pedocs
Open Access Erziehungswissenschaften

DIPF

Becker, Manuel

Der Energie-Feld-Ansatz. Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes für den Energieunterricht der Sekundarstufe II

Berlin : Logos Verlag Berlin 2026, 521 S. - (Studien zum Physik- und Chemielernen; 397) - (Dissertation, Universität Wien, 2023)

Quellenangabe/ Reference:
Becker, Manuel: Der Energie-Feld-Ansatz. Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes für den Energieunterricht der Sekundarstufe II. Berlin : Logos Verlag Berlin 2026, 521 S. - (Studien zum Physik- und Chemielernen; 397) - (Dissertation, Universität Wien, 2023) - URN: urn:nbn:de:0111-pedocs-363975 - DOI: 10.25656/01:36397; 10.30819/6079

https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0111-pedocs-363975
https://doi.org/10.25656/01:36397

in Kooperation mit / in cooperation with:

λογος
LOGOS VERLAG BERLIN
Verlag für wissenschaftliche Publikationen

https://www.logos-verlag.de

Nutzungsbedingungen

Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz: http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de - Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt unter folgenden Bedingungen vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen: Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen. Dieses Werk bzw. dieser Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden und es darf nicht bearbeitet, abgewandelt oder in anderer Weise verändert werden.
Mit der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Terms of use

This document is published under following Creative Commons-License: http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.en - You may copy, distribute and transmit, adapt or exhibit the work in the public as long as you attribute the work in the manner specified by the author or licensor. You are not allowed to make commercial use of the work or its contents. You are not allowed to alter, transform, or change this work in any other way.

By using this particular document, you accept the above-stated conditions of use.

Kontakt / Contact:

peDOCS
DIPF | Leibniz-Institut für Bildungsforschung und Bildungsinformation
Informationszentrum (IZ) Bildung
E-Mail: pedocs@dipf.de
Internet: www.pedocs.de

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

Studien zum Physik- und Chemielernen

M. Hopf und M. Ropohl [Hrsg.]

397

Manuel Becker

Der Energie-Feld-Ansatz

Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes für den Energieunterricht der Sekundarstufe II

λογος

Studien zum Physik- und Chemielernen

Herausgegeben von Martin Hopf und Mathias Ropohl

Diese Reihe im Logos Verlag Berlin lädt Forscherinnen und Forscher ein, ihre neuen wissenschaftlichen Studien zum Physik- und Chemielernen im Kontext einer Vielzahl von bereits erschienenen Arbeiten zu quantitativen und qualitativen empirischen Untersuchungen sowie evaluativ begleiteten Konzeptionsentwicklungen zu veröffentlichen. Die in den bisherigen Studien erfassten Themen und Inhalte spiegeln das breite Spektrum der Einflussfaktoren wider, die in den Lehr- und Lernprozessen in Schule und Hochschule wirksam sind.
Die Herausgeber hoffen, mit der Förderung von Publikationen, die sich mit dem Physik- und Chemielernen befassen, einen Beitrag zur weiteren Stabilisierung der physik- und chemiedidaktischen Forschung und zur Verbesserung eines an den Ergebnissen fachdidaktischer Forschung orientierten Unterrichts in den beiden Fächern zu leisten.

Martin Hopf und Mathias Ropohl

Studien zum Physik- und Chemielernen

Band 397

Manuel Becker

Der Energie-Feld-Ansatz

Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes für den Energieunterricht der Sekundarstufe II

Logos Verlag Berlin



Studien zum Physik- und Chemielernen
Martin Hopf und Mathias Ropohl [Hrsg.]

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.



Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons Lizenz CC BY-NC-ND (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
Die Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz gelten nur für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen (gekennzeichnet mit Quellenangabe) wie z. B. Schaubilder, Abbildungen, Fotos und Textauszüge erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.

Logos Verlag Berlin GmbH 2026

ISBN 978-3-8325-6079-9
ISSN 1614-8967
DOI 10.30819/6079

Logos Verlag Berlin GmbH
Georg-Knorr-Str. 4, Geb. 10
D-12681 Berlin

Tel.: +49 (0)30 / 42 85 10 90
Fax: +49 (0)30 / 42 85 10 92
https://www.logos-verlag.de

Der Energie-Feld-Ansatz:

Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes für den Energieunterricht der Sekundarstufe II

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

vorgelegt von
Manuel Becker

Wien, 2023

Als Dissertation angenommen von der Fakultät für Physik der Universität Wien.

1. Gutachter:	Prof. Dr. Lutz Kasper
2. Gutachter:	Prof. Dr. Burkhard Priemer
Vorsitzender:	Prof. Dr. Thomas Pichler
Betreuer:	Prof. Dr. Martin Hopf

Tag der Defensio: 04.09.2023

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

1.1 Einführung 1

1.2 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit 3

2 Theoretischer Rahmen **5**

2.1 Physikdidaktische Forschung 5

2.2 Didaktische Entwicklungsforschung 6

2.3 Lehr-Lern-Modelle und Konzeptwechsel 7

2.4 Modell der Didaktischen Rekonstruktion 11

3 Der traditionelle Energieunterricht und alternative Ansätze **15**

3.1 Der traditionelle Energieunterricht 16

3.2 Probleme des Energieunterrichts 20

3.3 Alternative Ansätze mit Feldern 28

3.4 Mathematische Formalismen im Physikunterricht 33

3.5 Resümee 38

4 Fachliche Klärung **39**

4.1 Fachlicher Hintergrund 40

4.2 Expert*innen-Interviews 49

4.3 Resümee 68

5 Methodische Gestaltung des EFA **71**

5.1 Ziele, Verortung, Forschungsfrage und Vorgehen 71

5.2 Vorüberlegungen und normative Festlegungen 78

5.3 Entwicklung des Unterrichtskonzeptes (Konzeption) 78

5.4 Evaluation des Konzeptes durch Akzeptanzbefragungen 80

5.5 Evaluation des Konzeptes im Klassensetting 91

5.6 Mathematisierung des EFA 96

6 Vorüberlegungen und Abgrenzung des Energie-Feld-Ansatzes 101
6.1 Grundgedanke des Energie-Feld-Ansatzes 101
6.2 Mehrwert des EFA als alternativer Ansatz 102
6.3 Normative Festlegungen und Begriffe 105
6.4 Designprinzipien des EFA 117
6.5 Abgrenzung des EFA zu anderen Ansätzen 118
6.6 Resümee 122

7 Erste Version des EFA: Konzeption 123
7.1 Entwicklung der Konzeptideen 123
7.2 Design des Interviewleitfadens 130

8 Erste Version: Auswertung der Interviews 141
8.1 Allgemeine Rahmenbedingungen und Stichprobe 142
8.2 Kodierung und Ersteindruck 142
8.3 Längsanalyse 144
8.4 Queranalyse 159
8.5 Diskussion und Resümee 168

9 Zweite Version: Konzeption 171
9.1 Weiterentwicklung der Konzeptideen 172
9.2 Weiterentwicklung des Interviewleitfadens 186

10 Zweite Version: Auswertung der Interviews 195
10.1 Allgemeine Rahmenbedingungen und Stichprobe 195
10.2 Kodierung und Ersteindruck 197
10.3 Längsanalyse 200
10.4 Queranalyse 222
10.5 Vergleich zur ersten Runde und Resümee 238

11 Dritte Version: Konzeption 241
11.1 Weiterentwicklung der Konzeptideen 241
11.2 Weiterentwicklung des Interviewleitfadens 248

12 Dritte Version: Auswertung der Interviews 251
12.1 Allgemeine Rahmenbedingungen und Stichprobe 251
12.2 Kodierung und Ersteindruck 253
12.3 Längsanalyse 256
12.4 Queranalyse 270
12.5 Vergleich zur zweiten Runde und Resümee 282

13 Erhebung im Klassensetting: Design **285**
13.1 Kommunikation mit den Lehrpersonen 286
13.2 Handreichung 289
13.3 Testinstrument 292

14 Erprobung im Klassensetting: Analyse **299**
14.1 Kommunikation mit den Lehrpersonen 300
14.2 Kodierung 304
14.3 Analyse Posttest 305
14.4 Einschätzung des Konzeptes 326
14.5 Diskussion und Resümee 328

15 Mathematisierung des EFA: Konzeption **331**
15.1 Ziel und Designprinzipien des EFA-M 332
15.2 Konzeptideen 334
15.3 Interviewleitfaden des EFA-M 340

16 Mathematisierung des EFA: Auswertung der Interviews **349**
16.1 Beschreibung der Stichprobe 350
16.2 Wiederholung der Konzeptideen des EFA 350
16.3 Konzeptidee zur Balkendarstellung 353
16.4 Konzeptidee zur Formelgestalt 354
16.5 Einschätzung der Schüler*innen 359
16.6 Diskussion und Resümee 361

17 Zusammenfassung und Ausblick **365**
17.1 Reflexion der Vorannahmen 366
17.2 Wichtige Erkenntnisse 368
17.3 Limitationen 374
17.4 Ausblick 376
17.5 Schluss 378

Literaturverzeichnis **381**

Abkürzungsverzeichnis **393**

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis **395**

Anhang **399**

Danksagung **521**

KAPITEL 1

Einleitung

1.1 Einführung

Energie ist ein fundamentales Konzept. Sie spielt nicht nur für die Wissenschaft eine bedeutende Rolle, sondern auch für unseren Alltag. Neben alltäglichen Anwendungen ist das Thema Energie auch im Zuge von Klimakrise, Ressourcenknappheit und der Frage nach ‚erneuerbarer Energie' relevant für die Gesellschaft. Als gleichzeitig zeitloses und zeitgemäßes Konzept ist ein fundiertes Grundverständnis ihrer Relevanz für unsere Lebenswelt ebenso erstrebenswert wie notwendig. Mit der Aufgabe von Schulen, Schüler*innen auf ihrem Weg zu mündigen und verantwortungsvoll handelnden Bürger*innen auszubilden, kommt der Energie ein hoher Bildungsanspruch zu. Dies spiegelt sich auch in den Lehrplänen der Sekundarstufe wider. Dort spielt die Energie eine jahrgangs- sowie fächer- und kontextübergreifende Rolle. Konkret ist das Betrachten von Energie bedeutend für die Beschreibung und Erklärung von Phänomenen. Mit dem grundlegenden Prinzip der Energieerhaltung steht der Physik ein mächtiges Werkzeug zur Verfügung, mit dem sich Prozesse analysieren lassen.

Dennoch gelingt es bisher nicht, Schüler*innen ein angemessenes und nachhaltiges Verständnis von Energie zu vermitteln. Zahlreiche Studien legen offen, dass das Konzept nicht besonders attraktiv ist und Schüler*innen Prozesse nur selten aus der Energieperspektive betrachten. Viele Lernende verfügen auch nach ihrem Schulabschluss noch über ein unzureichendes Energieverständnis. Trotz seiner Relevanz für Wissenschaft, Technik und Alltag erkennen Schüler*innen nur selten

den Mehrwert des Konzeptes (Nordine et al., 2019). Forscher*innen vermuten, dass dies nicht zuletzt auch an der Herangehensweise des traditionellen Energieunterrichts liegt. Typischerweise wird Energie in der Mechanik über Kräfte und das Konzept der Arbeit eingeführt und über diverse Energieformen zu den Prinzipien der Energieübertragung, -umwandlung und -erhaltung hingeführt. Aus fachlicher und didaktischer Sicht bringt die Einführung verschiedener Energieformen aber einige Probleme mit sich. Insbesondere Formen potenzieller Energie stehen unter Verdacht, eher einer Umbenennung eines eigentlich universellen Konzeptes zu dienen, als ein sinnstiftendes Verständnis zu fördern. Wie ein wirksames und umfassendes Unterrichtskonzept aussehen kann, ist noch nicht vollständig geklärt.

Um der Forderung nach einem sinnstiftenderen Energieunterricht zu begegnen, gibt es verschiedene Vorschläge und Ansätze, wie eine lernwirksame Alternative zum traditionellen Ansatz aussehen könnte. Das in dieser Arbeit beschriebene Dissertationsprojekt adressiert die Problematik, indem es existierende Vorschläge aufgreift und ein Unterrichtskonzept entwickelt und evaluiert, das Energie mit Feldern verknüpft. Dieser *Energie-Feld-Ansatz (EFA)* ist für die Sekundarstufe II konzipiert und wird mit Schüler*innen an österreichischen Gymnasien evaluiert. Im Kern führt der Ansatz die zahlreichen Energieformen des traditionellen Unterrichts auf Bewegungsenergie und Feldenergie zurück. Dabei werden Formen potenzieller Energie über Felder beschrieben. Das Prinzip der *Umwandlung* von Energie wird im EFA obsolet und der in der fachdidaktischen Literatur kritisierte Blackbox-Charakter der Energieformen wird inhaltlich angereichert. Prozesse können dann durch die zu Grunde liegende Wechselwirkung über die Veränderung von Bewegungen und Feldern beschrieben werden.

Zentral für den EFA ist die Einführung eines sogenannten *Gesamtfeldes*, welches die Wechselwirkung verschiedener Objekte abbildet und eine aktive Rolle in Prozessen der Energieübertragung übernimmt. Über Felder können Phänomene in beliebiger Größenordnung beschrieben werden. Von der Bewegung eines Satelliten oder Luftballons, über die Bindung von Atomen oder dem Zerfall von Kernen bis zur Annihilation und Entstehung von Elementarteilchen – der EFA beschreibt Phänomene der klassischen und modernen Physik durch ein konsistentes Unterrichtskonzept.

1.2 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit

Das Projekt reiht sich in das Paradigma der didaktischen Entwicklungsforschung (Design-based Research, DBR) ein. Gemäß dem Modell der didaktischen Rekonstruktion werden fachliche Klärung und Erkenntnisse zu Lernendenvorstellungen zum Thema miteinander in Beziehung gesetzt und die Inhalte didaktisch strukturiert. Das Ergebnis der didaktischen Rekonstruktion sind sogenannte Konzeptideen und passende Kontexte, die das Unterrichtskonzept bilden. Entsprechend dem Vorgehen von Design-based Research (DBR) wird der Entwurf des Unterrichtskonzeptes mittels Akzeptanzbefragungen formativ evaluiert und zyklisch weiterentwickelt. Die gewonnenen Erkenntnisse über Benefits und Schwierigkeiten aus insgesamt $N = 21$ Befragungen bestimmen dabei die Weiterentwicklung der Designs in insgesamt drei Entwicklungszyklen. Neben einem für die Praxis vielversprechenden Unterrichtskonzept entstehen lokale Lerntheorien zum Lernen mit dem EFA. Zusätzlich zur Evaluation in Akzeptanzbefragungen wird das Konzept in einem authentischen Klassensetting mit drei Lehrpersonen und insgesamt $N = 84$ Schüler*innen erprobt und evaluiert. So werden Einblicke in die Umsetzbarkeit des Konzeptes unter Realbedingungen erhalten.

Die Dissertation gliedert sich in die folgenden Abschnitte: Beginnend mit einer Darstellung des theoretischen Rahmens in Kapitel 2 werden grundlegende Lehr-Lern-Theorien aufgezeigt, die bei der Konzeption eine Rolle spielen. Außerdem wird auf das Paradigma der Designforschung und das Modell der didaktischen Rekonstruktion eingegangen. Anschließend folgt Kapitel 3 zur Darlegung der Merkmale und Probleme des traditionellen Energieunterrichts sowie der Darstellung alternativer Ansätze. Darauf baut die fachliche Klärung des Themas mit Kapitel 4 auf, begleitet von der Beschreibung einer Expert*innen-Befragung zum Ansatz. In Kapitel 5 wird das methodische Vorgehen der Arbeit erläutert, bevor dann in Kapitel 6 neben der Klärung zentraler Begriffe und normativen Festlegungen auch wesentliche Vorüberlegungen zu Grundgedanke und Mehrwert des EFA dargelegt werden. In diesem Rahmen werden auch die für die Konzeption essentiellen Designprinzipien definiert.

Die Kapitel 7 bis 12 beschreiben alternierend die Konzeption und Evaluation der drei Entwicklungszyklen durch Akzeptanzbefragungen. Dazu werden die Entscheidungen zum Design von Konzeptideen und Kontexten begründet und in der qualitativen Auswertung Benefits und Probleme herausgestellt und zu einem Überarbeitungsvorschlag für die jeweils nächste Konzeptversion hingeführt. Im Anschluss

berichten die Kapitel 13 und 14 zu Design und Erprobung sowie Evaluation des EFA im Klassensetting. Abschließend wird in den Kapiteln 15 und 16 eine Erweiterung des EFA um die mathematische Komponente der Formeln beschrieben. Auch hier werden Designentscheidungen und Erkenntnisse aus der qualitativen Evaluation berichtet. Die Arbeit schließt mit Kapitel 17, welches die wesentlichen Erkenntnisse zusammenfasst und diskutiert, offene Fragen formuliert und einen Ausblick für Ideen zu Folgestudien gibt.

KAPITEL 2

Theoretischer Rahmen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den theoretischen Grundlagen der Dissertation. Hier werden die zu Grunde liegenden theoretischen Modelle erläutert. Ausgangspunkt stellt eine Darstellung des physikdidaktischen Paradigmas der Designforschung dar. Daran schließt eine kurze Beschreibung typischer Lehr-Lern-Modelle zum Konzeptwechsel im Physikunterricht an, gefolgt von einer kurzen Beschreibung des Modells der Didaktischen Rekonstruktion.

2.1 Physikdidaktische Forschung

Um die Physikdidaktik als Wissenschaft zu verstehen, muss man ihren Forschungsgegenstand und ihre Methoden definieren (Hopf, 2009). Gegenstand ist das Lehren und Lernen von physikalischen Inhalten. Dieser Prozess wird erforscht, indem meist empirische Methoden der Sozialforschung entlehnt und angepasst werden (Hopf, 2009). Dabei wird sowohl auf qualitative als auch quantitative Methoden zurückgegriffen, je nachdem welchen Untersuchungsschwerpunkt eine Studie besitzt. Da die Didaktik nicht nur die Erforschung von Lehr- und Lernprozessen zum Ziel hat, sondern auch auf den Bedarf an empirisch fundierten Vorschlägen für Unterricht eingehen will, gliedern sich die Methoden in erforschende Methoden zum Erkenntnisgewinn und entwickelnde Methoden mit einem Ertrag zum praktischen Nutzen. Wenn man die Zielsetzung von Wissenschaft durch die zwei Parameter „Nutzen“ und „Erkenntnis“ beschreibt, lassen sich verschiedene wissenschaftliche Disziplin bzw. Forschungsinteressen nach Stokes (1997) in ein soge-

nanntes *Quadrantenmodell* einteilen.[1] Bestimmte Bereiche der Bildungsforschung können dann in den „Pasteur-Quadranten“ (Interesse an Nutzen und Erkenntnis) eingeordnet und als „nutzenorientierte Grundlagenforschung“ bezeichnet werden (Fischer et al., 2005).
Um nicht nur theoretische Erkenntnisse über das Lehren- und Lernen zu gewinnen, sondern auch nützliche Produkte wie beispielsweise lernwirksame Unterrichtskonzeptionen zum Ergebnis zu haben, wird die Physikdidaktik auch auf Grundlage von Postulaten von Comenius (1657) als „nutzenorientierte Grundlagenforschung“ beschrieben (Hopf, 2009). So können die wissenschaftlichen Erkenntnisse genutzt werden, um aktiv den Unterricht zu verbessern, z. B. durch die Bereitstellung von Unterrichtskonzeptionen und -modellen, Schulbüchern, Materialien und Ratgebern (Krüger et al., 2014).

2.2 Didaktische Entwicklungsforschung

Fachdidaktische Entwicklungsforschung (auch „Designforschung“)[2] verfolgt das Ziel, entsprechend der obigen Ausführungen neben dem Gewinn von Erkenntnissen über Lehr-Lernprozesse auch für den Unterricht nützliche Konzeptionen hervorzubringen. Sie grenzt sich also von der reinen Erkenntnis gewinnenden Grundlagenforschung ab. Hier wird gezielt auf Laborstudien mit kontrollierten Variablen verzichtet, um Unterrichtskonzepte bewusst unter realen Bedingungen zu untersuchen (Krüger et al., 2014). Dabei steht der Praxisbezug und die Nutzenorientierung im Vordergrund. Konzepte werden folglich an der Erfahrung gemessen und mit diesen über geeignete Evaluationsmaßnahmen weiterentwickelt, auch unter Einbezug der Lehrpersonen (Krüger et al., 2014). Als an der Theorie orientierter Entwicklungsprozess liefert die Designforschung Lösungen für konkrete unterrichtliche Probleme aus der Praxis (Design-Based Research Collective, 2003; Hopf und Wiesner, 2008). Zentral für die Designforschung ist die Entwicklung und Weiterentwicklung der Konzeptionen (Designs) in einem Zyklus aus Design, Umsetzung, Analyse und Weiterentwicklung (Re-Design) (Design-Based Research Collective, 2003; Haagen-Schützenhöfer und Hopf, 2020). Damit werden die folgenden Anforderungen adressiert (aus Collins et al., 2004):

[1] Die Quadranten gliedern sich dabei in die folgenden vier: 1. keine Erkenntnis und keinen Nutzen (nicht durch sinnvolle Forschung vertreten), 2. hoher Nutzen und geringes Erkenntnisinteresse (repräsentiert durch Thomas Edison), 3. hoher Erkenntnisgewinn ohne spezielles Interesse am Nutzen (repräsentiert durch Nils Bohr) und 4. Fokus auf gleichzeitigem Nutzen und Erkenntnis (repräsentiert durch Louis Pasteur); siehe Fischer et al. (2005).

[2] Auch als „Design-based Research“ (DBR; Design-Based Research Collective, 2003) oder „Design Science“ (Fischer et al., 2005) bezeichnet.

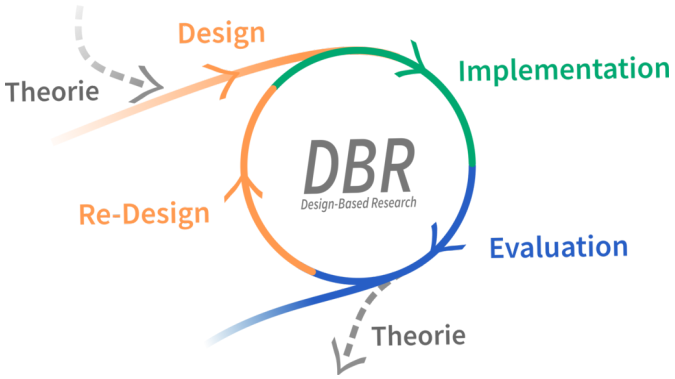


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Prozesses von Design-based Research (Designforschung, DBR). Auf Basis theoretischer Erkenntnisse wird ein Konzept entwickelt (Design), im Unterricht erprobt bzw. umgesetzt (Implementation) und mit geeigneten Methoden evaluiert. Dabei werden Erkenntnisse über Schwierigkeiten und Benefits des Konzeptes gewonnen (Theorieelemente), welche dann in einer Weiterentwicklung (Re-Design) zur Verbesserung des Konzeptes beitragen. Dieses kann dann erneut evaluiert werden. Bild: „Vorgehensweise bei Design-Based Research“ von Sarah Zloklikovits, lizenziert unter CC BY 4.0

- Beantwortung theoretischer Fragen zur Natur des Lernens im Kontext
- Erschaffung von Ansätzen zur Untersuchung des Lernens im Realfall anstelle von Laborsettings
- Exploration von Lernen als ein breites Spektrum von Faktoren
- Ableitung von Erkenntnissen aus formativen Evaluationen

Das Ergebnis von Designforschung sind also sowohl Theorien über das Lehren und Lernen zu einem bestimmten Sachverhalt als auch ein Produkt, das in einem authentischen Unterrichtssetting funktioniert. „DBR geht [also] über das designen [sic] und testen [sic] von bestimmten Interventionen hinaus.“ (Design-Based Research Collective, 2003). Abbildung 2.1 veranschaulicht den beschriebenen Prozess der Designforschung schematisch.

2.3 Lehr-Lern-Modelle und Konzeptwechsel

Moderne physikdidaktische Forschung basiert auf kognitivistischen Lerntheorien. Dabei stehen die Lernenden im Fokus und Lernen kann als Konzeptwechsel verstanden werden (Bünder et al., 1999). Dabei liegt die Konzentration auf Theorien und Ansätzen, wie das Lehren und Lernen so gestaltet werden kann, dass sich Erkenntnisse durch geeigneten Unterricht in eine bestimmte Richtung verändern (Riemeier, 2007). Der Unterricht bedient sich dabei Methoden zum Aufbauen und Verändern vorunterrichtlicher Vorstellungen durch geeignete Lehr-Lern-Settings (Plotz, 2017). Um einen Konzeptwechsel zu erreichen (insbesondere

bei existierenden aus fachlicher Sicht oder für das Lernen ungünstigen Vorstellungen), müssen Erklärungsangebote mit sinnstiftenden Kontexten geschaffen werden (Bransford et al., 2000); insbesondere auch, um Begriffe und ihre Bedeutung zu erlernen (Rückl, 1991). So muss vorunterrichtlichen Vorstellungen von Lernenden durch das Angebot geeigneter Konzepte angemessen begegnet werden.

Lernendenvorstellungen

In dieser Arbeit wird der Begriff „Lernendenvorstellung“ verwendet. In der Literatur werden (Fach-)Begriffe zu vorhandenen kognitiven Ideen, Konstrukten und Vorstellungen von Schüler*innen unterschiedlich gefasst. So ist beispielsweise der Begriff „misconception“ (Driver und Easley, 1978) im englischen Sprachraum verbreitet und wird im Deutschen z. B. mit „Fehlvorstellung“ übersetzt. Inhaltlich können sich die Bedeutungen allerdings je nach Verwendung unterscheiden. Egal, ob von Fehlvorstellungen (die per Definition unangemessene Ideen und Vorstellungen bezeichnen), Schülervorstellungen, naiven Vorstellungen, misconceptions oder Lernendenvorstellungen gesprochen wird, wird sich allgemein auf von Schüler*innen mitgebrachte Vorstellungen zu bestimmten Inhalten bezogen (Plotz, 2017). Um sowohl lernförderliche als auch hinderliche sowie angemessene und unangemessene Vorstellungen von Lernenden jeder Altersstufe (auch außerhalb des schulischen Kontexts) mit einem Begriff abzudecken, wird im Folgenden der Terminus „Lernendenvorstellungen“ verwendet.

Konzeptwechsel

Didaktische Lehr-Lern-Theorien versuchen, die Entstehung und Manifestation sowie die Beeinflussung von Vorstellungen zu beschreiben. Dabei spielt insbesondere auch der Konzeptwechsel (*Conceptual Change*) als Hinwendung von Alltagsvorstellungen zu fachlich angemessenen Konzepten eine zentrale Rolle. Eine erste Theorie zum *Conceptual Change* stammt von Posner et al. (1982), in der Voraussetzungen und Merkmale für einen erfolgreichen Konzeptwechsel gerahmt werden. Dabei wird die Veränderung von Vorstellungen durch Akkommodation beschrieben, d. h. das Ersetzen von alten durch neue fachlich begründete Vorstellungen (s. auch Krüger, 2007). Dies ist in der Regel kein spontaner, sondern ein allmählicher kognitiver Anpassungsprozess (Vosniadou und Brewer, 1992), der z. B. durch die Erzeugung eines kognitiven Konfliktes (Dissonanz von existierenden und fachlich angemessenen Vorstellungen) eingeleitet werden kann.
Um den Konzeptwechsel selbst auch im Rahmen des Kognitivismus zu beschreiben, existieren verschiedene Theorien, die sich in ihren Schwerpunkten unterschei-

den. Ihnen ist gemein, dass sie Lernendenvorstellungen in kognitive Sinneinheiten unterteilen und versuchen, so die kognitiven Prozesse der Schüler*innen zu beschreiben. Im Folgenden werden drei prominente theoretische Auffassungen der Didaktik zu diesem Thema kurz skizziert: das Modell von *Knowledge-in-Pieces* (dt. Wissen in Teilen oder Wissensbausteine), der Gebrauch von *P-Prims* und die Rahmung mit *Cognitive Resources* (dt. kognitive Ressourcen) sowie die „Synthetic Models“ (dt. synthetische Modell).

2.3.1 Knowledge-in-Pieces und P-Prims

In Kaiser et al. (2018) beschreibt DiSessa die Auffassung und Rahmung des *Conceptual Change* und definiert dabei den Begriff *Knowledge-in-Pieces* wie folgt:

> „Knowledge in Pieces (KiP) names a broad theoretical and empirical framework aimed at understanding knowledge and learning. It sits within the field of *conceptual change*, which studies learning that is especially difficult.“ (DiSessa, 2018, S. 65)

Es handelt sich also um einen Theorierahmen, der den Konzeptwechsel bei Schüler*innen beschreibt. Im Rahmen dieser Wissensbausteine definiert DiSessa auch die sogenannten *P-Prims* (‚phenomenological primitives‘; DiSessa, 1993), welche Elemente intuitiver Kognition darstellen. Diese werden von Schüler*innen genutzt, um zu entscheiden, welche Prozesse plausibel oder unwahrscheinlich sind und wie man diese erklären kann (DiSessa, 2018). So hilft beispielsweise die phänomenologisch nützliche Relation des Ohm’schen P-Prims beim Argumentieren von kausalen Zusammenhängen: ‚Mehr Aufwand erzeugt/führt zu mehr Ergebnis‘ (DiSessa, 2017). Diese und ähnliche basale Regeln stellen P-Prims dar und werden nach DiSessa herangezogen, um Sachverhalte zu erklären. Eine von einem Schüler formulierte logische Kette zum thermischen Gleichgewicht sieht dann beispielsweise wie folgt aus:

> „Difference in temperature causes ‘freaking out‘, ‘freaking out‘ causes ‘working harder‘, ‘working harder‘ characterizes the first slot in Ohm’s p-prim, which is linked causally to a greater result, a greater speed toward equilibrium.“ (DiSessa, 2017, S. 17)

2.3.2 *Cognitive Resources*

Eine weitere Rahmung des *Conceptual Change* geht auf David Hammer zurück, der die Zusammensetzung von Lernendenvorstellungen über *Cognitive Resources* beschreibt. Die Theorie kann als Weiterentwicklung des KiP-Modells gesehen werden. Der Begriff ‚resource' lehnt sich dabei an den Begriff Ressourcen der Informatik an, wo er sie mit einem Stück Programm-Code vergleicht, das in verschiedenen Programmen eingeflochten werden kann, um eine bestimmte Funktion auszuführen (aus dem Englischen; Hammer, 2000, S. 53). Eine *Cognitive Resource* stellt also ein kognitives Wissenselement dar, das in verschiedenen Kontexten auf unterschiedliche Weise für Argumentationen genutzt werden kann. Als Vorteil des Ressourcen-Systems gegenüber dem KiP-Rahmen mit P-Prims als Theorie der Lernendenvorstellungen führt er an, dass sich *Cognitive Resources* zu größeren Einheiten zusammensetzen können, P-Prims hingegen nicht, da diese dann zwar ein größeres Element bilden würden, aber kein P-Prim mehr seien (per Definition kleinste logische Einheit; Hammer, 2000). Eine Ressource kann zwar ein P-Prim sein, allerdings auch eine größere Einheit bilden. Hammer grenzt sein Ressourcen-System allerdings vom Rahmen der *misconceptions* ab, da dieses System nicht erkläre, wieso die Erklärungen von Schüler*innen in verschiedenen Kontexten variieren (Hammer, 1996; Smith III et al., 1994). Zudem lasse die ausschließliche Beschreibung von *misconceptions* keine produktiven Ressourcen oder Anwendungen zu und gebe keine Auskunft über die zu Grunde liegenden kognitiven Mechanismen.Bei den Ressourcen unterscheidet er produktive und unproduktive Ressourcen, je nachdem, ob sie für eine Erklärung zielführend sind oder nicht. Außerdem unterteilt er sein System in *Conceptual Resources* (für das Verständnis spezieller physikalischer Phänomene und Konzepte) sowie *Epistemological Resources* (für das allgemeine Verständnis von Wissen und Lernen). Er plädiert dafür, dass Schüler*innen freier mit ihren kognitiven Ressourcen umgehen und diese in Kontexten erproben („messing about"). Damit kritisiert er das für den typischen Unterricht häufige Einprägen von „magic words" anstelle des Aufbaus eines Verständnisses für grundlegende Mechanismen (Hammer, 2000).

2.3.3 *Synthetische Modelle*

Nach Vosniadou und Brewer (1992) wird ein nachhaltiger Konzeptwechsel nur dann erzielt, wenn Schüler*innen ihre problematischen Vorannahmen in Richtung fachlich angemessener Sichtweisen uminterpretieren. Dies geschieht aber nicht immer bzw. vollständig. Sie beschreiben, wie Schüler*innen der Grundschule beispielsweise sogenannte *Synthetic Models* (Synthetische Modelle) bilden. Diese ent-

stehen als Lösung, wenn es zu einem kognitiven Konflikt zwischen Vorannahme und ‚kulturell erwarteter' bzw. wissenschaftlich angemessener Sichtweise kommt. Als Beispiel wird die Theorie der flachen Erde angeführt. Schüler*innen, die beispielsweise zuerst ein Konzept einer flachen Erde haben, können leicht ein Synthetisches Modell bilden (z. B. eine Hohlkugel oder abgeflachte Kugel) anstelle der eigentlichen Kugel-Vorstellung der Erde, wenn sie mit der von der Gesellschaft und Wissenschaft akzeptierten Kugelvorstellung konfrontiert werden (vgl. Vosniadou und Brewer, 1992). Synthetische Modelle dienen also der Angleichung von problematischen Vorstellungen und akzeptierten bzw. angemessenen Vorstellungen, ohne aber die Vorannahme grundlegend zu verwerfen oder umzuinterpretieren. Diese Modelle können einen gewissen Wert für Erklärungen haben, auch wenn sie wissenschaftlich nicht vollständig korrekt sind (Vosniadou, 2018). Um bei einem Synthetischen Modell einen Konzeptwechsel zu erzielen, muss die problematische (und ggf. durch das Synthetische Modell ‚geschützte') Vorannahme adressiert werden. Dieser Prozess benötigt Zeit, da die sich ergebenden Synthetischen Modell sorgfältig über den Abgleich mit wissenschaftlich angemessenen Modellen verändert werden müssen (Vosniadou, 2018).

2.4 Modell der Didaktischen Rekonstruktion

Für die Aufbereitung fachwissenschaftlicher Inhalte für den Physikunterricht genügt es nicht, die Inhalte lediglich zu reduzieren und eine Teilmenge rezipierend vorzustellen. Vielmehr ist es notwendig, Lernendenvorstellungen sowie Erkenntnisse über das Lernen zu einem bestimmten Thema mit einzubeziehen (Duit, 2010). Die Sachstruktur der Physik und die Sachstruktur für den Unterricht sind also fundamental zu unterschieden (Duit, 2010). Aus diesem Grund bietet das Modell der didaktischen Rekonstruktion (MDR) nach Kattmann et al. (1997) eine Möglichkeit, die fachlichen Hintergründe und Lernendenperspektive aufeinander zu beziehen und die Sachstruktur so zu rekonstruieren, dass sie für den Schulunterricht geeignet ist, d. h. in ihrer Implementation über eine angemessene Lernwirksamkeit verfügt. Ziel ist es also, eine Lernumgebung zu entwickeln, die den Konzeptwechsel unterstützt (Plotz, 2017). Das MDR stellt ein „bereits erprobtes neues Paradigma für didaktische Forschung und Unterrichtsentwicklung" dar (Reinfried et al., 2009, S. 405). Abbildung 2.2 veranschaulicht das Modell. Fundamental dabei ist der ständige Rückbezug von fachlicher Klärung, Lernendenvorstellungen und didaktischer Strukturierung.
Nach Reinfried et al. (2009) soll die fachliche Klärung die implizit vorausgesetzten fachlichen Annahmen explizit machen und „in Vermittlungsabsicht klären" (S. 409).

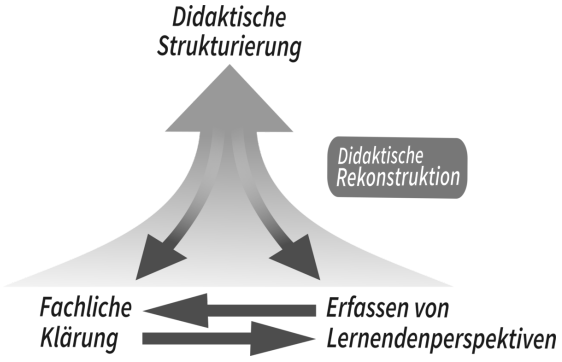


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des Modells der didaktischen Rekonstruktion (MDR). Fachliche Klärung, Lernendenperspektiven und didaktische Strukturierung stehen im ständigen Wechselspiel miteinander (nach Kattmann et al., 1997; Bild: „Das Modell der didaktischen Rekonstruktion“ von Sarah Zloklikovits, lizenziert unter CC BY 4.0).

Dabei erhält der rekonstruierte fachliche Inhalt eine Relevanz für die Vermittlung im Unterricht und kann in diesem kritisch analysiert werden. Duit (2010) beschreibt didaktische Rekonstruktion als Zusammenschluss von didaktischer Analyse nach Klafki (1969) und Strukturmomentmodell nach Heimann et al. (1969). Die vier zentralen Variablen „Ziele, Inhalt, Methoden und Medien“ werden aufeinander abgestimmt, um den Unterricht zu gestalten, wobei kognitive und affektive sowie sozio-kulturelle Voraussetzungen berücksichtigt werden; „die Ziele bilden [dabei] den Ausgangs- und Orientierungspunkt der Unterrichtsplanung, nicht aber der fachliche Inhalt.“ (Duit et al., 2012). Für die Elementarisierung des fachlichen Inhaltes wird die didaktische Analyse nach Klafki einbezogen. Mit Hilfe der beiden Modelle lassen sich dann fachliche Inhalte aus didaktischer Perspektive analysieren und reflektieren und so der Inhalt möglichst angemessen für den Unterricht aufbereiten (Duit et al., 2012). Reinfried et al. (2009) fügt hinzu, dass das MDR dazu beitrage, Lernendenvorstellungen aufzugreifen und dabei zu helfen, diese in Richtung von fachlich angemessenen Vorstellungen weiterzuentwickeln. Dabei wird der Begriff des *Conceptual Change* ersetzt durch den Begriff der *Conceptual Reconstruction* (Posner und Strike, 1992; Posner et al., 1982).
Die didaktische Rekonstruktion lässt sich also in die drei folgenden Teile gliedern, die im ständigen Rückbezug zueinander stehen (nach Kattmann, 2007; Kattmann et al., 1997; vgl. auch Abb. 2.2).

Didaktische Rekonstruktion

1. Fachliche Klärung:
    - Analyse des Themas aus fachwissenschaftlicher Perspektive, Einordnung der Inhalte und Brücke zum Schulunterricht
    - Herausstellen zentraler Ideen (Konzeptideen bei Konzeption)
    - Behandlung wissenschaftlicher Aussagen und Positionen der wissenschaftlichen Gemeinschaft
2. Erfassung/Berücksichtigung von Lernendenvorstellungen:
    - Erkenntnisse zu Vorstellungen zum Thema sammeln und strukturieren (Ergebnisse empirischer fachdidaktischer oder bildungs- bzw. erziehungswissenschaftlicher Forschung)
    - Voraussetzung für wirksame Anknüpfung an Vorwissen bzw. Vorerfahrungen und Perspektiven der Schüler*innen
    - Kenntnis darüber, was man verwenden kann und worauf man verzichten sollte (Schwierigkeiten/Hindernisse und Benefits beim Lernen zu einem bestimmten Thema)
3. Didaktische Strukturierung:
    - Prozess der Gestaltung von Lernangeboten (Erklärungen, Kontexte, Beispiele, Experimente, Aufgaben, etc.)
    - Einbezug von Fachinhalten und Lernendenvorstellungen

Auch wenn sowohl DBR als auch das Modell der Didaktischen Rekonstruktion (MDR) den zyklischen Rückbezug von Erkenntnissen und didaktischen Entscheidungen umfassen, unterscheiden sie sich grundlegend. Während DBR ein Paradigma der didaktischen Forschung beschreibt, stellt das MDR ein theoretisches Modell für die Strukturierung von Inhalten aus der fachdidaktischen Perspektive dar. Die Didaktische Rekonstruktion bietet einen Rahmen für die methodische Gestaltung von Projekten. Diese können, müssen aber keine Design-Projekte sein. Der Design- und Re-Design-Prozess der Entwicklungsforschung wiederum muss sich theoretisch nicht nach dem MDR richten. Beide sind also, auch wenn auf Anhieb anders vermutet werden könnte, als getrennte und voneinander unabhängige Rahmen zu betrachten.

KAPITEL 3

Der traditionelle Energieunterricht und alternative Ansätze

Das Konzept der Energie spielt aufgrund seiner Relevanz für die Beschreibung und Erklärung verschiedenster Prozesse und Phänomene eine bedeutende Rolle für die Physik und die Naturwissenschaften. Diese Bedeutung spiegelt sich auch im Schulunterricht und den entsprechenden Lehrplänen wider. Das Thema Energie stellt in Deutschland und Österreich sowohl in der Sekundarstufe I als auch in der Sekundarstufe II ein zentrales Konzept dar (vgl. BMBWF/10008568, 2019; und z. B. Lehrplan Berlin, 2021). In den letzten Jahren und Jahrzehnten gewann die Untersuchung der Lernwirksamkeit und Effektivität des Energieunterrichts zunehmend an Aufmerksamkeit, nicht zuletzt aufgrund des wenig zufriedenstellenden Lernerfolges der Schüler*innen (Nordine et al., 2019). Aus diesem Grund gibt es neben der sogenannten traditionellen (historisch gewachsenen) inhaltlichen Herangehensweise an das Unterrichten zum Thema Energie verschiedene Verbesserungsansätze und alternative Konzepte. Dieses Kapitel stellt die Merkmale und Probleme des traditionellen Unterrichts überblickend dar und geht auf bereits existierende Lösungsvorschläge und -ansätze ein. Neben der Darlegung relevanter Lernendenvorstellungen zum Thema Energie und Felder wird abschließend die Notwendigkeit eines alternativen Ansatzes motiviert und davon ausgehend das beschriebene Dissertationsprojekt mit dem Energie-Feld-Ansatz begründet.

3.1 Der traditionelle Energieunterricht

3.1.1 Merkmale

Der traditionelle Ansatz des Energieunterrichts folgt dem sogenannten „Dreischritt“ (Wilhelm et al., 2021b). Dabei wird zunächst über den Kraftbegriff die Arbeit eingeführt und darüber die Energie erarbeitet. Dies geschieht in der Regel im Kontext Mechanik am Beispiel der potenziellen Energie des Gravitationsfeldes. Ein österreichisches Schulbuch-Standardwerk („Basiswissen Physik-compact“; Mathelitsch et al., 2004) führt die Arbeit als „mechanische Form der Energieübertragung“ über die Formulierung „Arbeit ist gleich Kraft mal Weg“ ein. Darüber wird dann die Hubarbeit ($W = m \cdot g \cdot h$) eingeführt und als potenzielle Energie (bzw. Energie der Lage) bezeichnet. Die kinetische Energie wird dann in einem weiteren Schritt über die Beschleunigungsarbeit mit $E_k = \frac{m \cdot v^2}{2}$ motiviert. Anschließend wird dann der Energieerhaltungssatz formuliert: „In abgeschlossenen Systemen bleibt der Betrag der Gesamtenergie konstant: $E = const.$ bzw. $\Delta E = 0$.“
Andere Schulbücher folgen dieser Struktur bis auf leichte Abweichungen. In „Big Bang“ (Apolin, 2017) und in „Physik“ (Sexl, 2017) wird beispielsweise spezifiziert, dass bei der Arbeit nur die Komponente der Kraft entlang des Weges relevant ist. Apolin (2017) formuliert die Energieerhaltung implizit als „Energiegleichsetzung“ bei verlustfreier Umwandlung von potenzieller und kinetischer Energie. In Sexl (2017) wird die Energieerhaltung vorerst rein mechanistisch über die Erhaltung der Summe von kinetischer und potenzieller Energie definiert. Das deutsche Buch Hoche et al. (2020) verknüpft Arbeit, Wärme und Strahlung und definiert Energie als„die Fähigkeit eines Systems, mechanische Arbeit zu verrichten, Wärme abzugeben oder Strahlung auszusenden“ (S. 87).

Allgemein wird im traditionellen Unterricht, dessen Struktur Hand in Hand mit der Struktur der klassischen Schulbücher geht, mit dem Dreischritt die Energie als Fähigkeit eingeführt, Arbeit zu verrichten; diese Formulierung wird auch „goldene Regel“ genannt (Wilhelm et al., 2021b). Energieerhaltung steht dann (meist unter Vernachlässigung der Reibung) am Ende. Sukzessive werden verschiedene Energieformen eingeführt, beginnend mit der potenziellen Energie (Gravitation), der kinetischen Energie (zusammen dann die mechanistische Energieerhaltung), ggf. die „potenzielle Energie der Form (Spannungsarbeit)“ (Mathelitsch et al., 2004) und die Leistung als Quotient von Arbeit und Zeit. Der Zusammenhang verschiedener Energieformen wird dann üblicherweise über die Energieumwandlung bzw. -übertragung gebildet. Die Gesamtheit von Energie-Umwandlung, - Erhal-

tung, - Transport und - Entwertung wird nach Duit (Duit, 1991, 2007) auch als „Energiequadriga“ bezeichnet und stellt in vielen Lehrgängen die prinzipielle Sachstruktur dar. Dabei folgt auf die Einführung der Formen die Umwandlung bzw. Übertragung von Energie, wonach dann die Entwertung anschließt und auf die Energieerhaltung hin gearbeitet wird. Als Energieentwertung wird dabei der Grad der Reversibilität von Energieumwandlungsprozessen bezeichnet, also der Wert der Energie, gemessen an der Nutzbarkeit für (mechanische) Arbeit (Wilhelm et al., 2021b). Ein Beispiel ist die Abgabe von Energie eines sich bewegenden Systems aufgrund von Reibung (Umwandlung zu thermischer Energie). In anderen Kontexten wird auch über die Dissipation von Energie gesprochen (Abgabe an die Umgebung). Bei beiden Begriffen geht es darum, dass ein Teil der Gesamtenergie eines Systems das funktionierende System verlässt und nicht mehr nutzbar ist. Es gibt eine gewisse Irreversibilität (Wilhelm et al., 2021b).[1]
Im Kern des traditionellen Unterrichts zur Energie steht also die Einführung von Energieformen. Fasst man diese übergreifend zusammen, kommt man auf eine Liste an Formen, die sich für Schüler*innen (je nach Unterrichtskonzeption) sukzessive ergibt[2]:

Energieformen des traditionellen Energieunterrichts
(beliebige Reihenfolge)

- thermische Energie
- Reibungsenergie
- innere Energie
- Rotationsenergie
- Schallenergie*
- geothermische Energie*
- Gezeitenenergie* (Rotationsenergie der Erde)
- mechanische/gravitative potenzielle Energie (auch Lageenergie)
- elastische Energie bzw. Spannenergie
- magnetische Energie
- elektrische Energie
- chemische Energie
- Bindungsenergie (atomar und nuklear, nicht subnuklear)
- innere (nicht disjunkt von Bewegungsenergie bzw. chemischer Energie)

[1] Diesbezüglich wird dann auch meist der Wirkungsgrad eines Systems oder einer Maschine eingeführt, um Schüler*innen zu verdeutlichen, dass es kein perpetuum mobile gibt.

[2] Mit * markierte Formen der Energie sind speziell von Schlichting und Backhaus (1984) übernommen.

- Strahlungsenergie bzw. Lichtenergie* oder Solar-/Sonnenenergie
- Kernenergie
- Ruheenergie/Masse

Der Energieunterricht im Allgemeinen lässt sich auch nach Wilhelm et al. wie folgt treffend zusammenfassen:

> Den Begriff der Energie hat die (klassische) Physik erst spät entwickelt. Dies bildete sich auch im schulischen Physikunterricht ab: Die Energie wurde und wird als abgeleitete Größe eingeführt. Neuere physikdidaktische Ansätze gehen hingegen von der Energie als grundlegender physikalischer Größe aus und stellen sie von Beginn an ins Zentrum. (Wilhelm et al., 2021b, S. 157)

3.1.2 Variationen

Hier sei noch kurz erläutert, wie andere Ansätze (auch eher mit Ausrichtung an den Energieformen) das Thema auffassen: Alternativ zur klassischen Hinführung zur Energieerhaltung, bei der typischerweise die Dissipation von Energie weniger Beachtung findet, rücken Backhaus (1982) sowie Schlichting und Backhaus (1984) die Energieentwertung (über die Entropie) in den Vordergrund. Im Allgemeinen bezieht sich dieser Ansatz aber auch auf die traditionellen Energieformen wie beispielsweise die mechanische, elektrische, chemische und thermische Energie und deren Wertigkeit (Wilhelm et al., 2021b).

Der Karlsruher Physikkurs (KPK; Herrmann et al., 2014; Herrmann-Abell und DeBoer, 2017) gestaltet den Energieunterricht ausgehend von Energiequellen und -empfängern sowie dem Energiestrom zwischen diesen. Energie wird dabei als eine Art universeller Treibstoff verstanden. Hier bilden die Energieträger die Substitution der Energieformen; Energieumlader wechseln zwischen den Energieträgern. Die Ausführungen sind im sogenannten Energiebuch zu finden. Studien zeigen, dass Schüler*innen die Ideen zwar umsetzen können, suggerieren aber auch, dass sie nicht immer Energie und Entropie effektiv voneinander trennen können. Auch wenn sich der KPK empirisch für den Unterricht zur Wärmelehre als geeignet herausstellt (s. Starauschek, 2002), gibt es bisher keine umfassende systematische Untersuchung zur Lernwirksamkeit der Energielehre des KPK (Wilhelm et al., 2021b, S. 175).

Aufbauend auf der Grundidee von Jung et al. (1977) baut Bader (2001) in seinem Konzept die Reihenfolge des traditionellen Dreischritts um und führt Energie als eine zentrale physikalische Größe vor der Arbeit ein.

Muckenfuß (1995) geht an den Energieunterricht heran, indem er für die Veranschaulichung der Energie in sinnstiftenden Kontexten plädiert. In seinem Konzept werden die erworbenen physikalischen Kenntnisse in die Lebenswelt der Schüler*innen eingeordnet, sodass diese das Energiekonzept als sinnstiftend erfahren. Dabei wird Energie auch als universeller Treibstoff aufgefasst, der in verschiedenen Systemen erhalten ist und unterschiedlich verwendet werden kann. Energie kann also gespeichert (in Nahrung, Benzin, Akku, etc.), transportiert (z. B. elektrische Energie) bzw. auf ein anderes System übertragen werden (Wilhelm et al., 2021b). Allgemein wird dabei auch zwischen elektrischer, mechanischer, thermischer und chemischer Energie sowie Strahlungsenergie unterschieden. Energieentwertung wird allerdings nebensächlich thematisiert.

Auch Neumann et al. (2013) schlagen ähnlich zu Duit (1987) einen Verlauf vor, der mit Energiequellen und -formen beginnt und über die Energieentwertung auf die Energieerhaltung schließt (nach Wilhelm et al., 2021b).

John Jewett beschreibt in seiner fünfteiligen Reihe ‚Energy and the Confused Student' Probleme des Arbeits- und Energiebegriffs und gibt Ideen, wie man diese adaptieren kann. Die Teile vier und fünf (Jewett Jr., 2008c, 2008d) seiner Ausführungen stellen eine Lösungsidee vor, in der er von einer einzigen Energieformel ausgeht und über den ‚energy/momentum approach' versucht, das Verstehen von Energie zu erleichtern. Die Energieformel nennt er die ‚Gleichung der Energieerhaltung' oder ‚Kontinuitätsgleichung für Energie' (CEE)[3]. Sie bezeichnet dabei die Energieänderung ΔE_{System} eines zu betrachtenden Systems als Summe der über die Grenzen des Systems übertragenen Anteile der Energie (Jewett Jr., 2008c). Jewett fasst also die Übertragung oder Umwandlung von Energieformen nach traditionellem Ansatz in einer Formel zusammen. Die Energieerhaltung ergibt sich dann für ein abgeschlossenes System über $\Delta E_{\text{System}} = 0$. Auch wenn hier durch die Beschränkung auf eine Energieformel auf eine explizite „Kollektion" von Energieformen verzichtet wird, so repräsentieren die einzelnen Terme dieser Formel dennoch Formen von Energie, die dann in der Summe erhalten sind.

[3]Im Original: ‚conservation of energy equation' oder ‚continuity equation for energy'

All diesen Konzeptionen ist gemein, dass sie (auch wenn sich die Reihenfolgen bzw. Schwerpunkte der Unterrichtskonzeptionen unterschieden) alle auf dem traditionellen Formen-Ansatz basieren. Teilweise wird Energie als universeller Treibstoff (quasi-stofflich) verstanden, in anderen eher als mengenartige Größe, Bilanzierungsgröße oder als abstraktes Konzept. Die Verknüpfung mit Systemen erfolgt gelegentlich explizit (z. B. Sexl, 2017), in der Regel aber implizit. Eine zusammenfassende Beschreibung der hier angerissenen Konzeptionen findet sich in Wilhelm et al. (2021b). Auch wenn sich diese Konzeptionen in einzelnen Punkten unterscheiden, verfolgen sie dennoch einen gemeinsamen roten Faden, nämlich, dass sie sich zumindest teilweise auf die Energiequadriga beziehen und auf der Einführung und Verwendung von Energieformen basieren. Aus diesem Grund werden diese Ansätze im Folgenden zusammenfassend als traditioneller Ansatz bzw. Unterricht bezeichnet. Da diese Herangehensweise allerdings verschiedene Probleme mit sich bringt, wird im nächsten Abschnitt auf die Schwierigkeiten eingegangen.

3.2 Probleme des Energieunterrichts

Der Duden gibt unter anderem folgende Definition für den Begriff „Energie“:

> „**Energie**: (Physik) Fähigkeit eines Stoffes, Körpers od. Systems, Arbeit zu verrichten: elektrische E.; bei diesem Vorging wird E. frei, geht E. verloren; -n nutzen; E. sparende Maßnahmen.“
> (Duden, 2019, S. 526)

Hier sieht man bereits, dass die Formulierungen des Alltags teilweise nicht mehr fachlich angemessenen sind und entsprechend eine Diskrepanz von fachlichem und alltäglichem Verständnis von Energie suggerieren (Energie geht „verloren“).
Zahlreiche Studien zeigen, dass Schüler*innen am Ende des traditionellen Unterrichts kein zufriedenstellendes Verständnis vom Konzept der Energie entwickelt haben. Sie entwickeln zwar ausgereifte Ideen und Vorstellungen von Energie sowie den fünf Kernaspekten (Energieformen, -übertragung, -umwandlung, -dissipation, -erhaltung), allerdings kein robustes Verständnis von der Energieerhaltung als zentrales naturwissenschaftliches Prinzip (Duit, 2014; Nordine, 2016; Nordine et al., 2019). Aus diesem Grund wurde und wird der traditionelle Energieunterricht von Expert*innen dafür kritisiert, keine akkuraten und nützlichen Vorstellungen von Energie zu vermitteln (z. B. Nordine et al., 2019). Deshalb wird nach wie vor nach angemessenen und wirksamen Konzeption für den Energieunterricht geforscht (Papadouris und Constantinou, 2016).

3.2.1 Allgemeine Probleme

Die Schwierigkeiten von Schüler*innen, ein angemessenes Verständnis vom Energiekonzept zu erlangen, wird durch zahlreiche Studien belegt (bspw. Duit, 1981; Kurnaz und Arslan, 2011). Dies wird z. B. dadurch deutlich, dass viele Schüler*innen am Ende ihrer Schulzeit nicht in der Lage sind, ein breites Band an physikalischen Phänomenen zu verstehen (Herrmann-Abell und DeBoer, 2017; Liu und McKeough, 2005; Neumann et al., 2013). Das gilt auch für den Unterricht nach der Energiequadriga, der die Energieentwertung mit einbezieht (Papadouris und Constantinou, 2016). Wenn Schüler*innen Phänomene interpretieren, geschieht dies meist ohne Betrachtung der Energie, da diese „ungern“ bei der Problemlösung bzw. Beschreibung verwendet wird (Driver und Warrington, 1985; Nordine et al., 2019). Im traditionellen Unterricht wird Energie meist im Mechanik-Kontext motiviert und vorerst auf diesen limitiert (Duit, 2014). Auch eine stoffliche Vorstellung helfe dabei nicht, da sie ohnehin nicht dem fachlichen Hintergrund (abstrakte Bilanzierungsgröße) entspräche (Quinn, 2014; Warren, 1983). Außerdem erschweren Alltagsbegriffe wie „Energieversorgung, -wende, -sparen“ sowie „erneuerbare Energien“ das Bilden eines angemessenen Verständnisses von Energie und Energieerhaltung (Quinn, 2014).
Diese allgemeinen Probleme mit dem Energiekonzept gehen mit problematischen Lernendenvorstellungen einher: Auch wenn eine Analyse aus der Energieperspektive effektiver wäre, greifen Schüler*innen oft auf mechanistische Vorstellungen zurück (Driver und Warrington, 1985). Dabei wird Energie oft mit lebenden Dingen assoziiert und mit „offensichtlichen Aktivitäten oder Geschehnissen“ in Verbindung gebracht oder quasi-stofflich mit einem universellen Treibstoff (entsprechend einiger Unterrichtskonzeptionen) assoziiert (Driver et al., 2014; Nordine et al., 2019; Trumper, 1993; Watts, 1983). Für viele Schüler*innen ist Energie etwas, das man braucht, um etwas zu bewirken. Sie wird mit Aktivität, Schwung, Freude oder Schaffenskraft verbunden, oder mit etwas, womit man aufgeladen sein kann (Schecker et al., 2018). Diese Attribute entstammen dem lebensweltlichen Sprachgebrauch und kollidieren stellenweise mit den fachlichen Vorstellungen, insbesondere, wenn es um die Energieerhaltung geht. Außerdem hängt dies mit der oft betonten Gefahr zur Verwechslung mit dem Kraftbegriff zusammen.
Die Auffassung von Energie als eine Art Treibstoff ist zwar in bestimmten Kontexten förderlich (insbesondere für die Greifbarkeit des Konzeptes), fördert aber auch die Gefahr einer Gleichsetzung von Energie und Energieträgern (z. B. Nahrung *ist* Energie; Quinn, 2014) bzw. die Transportvorstellung von Energie nach dem Rucksackmodell (Burde und Wilhelm, 2021; Erb, 2021). Damit geht auch einher, dass der Verbrauch von Energieträgern schnell mit dem Energieverbrauch

bzw. -verlust verknüpft wird (Schecker et al., 2018). Diese Vorstellungen (insbesondere die Sichtweisen von abstrakter und stofflicher Konzeption) kollidieren (Solomon, 1983). Manche Schüler*innen, die auf die unterrichteten Konzepte zurückgreifen, verwenden diese zwar, allerdings inkonsistent, indem sie in einem Kontext „normative Ideen zur Energie beachten aber sie in einem anderen verletzen“ (Chabalengula et al., 2012).

3.2.2 Probleme mit Kraft und Arbeit im Kontext Energie

Bei der traditionellen Herangehensweise stellen Kraft und Arbeit (über die Kraft definiert) den Grundstein für die Einführung des Energiebegriffs dar. So wird Energie als „Fähigkeit, (mechanische) Arbeit zu verrichten“ definiert (Abschn. 3.1.1). Aus fachlicher Sicht ist diese Herangehensweise (auch historisch) nachvollziehbar und, sofern man die Definition über das Integral der Kraft nach dem Weg heranzieht (vgl. Formel 4.1 in Kap. 4), auch angemessen. Im Schulunterricht bringt diese Abfolge allerdings Probleme mit sich. Eines davon ist die Erkenntnis, dass es für viele Schüler*innen schwer ist, ein angemessenes Kraftkonzept zu entwickeln (Schecker et al., 2018), welches aber Voraussetzung für ein solides Verständnis von Energie ist. Außerdem wird Arbeit meist nur mit mechanischen Prozessen verknüpft. Energie hingegen stellt ein übergeordnetes und fächerübergreifendes Konzept dar. Des Weiteren ist die Arbeit als physikalische Größe problematisch für den Schulunterricht, da sie für Schüler*innen auch mit Begriffen aus der lebensweltlichen Erfahrung konnotiert ist. So wird Arbeit meist mit Anstrengung oder körperlicher Arbeit assoziiert, was aber im Fall der physikalischen Arbeit nicht immer angemessen ist (Müller, 2015). Beispielsweise erfordert das reine Hochhalten eines Gegenstandes makroskopisch betrachtet keine physikalische Arbeit, wird aber von Schüler*innen mit solcher identifiziert, da es „anstrengend“ ist, das Buch entgegen der Schwerkraft für eine gewisse Zeit an der gleichen Stelle zu halten.[4] In der bereits oben angesprochenen Reihe von Jewett[5] geht dieser weiter auf die Probleme des Arbeitsbegriffs ein. Um diese Problematik abzustecken, werden im Folgenden die relevanten Aspekte seiner Ausführungen sinngemäß gebündelt wiedergegeben:

[4] Auf molekularer Ebene wird Arbeit verrichtet, die aber makroskopisch nicht beobachtbar ist. Als typisches Beispiel für den Fall, dass keine mechanische Arbeit verrichtet wird, birgt diese Situation Probleme.

[5] „Energy and the Confused Student“ I bis IV

Jewett stellt heraus, dass der traditionelle Ansatz mit der klassischen Definition der Arbeit nicht auf alle Phänomene anwendbar ist. Die traditionelle Formulierung

$$W = F \cdot \Delta s$$

(in Worten „Die Arbeit W ist gleich der Kraft F entlang des Weges mal den Weg Δs“)[6] sei ungenau und müsse im weiteren Unterricht durch Anpassungen ergänzt werden. Er führt das darauf zurück, dass der Weg (s bzw. Δs) als Verschiebung nicht genau definiert werde. Diese fehlende Genauigkeit sorge für „konzeptionelle Schwierigkeiten“ und der Notwendigkeit, später kontextabhängig Informationen ergänzen zu müssen (Jewett Jr., 2008a). Diese äußern sich gerade bei Prozessen mit Reibung sowie deformierbaren oder rotierenden Objekten. Jewett erläutert, dass bei fehlender Spezifikation der Verschiebung Δs nicht klar sei, ob es sich um Arbeit oder Pseudoarbeit handle. Damit geht er auf das Problem ein, dass reale Arbeit vom Angriffspunkt der Kraft ausgeht, Pseudoarbeit bzw. „center-of-mass“ Arbeit allerdings nur die verrichtete Arbeit aufgrund der Verschiebung des Schwerpunktes des betrachteten Systems beschreibt. Dieser Unterschied wird besonders dann relevant, wenn man deformierbare oder rotierende Objekte betrachtet, beispielsweise wenn man eine Kraft an einer Stelle eines Luftballons oder nicht in der Mitte eines Balles ausübt (Jewett Jr., 2008a). Bei Kräften auf deformierbare Objekte (und bei Kräften in der Thermodynamik) sei es relevant, die Summe der Arbeit an den verschiedenen Angriffspunkten zu berechnen und so die Netto-Arbeit zu bestimmen. Das selbe Prinzip gelte für die Reibung (insbesondere bei deformierbaren Objekten), da hier für eine adäquate Beschreibung vielmehr die Summe der einzelnen Verschiebungen relevant sei als die Betrachtung des Schwerpunktes (Jewett Jr., 2008a). In diesem Zusammenhang geht Jewett auch darauf ein, dass es wichtig sei, das zu betrachtende System zu identifizieren und zu charakterisieren (Jewett Jr., 2008b). Dieser Umstand überträgt sich auch auf die Betrachtung der Energie (vgl. oben), wenn man über die Energieübertragung spricht, da hier die Systemgrenzen und die Abgeschlossenheit des Systems von großer Bedeutung für die Energieerhaltung im betrachteten System sind. Nach Jewett stellt der traditionelle Energieunterricht also eine unzureichende Definition der Arbeit vor, die durch Ungenauigkeit nicht die Arbeit, sondern ggf. nur Pseudoarbeit beschreibt und bei unklarer Systembetrachtung keine angemessene Grundlage für das Energiekonzept darstellt.

[6] Oftmals wird sogar nur s statt Δs geschrieben.

3.2.3 Probleme mit Energieformen

Energie in Formen versus Energie als unitäre Größe

Die meisten Schulbücher sowohl für die Unter- als auch für die Sekundarstufe II greifen nach wie vor auf den traditionellen Ansatz mit Energieformen zurück (Hewitt, 2009). Darunter zählen die Hebearbeit (Apolin, 2017) bzw. Hubarbeit (Mathelitsch et al., 2004) zur Einführung der potenziellen Energie (Gravitation), die Beschleunigungsarbeit zur Einführung der Bewegungsenergie (z. B. Mathelitsch et al., 2004) und die Dehnungsarbeit (Sexl, 2017) bzw. Spannungsarbeit (Mathelitsch et al., 2004) für die Spannenergie (z. B. einer elastischen Feder). Hier fällt auf, dass sich die Terminologie bereits bei der Einführung der ersten Energieformen im Mechanikkontext je nach Schulbuch unterscheidet.

Mehrere Expert*innen kritisieren, dass die Einführung von Energieformen eher einer Umbenennung als einer sinnstiftenden Definition gleiche (Quinn, 2014; Swackhamer, 2005). Die Unterteilung der eigentlich unitären physikalischen Bilanzierungsgröße „Energie“ in verschiedene „Portionen“ sorgt dabei für eine differenzierte und unübersichtliche Terminologie (vgl. auch Liste der Energieformen in Kap. 3.1). Expert*innen befürchten, dass diese Terminologie zu umfangreich für den Aufbau eines kohärenten Konzeptes für Energie und die einzelnen Formen außerdem nicht wohldefiniert seien (Quinn, 2014). Als Folge überlappen sich die Energieformen in ihrer Bedeutung und sorgen für Verwirrung bei den Lernenden (Quinn, 2014).[7] Zwar ist die Unterteilung in verschiedene Energieformen praktisch, im Sprachgebrauch nützlich und macht das abstrakte Energiekonzept greifbar, allerdings bildet die Unterteilung nicht unbedingt die physikalische Realität ab (Nordine et al., 2019; Quinn, 2014). Denn wenn man Energie als unitäre Größe betrachtet, ergibt die Unterteilung in verschiedene Formen wenig Sinn: Vergleicht man Energie beispielsweise mit einer Flüssigkeit, so gibt es davon zu einem bestimmten Zeitpunkt eine bestimmte Menge. Ob die Flüssigkeit in Tüten, Gläsern oder Flaschen abgefüllt ist ändert nichts an der Flüssigkeit selbst, lediglich an der Verpackung (Benennung). Diese Analogie kann man auch auf die „Verpackung“ der Energie in verschiedene (Erscheinungs-)Formen übertragen. Allerdings ergibt sich dabei für Schüler*innen das Problem (auch nicht zuletzt durch die nicht wohldefinierte und teils intransparente Benennung der Energieformen), dass sie teilweise nicht den Sinn der einzelnen Formen erkennen (Quinn, 2014).

[7] Ein Beispiel dafür sind die innere, thermische und chemische Energie, die (je nach Auffassung und Betrachtung) nicht unbedingt voneinander getrennt werden können.

Problematik einzelner Energieformen

Das gleiche Problem ergibt sich beim Übergang zu anderen Disziplinen wie der Biologie oder Chemie, in denen Energieformen (insbesondere die chemische Energie) ggf. unterschiedlich definiert werden. Inkonsistente Terminologie sorgt dafür, dass Schüler*innen nicht erkennen, was sich hinter einer bestimmten Energieform verbirgt, was deren Bedeutung ist bzw. wie man diese auseinander hält. Es ergeben sich „Blackboxen“, die letztlich Worthülsen darstellen, aber inhaltlich nicht gefüllt und damit für das weitere Lernen nicht tragfähig sind. Ein Beispiel dafür sind die Formen innere, chemische und Kernenergie: Bei der inneren Energie werden Schüler*innen meist nicht aufgeklärt, wo genau die Energie gespeichert ist bzw. welcher Mechanismus dafür sorgt. Das führt beispielsweise dazu, dass sie mit der thermischen Energie (eigentlich eine Form der kinetischen Energie) bzw. Wärme (Prozessgröße) gleichgesetzt wird (Berger und Wiesner, 1997). Auch die Unterscheidung von Wärme und Temperatur fällt damit einhergehend schwer (Kesidou und Duit, 1993).

Nach Quinn (2014) ist die chemische Energie nicht sinnvoll als totale Energie zu definieren, da hier unklar bzw. unbrauchbar ist, wie viel Energie in den einzelnen chemischen Bindungen einer Konstellation beinhaltet ist. Vielmehr sei es von Bedeutung, über die Energiedifferenz bei einem Prozess zu sprechen; diese Energieform als Maß für die Bindungsenergie von Atomen sei also wenig aussagekräftig. Das gleiche gelte für die Kernenergie, die eigentlich nur sinnvoll über die starke Wechselwirkung definiert werden könne.

Neben diesen Spezialfällen wird auch angemerkt, dass der Begriff „mechanische Energie“ wenig sinnvoll ist, da er nur als Oberbegriff für kinetische und (gravitative) potenzielle Energie dient (Quinn, 2014). Die Einführung bzw. Verwendung der potenziellen Energie selbst wird von mehreren Expert*innen kritisiert. Zum einen wird der Ausdruck „potenzielle Energie“ inkonsistent verwendet, da er abhängig von der jeweiligen Unterrichtskonzeption teilweise ausschließlich für die Lageenergie (auch potenzielle Energie der Höhe, Höhenenergie oder gravitative potenzielle Energie) verwendet wird, gelegentlich aber auch für die elektrische Energie (z. B. eines Kondensators) oder Spannenergie (z. B. einer elastischen Feder). Zum anderen stellt gerade die potenzielle Energie viele Schüler*innen vor Probleme, welche im Folgenden kurz beschrieben werden: Traditionell wird die potenzielle Energie für die Gravitation eingeführt. Allerdings wird es meist dem fallenden Objekt und nicht dem Gesamtsystem (also Erde und Objekt sowie deren Wechselwirkung) zugeschrieben (Doménech et al., 2007). Dabei ergeben sich verschiedene Probleme,

denn wenn die Energie dem fallenden Objekt zugeschrieben wird, beispielsweise einem Ball, so lässt man dabei das Gesamtsystem außer Acht. Über Energie zu sprechen und insbesondere einem Objekt eine bestimmte Energie zuzuschreiben ergibt erst dann Sinn, wenn man dabei auch die zu Grunde liegende Wechselwirkung betrachtet (Nordine et al., 2019; Quinn, 2014). Erst die Betrachtung der Konstellation von Erde, Ball und der Gravitation als Wechselwirkung erlaube es, über Formel 4.1 (Definition der Energie in Kap. 4) eine Energie zu berechnen.[8] Diese dann „nur“ dem Ball zuzuschreiben, birgt die Gefahr, dass Schüler*innen den Überblick und Zusammenhang und folglich auch die inhaltliche Bedeutung dieser Energieform übersehen. Gerade die Änderung der Situation (beispielsweise wenn sich der Abstand des Balles zur Erde ändert) verändert auch die Energie. Dies ist aber nicht unmittelbar erkennbar, wenn diese Abhängigkeit nicht explizit gemacht wird. Auch die typische Formel $E = m \cdot g \cdot h$ suggeriert, dass es nur auf die Masse des betrachteten bzw. fallenden Objektes ankomme, nicht aber auf die Masse der Erde, obwohl diese natürlich implizit in der Definition von g als Erdbeschleunigung (inkl. dem Radius der Erde; Näherung $r_{\text{Erde}} \gg h$) enthalten ist. Für Schüler*innen ist dies aber nicht zwingend erkennbar und wird auch im Unterricht nicht unbedingt explizit erwähnt (Quinn, 2014). Auch der Begriff potenzielle Energie ist teilweise missverständlich, da er von Schüler*innen gelegentlich missverstanden wird als nur das „Potenzial, Energie zu besitzen“ (Hecht, 2003).

Konsequenzen

Wie bereits geschildert, werden Energieformen über die verschiedenen Fächer nur eingeschränkt konsistent verwendet. Zudem wirkt die sukzessive Einführung der Energieformen im Verlauf des Energieunterricht an den Stellen, an denen man sie „braucht“ willkürlich und verwirrend (Jewett Jr., 2008c), was das Verständnis für Energie als übergreifendes Konzept schwierig macht (Nordine et al., 2019). Auch der Fokus auf Zustände anstelle von Prozessen erschwert das Verständnis (Nordine et al., 2019). Es sei sinnvoller, über Energiedifferenzen zu sprechen als über totale Energien (Quinn, 2014). So verwechseln beispielsweise manche Schüler*innen die Erhaltung der Energie mit der Erhaltung einzelner Energieformen und nehmen an, dass etwa elektrische Energie an sich erhalten sei (Fortus et al., 2019; Nordine et al., 2011). Dies führt zu Missverständnissen und erschwert die Bildung eines angemessenen Konzeptes von Energie und deren Erhaltung. Außerdem wird es schwierig, Schüler*innen zu vermitteln, dass Energie gerade auch wegen des mächtigen Prinzips der Energieerhaltung eine große Bedeutung und Attraktivität

[8] Swackhamer (2005) benennt und beschreibt dieses Problem anhand einer Tasse auch als Referenzproblem.

für die Beschreibung von Phänomenen besitzt (Driver und Warrington, 1985). Die traditionelle Behandlung der Energie und Energieformen könnte also das weitere Lernen über Energie sogar hemmen (Bransford und Schwartz, 1999; Kaper und Goedhart, 2002). Quinn (2014) merkt auch an, dass es aus fachlicher Sicht ohnehin nicht immer sinnvoll sei, einzelne Energieformen zu unterscheiden, insbesondere wenn kinetische und potenzielle Energie aufgrund der Energie-Masse-Äquivalenz nicht immer sinnvoll voneinander trennbar sind.

3.2.4 Probleme mit Energieerhaltung und Energie als Gesamtkonzept

Die Energieerhaltung wird nur von wenigen Schüler*innen am Ende ihrer Schulzeit als fundamentales und bedeutendes Prinzip erkannt und verstanden (Neumann et al., 2013). Aus diesem Grund schlagen Neumann et al. (2013) auch vor, mit der Existenz und Definition verschiedener Energieformen zu beginnen und dann erst im Anschluss über Umwandlung und Übertragung zu sprechen, um eine Vermischung zu vermeiden. Allgemein ist der Rückgriff auf das Prinzip der Energieerhaltung für Schüler*innen unattraktiv und es wird eher auf den Verbrauch, Verlust oder die Dissipation von Energie eingegangen (Kesidou und Duit, 1993). Energieerhaltung (als Formen-übergreifendes Gesamtkonzept) ist also für viele Schüler*innen schwierig zu verstehen (Lee und Liu, 2010; Liu und McKeough, 2005; Neumann et al., 2013).

Energie und Systeme bzw. Felder

Wie die obigen Ausführungen zeigen, kann man nur schwer angemessen über Energie sprechen, ohne dabei auf das betrachtete System einzugehen. Studien zeigen allerdings, dass Schüler*innen Schwierigkeiten dabei haben, Energie und Systeme miteinander zu verknüpfen (Lindsey et al., 2012). Auch bei Ansätzen, die Systeme explizit betrachten (System-Transfer-Ansatz; vgl. Nordine et al., 2019), haben Schüler*innen Probleme, wenn mehrere Systeme eine Rolle spielen (Papadouris und Constantinou, 2016). Zudem verwenden nur wenige Schulbücher einen System-basierten Ansatz zur Betrachtung von Phänomenen aus der Energieperspektive (Jewett Jr., 2008b).
Ein Vorschlag, um Systeme explizit mit der Energie zu verknüpfen, ist die Einführung von Feldern. Dies wird auch von verschiedenen Expert*innen vorgeschlagen (z. B. Quinn, 2014; Swackhamer, 2005), bedarf aber einer sorgfältigen Umsetzung, da Schüler*innen auch nach dem traditionellen Unterricht typischerweise bis in die Sekundarstufe II Schwierigkeiten mit dem Feldkonzept haben (Aschau-

er, 2017; Furió und Guisasola, 1998). Dabei knüpfen Schüler*innen auch oft nicht die Verbindung zwischen Feld und Kraft als Wechselwirkung; sie fokussieren z. B. eher auf die Kraftwirkung zwischen Objekten als auf die Rolle des Feldes (Schecker et al., 2018). Manche unterscheiden auch nicht zwischen Kraft und Feldstärke oder betrachten das elektrische und magnetische Feld als das selbe Feld (Schecker et al., 2018). Feldlinien stellen dabei generell ein Problem dar und werden nicht als visuelle Unterstützung für die Richtung der Kraft im Feld gesehen, sondern als Bahnen von Teilchen im Feld, etwas real existierendes oder sichtbares oder schreiben gar dem Raum zwischen den Feldlinien eine Feldfreiheit zu (Schecker et al., 2018).

Insgesamt gibt es also einige problematische Lernendenvorstellungen zu Feldern, die insbesondere bei genauer Betrachtung von Feldern und ihren Eigenschaften bzw. Rollen in Prozessen bemerkbar werden. Die Kenntnisse darüber sind für die Konzeption des Energie-Feld-Ansatzes relevant und kommen bei der didaktischen Rekonstruktion zum tragen. Genaueres zur Idee der Verknüpfung von Energie und Systemen bzw. Feldern in konkreten Lehrgängen wird in den nächsten Abschnitten beschrieben.

3.3 Alternative Ansätze mit Feldern

Im traditionellen Unterricht werden Energie und Felder praktisch fast nie miteinander verknüpft. Felder werden meist als etwas eingeführt, das einen Magneten (meist Permanentmagneten) umgibt, um die Fernwirkung der magnetischen Kraft zu erklären (Wilhelm et al., 2021b). Dabei werden Feldlinien als Veranschaulichung verwendet; visuell oft mit Eisenfeilspänen plausibilisiert. Aschauer (2017) führt elektrische und magnetische Felder als dynamische Entitäten über didaktisch rekonstruierte Maxwellgleichungen ein und stellt damit den Feldbegriff in den Fokus (Aschauer, 2017; Wilhelm et al., 2021b). Hier stehen allerdings die Felder selbst und weniger die Energie im Vordergrund. Rückl (1991) und Nordine et al. (2019) verknüpfen gezielt Energie und Felder in ihren vorgeschlagenen Lehrgängen. Deren Merkmale und Benefits werden im Folgenden genauer dargestellt.

3.3.1 Das Feldenergiekonzept von Rückl (1991)

Bereits 1991 veröffentlichte Eckhard Rückl ein Konzept für den Energieunterricht, das er im Rahmen seiner Habilitation von 1989 erarbeitet hatte (siehe Rückl, 1991). Dieses Konzept ist das sogenannte „Feldenergiekonzept“. Obwohl diese Arbeit be-

reits vor über dreißig Jahren verfasst wurde, erhielt sie bisher nur wenig Beachtung. Das Konzept greift den Kern der obigen Überlegungen zu Schwierigkeiten und Ideen auf und verknüpft Energie und Felder. Rückl verfolgt dabei den Ansatz, die traditionellen Energieformen ausschließlich auf Bewegungsenergie und Feldenergie zurückzuführen:

> „Sämtliche Energiearten lassen sich auf zwei reduzieren: die Feldenergie und [die] Bewegungsenergie." (S. 43)

Dazu führt er die Energie sich bewegender Objekte mit Masse auf Bewegungsenergie zurück. Dies gilt dann auch für den Fall der thermischen Energie. Feldenergie umfasse alle Formen potenzieller Energie, die sich aus einer Wechselwirkung ergeben. Er unterscheidet zwischen Quellen, deren Felder (z. B. das elektrische Feld einer Ladung) und Gesamtfelder als Überlagerung von Einzelfeldern. Auch das in der Physik oft verwendete Modell der Probekörper in Feldern wird verwendet. Die Feldvorstellung wird dann teilweise durch klassische Feldlinienbilder unterstützt. Ein Lernziel ist dabei das folgende:

> „Aus dem gemeinsamen Feld heraus zwischen den Magneten wirken anziehende Kräfte auf die Magnete, so daß [sic] eine Anziehung beider Magnete erscheint." (S. 70)

Zentrale Aussage ist, dass Energie in Feldern gespeichert ist und dass diese zwischen Feldern und sich bewegenden Objekten übertragen werden kann. So dient das Feld als Anker und wird beginnend mit dem Magnetfeld über das Gravitationsfeld über elektrische und elektromagnetische Felder bis hin zu Gluonen- bzw. Kernfeldern eingeführt. Dabei wird auch die Bindungsenergie bzw. Gitterenergie eines NaCl-Kristalls als überwiegend freiwerdende Feldenergie konzipiert (Rückl, 1989a, 1990). Für die Beschreibung von Kernprozessen führt er über die Deuteron-Bildung die Notwendigkeit von Nukleonen- bzw. Kernfeldern ein (Rückl, 1991, 120f)[9]. Später werden dann auch anhand des Beta-Zerfalls Gluon-Felder eingeführt, allerdings nicht weitergehend als problemlösend beschrieben, da sich die schwache Wechselwirkung aus fachlicher Sicht dadurch nicht beschreiben lässt. Die Energieübertragung in Stromkreisen sowie die Induktion werden über die Existenz und Veränderung von elektromagnetischen Feldern beschrieben (Rückl, 1989b).

Allgemein werden Felder ebenso wie Massen und Ladungen als eigenständige Entität betrachtet. Rückl begründet dies mit der Notwendigkeit, „frühzeitig dem Feld

[9] Hier verweist er auf die Yukawa-Näherung für die Legitimation von näherungsweise konzentrischen Kernfeldern.

einen Existenzcharakter zu[zu]ordnen [...]“ (S. 161). Die Sprache nehme dabei eine Schlüsselrolle ein, da Phänomene und Begriffe gemeinsam entstünden (S. 41). Den Mehrwert sieht Rückl neben der fachlichen Angemessenheit auch in der „Einfachheit“ (S. 42) der Konzeption. Damit bezieht er sich auf die Sachstruktur, die durch die Reduzierung der Terminologie der Energieformen auf nur zwei zentrale Begriffe (Feld und Bewegung) vereinfacht wird. Seine empirischen Untersuchungen unterstützen seine Vermutung, dass der Feldbegriff für Schüler*innen der Mittelstufe an sich nicht zu schwierig sei und man ihnen die Begriffe Feld, Energie und Feldenergie am Phänomen zusammenhängend nahe bringen könne (Arbeitshypothese, S. 42). An dieser Stelle sei bereits erwähnt, dass auch die Untersuchungen von Fortus et al. (2019) untermauern, dass Felder im Kontext Energie durchaus bereits in der Mittelstufe unterrichtet werden können.

Rückl selbst liefert Ergebnisse zur Wirksamkeit bzw. Umsetzbarkeit seiner Konzeption: In seinen Untersuchungen in den Jahrgangsstufen acht bis dreizehn mit Schüler*innen aus Realschule und Gymnasium verwendete er Fragebögen und Unterrichtsgespräche (Interviews), um sein Konzept zu evaluieren. Dabei stellte sich heraus, dass bereits „sehr jungen Schülern durch den Zusammenhang der Begriffe Feld, Teilchen und Feldenergie ein fundamentales und umfangreiches Verständnis für zahlreiche physikalische Phänomene ermöglicht werden kann.“ (S. 160) Auch wenn die Untersuchungen unter eher variablen Rahmenbedingungen (Dauer der Tests, Einsatzzeitpunkt und Phase sowie Thema und Schwerpunkte in den Schulstunden) stattfanden, sind die Ergebnisse vielversprechend:

> Die Schüler sind zum Großteil in der Lage, die Begriffe Feld und Energie zusammenhängend an der Eigenschaft von Feldern zu erläutern. Sich am Phänomen des Feldes orientierend, können die Schüler mehrheitlich die Begriffe Kraft, Energie und Arbeit miteinander in Beziehung setzen und Unterscheidungen zwischen ihnen treffen. Die Schülerminderheit greift [...] auf alte Argumente zurück und setzt die Begriffe Energie und Kraft gleich. (S. 155)

Als problematisch stellt sich heraus, dass bei manchen Schüler*innen dennoch Kraft und Energie gleichgesetzt werden bzw. teilweise alte Konzepte von Anziehung im Kraftbild vorherrschen (bei ca. 20 %). Dass Schüler*innen die Energie bei Phänomenen der Gravitation nicht dem Feld sondern der Höhe selbst zuschreiben (Referenzproblem), kam in etwa 13 % der Fälle vor; ca. 19 % schreiben sie dem fallenden Objekt selbst zu (S. 156). Diese Erkenntnisse sind vielversprechend, lassen allerdings wenig Rückschlüsse auf die Wirksamkeit einzelner Ideen bzw. Aspekte

der Konzeption zu. Einige produktiv erscheinende Aspekte von Rückls Konzeption werden vom hier erarbeiteten Energie-Feld-Ansatz aufgegriffen. Eine genaue Abgrenzung folgt zwecks Nachvollziehbarkeit nach der Beschreibung der grundlegenden Idee des vorliegenden Projektes im Anschluss an die fachliche Klärung und notwendigen Vorüberlegungen (s. Kapitel 6).

3.3.2 Der System-Transfer-Ansatz von Nordine et al. (2019)

Auch Nordine et al. (2019) verzichten in ihrem System-Transfer-Ansatz (STA) für die Mittelschule auf Energieformen und greifen auf das Feldkonzept zurück. Sie rücken den Energie-Transfer zwischen Systemen in den Vordergrund. Systeme spielen bei der Betrachtung von Energie eine zentrale Rolle, da diese und ihre Grenzen bei der Formulierung der Energieerhaltung direkt betrachtet werden müssen. Bereits Swackhamer (2005) betont die Bedeutung der Energie für die Veränderung von Systemen; Crissman et al. (2015) führen Systeme bereits in der Primarstufe ein. Van Huis und van den Berg (1993) erkennen die Notwendigkeit der Einführung von Feldern bei der Diskussion von Wechselwirkungen. Bei der Betrachtung von wechselwirkenden Systemen (bzw. Systemen von wechselwirkenden Objekten) ist also die Betrachtung von Feldern notwendig.
Nordine et al. (2019) greifen bisherige Erkenntnisse sowie die Ratschläge von Quinn (2014) und anderen Expert*innen auf und verknüpfen Energie mit Systemen. Dabei kommen Felder ins Spiel, wenn es um Distanz-Wechselwirkung geht. Beispielsweise bei der Gravitation, wenn ein fallendes Objekt beschleunigt wird, muss die Fernwirkung und Energieübertragung durch ein zweites System (neben dem Objekt selbst) beschrieben werden. An dieser Stelle wird das Gravitationsfeld benötigt. So lässt sich die Grundidee des Ansatzes (bezüglich Feldern) wie folgt formulieren (aus dem Englischen; S. 8):

1. Objekte, die über eine Distanz wechselwirken, machen dies via Felder.
2. Felder sind wahre physikalische Entitäten, die eine räumliche Struktur besitzen.
3. Wenn Energie zu/von einem Feld transferiert wird, so verändert sich dessen räumliche Struktur.

Der Grundgedanke ist dabei, dass Energietransfer betrachtet wird. Es ist also im STA nicht notwendig, einem System eine bestimmte Energie zuzuschreiben, sondern es genügt, über die übertragene Energie zu sprechen. Dabei werden Systeme betrachtet, die sich verändern, beispielsweise ein beschleunigendes Objekt. Erkennbar ist die Energieübertragung durch die Veränderung des entsprechenden

Systems, z. B. die Verformung des Feldes. Ein Beispiel sind zwei Magnetwägen, die sich durch die magnetische Abstoßung beschleunigt auseinander bewegen. Die Energie wird dabei von dem System „Magnetfeld“ auf das System „Wägen“ übertragen. Dabei wird Energie als erhaltene Größe beschrieben, die Grenzen für das Systemverhalten vorgibt. Von einem Versuch, Energie explizit zu definieren, wird nach Aussage von Nordine et al. (2019) entsprechend der Empfehlung von Feynman et al. (1967) verzichtet. Grundsatz ist der folgende: Wenn sich ein System verändert (und damit seine Energie), so muss sich auch ein anderes System ändern, das mit diesem interagiert:

> „Wenn Energie zu/von einem System übertragen wird, muss sie von/zu einem anderen System übertragen worden sein“ (S. 12).

Eine Stärke des STA ist, dass sich die Veränderung eines Systems vorhersagen lässt, wenn man Informationen über die Energieübertragung besitzt (z. B. Größe und Richtung).

Der Bericht von Fortus et al. (2019) dokumentiert die Evaluation des STA in einer quantitativen Untersuchung, die von Interviews begleitet wird. Dabei gab es 591 Schüler*innen in der Erhebung und 71 Interviews. Es wurde hauptsächlich das Anwendungswissen (‚knowledge in use‘; vgl. National Research Council, 2012) der Schüler*innen im Anschluss an den STA in der Mittelschule vergleichend mit dem traditionellen Unterricht getestet. Die Schüler*innen wurden instruiert (459 nach dem STA, 132 traditionell) und getestet sowie 71 Interviews geführt (42 nach dem ST, 29 traditionell; Nordine et al., 2019, S. 8). Insgesamt stellen die Forscher*innen dabei fest, dass der STA einen größeren Lernzuwachs zu zeigen scheint als der traditionelle Energieunterricht (mit Energieformen und ohne Systeme bzw. Felder). Das Feldkonzept scheint dabei keine signifikante Barriere zu sein. Durch den STA werde das Energie-Verständnis in physikalischen Kontexten signifikant verbessert und unterstütze das spätere Lernen. Was die Erhebungen allerdings nicht eindeutig erläutern, ist die Wirksamkeit bzw. Rolle der Felder im STA. Da der Ansatz deutlich mehr umfasst als nur den Einbezug von Feldern, kann hier lediglich darauf geschlossen werden, dass sie den Lernprozess anscheinend nicht wesentlich hemmen. Inwiefern sie aber förderlich sind bzw. welche Aspekte der Felder in welcher Weise das Lernen über Energie unterstützen, wird empirisch nicht eindeutig belegt. Eine Abgrenzung zum EFA folgt (zwecks Nachvollziehbarkeit) im Anschluss an die Beschreibung der Vorüberlegungen zum EFA in Kapitel 6.

3.3.3 Beitrag von Fiedler et al. (2022)

Fiedler et al. (2022) greifen die obigen Ideen zur Verknüpfung von Energie und Feldern bereits für die Sekundarsteufe II auf. Fiedler gibt der Energie durch die Einführung von Feldern „ein zu Hause“. Formen von potenzieller Energie werden auch hier auf Felder als physikalische Entitäten zurückgeführt. Sie führten es als unsichtbare und unantastbare real existierende Entität ein (s. auch Furió und Guisasola, 1998). Fiedler et al. gehen davon aus, dass für die Verknüpfung mit der Energie „nur wenige Aspekte des Feldkonzeptes benötigt [werden], nämlich, dass sie um ein Objekt herum existieren, Interaktion auf Distanz ermöglichen und eine bestimmte Gestalt annehmen“ (Fiedler et al., 2022, S. 1).
Ergebnisse der Vergleichsstudie mit dem traditionellen Unterricht zeigen, dass Schüler*in-nen, die über Felder unterrichtet wurden, schlechter im abschließenden Test abschneiden. Sie seien allerdings in der Lage, wesentliche Aspekte von Feldern zu verstehen. Fiedler geht davon aus, dass ihr Konzept zur Entwicklung eines besseren Energieverständnisses beitragen könnte; der Einfluss sei in weiteren Studien genauer zu untersuchen.

3.4 Mathematische Formalismen im Physikunterricht

Da das im Rahmen dieses Dissertationsprojektes entwickelte Unterrichtskonzept zum EFA auch sinnstiftend mit den Formeln des Energieunterrichts verknüpft werden soll, wird im Folgenden der Umgang mit mathematischen Formalismen im Physikunterricht dargelegt. Da es sich bei der Mathematisierung des EFA (EFA-M) um eine einfache qualitative Erweiterung handelt, soll dazu ein kurzer Abriss der wesentlichsten Aspekte genügen, um die in Kapitel 15 eingeführten Konzeptideen zu motivieren.
In der Physik spielt die Mathematik aus vielen Gründen eine bedeutende Rolle. Neben der Funktion als Werkzeug zur Quantifizierung von physikalischen Sachverhalten (Berechnungen) und Vorhersage von Prozessen (Prognose für die zeitliche Entwicklung von physikalischen Größen) dient sie auch als Sprache der Physik (Uhden, 2016). Konzeptuelle Zusammenhänge lassen sich mit ihr über Formeln präzise formulieren. Das Wechselspiel aus sprachlicher/konzeptueller und formaler Beschreibung ist dabei prägend für die Physik. Dieses Verständnis spiegelt sich auch im österreichischen Lehrplan für den Unterricht der Sekundarstufe II wider:

> „Mathematisierung als spezifische physikalische Arbeitsweise bedeutet das Durchlaufen verschiedener Stufen zunehmender Abstraktion

> von der Gegenstandsebene über bildliche, sprachliche und symbolische Ebenen zur formal mathematischen Ebene. Für das Verständnis sind die nichtformalen Ebenen wichtig, während der mathematischen Ebene für die Anwendung (Vorhersage) besondere Bedeutung zukommt.“ (BMBWF/10008568, 2019)

Die Mathematisierung von Konzepten hält also auch Einzug in den Schulunterricht, wobei sie nicht nur eine technische Rolle spielt, sondern auch der Kommunikation und Strukturierung von Formalismen dienen sollte (De Cock, 2022). Mathematische Ausdrücke ermöglichen insofern auch den Ausdruck von Zusammenhängen verschiedener Größen und der Formulierung mathematischer Aussagen; z. B. „Die thermische Energie steigt (linear) mit der Temperatur“ für den Ausdruck $E_{\mathrm{th}} \propto T$. Die Verbindung von Mathematik und Physik macht die mathematischen Formalismen zu mehr als nur einem „Werkzeug“ für die Physik; deshalb sollten Schüler*innen auch die „Kompetenz entwickeln, den Sinn der Mathematik in der Physik zu verstehen“ (De Cock, 2022, S. 123). Hewitt (1983) betont, dass Formeln insbesondere auch das Denken anleiten können. So bieten Formeln beispielsweise eine Möglichkeit, physikalische Bedeutung in eine kompakte Form zu fassen und über Abhängigkeiten physikalischer Größen nachzudenken. Sherin (2001) zeigt auf, dass in Formeln nicht nur die Symbole selbst, sondern auch die physikalische Bedeutung der algebraischen Operationen von Bedeutung sind. So sind mathematischer Formalismus und physikalische Bedeutung miteinander verknüpft (Hewitt, 1983).

3.4.1 Probleme bei der Mathematisierung im Unterricht

Im Gegensatz zu den beschriebenen Benefits von mathematischen Formalismen erkennen Schüler*innen deren Vorteile nur selten. Stattdessen werden Formeln von Schüler*innen im schulischen Kontext trotz ihrer breiten Funktion meist nur mit dem Lösen von Übungsaufgaben am Ende eines Buchkapitels assoziiert (Pospiech et al., 2019). Rechnungen werden oft strikt von inhaltlichen (qualitativen) Überlegungen getrennt (Pospiech et al., 2019). Oft denken Schüler*innen, wenn sie an Physik denken, zunächst an Formeln (Krey und Mikelskis, 2012). Diese seien zum Rechnen da; die konzeptuellen Inhalte sind dabei für viele Schüler*innen zweitrangig (Strahl et al., 2010). Nach Strahl et al. genüge es der Auffassung von Schüler*innen nach, „die Begriffe, die sich hinter den Symbolen einer Formel verbergen, wie Vokabeln zu lernen“. Pospiech et al. halten fest, dass Schüler*innen dadurch die Bedeutung von Symbolen und Zusammenhängen oft nicht klar werde, was zu Schwierigkeiten beim Lernen beitrage (s. auch Redish, 2006). Formeln wer-

den also üblicherweise als Werkzeuge zur Berechnung von Zahlenwerten oder zur Beschreibung von Experimenten gesehen, wohingegen sie in der Physik vielmehr zur „Formulierung von Theorien und Erklärungen physikalischer Phänomene“ dienen (Karam und Krey, 2015). Aus diesem Grund ist es wichtig, den Symbolen in Formeln eine Bedeutung zu geben.

3.4.2 Plädoyer der Fachdidaktik

In Pospiech et al. (2019) werden einige Vorschläge zum Umgang mit der beschriebenen Problematik übersichtlich dargestellt: Da die Mathematik „keine direkte Beschreibung“ für physikalische Konzepte bietet, sondern diese nur auf symbolischer Ebene repräsentiert, braucht es eine Abstraktion der Konzepte: eine Mathematisierung. Damit ist nach Pospiech et al. der Prozess der „schrittweisen Übersetzung und des Transfers von physikalischen Prozessen und Phänomenen zu mathematischen Elementen und Strukturen“ gemeint (S. 6). Hewitt (1983) plädiere dabei für die Reihenfolge, zunächst die Konzepte zu bilden, bevor man diese dann sinnstiftend mit den entsprechenden Formeln verknüpft. Darüber hinaus kann die Mathematisierung von physikalischen Konzepten dazu beitragen, auch die Konzepte selbst weiterzuentwickeln (De Berg, 1995). Schüler*innen verstehen nach Pospiech et al. (2019) ein Konzept erst dann, wenn sie physikalische Phänomene, das beschreibende Modell und die Mathematisierung dessen mental verknüpfen können.
De Cock (2022) stellt heraus, dass es außerdem Zeit bräuchte, um Schüler*innen Bedeutung und Zusammenhang von Mathematik und Physik zu vermitteln und fordert, dieser Aufgabe mehr Aufmerksamkeit zu schenken: „Es sollten Lehr-Lern-Umgebungen geschaffen werden, welche nicht nur die Entwicklung des konzeptuellen Verständnisses unterstützen, sondern auch die Verbindung von mathematischen und physikalischen Konzepten fördern.“ Im Folgenden werden zwei prominente Modelle vorgestellt, die das Denken von Schüler*innen zu mathematischen Formalismen theoretisch fassen:[10] Die *symbolic forms* von Sherin (2001) und die *epistemic games* von Redish (2006).

3.4.3 *Symbolic forms*

Um die mathematischen Formalismen mit Sinn zu füllen, müssen die Symbole und Operatoren mit den physikalischen Konzepten sinnstiftend in Verbindung

[10] Der Bereich fachdidaktischer Forschung zu mathematischen Formalismen ist breit und die Mathematisierung des EFA stellt lediglich eine Erweiterung des Ansatzes dar, weswegen hier nur zwei für diese Arbeit interessante Modelle kurz und exemplarisch aufgegriffen werden. Für eine intensivere Lektüre siehe z. B. Pospiech et al. (2019).

gebracht werden. Dazu führt Sherin die sogenannten *symbolic forms* ein. *Symbolic forms* sind gewissermaßen Vokabeln, die einen Term einer Formel mit einer konzeptuellen Vorstellung verbinden (Sherin, 2001). Zum Beispiel kann die resultierende Kraft auf ein fallendes Objekt durch die Differenz der Kräfte von Luftreibung und Gravitation gebildet werden; $\vec{F} = \vec{F}_g - \vec{F}_{\text{Reibung}}$. Die *symbolic form* ist dabei der Zusammenhang über das Minus-Zeichen (Subtraktion) als Differenz zweier (hier vektorieller) Größen und der konzeptuellen Vorstellung, dass die beiden Einflüsse miteinander konkurrieren (Sherin, 2001).
Die Übersetzung zwischen konzeptueller Vorstellung und mathematischer Repräsentation besitze dabei zwei Richtungen: Zum einen könnten Schüler*innen ihr Verständnis einer physikalischen Situation durch Formeln ausdrücken. Zum anderen könnten sie aus der Betrachtung von Formeln Informationen über ein physikalisches System gewinnen und dieses auch konzeptuell beschreiben (Sherin, 2001, S. 482). Sofern Schüler*innen also die Bedeutung von *symbolic forms* erkennen, bieten diese ein Werkzeug für die Beschreibung von physikalischen Sachverhalten durch mathematische Formalismen. Eine *symbolic form* umfasst zwei Komponenten; die Symbolstruktur (‚symbolic template') und das konzeptuelle Schema (physikalische Bedeutung, ähnlich zu DiSessas P-Prims; Sherin, 2001, S. 490). Eine Auswahl typischer Symbolstrukturen ist in Tab. 3.1 dargestellt. Diese *symbolic forms* finden später auch bei der Mathematisierung des EFA Anwendung (siehe Kapitel 15). Durch Aufgliederung einer Formel in einzelne Terme und Betrachtung der Abhängigkeiten im Sinne der *symbolic forms* kann die Symbolstruktur (formelle Gestalt) mit der konzeptuellen Bedeutung verknüpft werden. Beispielsweise kann eine Formel für die Gesamtenergie, die sich aus einzelnen Energieformen zusammensetzt, über die *symbolic form* „Identität" und „Teile eines Ganzen" aufgeschlüsselt werden.

3.4.4 *Epistemic games*

Gemäß Redish und Kuo (2015) lässt sich die Mathematik als Sprache auffassen und im physikalischen Kontext aus linguistischer Sicht deuten. Auch sie stellen heraus, dass es wichtig sei, Schüler*innen dabei zu helfen, den mathematischen Formalismen eine physikalische Bedeutung zuzuordnen, um das Zusammenspiel von Mathematik und Physik zu verstehen. Dazu stellen sie ein theoretisches Modell auf, das die auftretende Systematik im Problemlöseverhalten von Schüler*innen beschreibt. Dabei identifizieren sie sechs sogenannte *epistemic games* (Tuminaro und Redish, 2007). Diese sind zielgerichtete Aktivitäten zum Lösen von mathematischen Problemen. Diese Aktivitäten nutzen Wissenselemente als Basis („knowledge base") und epistemische Formen (Repräsentationsformen,

symbolic form	Symbolstruktur
Identität	$x = \ldots$
Abhängigkeit	$[\ldots x \ldots]$
Unabhängigkeit	$[\ldots]$
Teile eines Ganzen	$[\square + \square + \square + \ldots]$
Prop+	$\left[\frac{\ldots x \ldots}{\ldots}\right]$
Prop-	$\left[\frac{\ldots}{\ldots x \ldots}\right]$
Verhältnis	$\left[\frac{x}{y}\right]$

Tabelle 3.1: Ausgewählte *symbolic forms* mit zugehöriger Symbolstruktur (formale Gestalt von Formeln) nach Sherin (2001).

z. B. Formeln oder linguistische Formulierungen), um neues Wissen zu generieren (deshalb „epistemisch“) oder ein Problem zu lösen (Redish, 2004). Diese *epistemic games* werden auch von Physiker*innen durchgeführt:

> „Thus a physicist may play a “making meaning with mathematics” game to map a physical situation onto a set of equations, manipulate those equations to obtain a solution, take limiting cases to check against his intuition, etc.“ (Redish, 2004, S. 30)

Als „game“ (Spiel) werden sie bezeichnet, da die Überlegungen einer „Menge an kohärenten Verhaltensregeln“ folgen, um ein Problem zu lösen (Tuminaro und Redish, 2007). Dabei gibt es Gegenstände und Schritte des Spiels, die unternommen werden können. Ein *epistemic game* ist beispielsweise das Erstellen einer Liste („list making“), z. B. zu der Frage „Was sind die fundamentalen Kräfte der Physik?“ (Tuminaro und Redish, 2007). Der Rückgriff auf das Wissen über diese Kräfte kann dann mit dem Rückgriff auf die kognitiven Ressourcen („cognitive resources“; vgl. Kapitel 2.3) verglichen werden. Andere *epistemic games* sind das „Mapping Mathematics to Meaning“, bei dem Schüler*innen mathematischen Formeln eine physikalische Bedeutung zukommen lassen; oder das „Recursive Plug-and-Chug“, bei dem ohne große Überlegungen Werte in Formeln eingesetzt werden, um einen Ergebniswert zu erhalten. Die *epistemic games* können also die Überlegungen von Schüler*innen zur Übersetzung zwischen mathematischen Formalismen und physikalischen Konzepten beschreiben.

3.5 Resümee

Das Thema Energie wird traditionell über die Einführung von Energieformen unterrichtet. Diese werden dann über die Prinzipien der Energieübertragung bzw. -umwandlung miteinander Verknüpft. Obwohl es verschiedene Variationen dieses traditionellen Schemas gibt, birgt der Ansatz zahlreiche Probleme. So wird das Energiekonzept von Schüler*innen nur selten bei der Beschreibung von Problemen favorisiert und auch das fundamentale Prinzip der Energieerhaltung nicht hinreichend verstanden. Es existieren alternative Ansätze, die versuchen, die zahlreichen Formen von potenzieller Energie auf Felder zurückzuführen und so die Sachstruktur zu verständlichen. Zwar zeigen bisherige Studien, dass die Verknüpfung von Feldern und Energie für den Physikunterricht wirksam sein kann, liefern aber noch keine umfassenden Erkenntnisse darüber, inwiefern genau das Feldkonzept dabei helfen kann, Energie besser zu verstehen. Wie ein wirksames und umfassendes Konzept für den Energieunterricht aussehen sollte und ob bzw. wie das Lernen über Energie mit Feldern gelingen kann, ist noch nicht vollständig geklärt. Der hier vorgestellte Energie-Feld-Ansatz adressiert diese Problematik.

KAPITEL 4

Fachliche Klärung

Damit eine fundierte und fachlich abgesicherte didaktische Rekonstruktion für den Energie-Feld-Ansatz (EFA) möglich ist, muss vor der Konzeption eine fachliche Klärung erfolgen. Dazu stellt dieses Kapitel die für den EFA relevanten fachlichen Inhalte zum Thema Energie und Felder heraus und diskutiert sie hinsichtlich ihrer Angemessenheit und Sinnhaftigkeit für die Implementation in einem Unterrichtskonzept.

Da bei der didaktischen Rekonstruktion Kenntnisse über Lernendenvorstellungenmit einbezogen werden, um Lernschwierigkeiten zu reduzieren und die Inhalte zugänglich zu gestalten (vgl. Kapitel 2.4), müssen stellenweise fachliche Inhalte angepasst werden. Das bedeutet, dass einzelne Formulierungen oder Sachzusammenhänge zu Gunsten einer besseren Verständlichkeit teilweise gekürzt oder leicht verändert werden müssen. Dadurch werden sie aus rein fachlicher Sicht ggf. weniger angemessen, stellen aber für den Lernprozess einen Vorteil gegenüber der ausführlichen fachlich korrekten Formulierung dar. Das heißt, Vereinfachungen, die ggf. aus rein fachlicher Sicht nicht vollständig (dafür aber didaktisch sinnvoll) sind, müssen legitimiert werden. Damit die Rekonstruktion der Inhalte also auch aus fachlicher Sicht vertretbar ist, wurden Interviews mit Fachwissenschaftler*innen (Expert*innen) geführt. Diese dienten dazu, die Grenzen der didaktischen Rekonstruktion auszuloten und werden im zweiten Teil dieses Kapitels beschrieben.

4.1 Fachlicher Hintergrund

Die fachliche Klärung beginnt mit einer Zusammenstellung der für den EFA wesentlichen physikalischen Konzepte als Überblick. Um Redundanz zu vermeiden, wird hier ein basaler Abriss der relevanten Aspekte vorgestellt, um das Thema in der Fachliteratur zu verorten. Weitere Details und die Einschätzung hinsichtlich einer möglichen Implementation im EFA werden dann im Rahmen der Analyse der Expert*innen-Interviews im nächsten Abschnitt beleuchtet.

4.1.1 Energie

Das Konzept *Energie* ist eines der zentralen fachlichen Konzepte der Physik und der Naturwissenschaften. Energie spielt in allen Bereichen eine wesentliche Rolle, da sie als fundamentale Erhaltungsgröße den Rahmen für den Ablauf aller Prozessen unserer Welt vorgibt. Die Betrachtung der Energie als physikalische Größe sowie deren Umwandlung bzw. Übertragung liefert Informationen für Beschreibungen, Erklärungen und Prognosen von Prozessen. Aus diesem Grund nimmt die Energie eine relevante und mächtige Rolle unter den physikalischen Konzepten ein. Dieser Abschnitt erläutert in Kürze die für den EFA wesentlichen Aspekte dieser Größe.

Historischer Hintergrund

Die folgenden Ausführungen basieren auf der Zusammenstellung von Coopersmith (2015) und Planck (1887) und stellen einen kurzen Abriss der Historie des Energiebegriffs dar: Die Forschungen von Galileo Galilei im 16./17. Jahrhundert zu Bewegungen und seiner Erkenntnis, dass *Zeit* ein physikalischer Parameter ist, legten den Grundstein für die Entdeckung energetischer Zusammenhänge (Coopersmith, 2015). Durch diese Erkenntnis entstand auch die Relation $v^2 \propto h$ für ein Objekt, das aus der Ruhe fallend nach der Fallhöhe h ein Tempo v besitzt. Dies greift auch Christiaan Huygens im 17. Jh. auf, als er erkannte, dass der Ausdruck $m \cdot v^2$ eine Konstante ist. Damals wurde diese Größe noch als lebendige Kraft (*vis viva*) bezeichnet, welche die Bewegung von Körpern ermögliche (Planck, 1887). Damit etablierte sich das erste Element einer Liste vieler (Coopersmith, 2015).
Die ersten Anhaltspunkte für ein allgemeines Prinzip der Energieerhaltung ergaben sich durch die Überlegungen zur Nicht-Existenz eines Perpetuum Mobile. Dies brachte Rudolf Clausius im 19. Jh. dann zu dem folgenden Schluss (Planck, 1887, S. 3): „Leistung von Arbeit oder Erzeugung von lebendiger Kraft

[i. e. *vis viva*] kann nicht ohne irgend eine Compensation [sic] erfolgen, oder [...]: Es ist unmöglich, Arbeit aus Nichts zu gewinnen.“ Die mathematische Formulierung über die Definition der Arbeit als dem Integral der Kraft über den Weg (s. auch Gl. 4.1 unten) geht auf Coriolis im Jahr 1829 zurück (Coopersmith, 2015).

Was ist Energie? – Phänomenologische Anekdote

In der Physik wird darauf verzichtet, genau zu sagen bzw. qualitativ zu definieren oder zu beschreiben, was Energie *ist*. Denn Energie ist eine abstrakte physikalische Größe, die sich aus Berechnungen nach bestimmten Regeln ergibt, aber nicht greifbar ist. Diesen Umstand beschreibt Feynman in einer seiner bekannten Vorlesungen (Feynman et al., 1967): Man stelle sich ein Kind vor, das über 28 Bauklötze verfügt. Jeden Tag kommt seine Mutter und zählt die Bauklötze nach. Da die Klötze weder zerstörbar noch teilbar sind, findet sie stets die 28 an der Zahl. Lediglich, wenn das Kind Klötze aus dem Fenster wirft oder ein Freund zu Besuch kommt und weitere mitbringt, ändert sich die Zahl. Also stellt die Mutter sicher, dass die Fenster geschlossen sind und keine Klötze hinzukommen oder aus dem Raum verschwinden. Eines Tages findet sie nur 27 Bauklötze, bemerkt aber, dass die Spielzeugkiste um das Gewicht eines Klotzes schwerer geworden ist. So kann sie Rückschlüsse auf den Verbleib des Klotzes ziehen. Ebenso kann sie an anderen Tagen den Verbleib von Klötzen im dreckigen Badewasser bestimmen, wenn der Wasserspiegel entsprechend dem Volumen eines oder mehrerer Klötze ansteigt. Diese Beobachtungen führen dazu, dass die Mutter eine Formel aufstellt, mit der sie über die indirekten Indikatoren (Gewicht der Kiste, Wasserspiegel, usw.) feststellen kann, ob sich noch alle (aber ggf. nicht direkt sichtbaren) Klötze im Raum befinden. So stellt sie fest, dass die Zahl der Bauklötze unverändert bleibt.
Feynman möchte damit ausdrücken, dass es, wenn man so weit geht, dass man nur noch indirekt auf die Anzahl der Klötze im Raum schließen kann, eigentlich keine Klötze gibt. Am Ende bleibt eine abstrakte, nach bestimmten Regeln berechnete Zahl, die aber zu jedem Zeitpunkt konstant bleibt. Und ebenso sei es mit der Energie. Man verfügt über Regeln, nach denen man Energie in ihren verschiedenen Formen bzw. Erscheinungen berechnen kann; und diese ist zu jedem Zeitpunkt in ihrer Gesamtheit konstant, also erhalten.

Es ist sinnvoll, sich diesen abstrakten Charakter der Energie bewusst zu machen. Denn aus praktischen Gründen bietet es sich in vielen Bereichen an, Energie mit materiellen bzw. substanziellen Veranschaulichungen oder Analogien zu assoziieren, um sie greifbar zu machen (wie z. B. die stoffliche Vorstellung des Wassers oder Treibstoffs). Erst so wird es möglich, über Energie zu sprechen, beispiels-

weise wenn man sagt, dass Energie *gespeichert* oder *übertragen* wird. Auch die *Umwandlung* von Energieformen benötigt eine formelle Vorstellung dieser Größe, die eigentlich keine formhafte Gestalt annimmt. Denn gleichsam stellen diese Vorstellungen immer eine „Verweltlichung“ dar. Man sollte also beachten, dass (obwohl der Sprachgebrauch dies anders suggeriert) die Energie eine abstrakte mathematische Größe ist, die „auf wundersame Weise“ für ein abgeschlossenes System konstant ist.[1] Damit stellt die Energie eines der bedeutendsten und mächtigsten Konzepte der Naturwissenschaften dar. Denn die Energieerhaltung bildet das Fundament für die Betrachtung sämtlicher Prozesse und Phänomene unserer Welt und gilt bis heute als exaktes Gesetz, das immer und überall erfüllt ist (Feynman et al., 1967).

Was ist Energie? – Physikalische Definition

Auch wenn eine qualitative Aussage, was Energie *ist*, nicht unbedingt sinnvoll ist, so kann ihr dennoch ein numerischer Wert zugeordnet werden. Allgemein ergibt sich die Energie aus dem Prinzip der verrichteten Arbeit eines physikalischen Systems, d. h. wenn eine Kraft $\vec{F}$ entlang eines Weges $\vec{s}$ wirkt. Dann ist die Energie die Stammfunktion, also das unbestimmte Integral, der Kraft (bzw. der zeitlichen Ableitung des Impulses $\vec{p}$) nach dem Weg:

$$E = \int \vec{F}(\vec{s})\ \mathrm{d}\vec{s} = \int \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\vec{p}(t)\ \mathrm{d}\vec{s} \tag{4.1}$$

Je nachdem, um welche Kraft es sich handelt, ergeben sich verschiedene Formen von Energie. Hebt man beispielsweise einen Ball der Masse m in der Nähe der Erdoberfläche um die Höhe h an, so ergibt sich mit der Gravitationskraft $\vec{F}_g = m \cdot \vec{g}$ die Energie $E_{\mathrm{pot}} = m \cdot g \cdot h$, die dem System Erde-Ball zugeführt wird (potenzielle Energie). Wird der Ball fallen gelassen, kann diese Energie umgewandelt werden, bspw. in kinetische Energie. Im reibungsfreien Fall ergibt sich diese zu $E_{\mathrm{kin}} = \frac{m}{2} \cdot v^2$ aus der rechten Seite von Gl. 4.1.[2]

Energieerhaltung, -umwandlung und -übertragung

Das Prinzip der Energieerhaltung gibt nun vor, dass im reibungsfreien Fall die gesamte (vorher aufgewendete) potenzielle Energie in kinetische Energie umgewandelt werden kann, wenn der Ball wieder auf die Höhe $h = 0$ zurück fällt. Die

[1] Die „auf wundersame Weise“ geht auf die mathematische Beschreibung zurück und resultiert aus dem Noether-Theorem und der Zeitinvarianz der Lagrangefunktion (Kuypers, 2016, 92f), siehe weiter unten.

[2] Wegen $\int \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\vec{p}(t)\ \mathrm{d}\vec{s} = m \cdot \int \frac{\mathrm{d}\vec{s}(t)}{\mathrm{d}t}\ \mathrm{d}\vec{v} = m \cdot \int \vec{v}\ \mathrm{d}\vec{v}$ (in einfachen Fällen).

Energieerhaltung führt also zu einer Umwandlung der einen Energieform in die andere. In einer alternativen Formulierung kann man auch davon sprechen, dass potenzielle Energie aus dem Gravitationsfeld auf die Bewegung des Balles übertragen wird. Diese stammt dabei aus dem Gravitationsfeld, das sich durch die Konstellation von Ball und Erde ergibt. Sie ist also zu Beginn im System Ball-Erde gespeichert. Mathematisch wird dieser Prozess durch eine Gleichung ausgedrückt, bei der die zwei ineinander überführten Formen gleichgesetzt werden[3]:

$$\begin{aligned} E_{\text{pot,nachher}} - E_{\text{pot,vorher}} &= E_{\text{kin,nachher}} - E_{\text{kin,vorher}} \\ m \cdot g \cdot h &= \frac{m}{2} \cdot v^2 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Dieses Prinzip lässt sich auf alle Prozesse erweitern, bei denen Energie übertragen oder umgewandelt wird. So kann auch die Erwärmung des Untergrunds durch einen rollenden Ball beispielsweise grob damit beschrieben werden, dass die kinetische Energie des Balles über die Reibung auf den Boden übertragen wird.
Klassisch wird (auch im traditionellen Physikunterricht) zwischen Energieübertragung und -umwandlung unterschieden. Von Übertragung spricht man, wenn Energie von einem System oder Objekt auf ein anders übertragen wird. Von Umwandlung wird gesprochen, wenn Energie eines Systems oder Objektes seine Erscheinungsform ändert. So wird beim letzten Beispiel Energie vom Ball auf den Boden übertragen; die Energie wechselt das betrachtete System. Der Ball gibt also Energie ab (und wird dabei langsamer) und der Boden nimmt Energie auf (er wird wärmer). Beim fallenden Ball würde man traditionell eher von Umwandlung sprechen, da hier die potenzielle Energie des Balles in dessen Bewegungsenergie umgewandelt wird; es findet kein Systemwechsel statt. Das Prinzip der Umwandlung (Ändern der Erscheinungsform der Energie) ist nach dieser Modellierung deshalb notwendig, weil beispielsweise beim fallenden Ball (oder immer, wenn das Bezugssystem nicht offensichtlich ist) nicht klar ist, dass das Gravitationsfeld selbst (als Konstellation von Ball und Erde) Energie trägt und abgibt und nicht der Ball als Objekt selbst. Es wird im Verlaufe der fachlichen Klärung ersichtlich werden, dass die Unterscheidung von Umwandlung und Übertragung mit dem Energie-Feld-Ansatz obsolet wird, wenn man die Interaktion mit Feldern betrachtet. So könnte man auch hier von der Übertragung der Energie zwischen Gravitationsfeld und Ball bzw. seiner Bewegung sprechen, was ohne die Feldidee im traditionellen Energieunterricht allerdings nicht möglich ist.[4]

[3] Der Zahlenwert der Energie, der vorher als potenzielle Energie bezeichnet wurde, wird dann zu kinetischer Energie ($v_{\text{vorher}} = 0$ und $v_{\text{nachher}} =: v$).

[4] Dieser Gedanke wird auch von Swackhamer (2005) und Nordine et al. (2019) thematisiert.

Die Konsequenz der vorangegangen Überlegungen besitzt eine große Mächtigkeit, denn so lassen sich durch das Prinzip der Energieerhaltung mit Hilfe der Energieübertragung Gleichungen und damit Gesetze für alle Phänomene aufstellen, bei denen Energie übertragen bzw. umgewandelt wird. Die Energieerhaltung als Prinzip ergibt sich als Konsequenz des Noether-Theorems und der Homogenität der Zeit aus der Zeitinvarianz der Lagrangefunktion eines abgeschlossenen Systems (Kuypers, 2016, 92f). Das bedeutet, die Gesamtenergie ist erhalten, wenn es keinen Energieaustausch über die Grenzen des Systems gibt; ebenso wie kein Bauklotz aus dem Zimmer verschwindet (vgl. phänomenologische Anekdote von Feynman).
Damit wird es (wie bei Gl. 4.2) möglich, Informationen über den Ablauf eines Prozesses zu gewinnen; hier beispielsweise, wie schnell der Ball sich beim Auftreffen bewegt. Zieht man den Lagrange- bzw. Hamilton-Formalismus hinzu, lassen sich aus der kinetischen und potenziellen Energie die Bewegungsgleichungen eines Prozesses bestimmen und somit auch Vorhersagen über die Bewegung bzw. das Verhalten eines Systems und seiner Bestandteile treffen (vgl. z. B. Kuypers, 2016). Dies ist wohl eines der bedeutendsten Attribute des Konzeptes der Energie und spielt dementsprechend in den meisten physikalischen Betrachtungen eine wesentliche Rolle.
Um physikalische Phänomene beschreiben zu können, ist also die Kenntnis über die kinetischen und potenziellen Energien eines zu betrachtenden Systems notwendig. Die Bestimmung der potenziellen Energie hängt dabei mit der Betrachtung von Kräften bzw. Wechselwirkungen und den damit zusammenhängenden physikalischen Feldern zusammen. Diese werden im nächsten Abschnitt erläutert und mit der Energie verknüpft.

4.1.2 Kraft und Wechselwirkung

Neben der Energie spielt auch das Kraftkonzept in der Physik eine zentrale Rolle. Insbesondere die Newton'schen Axiome sind unerlässlich für die Beschreibung dynamischer Prozesse. Der Begriff der Kraft bzw. Wechselwirkung spielt aber auch deshalb eine fundamentale Rolle, weil er die Mechanismen beschreibt, die physikalischen Prozessen zu Grunde liegen: die vier fundamentalen Wechselwirkungen. Diese etablieren sich im Rahmen des Standardmodells der Teilchenphysik und umfassen die Gravitation, die elektromagnetische, die starke und die schwache Wechselwirkung (z. B. Meschede, 2006a). Dabei beschreibt die Gravitation die Wechselwirkung zwischen Massen bzw. im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie (ART) von Energie und die elektromagnetische Wechselwirkung die Kräfte zwischen stationären und bewegten Ladungen bzw. Magneten. Die starke

Wechselwirkung erklärt die Interaktion und Bindung von Quarks, die schwache Wechselwirkung beschreibt kurzreichweitige Zerfalls- und Umwandlungsprozesse wie beispielsweise den Beta-Zerfall. Auch wenn hier meist von fundamentalen Grundkräften die Rede ist, so beziehen sich die entsprechenden Theorien im Kern weniger auf die Prinzipien der Newton'schen Mechanik sondern vielmehr auf die Beschreibung der Wechselwirkungen von Feldern durch sogenannte Austauschteilchen (Eichbosonen). So werden Kräfte zwischen Ladungen im Rahmen der Elektrodynamik über die elektromagnetische Wechselwirkung und das Photon als Austauschteilchen der entsprechenden Kraft beschrieben. Für die starke Wechselwirkung nehmen die Gluonen die Rolle der Austauschteilchen ein und die schwache Wechselwirkung wird durch den Austausch von Z- bzw. W-Bosonen beschrieben. Eine Sonderrolle nimmt derzeitig noch die Gravitation ein, für die zwar das Graviton als Austauschteilchen postuliert, aber noch nicht nachgewiesen ist. Hier erklärt nach wie vor die allgemeine Relativitätstheorie die Wechselwirkung zwischen Massen und deren Energie. Zusammen mit der Theorie von Peter Higgs zum Higgs-Mechanismus, der den Elementarteilchen ihre Masse verleiht, stellen die vier Wechselwirkungen den aktuellsten und für das Standardmodell wesentlichen Rahmen dar, um unsere Welt physikalisch zu erklären.[5]

Streben nach Vereinheitlichung

Seit jeher versucht man in der Physik, Theorien zu entwickeln, welche die verschiedenen Prozesse und Phänomene unserer Welt einheitlich erklären. Egal, ob kosmologische oder nukleare Prozesse, Größenordnungen von Lichtjahren oder Femtometern, Milliarden von Jahren oder Attosekunden – die Physik versucht, Gesetzmäßigkeiten zu finden, welche in der Lage sind, alle Phänomene konsistent und einheitlich zu beschreiben. Aus diesem Grund strebt die Wissenschaft im Einklang mit dem Standardmodell der Elementarteilchen danach, die vier fundamentalen Wechselwirkungen zu vereinen. Der Grund dafür ist zum einen das Streben nach Einfachheit im Sinne einer grundlegenden universellen „Weltformel" (s. *Theory of Everything*, TOE; z. B. Laughlin und Pines, 2000) und zum anderen die Überlegung, dass beim Urknall nur eine Art von Wechselwirkung existiert haben kann, aus der sich dann die heute bekannten vier ausdifferenziert haben.
Bisher ist dies für die elektromagnetische (Quantenelektrodynamik) und die schwache Wechselwirkung (Fermi-Theorie) durch die Vereinigung zu einer elektroschwachen Theorie gelungen. Für die starke Wechselwirkung (Quantenchromodynamik)

[5] Die Ausführungen zu den beschriebenen Wechselwirkungen und ihrer Geltungsbereiche sind auch z. B. in Meschede (2006b), Povh und Soergel (2014) oder Tipler und Mosca (2019) zu finden.

und die Gravitation (ART) gibt es allerdings noch keine Einbettung, auch wenn die Stringtheorie dies versucht. (vgl. Green et al., 2012; Greene, 2015; Louis, 2008)

4.1.3 Felder

Definition und Beschreibung

Wie bereits angedeutet, spielen Felder in der Physik eine bedeutende Rolle. Insbesondere in der Elementarteilchenphysik werden Felder über die entsprechenden Austauschteilchen beschrieben. Hier besitzt der Begriff *Feld* also eher einen abstrakten Charakter, der weniger mit einer geometrischen Interpretation zusammenhängt als dies in der klassischen Physik der Fall ist. Klassisch wird ein Feld als die räumliche (geometrische) und zeitliche Verteilung einer physikalischen Größe verstanden (siehe z. B. Demtröder, 2006; Nolting, 2013). Dabei unterscheidet man zwischen statischen bzw. dynamischen skalaren oder vektoriellen Feldern. Als Beispiel für ein skalares Feld wird oft die Temperaturverteilung in einem geschlossenen Raum zu einem bestimmten Zeitpunkt genannt. Hier kann jedem Punkt des dreidimensionalen Raumes ein Temperaturwert zugeordnet werden. Die entsprechende Verteilung der physikalischen Größe *Temperatur* stellt dann ein Feld dar. Wenn die Verteilung einer bestimmten Gesetzmäßigkeit folgt, kann man diesem auch eine mathematische Formulierung verleihen. So lässt sich dann z. B. über die formale Vorschrift (als Funktion der Temperatur in Abhängigkeit der Raum-Koordinaten) die Temperatur für jeden beliebigen Punkt des Raumes (im Definitionsbereich) berechnen. Besitzt die physikalische Größe nicht nur einen Betrag, sondern auch eine Richtung, spricht man von einem vektoriellen Feld (oder Vektorfeld, siehe z. B. Demtröder, 2006, S. 438). Ein Beispiel dafür ist die Verteilung einer Kraft, beispielsweise das Gravitationsfeld, das jedem Punkt des Raumes einen Kraftvektor der Gravitationskraft mit Betrag (Stärke) und Richtung zuordnet. Geht man nun einen Schritt weiter und bezieht die zeitliche Veränderung der physikalischen Größe und damit des Feldes mit ein, spricht man von einem dynamischen Feld. Für die Temperaturverteilung geschieht dies beispielsweise, wenn ein Fenster geöffnet wird. Dann betrachtet man zusätzlich die Zeitabhängigkeit der Funktionswerte (Temperatur). Gleiches gilt für vektorielle Felder.

Zusammenhang mit der Energie

In der Physik kann jede Verteilung dieser Art als Feld beschrieben werden (vgl. z. B. Nolting, 2013). Am häufigsten geschieht dies allerdings für Kraftfelder, da die Verteilung von Kräften, bspw. Gravitationsfelder von Massen oder elektrische

Felder bei Ladungen, große Relevanz für die Beschreibung von physikalischen Prozessen und Bewegungsabläufen besitzt. Dabei werden für die Veranschaulichung typischerweise Bilder von Feldlinien oder Äquipotenziallinien erstellt, welche die Kraftrichtung bzw. das Potenzial an ausgewählten Punkten des Feldes darstellen. Gearbeitet wird dabei aber mit der mathematischen Formulierung des Feldes, also der Funktionsvorschrift für die zeitliche und räumliche Verteilung $\vec{F}(\vec{x},t)$. In der Elektrodynamik wird durch die Maxwell-Gleichungen beschrieben, dass sich ein elektromagnetisches Feld auch von seinen Quellen lösen und räumlich ausbreiten kann (vgl. z. B. Jackson, 1999; Nolting, 2013).
Wie bereits erwähnt, hängen Kräfte über die Formel 4.1 mit der Energie zusammen. Das bedeutet, wenn sich beispielsweise ein Probekörper, angenommen eine Ladung q, in einem elektrischen Feld befindet, wirkt auf diese die Kraft $\vec{F}(q,\vec{x_q},t)$ an ihrem Ort $\vec{x_q}$ zur Zeit t. Wird die Ladung dann (z. B. durch externe Einwirkung oder durch das Feld selbst) innerhalb des Kraftfeldes von einem Ort $\vec{x_{q,1}}$ nach $\vec{x_{q,2}}$ verschoben, so muss ggf. Arbeit verrichtet werden.[6] Dann wird dem Feld die Energie E zugeführt bzw. entnommen, je nachdem, ob es sich um eine Verschiebung entgegen bzw. in Richtung der wirkenden Kraft handelt. Dabei ist es nur sinnvoll (wie oben erläutert), über die Energiedifferenz zu sprechen, also $\Delta E(\vec{x_{q,2}},\vec{x_{q,1}})$:[7]

$$E = \Delta E(\vec{x}_{q,2},\vec{x}_{q,1}) = \int_{\vec{x}_{q,2}-\vec{x}_{q,1}} \vec{F}(q,\vec{x}_q,t)\ \mathrm{d}\vec{x}_q$$

Um auch formal den Einfluss des Probekörpers zu eliminieren, wird die Feldstärke $\vec{E}$ definiert, mit

$$\vec{E} = \vec{F}/\,\tilde{q}\quad ,$$

wobei $\tilde{q}$ für die Eigenschaft des Probekörpers steht, also z. B. für die elektrische Ladung oder die Masse eines Objektes im (davon unbeeinflussten) Feld.
Betrachtet man die elektromagnetische Strahlung als von seinen Quellen gelöstes Feld, so wird dessen Propagation, also die dynamische Entwicklung des Feldes und Ausbreitung im Raum sowie seine Energie durch den Poynting-Vektor beschrieben (Nolting, 2013).

[6] Nämlich genau dann, wenn $\vec{x_{q,2}} \neq \vec{x_{q,1}}$ und ein Teil des Weges der Verschiebung entlang der Kraft verläuft.

[7] Hier sei erwähnt, dass dazu angenommen wird, dass die Probeladung so klein ist, dass sie nur als kleine Störung des Feldes betrachtet werden kann; deshalb auch der Name „Probeladung“. Ansonsten müsste die durch die Verschiebung verursachte dynamische Veränderung des Feldes selbst auch berücksichtigt werden.

Grenzen der mathematischen Beschreibung

Bei der Betrachtung von Feldern ist die physikalische Herangehensweise meist problemorientiert. Das bedeutet, dass je nach Situation zwischen dem Feld-Probekörper und dem zwei-Körper Bild gewechselt wird. Betrachtet man beispielsweise zwei Körper mit den Massen m_1 und m_2 mit $m_2 \ll m_1$, dann kann der Körper mit m_2 als Probekörper im Gravitationsfeld des Körpers mit m_1 betrachtet werden, da dieser das Feld nur „stört“ und in hinreichender Näherung nicht verändert. Das heißt die Bewegung des Körpers mit m_1 wird nicht durch die Probemasse beeinflusst, sondern nur andersherum. In diesem Fall kann man die Feldstärke des Gravitationsfeldes als konstant ansehen. Für den Fall der Erde, also $m_1 = M_{\text{Erde}}$ ist die Feldstärke gleich der Erdbeschleunigung[8]:

$$\vec{E} = \frac{G \cdot M_{\text{Erde}}}{r_{\text{Erde}}^2} \cdot \vec{e}_r = \vec{g}$$

Damit ergibt sich dann die Kraft auf die Probemasse m_2 zu $\vec{F} = m_2 \cdot \vec{E} = m_2 \cdot \vec{g}$. Diese Formel ist auch im Schulunterricht die typische Formel für die Gravitationskraft. Befindet sich der Probekörper außerdem in Erdnähe und ist die senkrechte Verschiebung $|\Delta\vec{x}| = h$ klein gegen den Erdradius, so ergibt sich die Energie zu $E = |\vec{F}| \cdot h = m_2 \cdot g \cdot h$.

Diese Vereinfachung gilt allerdings nur für die beschriebenen Einschränkungen und ist damit ein Spezialfall. In der Regel müssen allgemeinere Formulierungen gewählt werden, wie beispielsweise bei der Betrachtung zweier beliebiger Ladungen q_1 und q_2 in einem Abstand r.[9] Hier ergibt sich folgender Zusammenhang für die elektrische Energie E_{el} aus dem Coulomb-Gesetz:

$$E_{\text{el}} = \int \vec{F_{el}}(\vec{s}) \, \mathrm{d}\vec{s} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot g_2}{r}$$

Dabei muss natürlich beachtet werden, dass E_{el} hier zunächst die Stammfunktion darstellt und erst mit bekannter Verschiebung eine Energie berechnet werden kann. Denn hier stellt sich bereits ein Problem heraus, das sich bei der Zuschreibung von Energie zu einem derartigen zwei-Körper-System ergibt: Aufgrund der Singularität bei $r = 0$ in der Formel für die elektrische Kraft weist auch die Stammfunktion aus Gl. 4.1.3 dort eine undefinierte Stelle auf. Für die Beschreibung der meisten Phänomene ist das dadurch beschriebene Fernwirkungsprinzip ausreichend. Da der Wert der elektrischen Energie für $r \to 0$ aber gegen unend-

[8] Mit der Gravitationskonstante G und dem Erdradius r_{Erde} sowie dem Einheitsvektor $\vec{e}_r$.

[9] Die universelle Beschreibung der Energie bei zwei Massen m_1 und m_2 würde analog erfolgen.

lich steigt, lässt sich für $r = 0$ kein sinnvoller Wert berechnen. Somit kann z. B. der Konstellation zweier sich anziehender Ladungen keine maximale Energie zugeordnet werden.[10] Aus diesem Grund ist es bei einem Prozess nur sinnvoll, über Energiedifferenzen, also über die in oder aus dem System übertragene Energie zu sprechen. Die Forderung, auch im Schulunterricht nur über Energiedifferenzen anstelle von absoluten Energien zu sprechen, weil die Physik ohnehin für die Beschreibung von Prozessen an der Energieübertragung interessiert sei, erscheint bereits in den Ausführungen von Quinn (2014). Sinnvoll ist der Ausdruck also erst, wenn man die Energie bestimmt, die übertragen wird, wenn die beiden Ladungen ihren Abstand zueinander verändern:

$$\Delta E_{\mathrm{el}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left(\frac{q_1 \cdot g_2}{r_{\mathrm{nachher}}} - \frac{q_1 \cdot g_2}{r_{\mathrm{vorher}}} \right) \quad ; \quad r_{\mathrm{vorher}} \neq 0 \neq r_{\mathrm{nachher}}$$

4.2 Expert*innen-Interviews

Grundidee der Expert*innen-Interviews

Um die Grenzen der Angemessenheit der Rekonstruktion für das behandelte Thema auszuloten und Anpassungen dementsprechend rechtfertigen zu können, wurden Interviews mit Fachwissenschaftler*innen aus unterschiedlichen Bereichen der Physik (Expert*innen) geführt. Das Ziel war es dabei, mögliche Aussagen und Formulierungen hinsichtlich ihrer Angemessenheit einschätzen zu lassen. Es ging also um die Klärung der Frage „Was darf man sagen und was nicht?“. Dabei spielen auch die Formulierungen, also der Sprachgebrauch, eine wesentliche Rolle. Beispielsweise macht es einen Unterschied, ob man von einer „Verformung“ eines Feldes oder nur von der „Verformung von Feldlinien“ sprechen darf. Die Interviews sollen Aufschluss über den Spielraum der fachlichen Angemessenheit als Grundlage für die didaktische Rekonstruktion der Inhalte für den EFA geben. Somit stellen die Auseinandersetzung mit den fachlichen Inhalten und die Expert*innen-Interviews die Basis für die Konzeption des EFA dar.

Methodische Gestaltung

Die Beschreibung der Methode und Ergebnisse zu den Expert*innen-Interviews wird hier dem Hauptteil der Arbeit vorgegriffen, da die Erkenntnisse als Teil der fachlichen Klärung Voraussetzung für die didaktische Rekonstruktion sind. Die methodische Gestaltung der eigentlichen Arbeit folgt dann in Kapitel 5. Die

[10] Denn die maximale Energie ergibt sich, wenn sich die Ladungen bis $r = 0$ annähern.

Interviews wurden als Leitfaden-gestützte Einzelinterviews auf deutsch bzw. englisch geführt, abhängig von der bevorzugten Sprache der jeweiligen Person. Ziel war es, herauszufinden, wie der fachlich vertretbare Spielraum der didaktischen Rekonstruktion aussieht, indem Expert*innen vorgefertigte Fragen bzw. Aussagen hinsichtlich ihrer fachlichen Angemessenheit beurteilten. Diese Aussagen sind vereinfachte oder didaktisch rekonstruierte Aussagen, deren fachliche Angemessenheit und Akzeptanz in der Fachgemeinschaft diskutiert werden kann (z. B. die Aussage „Das Gravitationsfeld trägt Energie.“). Dazu wurden neben mehreren offenen Fragen überwiegend Fragen formuliert, die mit „ja“ oder „nein“ beantwortet werden können (s. unten), um möglichst eindeutige Aussagen als Antworten zu erzielen.

Die Interviews wurden nicht transkribiert, sondern Notizen der wesentlichen Äußerungen während der Interviews festgehalten und die Aussagen anschließend analysiert. Deswegen gibt es in den folgenden Ausführungen zwar Verweise auf die jeweiligen Expert*innen, aber keine ausführlichen wörtlichen Zitate. Die Analyse erfolgte qualitativ inhaltsanalytisch nach Kuckartz (2014). Das heißt, die Antworten auf die offenen Fragen (z. B. zu möglichen Kontexten eines bestimmten Mechanismus) wurden gesammelt und induktiv kategorisiert. Bei den geschlossenen (ja/nein) Fragen sollten die Expert*innen ihre Einschätzung abgeben und (ggf. auf Nachfrage) Bedenken äußern und erläutern, wenn keine uneingeschränkte Zustimmung vorlag. So ergab sich dann zum einen eine übersichtliche Kodierung für die Akzeptanz einzelner Aspekte („ja“, „mit Einschränkungen“ oder „nein“) und zum anderen die dazugehörigen Erläuterungen aus fachlicher Sicht der Expert*innen. Die Kodierung folgt dabei den folgenden Kriterien: Die Einschätzungen zu den ja/nein Fragen wurde in die drei Kategorien eingeteilt. Ein „ja“ ergibt sich bei Einschätzungen zu uneingeschränkter bzw. minimal adaptiver Implementation. Ein „mit Einschränkungen“ folgt dann, wenn die Idee nicht uneingeschränkt aber unter Beachtung etwaiger Spezifika umsetzbar ist. Ein „nein“ ergibt sich, wenn die Idee gänzlich (z. B. konzeptionell) abgelehnt wird und auch im Gespräch kein Kompromiss gefunden wird. Die Anmerkungen von Expert*innen wurden dabei kategorisiert und in unwesentliche und wesentliche Aspekte eingeteilt. Die unwesentlichen Aspekte waren Ergänzungen oder Anmerkungen, die für die Implementation der Idee nicht relevant sind. Die wesentlichen Aspekte wurden für die Analyse aufgenommen, gelistet und bei der jeweiligen Kodierung referenziert. Es wurden also (nach Kuckartz, 2014) induktiv Kategorien von Anmerkungen der Expert*innen gebildet. Die Gesamtheit der Aspekte diente dann als Grundlage für die weitere Analyse. Gingen die Expert*innen-Einschätzungen auseinander,

Expert*in	Fachbereich	akad. Bezeichnung
E1	Mathematische Physik	Professor
E2	Teilchenphysik (exp)	Doktor
E3	Gravitationsphysik	Professor (emerit)
E4	Teilchenphysik (exp)	Professor
E5	Teilchenphysik (theo)	Professorin
E6	Didaktik	Doktor
E7	Teilchenphysik (theo)	Professor
E8	Teilchenphysik (theo)	Professor
E9	Teilchenphysik (theo)	Doktorin
E10	Astrophysik	Professor

Tabelle 4.1: Teilnehmer*innen der Expert*innen-Interviews. Stichprobe aus zehn Expert*innen mit 7 Professor*innen und 3 Doktor*innen. Es wird zwischen theoretischer (theo) und experimenteller (exp) Teilchenphysik unterschieden. Das Interview mit E5 wurde auf Englisch, die anderen auf Deutsch durchgeführt.

wurden die Vor- und Nachteile des betreffenden Aspektes abgewogen und eine Umsetzung im EFA hinsichtlich seiner Vertretbarkeit eingeschätzt. Die Abwägungen stellen den ersten Schritt der didaktischen Rekonstruktion der Inhalte für den EFA dar.

Die nachfolgende Analyse stellt die Erkenntnisse aus der Expert*innen-Befragung zusammen. Dabei werden Beobachtungen und Interpretationen zwecks Nachvollziehbarkeit bewusst gebündelt dargestellt, um die Schlussfolgerungen direkt aufzuzeigen. Das Resümee am Ende fasst dann die Erkenntnisse zusammen.

4.2.1 Beschreibung der Stichprobe

Die befragten Expert*innen sind promovierte Fachwissenschaftler*innen unterschiedlicher Fachbereiche der Physik, teilweise auch mit Bezug zur Didaktik. Tabelle 4.1 stellt die interviewten Personen und ihre Fachbereiche zusammen. Es wurden insgesamt 23 Wissenschaftler*innen der theoretischen und experimentellen Teilchenphysik sowie deren Didaktik, der Gravitationsphysik, Astrophysik und mathematischen Physik schriftlich kontaktiert und zu einem Online-Interview eingeladen. Bis auf eine Person lehren und forschen alle Expert*innen in Deutschland und Österreich, es wurden aber auch internationale Wissenschaftler*innen mit renommierter Position kontaktiert, die eine besondere Rolle für die Schnittstelle von Didaktik und Physik spielen. Eine*r dieser Expert*innen konnte zur Befragung beitragen. Insgesamt nahmen zehn Promovierte bzw. Professor*innen an einem Interview teil.

4.2.2 Erstellung der Interview-Fragen

In den Interviews wurden Fragen geklärt, bei denen die Angemessenheit aus fachlicher Sicht nicht eindeutig ist. Um die Einschätzung der Expert*innen zu erhalten, wurden neben einigen offenen Fragen überwiegend Aussagen formuliert, welche dann von diesen mit (bedingter) Zustimmung oder Ablehnung kommentiert werden sollten. Die Fragen bzw. Aussagen beziehen sich dabei neben Klärungen zu Energie und Feldern hauptsächlich auf Themenfelder der Teilchenphysik, um folgende Fragen zu beantworten:

1. Inwiefern darf man dem Gravitationsfeld Energie zuschreiben?
2. Inwiefern darf man dem Higgsfeld Energie zuschreiben?
3. Inwiefern darf man Prozesse der starken Wechselwirkung (z. B. Kernzerfälle wie den Alpha-Zerfall) mit dem Gluon-Feld beschreiben?
4. Inwiefern darf man Prozesse der schwachen Wechselwirkung (z. B. Beta-Zerfall) mit den bekannten Feldern beschreiben?

Der Interviewleitfaden findet sich in Anhang C und gliedert sich wie folgt:[11]

Struktur Interviewleitfaden der Expert*innen-Interviews

0. Leitfrage	(I und II)
1. Fragen zum Hauptkonzept	
1.1 Energie in verschiedenen Feldern	
1.2 Feld-Verformung	
1.3 $E = mc^2$	
1.4 Austauschteilchen	
2. Fragen zu einzelnen Feldern	
2.1 Gravitationsfeld	(a-e)
2.2 Higgsfeld	(ai-aii, b und c)
2.3 Gluon-Feld	(a, bi-biii, c)
2.4 Beta-Zerfall	(a und b)
3. Fragen zu Anwendungsbereichen	(1 bis 6)

[11] Für die Gliederung im Detail vgl. auch die Kodierung in Tab. 4.2.

Leitfrage

Jedes Interview beginnt mit der folgenden Leitfrage (Hauptidee des EFA):

0. Ist es legitim, Energie nur über Felder und Bewegungsenergie zu unterrichten?
   I. Was sind Ihre ersten Gedanken im Hinblick darauf, Energie NUR über Bewegung und Felder zu unterrichten?
   II. Welche Grenzfälle gibt es, bei denen eine Erklärung mit Feldern schwierig wird?

Diese Frage gab den Interviewten einen Eindruck vom zu erwartenden Inhalt. Hier konnte abgeschätzt werden, wie die Expert*innen die Sinnhaftigkeit der Hauptidee einordnen.

Fragen zum Hauptkonzept

Darauf folgten Fragen zum Konzept, beginnend mit der Frage, ob man sagen darf, dass Energie in elektrischen, magnetischen, Gravitationsfeldern, etc. gespeichert ist. In diesem Sinne wurde anschließend evaluiert, wie die Expert*innen die „Verformung“ von Feldern bei Energieübertragung sehen. Dabei wurde auf die Veränderung der Feldlinien Bezug genommen, deren Struktur sich verändert, wenn sich die Position oder Stärke der Quellen verändert. Hier wurde auch eingeschätzt, inwieweit der Sprachgebrauch zulässig ist.
Darauf folgten zwei kurze Abfragen, zum einen zur Energie-Masse-Äquivalenz (Ist diese für Feld- und Bewegungsenergie gleichermaßen anwendbar?) und zum anderen zur Abschätzung der Erweiterbarkeit des EFA für Themen der Teilchenphysik. Bei letzterer wurde gefragt, ob man Austauschteilchen immer als lokale Anregung eines Feldes betrachten dürfe. Wenn dies der Fall ist, würde das ein Potenzial zur späteren Ausweitung des EFA (in Folgeprojekten) auf Konzepte und Phänomene der Elementarteilchenphysik bedeuten. Darüber hinaus könnte dann durch die Anregung des Energiezustandes der Übergang von den klassischen Feldern zu den Austauschteilchen der modernen Physik geschaffen werden. Dies ist zwar nur ein Ausblick, diente aber als Einschätzung der Erweiterbarkeit und damit der Tragfähigkeit des Energie-Feld-Ansatzes.

Fragen zu einzelnen Feldern

Zunächst wurden über den EFA hinausgehende aber für die fachliche Klärung interessante Fragen zum Gravitationsfeld gestellt. Dabei wurde auch ein Eindruck

gewonnen, inwieweit die klassischen oder modernen Feldtheorien mit der ART vereinbar sind und welche Konzeption für den EFA implementierbar ist. Außerdem wurden die Kontexte *Gravitationslinse* und *Entstehung von Jets* als potenzielle Beispiele für den Zusammenhang von Masse und Energie besprochen. Es folgte die Klärung der Einbettung und Rolle des Higgsfeldes im Vergleich zu den anderen Feldern. Dadurch, dass das Higgsfeld den Elementarteilchen durch den Higgs-Mechanismus ihre Masse verleiht und keiner Quelle bedarf, nimmt es unter den Feldern eine Sonderrolle ein. Hier wurde eingeordnet, inwieweit die Theorie im EFA implementiert werden kann.
Ähnlich verhält es sich mit der Betrachtung des Gluon-Feldes. Hier ist der Zusammenhang mit den Quarks und deren Wechselwirkung von Interesse. Es wurde geklärt, welche Rolle das Gluon-Feld bei nuklearen Zerfallsprozessen spielt bzw. wie hier die Theorie vereinfacht beschrieben werden darf. Denn die Wechselwirkung der Quarks über die Gluonen als Eichbosonen der starken Wechselwirkung erfolgt primär innerhalb der Nukleonen (Proton oder Neutron). Inwieweit man das Konzept auch auf internukleare Prozesse erweitern darf, ist fachlich nicht trivial, denn hier spielt neben den Gluonen auch die elektromagnetische Wechselwirkung der Quarks eine Rolle. Zusätzlich wurde geklärt, wie die Zusammensetzung der Materie über die Energie in Gluon-Feldern erklärt werden darf, um dies ggf. als Motivation bzw. Beispiel für den EFA zu verwenden. Hier ist der Zusammenhang von Masse und Energie von Interesse, denn die Feldenergie im Gluon-Feld kann gewissermaßen auf die Masse der Atome projiziert werden; in welchem Ausmaß dies zulässig ist, sollte von den Expert*innen erläutert werden.
In einem weiteren Teil soll der Zusammenhang des Beta-Zerfalls mit dem Gluon-Feld bestimmt werden. Da es sich beim Beta-Zerfall um einen Prozess der schwachen Wechselwirkung handelt, spielt dieses hier eigentlich keine Rolle. Andererseits geht der Prozess mit der Umwandlung von Quarks auf subnuklearer Ebene einher. Es bleibt zu erwägen, ob bzw. inwieweit hier eine Verbindung hergestellt werden darf, um die Betrachtung dieses Prozesses ggf. aus der Energieperspektive im EFA abzudecken.

Fragen zu Anwendungsbereichen

Zum Schluss wurden die Expert*innen nach möglichen Kontexten der einzelnen Felder gefragt. Bei dieser offenen Frage gaben sie Vorschläge, welche (aus ihrer Sicht) interessanten Beispiele es für den Schulunterricht gibt. Die Ergebnisse wurden gesammelt.

4.2.3 Auswertung der Interviews: Ersteindruck und Kodierung

Die Analyse der Interviews folgte der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Methode. Hier sei angemerkt, dass die fachlichen Aussagen allgemeines Wissen darstellen oder den Aussagen der Interviewten zu entnehmen waren. Spezielle Informationen darüber hinaus sind durch entsprechende Referenzen gekennzeichnet. Zunächst wird anhand der Kodierung zwecks Überblick ein Ersteindruck der Ergebnisse gegeben und wesentliche Auffälligkeiten in Kürze vor dem Hintergrund der eigentlichen Analyse erläutert, bevor dann anschließend die Analyse der einzelnen Aspekte anschließt. Diese folgt dabei der Interviewstruktur, sodass hier die Teilbereiche nacheinander beleuchtet werden. Die Gliederung und Benennung der einzelnen Fragen und Aussagen der Interviews kann auch dem Interviewleifaden (siehe Anhang C) bzw. der Struktur aus Abschnitt 4.2.2 entnommen werden.[12]
Tabelle 4.2 gibt einen Überblick über die Antworten der Expert*innen. Insgesamt fällt auf, dass die Expert*innen den Aussagen überwiegend zustimmen. Auch die Hauptaussage des EFA (Leitfrage) wird von allen bis auf einen (generell eher kritischen) Experten geteilt. Aspekte, die wenig Zustimmung erfahren, sind die Verformung des Feldes (1.2), das Beispiel der Gravitationslinse (2.1d), Ruheenergie und Higgsfeld (2.2ai), die Bindungsenergie des Kerns (2.3biii) und der Beta-Zerfall sowie das Gluon-Feld (2.4a); genaueres wird unten erläutert.

Es stellen sich also einzelne Aussagen heraus, die von den Expert*innen überwiegend als problematisch eingestuft werden oder, wie im Fall eines konkreten Aspektes zum Higgsfeld (2.2ai), sogar fast einheitlich gänzlich abgelehnt werden. Andere Aspekte dagegen scheinen wiederum vollkommen unproblematisch zu sein. Diese Erkenntnis zeigt bereits hier, dass einige Ideen für die Konzeption des EFA in Frage kommen, andere nicht bzw. einer entsprechenden Abwägung oder Anpassung bedürfen. Jedenfalls zeigt die Kodierung eine überwiegende Einigkeit, d. h. einen Konsens der Expert*innen. So kann hier wohl davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse eine gewisse Aussagekraft besitzen und eine Implementation für den EFA nach Umsetzung der Erkenntnisse als fachlich abgesichert gelten kann. Im Folgenden werden die einzelnen Aspekte im Detail beleuchtet und analysiert.

[12] Zur sprachlichen Gestaltung dieser Arbeit: Die Darstellung von methodischem Vorgehen wird generell als abgeschlossene Handlung im Präteritum beschrieben. Der Bericht und die Analyse von Ergebnissen werden hingegen im Präsenz formuliert, da es sich um die aktuelle Beschreibung eines Datenmenge handelt, z. B. „Experte E8 gibt an, dass...“

				E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
Thema	**Aspekt**	**Frage**											
0	I			+	+	+	+	+	~	+	+	+	+
	II												
1	1 Felder	a		+	+	+	+		+	+	+	+	+
		b		+	+	+	+		+	+	+	+	+
		c		+	+	+	+		+	+	+	+	+
		d		-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
		e		+	+	+	+		+	+	+	+	
		f		+	+		+	+	+	+	+	+	
	2 Feld-Verformung			+	~	+	~	+	~	~		~	
	3 E = m c²			+	+	+	+	+		+	+	+	+
	4 Austauschteilchen			+	+	+	+			-		~	
2	1 Gravitationsfeld	a		+	+	+	+	+	+	+		+	+
		b		+	+	+	+	+	-	+	+	+	+
		c		+	+	+		+	-	+	+		+
		d		-	~	~				~	~	~	~
		e				~				~	+		
	2 Higgsfeld	a	i	-	-		-		-	-	+	-	
			ii	+	+	+	+		+	+	+	+	
			iii	+	+	+	+		+	+	+	+	+
		b											
		c											
	3 Gluon-Feld	a		+	+		+	+	+	+	+	+	
		b	i	+	+		+	+	+	+	+	+	
			ii	+	+		+	+	+	+	+	+	
			iii	+	+		~	~	~	~	~	~	
		c											
	4 Beta-Zerfall	a		-			-	-	-	-	-	+	
		b											
3	1 elektrisch												
	2 magnetisch												
	3 Elektromagnetisch												
	4 Gravitation												
	5 Higgs												
	6 Gluon												

Tabelle 4.2: Kodierung der Expert*innen-Interviews zur fachlichen Klärung. Die Tabelle zeigt die verschiedenen Aspekte der Befragung und die Zustimmung (+), eingeschränkte Zustimmung (~) bzw. Ablehnung (-) der Expert*innen. Offene Fragen sind blau gekennzeichnet.

4.2.4 Leitfrage

Das Interview beginnt mit der Leitfrage in zwei offenen Teilen (I und II). Teil I prüft die ad hoc Akzeptanz der Hauptaussage des EFA, dass Energie nur in Felder und Bewegungen gefasst werden kann. Hier betonen neun der zehn Expert*innen, dass sie die Idee interessant und die Reduktion der Energieformen sinnvoll fänden. Hier wird von E4 auch herausgestellt, dass ein Verständnis von Feldern i. A. essenziell für das Verständnis von Austauschteilchen sei. Es wird allerdings auch angemerkt, dass bestimmte Aspekte für die Schule nur bedingt geeignet seien: So wird von E3 angemerkt, dass ein Verständnis von Feldern bis zur Elektrodynamik nicht notwendig sei. Außerdem sei das Konzept der Energie mit dem Konzept des Feldes gemeinsam zu abstrakt (E8, E9) bzw. die Konzepte von Gluonen- und Higgsfeld zu kompliziert (E5, E9). Das Higgsfeld biete dabei auch keinen besonderen Mehrwert, was die Erklärungsgewalt angehe (E2, E9). Diese Bedenken lassen sich großteils so zusammenfassen, dass die Konzepte teilweise als zu abstrakt oder kompliziert für den Schulunterricht angesehen werden. Diese Anmerkungen sind zu berücksichtigen, stellen allerdings kein Ausschlusskriterium für eine Implementation dar. Denn durch eine geschickte didaktische Rekonstruktion könnte es trotzdem möglich sein, diese lernwirksam zu unterrichten. Die Grundidee des EFA wird von den Expert*innen jedenfalls als sinnvoll erachtet.

Bezüglich der Limitationen und Grenzfälle (Leitidee Teil II) äußern die Expert*innen drei Punkte: E1 merkt an, dass die Beschreibung der Gravitation über ein klassisches Feld schwierig sei, da hier für eine angemessene Beschreibung die ART notwendig ist. Weitere Details dazu finden sich unter dem entsprechenden Punkt zu den Einzelfeldern (siehe Abschn. 4.2.6). Andere Expert*innen merken an, dass das Higgsfeld im Zusammenhang mit der Energie Schwierigkeiten mit sich bringe. Hier sei zu beachten, dass das Higgsfeld durch den nicht-verschwindenden Vakuum-Erwartungswert selbst Energie trage, welche aber nicht mit der Ruheenerige der Elementarteilchen zusammenhänge (E1). Für die Ruhemasse sei der Kopplungsmechanismus (Higgs-Mechanismus) verantwortlich und nicht nur das Feld selbst (E1, E6, E9). Außerdem gestaltet sich die Energieübertragung hier anders als bei den anderen Feldern (E2). Die Ausdifferenzierung dieser Punkte findet sich bei der Diskussion zum Gravitationsfeld (siehe Abschn. 4.2.6). Darüber hinaus werden Bedenken im Kontext der schwachen Wechselwirkung geäußert, da hier im Gegensatz zu den anderen Feldern keine Bindungszustände beschrieben werden und sich diese Wechselwirkung dadurch auch phänomenologisch anders äußere (E6). Hier sei es vielmehr sinnvoll, über Austauschteilchen als über Felder zu sprechen (E7).

4.2.5 Fragen zum Hauptkonzept

Energie in Feldern

Wie man der Kodierung in Tabelle 4.2 entnehmen kann, stimmen die Expert*innen einheitlich der Aussage zu, dass Energie in einem Feld gespeichert sein könne (vgl. Frage 1.1a-f). Lediglich beim Gravitationsfeld hält E1 fest, dass dieses keine Energie trage, da es keine Energiedichte im klassischen Sinne besitze. Hier sei die Raumkrümmung und entsprechend eine Beschreibung über die ART notwendig. Eine vollständige Beschreibung einer Feldquantisierung für das Gravitationsfeld existiere noch nicht und ließe sich nur durch das postulierte Graviton lösen. Bezüglich des Higgsfeldes wird darauf hingewiesen, dass das Feld selbst Energie trage, für die Ruheenergie der Elementarteilchen aber auch der Higgs-Mechanismus relevant sei.

Verformung des Feldes

Bei Energieübertragung über die Verformung eines Feldes zu sprechen, stößt bei der Hälfte der Expert*innen auf Skepsis. Hier wird betont, dass der Begriff Verformung eine Abweichung von einer Symmetrie suggeriere (E2, E4) und deshalb auch mechanisch konnotiert sei (E6, E7, E9). Beim Gluon-Feld von Stauchung oder Streckung zu sprechen sei vertretbar, generell sei es aber besser, von einer Veränderung zu sprechen.[13]

Energie-Masse-Äquivalenz

Die Energie-Masse-Äquivalenz sowohl für Bewegungen als auch für Felder gleichermaßen zu verwenden, stößt auf einheitliche Zustimmung. Daraus kann gefolgert werden, dass es also in Ordnung ist, sowohl Bewegungen als auch Feldern Energie zuzuschreiben und diese auch (abhängig vom Kontext) mit Masse zu assoziieren, bzw. umgekehrt.

Austauschteilchen als Anregung eines Feldes

Wie bereits oben erwähnt, soll für die Abschätzung der fachlichen Erweiterbarkeit des EFA überprüft werden, inwieweit man die Austauschteilchen der verschiedenen Wechselwirkungen als (lokale) Anregung des entsprechende Feldes modellieren darf. Hierzu haben die Expert*innen eine klare Meinung: Es sei nicht sinnvoll, von einer „lokalen“ Anregung zu sprechen, da die Teilchen selbst das Feld darstellen

[13] Diese Frage wurde durch das Konzept von Nordine et al. (2019) motiviert, bei dem die „Verformung“ eine wesentliche Rolle spielt.

(E9, E7). So seien beispielsweise die Photonen in Summe das elektrische Feld. In der Quantenfeldtheorie (QFT) werden die Felder durch die Austauschteilchen repräsentiert. Die Teilchenbewegung entspreche dann der Ausbreitung und Reichweite des Feldes. Die Energie des Feldes stecke also in den Teilchen. Expert*in E7 merkt zusätzlich an, dass es im Rahmen des Schulunterrichtes durchaus angemessen wäre, über Felder und deren Energie zu sprechen anstatt (wie eigentlich treffender) über ihre Eichbosonen und deren Masse bzw. Energie. Es kann insgesamt gefolgert werden, dass es gemäß den Expert*innen legitim ist, Felder und deren Energie mit den Austauschteilchen in Verbindung zu bringen, allerdings in einem allgemeineren und eher theoretischen als anschaulichen Sinne.

4.2.6 Fragen zu den einzelnen Feldern

Gravitationsfeld

Da sich die Aspekte 2.1a bis 2.1c als wenig problematisch herausstellen, wird deren Ergebnis hier kurz gebündelt: Dass das Graviton das postulierte Austauschteilchen der Gravitation ist, wird wie erwartet auch von den Expert*innen bekundet. Auch die Aussage, dass man dies als Analogie zum Photon (als Austauschteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung) betrachten kann, wird von fast allen Expert*innen geteilt, ebenso wie die Analogie, dass Gravitationswellen mit den elektromagnetischen Wellen im Elektromagnetismus vergleichbar sind. Lediglich E6, der tendenziell auch nach eigener Aussage eher kritisch ist, merkt hier an, dass die Situation bei der Gravitation etwas anders sei. Denn eine Gravitationswelle sei eine Fluktuation im metrischen Tensor[14], während eine elektromagnetische Welle anders modelliert sei. Hier wird von den Expert*innen auf die unterschiedliche Natur der beiden Theorien (ART und Elektromagnetismus) Bezug genommen. Folglich muss ein Vergleich innerhalb seiner Grenzen erfolgen, was allerdings eine (ggf. eingeschränkte) Analogiebildung nicht ausschließt.
Die Diskussion der zwei Kontexte „Gravitationslinse“ (2.1d) und „Entstehung von Jets“ (2.1e) erzeugte im Vergleich mehr Dissonanz bei den Befragten. Für die Ablenkung der Strahlung bei einer Gravitationslinse wurde die Vertretbarkeit folgender Aussage diskutiert:

> Elektromagnetische Strahlung verhält sich durch ihre Energie „masseähnlich“. Durch die quasi-Masse wirkt auf sie die Gravitation (Masse wechselwirkt mit der Strahlung).

[14] Dieser gibt die Struktur der Raumzeit vor und liefert gewissermaßen die Funktionsvorschrift für die Bewegung von Massen.

Hier stimmt keine*r der Expert*innen uneingeschränkt zu. E1 lehnt diese Modellierung gänzlich ab, da hier die Raumkrümmung und nicht die Energie/Masse der Strahlung relevant sei. Die quasi-Masse sei dabei nicht relevant. Die anderen erachten das Beispiel als sinnvoll, nehmen aber von der Betrachtung einer „quasi-Masse“ Abstand, da die Strahlung keine Ruhemasse besitzt. Bei der Gravitation könnte man stattdessen besser über die Wirkung auf Energie sprechen (E3, E8). Hier wäre es in Ordnung, zu sagen, dass die Gravitation an Energie „koppelt“ bzw. auf diese wirkt und damit zur Ablenkung der Strahlung führt (E7, E8). Dabei sei es im Rahmen der ART sowieso sinnvoller, Energien zu betrachten als Massen, da das Konzept der Ruhemasse hier irrelevant sei. Insgesamt solle eher auf die Energie fokussiert werden. Die Berechnung der Ablenkung der Strahlung mit quasi-Masse im klassischen Bild durch die Newton'sche Mechanik und spezielle Relativitätstheorie existiert zwar, bietet aber keine vollständig angemessene Erklärung, da die Berechnungen nur die Hälfte der Ablenkung erklären (Bartelmann und Schneider, 2001; Povh und Soergel, 2014).
Ob man die Entstehung von Jets bei schwarzen Löchern über Felder und Bewegungsenergie erklären kann, sorgt für Uneinigkeit. Die Expert*innen E8 und E10 stimmen dem uneingeschränkt zu. Ein Experte (E7) gibt an, dass man das Phänomen damit erklären müsse, dass nach dem Kollaps bei einer Supernova Energie aus dem System „hinaus getragen“ werden müsse, dies geschehe durch Jets. Experte E3 (Gravitationsphysik) beschreibt den Effekt als Zusammenspiel von Magnetfeld und Akkretionsscheibe, die um das kompakte Objekt kreise. Hier spalten sich also die Meinungen, inwiefern eine vereinfachende Erklärung mit Feldern sinnvoll wäre. Allerdings merken die meisten Befragten auch an, dass sie keine Expert*innen auf diesem Gebiet seien. Die Rückmeldungen von E3 und die Akzeptanz von E10 (Astrophysik) zeigen zwar, dass eine adaptierte Implementation für den EFA möglich wäre, da es sich allerdings um ein vielschichtiges Beispiel handelt, das für Schüler*innen ggf. weniger nahbar ist, wird für den EFA eher auf die Gravitationslinse zurückgegriffen.

Higgsfeld

Um abzuschätzen, welche Aussagen zum Higgsfeld legitim sind, wurden bei Punkt 2.a drei vorstellbare Formulierungen zur Beurteilung gestellt:

- 2.ai Die Ruheenergie (der Elementarteilchen) kommt aus dem Higgsfeld.
- 2.aii Die Ruheenergie kommt durch die Kopplung an das Higgs-Feld (Higgs-Mechanismus) zu Stande.
- 2.aiii Durch das Higgs-Feld erhalten die Elementarteilchen ihre Ruheenergie.

Bei diesen Formulierungen wurden bewusst verschieden starke Aussagen getroffen. Physikalisch angemessen wäre es, das Higgsfeld als eigenständige und im Universum omnipräsente Entität zu beschreiben, da es sowohl (entsprechend des nicht verschwindenden Vakuum-Erwartungswertes; siehe Higgs, 1964) selbst eine Energie trägt als auch durch den Higgs-Mechanismus dafür sorgt, dass die Elementarteilchen des Standardmodells eine Ruhemasse erhalten. Aus diesem Grund lehnen die Expert*innen die erste Aussage (2.ai) ab. Diese Ablehnung erfolgt auch einstimmig bis auf E8, der hier in der Versprachlichung etwas flexibler ist. Die Mehrheit der Expert*innen hält aber daran fest, dass die Energie, welche die Elementarteilchen als Ruhemasse besitzen, nicht dem Higgsfeld entstammt, sondern getrennt davon durch den Higgs-Mechanismus erklärt werden muss. Demzufolge sind die Aussagen 2.ai und 2.aii angemessen. Aus diesem Grund wird für den EFA an der Formulierung 2.ai festgehalten. Hier wird dann auch auf die Omnipräsenz des Higgsfeldes eingegangen, um das Konzeptverständnis zu fördern und die Unterscheidung nicht nur auf sprachlicher Ebene treffen zu müssen.

Nachfolgend wurden die Expert*innen um eine Einschätzung gebeten, welcher Anteil der Kernmasse durch die Kopplung der Quarks an das Higgsfeld zu Stande komme (2.b). Hier werden unterschiedliche Angaben gemacht, alle schreiben dem Higgsfeld allerdings den kleineren Anteil der Masse (im Vergleich zum Gluonen-Feld) zu. Die Einschätzung bewegt sich dabei zwischen einem und zehn Prozent. Auch die Gemeinschaft der Fachwissenschaftler*innen gibt hier verschiedene Werte an. Neuere Einschätzungen durch die Berechnung der Zusammensetzung der Proton-Masse von Yang et al. (2018) kommen auf einen Anteil von 9 %. Dieser Wert ergibt sich durch die Masse der Quarks und kann auch im Rahmen des EFA verwendet werden, um Schüler*innen nahe zu bringen, wie sich die Masse der Nukleonen zusammensetzt, welcher Anteil dabei durch das Higgsfeld entsteht und um zu motivieren, dass es neben dem Higgsfeld auch ein weiteres Feld geben muss, das zu den restlichen 90 % der Masse beiträgt (Gluon-Feld, s. u.).

Für die Beantwortung der Frage 2.c geben die Expert*innen an, dass der Mechanismus der Kopplung von Elementarteilchen und Higgsfeld zwar bedeutend, für die Energieübertragung aber nicht relevant sei. Denn dieser beeinflusse nicht die Dynamik des Prozesses, der im Wesentlichen der freien Wahl eines Parameters entspräche (E2, E3, E7).[15]

[15] Die fermionischen Ruhemassen werden über die Yukawa-Kopplungsstärke experimentell bestimmt (Hempfling, 1994).

Gluon-Feld

Die Fragen zum Gluon-Feld reihen sich analog zu denen des Higgsfeldes, um dessen Rolle in kernphysikalischen Prozessen einzuordnen. Insbesondere können so Beschreibungsmöglichkeiten für die Energieübertragung im Zusammenhang mit der Veränderung der Kernmasse und der Wechselwirkung der Gluonen eruiert werden:

3.bi Das Gluon-Feld trägt Energie.
3.bii Die Ursache für die Kernmasse von Materie ist hauptsächlich das Gluon-Feld.
3.biii Das [Gluon-Feld] ist die Bindungsenergie des Kerns.

Die Expert*innen sind sich einig, dass im Gluon-Feld Energie gespeichert ist. Im Gegensatz zum Higgsfeld ist diese Energie auch übertragbar, wenn sich das Feld verändert. Weniger Zustimmung erfährt der dritte Punkt (3.biii). Hier führen sechs Expert*innen Bedenken an, die es zu beachten gilt: Die Masse der Nukleonen bzw. Kerne sei nicht nur die Bindungsenergie der Quarks bzw. Nukleonen. Hier gebe es ein konzeptuelles Problem. Expert*in E4 erläutert, dass hier (ähnlich wie beim Deuteron) eher Van-der-Waals Kräfte relevant seien, die für einen leicht gebundenen Zustand und einen Massendefekt sorgen. Beim Gluon-Feld ist das Feld allerdings selbst Masse und bestimmt die Masse der Nukleonen (E4, E5, E7, E8). Die Bindung zwischen den Nukleonen werde hingegen als quantenmechanische Überlagerung durch die Nukleonen-Wellenfunktion beschrieben und erfolge über virtuellen Gluonen-Austausch (E4). Hier wir darauf Bezug genommen, dass die Bindung der Nukleonen zu Kernen nicht auf dem selben Prinzip beruht wie die Bindung der Quarks zu den Nukleonen selbst. Denn das Gluon-Feld ist zwar verantwortlich für die Wechselwirkung der Quarks, allerdings (auch aufgrund des Confinements) nicht direkt für die Bindung der Nukleonen. Für deren Beschreibung muss die elektromagnetische Komponente der Quark-Wechselwirkung mit berücksichtigt werden. Entsprechend dieser Logik führen die Expert*innen auch an, dass die Nukleonen untereinander gebundene Zustände einnehmen, da diese Bindung (bei hinreichender Nähe zueinander) energetisch „günstiger“ sei. Dies werde durch die „Überlappung“ der entsprechenden quantenmechanischen Wellenfunktionen beschrieben. Die Energie, die dann frei wird, stamme aus gluonischer Wechselwirkung, aber nicht direkt aus dem Gluon-Feld, das für die Interaktion der Quarks und damit der Masse der Nukleonen verantwortlich ist (E5, E6, E8, E9). Das Gluon-Feld sei also streng genommen von der Restwechselwirkung zwischen den Hadronen (analog zu den Van-der-Waals Kräften im Elektromagnetismus) zu unterscheiden. Diese Wechselwirkung zwischen den Nukleonen komme mittels

Pion-Austausch (Quark-Antiquark Paare) durch die starke Wechselwirkung zu Stande (E4, E8, E9).
Diese Beschreibungen legen offen, dass hier das Gluon-Feld (und insbesondere die Rolle der Gluonen bei der Bindung von Quarks) nicht allein für die Bindung der Nukleonen verantwortlich ist. Dazu sei die Restwechselwirkung relevant; zwar unter gluonischem Einfluss, aber nicht direkt durch das *Gluon-Feld*. Für den EFA bedeutet dies, dass nicht nur über das Gluon-Feld allein gesprochen werden sollte, wenn es um Kernprozesse wie beispielsweise den Alpha-Zerfall geht. Um diese „größeren“ Prozesse außerhalb des Nukleonenradiusses zu inkludieren, muss man auch die kurzreichweitige Wechselwirkung der Quarks mit einbeziehen, die bei nahen Nukleonen stattfindet und zur Bindung führt. Diese Wechselwirkung wird dann durch Gluonen und aber auch die elektromagnetische Komponente beeinflusst. Diesen Umstand erwähnt auch bereits Rückl (1991) in seiner Arbeit. Aus diesem Grund ist es ratsam, hier eher von einem Feld der Quarks (oder *Quarkfeld*) zu sprechen. Dieser Term bringt den Vorteil mit sich, dass er sowohl die Gluon-Wechselwirkung als auch die elektromagnetische Komponente der Quarks abbildet. Die Energie in diesem Feld kann also im Sinne der didaktischen Rekonstruktion als Bindungsenergie der Quarks bzw. Nukleonen betrachtet werden. Die Veränderung eines Nukleons oder der Zerfall eines Kerns kann dann mit der Veränderung und Energieübertragung des Quarkfeldes assoziiert werden. Expert*in E9 merkt aus didaktischer Sicht noch an, dass es hilfreich wäre, wenn die Schüler*innen an ihr Verständnis vom Atommodell anknüpfen könnten. Diese Forderung ist erstrebenswert und insofern auch umsetzbar als ein Nukleon auch als „Quasi-Atom“ betrachtet werden könne, dessen Bestandteile (Quarks) über ein entsprechendes Feld miteinander interagieren. Die Energie dieses Feldes ergibt sich dann durch die Wechselwirkung und äußert sich über die Energie-Masse-Äquivalenz in der Masse des Nukleons.

Was die Zusammensetzung der Nukleonen-Masse angeht, so bestimmen Yang et al. (2018) neben dem Anteil des Higgsfeldes (ca. 9 % durch die Ruhemasse der Quarks) auch den Anteil der Quark-Wechselwirkung (ca. 32 %), des Gluon-Feldes (Gluon-Gluon-Wechselwirkung, ca. 36 %) und der Interaktion von Quarks und Gluonen (aus der Summenregel, ca. 23 %). Fasst man also die Beiträge von Quarks und Gluonen bzw. dere Interaktion zusammen, kommt man auf 91 %. Dieser Wert entspricht dann dem Anteil des „Quarkfeldes“ an der Energie bzw. Masse des Nukleons (hier das Proton). Die Einschätzung der Expert*innen liegt auch zwischen 90 und 99 Prozent für den Anteil des Feldes im Kern (in jedem Fall der Hauptanteil der Masse). Für den EFA kann somit geschlussfolgert werden, dass es unter

Einführung des Quarkfeldes legitim ist, von einer 9:1 Verteilung zwischen Quark- und Higgsfeld als Ursache für die Masse der Nukleonen zu sprechen.

Beta-Zerfall und schwache Wechselwirkung

Um abzuschätzen, inwiefern man mit den bisher bekannten Feldern im Rahmen des EFA auch den Beta-Zerfall der schwachen Wechselwirkung beschreiben kann, wurden die Expert*innen auch hierzu befragt. Sie sollten erläutern, ob die Energie des Beta-Zerfalls (teilweise) aus dem Gluon-Feld stammt.[16] Die Antwort der Expert*innen ist hier allerdings deutlich: Der Beta-Zerfall darf als Prozess der schwachen Wechselwirkung nicht mit den Gluonen in Verbindung gebracht werden. Auch wenn es hier zur Umwandlung von Quarks (up zu down oder umgekehrt) kommt, so seien nur Felder der schwachen Wechselwirkung relevant (E1, E5, E6, E7, E8). Denn durch die Farbinvarianz bei diesem Prozess wirke keine Farbkraft und es seien keine Gluonen involviert (E4).[17] Hier sind sich die Expert*innen einig, dass die Austauschbosonen der schwachen Wechselwirkung (Z- und W-Bosonen) das Feld darstellen. Die schwache Wechselwirkung beschreibt außerdem Zerfälle und keine Bindungszustände, was sie neben anderen Aspekten fundamental von der starken Wechselwirkung unterschiedet. Somit erscheint eine Repräsentation des Beta-Zerfalls im EFA nicht sinnvoll.

Zum Begriff *Quarkfeld*

Im Rahmen weiterer Diskussionen mit Expert*innen der Didaktik aus dem eigenen Arbeitskreis wurde erörtert, welchen Begriff das „allgemeinere“ Feld erhalten soll, welchen nicht nur die Gluonen-Wechselwirkung, sondern auch die Wechselwirkung der Quarks und naher Nukleonen beschreibt. Hier kristallisierten sich verschiedene Vorschläge heraus, neben dem Begriff Quarkfeld auch *Farbfeld* und *Kernfeld*. Hier seien kurz die Gründe zur Entscheidung für das Quarkfeld genannt: Der Begriff „Farbfeld“ ist anschaulich und ergibt aus fachlicher Sicht ebenfalls Sinn, da bei Prozessen die Farbladung der Quarks als „Ladung der starken Wechselwirkung“ eine Rolle spielt und mehr noch die Eigenschaft darstellt, die bei diesen Prozessen zu beachten ist. Allerdings weckt der Begriff bei den Schüler*innen vermutlich starke Assoziationen mit der Farbenlehre und könnte eher ein Distraktor

[16] Der Beta Zerfall ist ein Prozess der schwachen Wechselwirkung. Dabei sind Gluonen nicht involviert, da es zu keiner Änderung der Farbladung der Quarks kommt. Dennoch sollte ausgelotet werden, ob es hier von Seiten der Expert*innen Spielraum für Interpretationen im Bild der starken Wechselwirkung gibt.

[17] Auf die Zustimmung von E9 wird hier nicht eingegangen, da sich das Argument auf die Rolle der Quarks bezieht. Die Problematik der invarianten Farbladung wurde nicht angesprochen. E2 und E3 äußern sich zu der Problematik nicht.

sein als eine Hilfestellung; insbesondere wenn auf die Farbwechselwirkung nicht weiter eingegangen wird. Darüber hinaus gibt der Begriff keinen Mehrwert, was die inhaltliche Bedeutung angeht, da er für Schüler*innen weder Aufschluss über die Wechselwirkung noch über die Quellen des Feldes gibt.
Der Ausdruck Kernfeld ist naheliegend und könnte vorteilhaft sein, weil er begrifflich und inhaltlich an den bereits bekannten Term „Kernenergie“ anknüpft, den viele Schüler*innen bereits kennen. Dabei verliert man aber gleichzeitig auch den Vorteil eines noch nicht konnotierten Begriffs. Denn ein bereits konnotierter Begriff bringt auch Vorwissen bzw. Vorstellungen der Schüler*innen mit sich, die dann beachtet werden müssen.[18] Bei einem „neuen“ kognitiv noch wenig vernetzten Begriff ist das nicht der Fall. Außerdem suggeriert „Kernfeld“ eher ein globales Feld und lässt ggf. nicht unbedingt auf ein intranukleares Feld bzw. dessen Quellen schließen. Somit ergibt sich ebenso wie beim Begriff Kernenergie die Tendenz zu einem Blackbox-Charakter. Der Begriff Quarkfeld ist sowohl vermutlich nahezu frei von Assoziationen mit problematischem Vorwissen als auch hinreichend nahbar für Schüler*innen, welche den Begriff „Quark“ meist bereits gehört haben. Außerdem gibt der Begriff direkten Aufschluss über seine Quellen. Wie oben erwähnt, ist er auch aus fachlicher Sicht vertretbar mit der Wechselwirkung der Quarks und Gluonen vereinbar.

4.2.7 Fragen zu Anwendungsbereichen

Die Expert*innen wurden am Ende des Interviews gebeten, Vorschläge für interessante und moderne Anwendungsbeispiele für die besprochenen Felder zu geben. Dazu wurden die Felder genannt und die freie Assoziation festgehalten. Zum elektrischen und magnetischen Feld wurden kaum Aussagen gemacht, die über die Wechselwirkung von Ladungen und Magneten hinausgehen. Interessanter fanden die Expert*innen die anderen Felder (siehe Tab. 4.3). Die Liste von genannten Kontexten wurde sukzessive erweitert. Wenngleich beliebte Beispiele (wie z. B. die Annihilation oder Entstehung von Elementarteilchen) von mehreren Expert*innen genannt wurden, wird die Häufigkeit der Nennungen nicht als relevant betrachtet, da es hier vielmehr um die Sammlung von Vorschlägen geht. Deswegen werden hier keine Verweise auf die Expert*innen angeführt.

[18] Hier würden dann jegliche Vorstellungen zum Begriff „Kern“ auch eine Rolle spielen. So könnten Schüler*innen beispielsweise vermuten, dass es sich nur um das Feld des Kerns als Ganzes handelt. Dies ist aber nicht hilfreich, wenn man die Veränderung von Kernen auf der Quark-Ebene betrachten möchte.

elektromagn. Feld	**Gravitationsfeld**	**Higgsfeld**	**Gluon- bzw. Quarkfeld**
Laser	Gravitationslinse	Paar-Erzeugung	Kernspaltungen
Mikrowelle	gravitative Rotverschiebung	Annihilation (PET)	Kernfusion (Sonne)
Radiowellen	Periheldrehung Merkur	CERN-Kollision	CERN-Kollision
Leuchtstoffröhre	Expansion des Universums		Alpha-Zerfall
Leuchtstoffröhre			See-Quarks
Licht-Spektrum			Hadronisierung und Teilchenschauer im Detektor

Tabelle 4.3: Von Expert*innen genannte Anwendungsbeispiele zu einzelnen Feldern

Klassische Felder

Das elektromagnetische Feld wird mit typischen Beispielen verknüpft, wie z. B. der Mikrowelle, dem elektromagnetischen Spektrum bzw. der Erzeugung von Licht (Leuchtstoffröhre). Hier ergeben sich natürlich darüber hinaus viele Möglichkeiten, das elektromagnetische Feld in Kontexten einzubeziehen. Für das Gravitationsfeld wurden die Beispiele Gravitationslinse, gravitative Rotverschiebung, Periheldrehung des Merkur sowie die Expansion des Universums aufgrund der dunklen Energie genannt. Die ersten beiden Vorschläge sind dabei besonders attraktiv für eine Implementation im EFA, da hier das direkte Zusammenspiel von Masse und Energie über die Energie-Masse-Äquivalenz deutlich wird. Außerdem spielen dabei das elektromagnetische bzw. Gravitationsfeld eine Rolle.

Moderne Felder

Das Higgsfeld wird aufgrund seiner Bedeutung für die Ruhemasse der Elementarteilchen meist mit der Paar-Erzeugung bzw. dem umgekehrten Prozess der Annihilation verknüpft. Gerade die Positron-Emissions-Tomographie (PET) besitzt hier mit ihrem Bezug zur Medizin ein interessantes Implementationspotenzial. Ebenso spielt das Higgsfeld bei der Entstehung von Teilchen bei CERN-Kollisionen eine bedeutende Rolle.

Das Gluon- bzw. Quarkfeld kommt bei der Beschreibung von kernphysikalischen Prozessen wie Spaltung und Fusion ins Spiel. Insbesondere die Prozesse in Kernkraftwerken oder der Sonne sind für den Schulunterricht von Relevanz. Darüber hinaus kann der Alpha-Zerfall im Zusammenhang mit Massendefekt bzw. Bindungsenergie über das Quarkfeld erläutert werden. Ebenso wie das Higgsfeld spielt auch das Gluon- bzw. Quarkfeld bei Kollisionen am CERN eine Rolle, weswegen hier die Vernichtung bzw. Entstehung und Zusammensetzung von Teilchen interessant ist. In diesem Kontext können Prozesse der Hadronisierung und auch der Detektion von Teilchenschauern am LHC betrachtet werden. Die Betrachtung von See-Quarks bzw. die Bildung von Quark-Antiquark-Paaren wird zwar auch als interessanter Kontext genannt, stellt aber ein eher abstrakter Beispiel dar.
Insgesamt ergeben sich aus den Interviews zahlreiche Kontexte. Diese bieten größtenteils geeignete und teilweise sogar hinsichtlich ihrer Relevanz für Medizin, Technik, Alltag oder moderner Physik vielversprechende Möglichkeiten zur Implementation für den Energie-Feld-Ansatz.

4.2.8 Weitere Anmerkungen aus den Interviews

Hier wird zusätzlich zusammengestellt, welche weiteren Aspekte auffallen und von Interesse sind. Für die Analyse und die Konzeption des EFA sind sie teilweise relevant und insofern berichtenswert, als sie die Sichtweisen der Expert*innen näher verdeutlichen. Es fällt beispielsweise auf, dass einzelne Expert*innen im Zusammenhang mit Quarks und Nukleonen den Ausdruck „umordnen“ verwenden (E1 und E5). Dieser Begriff und seine anschauliche Bedeutung spielen auch bei der Konzeption des EFA eine Rolle, wenn es um die Versprachlichung der Prozesse bei der Energieübertragung geht. Über ein „Umordnen“ von Quarks (oder analog ggf. auch von Atomen in Molekülen) zu sprechen, ist also aus Sicht einiger Expert*innen legitim. Des Weiteren spricht E6 im Kontext Gravitationsfeld davon, es sei „wie eine Feder, die gespannt wird“. Expert*in E4 nutzt dieses Bild auch für die Wechselwirkung der Gluonen. Diese Analogie für die Wechselwirkung kann möglicherweise auch für das Konzept als Veranschaulichung dienen; auch generalisierend für andere Felder.

Bezüglich des Feldbegriffs weisen einzelne Expert*innen darauf hin, dass eine geometrische Vorstellung des Feldes nicht im Sinne der QFT ist. Hier werden vielmehr die Austauschteilchen selbst als Feld identifiziert. Eine raumzeitliche Einbettung und Vorstellung von einem Ablauf sei nicht unbedingt sinnvoll, da es sich tatsächlich um rein mathematische Beschreibungen über Operatoren und Zustände handle (E6). Nach E6 solle man bei diesem „Drang nach Greifbarkeit“ aufpassen,

da er nicht die Realität abbilde. Diese Bedenken sind durchaus berechtigt und sollten beachtet werden. Im Sinne einer didaktische Rekonstruktion scheint es allerdings vertretbar, auch die „modernen“ Felder zumindest mit Gemeinsamkeiten der klassischen Felder in Zusammenhang zu bringen. Diese Veranschaulichung, auf welche Art diese auch geschehe, ist zwar immer mit Limitationen verbunden, wird aber möglicherweise im Laufe der Konzeption notwendig. Denn ggf. stellt sich heraus, dass Schüler*innen eine konkrete Vorstellung oder Veranschaulichung benötigen, um den Feldbegriff sinnvoll bei Beschreibungen verwenden zu können.

4.3 Resümee

Hier sei noch einmal kurz zusammengefasst, welche Erkenntnisse sich aus den fachlichen und didaktischen Betrachtungen sowie den Einschätzungen der Expert*innen ergeben.
Die Klärung der fachlichen Struktur von klassischen und modernen Feldern stellte sich als vielversprechend heraus. Auch kompliziertere Zusammenhänge wie beispielsweise Prozesse, in denen Gluon-Felder involviert sind, können durch gezielte Überlegungen didaktisch rekonstruiert werden. Die Einführung eines Quarkfeldes als Akteur in Prozessen der starken Wechselwirkung ermöglicht eine Anknüpfung an die Beschreibung mit klassischen Feldern wie dem elektrischen oder Gravitationsfeld.
Auch wenn für das Gravitationsfeld bislang keine quantisierte Feldtheorie existiert, wird es für den EFA als klassisches Feld mit Energie behandelt. Die Vorteile dieser Rekonstruktion überwiegen die theoretischen Feinheiten in ihrer Praktikabilität. Es wird davon abgesehen, bei Feldern über „Verformung“ zu sprechen, um den geometrischen Charakter und Assoziationen mit dem Feldlinienbild zu minimieren. Stattdessen wird über die Veränderung von Feldern gesprochen. Ggf. kann in diesem Zusammenhang über die Vergrößerung bzw. Verkleinerung gesprochen werden. Über die Stärke eines Feldes wird nicht direkt gesprochen, wenn dann über die Stärke einer Quelle (z. B. Masse oder Ladung) oder die Stärke der Wechselwirkung. Generell wird aber auf den Ausdruck Stärke verzichtet, wenn dieser nicht explizit von Schüler*innen eingebracht wird.
Über den Zusammenhang von Austauschteilchen der Quantenfeldtheorie wird in diesem Projekt nicht gesprochen, um ein räumliches eher klassisches Bild von Feldern zu vermitteln. Der Grund dafür ist auch die spätere Assoziation der Felder mit der Energie. Ebenso werden Prozesse der schwachen Wechselwirkung vorerst nicht erläutert, da sie anders als die anderen Felder keine Bindungszustände abbilden und somit gesondert in die logische Struktur des Konzeptes eingebettet

werden müssten. Folglich wird zunächst auf die anderen Felder fokussiert, die auch gewissermaßen als räumliches Feld interpretiert werden können. Wird das Beispiel „Gravitationslinse“ im Konzept aufgenommen, so wird nicht über eine „quasi-Masse“ gesprochen, sondern über die Energie der Strahlung, welche durch die Gravitation beeinflusst wird.
Das Higgsfeld trägt selbst Energie. Dies wird aber nicht konzeptionalisiert, sondern stattdessen betont, dass die Omnipräsenz des Higgsfeldes und die Wechselwirkung mit diesem zur Ruhemasse bzw. -energie der Elementarteilchen führt. Im Gegensatz zu den anderen Feldern gibt es (auch da das Higgsfeld keine Quelle besitzt) keine Energieübertragung in bzw. aus dem Higgsfeld. Die Entstehung oder Vernichtung von Teilchen geht mit Energieübertragung der involvierten Strahlung oder anderen Teilchen einher.
Die Bindungsenergie in Kernen wird nicht dem Gluon-Feld, sondern dem (hier so genannten) Quarkfeld zugeschrieben. Dieses soll als allgemeineres Feld die komplexen Wechselwirkungsprozesse zwischen Quarks und Gluonen sowie benachbarter Nukleonen abbilden.

KAPITEL 5

Methodische Gestaltung des EFA

In diesem Kapitel wird der methodische Rahmen der vorliegenden Arbeit beschrieben. Aufbauend auf der theoretischen Grundlage und der fachlichen Klärung werden die Ziele und Forschungsfrage des Dissertationsprojektes beschrieben und methodisch verortet. Die Ausführungen umfassen die Vorüberlegungen zur Konzeption, die Evaluation und Weiterentwicklung in Akzeptanzbefragungen und die Erprobung im Klassensetting mit zugehöriger Evaluation. Das Kapitel schließt mit der Beschreibung von Konzeption und Evaluation einer Erweiterung um die Verknüpfung des Konzeptes mit typischen Formeln des Energieunterrichts.

5.1 Ziele, Verortung, Forschungsfrage und Vorgehen

5.1.1 Ziele und Verortung

Das Dissertationsprojekt trägt den Namen „Energie-Feld-Ansatz“ (EFA) und reiht sich in das Paradigma der fachdidaktischen Entwicklungsforschung (Designforschung) ein. Somit entwickelt der Ansatz ein Unterrichtskonzept, welches das Energieverständnis von Schüler*innen effektiver fördern soll als der traditionelle Unterricht[1] und verfolgt hauptsächlich zwei Ziele: Zum einen soll er einen Entwurf

[1]Hier sei angemerkt, dass die Begriffe „Konzeption“ und „Konzept“ synonym verwendet werden. Mit dem traditionellen Unterricht wird der in der Schule (und nach klassischem Lehrplan) unterrichtete Ansatz bezeichnet, bei dem die Einführung und Verknüpfung verschiedener Energieformen im Zentrum steht (vgl. Kapitel 3.1).

für ein Unterrichtskonzept zum Thema „Energie und Felder“ hervorbringen, das sich in ersten Evaluationsschritten als nützlich und für den Unterricht umsetzbar zeigt. Zum anderen bringt die Evaluation des Ansatzes Informationen über Schwierigkeiten und Benefits beim Lernen des Konzeptes hervor, also Erkenntnisse über Lernendenvorstellungen zum EFA. Die Erkenntnisse stellen (wie in Kap. 2.2 beschrieben) übertragbare Theorieelemente zum Lehren und Lernen über Energie und Felder dar.

Im Sinne der Merkmale und Ziele der Designforschung steht also der Entwurf (Design) des Unterrichtskonzeptes im Vordergrund. Ein solches *Konzept* setzt sich aus Konzeptideen und deren logischer Verknüpfung als Kern sowie den zugehörigen Kontexten (d. h. Beispielen und Aufgaben) zusammen. Eine Konzeptidee ist dabei die kleinste Einheit einer (Sinn tragenden) fachinhaltlichen Aussage, z. B. die Formulierung: „Ein Feld trägt Energie.“[2] Konzeptideen bilden also als didaktisch rekonstruierte Aussagen den Kern des EFA.

Für die Entwicklung der Konzeptideen eines Unterrichtskonzeptes müssen die theoretischen Grundlagen der bereits beschriebenen Lehr-Lern-Theorien berücksichtigt werden. Insbesondere weil der EFA darauf abzielt, das Energieverständnis von Schüler*innen zu verbessern, wird ein effektiver Konzeptwechsel bzw. Umgang mit existierenden Lernendenvorstellungen angestrebt. Insbesondere das von Hammer (2000) kritisierte bloße Einprägen von „magic words“ anstatt ein tieferes Verständnis zu fördern, ist eine Gefahr bei der Verwendung von Energieformen nach dem traditionellen Unterricht (vgl. Kapitel 3.2). Deshalb werden im Rahmen des EFA die gebildeten Konzeptideen inhaltlich aussagekräftig formuliert und miteinander vernetzt. Auch die Anwendung in verschiedensten Kontexten (in Anlehnung an das „messing about“; Hammer, 2000) wird besonders beachtet. Bennett et al. (2007) führen auch an, dass ein „kontextorientiertes Lernen [...] im Vergleich zum traditionellen (fachsystematischen) Vorgehen einen positiven Einfluss auf das Interesse der Schülerinnen und Schüler“ habe. So sollen Schüler*innen später die angebotenen Konzeptideen als Bausteine integrieren und bei der Anwendung erproben, um deren Mehrwert zu erkennen. Gewissermaßen kann man die Konzeptideen des EFA als Wissensbausteine zur Gestaltung eines kognitiven Gebäudes verstehen, das dann ein Konzept für den Zusammenhang von Energie und Feldern sowie deren Bedeutung für die Beschreibung von Prozessen und Phänomenen bildet. Über Anwendungsbereiche und Ebenen hinweg (Makro- und

[2] Eine Konzeptidee ist ähnlich zur sogen. „Key Idea“ zu verstehen; siehe z. B. Haagen-Schützenhöfer (2016, S. 21, 23).

Mikrokosmos) können diese Bausteine dann unabhängig vom Kontext kombiniert und verwendet werden, ähnlich zu Ressourcen oder „Knowledge Pieces“.

Wie auch andere Design-Projekte versteht sich der EFA als Ansatz zur Untersuchung des Lernens unter realen Bedingungen. Das bedeutet, es wird nicht versucht, externe Einflussfaktoren im Detail zu kontrollieren, sondern diese vielmehr mit in die Analyse einzubeziehen, sofern dies möglich ist (Hopf, 2009). Die Erkenntnisse über Probleme und Benefits unter Realbedingungen sind für das Projekt also wertvoller als Erkenntnisse aus einem Laborsetting. Insbesondere die Extraktion von Erkenntnissen aus empirischen formativen Evaluationen, wie sie als Forderung von Collins et al. (2004) genannt wird, steht bei der Evaluation des EFA im Vordergrund. Das folgende Zitat von ihnen fasst die Vorgehensweise treffend zusammen:

> Design experiments were developed as a way to carry out formative research to test and refine educational designs based on theoretical principles derived from prior research. This approach of *progressive refinement* in design involves putting a first version of a design into the world to see how it works. Then, the design is constantly revised based on experience, until all the bugs are worked out. (S. 18)

Für die Evaluation der Umsetzbarkeit des Unterrichtskonzeptes werden die Konzeptideen und Zusammenhänge mit geeigneten Kontexten, Beispielen und Aufgaben in einer Lehr-Lern-Einheit implementiert. Der Begriff Lehr-Lern-Einheit (LLE) bezeichnet also ein Arrangement zur Erprobung des Konzeptes mit Lernenden[3].
Mit Umsetzbarkeit ist gemeint, dass Schüler*innen die Ideen des Konzeptes (Erklärungsangebote, Beispiele/Kontexte) akzeptieren und sinnvoll finden sowie in einfachen Aufgaben zur Beschreibung von Prozessen aus der Energieperspektive anwenden können. In einem solchen Fall kann davon ausgegangen werden, dass das Konzept Schüler*innen im Allgemeinen näher gebracht werden kann und es ein Potenzial für ein lernwirksames Unterrichtskonzept (auch im breiten Schulunterricht) besitzt. Der Nachweis der Umsetzbarkeit stellt also die Grundlage größerer

[3]Hier sei angemerkt, dass der Begriff „Lehr-Lern-Einheit“ bzw. „Lehr-Lern-Umgebung“ gleichbedeutend zu „learning environment“ oder „teaching-learning sequence“ verwendet wird. Dabei handelt es sich im vorliegenden Dissertationsprojekt stets um die Zusammenstellung der Lehr-Lern-Einheit, die sich durch den EFA ergibt. Die verschiedenen Begriffe werden in der wissenschaftlichen Gemeinschaft unterschiedlich verwendet und beziehen teilweise auch die Implementation von geeigneten Evaluationsinstrumenten (z. B. Test bzw. Aufgaben in einer teaching-learning sequence mit ein. Auf eine genaue trennscharfe Definition wird hier verzichtet und stattdessen auf die Umsetzung des Konzeptes des EFA Bezug genommen.

Implementationsstudien dar. Da es bei diesem Projekt um eine erste Abschätzung der Umsetzbarkeit geht, wird auf die Bestimmung der Lernwirksamkeit als übergeordnetes und strenger definiertes Maß verzichtet. Diese würde erst in Folgestudien zum Tragen kommen, wenn der EFA anhand der Lernwirksamkeit mit dem traditionellen oder anderen Ansätzen verglichen wird.

Entsprechend der Vorgehensweise von DBR erfolgt die Entwicklung, formative Evaluation und Weiterentwicklung in sogenannten Design-Zyklen. Nach dem MDR nutzt der EFA existierende Kenntnisse über Lernendenvorstellungen und Erkenntnisse aus den Design-Zyklen, um die Inhalte des Konzeptes didaktisch zu strukturieren. Mit jeder neuen Erkenntnis aus dem evaluierenden Design- und Re-Design Prozess stehen neue Informationen zur Verfügung, die im Rückbezug mit der fachlichen Klärung zu einer verbesserten didaktischen Strukturierung und damit erhöhten Umsetzbarkeit des Konzeptes für den Schulunterricht führen. Die fachliche Klärung ist dabei ebenfalls an angemessenen Implementationsüberlegungen orientiert und wird in Kapitel 4 genauer beschrieben.

Hier sei noch angemerkt, dass das Akronym EFA nicht nur den Ansatz, sondern auch das Unterrichtskonzept und die sich ergebende LLE bezeichnet. Man spricht also auch von der Evaluation bzw. (Weiter-)Entwicklung des EFA.

5.1.2 Forschungsfrage

Ausgehend von den Zielen kann man eine Forschungsfrage formulieren, die im Rahmen des Projektes beantwortet werden soll:

Forschungsfrage

> Welche Schwierigkeiten und Benefits ergeben sich beim Lernen zu Energie und Feldern nach dem Energie-Feld-Ansatz und wie kann ein für die Praxis realisierbares Unterrichtskonzept aussehen, um diesen zu begegnen?

Hier sei angemerkt, dass das Prinzip einer Forschungs*frage* nicht uneingeschränkt auf das Vorgehen eines DBR-Projektes passt, da hier neben den empirischen Erkenntnissen auch die (Weiter-)Entwicklung und Evaluation des Designs selbst Forschungsgegenstand sind. Das Projekt umfasst also im Sinne einer Forschungs*aufgabe* mehr als nur die Beantwortung der Forschungsfrage, wenngleich die entsprechenden Antworten wesentlich zur Erfüllung der Aufgabe beitragen. Für die Beantwortung dieser Frage sind Erkenntnisse über die Akzeptanz bei den Schüler*innen

sowie die Dynamik existierender und neuer Lernendenvorstellungen beim Lernen nach dem EFA notwendig. Für die Realisierbarkeit (im Folgenden auch „Umsetzbarkeit“) müssen Nutzen und Eignung des Konzeptes für den Unterricht festgestellt werden. Dazu muss es für Schüler*innen insbesondere auch zur Beschreibung von Prozessen aus der Energieperspektive hilfreich sein. Basierend auf der konstruktivistischen Auffassung des Lernens (siehe Kap. 2.3) wird also auch der EFA Theorieelemente hervorbringen, die den Konzeptwechsel verschiedener vorunterrichtlicher oder auch im Rahmen des EFA gebildeter Lernendenvorstellungen beschreiben.

5.1.3 Vorgehen

Der EFA umfasst mehrere methodische und inhaltliche Elemente von der fachlichen Klärung (bereits in Kapitel 4 beschrieben) über die Festlegung von Designprinzipien und die Konzeption (Design) sowie Weiterentwicklung (Re-Design) auf Basis von Evaluationszyklen (Akzeptanzbefragungen) zu einer abschließenden Überprüfung der Umsetzbarkeit im Klassensetting unter authentischen Bedingungen. Zum Schluss folgt die Konzeption und Evaluation der Erweiterung um die Mathematisierung des Konzeptes (EFA-M). Das Vorgehen des Projektes ist in Abb. 5.1 dargestellt und lässt sich wie folgt kurz zusammenfassen.

1. Fachliche Klärung
    - Elementarisierung der fachlichen Sachstruktur
    - Expert*innen-Interviews
2. Konzeption
    - Erster Entwurf (erste Design-Version) auf Basis der fachlichen Klärung (Kapitel 4), bekannten Lernendenvorstellungen und bisherigen Ansätzen und Vorschlägen aus der fachdidaktischen Gemeinschaft (Kapitel 3)
    - Implementation in einer Lehr-Lern-Einheit für die empirische Untersuchung und Evaluation
    - Weiterentwicklung (gemeinsam mit Evaluation): Rückbezug mit fachlicher Klärung und Lernendenvorstellung nach dem MDR
3. Evaluation in Akzeptanzbefragungen (s. u.)
    - Zyklische Evaluation der (Weiter-) Entwicklung
    - Erkenntnisse über Schwierigkeiten und Benefits zum Lernen mit dem Energie-Feld-Ansatz
4. Zyklische Wiederholung der Schritte 2 und 3 (Konzeption/Design, Evaluation in Akzeptanzbefragungen und Weiterentwicklung/Re-Design). Die

zyklische Weiterentwicklung endet, wenn vorher definierte Kriterien erfüllt werden, sodass die Umsetzbarkeit des Konzeptes als „zufriedenstellend“ betrachtet werden kann (siehe Abschn. 5.4.3).

5. Untersuchung im Klassensetting
    - Erstellung einer Handreichung sowie Instruktionen und Materialien für die Implementation im Unterricht durch Lehrpersonen
    - Untersuchung der Umsetzbarkeit des EFA im authentischen Klassensetting
    - (qualitative) Auswertung von Erhebungsdaten und Implikationen für die Umsetzung des EFA im Schulunterricht
6. Mathematisierung des EFA
    - Ergänzung des qualitativen EFA um den Zusammenhang mit Formeln im Physikunterricht (EFA-M)
    - Evaluation in Befragungen (ohne Wiederholung)
    - Evaluation in Akzeptanzbefragungen (ohne Wiederholung)
    - Erkenntnisse über Schwierigkeiten und Benefits

Die methodische Gestaltung der einzelnen Teile, insbesondere der Hauptteil der Arbeit zur Konzeption und Weiterentwicklung des EFA sowie die zyklische Evaluation in Akzeptanzbefragungen, wird im Folgenden genauer erläutert.

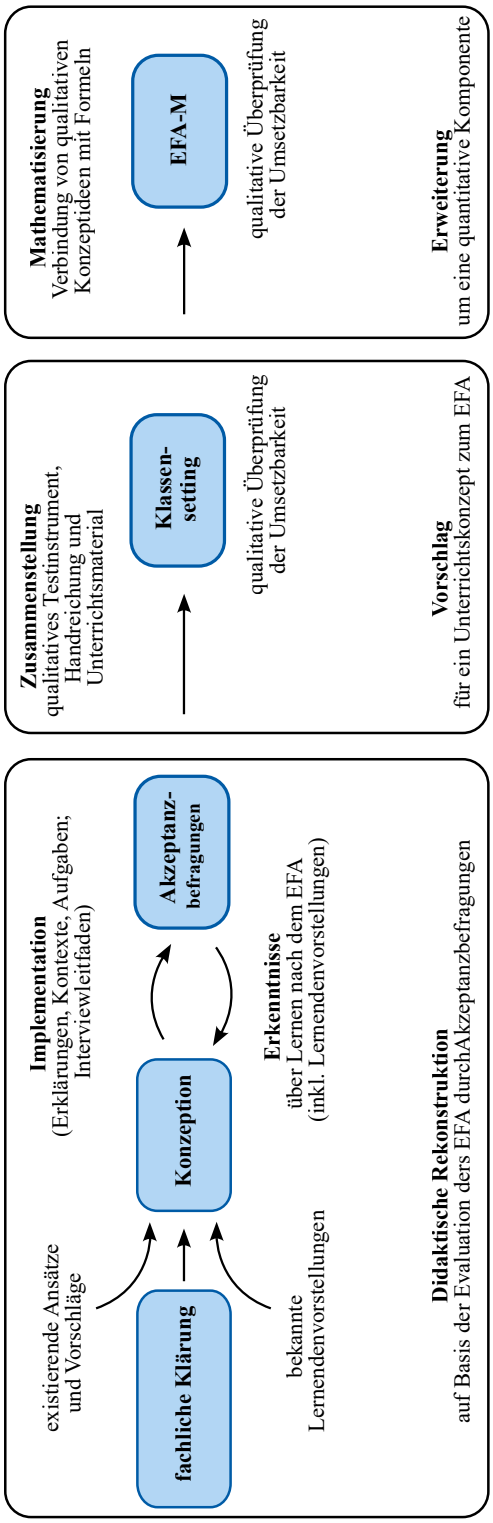


Abbildung 5.1: Überblick über das methodische Vorgehen des EFA. Nach dem Modell der didaktischer Rekonstruktion wird das Konzept entwickelt, mittels Akzeptanzbefragungen evaluiert und zyklisch weiterentwickelt. Abschließend wird die Umsetzbarkeit im Klassensetting unter authentischen Bedingungen untersucht. Die Verknüpfung mit Formeln des Physikunterrichts (EFA-M) und entsprechende Evaluation durch Befragungen rundet das Projekt ab.

5.2 Vorüberlegungen und normative Festlegungen

Vor der Konzeption und ausgehend von der fachliche Klärung in Kapitel 4 wurden verschiedene Vorüberlegungen angestellt, damit die Konzeption des EFA fundiert erfolgen kann (siehe Kap. 6). Denn um eine zielgerichtete Orientierung und Umsetzung zu ermöglichen, ist die Formulierung konkreter Anforderungen und Voraussetzung von Bedeutung. Es wurden dazu a priori Überlegungen zur grundsätzlichen Ausrichtung des Konzeptes sowie der Zielgruppe angestellt. Dazu gehört an erster Stelle die Formulierung der Grundidee des EFA sowie die Definition des angestrebten Mehrwertes des Projektes. Außerdem wurde normativ festgelegt, wie zentrale Begriffe wie *Feld*, *Energie* und *Wechselwirkung* aufgefasst werden. Die Begriffserklärungen dienen dabei der Sicherstellung einer wissenschaftlichen Diskussionsgrundlage. Sie stellen keine allgemeingültige Definition dar, sondern vielmehr die Beantwortung der Frage „worüber sprechen wir?“, also wie zentrale Begriffe im Rahmen dieses Projektes aufgefasst werden. Für die Festlegung des konkreten Feldbegriffs fließen auch Abwägungen anderer Fachdidaktiker*innen der Arbeitsgruppe mit ein. Als weiterer Aspekt wurde begründet und entschieden, welche logische Abfolge die Unterrichtskonzeption verfolgt (z. B. von konkreten zu abstrakten Inhalten und Beispielen) und wie mit dem Arbeitsbegriff umgegangen wird. Des Weiteren musste die Zielgruppe (Sekundarstufe I oder II) festgelegt und der Ansatz gegen bereits existierende Unterrichtskonzeptionen und Ideen (vgl. auch Kap. 3) abgegrenzt werden. Diese Überlegungen wurden größtenteils auf theoretischer Ebene a priori angestellt und dienten der Definition des normativen Rahmens des Projektes.

5.3 Entwicklung des Unterrichtskonzeptes (Konzeption)

Der Begriff *Konzept* bezeichnet hier im Sinne eines Unterrichtskonzeptes einen Entwurf für den Unterricht, der Inhalte (Argumente der Sachstruktur) miteinander vernetzt und mit Kontexten (Beispielen) verknüpft.[4] Den Inhalt bilden sogenannte Konzeptideen (auch „key ideas“; vgl. Haagen-Schützenhöfer, 2016). Sie stellen den Kern des Konzeptes dar. Dabei wird sowohl auf die Wahl der Begrif-

[4] Hier werden die Begriffe Konzept und Konzeption gleichbedeutend verwendet. Nach Wilhelm et al. (2021a) versteht man unter einer „Unterrichtskonzeption [...] ein explizites Lehrprogramm für konkrete Themen des Physikunterrichts, also einen an Leitideen entwickelten Entwurf für die [...] Gestaltung der Inhalte des Physikunterrichts.“

fe und Worte selbst als auch auf die logische Verknüpfung verschiedener Begriffe geachtet. Dies ist bei der Gestaltung der Konzeptideen mit Abwägungen und Entscheidungen verbunden, deren Eignung dann durch die Umsetzung im Rahmen der Evaluation des Konzeptes eingeschätzt werden muss. Ein Beispiel für eine Konzeptidee ist die einfache Aussage „Ein Feld trägt Energie.“ Hierbei wird dann z. B. der Begriff „tragen“ gegen andere Formulierungen wie „haben“, „besitzen“ oder „speichern“ abgewogen (für Details siehe Kapitel 7 und 8). Die Konzeptideen werden innerhalb des Konzeptes mit geeigneten Beispielen verknüpft (Kontexte), z. B. mit der Darstellung zweier sich abstoßender und auseinander bewegender Magneten. Die Zusammenstellung solcher Konzeptideen und ihrer (ggf. impliziten) Zusammenhänge untereinander bilden das Konzept. Das bedeutet, dass ein Konzeptentwurf durch ebendiese Zusammenstellung definiert wird. Die erste Zusammenstellung eines Konzeptes wird hier als erste Version des EFA bezeichnet. Alle weiteren Versionen (Designs) als Ergebnis des jeweiligen Evaluationszyklusses der Vorgängerversion werden laufend nummeriert. Das Konzept des EFA setzt sich also aus zusammenhängenden Konzeptideen und entsprechenden Kontexten zusammen, die dann für die Evaluation auch in Form von Aufgaben gestaltet und im Rahmen einer LLE evaluiert werden können.

Es ist erstrebenswert, dass ein Unterrichtskonzept in seiner Komplexität simpel gehalten und für möglichst viele Schüler*innen in seiner Struktur zugänglich und verständlich wird. Dabei soll es bzgl. seiner „Erklärungsmacht“ in der Sachstruktur weder unnötig detailliert sein noch hinter dem traditionellen Energieunterricht zurückstehen. Dafür ist es notwendig, dass das Konzept in der Lage ist, auch die typischen bereits aus der Schule bekannten Phänomene zu beschreiben bzw. zu erklären. Der Mehrwert des EFA wird durch geeignete Vorüberlegungen zu Designprinzipien und normativen Festlegungen bestmöglich gesichert (vgl. Kapitel 6). Für die Konzeption folgt das Projekt dem MDR, indem es sowohl Erkenntnisse aus der fachlichen Klärung als auch über Lernendenvorstellungen zu den Themen Energie und Felder nutzt. Dazu wurden bekannte Lernschwierigkeiten bei der Formulierung der Konzeptideen und ihrer logischen Struktur (insbesondere auf der Begriffsebene) berücksichtigt. In einer fachlichen Klärung (siehe Kapitel 4) wurden dann die relevanten fachwissenschaftlichen Inhalte herausgestellt und im Hinblick auf mögliche Schwierigkeiten didaktisch rekonstruiert. Die Konzeption (Design) an sich gliedert sich dann in die folgenden drei Schritt:

1. Formulierung von Designprinzipien und Vorüberlegungen (a priori Festlegungen und normative Entscheidungen, siehe Kap. 6)
2. Zusammenstellung von Konzeptideen (Aussagen und Zusammenhänge)
3. Auswahl von Kontexten (Anschauungen und Beispiele für Konzeptideen und Aufgaben)

5.4 Evaluation des Konzeptes durch Akzeptanzbefragungen

5.4.1 Allgemeine Methode

Um ein Design eines Unterrichtskonzeptes im Rahmen der Entwicklungsforschung zu evaluieren, müssen Benefits und Schwierigkeiten identifiziert werden, um zyklisch Erkenntnisse für die Weiterentwicklung(en) zu gewinnen. Je detaillierter die Befunde und je informativer die Einblicke in das Lernen der Schüler*innen mit dem neuen Konzept sind, umso gezielter kann eine Weiterentwicklung gestaltet werden und desto größer sind die Erfolgsaussichten des Projektes. Für detaillierte Einblicke in den Lernprozess eignet sich die Methode der Akzeptanzbefragungen nach Jung (1992).[5] Nach Wiesner (1995) wurde die Methode in Zusammenarbeit von Jung, Wiesner und Blumör (Jung et al., 1988) entwickelt. Jung (1992) erklärt die Methode ausführlich am Beispiel der elementaren Optik. Seither wird sie in der didaktischen Forschung als probates Mittel für die „Verbesserung des Lernerfolgs im Physikunterricht durch Untersuchungen von Lernschwierigkeiten und Lernprozessen“ eingesetzt (Wiesner, 1993). Akzeptanzbefragungen werden mit einer*m oder mehreren Lernenden (hier Schüler*innen) nach den folgenden Schritten durchgeführt (vgl. Abb. 5.2 und siehe Wiesner, 1995):

1. Der*die Interviewer*in liefert ein Erklärungsangebot (ggf. auch an einem Beispiel).
2. Die Lernenden bewerten die Erklärung hinsichtlich ihrer Plausibilität und Verständlichkeit.
3. Die Lernenden paraphrasieren den Inhalt.
4. Die Lernenden wenden den Inhalt in einer oder mehreren Aufgabe(n) an.

Dieses Schema wird für jedes inhaltliche Element (z. B. Erklärung einer jeden Konzeptidee) wiederholt, um die Wirkungen dieser feinen Einheiten kleinschrittig

[5] Alternative Begriffe sind auch die Übersetzung „Probing Acceptance“ (Jung, 1992) sowie die Bezeichnung „Teaching Experiments“ im Englischen. Teaching Experiments stellen dabei eine Erweiterung zur Evaluation von Lehr-Lern-Sequenzen (teaching-learning sequences) dar (Komorek und Duit, 2004).

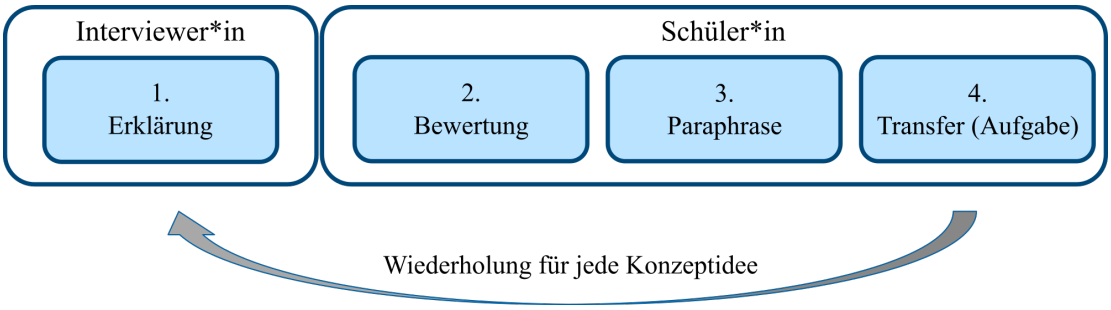


Abbildung 5.2: Schema für den Ablauf einer Akzeptanzbefragung. Erklärungsangebote des*r Interviewers*in werden von den befragten Schüler*innen in einem Dreischritt bewertet, paraphrasiert und in einer oder mehreren Aufgaben angewendet. Der Dreischritt wiederholt sich für jedes Erklärungsangebot der Konzeptideen.

zu verstehen. Es handelt sich also um eine Erklärung plus Dreischritt für jede Konzeptidee. In manchen Umsetzungen (z. B. bei den Untersuchungen zur elementaren Optik von Wiesner (1995)) werden auch Teilaspekte eines Inhaltes noch einmal gezielt untersucht und beleuchtet.
Wie der Name andeutet, sollen Akzeptanzbefragungen zum einen die Akzeptanz der angebotenen Inhalte bei den Lernenden feststellen, also inwiefern die Inhalte als plausibel, verständlich bzw. passend eingestuft werden (Wiener et al., 2018). So kann über explizite Ablehnung (z. B. „Das glaube ich nicht.“ oder „Das verstehe ich nicht.“) herausgefunden werden, welche Aspekte einer Erklärung für das Lernen hinderlich sein könnten (Wiesner, 1995). Die anschließende Paraphrase dient der Überprüfung der Akzeptanz. Wenn hier Schüler*innen beispielsweise andere Begriffe verwenden oder Teile vergessen, so kann auf Probleme geschlossen werden (Wiesner, 1995). Erkenntnisse zur Akzeptanz dienen dann als Basis für Überlegungen zur Weiterentwicklung des Konzeptes. Zum anderen werden die Inhalte auf ihre Anwendbarkeit und ihren Nutzen untersucht. Auch wenn eine Idee nicht akzeptiert wird (z. B. auch, weil sie ungewohnt ist), können dadurch ggf. Lernschwierigkeiten „überwunden“ werden (Wiesner, 1995). Bei der Anwendung in einer oder mehreren Aufgaben äußert sich dann, inwiefern Schüler*innen bei der Argumentation auf die präsentierten Inhalte zurückgreifen. Insbesondere bei neuen (unbekannten) Konzepten stellt sich hier heraus, ob die Ideen für die Beschreibung und Erklärung von Phänomenen und das strategische Problemlösen brauchbar oder gar nützlich sind. Die Einblicke von Akzeptanzbefragungen in den Lernprozess von Schüler*innen ermöglichen eine Abschätzung der Wirksamkeit der einzelnen Konzeptideen und Kontexte durch die fallspezifische Interpretation (Wiesner, 1995). Blumör (1993) bzw. Wiener et al. (2015) zeigen auch, dass Akzeptanzbefragungen bereits mit Schüler*innen auf Primarstufen- bzw. früher Sekundarstufen-Ebene nützlich sind.

5.4.2 Umsetzung im EFA

Der EFA greift auf die Akzeptanzbefragung als Evaluationsmethode zurück. Dabei wurden fast ausschließlich Einzelinterviews durchgeführt (der Forscher als Interviewer und ein*e Schüler*in), um einen möglichst intensiven Austausch zu ermöglichen und sicherzustellen, dass Schüler*innen alles äußern können, was sie möchten. Da die Sachstruktur des EFA relativ ausgedehnt ist, waren die Interviews lang (ca. zwei bis zweieinhalb Stunden) im Vergleich zu anderen Akzeptanzbefragungen (selten mehr als eine Stunde). Zwar bestand hier das Risiko der Aufmerksamkeits- und Konzentrationsabnahme am Ende, allerdings sollte sowohl jedem*r Schüler*in das ganze Konzept demonstriert werden als auch die zeitliche Nähe gesichert sein. Das heißt, von einer Aufteilung in mehrere Interviews wurde abgesehen, um eine möglichst große Konsistenz und einen bestmöglichen Fluss der Interviews zu ermöglichen. Außerdem sollten dadurch Störeffekte vermieden werden, die sich durch die zeitliche Teilung und die zwischenzeitliche Auseinandersetzung des*r Schüler*in mit dem Thema ergeben könnten.
Bei den Akzeptanzbefragungen des EFA wurden nach der Paraphrase ein bzw. zwei Aufgaben gestellt. Die Kontexte wurden dabei möglichst ansprechend und alltagsnah gewählt, um die Relevanz des Themas zu motivieren sowie das Interesse und die Aufmerksamkeit der Schüler*innen aufrecht zu erhalten (siehe Versionen der Konzeption ab Kapitel 7).

Akquise und Durchführung

Da der Erhebungszeitraum in Mitten der COVID-19 Pandemie lag, wurden die Interviews online als Videokonferenz durchgeführt. Die Schüler*innen wurden über ihre Lehrpersonen akquiriert, welche über verschiedene Kanäle informiert wurden (hauptsächlich über den Kontakt zur Universität und Kolleg*innen). Interessierte Schüler*innen erhielten ein Informationsschreiben, in dem Ziel, Form und Ablauf der Interviews erläutert werden (siehe Anhang B). Darin waren auch die Aufklärung über die Anonymität und den Datenschutz enthalten sowie darüber, dass der Ton der Gespräche zu Forschungszwecken aufgezeichnet und anonym verarbeitet (transkribiert) wird. In der zweiten und dritten der insgesamt drei Runden (Design-Zyklen) erhielten die Teilnehmenden eine geringe Aufwandsentschädigung für ihre Zeit. Diese Maßnahme diente zum einen der Akquise von ausreichend Schüler*innen und zum anderen dazu, dass sich nicht nur besonders interessierte Schüler*innen freiwillig melden. Alle Teilnehmenden erhielten eine Teilnahmebescheinigung. Bereitwillige Schüler*innen konnten sich dann über ein online-Formular oder per E-Mail melden und einen Termin für ein Interview ver-

einbaren. Durchgeführt wurde ein Interview dann, wenn eine schriftliche informierte Einwilligung (Einverständnis) von Erziehungsberechtigten und Schüler*innen vorlag.
Das Interview selbst wurde anhand eines auf der Konzeption basierenden Interviewleitfadens durchgeführt und optisch (aufgrund der fehlenden direkten Interaktion) durch eine Folienpräsentation per Bildschirmübertragung unterstützt. Dabei wurden den Schüler*innen Abbildungen, Simulationen und kurze Videos (bis 30 Sekunden) von einfachen Experimenten gezeigt. So konnten die Erklärungen graphisch gestützt werden. Am Ende jedes Interviews wurden die Teilnehmenden auch nach ihrer Einschätzung des Konzeptes gefragt. Die Interviews wurden vom Forscher selbst durchgeführt, um eine möglichst große Konzepttreue bei der Umsetzung sicherzustellen.

5.4.3 Analyseverfahren

Ausgewertet wurden die Interviews mittels qualitativer strukturierender Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2014). Dazu wurden die Audio-Aufnahmen der einzelnen Interviews zunächst transkribiert und anonymisiert. Die Transkription erfolgte auf Grundlage von Vorgaben durch nicht in die Forschung einbezogene Personen, welche dem Transkriptionsmanual entnommen werden können (siehe Anhang D). Die Konventionen lehnen sich dabei an die Vorlagen von Helbig et al. (2001) und Selting und Hinnenkamp (2012) an. Jede*r Schüler*in erhielt dabei einen Code (z. B. $S2_3$ für „Schüler*in S2 in Version 3 des EFA“).

Allgemeines Vorgehen

Bei der qualitativen Analyse geht es um die Identifikation von Lernschwierigkeiten (Problemen) und lernförderlichen Aspekten (Benefits) des EFA. Dazu eignet es sich, die einzelnen Bereiche (Themen) und Aspekte (Bewertung, Paraphrase oder Aufgabe) als Strukturelemente eines Interviews zu kodieren (siehe Tab. 5.1). Die Kodierung gibt einen ersten und aussagekräftigen Überblick darüber, welche Schüler*innen Probleme hatten und wo diese auftraten. Parallel mit der Kodierung entstehen Kategorien der Schwierigkeiten, welche dann in Summe die Problematik einer bestimmten Konzeptversion charakterisieren. Zusätzlich wurden für jede Version spezifische Beobachtungsfragen formuliert, die weitere Informationen zur Beantwortung der Forschungsfrage beitragen (z. B. welche Begriffe und Formulierungen werden verwendet oder vermieden). Diese Beobachtungen führten dann zu Erkenntnissen als Grundlage für die Weiterentwicklung der einzelnen Versionen des Energie-Feld-Ansatzes.

Code	Bewertung	Paraphrase	Aufgabe
-	Auslassung, keine Daten		
0	ohne Einschränkungen akzeptiert	vollständig und richtig wiedergegeben	problemlose Beantwortung
1	akzeptiert, aber mit Einschränkungen	teilweise richtig wiedergegeben oder Wesentliches ausgelassen	wenige Fehler, die gelöst werden können
2	auch mit Erläuterungen abgelehnt	große Schwierigkeiten und Fehler oder keine Wiedergabe	fehlerhaft trotz Hilfestellung oder keine Lösung

Tabelle 5.1: Erklärung zu den möglichen Werten einer Kodierung für die Akzeptanzbefragungen zum EFA als Grundlage für Beispielkodierung in Tabelle 5.2. Die Werte bilden die Akzeptanz und Performanz der Schüler*innen ab.

Kodierung der Interviews

Die Interviews wurden in Anlehnung an Haagen-Schützenhöfer (2016) kodiert und daraus eine Kodiertafel erstellt. Kodiert wurden die Antworten auf jede Bewertung, Paraphrase und Aufgabe eines Interviews, ausgehend von dem jeweiligen Kodierleitfaden eines Interviews. Tabelle 5.1 fasst die Regeln für die Kodierung zusammen. Dabei wurden Werte zwischen null und zwei vergeben. Auslassungen (weiße Aspekte) entstanden, wenn eine Bewertung, Paraphrase oder Aufgabe ausgelassen wurde (z. B. aus Zeitgründen oder weil von der Struktur abgewichen wurde) oder die Antwort des*r Schüler*in nicht erfolgte.[6] Erfolgte die erste Antwort einer*s Schüler*in nicht sofort vollständig oder angemessen, wurden Nachfragen gestellt. Diese gestalten sich so, dass (sofern möglich) auftretende produktive Lernendenvorstellungen aufgegriffen werden (z. B. *knowledge-pieces*, s. Kap. 2.3) und die Schüler*innen darum gebeten werden, einen bestimmten Aspekt genauer zu spezifizieren. Beispielsweise kann gefragt werden: „Was meinst du damit, wenn du sagst es entstehe ein Feld?“ Kommt es zu keiner angemessenen Antwort auf die Nachfrage(n), wirkt sich dies entsprechend Tabelle 5.1 auf die Kodierung aus.

Die einzelnen Werte der Kodierung für eine*n bestimmte*n Schüler*in (Code) können zu einem Performanzwert P für die jeweilige Person zusammengeführt werden. Mit Performanz ist dabei insgesamt die Akzeptanz und der „Erfolg“ der Lernenden in den Interviews gemeint. Der Performanzwert ergibt sich als Mit-

[6] Manchmal gingen Schüler*innen bei der Bewertung oder Paraphrase auf andere Aspekte ein und es wurde von der geplanten Interviewstruktur abgewichen. Dann konnte es vorkommen, dass keine kodierbare Antwort für den Aspekt vorlag.

telwert der Codes der Aspekte und bietet einen Gesamteindruck des Interviews (vgl. Tab. 5.2). Die Bereichswerte stellen die Mittelwerte der Codes eines Themenbereichs dar (z. B. die Konzeptidee „Ein Feld trägt Energie.“) und bilden ab, wie problematisch oder vielversprechend eine bestimmte Konzeptidee funktionierte.

Farbschema der Kodierung

Die Idee der Farbdarstellung (weiß, grün, gelb, rot) der einzelnen Aspekte Bewertung, Paraphrase und Aufgabe (Codes 0, 1 oder 2) richtet sich nach Haagen-Schützenhöfer (2016). Daran angelehnt wurde hier auch die Einfärbung der Bereichswerte und Gesamtperformanz für eine größere Übersichtlichkeit wie folgt festgelegt:

$P \in [0:0,75]$	rot	(Code 0)
$P \in (0,75:1,75]$	orange/gelb	(Code 1)
$P \in (1,75:2]$	grün	(Code 2)

Obwohl der Mittelwert der Werte 1 und 2 gleich 1,5 ist, wurde hier dennoch eine strengere Darstellung gewählt. Denn ein Performanzwert von 1,5 würde bedeuten, dass gleich viele vollständig zufriedenstellende und teilweise problematische Aspekte vorlagen (Verhältnis von 1:1), was in jedem Fall keine zufriedenstellende Gesamtkodierung sein sollte. Insofern wurde hier gefordert, dass für eine grüne Darstellung (zumindest für die Darstellung) im Mittel mehr als drei von vier Aspekten (d. h. $P = 1,75$) vollständig zufriedenstellend mit Stufe 2 kodiert sein müssen. Dies entspricht theoretisch dem Fall, dass maximal einer von vier Aspekten eines Bereiches, also ein Aspekt von Bewertung, Paraphrase oder zwei Aufgaben, mit Stufe 1 kodiert wird. Dieser Fall kann dann als zufriedenstellend angesehen werden, da hier auf den ersten Blick zumindest keine größeren Probleme vorlagen. Stellen, die in der Kodiertafel als weißes (leeres) Feld erscheinen, wurden nicht kodiert.

Längs- und Queranalyse

Die beschriebene Analyse gliedert sich in eine Längs- und Queranalyse (siehe Abbildung 5.3). Die Längsanalyse beschäftigt sich intensiv mit der Problematik einzelner Fälle (Lernprozesse einzelner Schüler*innen) und bildet Kategorien für die auftretenden Probleme. Diese Problematiken werden dann im Rahmen der Queranalyse zusammengeführt. Zusätzlich wird dort die Kodierung hinsichtlich problematischer Bereiche und Aspekte integrativ interpretiert. So werden Gruppierungen von Schwierigkeiten für einzelne Konzeptideen, Kontexte, Aufgaben oder

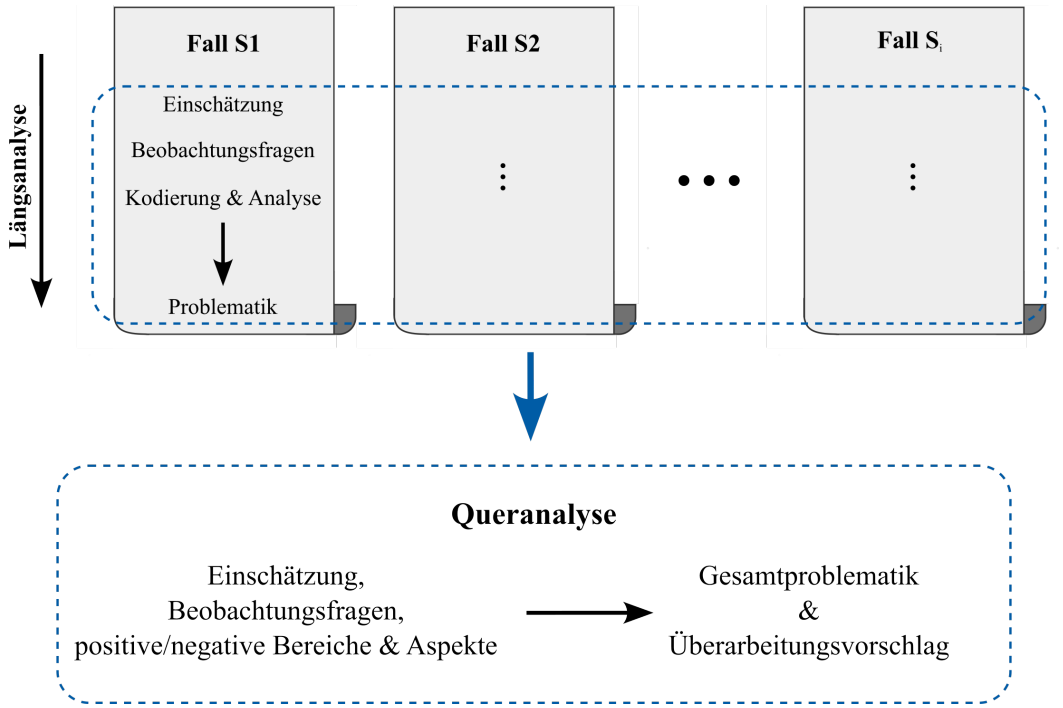


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung der fallspezifischen Längsanalyse und der integrierenden Queranalyse für die Akzeptanzbefragungen.

Schüler*innen aufgezeigt. Daraus werden dann Lösungsvorschläge für die Probleme abgeleitet und mit den Informationen aus der Längsanalyse zu einem *Überarbeitungsvorschlag* integriert. Dieser Überarbeitungsvorschlag stellt dann den Ausgangspunkt für die Weiterentwicklung des EFA in einer nächsten Version dar.

Alle Aspekte des Konzeptes, die unproblematisch sind, sollten durch den Lösungsansatz nicht nachteilig beeinflusst werden. Das bedeutet, dass alle Anpassungen den Informationsgehalt und die didaktischen Überlegungen der nicht betrachteten Konzeptideen invariant lassen. Dies ist im Allgemeinen bei Erweiterungen und Ergänzungen gewährleistet. Sollten grobe Änderungen am fundamentalen Konzept vorgenommen werden, müssen diese vor dem Hintergrund aller bisherigen Konzeptideen und Änderungen diskutiert werden.

Beispielkodierung

Tabelle 5.2 stellt eine exemplarische Kodiertafel dar, um wesentliche Merkmale der Kodierung zu veranschaulichen: Die Performanzwerte spiegeln wider, dass die hypothetischen Schüler*innen S4 und S6 keinerlei Probleme haben und alle Aspekte souverän bewältigen. Im Gegensatz dazu hat S5 bei mehreren Aspekten Probleme, besonders bei der vierten Konzeptidee (Bereich vier). Die genaueren Gründe

Bereiche (Aspekte B, P & A)		**Schüler*innen**							Bereichs-wert
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	
Bereich 1	B	2	2	2	2	2	2	2	1,95
	P	2	2	2	2	2	2	2	
	A	2	2	2	2	1	2	2	
Bereich 2	B	2	2	2	2	2	2	2	2,00
	P	2	2	2	2	2	2	2	
	A	2	2	2	2	2	2	2	
Bereich 3	B	1	0	1	2	1	2	2	1,71
	P	2	2	2	2	2	2	1	
	A	2	2	2	2	2	2	2	
Bereich 4	B	2	2	2	2	1	2	2	1,75
	P	2		2	2	0	2	2	
	A	1	2	2	2	1	2	2	
Performanz		1,83	1,82	1,92	2,00	1,50	2,00	1,92	**1,86**

Tabelle 5.2: Beispielhafte Kodierung einer Akzeptanzbefragung (Kodiertafel) entsprechend der Kriterien für Codes nach Tabelle 5.1. Die Performanz der sieben Schüler*innen wird für Bewertung (B), Paraphrase (P) und Aufgabe (A) einzeln mit einem Code zwischen 0 und 2 kodiert. Performanz und Bereichswerte ergeben sich als Mittelwerte der Codes der Schüler*innen bzw. Bereiche.

und die Beschreibung der Problematik befände sich dann in der Längsanalyse zum Fall S5. Auffällig ist auch, dass die Bewertung der dritten Konzeptidee (Bereich 3) bei einigen Schüler*innen nicht optimal ausfällt. Hier wäre im Rahmen der Queranalyse genauer zu beobachten, welche Gemeinsamkeiten sich ergeben und wie dieses Problem ggf. für alle gemeinsam gelöst werden könnte. Es würde ein Lösungsvorschlag für eine attraktivere Erklärung erstellt werden, der dann in der Weiterentwicklung des Konzeptes implementiert werden könnte. Die Bereichswerte für die dritte und vierte Konzeptidee fallen teilweise problematisch aus. Hier wäre eine genauere integrative Analyse der Fälle sinnvoll. Hier spiegelt sich insbesondere auch die schwache Performanz von S5 wider. Der Gesamtwert für den Zyklus (Performanzwert von $P = 1,86$) fasst zusammen, dass der Zyklus insgesamt positiv verlaufen ist und überwiegend unproblematische Aspekte vorliegen. Integriert man alle Informationen aus der Kodierung in Längs- und Queranalyse, ergibt sich ein detailliertes Bild von der Umsetzbarkeit der LLE und damit der Konzeptversion.

Interrates

Auch wenn der Fokus auf der qualitativen Analyse und den inhaltlichen Erkenntnissen der Akzeptanzbefragungen lag, sollte die Kodierung der Performanzen (Einordnung in Kategorien) möglichst reliabel sein. Um dies zu gewährleisten, wurden auf Basis der Transkripte Beurteilungen von anderen Forscher*innen durch-

		Kodierung Interrater		
		2	1	0
Kodierung	2	n_{11}		...
Forscher	1	n_{21}	n_{22}	
	0	...		n_{33}

Tabelle 5.3: Schema für die Benennung der Einträge zur Berechnung der Interrater-Reliabilität κ (Cohens-Kappa) nach Formel 5.1 gemäß Wirtz und Kutschmann (2007). Dabei bezeichnet n_{ij} die Anzahl, wie oft Forscher und Beurteiler*in eine bestimmte Konstellation der Kodierung abgaben. So ist z. B. n_{21} die Anzahl der Kodierungen, die von der*dem anderen Beurteiler*in mit 2 und vom Forscher mit 1 kodiert wurden und n_{33} die Anzahl der Übereinstimmungen für die Kodierung „0“.

geführt (Interrates). Grundlage dafür stellten angefertigte Kodierleitfäden dar, die den Erwartungshorizont und die Kriterien für angemessene Antworten nach dem EFA definieren (entsprechend Tab. 5.1). Dazu wurden für den ersten Zyklus ein*e und für den zweiten und dritten Zyklus jeweils zwei andere Forscher*innen (Beurteiler*innen) gebeten, ein Interrate durchzuführen.[7] So erhielt man einen Vergleich der Kodierungen und konnte feststellen, wie stark diese übereinstimmen (siehe Tab. 5.3). Dabei geben die Werte n_{ij} die absolute Häufigkeit einer bestimmten Konstellation von Beurteilungen an. Die Diagonalwerte n_{ii} (für $i \in \{1,2,3\}$) repräsentieren beispielsweise die Anzahl der Übereinstimmungen der jeweiligen Kodierungen.

Ausgehend davon wurde die Interrater-Reliabilität nach Wirtz und Kutschmann (2007) über die Berechnung des Cohens-Kappa κ bestimmt. Für die Berechnung wurde untersucht, wie groß die Übereinstimmung der Kodierungen der Beurteiler*innen (Forscher und Interrater) war; „von einer systematischen Übereinstimmung zwischen zwei Beurteiler*innen kann nämlich nur dann gesprochen werden, wenn identische Urteile häufiger vergeben werden als man aufgrund der Grundhäufigkeit, mit der die einzelnen Kategorien eingeschätzt werden, erwarten würde.“ (Wirtz und Kutschmann, 2007) Die Größe von Cohens-Kappa dient der quantitativen Abschätzung dieser Übereinstimmung und berechnet sich nach Wirtz über die Formel

$$\kappa = \frac{\ddot{\mathrm{U}}_{\mathrm{Interrater}} - \ddot{\mathrm{U}}_{\mathrm{Zufall}}}{1 - \ddot{\mathrm{U}}_{\mathrm{Zufall}}} \quad , \tag{5.1}$$

wobei sich die Übereinstimmung $\ddot{\mathrm{U}}_{\mathrm{Interrater}}$ für die Interrater und die Übereinstim-

[7] Die qualitative Analyse selbst war davon nicht betroffen, lediglich die Zuweisung von Codes zu den einzelnen Aspekten. Hier sei angemerkt, dass die Kodierung vornehmlich als Orientierung und Übersicht dient. Durch die Bestimmung der Interrater-Reliabilität sollte lediglich sichergestellt werden, dass die vom Forscher selbst angefertigten Kodierungen hinreichend reliabel sind, damit der Ersteindruck eine gewisse Aussagekraft besitzt.

mung $\ddot{\mathrm{U}}_{\mathrm{Zufall}}$, die durch zufällige Urteile zu erwarten wäre, über

$$\ddot{\mathrm{U}}_{\mathrm{Interrater}} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{3} n_{jj} = \frac{1}{N}\left(n_{11}+n_{22}+n_{33}\right) \qquad \text{und}$$

$$\ddot{\mathrm{U}}_{\mathrm{Zufall}} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{3}\left\{\left(\sum_{i=1}^{3} n_{ij}\right)\cdot\left(\sum_{i=1}^{3} n_{ji}\right)\right\}$$

ergibt. Dabei stellt N die Anzahl der Kategorien (also die Summe der zu kodierenden Aspekte) dar. Für diese Arbeit ist das die Anzahl der kodierten Aspekte (Summer der Bewertungen, Paraphrasen und Aufgaben in einem Interview). Für acht Konzeptideen mit jeweils einer Bewertung, Paraphrase, und zwei Aufgaben sind das $8 \cdot 4 = 32$ Aspekte, wenn alle beantwortet und kodierbar sind. Wendet man die durch Formel 5.1 beschriebene Vorschrift zur Berechnung an, erhält man für die erste Runde von Akzeptanzbefragungen eine Interrater-Reliabilität von $\kappa = 0,72$. Damit kann die Beurteiler*innen-Übereinstimmung als „gut“ bzw. „substantial“ bezeichnet werden (Landis und Koch, 1977; Wirtz und Kutschmann, 2007). Für die zweite sowie dritte Runde ergibt sich in beiden Fällen ein Wert von $\kappa = 0,69$; was ebenfalls einer „guten“ Übereinstimmung entspricht. Insgesamt ergibt sich also eine genügend hohe Interrater-Reliabilität, sodass man von einer ausreichenden Verlässlichkeit der Kodierungen für den Ersteindruck ausgehen kann.

Ende der zyklischen Weiterentwicklung

Da es sich bei der Evaluation um eine formative Evaluation auf Basis einer qualitativen Inhaltsanalyse handelt, musste festgelegt werden, ab wann man das Ergebnis der Evaluation eines bestimmten Zyklus als zufriedenstellen bezeichnen kann. Denn erst dann konnte die entsprechende Version des EFA als ausreichend umsetzbar für den nächsten methodischen Schritt erachtet werden. Da der nächste Schritt die Erprobung im Klassensetting war, sollten die Benefits und der Mehrwert des Ansatzes gegenüber dem traditionellen Unterricht erkennbar sein. Ausgehend von den Vorüberlegungen (siehe Kap. 6) bedeutet dies, dass die Umsetzung des EFA in der Praxis nicht nur aus theoretischer fachlicher und didaktischer Sicht erstrebenswert, sondern auf Basis der Akzeptanzbefragungen auch eine Akzeptanz und ein grundsätzliches Verständnis seitens der Schüler*innen erkennbar war. Ein Übergang von Einzelinterviews zu einem größeren Rahmen im Klassensetting mit Lehrpersonen war also damit gerechtfertigt, dass die wesentlichen potenziellen Lernschwierigkeiten bekannt und adressierbar waren sowie die Benefits überwogen. Wenn einzelne Schüler*innen das vorgestellte Konzept also als hilfreich bzw. nützlich wahrnahmen, annahmen sowie sinnvoll und angemessen mit den Kon-

zeptideen umgingen, konnte die Performanz nach Instruktion in einem größeren Setting untersucht werden. Dazu musste in jedem Fall angenommen werden können, dass im letzten Zyklus keine groben bzw. unbekannten Problematiken mehr auftraten, die noch nicht adressiert wurden. Dieser Punkt war anhand der qualitativen Analyse der jeweils letzten Befragungsrunde der Entwicklung zu bestimmen.

Als quantitatives Maß konnte zusätzlich auch die Performanz herangezogen werden. Nimmt man an, dass die Performanzwerte (Bereichswerte sowie einzelne Schüler*innen und die Gesamtperformanz des Zyklus) die Umsetzbarkeit des Ansatzes repräsentieren, kann man folgende Überlegung anstellen: Wenn ein einzelner Aspekt (Bewertung, Paraphrase oder Aufgabe) bei nicht mehr als wenigen einzelnen Schüler*innen problematisch erscheint, kann dieser als unproblematisch angesehen werden. Natürlich muss sich dieser Eindruck auch mit der qualitativen Analyse decken. Geht man aber davon aus, dass dies der Fall ist, so kann man einen Aspekt als hinreichend umsetzbar bzw. verständlich bezeichnen, wenn eine deutliche Minderheit der Schüler*innen Probleme mit diesem Aspekt aufweist. Es ist also nicht zwingend notwendig, weitere Veränderungen oder Anpassungen des Konzeptes hinsichtlich dieses Aspektes vorzunehmen, wodurch er als zufriedenstellend bzw. „final“ angesehen werden kann.
Als weiteres Maß diente der Bereichswert. Beträgt ein Performanzwert für einen Bereich bestehend aus Bewertung, Paraphrase und zwei Aufgaben insgesamt mindestens $P \geq 1,75$, so gibt es im Schnitt (pro Schüler*in) weniger als einen problematischen Aspekt in diesem Bereich. Legt man eine strengere Forderung von 20 % an, so ergibt sich ein Wert von $P = 1,8$ als Schwelle dafür, dass maximal jeder fünfte Aspekt problematisch ist. Aufgrund dieser Überlegungen wurde hier festgelegt, dass die Umsetzbarkeit des Konzeptes als hinreichend angesehen werden kann, wenn (in Einklang mit der qualitative Analyse) sowohl alle Bereichswerte als auch der Wert der Gesamtperformanz mindestens $P = 1,8$ betragen.
Diese Forderung auch für einzelne Schüler*innen zu stellen ergibt insofern keinen Sinn, als individuelle Performanzen aus verschiedenen Gründen problematisch sein können und nicht zwingend mit den anderen Schüler*innen zusammenhängen. Aus diesem Grund sollten die Performanzen einzelner Schüler*innen individuell betrachtet und beurteilt werden. Nichtsdestotrotz sollte das Gesamtbild aller Performanzen der Schüler*innen unproblematisch erscheinen, was sich aber aus der Forderung nach der Gesamtperformanz ergibt. Die zyklische Weiterentwicklung des Konzeptes wurde also beendet und der nächste methodische Schritt im Klassensetting begonnen, wenn diese Anforderungen erfüllt waren. Dies war für die Evaluation des EFA nach dem dritten Evaluationszyklus der Fall.

5.5 Evaluation des Konzeptes im Klassensetting

Das in den Akzeptanzbefragungen entwickelte und weiterentwickelte Konzept des EFA wurde in Form einer Lehr-Lern-Einheit (LLE) in Schulklassen evaluiert. Das Ziel war die Erprobung des EFA in einem authentischen Klassensetting in der Schulpraxis. Die LLE stellte dabei ein Ensemble von Erklärungen, Kontexten, Beispielen und Aufgaben sowie zugehörigen Evaluationswerkzeugen (Testinstrument aus Prä- und Posttest) dar. Dazu wurden die Konzeptideen sowie die Kontexte aus dem letzten (also zufriedenstellenden) Interviewzyklus übernommen und in einer LLE implementiert. Die Umsetzung der LLE erfolgte in vier Schulstunden mit jeweils 50 Minuten. Um die Umsetzbarkeit des Konzeptes einzuschätzen, wurde die Erprobung von einem Prä- und Posttest begleitet. Das Testinstrument wurde gezielt für die Evaluation des EFA im Klassensetting entwickelt und basiert überwiegend auf qualitativen Items in Form von offenen Fragen und Aufgaben. Neben offenen Aufgaben wurden zur besseren Beschreibung der Stichprobe auch grobe Selbsteinschätzungen des eigenen Interesses der Schüler*innen an allgemeinen Themen der Physik und die letzte Zeugnisnote sowie die Beurteilung der vorgestellten LLE erhoben. Prä- und Posttest sind dabei bis auf einzelne Items zu Interesse, letzter Zeugnisnote (Prätest) und Abfrage der Kernidee sowie Einschätzung des Konzeptes (Posttest) identisch (siehe Kapitel 13.3.3). Ziel war es, herauszufinden, ob Schüler*innen die Inhalte der LLE reproduzieren und auf typische Aufgaben anwenden können. Die gesamte Dauer der Erprobung betrug sechs Schulstunden (siehe Abb. 5.4).

Die Umsetzung erfolgte in Präsenz an verschiedenen Schulen, unterrichtet wurde die LLE durch die klasseneigenen Lehrpersonen. Diese erhielten eine Instruktion zur LLE in einer Vorbesprechung im Einzelinterview und wurden im Anschluss an die Durchführung in einer Nachbesprechung erneut zur Umsetzung befragt. Für die Vorbereitung und Durchführung wurde eine Handreichung zum Unterrichtskonzept erstellt und den Lehrpersonen inklusive Arbeitsblättern, Präsentationsfolien (Visualisierungsmaterial) und Experimentiermaterial zur Verfügung gestellt. Einzelheiten zu den verschiedenen Teilen können in Kapitel 13 und 14 nachgelesen werden. Die folgenden Abschnitte beleuchten das Design der methodischen Herangehensweise.

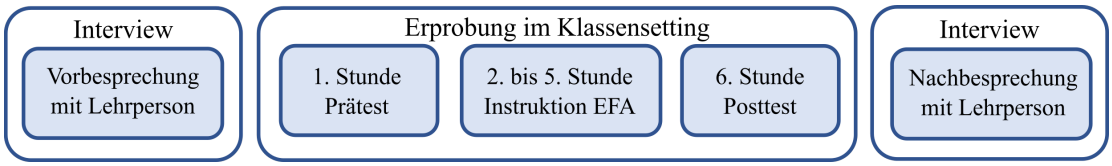


Abbildung 5.4: Schema für den Ablauf der Erprobung und Erhebung im Klassensetting. Nach einer Vorbesprechung und Instruktion einer Lehrperson führt diese in ihrer Klasse den Prätest durch, erprobt das Konzept des EFA im Rahmen einer LLE anhand einer Handreichung. Im Anschluss führt die Lehrperson den Posttest durch und schildert ihre Erfahrungen in einer Nachbesprechung mit dem Forscher.

5.5.1 Allgemeine Rahmenbedingungen der Umsetzung

Für die Evaluation des EFA-Konzeptes im Klassensetting wurde auf eine weitere online-Variante verzichtet, da das Interesse an der realen Umsetzung auch für die Zukunft von größerer Bedeutung ist. Außerdem ist es erstrebenswert, Störfaktoren des online-Unterrichts zu eliminieren und das Konzept in einer realen Schulsituation zu erproben. Dabei gibt es eine Vielzahl an unkontrollierten Parametern wie beispielsweise die Dynamik einer Gruppe von Schüler*innen, den Einfluss des tagesaktuellen Schulgeschehens, der tatsächlichen Umsetzung durch die Lehrperson (Konzepttreue) und der spezifischen lokalen Rahmenbedingungen. Allerdings war das Ziel der Erprobung nicht die Überprüfung von Abhängigkeiten einzelner Parameter der Lernwirksamkeit, sondern eine erste Einschätzung der grundsätzlichen Umsetzbarkeit des Konzeptes in der Schulpraxis. Aus diesem Grund war es als unproblematisch anzusehen, dass unbekannte bzw. unkontrollierte Störfaktoren existieren. Vielmehr war es wünschenswert, eine möglichst authentische Situation zu erzeugen, um Einblicke zu erhalten und den Erfolg auch in diesem Setting zu untersuchen.

Aus dem gleichen Grund wurde auf das Unterrichten durch den Forscher selbst bzw. durch eine externe Lehrperson oder die Präsentation von vorher aufgezeichneten Erklärvideos verzichtet und stattdessen die in der Klasse unterrichtende ‚authentische' Lehrperson ausgewählt, die LLE zu erproben. So sollte eine natürliche Situation im Unterricht bewahrt werden. An dieser Stelle wird kurz der mögliche Lehrpersonen-Bias diskutiert, insbesondere hinsichtlich der Forderung nach einer möglichst großen Standardisierung: Eine Varianz im Lehrstil ist letztlich auch ein Abbild der Realbedingungen. Zwar ist eine Kontrolle von möglichst vielen Parametern des individuellen Lehrstils für eine maximale Konzepttreue[8] wünschenswert, allerdings könnte eine zu starke Einschränkung durch Vorgaben

[8]Mit Konzeptrreue wird hier ausgedrückt, wie strikt sich die Umsetzung nach dem EFA richtet, also nach den angegebenen Erklärungen (auch die sprachlichen Formulierungen), Vorgaben der Handreichung und Arbeitsmaterialien.

auch die Authentizität des Unterrichts gefährden. Da hier die generelle Umsetzbarkeit von Interesse ist, wird von einer strengen Fixierung von personalen sowie sozialen Parametern abgesehen. Diese auf den ersten Blick freie Wahl kann auch von Vorteil sein, was die Evaluation der LLE betrifft. Denn wenn das Ergebnis der Evaluation positiv ausfällt, würde das eine vielversprechende Umsetzbarkeit des Konzeptes trotz variierender Realbedingungen bedeuten und somit ein Argument für die Stärke des Konzeptes darstellen.
Darüber hinaus kann die Durchführung der LLE in einer bestimmten Klasse durch die eigene Lehrperson in gewissem Maße auch als Standardisierung gesehen werden, wenn es darum geht, ein natürliches und gewohntes Umfeld aus Sicht der Schüler*innen zu schaffen. Da die Lehrpersonen bereits mit den Schüler*innen ihrer Klassen vertraut sind, können sie am besten auf Besonderheiten einzelner Schüler*innen eingehen. So können beispielsweise besondere Bedürfnisse in Betracht gezogen und mit diesen angemessen umgegangen werden. Ob für nachfolgende Forschungsprojekte dennoch eine stärkere Standardisierung notwendig ist, zeigt die Evaluation der Erhebung.

Akquise und Stichprobe

Die Erprobung wurde bei Lehrpersonen und ihren Kolleg*innen an verschiedenen Schulen beworben. Die Kommunikation mit freiwilligen Lehrpersonen erfolgte wie oben beschrieben durch ein erstes Informieren über die Rahmenbedingungen und eine Vorbesprechung. Vor der Erhebung informierten sich die Lehrpersonen und hielten Rücksprache mit ihrer Direktion und den Erziehungsberechtigten. Von den Schüler*innen bzw. Erziehungsberechtigten wurde eine informierte schriftliche Einverständnis zur anonymisierten Teilnahme, Verarbeitung ihrer Testergebnisse und Verwendung für wissenschaftliche Zwecke (z. B. Publikationen) eingeholt (siehe Anhang B).

5.5.2 Evaluationswerkzeuge

Neben der Umsetzung des Konzeptes als LLE spielte die Evaluation der Umsetzbarkeit eine wesentliche Rolle bei dieser Erprobung. Um herauszufinden, wie die Schüler*innen im Klassensetting über das Konzept lernen, mussten Evaluationswerkzeuge eingesetzt werden. Ein Werkzeug zur Überprüfung der Konzepttreue bei der Umsetzung durch die Lehrpersonen war dabei durch die Instruktion bzw. Nachbesprechung mit den Lehrpersonen gegeben, da hier bereits Informationen über Benefits und Schwierigkeiten aus der Perspektive der Lehrenden festgestellt werden konnten. Im Rahmen einer Vorbesprechung wurde den Lehrer*innen das

Konzept anhand der ihnen zur Verfügung gestellten Handreichung (inklusive Tipps zur Umsetzung) nahegebracht und über die wichtigsten Aspekte bei der Durchführung informiert sowie über potenzielle Schwierigkeiten aufgeklärt. Die Vorbesprechungen fanden einzeln und online in einer Videokonferenz statt. Im Rahmen einer Nachbesprechung nach der Durchführung wurden sie bezüglich der tatsächlichen Umsetzung befragt. Um hier eventuelle Probleme oder Abweichungen zu erkennen, wurden die Lehrpersonen in der Vorbesprechung gebeten, nach jeder Einheit der Instruktion Notizen in Form eines kurzen Tagebuchs zu führen. Vor- und Nachbesprechung gaben dann Aufschluss über die Umsetzung des Konzeptes.

Die Umsetzbarkeit aus der Perspektive der Schüler*innen wurde mit Hilfe eines Testinstrumentes im Prä-/Posttest-Design untersucht. Dabei gab es verschiedene Möglichkeiten bei der Wahl des Designs; hier wurde ein qualitatives Design mit schriftlichen und größtenteils offenen Fragen (Items) gewählt. Auf eine quantitative Analyse als Untersuchung von speziellen Abhängigkeiten einzelner Parameter wurde verzichtet; wieder aus dem gleichen Grund, dass der Fokus primär auf der generellen Umsetzbarkeit des EFA liegt. Es sollte hier also nicht die Lernwirksamkeit der LLE bzw. der Lernzuwachs als streng definiertes Konstrukt untersucht werden. Stattdessen sollte die Frage beantwortet werden, wie die nach dem EFA mittels der ausgearbeiteten LLE unterrichteten Schüler*innen die Konzeptideen wiedergeben und in verschiedenen Kontexten anwenden können. Für die Beantwortung eigenen sich also Items, welche eben diese Wiedergabe und Anwendung der unterrichteten Konzeptideen erheben.
Um dabei vergleichen zu können, wie Schüler*innen die Items zu Prozessen der Energieübertragung vor bzw. nach dem Unterricht nach dem EFA beantworten, wurden ein Prä- und Posttest entwickelt. Diese unterscheiden sich nur geringfügig (siehe oben); die inhaltlichen Fragen und Aufgaben sind identisch und können sowohl ohne als auch mit Wissen über den EFA beantwortet werden. So kann untersucht werden, wie sich die Antworten der Schüler*innen vor und nach dem Lernen über das Konzept verändern und wie sie auf die Konzeptideen zurückgreifen. Die Items beziehen sich dabei in den meisten Fällen auf die Beschreibung von Phänomenen aus der Energieperspektive. Aus dem Vergleich der Antworten von Prä- und Posttest konnten dann Rückschlüsse darauf gezogen werden, wie bereit und fähig die Schüler*innen waren, auf das vermittelte Konzept zurückzugreifen. So konnte die Umsetzbarkeit des Konzeptes erstmalig abgeschätzt werden. Für eine genaue Darstellung der Entwicklung des Testinstrumentes siehe Kapitel 13.3.

Hier sei angemerkt, dass nicht auf aufwendige oder standardmäßig verwendete Testinstrumente zurückgegriffen wurde, da diese nicht speziell auf das Verständnis der Konzeptideen abzielen. Zwar gibt es bereits in Studien verwendete Tests[9], diese beschränken sich allerdings meist auf typische Energieaufgaben und sind deshalb allgemein gehalten. Für den Zusammenhang mit Feldern müssten also weitere Items entwickelt werden. Da der Untersuchungsschwerpunkt dieser Arbeit allerdings auf einer ersten Einschätzung der Realisierbarkeit des Konzeptes liegt, wurden offene Items herangezogen. Diese wurden auf Grundlage der Interviews konzipiert (im Gegensatz z. B. zu einem *evidence-centered desing*; vgl. Neumann et al., 2016). Die Testinstrumente wurden durch Feedback und Rücksprache mit Forscher*innen der Arbeitsgruppe auf ihre Zweckmäßigkeit und Sinnhaftigkeit überprüft und dadurch bedingt validiert.

Aus zeitlichen und organisatorischen Gründen wurde davon abgesehen, darüber hinaus zusätzlich einzelne Schüler*innen im Anschluss an die Durchführung der LLE zu befragen, da bis zu diesem Punkt bereits umfassende Daten für die Evaluation zur Verfügung standen. Auch auf die Videographie des Unterrichts wurde nach Abwägung von organisatorischem sowie analytischem Aufwand und dem Nutzen verzichtet. Der Spielraum der Lehrpersonen hinsichtlich der konzepttreuen Umsetzung wurde als Merkmal der Realsituation wahrgenommen (wie es auch bei einer späteren Anwendung im Schulalltag der Fall wäre) und hier bewusst als freier Parameter akzeptiert. Wenn möglich, wurde die Gelegenheit zur stichprobenartigen Hospitation genutzt, um einen Einblick in den realen Unterricht zu erhalten (wegen der COVID-19 Maßnahmen nur eine Unterrichtsstunde).

5.5.3 Analyseverfahren

Für die Evaluation der Erprobung wurden die Antworten der Schüler*innen aus den Prä- und Posttests analysiert (für eine genaue Beschreibung der Testinstrumente siehe Kapitel 13.3). Bei den offenen Items handelt es sich um Aufgaben aus den Akzeptanzbefragungen, die auch im Rahmen der Instruktion besprochen werden (siehe auch Handreichung im Anhang F). Bei den Aufgaben sollten Prozesse aus der Energieperspektive mittels Feldern beschrieben werden. Die Beschreibungen waren schriftlich zu formulieren. Diese Items stellen den Kern des Testinstruments dar und sind identisch für Prä- und Posttest, um das Wissen vor und nach der Instruktion vergleichen zu können (siehe Abschnitt 13.3). Darüber hinaus fragte jeweils ein Item mit fünf-stufiger Likert-Skala (nach Joshi et al., 2015) nach

[9]Es existiert beispielsweise das *Energy Concept Inventory* (ECI; angelehnt an das *Force Concept Inventory*, FCI) mit 35 Items hauptsächlich zur Mechanik und Wärmelehre.

dem allgemeinen Interesse an Themen der Physik bzw. der letzten Zeugnisnote in Physik im Prätest und nach der Einschätzung der der letzten Physikstunden im Posttest.
Für die Auswertung wurden für jede Klasse Mittelwerte der geschlossenen Likert-Items sowie der Performanzen gebildet. Die Informationen zu Interesse, letzter Zeugnisnote und Einschätzung dienen der bedarfsweisen Abbildung der Stichprobe und dem Vergleich der Klassen bzw. der Schüler*innen untereinander. Die Antworten auf die offenen Items (Energieaufgaben) wurden wie bei den Befragungen qualitativ interpretiert und Schwierigkeiten sowie Benefits für diese größere Stichprobe identifiziert. Für die offenen Items wurde dazu ein Erwartungshorizont mit Musterlösung definiert (siehe Anhang G). Problematische Aspekte wurden analog zur Vorgehensweise der Akzeptanzbefragungen induktiv gesammelt und hinsichtlich ihrer Angemessenheit unter Verwendung der Konzeptideen beurteilt und kategorisiert. So wurde den Schüler*innen für die einzelnen Items ein Performanzwert zugeordnet.[10] Es ergaben sich Häufigkeiten der Probleme für die einzelnen Items. Am Ende konnten die Performanzen einzelner Schüler*innen bzw. Klassen miteinander verglichen werden. Die Auswertung der Posttest und der Vergleich der Ergebnisse von Prä- und Posttest lieferten Erkenntnisse darüber, in welchem Maße die Schüler*innen die Konzeptideen annehmen und verwenden. Die Kodierung des Posttest gab dann Aufschluss über den Erfolg der Implementation. Durch die Interpretation der Ergebnisse und den Abgleich mit den Nachbesprechungen der Lehrpersonen konnten die Erkenntnisse auch vor dem Hintergrund der Konzepttreue reflektiert werden.

5.6 Mathematisierung des EFA

Entsprechend der Forderung von De Cock (2022) wurde im Rahmen des EFA im Anschluss an die Evaluation des qualitativen Konzeptes auch eine Verbindung zu den traditionellen Formeln für Energie hergestellt. Dazu wrde eine formale Brücke zum traditionellen Energieunterricht geschaffen, wodurch Schüler*innen die Formeln für unterschiedliche Energieformen nicht nur als Werkzeuge für Berechnungen, sondern als sinnstiftende Konstrukte verstehen sollen. Der mathematische Formalismus (traditionelle Energieformeln) wird also mit dem konzeptuellen Verständnis (Konzeptideen des EFA) vereint. Diese Erweiterung wird als Mathematisierung des EFA (EFA-M) bezeichnet.

[10] Code 0 (rot) für falsche Antworten ohne Konzeptideen des EFA, Code 1 für teilweise angemessene Antworten und Code 2 für treffende Antworten.

Das Ziel ist es, die Konzeptideen zu Feldern zu nutzen, um traditionelle Formeln im Energieunterricht sinnstiftend zu beschreiben und den Symbolen durch die explizite Verknüpfung mit den entsprechenden physikalischen Größen eine Bedeutung zu verleihen (vgl. Kapitel 3.4). Um dies zu erreichen, wurde das Konzept des EFA über zwei weitere Konzeptideen mit typischen Formeln des Energieunterrichts verbunden (Mathematisierung des EFA: EFA-M). Dazu wurde ausgehend von den qualitativen Konzeptideen eine Visualisierung der Energieübertragung zwischen Feldern und Bewegungen angeboten. Durch eine *Balkendarstellung*[11] wurde vermittelt, dass sich die erhaltene Gesamtenergie nur auf Bewegungen und Felder verteilt. Zusätzlich wurde eine *allgemeine Formelgestalt* angeboten, mit der man typische Formeln für Feldenergie interpretieren kann. Diese soll das Verständnis für die Symbolstruktur von Formeln erleichtern und die Verknüpfung mit den konzeptuellen Inhalten anregen. Damit ergaben sich zwei Konzeptideen für den EFA-M (für eine ausführliche Begründung der Designprinzipien und -entscheidungen siehe Kapitel 15). Diese Mathematisierung ist als Erweiterung zum EFA gedacht, bei der die qualitativen Inhalte während des Konzeptaufbaus sukzessive mit den quantitativen Aspekten verknüpft werden. Schüler*innen soll so die Sinnhaftigkeit der Symbiose von qualitativen und quantitativen Beschreibungen nahegebracht werden.

Die Erweiterung des Konzeptes wurde erneut nach der Methode der Akzeptanzbefragung in Einzelinterviews evaluiert. Diesbezüglich ergeben sich zwei Fragen für die Evaluation:

- Inwiefern können Schüler*innen die Balkendarstellung bei der Beschreibung von Prozessen mit Energieübertragung verwenden?
- Wie nutzen die Schüler*innen das Erklärungsangebot zur Formelgestalt, um damit traditionelle Energieformeln zu interpretieren und deren Zusammensetzung zu erläutern?

Bei letzterer Fragestellung wurde erhoben, ob Schüler*innen bei der Interpretation von Formeln zur Feldenergie[12] selbst auf die Konzeptidee zurückgreifen, also ob sie die Idee der allgemeinen Formelgestalt nutzen, um die einzelnen Faktoren einer Formel zu interpretieren. Die beiden Fragen wurden durch die im Folgenden beschriebene Evaluation beantwortet. Die Ergebnisse werden in Kapitel 16 beschrieben.

[11] Ähnlich zur Darstellung von Müller (2021), aber hier ein Balken für Feld- und Bewegungsenergie.

[12] Da der Schwerpunkt des Konzeptes hier auf den Formeln für Feldenergie liegt, wird im Folgenden der Begriff „Formel“ verwendet. Gemeint sind damit in der Regel Formeln für Feldenergien, da sich die zweite Konzeptidee nur auf diese bezieht.

5.6.1 Akquise und Stichprobe

Voraussetzung für das Verständnis des EFA-M ist das Vorwissen über die qualitativen Konzeptideen. Daher wurden alle Schüler*innen kontaktiert, die bereits an einem der drei Zyklen von Akzeptanzbefragungen teilnahmen. Sie wurden angeworben, freiwillig an einem weiteren Online-Interview[13] von ca. 45 bis 60 Minuten teilzunehmen, in dem es um eine Erweiterung des ihnen bekannten Konzeptes gehe. Was der genaue Inhalt der Interviews ist, wurde nicht verraten, um nicht nur an Mathematik interessierte Schüler*innen anzusprechen. Letztlich erklärten sich neun der insgesamt 21 Schüler*innen bereit, an einem Interview teilzunehmen; eine Vergütung gab es in diesem Fall nicht. Da die Interviews der ersten Runde 15-17 Monate, der zweiten Runde 13 Monate und dritten Runde 7-9 Monate zurück lagen, wurde mit den Schüler*innen zu Beginn eine Wiederholungsphase der wichtigsten Konzeptideen angelegt. Diese diente zwei Zwecken: Zum einen konnte so festgestellt werden, welche Inhalte von den Schüler*innen gemerkt und erinnert wurden, was Rückschlüsse auf die Attraktivität bzw. Relevanz der Konzeptideen zuließ. Zum anderen konnte so sichergestellt werden, dass alle Schüler*innen mit einem Mindestmaß an Vertrautheit mit dem Konzept in die Befragung starteten.

5.6.2 Evaluation

Für die Evaluation der Konzeptideen des EFA-M wurde leicht von der in Abschnitt 5.4 beschriebenen Vorgehensweise der Akzeptanzbefragungen abgewichen. Wie bei der zyklischen Weiterentwicklung wurden die Interviews transkribiert und im Rahmen der qualitativ inhaltsanalytischen Auswertung (nach Kuckartz, 2014 bzw. Mayring und Fenzl, 2014) Kategorien der Probleme gebildet. Der klassische Ablauf der Akzeptanzbefragung durch Erklärung und nachfolgendem Dreischritt (Bewertung, Paraphrase und Aufgabe) wurde beibehalten. Da es sich hier aber nur um die beiden Konzeptideen zur Balkendarstellung und Formelgestalt handelt, wurde auf eine Kodierung verzichtet und eine weniger feine Analyse vorgenommen. Das bedeutet es wurde auf die Kombination von Längs- und Queranalyse verzichtet und stattdessen der Fokus auf die Angemessenheit der Verwendung der relativ simplen Konzeptideen gelegt. Entstehende Kategorien der Probleme werden in Kapitel 16 gebündelt berichtet. Der Schwerpunkt der qualitativen Inhaltsanalyse lag dabei auf der Beantwortung der Aufgaben, d. h. der Verwendung der vorgestellten Konzeptideen und damit auf den folgenden Aspekten:

[13] Die Interviews fanden aufgrund der anhaltenden COVID-19 Maßnahmen weiterhin online statt. Visuell wurde die Befragung durch Präsentationsfolien unterstützt.

- Akzeptanz der Mathematisierung (EFA-M Konzeptideen); insbesondere der beschriebenen Zusammenhänge von Konzept und Formeln (Bewertung)
- Fähigkeit der Schüler*innen, die Zusammenhänge zu erkennen und zu beschreiben (Paraphrase)
- Fähigkeit der Schüler*innen, die Konzeptideen auf Beispiele zu übertragen (Transfer); z. B. die Gestalt einer Formel für die Energie eines Kondensators zu interpretieren (Aufgaben)

KAPITEL 6

Vorüberlegungen und Abgrenzung des Energie-Feld-Ansatzes

Die Konzeption des Energie-Feld-Ansatzes soll bestimmte Voraussetzungen erfüllen. Diese Anforderungen richten sich nach dem erhofften Mehrwert des Ansatzes und können (in Anlehnung an Haagen-Schützenhöfer (2016)) auch als Designprinzipien bezeichnet werden. Der Ansatz wird auf Grundlage der fachlichen Klärung im Hinblick auf den fachwissenschaftlichen Hintergrund, der Kenntnisse über didaktische Ansätze und Lernendenschwierigkeiten zum Thema und der damit verbundenen didaktische Rekonstruktion konzipiert. Die Anforderungen an den Ansatz, der damit verbundene erwartete Mehrwert für die didaktische Forschung und den Physikunterricht, weitere Überlegungen zu Design, Rahmenbedingungen und Festlegungen sowie die sich daraus ableitenden Designprinzipien werden in diesem Kapitel beschrieben.

6.1 Grundgedanke des Energie-Feld-Ansatzes

Zentral für den Energie-Feld-Ansatz ist die Zusammenführung der traditioneller Energieformen (vgl. Kapitel 3.1) zu Bewegungsenergie und Feldenergie. Diese Subsumption und exklusive Unterteilung in zwei Arten von Energie sei hier als die „Dichotomie der Energie“ bezeichnet und bildet den Kerngedanken des EFA, der auf den bereits beschriebenen Vorarbeiten basiert (siehe Quinn (2014)). So sollen alle traditionellen Energieformen durch Bewegungsenergie oder Feldenergie verstanden werden können. Dafür beschränkt sich der EFA vornehmlich auf

qualitative Beschreibungen (ergänzt durch seine Mathematisierung am Ende des Projektes; den EFA-M). Der EFA bedient sich des Feldkonzeptes und hält dieses möglichst abstrakt, um es universell mit der Energie zu verknüpfen (inklusive schematischer Veranschaulichung ab der zweiten Konzeptversion). Neben der Unsichtbarkeit und Unantastbarkeit sowie räumlichen Ausdehnung von Feldern spielt das Gesamtfeld als Überlagerung von Einzelfeldern eine zentrale Rolle. Es basiert auf der Wechselwirkung von Objekten über ihre Felder und alle Prozesse der Energieübertragung sollen über dieses Gesamtfeld formuliert werden können. Es werden verschiedene Arten von Feldern eingeführt, um die unterschiedlichen (fundamentalen) Wechselwirkungen abzubilden: das elektrische, magnetische, elektromagnetische, Gravitationsfeld, Quarkfeld und Higgsfeld. Alle relevanten Phänomene (mit Ausnahme der schwachen Wechselwirkung) sollten über diese Felder beschrieben werden. Somit gliedert sich das Beschreibungsspektrum des EFA in klassische (Elektromagnetismus und Gravitation; Atome und Moleküle) und moderne Physik (starke Wechselwirkung und Higgsfeld, Verknüpfung mit der Masse über die Energie-Masse-Äquivalenz). Weiters wird festgelegt, dass sich die Sachstruktur des Konzeptes linear von der Makro- zur Mikro-Ebene, von konkreten zu abstrakten (z. B. Magnetfelder zu Atome im Treibstoff oder Quarkfelder) und von offensichtlichen zu weniger offensichtlichen (z. B. Satellit und Erde zu Ball und Erde) Phänomenen und Prozessen strukturieren soll. Die folgenden Ausführungen gehen auf die Begründungen für diese Prinzipien ein.

6.2 Mehrwert des EFA als alternativer Ansatz

Ziel des EFA ist es, den Energieunterricht zu „verbessern“. Um diese zunächst unpräzise Formulierung zu konkretisieren, wird der angestrebte Mehrwert des EFA formuliert. Diese Überlegungen stellen die Voraussetzung für die Formulierung von Designprinzipien dar, die dann nachfolgend das Design maßgeblich anleiten. So soll durch geeignete Rahmung ermöglicht und vorbereitet werden, dass der EFA sich am Ende durch einen Mehrwert gegenüber dem traditionellen Unterricht auszeichnet. Dazu werden hier drei Aspekte zum Mehrwert festgehalten. Diese Aspekte werden normativ und a priori formuliert und stellen Anforderungen dar, die bei der Konzeption beachtet werden. Die drei Aspekte des Mehrwertes des EFA sind die folgenden:

1. Fachliche Angemessenheit
2. Wissenschaftstheoretische Bedeutung (Propädeutik)
3. Empirische Bedeutung

Hinzu kommen noch Erwartungen, die aufgrund von theoretischen und empirischen Befunden ausgesprochen werden können und hier als *optimistisches Argument* bezeichnet seien.

Fachliche Angemessenheit

Aus fachlicher Sicht ist die Beschreibung und Verknüpfung der Energie mit Feldern vollständiger als die Herangehensweise des traditionellen Ansatzes, wenn dabei die Energieformen auf Bewegungsenergie und Feldenergie zurückgeführt werden (Quinn, 2014); siehe auch Kapitel 4). Dies zeigt auch die Expert*innen-Befragung in Kapitel 4, insbesondere durch die Äußerungen zur Leitfrage. Der Grund dafür ist, dass die Energieformen im traditionellen Unterricht sukzessive und teilweise unabhängig voneinander eingeführt werden (vgl. traditioneller Energieunterricht; Kapitel 3). Dieser klassische Weg über die Einführung verschiedener Energieformen über Kräfte, den Begriff der Arbeit und die goldene Regel suggeriert eher eine Aufteilung und Umbenennung der Energie in verschiedenen Situationen als ein zusammenhängendes Konzept dieser fundamentalen physikalischen Größe. Im Gegensatz dazu wäre es wünschenswert, Energieformen nicht nur als voneinander losgelöste (und für Schüler*innen teilweise willkürlich wirkende) Begriffe einzuführen, wenn man sie benötigt. Stattdessen ist es sinnstiftender, ein Konzept anzubieten, das eine Globalstruktur bietet und in dem diese Energieformen dann verankert werden können bzw. in dem es keine willkürliche Einteilung oder Benennung in Energieformen, sondern eine fachlich angemessene und zielgerichtete Verknüpfung mit dem jeweiligen Feld gibt. Entsprechend gibt es die bereits beschriebenen Vorteile, die Energie mit Feldern zu verknüpfen und so ihren allgemeinen Charakter zu betonen. Denn wenn nur zwischen Bewegungsenergie und Feldenergie unterschieden wird, sollte sich aus Lernendenperspektive eine klarere Globalstruktur ergeben. Aus dieser könnte dann hervorgehen, dass Energie eine übergeordnete Größe ist, die über verschiedene Felder und Bewegungen aber zusammenhängend erhalten ist.

Propädeutik

Es ist aus fachlicher und didaktischer Sicht sinnvoll, ein Energiemodell zu unterrichten, das in seinen Begrifflichkeiten und Zusammenhängen maximal kompakt und übersichtlich gestaltet ist aber gleichzeitig andere Modelle bzw. Konzepte des Physikunterrichts übergreift. So ist es z. B. erstrebenswert, Aspekte der Newton'schen Prinzipien, die sich auf verschiedene Formen von Wechselwirkungen beziehen, gewissermaßen im neuen Konzept zu verankern. Dies kann beispielsweise

dadurch geschehen, die verschiedenen Arten von Wechselwirkungen indirekt über verschiedene Arten von Feldern einzuführen (z. B. elektrische oder magnetische Felder). So wird eine Brücke zwischen Energie und Kräften geschlagen, die sich auf die phänomenologische Ebene des Prozesses der Energieübertragung beschränken kann, ohne dabei problematische Aspekte des Newton'schen Kraftkonzeptes direkt aufzugreifen. Diese Modellierung stellt natürlich keinen Ersatz dar, ergänzt die Sachstruktur aber durch die Einbettung in den Kontext des Energieunterrichts. Gemäß dieser Idee sollte ein Konzept für den Energieunterricht nicht nur lokal auf bestimmte Kontexte anwendbar sein, sondern fächerübergreifend und kontextunabhängig einen Bezug zu möglichst vielen physikalischen Phänomenen herstellen können. Das bedeutet, die Struktur des Konzeptes ist so gestaltet, dass die Ideen auf verschiedene Sachverhalte übertragen werden können und zumindest grob in der Lage sind, Prozesse in Phänomenen einheitlich zu beschreiben.
Darüber hinaus spiegelt die Subsumption der potenziellen Energieformen zu Feldenergie und die Dichotomie in Feld- und Bewegungsenergie auch insofern eine moderne Sichtweise der Physik wider als sie auf die Bestrebungen aktueller Forschung hinführt, die fundamentalen Wechselwirkungen in einer einheitlichen Feldtheorie zusammenzuführen.[1] Die Reduktion von potenziellen Energieformen (z. B. Spannenergie, chemische Energie, teilweise innere Energie, Kernenergie) zu Feldenergie bildet also einen Spezialfall dieses übergeordneten Prinzips der Physik ab. Ein Konzept, dass eine Globalstruktur suggeriert und versucht, ein übergeordnetes Energieverständnis zu vermitteln, indem es Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten herausstellt, bildet also bereits allgemein einen Mehrwert für den Bildungsanspruch des Physikunterrichts.

Empirische Bedeutung

Die Tatsache, dass es bislang noch kein zufriedenstellendes Unterrichtskonzept für den Energieunterricht gibt, welches das Konzept der Energie und das Prinzip der Energieerhaltung verständlich und nachhaltig vermittelt, stellt ein starkes empirisches Argument dafür dar, eine neue Herangehensweise zu erproben. Aus diesem Grund ist eine aus fachlicher und didaktischer Sicht sinnvolle Konzeption erstrebenswert.

[1] Diese Zielsetzung der Physik, beginnend mit dem Reduktionismus der alten Griechen (Laughlin und Pines, 2000), mündet in den Bestrebungen zu Formulierung einer „Theory of Everything“ (ToE); siehe Gribbin (2009).

Optimistisches Argument

Zusätzlich zu den drei Aspekten des Mehrwertes führen die Erkenntnisse bisheriger didaktischer Forschung zu einem *optimistischen Argument*, das für die Konzeption der Energie über Felder und Bewegungen in einem neuen Konzept spricht (z. B. den EFA): Zum einen ist zu vermuten, dass es für Schüler*innen kognitiv einfacher zu bewältigen ist, verschiedene Arten von Feldern unter einem allgemeinen Begriff von Feldenergie zu subsumieren anstatt die teilweise inkonsistent verwendeten und scheinbar zusammenhanglosen Energieformen zu memorieren und mit Inhalt zu füllen. Es ist dabei zu vermuten, dass das Wissensnetz (*cognitive network*) der Schüler*innen, welches sie potenziell beim Lernen über Felder entwickeln, eher dem von Expert*innen ähnelt (Fortus et al., 2019). Denn wenn ihr Verständnis von Energie über den Feldbegriff zusammenhänge, unterschiedet sich dies grundlegend von dem Eindruck, den disjunkte Energiebegriffe im Formenansatz vermitteln. Dazu trägt womöglich auch die reduzierte Begriffsvielfalt an sich bei, denn die Anzahl an Feldenergien im EFA ist gering im Vergleich zu den zahlreichen Formen von Energie im traditionellen Ansatz (vgl. Liste in Kapitel 3.1).[2]
Ähnliches gilt für die Bewegungsenergie.[3] So steigt die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einem stärkeren Vernetzungswissen kommt (*integrated knowledge*; vgl. Kubsch et al., 2019; Nordine et al., 2019). Außerdem entsteht die Hoffnung, dass ausgehend vom Mehrwert der fachlichen Angemessenheit des Konzeptes durch die Anwendbarkeit auf verschiedene Ebenen (Makro- und Mikrokosmos) ein besseres Verständnis bei Schüler*innen für die Bedeutung und Reichweite des Energiekonzeptes und der Energieerhaltung entsteht. So soll die Energie aus Schüler*innen-Sicht insgesamt für die Beschreibung von Prozessen attraktiver werden und somit auch das empistemische Verständnis fördern.

6.3 Normative Festlegungen und Begriffe

Für die Konzeption des Energie-Feld-Ansatzes müssen an bestimmten Stellen Entscheidungen zur Ausrichtung des Konzeptes getroffen werden. Diese beziehen sich auf die Festlegung der Zielgruppe sowie die grundlegende Auffassung des Energie- und Feldbegriffes im EFA, die normativ begründet und festgelegt werden muss. Diese Festlegungen sowie wesentliche Begriffe werden hier kurz dargelegt.

[2] Im EFA: elektrisches, magnetisches, elektromagnetisches, Gravitationsfeld, Quark- und Higgsfeld.

[3] Diese wird als einzelne Energie eingeführt und subsumiert traditionelle Formen von Bewegungsenergie wie Reibungsenergie, thermische Energie und teilweise innere Energie.

6.3.1 Zielgruppe der Konzeption

Vor den normativen inhaltlichen Festlegungen wird hier die Zielgruppe für den Energie-Feld-Ansatz als Aspekt der empirischen Evaluation festgelegt. Dazu wird kurz erörtert, ob der hier konzipierte Ansatz primär für den Energieunterricht der Sekundarstufe I oder II ausgelegt wird. Dies stellt keine final restriktive Festlegung in dem Sinne dar, dass das Konzept nicht auf beide Schulstufen erweitert und implementiert werden kann. Allerdings muss bestimmt werden, welche Klassenstufen sich am besten für eine erste Überprüfung der Realisierbarkeit des Ansatzes eignen. Die Abwägung und Gründe für diese Festlegung werden hier kurz beschrieben.

Vor- und Nachteile der Konzeption für die Sekundarstufe I

In der Sekundarstufe I beschränkt sich der Energieunterricht hauptsächlich auf einfache und rein qualitative Argumente, da Schüler*innen hier zum ersten Mal mit dem Energiekonzept in Berührung kommen und die wesentlichen Grundbegriffe neu lernen. Sie besitzen also nahezu kein schulisches Vorwissen zum Thema und die Einführung eines neuen Konzeptes würde somit nicht auf bereits existierenden und ggf. kontradiktive Konzeptualisierungen treffen. Dies böte also Möglichkeiten, neue Ideen frei zu implementieren, ohne dabei besonders auf die Anknüpfungsfähigkeit an Vorwissen achten zu müssen. Dieser Vorteil wiegt insofern besonders als so ein neues Konzept unvoreingenommen auf seine Implementationsfähigkeit untersucht und als Ausgangspunkt für ein grundlegend neues Energieverständnis betrachtet werden kann. Zusätzlich zeichnet sich die Sekundarstufe I dadurch aus, dass Argumente nur rein qualitativ unterrichtet werden, d. h. dass Konzeptideen simpel gestaltet werden können und sogar sollten. Hier würde der Fokus auf der Anschaulichkeit und Übersichtlichkeit der Sachstruktur liegen.
Nachteilig ist bei diesem Aspekt allerdings auch, dass beispielsweise die Implementation von Formeln nicht bzw. nur eingeschränkt möglich ist. Eine quantitative Betrachtung des EFA wäre also nur schwer umsetzbar und evaluierbar. Hinzu kommt, dass die Sekundarstufe I nur eingeschränkt abstrakte Konzepte zulässt. Da das ohnehin eher abstrakte Konzept der Energie bereits schwierig ist, könnte eine zusätzliche Einführung von Feldern als weiteres abstraktes Konzept problematisch sein. Außerdem kann die inhaltliche Dichte in der Sekundarstufe I nicht so hoch sein wie in der Sekundarstufe II. In jedem Fall ist hier eine vorsichtigere Wahl von Konzeptualisierungen notwendig, um Schüler*innen kognitiv nicht zu überfordern und so die Überprüfung der Umsetzbarkeit bzw. Wirksamkeit des Konzeptes zu erschweren. Des Weiteren kann nicht auf Vorwissen zur Energie aufgebaut werden.

Fehlendes Vorwissen stellt also nicht unbedingt einen Vorteil, sondern ggf. einen Nachteil dar; abhängig davon, wie tief der konzipierte Ansatz reichen soll. So kann man beispielsweise das Prinzip der Energieerhaltung keinesfalls voraussetzen und muss es zunächst einführen.

Vor- und Nachteile der Sekundarstufe II

Die erwähnten Nachteile der Sekundarstufe I sind teilweise Vorteile für die Implementation in der Sekundarstufe II. Auch wenn das Vorwissen der Schüler*innen je nach Schule, Klasse und Lehrperson sowie persönlicher Erfahrung und Kontakt mit dem Thema Energie in ihrer Lebenswelt sehr unterschiedlich ist, kann in der Sekundarstufe II zumindest durch den vorangegangenen Unterricht eher von einem gewissen Vorwissen ausgegangen werden. Zwar sind Schüler*innen (wie die erwähnten Studien zeigen) nicht sicher im Umgang mit dem Energiekonzept, kennen aber meist grundlegende Begriffe wie Energieformen, Umformung bzw. Umwandlung und das Prinzip der Energieerhaltung. Auch wenn der Stand der Vorbildung und des individuellen Vorwissens nicht verlässlich ist, kann in manchen Fällen auf einer Grundlage aufgebaut werden; insbesondere zum Ende der Schulzeit. Darüber hinaus kann in der Sekundarstufe II ein höherer Abstraktionsgrad zugemutet werden. Ein eher abstraktes Feldkonzept erscheint hier also weniger problematisch. Auch eine Verknüpfung mit Formeln bzw. einem Formalismus auf quantitativer Ebene ist hier denkbar.

Ein weiteres relevantes Argument für die Sekundarstufe II ist die retrospektive Neugestaltung des Energiekonzeptes. Damit ist gemeint, dass das Angebot eines neuen alternativen Konzeptes, das Energie mit Feldern verknüpft und die bekannten Energieformen zusammenhängend darstellt, eine Art „Aha-Effekt“ für Schüler*innen darstellen könnte. Sollte der EFA für Lernende sinnvoll erscheinen, könnten sie ihr Vorwissen sinnstiftend einbetten und so Zusammenhänge erkennen, die ihnen vorher unklar waren. Diese retrospektiv zusammenführende Erkenntnis als „großes Ganzes“ ist auch aus wissenschaftspropädeutischer Sicht wünschenswert. Ein verbessertes „Globalverständnis“ von Energie, auch unter einem epistemischen Gesichtspunkt, wäre so denkbar. In der Sekundarstufe II ist die Evaluation der Attraktivität des Konzeptes durch die Erfragung von Schüler*innen-Einschätzungen vielversprechender. Denn ältere Schüler*innen können die neuen Inhalte im Gegensatz zu Schüler*innen der Sekundarstufe I reflektierter und mit Rückbezug auf ihren vergangenen Schulunterricht bewerten. Insgesamt geben diese Umstände einer Konzeption mehr Freiheitsgrade für die inhaltliche Gestaltung.

Aus praktischer Sicht ist die Auswahl an verwendbaren Beispielen und Kontexten in der Sekundarstufe II deutlich größer. Hier kann also ein größerer Bereich der Physik und deren Alltagsanwendungen abgedeckt und daraus Kontexte ausgewählt werden. Dies bietet auch Vorteile hinsichtlich der Transdisziplinarität des Ansatzes, indem man Kontexte mit Bezug zu Bereichen der Chemie oder Biologie einbettet. Aus curricularer Sicht stellt eine Konzeption für die Sekundarstufe II weniger Probleme bei der Implementation im Lehrplan dar, da hier vorerst nicht der gesamte Energieunterricht umgestellt werden müsste, sondern das Konzept auch als Ergänzung verstanden werden kann. So wäre dies also sowohl als Alternative als auch als Erweiterung zum bisherigen Unterricht vorstellbar. Als empirisches Argument ist hier noch zu erwähnen, dass es zum Energieverständnis in der Sekundarstufe II weniger Forschungsergebnisse gibt als zur Sekundarstufe I, weswegen sich auch deshalb eine Erprobung für diese Altersklasse anbieten würde.

Als Nachteil für die Wahl der Sekundarstufe II muss beachtet werden, dass dann keine Rückschlüsse auf die Implementation in der Sekundarstufe I möglich sind. Zwar können Evidenz-basierte Annahmen gemacht werden, aber eine sinnvolle Extrapolation ergibt sich nicht. Über diesen Umstand kann aber insofern hinweg gesehen werden als das Ziel zunächst eine Erstmalige Konzeption und Evaluation eines alternativen Konzeptes ist. Die subsequente (Um-) Gestaltung für die Sekundarstufe I kann dann Gegenstand weiterreichender Forschungsprojekte zum Ansatz sein.[4]

Entscheidung für die Sekundarstufe II

Das vorangehende Argument dient als Ausgangspunkt für die Entscheidung zur Konzeption für die Sekundarstufe II. Denn für die ältere Zielgruppe ist die Bandbreite verwendbarer Kontexte sowie der Abstraktionsgrad größer. Außerdem kann das Konzept durch den Aufbau auf Vorwissen (z. B. Energieerhaltung und Energieumwandlung) detaillierter und weitreichender gestaltet werden, was für die Gewinnung neuer Erkenntnisse durch eine Evaluation von großem Interesse ist. Zwar beziehen sich die Befunde zu Umsetzbarkeit und Lernendenschwierigkeiten dann nur auf Schüler*innen der Jahrgangsstufen 10 bis 12, liefern aber detaillierte Einblicke in das Lernen zum neuen Konzept. Maßgebend ist hier auch das Argument, dass für die Sekundarstufe II abstraktere und weitreichende Inhalte und Kontexte (auch fächerübergreifend) implementiert werden können. Dazu zählt auch, dass beispielsweise Prozesse auf der molekularen bzw. atomaren Ebene abstrakt

[4] Außerdem beschäftigt Fiedler et al. (2022) mit der Evaluation eines ähnlichen Konzeptes für die Sekundarstufe I.

beschrieben werden können, da auf vorhandenes Wissen zum Teilchenmodell zurückgegriffen werden kann. Diese Konzeption ließe sich dann in ein bestehendes Curriculum einbetten und auch mit qualitativen Elementen wie beispielsweise Formeln verknüpfen.

6.3.2 Energiebegriff

Von einer genauen Definition des Begriffes „Energie“ wird im Rahmen des EFA abgesehen. Vielmehr soll Schüler*innen ein phänomenologischer Eindruck von der Rolle und Bedeutung der Energie in Prozessen vermittelt werden. Dabei wird neben der Energieerhaltung auch die Dichotomie als wesentlicher Charakterzug des Energiekonzeptes veranschaulicht. Schüler*innen sollen implizit erkennen, dass sich die Energie (insbesondere in Kombination mit Feldern) als Konzept anbietet, um damit Phänomene und ihre Mechanismen zu beschreiben.

6.3.3 Zu den Begriffen „Prozess“ und „Phänomen“

Das Ziel der Konzeption ist es, eine Menge von logisch verknüpften Konzeptideen so zu bilden, dass sich daraus unter Hinzunahme von Kontexten ein konsistentes Erklärungsmodell für Prozesse bzw. Phänomene ergibt. Als *Prozess* sei im Rahmen dieser Arbeit der tatsächliche Vorgang beschrieben, bei dem sich die Eigenschaften eines Systems bzw. einzelne Systemgrößen verändern (z. B. die Geschwindigkeit eines oder mehrerer Bestandteile).[5] Damit kann beispielsweise auch die Beschleunigung eines Satelliten um die Erde oder die Umordnung der Atome bei einem explodierenden Feuerwerk gemeint sein. Die (Veränderung der) Bewegung von Körpern oder Atomen bzw. Teilchen sowie die Veränderung von dabei involvierten physikalischen Feldern stellen den Prozess dar. Sofern Prozesse mit der Übertragung von Energie einhergehen, können sie folglich aus der Energieperspektive beschrieben werden.
Als *Phänomen* wird hier die Erscheinung eines direkt oder indirekt beobachtbaren bzw. beschreibbaren (physikalischen) Vorgangs als Ergebnis/Gesamtheit der auftretenden Prozesse bezeichnet.[6] Das können chemische oder biologische Naturprozesse oder auch Prozesse wie die Bewegung eines Satelliten um die Erde,

[5] Im Fall des EFA ist das ein physikalischer Vorgang auf einer beliebigen Ebene, der aus der Energieperspektive beschrieben werden kann. Der Begriff „Prozess“ ist nicht einheitlich definiert und wird je nach Disziplin unterschiedlich aufgefasst, weswegen hier keine explizite Definition angegeben und für hinreichende Konsistenz die beschriebene Auffassung verfolgt wird.

[6] Wie beim Prozessbegriff wird auch der Phänomenbegriff unterschiedlich gefasst. Deshalb genüge hier die angegebene Begriffsklärung. Eine exemplarische Begriffsdiskussion, die den Begriff „Phänomen“ mit dem Begriff der „Daten“ diskutiert und abgrenzt, ist in Woodward (2011) zu finden.

die Entstehung von Teilchen-Antiteilchen Paaren oder die Explosion eines Feuerwerks sein. Ein Phänomen wird also durch die Betrachtung der zugrunde liegenden physikalischen Prozesse beleuchtet.

6.3.4 Zu den Begriffen „Beschreibung“ und „Erklärung“

Weiters wird hier in der Regel zwischen den Begriffen Beschreibung und Erklärung unterschieden. Als *Beschreibung* wird dabei die sachliche Charakterisierung eines Zustands oder Prozesses verstanden; beispielsweise die Beschreibung der Energieverteilung von interagierenden Objekten und Feldern. Eine Beschreibung beantwortet damit das *wie* eines Prozesses, also z. B. „Wie sieht die Bewegung eines Satelliten aus?“ (Karam et al., 2011). Für eine *Erklärung* bedarf es zusätzlich eines kausalen Zusammenhangs, der den Prozess und seine Ursachen logisch begründet; beispielsweise die Begründung, *warum* ein Ball zu Boden fällt. Woodward (2011) beispielsweise beschreibt das Erklären von Phänomenen als Ableiten von *basic laws and principles*. Karam et al. (2011) erläutern, warum die Wissenschaft aufgrund der Modellbildung generell nur beschreibt und streng genommen nicht erklären kann. Sie betonen aber auch, dass es sich dabei um eine philosophische Fragestellung handelt. Bei Akzeptanzbefragungen wird von Erklärungen oder Erklärungsangeboten gesprochen, dabei werden in diesem Rahmen allgemein die angeboten Informationen und Inhalte zu den Konzeptideen bezeichnet, welche dann bewertet, paraphrasiert und angewendet werden sollen. Der Terminus gilt (da es sich um einen Fachbegriff der entsprechenden Methodik handelt) auch dann, wenn streng genommen nicht unbedingt erklärt, sondern beschrieben wird. Die Unterscheidung ist hier insofern von Bedeutung, als das Konzept der Energie allein selten kausale Zusammenhänge erklären kann und als abstrakte Zustandsgröße eine bestimmte Situation charakterisiert. Zwar kann durch die Energieerhaltung ein Rahmen (Ausmaß) für Prozesse festgelegt werden („Was *kann* passieren?“), *warum* sich ein System *wie* verändert, kann allerdings auf Schulniveau meist nicht vorhergesagt werden, ohne weitere Konzepte (z. B. Kraft oder Impuls) mit einzubeziehen.[7] Aus diesem Grund wird im Rahmen der Beispiele des EFA eher von einer Beschreibung als von einer Erklärung gesprochen. Erst die später eingeführte *Tendenz des Gesamtfeldes* ermöglicht dann Vorhersagen über die Richtung von Prozessen.

[7] In der Theorie können der Lagrange- und Hamilton-Formalismus Vorhersagen zum Systemverhalten über die kinetische und potenzielle Energie sowie die Berücksichtigung von Zwangsbedingungen treffen (Kuypers, 2016).

6.3.5 Festlegungen zum logischen Aufbau der Konzeptideen

Die Konzeptideen bauen aufeinander auf und hängen folglich logisch miteinander zusammen. Um den Schüler*innen eine schrittweise und nachvollziehbare Entwicklung zu ermöglichen, erfolgt die Konzeptbildung linear. Das bedeutet, es wird von makroskopischen zu mikroskopischen Erklärungen und Kontexten übergegangen. So sollen Schüler*innen den Zusammenhang von Energie und Feldern zunächst an Beispielen der makroskopischen Welt kennenlernen und dann abstrakteren bzw. detaillierteren Konzeptideen auf tieferer Ebene begegnen. Das bedeutet, es wird mit alltagsnahen Phänomenen wie der Bewegung zweier Magnetwägen oder dem Fallen eines Balles begonnen und die eingeführten Konzeptideen auf die mikroskopische Ebene erweitert. Die Begriffe makro- und mikroskopisch werden hier nicht klar definiert, sondern als grobe Rahmung für Prozesse „des Großen“ bzw. „des Kleinen“ verstanden. So würde man die Bewegung zweier Luftballons beispielsweise als makroskopischen (auch direkt beobachtbaren) Prozess bezeichnen und unter mikroskopische Vorgehensweisen atomare, aber auch nukleare und sub-nukleare Vorgänge (z. B. das Verhalten von Nukleonen oder Quarks) fassen. Grundsätzlich könnte dies auch andersherum erfolgen. Diese Richtung wird aber als besonders sinnvoll erachtet, da die Einführung von Konzeptideen an konkreten und anschaulichen Beispielen an der Lebenswelt der Schüler*innen anknüpft und deshalb zielführender ist und dann subsequent auf abstraktere und weniger anschauliche Ideen und Kontexte erweitert werden kann. So soll sichergestellt werden, dass Schüler*innen die grundlegenden Konzeptideen verstehen und als Basis für die weiteren nutzen können. Entsprechend wird von konkreten Beispielen zu abstrakteren Prozessen (z. B. Verhalten von Atomkernen oder Elementarteilchen) übergeleitet. Felder und das Konzept des Gesamtfeldes werden an offensichtlichen Quelle-Feld Konstellationen eingeführt, beispielsweise bei zwei Magneten oder Satellit und Erde (zwei massive Objekte), anhand derer man die Quellen und Felder leicht identifizieren kann. Weniger offensichtliche Konstellationen, wie z. B. das Gravitationsfeld von Ball und Erde oder von Atomen in einem Festkörper, folgen dann später. Das Verfolgen dieser Logik soll dazu beitragen, dass Schüler*innen den Erklärungen folgen und im Verlauf der Konzeptbildung neu eingeführte Ideen kognitiv einbetten können.

6.3.6 Normative Festlegung zum Feldbegriff

Das Feld als physikalische Entität wird im Rahmen des EFA weder durch die typischen Feldliniendarstellungen noch als konkrete mathematische Gestalt ein-

geführt.[8] Stattdessen wird der Feldbegriff eher abstrakt gehalten. Das bedeutet, Schüler*innen wird weitestgehend die Freiheit gelassen, ein eigenes Feldkonzept zu entwickeln, solange es mit den Prinzipien des Enegiekonzeptes und den fundamentalen Feldideen des EFA verträglich ist. Felder dienen somit als Hilfsmittel zur Vermittlung eines adäquaten Energiekonzeptes. Aus diesem Grund ist auch die Untersuchung bzw. Evaluation des Feldkonzeptes allein nicht Gegenstand dieser Arbeit, sondern lediglich die angemessene Verwendung der vermittelten Feldideen im Kontext Energie. Durch die Abstraktheit wird es dann auch später möglich sein, eine einfache schematische Darstellung für die Visualisierung des Gesamtfeldes zu wählen und diesem Unsichtbarkeit, Unantastbarkeit und unendliche Ausdehnung als abstrakte Attribute zuzuschreiben, ohne dabei ein konkretes Bild von Feldern (wie es ein Feldlinienbild suggerieren würde) vorzugeben. Für die konkrete Konzeptualisierung des Feldbegriffs wird hier zwischen drei Möglichkeiten abgewogen. Dabei geht es darum, wie die Interaktion von Feldern und Körpern zu modellieren ist. Es wird zwischen dem Probekörper-Probekörper-, dem Feld-Probekörper- und dem Feld-Feld-Bild unterschieden. Damit Schüler*innen das ohnehin abstrakte Konzept des Feldes mit dem ebenfalls abstrakten Konzept der Energie aber sinnvoll in Verbindung setzten können, ist es wünschenswert, sich für den EFA auf nur eine Repräsentation zu beschränken (insbesondere auch im Gegensatz zu Rückl (1991)). Die Abwägung der Vor- bzw. Nachteile der drei Bilder wird hier kurz erläutert:

Probekörper-Probekörper (PP)

Bei der PP-Repräsentation wird ein Feld durch zwei Probekörper bzw. Quellen gebildet. In diesem Fall kann das Feld als eine durch diese Quellen erzeugte Entität betrachtet werden. Der Vorteil dieser Darstellung ist der offensichtliche Symmetriecharakter, der die Gleichberechtigung beider Quellen betont. Der Nachteil ist allerdings, dass sich so kein wesentlicher konzeptioneller Unterschied zum Kraftbild ergibt, wenn die Quellen lediglich das Feld als eine Art „Medium“ oder Moderator mitführen. Diese Nähe könnte dazu beitragen, dass Schüler*innen die der Wechselwirkung zugeschriebene Energie direkt mit der Wechselwirkung bzw. Kraft selbst gleichsetzen, was wiederum ungünstig ist und direkt auf eine der bereits beschriebenen Lernendenvorstellungen führt (Verwechslung von Kraft und Energie, siehe Kap. 3.2). Außerdem besteht die Gefahr, dass Schüler*innen hier das Feld als eine Art Puffer oder Kleber zwischen den Quellen betrachten könnten

[8] Typischerweise wird das Feld als Verteilung einer physikalischen Größe (z. B. Kraft) im Raum konzeptualisiert, wobei einem Raumpunkt dann ein Wert (und bei Kraftfeldern ggf. auch eine Richtung) zugeordnet wird; siehe Kap. 4.

anstatt es als eigenständige Entität zu begreifen. Auch eine Assoziation der Energie mit der Kraft an sich läge ggf. nahe und sollte aber vermieden werden. Eine Veränderung der Konstellation der Quellen wäre folglich naheliegend eher durch die Kraftwirkung als über das Feld zu beschreiben. Des Weiteren bietet diese Interpretation keine Möglichkeit, die Energie eines elektromagnetischen Feldes zu beschreiben, da hier ein Feld ohne direkten Bezug zu seiner Quelle existiert und mehr als nur die Wechselwirkung zweier Körper darstellt.

Feld-Probekörper (FP)

Das FP-Bild ist die wohl am häufigsten verwendete Repräsentation im Physikunterricht. Es betrachtet ein Feld als eine Entität, die von einer festen Quelle ausgeht und einen Einfluss auf das Verhalten eines darin befindlichen flexiblen Probekörpers hat, beispielsweise einen Ball im Gravitationsfeld der Erde. Das Feld wird hier also als zur Erde gehörig aufgefasst. Darüber hinaus ist es statisch, da sich in diesem Bild lediglich die Position des Balles relativ zur „festen“ Erde verändert. Diese Anschauung ist praktisch bei sehr unterschiedlichen Massen, da das Feld und das Objekt mit erheblich größerer Masse als statisch betrachtet werden können.

Allerdings ist diese Beschreibung weniger vorteilhaft für die Betrachtung zweier flexibler Quellen, die sich gleichsam bewegen können. Für den Fall zweier umeinander kreisender Sterne oder zwei bewegliche Permanentmagneten ist das Bild beispielsweise ungeeignet. Aber selbst wenn die Massen beide sehr unterschiedlich sind, gestaltet sich die Zuordnung der Energie problematisch: Im gleichen Fall (Ball im Gravitationsfeld) steckt nach dem traditionellen Bild die Energie im Gravitationsfeld, welche beim Herunterfallen des Balles teilweise in dessen kinetische Energie umgewandelt bzw. auf diesen übertragen wird. Diese Beschreibung ist insofern problematisch als die Energie, die hier als Attribut des Feldes aufgefasst werden kann, eigentlich von beiden Massen (Erde und Ball) abhängt, also von der Konstellation. Denn ohne den Ball kann keine Energie definiert werden; sie ergibt sich erst durch die Wechselwirkung der beiden Objekte bzw. die Energieübertragung aus deren Veränderung oder Verschiebung. Es ist hier also schwierig, dem Feld (als statisches Feld der Erde) selbst eine Energie zuzuschreiben und den Ball dabei als externen Probekörper zu belassen. Diese Untrennbarkeit von Probekörper und Feld für die Bestimmung der übertragenen Energie steht allerdings im Widerspruch zu der eigentlichen Vereinfachung, nämlich der Trennung von Feld und Probekörper.

Hinzu kommt, dass die Trennung von Feld und Probekörper eine Asymmetrie suggeriert, die der eigentlichen wechselseitigen Beziehung nicht gerecht wird. So kann zwar (unter der Voraussetzung, dass Schüler*innen die Newton'schen Gesetze verstanden haben) im Beispiel von Ball und Erde die größere Beschleunigung des Balles aufgrund seiner kleinen Masse im Vergleich zur Erdmasse plausibel erklärt werden, jedoch ist die eigentliche Wechselwirkung (die beidseitig gleichermaßen stattfindet) auf diese Weise schwer erkennbar, bei der eigentlich beide Körper das Feld beeinflussen. An dieser Stelle könnte es aber insbesondere erstrebenswert sein, die zumindest implizite Verdeutlichung der Symmetrie der Wechselwirkung zu erhalten. Denn deren Bedeutung für die Energie ist nicht unwesentlich, wenn man beachtet, dass es für die Bestimmung zwei Massen braucht. Betrachtet man mehr als einen Probekörper oder das gesamte System beispielsweise in der Nähe eines zweiten Planeten, wird das Bild und damit diese Trennung komplizierter bzw. unmöglich. In diesem Sinne wird es weiters schwieriger, Feld und Probekörper systematisch zu trennen, wenn sich die beiden Massen oder, in Analogie, zwei Magnete oder Ladungen ähneln. Dann ist es sinnvoller, von keinem, zwei einzelnen oder einem gesamten Feld zu sprechen.

Feld-Feld (FF)

Die dritte Variante, die sich logisch zu den beiden anderen reiht, bezieht sich auf die Zuordnung von einem Feld zu jeweils einer Quelle. Dabei wird im Vergleich zu den beiden anderen Interpretationen auch dem/n Probekörper/n als Quelle/n ein Feld zugeordnet. Es gibt also keine auszeichnende Unterscheidung der Körper mehr, die das Feld bilden; sie werden alle als Quelle bezeichnet, unabhängig von der Größe ihrer Masse oder Ladung.

Beim FF-Bild wird das PP-Bild um die einzelnen Felder der Quellen erweitert und zu einem sogenannten *Gesamtfeld* ergänzt: Jede Quelle besitzt ein eigenes Feld, z. B. eine Ladung ein elektrisches Feld. Wenn zwei Quellen miteinander interagieren, so überlagern sich die Einzelfelder zu einem Gesamtfeld, welches dann die Wechselwirkung der beiden Quellen repräsentiert. Das Konzept des Gesamtfeldes bringt dabei mehrere Vorteile mit sich. Zum einen greift es die Symmetrie bzw. Gleichberechtigung einzelner Quellen auf, welche abhängig von ihrer Größe bzw. Stärke (also der Ladung, Masse, etc.) gleichsam das sich ergebende gemeinsame Feld beeinflusst. Zum anderen lenkt es den Fokus von den beiden (oder auch mehreren) Quellen und Einzelfeldern sowie der Kraftwirkung zwischen ihnen auf die Rolle des gemeinsamen Feldes als Ergebnis der Interaktion. Außerdem können über die Veränderung des Gesamtfeldes Rückschlüsse auf die Bewegung bzw. Ver-

änderung der Einzelfelder und Quellen gezogen werden, weswegen das Gesamtfeld als physikalische Entität eine eigenständige Rolle in Prozessen spielt und für Argumentationen herangezogen werden kann.[9]

Energie: Ein weiterer Aspekt, der für das FF-Bild spricht, ist die Zuschreibung von Energie zu einem Feld. Im PP-Bild beispielsweise gibt es keine saubere Definition und Rolle des Feldes, weswegen es hier schwierig ist, dem System eine Energie zuzuschreiben. Zwar könnte man hier dem generellen Feld als Ergebnis die Gesamtenergie des Systems zuordnen, allerdings besteht dann die Gefahr, dass die Energie auch den Quellen selbst zugeschrieben wird. Dies wäre insofern ungünstig als dass die Energie erst sinnvoll dem System durch die Wechselwirkung zugeordnet werden kann. Für das FP-Bild ist eine sinnvolle Zuschreibung der Energie noch schwieriger, denn hier wird der Einfluss des Probekörpers als zweite Quelle ausgeblendet, obwohl die Wechselwirkung zwischen diesem und der „fixen“ Quelle für die Energie des Systems bestimmend ist. Für das FF-Bild als Erweiterung des PP-Bildes ergibt sich eine andere Situation. Hier kann zwar weder den Quellen noch den Einzelfeldern eine Energie zugeordnet werden, dem Gesamtfeld aber sehr wohl. Denn das Gesamtfeld repräsentiert die Wechselwirkung der Quellen und damit das Gesamtsystem als Konstellation. Eine Veränderung der Konstellation bedeutet dann auch einer Veränderung des Gesamtfeldes und damit der Veränderung der Energie, weswegen die Veränderung des Gesamtfeldes mit der Energieübertragung in bzw. aus dem Feld zusammenhängt. Auf diese Weise kann der Energietransfer von Gesamtfeld (stellvertretend für das System) und Umgebung bzw. Bewegung der Quellen als Konzeptidee eingeführt werden (für genauere Erläuterungen siehe Kapitel 7). Ein weiterer Vorteil der FF-Repräsentation ist die Generalisierbarkeit für beliebig viele Quellen. Denn so lässt sich auch qualitativ das Gesamtfeld mehrerer Quellen wie z. B. Ladungen als Bestandteile von Atomen bzw. Atome als Bestandteile von Molekülen und Festkörpern konzipieren. Es entstehen Strukturen von Feldern, die dann beliebig kompliziert sein können, aber durch die Betrachtung des Gesamtfeldes auch für Schüler*innen greifbar werden.[10]

Entscheidung für die FF-Repräsentation mit Gesamtfeld

Die Entscheidungsmöglichkeiten wurden auch bei einem dafür angesetzten Treffen von den Mitgliedern der Fachdidaktik-Forschungsgruppe diskutiert, um eine

[9] Die Grundidee eines „Gesamtfeldes“ hatte bereits Rückl (1991), der sie allerdings mit anderen Repräsentationen wie dem FP-Bild vermischte.

[10] Auf diese Weise kann beispielsweise die Veränderung eines Festkörpers, z. B. das Spannen einer elastischen Feder, auch mit der Veränderung des Gesamtfeldes der Atome bzw. Ladungen beschrieben werden.

fundierte Entscheidung zu treffen und diese zu legitimieren. Die Forscher*innen setzten sich dazu gedanklich mit den verschiedenen Realisierungen für das Konzept auseinander und wogen Vor- und Nachteile ab. Die Ergebnisse dieser Diskussionen fließen in die Entscheidung für die Feld-Feld-Repräsentation im EFA mit ein: Da sie die Nachteile der Feld-Probekörper Interpretation umgeht und die Vorteile der Probekörper-Probekörper Beschreibung aufgreift und um den Begriff des Feldes bzw. Gesamtfeldes erweitert, wird die Feld-Feld Interpretation als Ausgangspunkt gewählt. In diesem Zusammenhang wird der Begriff des Gesamtfeldes als Überlagerung zweier oder mehrerer Felder eingeführt; in diesem steckt dann Energie. Der Begriff *Feld* ergibt sich also im Folgenden aus der Konstellation zweier oder mehrerer Quellen wie z. B. Massen, Magnete oder Ladungen, die miteinander in Wechselwirkung stehen. Die einzelnen Felder der Quellen überlagern sich zum Gesamtfeld. Dieses bzw. dessen Veränderung bietet dann bei der Beschreibung von Prozessen einen Anhaltspunkt für die Beschreibung der Energieübertragung zwischen sich bewegenden Objekten und Feldern.

6.3.7 Normative Festlegung zur Wechselwirkung

Die Begriffe Feld und Wechselwirkung hängen eng miteinander zusammen. Denn wenn zwei Objekte miteinander wechselwirken, geschieht dies über ihre Felder (z. B. ein elektrisches, magnetisches oder Gravitationsfeld). Spricht man über die Wechselwirkung zwischen zwei Objekten (z. B. Ladungen) als Quellen eines Feldes, so bezieht sich die Modellierung auf die Kraftwirkung zwischen den Objekten. Diese ist dann maßgebend für die Energie, die dem System zugeordnet werden kann bzw. die übertragen wird, wenn sich die Wechselwirkung verändert. Da die Wechselwirkung also ausschlaggebend für die Interaktion der Quellen bzw. Felder ist, wird diese auch im Rahmen des EFA konzeptualisiert. Wenn sich die Wechselwirkung verändert, geht dies mit einer Veränderung des Gesamtfeldes und der Übertragung von Energie einher.

6.3.8 Verzicht auf den Arbeitsbegriff

Auch wenn der Begriff „Arbeit“ im traditionellen Unterricht für die Einführung der Energie eine zentrale Rolle spielt, so bringt er einige Probleme mit sich, die hier vermieden werden sollen (s. Kapitel 3.2). Da durch die Verwendung des Feldbegriffs auch auf den Arbeitsbegriff verzichtet werden kann, kommt der EFA ohne dessen explizite Verwendung aus. Stattdessen wird über die Veränderung des

Feldes gesprochen.[11] Diese Betrachtung ermöglicht eine rein energetische Argumentation in Prozessen, indem man lediglich den vorher- und nachher-Zustand von Feldern vergleicht bzw. die Energieübertragung betrachtet. Diese Darstellung zeigt auch, dass es ggf. möglich ist, sogar auf den Kraftbegriff (zumindest zu Beginn) zu verzichten und so weitere Schwierigkeiten oder Verwechslungen dessen mit der Energie vorzubeugen. Inwieweit diese minimalistische Herangehensweise für Argumentationen seitens der Schüler*innen ausreicht, bzw. ob und wie hier das Konzept mit den entsprechenden Ideen aber noch angereichert werden muss, ist an dieser Stelle eine empirische Fragestellung, deren Beantwortung sich aus der Evaluation ergeben wird.

6.4 Designprinzipien des EFA

Als Grundlage für die Entwicklung des Unterrichtskonzeptes zum EFA dienen Designprinzipien, welche die Entwicklung des Konzeptes, insbesondere der Konzeptideen des EFA, maßgeblich anleiten. Sie leiten sich aus den vorangegangenen Überlegungen zu Mehrwert und normativen Festlegungen ab und werden hier in Kürze zusammengefasst:

- Dichotomie der Energie
- Qualitative Beschreibungen (bis auf EFA-M)
- Felder als abstraktes Konzept (mit Veranschaulichung)
- Gesamtfeld als zentrales Element in Prozessen der Energieübertragung
- Von makro- zu mikroskopischen Phänomenen
- Von konkreten zu abstrakten Modellen
- Von offensichtlichen zu weniger offensichtlichen Quelle-Feld-Konstellationen

Die Dichotomie der Energie (Subsumption der traditionellen Energieformen unter *Bewegungsenergie* und *Feldenergie*) stellt den Kern des EFA dar und dient somit als Leitmotiv jeglicher Erklärungen. Dabei spielt das Gesamtfeld als Überlagerung von Einzelfeldern einer Konstellation von Quellen eine wesentliche Rolle, da ihm als Träger Energie zugeschrieben wird, ähnlich der Idee „der Energie ein zu Hause geben“ nach Fiedler et al. (2022). Felder können dabei ein eher abstraktes Konzept bleiben und schematisch veranschaulicht werden, Der logische Aufbau des Konzeptes wird auch den Aufbau der Akzeptanzbefragungen vorgeben. Dabei wird

[11] Es muss nicht darüber gesprochen werden, dass Arbeit verrichtet wird, wenn Energieübertragung auch über die Veränderung eines Feldes beschrieben werden kann. Denn das Aufwenden einer Kraft entlang eines Weges entspricht der Veränderung des Feldes in bzw. entgegen der Wechselwirkungsrichtung.

festgelegt, dass der logische Struktur die Richtung von konkret zu abstrakt[12], von makroskopisch zu mikroskopisch[13] und von offensichtlich zu weniger offensichtlich[14] verfolgt. Diese begründeten und normativ festgelegten Prinzipien werden als zu beachtende Grundlage für die Konzeption des EFA angesehen und werden bei der Formulierung der Konzeptideen und der Zusammenstellung von Beispielen und Kontexten beachtet.

6.5 Abgrenzung des EFA zu anderen Ansätzen

Wie in Kapitel 3 beschrieben, existieren bereits verschiedene Ansätze, Energie mit Feldern in einem Unterrichtskonzept zu verknüpfen. Dazu zählen im Besonderen der Ansatz von Rückl (1991) und der Ansatz von Nordine et al. (2019). Um deutlich zu machen, dass der EFA eine alternative bzw. neue angepasste und vielversprechende Konzeption darstellt, wird er hier kurz mit den bereits bestehenden Konzeptionen verglichen und abgegrenzt.

6.5.1 Vergleich mit Rückl (1991)

Einige Aspekte aus den bisher beschriebenen Vorschlägen von Expert*innen für die Verknüpfung von Energie und Feldern werden aufgegriffen. So werden insbesondere auch die Vorarbeiten von Rückl (1991) mit einbezogen und wesentliche Ideen seiner Arbeit implementiert. Da sein Konzept zwar evaluiert wurde, Rückschlüsse auf die Wirksamkeit einzelner Aspekte allerdings nicht hinreichend möglich sind, müssen die Ideen neu abgewogen und aus heutiger didaktischer Sicht rekonstruiert bzw. eingebettet werden. Grundlage dafür stellen auch die fachliche Klärung und die Vorüberlegungen dar.

Gemeinsamkeiten

Die Sinnhaftigkeit der Hauptidee, dass Energieformen sich auf Bewegungsenergie und Feldenergie zurückführen lässt, ist sowohl fachlich als auch didaktisch bereits mehrfach validiert worden (s. Kapitel 3 und 4). Darüber hinaus gibt es einzelne Konzeptideen, die Rückl verwendet und die im Energie-Feld-Ansatz übernommen

[12] Beispielsweise vom Feld zweier Magnete zum Quark- bzw. Higgsfeld.

[13] Beispielsweise von Satellit und Erde zum atomaren elektrischen Feld in Molekülen und Festkörpern.

[14] Damit ist die Quelle-Feld-Konstellation gemeint. Beispielsweise vom leicht erkennbaren Gesamtfeld zweier Magnete zum weniger offensichtlichen Gesamtfeld von Ball und Erde oder von Atomen in einem Festkörper.

werden. So führt er beispielsweise die Felder in der Reihenfolge „Magnetfeld – Gravitationsfeld – elektrisches Feld“ ein. Dies scheint gerade im Hinblick auf die makroskopische Anschaulichkeit des Magnetfeldes sinnvoll. Die wesentlichen Hauptideen können dann an diesem Beispiel eingeführt und als Analogie auf die weiteren Felder übertragen werden. Ebenso besitzt die Vorgehensweise, im Wesentlichen von makroskopischen zu mikroskopischen Feldern (Atome, Kerne) überzugehen, logische Vorteile. Rückl verknüpft die Bindungsenergie in atomaren Verbindungen (z. B. Moleküle) mit freigesetzter Feldenergie. Auch im Energie-Feld-Ansatz wird die Feldenergie von atomaren Konstellationen mit deren Bindung in Zusammenhang gebracht. Darüber hinaus werden Felder ebenfalls als Entitäten betrachtet, die eine eigene Rolle bzw. Funktion in Prozessen der Energieübertragung besitzen. Rückl beschreibt dies folgendermaßen: „Magnetfelder sind reale Erscheinungen der Natur, die wir [...] nicht direkt sehen [...] können.“ (ebd. S. 71) Sowohl der Realitäts- als auch der Unsichtbarkeitscharakter gleichen sich. Die Einfachheit der EFA Hauptidee impliziert, dass beispielsweise auch die folgende Hypothese als Prinzip übernommen wird:

> „Möglichst alle Begriffe sind durch die Grundbegriffe Feld, Energie, Feldenergie, Wechselwirkung, Ladung und Masse zu erklären.“ (Rückl, 1991, S. 43)

Diese Formulierung wird im Rahmen des EFA auch noch durch das Quark als Quelle sowie das Quark- und Higgsfeld ergänzt werden, trifft in ihrem Kern aber auch hier zu. Ein weiteres wesentliches Konzept, das auch im EFA existiert, ist das Konzept des Gesamtfeldes als Überlagerung von Einzelfeldern. Auch wenn unabhängig von Rückl konzipiert, findet sich dieses Prinzip auf ähnliche Weise in seiner Arbeit. Dabei stellen Massen, Ladungen und Magnete Quellen von Feldern dar. Die Wechselwirkung dieser Felder lässt es zu, die Konstellation als ein gemeinsames Feld zu betrachten, dem dann die Energie zugeschrieben werden kann (Rückl, 1991, S. 80).

Unterschiede

Neben den Gemeinsamkeiten auf globaler Ebene unterscheiden sich das Konzept von Rückl und der EFA in einigen Punkten grundlegend: Während Rückl noch das Kraftkonzept sowie den Arbeitsbegriff stark einbezieht, verzichtet der EFA darauf weitgehend. Stattdessen wird im EFA der Wechselwirkungsbegriff gebraucht und dem Feld mehr Zentralität verliehen, indem es als eigenständige Entität mit aktiver Rolle in Prozessen im Fokus steht. So spricht Rückl beispielsweise von der *Umwandlung* von Energie (eine eher Formen-basierte Terminologie), während

der EFA gänzlich darauf verzichtet und ausschließlich über die Übertragung von Energie zwischen Feldern und Bewegungen spricht.
Im EFA wird das Konzept des Gesamtfeldes verwendet; allerdings in konsistenterer Weise. Bei Rückl wird zwischen stärkeren und schwächeren Feldern unterschieden sowie die Begriffe „Feldvergrößerung“ und „Feldverkleinerung“ mit „Felderzeugung“ und „Reduzierung des Feldes“ vermischt. Das Gesamtfeld wird zwar als Überlagerung von Einzelfeldern beschrieben, aber nicht konsistent verwendet. Manchmal wird auch über einen Probekörper in einem Feld gesprochen (wenn sich die „Stärke“ der Felder deutlich unterscheidet) oder generell nicht auf das gemeinsame Feld, sondern nur auf die Felder eingegangen. Für die Unterscheidung der Terminologie ist dabei die Stärke des Feldes bzw. die Unterscheidung in stärkere bzw. „schwächere Partner“ relevant (ebd. S. 70). Rückl bezeichnet dies dann als Subjekt-Objekt Beziehung. Er beschreibt, dass sich Felder gegenseitig beeinflussen:

> „Im Versuch 4 hingegen wird das Magnetfeld des stärkeren Partners kaum, das des „schwächeren“ Partners sehr stark verändert.“ (Rückl, 1991, S. 70)

In anderen Kontexten ist auch von der „Störung des Feldes“ die Rede, beispielsweise „Das Gravitationsfeld der Kugel stört das Erdfeld“ (ebd. S. 72). Eine Kraft wirke dann aus einem resultierenden Feld heraus. Die Energieübertragung findet statt, wenn sich ein Feld vergrößert oder reduziert. Letzteres kann zu gebundenen Zuständen führen (z. B. Ionenbildung, ebd. S. 119). Die Energie wird mit einer Feldenergiedichte verknüpft, die Feldstärke als physikalische Größe spielt auch eine Rolle. Insgesamt beinhaltet die Konzeption von Rückl zwar die Idee eines Gesamtfeldes, bleibt aber offen für andere Formulierungen bzw. wechselt bewusst zwischen verschiedenen Repräsentationen. Dieser Wechsel geschieht im EFA nicht. Hier wird stattdessen auf eine lineare Sachstruktur geachtet, in der stets das Gesamtfeld als Überlagerung von Einzelfeldern betrachtet wird. Dieses trägt dann Energie, welche bei Veränderung des Feldes übertragen werden kann. Da es keine Notwendigkeit dafür gibt, wird nicht von Probekörpern oder Energiedichte bzw. Feldstärke gesprochen. Stattdessen wird das Gesamtfeld mehr in den Fokus gerückt und auch visuell nicht durch Feldliniendarstellungen sondern eine vereinfachte Grafik visualisiert (siehe Kap. 9).

Aus den Ausführungen von Rückl wird nicht ganz klar, welche Visualisierungen angeboten werden und wie streng sich die Umsetzung an die beschriebene Terminologie hält. Insbesondere die Einführung des Gluonen-Feldes wird weniger diskutiert und bleibt eher offen. Der EFA greift die starke Wechselwirkung durch

die Einführung des Quarkfeldes auf und nutzt dies, um auch Kernprozesse analog zu den anderen Feldern und ihrer Energieübertragung zu beschreiben sowie eine Verknüpfung mit der Masse herzustellen. Das Higgsfeld spielt bei Rückl keine Rolle, wird aber im Rahmen des EFA konzeptualisiert.

6.5.2 Vergleich mit Nordine et al. (2019) und Fiedler (2022)

Gemeinsamkeiten

Der System-Transfer-Ansatz (STA) von Nordine et al. (2019) stellt den Systembegriff in den Mittelpunkt der Energiebetrachtung. Dieses System kann ein Feld sein. Im Energie-Feld-Ansatz ist dieses immer entweder ein Feld oder eine Bewegung. Der STA konzentriert sich auf die Energieübertragung und die Beschreibung der Systemveränderung durch Indikatoren (vgl. Kapitel 3.3.2). Durch den Fokus auf Felder und Energieübertragungsprozesse wird dies auch im EFA der Fall sein, insbesondere bezogen auf die Veränderung von Feldern; hier allerdings nicht über die „Form"-Veränderung, sondern die Änderung von Quellen-Abständen und Vergrößerung/Verkleinerung eines Gesamtfeldes. Die Grundidee (s. Kapitel 3.3.2) ist dabei aber in leichter Abwandlung die gleiche. Als Einstieg ist wie bei Rückl das Beispiel der Magnetwägen didaktisch vorteilhaft, weswegen dies auch im EFA Verwendung findet.

Bei Fiedler et al. liegt der Schwerpunkt auf dem Feld als System und das gleiche Beispiel der Magnetwägen wird für die Sekundarstufe I aufgegriffen. Ähnlich zum EFA werden bei ihnen Felder als unsichtbare und nicht-materielle aber reale Entitäten eingeführt. Die genauen Ideen werden in der Veröffentlichung nicht erläutert. Es ist aber anzunehmen, dass Felder zwar eine bedeutende Rolle im Sinne eines Systems für die gespeicherte Energie spielen, wie zentral Feldes für die Beschreibung von Energieübertragungsprozessen sind und welchen Platz sie neben den traditionellen Energieformen einnehmen bzw. inwiefern sie diese ersetzen wird nicht klar.

Unterschiede

Während im STA auch andere Systeme denkbar sind (z. B. Strahlung als System oder Inneres eines Objektes) und einzelne Energieformen wie Kernenergie oder auch der Zusammenhang von Energie und Masse nicht beschrieben werden, wird der EFA hierfür Vorschläge geben. So werden auch typische Inhalte der Se-

kundarstufe II im Rahmen des EFA mit Feldern verknüpft, die mit dem für die Sekundarstufe I konzipierten STA (noch) nicht erklärt werden können. Im EFA wird auf die explizite Verwendung des Begriffs *System* verzichtet. Außerdem wird dem Feld eine aktive Rolle verliehen, indem es sich entsprechend der Wechselwirkung verändern kann. Auf den Begriff *Verformung* wird dabei im Gegensatz zum STA verzichtet. Darüber hinaus wird der EFA dem Feld als Entität auch eine Veranschaulichung geben. Ein weiterer wesentlicher Unterschied ist, dass die Dichotomie der Energie im Fokus steht. So können Schüler*innen darauf schließen, dass Energie in/aus einem Feld übertragen werden muss, wenn es keine Bewegung sein kann. Für den STA trifft dies nicht zu, da es neben sich bewegenden Objekten und Feldern auch noch andere Systeme geben kann. In diesem Sinne besitzt der EFA eine übersichtlichere Sachstruktur.
Eine Abgrenzung zum Konzept von Fiedler et al. ist durch die teilweise ungenaue Beschreibung des Konzeptes schwierig. Wie oben erwähnt, scheint es allerdings Unterschiede in der aktiven Rolle des Feldes und dem Zusammenhang mit den traditionellen Energieformen zu geben. Jedenfalls richtet sich ihr Ansatz an Schüler*innen der Sekundarstufe I, wohingegen der EFA die Sekundarstufe II adressiert und damit einen höheren Abstraktionsgrad anvisieren kann.

6.6 Resümee

Aufbauend auf den fachlichen und didaktischen Überlegungen wurden Mehrwert und Designprinzipien des EFA formuliert. Diese stellen die Grundlage und Orientierung für die Konzeption dar. Der Energie-Feld-Ansatz greift vielversprechende Ideen bereits existierender Ansätze auf und integriert darauf aufbauend wesentliche Vorteile in einem konsistenten Konzept. Dabei wird Energie nicht definiert und mehr Wert auf die Energieübertragung gelegt; auch entsprechend des Appells von Quinn (2014). Die Grundidee der Überlagerung von Feldern nach Rückl (1991) findet sich auch im EFA wieder, wo sie konsistent und zentraler für die Zuschreibung von Energie zu Feldern genutzt wird. Die genaue Umsetzung der Grundidee, Designprinzipien und Überlegungen zum EFA findet sich in der Konzeption der ersten Version (siehe Kap. 7).

KAPITEL 7

Erste Version des EFA: Konzeption

Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung der ersten Version (die sogenannte Pilot-Version) des EFA. Ausgehend von der vorangegangenen fachlichen Klärung und den Kenntnissen über Lernendenvorstellungen zum Thema werden erste Konzeptideen entwickelt. Zentral ist dabei auch die Berücksichtigung und Umsetzung der in Kapitel 6 angestrebten bzw. festgelegten Überlegungen zu Mehrwert und Designprinzipien. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen sie insbesondere bei der Konzeption der Konzeptideen beachtet werden. Anhand der festgelegten Designprinzipien wird hier die erste zu evaluierende Fassung der Konzeptideen vorgestellt, deren Entwicklung erläutert sowie die entsprechenden Kontexte für die Evaluation begründet. Anschließend wird auf die Konstruktion des Interview-Leitfadens für die Akzeptanzbefragungen eingegangen. Das nächste Kapitel 8 berichtet dann von der empirischen Untersuchung der ersten Version.

7.1 Entwicklung der Konzeptideen

7.1.1 Allgemeine Festlegungen

Arten und Quellen von Feldern

Da ein Feld als Konstellation von zwei oder mehr Quellen und deren Wechselwirkung zustande kommt, muss noch erwähnt werden, auf welche Felder sich der EFA konkret bezieht. Hinsichtlich der fundamentalen Wechselwirkungen macht es Sinn, von elektromagnetischen, schwachen, starken und Gravitationsfeldern zu sprechen. Für die erste Version des EFA wird vorerst auf Phänomene der starken und schwa-

Feld	Quelle	Wechselwirkung
elektrisch	Ladung	elektrische Anziehung oder Abstoßung
magnetisch	Magnet	magnetische Anziehung oder Abstoßung
Gravitation	Masse	gravitative Anziehung

Tabelle 7.1: Übersicht über die drei Felder und Arten von Quellen mit zugehöriger Wechselwirkung für die erste Version des EFA

chen Wechselwirkung verzichtet, Felder der starken Wechselwirkung kommen ab der zweiten Version hinzu. Um diese Felder mit der Definition des Feldes nach dem EFA zu vereinbaren, müssen Quellen und deren Wechselwirkung identifiziert werden. Da im Schulunterricht elektrische und magnetische Phänomene meist separat betrachtet werden, bietet es sich für die elektromagnetische Wechselwirkung außerdem an, diese in zwei Felder zu teilen:[1] das elektrische und das magnetische Feld. Auf diese Weise lassen sich auch elektrostatische und magnetostatische Phänomene separat behandeln. Zusammen mit dem Gravitationsfeld bleiben also drei Felder, die im schulischen Kontext eine dominante Rolle spielen. Diesen Feldern werden jeweils die entsprechenden Quellen zugeordnet (vgl. Tab. 7.1), sodass sich die Betrachtung auf Ladungen, Magnete (bzw. bewegte Ladungen) und Massen beschränkt. Diese sind jeweils Quelle eines entsprechenden Feldes, welche sich dann zu einem Gesamtfeld überlagern können und (Feld-) Energie tragen. Hier sei angemerkt, dass im Rahmen des EFA nur die Überlagerungen von Feldern gleicher Art beschrieben wird, d. h. also magnetische mit magnetischen, elektrische mit elektrischen Feldern, etc. Eine Ausnahme stellt das elektromagnetische Feld da, das im Kontext Strahlung als Überlagerung von elektrischem und magnetischem Feld beschrieben wird.

Sprachgebrauch

Die traditionellen Energieformen werden auf nur zwei reduziert, nämlich Bewegungs- und Feldenergie. Bewegungsenergie beschreibt dabei die Energie, die einem sich bewegenden Objekt mit Masse aufgrund seines Tempos zugeordnet wird. Feldenergie bezeichnet die Energie, die in einem Gesamtfeld gespeichert ist. In diesem Sinne wird davon gesprochen, dass ein Feld Energie „trägt“, „hat“ oder „besitzt“. In Anlehnung daran, und um Homogenität im sprachlichen Gebrauch zu schaffen, wird im Falle der Bewegungsenergie davon gesprochen, dass diese in einer Bewegung steckt oder ein sich bewegendes Objekt Bewegungsenergie „hat“ oder „besitzt“. Bezüglich der Energieübertragung wird davon gesprochen, dass Energie

[1] Die gilt außer im Falle der elektromagnetischen Strahlung, wo das elektromagnetische Feld als Überlagerung von magnetischem und elektrischem Feld beschrieben wird.

„in ein Feld“ oder „aus einem Feld“, bzw. dass Energie „in/auf eine Bewegung“ oder „aus/zu einer Bewegung“ übertragen wird.

Makro- und mikroskopische Felder

Im Hinblick auf die angestrebte umfängliche Anwendbarkeit und Transdisziplinarität (vgl. Kap. 6) des EFA müssen die Feld-Ideen nicht nur makro- sondern auch mikroskopisch anwendbar sein. Dies wird insbesondere für Prozesse der Festkörperphysik relevant, bei denen es um die Verformung von Materialien geht. Wird beispielsweise ein Gummiband gedehnt, so wird nach traditionellem Ansatz Arbeit an diesem verrichtet und Spannenergie darin gespeichert. Nach dem EFA soll auch auf diese Form verzichtet werden, sodass Spannenergie als Form potenzieller Energie auf Feldenergie zurückgeführt werden muss. Diese wird als das elektrische Gesamtfeld der Atome des Materials aufgefasst. Dazu wird die chemische Bindung von Atomen über die elektrostatische Anziehung didaktisch rekonstruiert, also auf das elektrische Feld.[2] Auf diese Weise kann die makroskopische Interpretation von Feldern und insbesondere des elektrischen Feldes (z. B. bei zwei geladenen Luftballons) analog auf mikroskopische Felder, insbesondere das elektrische Feld bei Atomen, extrapoliert werden. Für den EFA wird in diesem Kontext die Vorgehensweise ‚von groß nach klein‘ verfolgt, d. h. mit makroskopischen Erklärungen und Beispielen begonnen und die Logik des Zusammenspiels von Energie und Feldern anschließend auf mikroskopische Kontexte übertragen. Beispielsweise wird das elektrische Feld und dessen Energie zunächst am Beispiel zweier elektrostatisch aufgeladener Luftballons veranschaulicht und die Struktur der Erklärungen dann später auf die Energie im elektrischen Feld von Atomen in Festkörpern erweitert. Die Analogie von makro- und mikroskopischen Feldern in der Vorstellung sowie in Aufbau und Sprachgebrauch soll den EFA in seiner Handhabe demzufolge konsistent und praktisch gestalten.

7.1.2 Übersicht über die Konzeptideen

Basierend auf den vorigen Überlegungen können nun die Konzeptideen für die erste Version des EFA formuliert werden. Diese werden nun in Kürze vorgestellt und die dabei relevanten Design-Entscheidungen anschließend erläutert. Anmerkung: Die letzte Idee zur Energieerhaltung (kursiv) wird nur implizit implementiert. Das

[2] Die genaue Art der Bindungen werden dabei nicht betrachtet, lediglich die Wechselwirkung aufgrund der elektrostatischen (eigentlich quantenmechanischen) Anziehung und Überlagerung der Felder. Die Verwendung der Begriffe makroskopisch und mikroskopisch sind dabei, wie in Kapitel 6 erläutert, nicht mit einer klaren Abgrenzung zweier Größenordnungen zu verstehen, sondern als grobe Einteilung von Prozessen ‚im Großen‘ bzw. ‚im Kleinen‘.

heißt sie wird nicht explizit durch eine Erklärung oder ein Beispiel vermittelt und deshalb auch nicht bewertet oder paraphrasiert werden, ist aber gleichwohl Bestandteil des Konzeptes. Es sei auch angemerkt, dass hier in der ersten Version Wärme noch als Energieform angeführt wird (Konzeptidee 12). Später (ab Version 2) wird diese Konzeptidee fachlich angemessener über die thermische Energie formuliert und Wärme als Prozessgröße (übertragene Energie) verstanden.

Konzeptideen der ersten Version des Energie-Feld-Ansatzes

1. Ein Körper/Objekt ist immer Quelle eines Feldes (welches das Objekt „umgibt“).
2. Es gibt drei Arten von Quellen und Feldern:
   - Ladung (elektrisches Feld)
   - Magnet (magnetisches Feld)
   - Masse (Gravitationsfeld)
3. Ein Feld ist anders als ein Körper/Objekt. Man kann es weder sehen noch anfassen.
4. Ein Feld ist (sofern es die Möglichkeit hat) unendlich weit ausgedehnt.
5. Zwei Felder überlagern sich zu einem Gesamtfeld.
6. Das Gesamtfeld trägt Energie.
7. Diese Eigenschaften gelten in jeder Größenordnung: makroskopisch (bei allg. Objekten) und mikroskopisch (bei Atomen und Teilchen).
8. Wenn sich die Konstellation (d. h. der Abstand) der Quellen ändert, dann ändert sich das Gesamtfeld.
9. Wenn sich das Feld verändert, dann ändert sich auch seine Energie; es wird Energie übertragen.
10. Es gibt nur zwei Arten/Formen von Energie: Bewegungsenergie und Feldenergie.
11. Wenn Energie übertragen wird, erkennt man dies daran, dass sich eine Bewegung verändert (etwas wird schneller oder langsamer) oder ein Feld verändert (der Abstand der Quellen ändert sich).
12. Wärme ist mikroskopische Bewegungsenergie von Atomen bzw. Teilchen.
13. Elektromagnetische Strahlung trägt Feldenergie.
14. *Insgesamt (wenn man Bewegungs- und Feldenergie zusammen betrachtet) ist die Energie immer gleich groß, d. h. erhalten.*

7.1.3 Anmerkungen zum Design der Konzeptideen

Insgesamt beziehen sich die Konzeptideen auf Aspekte, die das Feld selbst sowie dessen Energie und die phänomenologischen Zusammenhänge von Feldern und Energie bei der Energieübertragung beschreiben.

Zu den Begriffen „Quelle“ und „Art“ des Feldes

Beginnend mit der ersten Konzeptidee wird der Begriff der *Quelle* eingeführt. Dieser nimmt eine zentrale Rolle ein, da damit jedem Körper ein Feld zugeordnet werden kann. In Anlehnung an den alltäglichen Gebrauch dieses Begriffs (wie z. B. Wasserquellen) wird dieser bewusst gewählt, um auch Körpern mit Masse, magnetischem Moment oder Ladung den Charakter einer Quelle im Sinne eines Ursprungs zu geben, aufgrund dessen dann etwas „entstehen“ kann; in diesem Fall das Feld. Darüber hinaus wird auf die Assoziation mit der Ausbreitung des „gequollenen“ Mediums bzw. der Entität „Feld“ aufgebaut und dahingehend aufgegriffen, dass sich beispielsweise das elektromagnetische Feld auch von seiner/n Quelle/n entfernt. Dies kann auch als Anknüpfung an die entsprechenden kognitiven Ressourcen nach Hammer (2000) gesehen werden (vgl. Kapitel 2.3). Dieser Ausbreitungs- bzw. Ausdehnungscharakter wird in Idee (4) aufgegriffen. Es spiegelt hier auch implizit den Kausalitätsgedanken wider, dass eine Information oder in diesem Fall ein Feld eine endliche von Null verschiedene Zeit braucht, um sich in den umliegenden Raum hinaus auszubreiten. Wenngleich dieser Gedanke nicht explizit im Konzept aufgenommen wird, bietet er doch die Möglichkeit, nachfolgend die Begrenzung durch die Lichtgeschwindigkeit zu motivieren. Auch die Vorstellung, dass sich ein Feld unter Umständen von seiner Quelle lösen kann, wie es auch bei der elektromagnetischen Strahlung der Falls ist, wäre eine implizite Folgerung, die durchaus Vorteile mit sich bringt könnte und explizit in der zweiten Version des EFA aufgegriffen wird.
Zusammen mit Idee (2) werden dann die Arten von Feldern definiert. Dabei wird der Begriff „Art“ bewusst gewählt, um das Feld selbst mit der Art der Quelle (Masse, Magnet, Ladung) zu verknüpfen. Gemäß dem Begriff Art als Subsumption verschiedener Ausprägungen unter einem Oberbegriff wird hier also von verschiedenen Arten von Quellen und entsprechenden Feldern gesprochen. Vom Begriff „Form“ wird aus zwei Gründen Abstand genommen. Zum einen birgt er das Potential für Verwechslungen mit den Energieformen und deshalb möglicherweise auch die Verwechslung von Feldern mit Energie. Zum anderen soll hier keine zu starke Assoziation mit einer bestimmten geometrischen Form eines Feldes ausgelöst werden. Denn da es für das Verständnis über den Zusammenhang von Ener-

gie und Feldern nicht zwingend der Repräsentation mittels Feldlinien bedarf (die ohnehin nicht für alle Arten von Feldern trivial sind), soll die Verwendung des Feldbegriffs hier vorerst abstrakt bleiben bzw. möglichst viel Spielraum für individuelle bildliche Vorstellungen lassen.
Zur Art des Feldes ist noch zu sagen, dass sich diese Version des EFA auf drei Arten beschränkt, um die Sachstruktur insbesondere bei der Einführung der Feldaspekte maximal übersichtlich zu halten. So wird auch die Tatsache, dass auch eine bewegte Ladung Quelle eines magnetischen Feldes ist, zunächst vernachlässigt, da für die Kontexte der ersten Version nur statische Felder benötigt werden.
Um das Feld als eigenständige physikalische Entität von Objekten und Körpern als Quellen abzugrenzen, wird mit Konzeptidee (3) der Aspekt der Unsichtbarkeit und Unantastbarkeit eingeführt. Dadurch soll Schüler*innen plausibel gemacht werden, dass Felder zwar nicht unmittelbar erkennbar sind, sie aber real existieren und sich erst durch die entsprechende Wechselwirkung bzw. Energieübertragung in Prozessen bemerkbar machen. Durch die Idee, dass man Felder weder „sehen“ noch „anfassen“ kann, soll dementsprechend verhindert werden, ihnen materielle Eigenschaften zuzuschreiben. Möglicherweise führt dies in der Assoziation zu einer weniger Materie-verbundenen Vorstellung von Energie, da das Feld auch als Träger von Energie konzeptualisiert wird.

Zum Gesamtfeld

Mittels Konzeptidee (6) wird der Begriff des Gesamtfeldes im EFA etabliert. Dabei wird dieses als Überlagerung der Einzelfelder von Quellen definiert. Damit manifestiert das Gesamtfeld die Brücke zwischen der Wechselwirkung der Quellen und der Energie und stellt sich somit als Träger ebendieser vor. Da die Energie also dem Feld und nicht direkt der Wechselwirkung bzw. Kraft zugeschrieben wird, kann der Energiebegriff weiter vom Kraftbegriff distanziert werden, als wenn man die Energie direkt der Wechselwirkung zuschreiben würde. Dieser Zwischenschritt soll der Unterscheidung der beiden Größen Kraft und Energie dienen und Verwechslungen seitens der Schüler*innen teilweise vorbeugen.
Die Überlagerung zum Gesamtfeld bezieht sich hier (implizit) nur auf die Überlagerung von Feldern gleicher Art. Diese Einschränkung wird vorgenommen, da sie auch aus fachlicher Sicht sinnvoll ist. Denn wird beispielsweise ein Phänomen zweier sich anziehender Ladungen beschrieben, so wird das resultierende elektrische Feld betrachtet, deren Gravitationsfeld aber aufgrund der im Vergleich zur elektrischen Kraft signifikant geringeren Stärke der Gravitationskraft vernachlässigt. Entsprechend werden auch für den EFA fast ausschließlich Phänomene besprochen, bei denen im Rahmen der didaktischen Rekonstruktion eine strikte

Unterscheidung der Felder gerechtfertigt ist. Das heißt, es werden nur Phänomene behandelt, bei denen es genügt, ein Feld als dominanten Prozesspartner zu identifizieren und mit diesem zu argumentieren.
Eine Ausnahme stellt das elektromagnetische Feld dar, genauer die elektromagnetische Strahlung. Diese wird als Überlagerung bzw. Zusammenspiel von elektrischem und magnetischem Feld über die Feldveränderung und Abstrahlung eines Atoms motiviert (s. Interviewleitfaden). Mit Konzeptidee (6) wird dem Gesamtfeld Energie zugeordnet. Hier wird bewusst auf den Begriff „tragen“ bzw. „haben“ zurückgegriffen, um der Energie eher einen attributiven als einen materiellen/medialen Charakter zuzuordnen. Darüber hinaus verfügt der Begriff „tragen“ über einen dynamischen Aspekt, der insbesondere für die elektromagnetische Strahlung von Vorteil ist, da diese nicht statisch, sondern als sich ausbreitendes Feld aufgefasst werden muss. Konzeptidee (7) überträgt dann die definierten Eigenschaften auf mikroskopische Phänomene, wie z. B. die Energie im elektrischen Gesamtfeld der Atome in einem gespannten Gummiband.
Um die Änderung der Energie mit der Veränderung des Feldes verknüpfen zu können, wird Konzeptidee (8) formuliert. Hier wird der Abstand als Observable genannt, da dessen Veränderung neben der Veränderung einer Bewegung (Änderung des Tempos) eines Körpers das offenkundige Maß für eine Veränderung in einem Prozess ist. Die Abstandsänderung zweier Quellen wird hier also explizit als Indikator für die Veränderung eines Feldes bei Prozessen herangezogen.

Zur Energie und Energieübertragung

Aufbauend auf Konzeptidee (8) wird über Idee (9) die Energieübertragung beschrieben. Darin steckt implizit die Veränderung der Wechselwirkung der beiden Felder und damit der Arbeitsbegriff, auf den hier aber explizit verzichtet wird. Das Tempo als zweite Observable der Energieübertragung wird mit Idee (11) als Folgerung von Konzeptidee (10) eingeführt, wobei letztere die Essenz des EFA darstellt. Die Konzeptideen (12) und (13) fassen zwei prominente Beispiele zusammen, welche im Rahmen der LLE thematisiert werden. Hierzu muss angemerkt werden, dass in der ersten Version noch von „Wärme“ als Bewegungsenergie von Atomen gesprochen wird, wenngleich hier eigentlich die thermische Energie gemeint ist und Wärme streng genommen nur die übertragene Energie bezeichnen sollte. Hier wird aber zwecks Einfachheit vorerst auf die subjektive Vorstellung von Schüler*innen aufgebaut, dass Wärme gerade die Bewegung der Atome ist. In der zweiten Version des EFA wird hier fachlich angemessener der Begriff der thermischen Energie verwandt.

Dass Idee (14) nur implizit genannt ist, liegt daran, dass das Prinzip der Energieerhaltung im Rahmen der LLE immer wieder verwendet wird, z. B. über die Frage „Woher kommt die Bewegungsenergie?“, aber nicht zwingend explizit als Konzeptidee genannt wird. Nichtsdestotrotz wird deutlich gemacht, dass – gerade auch, weil Energie nur in Bewegungen und Feldern existiert – die Gesamtenergie aus beiden erhalten ist und deshalb die genannte Frage überhaupt sinnvoll gestellt werden kann. Im folgenden Abschnitt wird nun die Umsetzung der Konzeptideen zu einem Interviewleitfaden für die erste LLE nach dem EFA mithilfe von geeigneten Kontexten beschrieben.

7.2 Design des Interviewleitfadens

Um die definierten Konzeptideen hinsichtlich ihrer Eignung für die Realisierung des EFA im Unterricht im Rahmen einer Akzeptanzbefragung untersuchen zu können, müssen sie unter Einbezug von geeigneten Kontexten in einem Interviewleitfaden implementiert werden. Die Auswahl der Kontexte sowie die Gestaltung des logischen Aufbaus des Leitfadens sind Gegenstand dieses Abschnittes.

7.2.1 Aufbau des Interviewleitfadens

Gemäß der Methode nach Jung (1992) ist jedes Interview als Akzeptanzbefragung in Bereiche gegliedert, die jeweils aus einer Erklärung durch den/die Interviewer*in und aus Bewertung, Paraphrase und Transfer dieser Erklärung seitens des*r Schülers*in besteht (siehe Kap. 5.4). Dabei stellt jede Erklärung die Implementation einer oder mehrerer Konzeptideen dar. Für die hier beschriebene erste Version verläuft der logische Aufbau des Interviewleitfadens grundsätzlich entlang der Struktur der Konzeptideen. Die Anordnung dieser für die Befragungen wurde wie folgt gestaltet:

1. Ein Feld trägt Energie. (Bsp. magnetisches und Gravitationsfeld)
2. Das Gesamtfeld trägt Energie.
3. Es gibt nur Bewegungs- und Feldenergie.
4. Felder sind makroskopisch und mikroskopisch.
5. Energieübertragung und Veränderung des Feldes.
6. Wärme ist Bewegungsenergie.
7. Elektromagnetische Strahlung ist Feldenergie.

Dieser Aufbau spiegelt die sieben zentralsten Konzeptideen der ersten Version wider und stellt zugleich die Unterteilung der Akzeptanzbefragung dar. Das heißt,

dass jeder dieser Aspekte (unter Zuhilfenahme der weiteren Konzeptideen) einzeln erklärt und über den Dreischritt (Bewertung, Paraphrase, Transfer) überprüft wird. Ein Interview besteht hier also aus insgesamt sieben Bereichen aus jeweils einer Erklärung, gefolgt von einem Dreischritt mit mindestens einer Transferaufgabe. Auf die genaue Struktur wird im Folgenden eingegangen (siehe inbes. Abschnitt 7.2.3). Insgesamt wird über den gesamten Verlauf des Interviews der Prozess der Energieübertragung zwischen unterschiedlichen Feldern und Bewegungen beschrieben (Konzeptideen 8 und 9). Dies soll plausibel machen, dass man für eine Beschreibung von Prozessen über die Energieübertragung „nur“ nach Feldern und Bewegungen „suchen“ muss. Es würde also genügen, die in einem Prozess involvierten Felder und Bewegungen zu kennen sowie deren Veränderung zu beschreiben und mit der Energieübertragung in ein Feld oder aus einem Feld zu argumentieren. Diese logische Struktur zieht sich durch das gesamte Interview und wird schrittweise mit Konzeptideen zu verschiedenen Feldern und Indikatoren angereichert.
Für die erste Version steht hier die Motivation der Energie in einem Feld gleich am Anfang. Dabei wird plausibel gemacht, dass Energie grundsätzlich in Feldern „stecken“ kann. Darauf aufbauend wird diese Idee dann mit der Idee des Gesamtfeldes angereichert, gefolgt von der zentralen Unterscheidung zwischen Bewegungs- und Feldenergie als einzige Formen der Energie.
Wie bereits angedeutet, verläuft der Aufbau des Interviewleitfadens von der makro- zur mikroskopischen Ebene. Um dies zu ermöglichen, müssen zuerst die drei Arten von Feldern auf der makroskopischen Ebene eingeführt werden, sodass dann anschließend das Prinzip von Feldern und Energie über das elektrische Feld der Atome auf die mikroskopische Ebene übertragen werden kann. An dieser Stelle sind dann alle Arten von Feldern sowie der Umstand, dass elektrische Felder auch eine mikroskopische Rolle spielen, eingeführt. Anschließend wird darauf eingegangen, dass Abstands- und Bewegungsänderungen Indikatoren für Energieübertragung darstellen. Das Interview schließt mit einem Bereich zur Wärme und einem Bereich zur elektromagnetischen Strahlung.

7.2.2 Gestaltung der Kontexte

Der beschriebenen Logik folgend, müssen für das Interview Kontexte gefunden werden. Es gibt zum Thema Energie zahlreiche Kontexte, d. h. Beispiele mit Erklärungs- und Anwendungsrelevanz, von denen einzelne mehr oder weniger für die Repräsentation der vorgestellten Konzeptideen geeignet sind. Einzelne wurden auch bereits von den Expert*innen in Kapitel 4.2 genannt. In diesem Sinne ist die Wahl der Kontexte auch keinesfalls eindeutig hinsichtlich ihrer Eignung. So

kann es Kontexte geben, die gleichermaßen oder sogar besser geeignet sind, um eine bestimmte Konzeptidee zu erklären, zu veranschaulichen oder deren Transfer zu überprüfen. Die hier vorgestellte Auswahl definiert also die zum Zeitpunkt der Entscheidung hinsichtlich ihrer Eignung bestmöglich abzuschätzenden Kontexte. Ob und inwiefern diese Auswahl tatsächlich für die Implementation des EFA geeignet sind, wird sich durch die Ergebnisse herausstellen und ist eine empirische Fragestellung.
Aufgrund der Maßnahmen zur Eindämmung von COVID-19 müssen die Interviews online über Videokonferenz durchgeführt werden.[3] Das bedeutet, dass die Beispiele der Kontexte nicht vor Ort im Zwiegespräch vorgestellt und demonstriert werden können. Deshalb werden zu allen Kontexten sowohl für die Erklärungen als auch für die Transfer-Aufgaben kurze Videos von bis zu 30 Sekunden Länge aufgenommen, in denen man den zu diskutierenden Prozess (z. B. ein schwingendes Pendel) bzw. ein Modell sieht. Als Hauptmedium werden Präsentationsfolien über einen geteilten Bildschirm gezeigt, welche dem Aufbau des Interviews folgen. Darin enthalten sind dann die Bilder und Videos bzw. der Link zu einer Simulation. Die Überlegungen zur Wahl der Kontexte werden im folgenden Abschnitt bei der Beschreibung des Inhalts der einzelnen Bereiche erläutert.

7.2.3 Abschnitte des Interviewleitfadens

Der Interviewleitfaden ist nach der oben beschriebenen Logik aufgebaut und entsprechend Tabelle 7.2 gegliedert. Sie gibt eine Übersicht der Gliederung der Erklärungen und Aufgaben bzw. Fragen zu den einzelnen Bereichen. Hinzu kommen noch Bewertung und Paraphrase für jeden Bereich (nach der/den Erklärung/en), diese sind in der Tabelle nicht noch einmal aufgeführt. Die Bezeichnung kennzeichnet die Phase eines Bereiches und steht für die Erklärungen (E) und Aufgaben (A). Bei der Wahl der Kontexten für die Aufgaben wurde darauf geachtet, aus dem Alltag bekannte bzw. interessante Beispiele zu wählen.[4] Die Bereiche richten sich nach der Unterteilung in Abschnitt 7.2.1. Die genauen Formulierungen der Erklärungen sind im Interviewleitfaden zu finden (siehe Anhang C).
Jedes Interview beginnt mit einer Begrüßung, bei der wichtige organisatorische Aspekte geklärt werden, wie z. B. eine kurze Information zu Zweck und Aufbau des Interviews, Umgang mit eventuellen technischen Problemen, Aufklärung über Anonymität der Daten und Auswertung sowie die Absicherung der Einverständ-

[3] Wegen Zugänglichkeit und Verwendung in der Schule wird *ZOOM* als Konferenztool gewählt (siehe *Zoom Video Communications*, ISIN US98980L1017, zoom.us).

[4] Hier soll gemäß Fischer und Draxler (2007) das Verstehen der naturwissenschaftlichen Konzepte Energie und Felder durch geeignete Aufgaben unterstützt werden.

Bereich/Bezeichnung	Nummer	Kontext	Medium
1. Ein Feld trägt Energie	E1.1	Abstoßende Magnetwägen	Video
	E1.2	Satellit um Erde	Simulation
	A1.3a	Fallender Ball	Video
	A1.3b	Abstoßende Luftballons	Video
	Frage1.3	Abstoßende Luftballons	Mündlich
2. Gesamtfeld	E2.1	Automotor	Mündlich
	A2.2	Fadenpendel	Video
	A2.3	Abprallende Magnetwägen	Video
3. Es gibt nur Bewegungs- und Feldenergie	E3.1	Keiner, allgemein	Mündlich
	A3.2	Lastenheber	Video
	Frage3.2	Lastenheber	Mündlich
4. Felder sind makroskopisch und mikroskopisch	E4.1	Automotor	Mündlich
	A4.2	Schleuder	Video
5. Energieübertragung und Veränderung des Feldes	E5.1	Schwingende Magnetringe	Video
	A5.2	Fadenpendel	Video
	A5.3	Federpendel	Video
6. Wärme ist Bewegungsenergie	E6.1	Fadenpendel	Video
	E6.1-A	Fadenpendel, Reibung an der Aufhängung	Video
	E6.1-B	Fadenpendel, Luftreibung	Video
	A6.2	Springender Ball	Video
	A6.3	Kugelbahn	Video
7. Elektromagnetische Strahlung ist Feldenergie	E7.1	Abstrahlung Atom, Mikrowelle	Mündlich
	A7.2	Erwärmung des Bodens	Mündlich
	A7.3	Radiometer (Lichtmühle)	Video

Tabelle 7.2: Struktur des Interviewleitfadens zu Version 1 des EFA.

niserklärung von Erziehungsberechtigten. Den Abschluss des Interviews stellen der Dank sowie ein paar kurze Fragen zur generellen Einschätzung des Ansatzes und Interviews dar. Dabei werden die Schüler*innen nach ihrem generellen Eindruck von Thema und Inhalt des Interviews gefragt. Hier sollen sie einschätzen, für wie sinnvoll und hilfreich sie den Ansatz halten.

Bereich 1: Ein Feld trägt Energie

Beginnend mit Bereich 1 müssen Beispiele für Prozesse mit makroskopischen Feldern gewählt werden, welche die zu erklärende Konzeptidee plausibel darstellen. Dafür wird als erstes auf das magnetische Feld zweier Stabmagneten eingegangen. Vorteil dabei ist, dass davon ausgegangen werden kann, dass den meisten Schüler*innen bewusst ist, dass Stabmagnete jeweils ein magnetisches Feld haben, was sie teilweise auch bereits über die Visualisierung mittels Eisenfeilspänen in der Schule gesehen haben. Ausgehend davon kann hier angenommen werden,

dass sie die Präsenz der Entität „magnetisches Feld“ bereits selbst voraussetzen oder zumindest akzeptieren. Darüber hinaus muss nun plausibel gemacht werden, dass dieses Feld Energie trägt. Dies ist über dessen Rolle in einem Prozess der Energieübertragung möglich. Aufgrund der Einzelstellung der kinetischen Energie[5] wird ein Prozess dargestellt, bei dem die Energie des magnetischen Feldes in Bewegungsenergie übertragen/umgewandelt wird. Dazu werden zwei Stabmagnete in abstoßender Konstellation (z. B. Südpol and Südpol) auf jeweils einen Wagen gesetzt, diese zusammengehalten und anschließend losgelassen, sodass sich die beiden Magnetwägen voneinander entfernen (Video). Die rhetorische Frage, welche dann in der Erklärung beantwortet wird, ist: „Woher bekommen die beiden Wägen ihre Bewegungsenergie?“ Die Antwort („aus dem Feld“) führt dann zur Konzeptidee „Ein Feld trägt Energie“. Um diese Logik plausibel zu machen und anzudeuten, dass dies bei allen Feldern gilt, wird das Prinzip mit dem Gravitationsfeld im Kontext Erde-Satellit wiederholt. Dazu wird eine Simulation der Seite *PhET (Interactive Solutions)* der Universität von Colorado [6] gezeigt, in der ein Satellit die Erde auf elliptischer Bahn umrundet. Analog zum Beispiel der Magnetwägen wird dann erklärt, dass bei kleinerem Abstand des Satelliten zur Erde seine Bewegungsenergie größer ist, als wenn er sich weiter weg befindet. Diese zusätzliche Bewegungsenergie kommt aus dem Gravitationsfeld.
Für den Transfer dieser Erklärung werden zwei Aufgaben zusammengestellt: In der ersten sollen die Schüler*innen die Erklärung der Konzeptidee auf das Beispiel eines fallenden Balles anwenden und argumentieren, dass dieser beim Fallen seine Bewegungsenergie aus dem Gravitationsfeld erhält. Die zweite Aufgabe beschreibt die Abstoßung zweier durch Reibung elektrostatisch aufgeladener Luftballons. Dabei wird ein Luftballon an einen anderen (liegenden) angenähert und die Beschleunigung des zweiten (frei beweglichen) Luftballons beobachtet. Fragestellung und Antwort sind hier analog zur vorigen Aufgabe bzw. dem Beispiel der Magnetwägen, nur diesmal mit dem elektrischen Feld.
An dieser Stelle bietet sich die Überprüfung einer zusätzlichen *Beobachtungsfrage* an. Beobachtungsfragen dienen über den Dreischritt der Akzeptanzbefragungen hinaus der Analyse spezieller Aspekte und tragen damit zusätzlich zur Beantwortung der Forschungsfrage bei (vgl. Kapitel 15.1.1). Bezüglich des Rückgriffs auf andere Konzepte bietet sich also folgende Beobachtungsfrage an:

[5] Die Bewegungsenergie ist neben der Energie in unterschiedlichen Felder die einzige Form, die eben nicht unter den Begriff Feldenergie gefasst wird und dementsprechend eine Einzelstellung besitzt und folglich auch in fast jedem Prozess eine Rolle spielt. Darüber hinaus wird die kinetische Energie bereits nach dem traditionellen Ansatz in der Schule als eine der ersten (intuitiven) Formen eingeführt und darauf aufgebaut.

[6] Siehe University of Colorado, https://phet.colorado.edu/; Simulation: https://phet.colorado.edu/sims/html/gravity-and-orbits/latest/gravity-and-orbits_de.html; Abruf 02/2023

> Welche Konzepte verwenden die Schüler*innen anstelle der Konzeptideen des EFA für die Argumentation (Kraft, traditionelle Energieformen oder andere)?

Anhand der Antwort auf diese Frage können in der Auswertung der Befragungsrunden Rückschlüsse darauf gezogen werden, wie plausibel bzw. nützlich die Schüler*innen die Erklärung einschätzen und ob bzw. wie sie diese für die eigenen Beschreibungen einsetzen können. Sollte ein*e Schüler*in hier also Probleme haben und z. B. auf das Kraftkonzept anstatt der Argumentation mit der Energie des Feldes zurückgreifen, könnte man Rückschlüsse auf problematische Aspekte von Aufgabe oder Erklärung ziehen.

Um zu überprüfen, ob die Schüler*innen von selbst bereits die Quelle des bisher noch nicht explizit eingeführten elektrischen Feldes der beiden Ballons und die Gemeinsamkeiten zu magnetischem und Gravitationsfeld identifizieren können, wird eine abschließende Frage für den ersten Bereich gestellt: „Was ist dir beim letzten Beispiel im Vergleich zu vorher aufgefallen?“ Die folgenden Absätze geben einen kurzen Abriss von logischer Struktur und Wahl der Inhalte der weiteren Konzeptideen.

Bereich 2: Das Gesamtfeld

Hier wird mündlich motiviert, dass die Energie nicht in einem Einzelfeld, sondern in einem Gesamtfeld als Konstellation zweier oder mehr Quellen steckt (E2.1). Hier wird bewusst Freiraum für Assoziationen und Vorstellungen seitens der Schüler*innen gelassen. Die Argumentation wird lediglich auf den Kontext der beiden Magnete übertragen und die Übertragung der Konzeptidee anschließend am Beispiel des Fadenpendels (A2.2) überprüft. Hier, wie auch in einigen folgenden Kontexten, wird bewusst ein schwingendes System gewählt, da hier die Energieübertragung zwischen Feld und Bewegung kontinuierlich „hin- und hergeht“. Auf diese Weise soll das Zusammenspiel von Feld- und Bewegungsenergie hervorgehoben werden. An dieser Stelle bietet sich auch die Formulierung einer weiteren Beobachtungsfrage an. Denn im Gegensatz zu den Kontexten *Luftballons* und *Satellitenbewegung* stellen sowohl die Aufgabe zum fallenden Ball (A1.3a) als auch die zum Fadenpendel (A2.2) keine offensichtlichen Quelle-Feld Konstellationen dar. Das heißt, die Schüler*innen müssen hier erkennen, dass neben der Erde auch der Ball bzw. die Kugel des Pendels ein eigenes Feld besitzen, sodass eine Überlagerung zum Gesamtfeld stattfinden kann. Ob die Schüler*innen diesen Schritt von eher offensichtlichen zu weniger deutlichen Konstellationen schaffen, wird mit Hilfe der folgenden Beobachtungsfrage verfolgt:

> Wie gelingt den Schüler*innen der Übergang von offensichtlichen zu weniger offensichtlichen Quelle-Feld Konstellationen (z. B. von Satelliten zu Pendel)?

Da die Konzeptideen Unsichtbarkeit, Unantastbarkeit und unendliche Reichweite von Feldern nicht explizit für die Argumentation bei Aufgaben notwendig ist, wird hier deren Plausibilität im Rahmen einer zweiten Bewertung (B2.3) explizit überprüft; gefolgt von einer Aufgabe zu den beiden Magnetwägen, diesmal aber in leicht abgewandelter Form in einem Prozess mit abstoßender Wechselwirkung (A2.3).[7]

Bereich 3: Zweiteilung der Energie (Dichotomie)

Der Kernaspekt des EFA, dass es nur Feld- und Bewegungsenergie gibt, wird als einzeln stehende Konzeptidee mündlich erläutert (E3.1). Diese soll auf die Aufgabe des Lastenhebers (A3.2) übertragen werden. Die Besonderheit bei dieser Aufgabe ist, dass eine Akku-Bohrmaschine eine Metallkugel an einem Faden aufrollt und dadurch nach oben zieht. Dabei sollen die Schüler*innen erklären, woher die Energie kommt, die dabei in das Gravitationsfeld übertragen wird. Hier wird erwartet, dass die Schüler*innen mit Hilfe der neuen Konzeptidee nach einem Feld oder einer Bewegung suchen und somit auf die Präsenz einer mikroskopischen Bewegung oder eines (elektrischen) Feldes im Akku des Bohrer schließen. Diese Aufgabe und die Frage nach der entsprechenden Quelle (Frage3.2) dient zugleich als Überleitung zu Bereich 4 und bietet gemeinsam mit diesem die Möglichkeit für die folgende Beobachtungsfrage für die Evaluation:

> Wie gelingt den Schüler*innen der Übergang von makroskopischen zu mikroskopischen Feldern?

Bereich 4: Felder sind makro- und mikroskopisch

Um zu veranschaulichen, dass elektrische Felder auch mikroskopisch auf der atomaren Ebene eine Rolle spielen und das Prinzip der Energieübertragung in ein Feld bzw. aus einem Feld dort analog funktioniert, wird das Beispiel Automotor (E4.1) erklärt. Dabei wird die Frage gestellt, woher denn die Bewegungsenergie des Autos kommt, wenn es beschleunigt. Nach dem verfolgten Prinzip wird erklärt, dass man nach einer Bewegung oder einem Feld „suchen“ muss und – da es hier keine anderen offensichtlichen Bewegungen oder Felder gibt – näher in den Treibstoff

[7] Hier werden die beiden Magnetwägen in abstoßender Konstellation aus einem Abstand aufeinander zu gestoßen. Durch die Abstoßung kehren sie um, bevor sie sich berühren. Das „Abprallen“ ist hier also als ein Stoß ohne mechanische Berührung zu verstehen.

hineinschauen muss. So wird dann auf das mikroskopische elektrische Feld der Atome des Treibstoffs geschlossen und dessen Veränderung (des Gesamtfeldes) mit der Energieübertragung zur Bewegung des Autos verknüpft. Als Transfer-Aufgabe folgt das Beispiel der Steinschleuder (A4.2). Schüler*innen sollen argumentieren, dass man auch hier nach einem mikroskopischen Feld in der Schleuder suchen muss. Sie sollen nach Möglichkeit sogar auf die entsprechende Veränderung des elektrischen Feldes der Atome schließen. Analog sind die Beispiele und Aufgaben der folgenden Bereiche gestaltet.

Bereich 5: Energieübertragung und Feldveränderung

Um zu demonstrieren, dass die Abstandsänderung der Quellen sowie die Bewegungsänderung Indikatoren für die Energieübertragung zwischen Feld und Bewegung sind, wird ein Video von zwei sich abstoßend übereinander gelagerten und dabei schwingenden Magnetringen gezeigt.[8] Die dabei stattfindende Energieübertragung wird hinsichtlich der beiden Indikatoren erläutert. Die Argumentation sollen die Schüler*innen dann auf die ebenfalls periodisch ablaufenden Beispiele des Fadenpendels (A5.2) und des Federpendels (A5.3) übertragen. Dabei ist das Fadenpendel bereits von vorher bekannt, beim Federpendel soll die Konzeptidee aus Bereich 4 hinzugezogen werden, um die Energieübertragung zwischen Bewegung der Kugel und elektrischem Feld der Atome in der Feder (bei Stauchung und Streckung der Feder) zu erklären. Dabei sollte auf die Abstandsänderung der Atome in der Feder geschlossen werden, analog zum vorigen Beispiel mit dem Gummiband der Schleuder.

Bereich 6: Wärme

Um zu veranschaulichen, dass Wärme (ab der zweiten Version „thermische Energie“) als mikroskopische Bewegungsenergie verstanden werden kann, wird der Kontext des Fadenpendels erneut aufgegriffen. Diesmal wird auf das Stoppen des Pendels nach endlicher Zeit und die Frage eingegangen, wohin die Energie aus dessen Bewegung verschwunden ist (E6.1). Dazu werden zwei kurze Videos gezeigt, die ein Modell von der Energieübertragung an der Aufhängung bzw. in der Luft zeigen. Dabei wird einerseits die Reibung an der Aufhängung damit verknüpft, dass die Atome des Materials in Bewegung (Schwingungen) versetzt werden. Dies wird durch eine Kugel auf einer elastischen Feder simuliert, die angestoßen wird und sich dann bewegt (E6.1-A). Diese „mikroskopische“ Bewegungsenergie stellt

[8] Der obere Ring wird fallen gelassen und beginnt aufgrund der magnetischen und Gravitationskraft auf und ab zu schwingen.

a) b)



Abbildung 7.1: BB-Bag von der Seite (a) und von oben (b). Das Volumen-Verhältnis von BBs (‚baby bullets') und Tüte entspricht dem Verhältnis der gleichen Zahl an Luft-Molekülen und eingenommenem Volumen der Luft (Hull et al., 2023).

einen Teil der Energieübertragung dar. Den anderen Teil stellt die Übertragung an die „Luftatome" (stellvertretend für die konstituierenden Atome bzw. Moleküle) dar, welche durch Stöße mit dem Pendel in (mikroskopische) Bewegung versetzt werden.

Diese Energieübertragung wird auch mit Hilfe eines Videos simuliert, in dem ein *BB-Bag* zu sehen ist (A6.1-B). Ein BB-Bag ist eine transparente Plastiktüte, die mit gelben Kunststoff-Kügelchen (BBs)[9] gefüllt ist (siehe Abb.7.1). Das Besondere dabei ist, dass das Verhältnis der eingenommenen Volumina von Kügelchen zu Sackerl dem Verhältnis der eingenommenen Volumina von Atomen zur Luft gleicht (Hull et al., 2023). So können die BBs in der Tüte als Repräsentation für die Atome der Luft aufgefasst werden. Stößt das Pendel mit der Tüte, werden die BBs in Bewegung versetzt, Dies demonstriert die Bewegungsänderung der Atome der Luft bei Stößen mit dem Pendel. Auch wenn dies eine Modellexperiment bzw. eine Analogie mit Einschränkungen darstellt, so ermöglicht diese Darstellung doch eine elegante Veranschaulichung der mündlichen Erklärung. Die Eignung dieser Beschreibung wird anschließend mit Beispielen eines springenden Balls (Flummi, A6.2) und einer hin- und her-rollenden Kugel auf einer U-förmigen Bahn (Kugelbahn, A6.3) überprüft.

Bereich 7: Elektromagnetische Strahlung

Dass elektromagnetische Strahlung Feldenergie trägt, wird am Beispiel der Abstrahlung eines Atoms mündlich erklärt.[10] So soll plausibel werden, dass Strahlung (die abgegebene) Feldenergie trägt. Die Idee wird mit Kontexten zur Erwärmung des Bodens (z. B. Sandstrand im Sommer, auch basierend auf Bereich 6; A7.2)

[9] BBs sind kleine Kugeln, die typischerweise als Munition für Luftdruckwaffen verwendet werden. Es finden sich verschiedene Begriffserklärungen, z. B. „ball bearing" (Kugellager) oder „baby bullet".

[10] Ein Elektron ändert sein Energieniveu, wobei sich das elektrische und magnetische Feld ändert. Die Energie wird als Strahlung freigesetzt (Bohr'sches Atommodell).

und der Bewegung eines Radiometers (A7.3) evaluiert. Bei Letzterem ist dabei nicht die detaillierte Erklärung der Funktionsweise[11] notwendig, sondern lediglich das Erkennen, dass hier Feldenergie der Strahlung zu Energie der Bewegung der Plättchen übertragen wird.

Zusätzliche Beobachtungsfragen

Diese Überlegungen definieren den Interviewleitfaden und damit Aufbau und Inhalt der Akzeptanzbefragungen zur ersten Version des EFA. Die Evaluation dieser Umsetzung wird im nächsten Kapitel ausführlich dargelegt. Hier seien abschließend noch die oben hergeleiteten und für die Evaluation zusätzlich relevanten Beobachtungsfragen zusammengefasst. Die Beantwortung dieser Fragen ist ebenfalls Gegenstand des nächsten Kapitels.

1. Welche Rolle spielt das Kraftkonzept in den Argumentationen der Schüler*innen?
    a. Wie viele Schüler*innen verwenden das Kraftkonzept anstelle des Feldkonzeptes bei der Lösung der Aufgaben?
    b. Wie entwickelt sich die Verwendung des Kraftkonzeptes während des Interviews? Wie oft wechseln sie zwischen Feld und Kraft und was sind mögliche Ursachen?
2. Welche anderen Konzepte werden ggf. anstelle der Konzeptideen des EFA verwendet?
3. Wie gelingt den Schüler*innen der Übergang von makroskopischen zu mikroskopischen Feldern?
4. Wie gelingt den Schüler*innen der Übergang von offensichtlichen zu weniger offensichtlichen Quelle-Feld Konstellationen (z. B. vom Satelliten zum Pendel)?

[11] Es ist nicht notwendig, dass Schüler*innen auf den Mechanismus oder die Beschreibung über den Impuls von Strahlung und Atomen eingehen.

KAPITEL 8

Erste Version: Auswertung der Interviews

In diesem Kapitel wird die Evaluation der ersten Version des Energie-Feld-Ansatzes vorgestellt. Dazu wurden online Einzelinterviews im Format einer Akzeptanzbefragung mit Schüler*innen der Sekundarstufe II geführt, in denen Erklärungen zu verschiedenen physikalischen Prozessen mit Hilfe der Konzeptideen des EFA vorgestellt wurden, welche dann durch die Schüler*innen bewertet, paraphrasiert und bei der Beschreibung weiterer Phänomene angewendet wurden. So wurden die in Kapitel 7 entwickelten Konzeptideen und Kontexte hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit für den Schulunterricht untersucht. Grundlage für die Interviews stellt der in Kapitel 7 vorgestellte Interviewleitfaden dar. Die Interviews wurden, wie in Kapitel 5.4 beschrieben, qualitativ inhaltsanalytisch ausgewertet, um Erkenntnisse zu Benefits und Schwierigkeiten des Konzeptes zu erlangen. Die Analyse gliedert sich in die Beschreibung des Ersteindrucks auf Grundlage der Kodierung der Interviews, die Betrachtung der einzelnen Fälle der Schüler*innen in der Längsanalyse sowie die Integration der Benefits und Problematiken im Rahmen der Queranalyse. Das Kapitel schließt mit der Beantwortung der Beobachtungsfragen, Darstellung der Einschätzung seitens der Schüler*innen und der Zusammenstellung eines Überarbeitungsvorschlages für die Weiterentwicklung zur zweiten Version des EFA.

Kürzel	Geschlecht	Jgst.	Schultyp	Interviewdauer in Stunden	Performanz
$S1_1$	w	10	Real-Gym	2,5	1,53
$S2_1$	w	11	Real-Gym	2,5	1,43
$S3_1$	m	11	Real-Gym	1,75	1,90
$S4_1$	w	12	Real-Gym	1,5	1,71
$S5_1$	w	11	Real-Gym	1,5	1,85
$S6_1$	m	11	Real-Gym	1,5	1,97

Tabelle 8.1: Schüler*innen $S1_1$ bis $S6_1$ der ersten Runde für die Evaluation des EFA mittels Online-Akzeptanzbefragungen. „Real-Gym“ bezeichnet die Schulform Real-Gymnasium. Die Performanz-Werte sind bereits aus der nachfolgenden Auswertung übernommen. Die kürzere Interviewdauer ab $S3_1$ bzw. $S4_1$ ist dem Umstand geschuldet, dass diese Schüler*innen deutlich besser mit dem Konzept zurecht kommen als die ersten beiden.

8.1 Allgemeine Rahmenbedingungen und Stichprobe

Die Stichprobe für die erste Runde der Akzeptanzbefragungen setzt sich aus sechs Schüler*innen der Sekundarstufe II aus österreichischen Real-Gymnasien zusammen. Dabei nahmen zwei Jungen und vier Mädchen an den Online-Interviews teil (siehe Tabelle 8.1).[1] Der Schwerpunkt der Klassenverteilung liegt auf der elften Jahrgangsstufe, also auf dem vorletzten Jahrgang der Sekundarstufe II. Jede der drei Klassenstufen der Sekundarstufe II ist vertreten. Wie man an der Performanz der einzelnen Schüler*innen sehen wird, ist auch das Abstraktionsniveau unterschiedlich und die Einschätzungen und Anmerkungen der Schüler*innen verschieden, was eine detaillierte Weiterentwicklung des Ansatzes begünstigt.

8.2 Kodierung und Ersteindruck

Es folgt nun die in Kapitel 5.4 beschriebene Auswertung der Interviews. Dazu wird zunächst die Kodiertafel vorgestellt und ein Ersteindruck zu den vorliegenden Daten vor dem Hintergrund der qualitativen Analyse gegeben. Anschließend werden die wesentlichen Aspekte der qualitativen Analyse in Form von Längs- und Queranalyse erläutert. Die einzelnen Werte der Kodierung (0, 1, 2 oder Auslassung) sind in der Kodiertafel (Tabelle 8.2) zu sehen. Für die Bestimmung der Werte von Kodierung und Performanz sowie der Erklärung der Darstellungsform und des Farbschemas sei auf Kapitel 5.4 verwiesen.

[1] Die Bezeichnung der Schüler*innen richtet sich nach der Reihenfolge der Interviews. Der Index gibt an, zu welchem Zyklus die*der Teilnehmende gehört; z. B. $S3_2$ für die*den dritte*n Teilnehmende*n im zweiten Zyklus, also der zweiten Version des EFA.

Bereich	Kontext	Nummer	Schüler*innen $S1_1$	$S2_1$	$S3_1$	$S4_1$	$S5_1$	$S6_1$	
Ein Feld trägt Energie.		B1.3	2	2	2	2	2	2	1,80
		P1.3	2	2	2	2	2	2	
	Fallender Ball	A1.3a	1	1	2	0	2	2	
	Abstoßende Luftballons	A1.3b	2	2	2	0	2	2	
	Gemeinsamkeiten	Frage1.3	2	2	2	2		2	
Das Gesamtfeld trägt Energie.		B2.2	1	2	2	1	2	2	1,63
		P2.2	2	2	2	2	2	2	
	Fadenpendel	A2.2	1	1	2	1	2	1	
		B2.3	2	1	2	2	2	2	
	Abprallende Magnetwägen	A2.3	1	0	1	2	2	2	
Es gibt nur Bewegungsenergie und Feldenergie.		B3.2	1	2	2	2	2	2	1,75
		P3.2		2	2	2	2	2	
	Lastenheber	A3.2	1	0	2	1	1	2	
	Quelle des elektrischen Feldes	Frage3.2	2	2	2		2	2	
Felder sind mikroskopisch und makroskopisch.		B4.2		2	2	2	2	2	1,80
		P4.2		2	2	2		2	
	Schleuder	A4.2		1	1	2	1	2	
Energieübertragung und Veränderung des Feldes.		B5.2		2	2	2	2	2	1,80
		P5.2		1	2	2	2	2	
	Fadenpendel	A5.2		0	2	2	2	2	
	Federpendel	A5.3		1	1	2	2	2	
Wärme ist Bewegungsenergie.		B6.2	2	2	2	2	2	2	1,83
		P6.2	2	1	2	2	2	2	
	Springender Ball	A6.2	2	1	2	2	1	2	
	Kugelbahn	A6.3	2	1	2	2	2	2	
Elektromagnetische Strahlung ist Bewegungsenergie.		B7.2	1	2	2	2	2	2	1,76
		P7.2		2	2	2	1	2	
	Erwärmung des Bodens	A7.2		1	2	1	1	2	
	Radiometer	A7.3		1	2	2	2	2	
Performanz			1,53	1,43	1,90	1,71	1,85	1,97	**1,75**

Tabelle 8.2: Kodiertafel der Interviews zur ersten Version des EFA. Eine grüne Kodierung (2) bedeutet angemessene, eine gelbe (1) teilweise problematische und eine rote Kodierung (0) trotz Hilfestellung problematische Performanz. Leere Felder kennzeichnen Auslassungen bzw. fehlende Daten. Die Performanz ergibt sich als Mittelwert der entsprechenden Schüler*innen bzw. Bereiche.

Für die Schülerin $S5_1$ wurde ein Interrate durchgeführt, was zu einer Interrater-Reliabilität (Cohens Kappa) von $\kappa = 0,71$ und damit zu einer „guten“ Übereinstimmung führt (vgl. Kapitel 5.4.3). Die angeschriebenen Performanzwerte für die Schüler*innen bzw. Bereiche ergeben sich als Mittelwerte der einzelnen Werte für die Bewertungen, Paraphrasen und Aufgaben eines*r Schülers*in. Zusätzlich werden auch die Performanzwerte der einzelnen Bereiche als Bereichswerte sowie die Gesamtperformanz der Befragungsrunde dargestellt.

Die Gesamtperformanz für die Befragungsrunde (Mittelwert über die Performanzwerte aller Schüler*innen) beträgt 1,75. Das bedeutet, dass insgesamt ca. jeder vierte Aspekte mit 1 statt mit 2, also teilweise problematisch kodiert wird.[2] Auf den ersten Blick ist zu erkennen, dass drei Schüler*innen ($S3_1$, $S5_1$ und $S6_1$) nur wenige bis keine Probleme während des Interviews zeigen. Im Fall von $S1_1$ sind einige Aspekte teilweise problematisch (Stufe 1) kodiert, aber keiner mit Stufe 0. Das liegt größtenteils daran, dass sich $S1_1$ bereits auf einem hohen fachlichen Niveau bewegt und teilweise andere ihr sympathischere Konzepte (Kraftkonzept, Potential) verwendet, da ihr die Tiefe der vorgestellten Erklärungen des EFA teilweise nicht ausreicht (Details siehe Längsanalyse). Aus diesem Grund wurden mit $S1_1$ auch einzelne Bereiche bewusst ausgelassen, um detaillierter über andere Aspekte zu sprechen. Im Fall von $S2_1$ und $S4_1$, welche eine mittlere Performanz zeigen, treten scheinbar auch einige größere Probleme in den Bereichen 1, 3 und 5 auf, welche im Rahmen der Längsanalyse genauer betrachtet werden.
Betrachtet man die Bereichswerte, fällt auf, dass einzelne Aspekte (überwiegend Bewertungen und Paraphrasen) akzeptabel funktionieren, es in den Bereichen 2 und 3 allerdings größere Probleme gibt. Diese müssen dann im Rahmen der Queranalyse genauer untersucht werden.

8.3 Längsanalyse

In diesem Abschnitt werden die Interviews der Schüler*innen fallspezifisch analysiert. Dazu werden für jeden Fall zunächst problemlose, bzw. sofern sinnvoll, besonders vorteilhaft verlaufene Aspekte und allgemeine Gesichtspunkte kurz dargestellt. Anschließend werden die problematischen Aspekte genauer betrachtetet.

[2] Mit einer Anzahl von ca. 4,1 Aspekten pro Bereich (29 insgesamt geteilt durch 7 Bereiche) bedeutet dies, dass im Mittel ein Aspekt (also eine Bewertung, Paraphrase oder Aufgabe) pro Bereich teilweise problematisch ausfällt.

8.3.1 Analyse Fall S1_1

Schülerin S1_1 besucht die elfte Jahrgangsstufe eines Real-Gymnasiums. Wie bereits oben angemerkt, ist die Schülerin S1_1 in ihrem physikalischen Verständnis bereits weit entwickelt und stellt aufgrund ihrer sehr umfangreichen fachlichen Kenntnisse einen Sonderfall dar. Dies ist auch daran zu erkennen, dass sie eine Schule mit Begabungsförderung besucht und den Schwerpunkt „Science“ belegt. Sie verfügt über Kenntnisse zu Skalar- und Vektorfeldern, dem Orbitalmodell der Atome, zum Elektromagnetismus und zum Higgs-Feld.

Allgemeine und positive Aspekte

Ihr Vorwissen macht sich insbesondere daran bemerkbar, dass sie flexibel zwischen unterschiedlichen Modellen wechselt (Kräfte, Energie, Potential, Felder), je nachdem, welches Modell ihr für eine Beschreibung am besten geeignet erscheint. Deshalb wurde vereinbart, dass sie für die Paraphrasen beide Varianten einer Beschreibung verwendet (ihre persönliche und die vorgestellte). Für die Kodierung wird nur der Umgang mit den vorgestellten Inhalten berücksichtigt. Weil ihre Anmerkungen auf diesem Niveau auch dazu dienen können, das Konzept weiterzuentwickeln, wurden auch weiterreichende Diskussionen geführt, die über die übliche Kodierung hinaus gehen. Aus diesem Grund wurden einzelne Bereiche aus Zeitgründen übersprungen. So ergeben sich besonders im hinteren Teil des Interviews Lücken, die aber bewusst zu Gunsten detaillierter Diskussionen zu den einführenden Konzeptideen entstanden sind. Alle relevanten Aspekte für die Weiterentwicklung sind in der Kodierung sowie den zugehörigen Notizen enthalten und werden hier analysiert. Grundsätzlich zeigt sie ein gutes Verständnis für die Konzeptideen und die damit zusammenhängende Physik. Es fällt auf, dass die Schülerin die Idee, dass ein Feld Energie trägt, akzeptiert und grundsätzlich auch so wiedergibt und anwendet:

> „Ich entnehme Energie aus meinem Gravitationsfeld“ (A3.2)[3]

Bereits zu Beginn äußert sie bei der Bewertung (B1.3), ohne dass dies explizit angesprochen wurde: „[Die] Ursache für alle Energien sind Felder.“ Dass ein Feld eine Quelle besitzt (z. B. Ladung als Quelle bei Luftballons A1.3b bzw. Frage1.3) und dass sich Felder nicht nur makroskopisch, sondern auch (wie man am Beispiel des Lastenhebers A3.2 sieht) mikroskopisch zu einem Gesamtfeld überlagern (B2.2, P2.2), scheint ihr verständlich.

[3]Hier und im Folgenden entspricht die Nummerierung von Bewertungen, Paraphrasen und Aufgaben der Nummerierung im Interviewleitfaden.

Die Aspekte Unsichtbarkeit, Unantastbarkeit und Reichweite eines Feldes (B2.3) findet sie plausibel, auch wenn ihr ein „alldurchdringende[s] Feld [...] zu abstrakt“ erscheint (B7.2). Der für den EFA zentrale Aspekt, dass Energie immer nur in Bewegung und in Feldern gefunden werden kann, scheint sie grundsätzlich plausibel zu finden. So fasst sie diesen Aspekt selbst bereits in Worte (A1.3b bzw. A2.2) Worte:

> „Es gibt ein Feld und daher kann eine Bewegung entstehen.“

Ihr ist bereits bewusst, dass es sich bei Wärme um Bewegungsenergie (und die Interaktion von Atomen und Molekülen) handelt und diese durch Reibung und Stöße innerhalb der Materie übertragen wird sowie dadurch Prozesse nach endlicher Zeit stoppen (Bereich 6). Auch, dass elektromagnetische Strahlung Energie trägt, ist ihr bewusst. $S1_1$ gibt an, dass eine alternative Erklärung über Felder möglich wäre, wenn man diese dann mit mehr Details (z. B. dem Potenzial) erklären würde (B7.2). Anzumerken ist hier auch, dass die Schülerin trotz ihres breiteren und tieferen Wissens neben den für sie aussagekräftigeren Konzepten (Potenzial und Feldlinien) auch die eher einfach wirkenden vorgestellten Feld-Ideen verwendet und das Grundkonzept (insbes. auch Quellen-Bild und Idee des Gesamtfeldes) sinnvoll findet. Über diese insgesamt positiv auffallenden Aspekte hinaus gibt es weitere bereichsspezifische Anhaltspunkte, die durch Verbindung mit den problematischen Aspekten eine möglichst genaue qualitative Abbildung des Falles ermöglichen. Beide Seiten basieren auf der Kodierung und werden im nächsten Abschnitt zwecks Herausarbeitung eines Überarbeitungsvorschlags für die Weiterentwicklung erläutert.

Problematische Aspekte

Andere Konzepte: Potenzial
Die Schülerin greift bereits für die erste Aufgabe der Befragung auf das Konzept des Potenzials zurück: „Das Potenzial ist der Auslöser dafür, dass der Ball nach unten fällt.“ (A1.3a) Dabei vernachlässigt sie den Aspekt der Energieübertragung dahingehend, dass sie nicht über die Energie in einem Feld, sondern über die Energieübertragung aufgrund des „Potenzialunterschied[s] mit Quellen und Senken“ spricht (A1.3b). Bringt man die Äußerungen mit den Antworten zu anderen Aufgaben in Verbindung, so zeichnet sich ab, dass die Schülerin hier das Potenzial aus praktischer Sicht als das nützlichere Konzept auffasst und es der Argumentation mit Feldern vorzieht. Im Gegensatz dazu scheint ihr das „alldurchdringende Feld [...] zu abstrakt“ (B7.2).

Fehlen von Details und Veranschaulichung

Wie bereits oben erläutert, findet sie die Argumentation mit Feldern grundsätzlich sinnvoll, aber zu wenig detailliert. So betont sie an mehreren Stellen, dass die Fragen „Was ist Energie und was ist ein Feld?“ (B2.2, A2.3) sowie „[. . .] wieso kann es Energie tragen?“ (A2.3) nicht beantwortet werden. Für sie gilt: „Der Begriff Energie ist nahezu gleichzusetzen mit einem Feld“ (B3.2). Daher sei das hier dargestellte Konzept für sie zu abstrakt, um damit ausreichend detaillierte Erklärungen formulieren zu können (A2.2, B7.2). Zu Bereich 1 („Ein Feld trägt Energie“) kann man also sagen, dass hier der Feldbegriff zu abstrakt bleibt und die Schülerin durch diesen von ihr empfundenen Mangel an Details deshalb auf das für sie anschaulichere Konzepte des Potenzials zurückgreift.

Speziell in Bereich 2 („Das Gesamtfeld trägt Energie“) spricht sie über die Anschaulichkeit des Potenzials mit Quellen und Senken (s. o) und den damit verbundenen visuellen Charakter (A1.3b, A2.2). Im Zusammenhang mit der Energieübertragung sagt sie: „Wenn die Feldlinien verdichtet werden, stecke ich Energie hinein.“ (A1.3b). Dies wird mit der Analogie „ [. . .] wie wenn ich eine Feder zusammen stauche.“ (A2.3) verknüpft und so auf eine anschauliche Ebene gebracht. Bezogen auf das Gesamtfeld, das sie grundsätzlich akzeptiert (vgl. B2.2, P2.2), spricht sie noch an, dass hier die Verknüpfung mit dem Begriff der Wechselwirkung hilfreich sein könnte. Außerdem spielt für sie die Stärke des Gesamtfeldes eine Rolle: „Wenn ich näher an einer Person bin, steigt dann unser Gesamtfeld?“ (B2.3) Dabei scheint die Stärke des Feldes mit der Stärke der Wechselwirkung bzw. Kraft vermischt zu werden. In diesem Kontext taucht auch die folgende Frage auf: „Woher nimmt das Feld selbst die Energie, so weit zu reichen?“ (B2.3). Diese allgemeine Frage zu Feldern, die nicht nur auf den EFA spezifiziert ist, spiegelt wider, dass die Schülerin hier mit der Darstellung bzw. Erklärung des Feldes nicht zufrieden ist und an dieser Stelle ebenfalls eine detailliertere Erklärung notwendig wird. Dass in Bereich 3 („Es gibt nur Bewegungsenergie und Feldenergie“) auf die traditionellen Energieformen und den Arbeitsbegriff zurückgegriffen wird, stützt diese Vermutung. Hier fehlt das „[. . .] Potenzial [. . .], das aus dem Feld kommt.“ (B3.2).

Grundsätzlich wäre für die Schüler*in eine gründlichere Erklärung von Feldern und deren Zusammenhang mit Energie, ihre Rolle und Veränderung bei Energieübertragung sowie die bildliche Anschauung dieser Prozesse hilfreich. Abschließend merkt die Schülerin diesbezüglich bei der Bewertung zu elektromagnetischer Strahlung auch an: „Wenn man aber genug Zeit hat, die einzelnen Details zu erklären, dann wäre das Feld okay.“ (B7.2). An dieser Stelle spricht sie auch von elektromagnetischer Strahlung als Welle (B7.2). Insgesamt sind die Probleme dieses Falles also auf den Mangel an Details im Feldkonzept zurückzuführen.

8.3.2 Analyse Fall S2_1

Schüler*in S2_1 besucht die elfte Jahrgangsstufe eines Real-Gymnasiums. Das Interview mit S2_1 dauert im Vergleich zum Mittelwert (1,9 h, vgl. Tabelle 8.1) relativ lange (ca. 2,5 Stunden). Der Grund dafür ist hauptsächlich, dass die Schülerin zwar alle Erklärungen uneingeschränkt plausibel findet und auch meistens korrekt wiedergeben kann, bei den Aufgaben aber oft Hilfestellungen benötigt. Dies spiegelt sich auch in ihrem unterdurchschnittlichen Performanzwert von 1,43 wider.

Allgemeine und positive Aspekte

Grundsätzlich positiv fällt auf, dass die Schülerin (mit Ausnahme von B2.3) alle Erklärungen plausibel findet und bis auf P5.2 (Energieübertragung) und P6.2 (Wärme) alle Konzeptideen einwandfrei paraphrasieren kann. Für sie stellen also eher die Aufgaben ein Problem dar. Des Weiteren ist anzumerken, dass die Schülerin an vielen Stellen selbst richtige Konzeptideen bereits einführt, bevor diese erklärt wurden. So äußert sie in Bereich 1:

> „[Ich] stelle mir zwei separate Felder vor, durch die elektrische Ladung.“ (A1.3b)

In Bereich 4 (Felder sind makroskopisch und mikroskopisch) erkennt sie den Zusammenhang zwischen Veränderung des Feldes in der Schleuder und allgemeinen Festkörpern und verallgemeinert so die Konzeptidee des elektrischen Feldes (A4.2). Ein zusätzlicher Aspekt, der nicht einmal explizit als Konzeptidee implementiert wurde, ist der Aspekt der Energieerhaltung. Im Bereich zur Wärme stuft sie die Erklärung als plausibel ein und äußert (ohne danach gefragt worden zu sein):

> „Wir haben bisher immer über Energieübertragung gesprochen. Dass Energie verloren geht ergibt [also] nicht so viel Sinn nach dem, was ich bisher hier gehört habe. Hört sich zwar fremd an aber ergibt Sinn.“ (B6.2)

Diese Äußerung suggeriert, dass sie hier allein auf Grundlage der gebotenen Erklärungen selbst auf Energieerhaltung schließen würde, unabhängig von Vorwissen und davon, dass diese Idee nicht explizit formuliert wurde.

Problematische Aspekte

Fehlen von Überblick und Zeit für Verinnerlichung
Die Schülerin kann einige Ideen trotz Akzeptanz nur schwer wiedergeben bzw. anwenden, auch wenn sie sich über das gesamte Interview bemüht und gegen Ende immer mehr Konzeptideen in ihren Erklärungen integriert. So argumentiert sie anfangs bis A4.2 noch hauptsächlich mit dem Kraftkonzept, versucht aber ab P5.2, überwiegend die vorgestellten Konzeptideen zu verwenden. Dies gelingt ihr allerdings nicht unmittelbar: Die Argumentation

> „Wenn der Magnet nach oben geht, wird Energie in das Magnetfeld gesteckt und wenn er runter fällt in das Gravitationsfeld." (P5.2: Federpendel)

folgt zwar dem richtigen Prinzip, die logische Struktur ist nur genau umgekehrt zur richtigen Antwort; wenn der Magnetring nach oben schwingt, wird Energie aus dem Magnetfeld in das Gravitationsfeld übertragen. Ähnlich verhält es sich mit der folgenden Aussage:

> „Wenn die Kugel nach oben geht, wird Energie in das Gravitationsfeld gesteckt. Wenn die Kugel fällt, dann wird die Energie in das Gravitationsfeld der Kugel gesteckt." (A5.2)

Hier versucht sie ebenfalls, das richtige Prinzip (Energieübertragung zwischen Feld und Bewegung) anzuwenden, versteht aber die logische Struktur der Konzeptidee noch nicht ganz und gibt dem Feld in jedem Fall eine Energie-abgebende Funktion. Dies deutet darauf hin, dass sie mehr Zeit und Übung bräuchte, um die Ideen zu verstehen und anwenden zu können. Eine Aussage, welche diese Vermutung stützt, ist auch eine Äußerung am Ende des Interviews, in der sie anmerkt, dass sie die Aufgaben zwar insgesamt in Ordnung findet, sie das Prinzip bei der „Suche nach Feldern oder Bewegung" aber erst einmal „ [. . .] in den Kopf bekommen [. . .]" müsse (Einschätzung am Ende). Dieses Geständnis spricht auch dafür, dass sie die Konzeptideen an sich verständlich findet, aber mehr Zeit und Übung helfen könnten, um diese auch umzusetzen. Ebenso merkt sie an, dass ihr für Übergänge zwischen Themenbereichen kurze Zusammenfassungen bzw. Ausblick helfen würden, um sich besser orientieren zu können. Dennoch fällt auf, dass sie gegen Ende immer mehr Ideen richtig umsetzen kann. Insofern könnten also punktuelle Hilfestellungen für die Argumentation erleichternd wirken (vgl. auch A5.3, A6.3 und A6.3).

Argumentation im Kraftbild und Vermischung von Kraft und Energie
Besonders zu Beginn des Interviews fällt auf, dass die Schülerin das Feldkonzept noch nicht fehlerfrei übernimmt und vorerst nur auf Nachfrage darauf zurückgreift. So antwortet sie beispielsweise bei A1.3a auf die Frage „woher bekommt der Ball seine Bewegungsenergie; wo war sie vorher?“: „Die Energie kommt aus der Gravitation“ (A1.3a: Fallender Ball). Auch in Bereich 2 (Das Gesamtfeld trägt Energie) zeigt sich, dass ihr das Konzept der Überlagerung von Feldern noch nicht klar ist:

> „Wenn die Kugel ein Feld hat, und wir wissen, dass jedes Feld eine Energie hat, was ist dann die Energie der Kugel? Oder ist dann die Bewegungsenergie Teil von dem Feld?“ (B2.3)

An dieser Stelle merkt sie auch an, dass sie sich Felder wie Wellen vorstellt, die sich überlagern. Zu dieser Zeit bewegt sich die Argumentation von $S2_1$ noch überwiegend im Kraftbild. Dies wird dadurch deutlich, dass sie vermehrt von der „Wirkung“ der Energie bzw. des Feldes spricht:

> „Erst dann kann die Energie der beiden Felder aufeinander wirken und sie beeinflussen sich, sodass etwas passiert.“ (A2.3: Abprallende Magnetwägen)

oder

> „Je näher man der Quelle kommt, umso mehr Energie wirkt sich auf das Objekt aus.“ (P5.2: Magnetringe)

In diesem Zusammenhang spricht sie auch davon, dass das Feld bzw. die Energie ausreichen muss, um eine bestimmte Wirkung zu haben und beispielsweise gegen die Gravitation „anzukommen“:

> „Der Bohrer muss ein Feld haben, sonst könnte er nicht gegen die Gravitation kämpfen.“ (A3.2: Lastenheber)

und

> „Irgendwann ist die Energie, die ich in das Gravitationsfeld des Balles gesteckt habe, nicht mehr ausreichend, um gegen die Gravitationskraft anzukommen und er fällt hinunter.“ (A4.2: Schleuder)

Für die Schülerin scheint also sowohl die Energie also auch das Feld eine Wirkung zu haben; Energie wird als etwas gesehen, das für einen Effekt benötigt wird.

Hier spiegelt sich also eine typische Lernendenvorstellung wider (vgl. Kapitel 3.1). Die Problematik deutet darauf hin, dass das Konzept bisher (zumindest für diese Schülerin) den Unterschied zwischen Kraft und Energie sowie den Zusammenhang zu Feldern nicht ausreichend verdeutlicht. Hier müssten entsprechende Anpassungen vorgenommen werden (siehe Überarbeitungsvorschlag in der Queranalyse).

Bezugspunktproblem und „Nähe zum Feld“ als Bedingung für Überlagerung
Ein Problem, das mit dem fehlenden Verständnis für Felder und die Definition des Gesamtfeldes als Überlagerung einhergeht, ist die Bezugspunktproblematik. Damit wird hier die Schwierigkeit bezeichnet, die einzelnen Felder von Objekten und deren Zusammenhang mit der Energie über das Gesamtfeld zu verstehen. So wird hier beispielsweise bei der Bewertung B2.3 (Kontext Fadenpendel) deutlich, dass die Schülerin akzeptiert, dass Erde und Kugel jeweils ein Feld haben, ihr aber nicht klar ist, wo die Energie steckt. Sie schreibt diese hier dem Einzelfeld zu, nicht aber dem Gesamtfeld, was auch daran liegen könnte, dass die traditionelle potenzielle Energie auch der Kugel statt dem Feld zugeschrieben wird. Hier hängt auch die oben beschriebene „Wirkung“ der Energie mit dem Abstand eines Objektes zu einem Feld zusammen:

> „In der Mitte, wo die Kugel schneller ist, ist sie näher am Feld und wenn sie langsamer wird, ist sie wieder weiter weg.“ (vgl. A2.2: Fadenpendel)

sowie

> „Wenn sie sich nahe kommen, sodass Energie wirkt und sie sich überlagern [...]“ (A2.3: Abprallende Magnetwägen)

Die „Nähe zum Feld“ wird mit dem kleineren Abstand der Quellen verwechselt. Das zeigt, dass die Schülerin bei A5.2 das Prinzip des Gesamtfeldes noch nicht verstanden hat. Das Zusammenspiel von Quellen, Einzelfeldern und deren Überlagerung zum Gesamtfeld ist noch unklar. Bei A2.3 erwähnt sie dann die Überlagerung, verknüpft dies aber nach wie vor mit der Nähe als Bedingung. Nachdem ihr im Anschluss das Prinzip erneut erklärt wird, findet sie es plausibel. Der Aspekt wird in weiterer Folge korrekt wiedergegeben.

Unsicherheit bei der Suche nach Feldern oder Bewegung
Insgesamt fällt auf, dass sie sich bei der Suche nach Feldern unsicher ist. Das bedeutet, dass sie zwar im weiteren Verlauf weiß, dass es ein Feld oder eine Bewegung geben muss (vgl. A4.2: Schleuder), das Feld aber nicht findet. Hier hat sie u. a.

Schwierigkeiten, auch auf der mikroskopischen Ebene nach Feldern zu suchen.
In Bereich 6 (Wärme ist Bewegungsenergie) verwechselt die Schülerin Wärme mit Feldenergie, da sie das Prinzip hier nun anwenden möchte, dies aber auf Basis der vorgestellten Erklärung nicht zielführend ist. Dass es sich um mikroskopische Bewegungsenergie handelt, könne sie sich nicht vorstellen (A6.2: Springender Ball) und auch bei A6.3 (Kugelbahn) spricht sie erst über „Reibungsenergie“. Die Assoziation mit Feld- statt Bewegungsenergie im Kontext Wärme setzt sich auch in Bereich 7 (Elektromagnetische Strahlung ist Feldenergie) fort. Hier sucht sie bei A7.2 (Erwärmung des Bodens) nach dem „Feld des Betons“ und schreibt dem Boden Feldenergie zu; stattdessen aber der Strahlung Bewegungsenergie (als Welle, die sich bewegt). Die Verwechslungen in den letzten beiden Bereichen zeigen, dass die Schülerin Schwierigkeiten damit hat, das Konzept sofort richtig auf Kontexte anzuwenden. Sie bringt hier Feld- und Bewegungsenergie häufig durcheinander.

8.3.3 Analyse Fall S3_1

Schüler S3_1 besucht die elfte Jahrgangsstufe eines Real-Gymnasiums. Er zeigt mit 1,90 die zweitbeste Performanz (nur drei teilweise problematische Aspekte), was sich auch in der vergleichsweise geringen Dauer des Interviews widerspiegelt (ca. 1,75 Stunden). Er scheint außerdem mit mathematischen Beziehungen gut umgehen zu können, denn er argumentiert an mehreren Stellen auch mit dem Newton'schen Gravitationsgesetz („Ich stelle mir das mit Formeln vor“, Bereich 1), z. B. wenn es um die Bewegung des Satelliten um die Erde geht. Darüber hinaus fällt es ihm aber auch allgemein leicht, die vorgestellten Ideen in seinen Argumentationen zu verwenden.

Allgemeine und positive Aspekte

Beim Beispiel des Satelliten (E1.2) erwähnt er von selbst die Abhängigkeit von Feldveränderung bzw. Energieübertragung und Abstandsänderung, ohne dass dies hier erklärt wird. Auch beim Übergang von der makroskopischen zur mikroskopischen Ebene (A3.2: Lastenheber) schließt er selbst schnell auf das elektrische Feld. Auch die Wärme verknüpft er vor der Erklärung schon mit Bewegungsenergie:

> „Wärmeenergie wäre also kinetische Energie?“ (vor B6.2)

Positiv fällt außerdem auf, dass er das Konzept des Gesamtfeldes von vornherein eigenständig über den Verlauf des Interviews verwendet, selbst wenn nicht explizit danach gefragt ist. Dies zeigt, dass das Konzept für ihn offenbar Vorteile bei der Betrachtung von Phänomenen bietet und auch praktisch nützlich sein kann.

Der Schüler verwendet die Kernidee (nur Bewegungs- und Feldenergie) sowie den Energie- und Feldbegriff souverän und äußert, dass er die Erklärungen sinnvoll findet. Er bewertet und paraphrasiert alle Erklärungen ohne Probleme. Nur bei der Suche nach dem Feld (z. B. bei der Schleuder A4.2 bzw. beim Federpendel A5.3) braucht er etwas Hilfe beim Suchen des Feldes.

Problematische Aspekte

Veranschaulichung und elektromagnetische Strahlung als Bewegungsenergie
Die beiden Aspekte zur fehlenden Veranschaulichung des Feldes und zur elektromagnetischen Strahlung stellen zwar keine Probleme im eigentlichen Sinne dar, weil der Schüler hier richtig argumentiert, sie seien aber dennoch genannt. Zum einen äußert er bereits bei der ersten Paraphrase (P1.3):

> „Das Gravitationsfeld ist schwieriger sich vorzustellen."

Diese Anmerkung erscheint im Kontext des Satelliten, der sich um die Erde bewegt. Hier kann man darauf schließen, dass er das Prinzip zwar versteht, aber eine Veranschaulichung bzw. Analogie hilfreich fände. Diesen Umstand verbalisiert er auch am Ende des Interviews selbst. Ein anderer Aspekt ist die elektromagnetische Strahlung (Bereich 7). Hier merkt er bei der Bewertung an, dass er die Erklärung zwar sinnvoll findet, anfangs aber verwundert gewesen sei, dass es sich nicht um Bewegungsenergie handle (B7.2). Auch wenn ihm die Erklärung keine Probleme bereitet, sollte hier dennoch festgehalten werden, dass die intuitive Einschätzung seitens des Schülers die Verknüpfung mit Bewegungsenergie statt Feldenergie war. Diese Tatsache suggeriert, dass hier (ähnlich zu den beiden vorigen Fällen) eine explizite Abgrenzung zwecks Plausibilität sinnvoll wäre.

Verwendung anderer Konzepte und Suche nach Feldern oder Bewegung
Auch wenn er die Überlagerung zum Gesamtfeld akzeptiert, angemessen paraphrasiert und in Aufgabe A2.2 (Fallender Ball) sogar anwendet, greift er bei Aufgabe A2.3 (Magnetwägen) kurzzeitig auf das Kraftkonzept zurück. Bereits in Aufgabe A2.2 verknüpft er (aber auf richtige Weise) das Gesamtfeld mit einem Kraftfeld. Bei der Suche nach Feldern oder Bewegung spricht er nun über die Abstoßung durch das Gesamtfeld, erwähnt aber erst nicht die Energie.
Ähnlich ist es bei Aufgabe A4.2 (Schleuder). Hier spricht er zunächst nur über „Spannenergie", anstatt nach einem Feld oder einer Bewegung zu suchen. Auf Nachfrage kommt er dann aber letztlich selbst zum elektrischen Feld der Atome:

$S3_1$: Die Schleuder hat Spannenergie als gespeicherte Bewegungsenergie.
I: Du hast Spannenergie gesagt, was verbirgt sich dahinter?
$S3_1$: Sie erhält potenzielle Energie, diese ist Feldenergie.
I: Was für ein Feld ist das; was ist in der Feder?
$S3_1$: Das Feld der Moleküle.
I: Was passiert, wenn ich die dann auseinander ziehe?
$S3_1$: Sie wollen zusammen sein, wegen der Ladung also wegen des elektrischen Feldes.

Bei Aufgabe 5.3 (Federpendel) wiederholt sich die stockende Suche nach dem Feld. Hier erwähnt er von sich aus die Energie in der Feder, aber nicht das Feld. Auf Nachfrage antwortet er mit dem elektrischen Feld. Hier fehlt scheinbar insgesamt eine Hilfestellung bzw. genauere Anleitung, wonach gesucht werden soll.

8.3.4 Analyse Fall $S4_1$

Schülerin $S4_1$ besucht die zwölfte Schulstufe eines Real-Gymnasiums. Sie zeigt eine mittlere Lernperformanz ($P = 1,71$) und hat eher am Anfang des Interviews Probleme mit dem neuen Konzept und greift dort stellenweise noch auf das Kraftkonzept zurück.

Allgemeine und positive Aspekte

Insgesamt nimmt sie die Konzeptideen an, bewertet die Ideen (bis auf B2.2) durchweg als plausibel und gibt diese immer adäquat wieder. Ab Bereich 3 (Nur Bewegungs- und Feldenergie) hat sie nahezu keine Probleme mehr. Bei der Bewertung zu Bereich 4 (Felder sind makroskopisch und mikroskopisch) schließt sie von selbst auf einen Zusammenhang für Festkörper:

> „Kann ich dann nicht alles auf ein elektrisches Feld zurückführen, weil alles aus Atomen besteht?“ (B4.2)

Diese eigenständige Schlussfolgerung ist auch schon bei $S2_1$ (B4.2) vorgekommen und suggeriert, dass die Übertragung der Feld-Ideen auf die mikroskopische Ebene grundsätzlich gangbar ist und gerne angenommen wird. Am Ende führt sie an, dass sie es noch schwierig finde „umzudenken“, da man es aus der Schule so [mit dem Kraftkonzept] gewohnt sei (Einschätzung am Ende). Sie gibt an, dass der Ansatz helfe, die bekannten Kräfte in „das große Ganze“ einzuordnen.

Problematische Aspekte

Bezugspunktproblem
Der Schülerin fällt es zu Beginn bei der Aufgabe des fallenden Balles (A1.3a) schwer, zu erkennen, dass die Energie aus dem Gravitationsfeld kommt. An dieser Stelle wurde noch nichts über Quellen und Gesamtfelder erklärt, dennoch schreibt sie dem Ball (analog zum traditionellen Ansatz) bzw. dessen Ort die Energie zu:

I: Wo kommt die Bewegungsenergie des Balles her?
$S4_1$: Durch die Erdbeschleunigung wird der Ball schneller.
I: Wo war die Energie vorher?
$S4_1$: Auf der Höhe wo der Ball war, also im Ausgangspunkt.
I: Siehst du eine Ähnlichkeit zu der Energie im Gravitationsfeld beim Satelliten?
$S4_1$: Nein. Beim Ball gibt es keinen zweiten Bezugspunkt. Vorher war es Satellit und Erde, hier ist es Luft und Ball.

Die Aufgabe wird anschließend durch Erklärung aufgelöst. Nach dem Vorschlag der richtigen Antwort findet sie diese genauso plausibel: „Habe vorher nur nicht so gedacht."
Nachfolgend geschieht das Gleiche bei der Aufgabe der beiden sich abstoßenden elektrostatisch aufgeladenen Luftballons (A1.3b). Hier schreibt sie dem einen Luftballon, der mit der Hand zum anderen ruhenden hingeführt wird, die Energie zu:

> „In dem Luftballon. Die Energie bekommt er durch die Reibung, indem er aufgeladen wird."

Auf die Nachfrage, ob es hier auch ein Feld gebe, antwortet sie: „Ein Energiefeld?" (A1.3b) Anschließend wird die Aufgabe erneut erklärt, gefolgt von Bereich 2 (Das Gesamtfeld trägt Energie). In diesem stellt sich erneut heraus, dass sie hier die Idee des Gesamtfeldes als Überlagerung zweier Felder von zwei Quellen noch nicht angenommen hat:

> „Dass das Pendel ein eigenes Feld hat kann ich mir vorstellen, aber wo ist das zweite, mit dem es sich überlagert?" (A2.2: Fadenpendel)

Nach erneuter Erklärung scheint sie das Prinzip verstanden zu haben, denn in weiterer Folge tritt das Problem nicht mehr auf. An dieser Stelle hält sie noch fest, dass sie sich das Gesamtfeld nun vorstelle wie Wellen, die sich überlagern (B2.3).

Unsicherheit bei der Suche nach Feldern und Bewegung
In Bereich 3 (Es gibt nur Bewegungs- und Feldenergie) fällt es der Schülerin

schwer, von sich aus auf ein (mikroskopisches) Feld im Bohrer zu schließen (A3.2: Lastenheber). Auf Nachfrage kann sie die Argumentation dahingehend aber fortsetzen. Hier bräuchte es also eine kleine Hilfestellung bzw. einen Anreiz für die Suche nach dem Feld. Bei Aufgabe 7.2 (Erwärmung des Bodens) spricht die Schülerin nur von der Energie „in dem Licht“; es ist ihr anfangs unklar, dass es sich hier um ein elektromagnetisches Feld mit Feldenergie handelt. In der Folgeaufgabe (A7.3: Radiometer) argumentiert sie allerdings vollständig richtig.

8.3.5 Analyse Fall S5_1

Die Schüler*in besucht die elfte Jahrgangsstufe eines Real-Gymnasiums und wird bilingual Deutsch-Englisch unterrichtet. Mit einem Performanzwert von 1,85 gehört sie zur besseren Hälfte der Teilnehmer*innen. Dies macht sich daran bemerkbar, dass sie alle Erklärungen plausibel einschätzt und bis auf P7.2 (Bereich 7: Elektromagnetische Strahlung ist Feldenergie) auch alle Konzeptideen problemlos wiedergeben kann. Lediglich bei vereinzelten Aufgaben hat sie leichte Schwierigkeiten.

Allgemeine und positive Aspekte

Es fällt auf, dass sie insbesondere die Ideen des Gesamtfeldes (Bereich 2) als plausibel einschätzt und bei A2.2 (Fadenpendel) auf Anhieb nach dem Feld sucht. Dies ist insofern bemerkenswert, als sie damit neben S3_1 die einzige Schüler*in ist, welche die Aufgabe ohne Probleme mit angemessener Verwendung des neuen Konzeptes *Gesamtfeld* lösen kann:

> „Es muss ein überlappendes Feld geben, also wahrscheinlich geht von der Kugel auch ein Feld aus.“ (A2.2)

Auch im Bereich 6 (Wärme ist Bewegungsenergie) löst sie bis auf anfängliches Zögern die Aufgaben souverän. Bereits bei der Erklärung schließt sie darauf, dass wegen der Teilchenbewegung im Atomverbund (des Materials) auch ein elektrisches Feld involviert sein müsse. Diese Beobachtung geht mit ihrer Einschätzung am Ende und dem Umstand einher, dass sie sich im Umgang mit dem Feldkonzept behaglich fühlt und dessen Bedeutung bzw. Anwendung als nützlich erachtet.

Problematische Aspekte

„Nähe zum Feld“ als Bedingung für Überlagerung
Zwar wird dieser Aspekt in einem nicht problematischen Kontext erwähnt (und

diesbezüglich auch nicht in der Erklärung behandelt), stellt aber dennoch einen potenziellen Problempunkt dar:

> „[Die Luftballons] sind so nahe zusammen, dass sich die Felder überlagern." (P2.2: Das Gesamtfeld trägt Energie)

Hier wird offenbar die Nähe der beiden Felder, also eigentlich der geringe Abstand der beiden Quellen, ähnlich zum Fall $S2_1$ als Bedingung für die Überlagerung zum Gesamtfeld gesehen. Diese Annahme wurde in der Erklärung nicht geklärt und deshalb in Folge aufgelöst, sodass diese Vorstellung nicht mehr aufgetreten ist. Dieser Aspekt sollte aber trotzdem durch eine Anpassung des Konzeptes berücksichtigt werden. Es könnte also (analog zu Fall $S2_1$) über die Ausdehnung der Felder eine bedingungslose Überlagerung motiviert werden. Für diese Argumentation ist dann auch von Vorteil, wenn die Begriffe Wechselwirkung und Feld miteinander in Verbindung gebracht werden, sodass erklärt werden kann, dass auch bei schwacher Wechselwirkungsstärke eine Überlagerung stattfindet.

Unsicherheit bei der Suche nach Feldern und Bewegung sowie Bezugspunktproblem
Bei Aufgabe A3.2 (Lastenheber) hat die Schülerin erst keine Idee, wo die Energie herkommen könnte. Erst mit Hilfestellung kommt sie auf das elektrische Feld des Akkus. Später bei P4.2 merkt sie nachträglich an, dass hier nicht eindeutig zwei Objekte als Quellen vorliegen, das Feld also schwer auszumachen sei. Diese Anmerkung lässt darauf schließen, dass hier der Übergang von der makro- zur mikroskopischen Ebene schwer fällt und die Suche eines Bezugspunktes auf dieser Ebene für sie problematisch ist. Die gleiche Problematik ergibt sich auch stellenweise in den Bereichen 4 (Felder sind makroskopisch und mikroskopisch) und 6 (Wärme ist Bewegungsenergie), bei denen sie erst nur auf Nachfrage und mit Hilfestellung auf das elektrische Feld der Atome schließt (A4.2: Schleuder) bzw. bei der Suche nach Feldern oder Bewegung zögert (A7.2: Springender Ball).

Elektromagnetische Strahlung als Bewegungsenergie
Auch wenn der Fall hier nicht so deutlich ist wie bei den anderen, so ist doch erkennbar, dass sich die Schülerin dabei zurückhält, der elektromagnetischen Strahlung Feldenergie zuzuschreiben bzw. dies auszusprechen. Dies wird bei Paraphrase 7.2 und Aufgabe 7.3 deutlich. Bei der Paraphrase spricht sie zwar von der Strahlung als Welle und später auch als Feld, lässt aber die Zuschreibung von Feldenergie aus:

> „Das Feld gibt, wenn es auf den Boden trifft, seine Energie, also es gibt die Bewegungsenergie an den Boden ab.“ (A7.2: Erwärmung des Bodens)

Auf Nachfrage und in der nachfolgenden Aufgabe spricht sie dann von Feldenergie, in dieser Formulierung hier aber neigt sie noch dazu, über Bewegungsenergie zu sprechen. Ob sie dabei aber eher den Endzustand (Bewegungsenergie im Boden) meint, der Strahlung Bewegungsenergie zuschreibt oder hier schon Energie als Größe generalisiert, kann man nicht eindeutig festmachen. Nichtsdestotrotz würde es sich lohnen, die Erklärung um eine entsprechende Abgrenzung zu erweitern.

8.3.6 Analyse Fall S6_1

Allgemeine und positive Aspekte

Schüler S6_1 besucht die elfte Jahrgangsstufe eines Real-Gymnasiums und wird bilingual Deutsch-Englisch unterrichtet. Sein Performanzwert von 1,97 spiegelt eine nahezu einwandfreie Leistung wider. In seinem Interview braucht er lediglich an einer Stelle Hilfe (A2.2: Fadenpendel). Für den Rest der Befragung bewertet er die Erklärungen nicht nur als sinnvoll, sondern paraphrasiert sie auch ohne Probleme. Obwohl er stellenweise leichte sprachliche Schwierigkeiten hat (Deutsch ist nicht seine Muttersprache), kann er die Konzeptideen anwenden und sicher damit argumentieren. Ähnlich zu Fall S3_1 verknüpft er insbesondere in Bereich 1 (Beispiel Satellit-Erde) das Gelernte explizit mit dem Newton'schen Gravitationsgesetz, also einer Aussage im Kraftbild, gibt die Beispiele aber auch von sich aus mit dem Feldkonzept wieder. Auch wenn bei A5.2 (Fadenpendel) die Äußerung „[Das] Gravitationsfeld erzeugt Energie, die das Pendel nach unten zieht.“ suggeriert, dass er das Kraftkonzept mit dem Konzept der Energie vermischt, so verwendet bzw. unterscheidet er die beiden bei den Aspekten davor und danach korrekt und souverän. Deshalb kann auch hier davon ausgegangen werden, dass es sich eher um ein sprachliches Problem handelt, er z. B. den Ausdruck „erzeugt Energie“ in diesem Kontext ungünstig wählt. Neben dieser Phrase beschreibt er das Beispiel angemessen und bringt die Schwingung sogar korrekt mit dem Beispiel der Magnetringe (Erklärung 5.1) sowie der Abstandsänderung in Verbindung.

Des Weiteren verwendet er in seinen Erklärungen das Prinzip der Überlagerung von Einzelfeldern zu einem Gesamtfeld über Bereich 2 hinaus. Dies ist insofern erwähnenswert als hier zwar auch die sprachliche Konvention „Feld“ auch für die Argumentationen ausreichen würde (so wird es auch in den Instruktionen verwendet), er aber trotzdem die Überlagerung der Einzelfelder zum Gesamtfeld

teilweise weiter mit anführt und erklärt. Dieser Umstand spricht auch hier wieder dafür, dass die Grundidee des Gesamtfeldes auch aus Sicht von Schüler*innen fruchtbar und hilfreich zu sein scheint. Dass in seinem Fall das Feldkonzept generell für Erklärungen hilfreich scheint, zeigt er auch dadurch, dass er sogar bei P6.2 (Paraphrase zur Wärme) auf die Energieabgabe des Gravitationsfeldes (als Voraussetzung der Pendelbewegung) eingeht, um die Erwärmung des Materials zu erklären. Des Weiteren gelangt er bei A4.2 (Schleuder) und A5.3 (Federpendel) über das Ausschlussprinzip auf das elektrische Feld der Atome, indem er Gravitationsfeld und magnetisches Feld in diesem Kontext als zwei der drei bekannten Felder ausschließt.

Problematische Aspekte

Obwohl $S6_1$ souverän argumentiert, gibt es zwei Stellen, an denen hier eine Anpassung des Konzeptes sinnvoll wäre: Zum einen merkt er in Bereich 2 (Das Gesamtfeld trägt Energie) an, dass eine Veranschaulichung für die Überlagerung zum Gesamtfeld wünschenswert sei. Dieser Aspekt tritt auch bei den meisten anderen Schüler*innen auf und wird vermerkt. Zum anderen ist ihm bei Aufgabe A2.2 zum Fadenpendel die Energieübertragung zunächst nicht klar. Hier fragt er:

> „Wieso geht das Pendel wieder nach oben?“ (A2.2: Fadenpendel)

Diese Frage kann zwar ohnehin aktuell nicht allein mit Ideen des EFA beantwortet werden[4], spiegelt aber den Bedarf nach der Verknüpfung mit dem Kraftkonzept wider. Insbesondere die Frage danach, „warum“ bestimmte Prozesse wie beobachtet ablaufen, kann bislang nicht mit den Konzeptideen erklärt werden. Hier zeichnet sich also ab, dass eine Erweiterung dahingehend sinnvoll wäre.

8.4 Queranalyse

Die Queranalyse basiert auf den Ergebnissen der Längsanalyse, integriert Problematiken der einzelnen Fälle und erstellt einen Überarbeitungsvorschlag. Zusätzlich wird dafür anhand der Kodierung ein Blick auf die problematischen Bereiche und Aspekte geworfen. Die Beantwortung der Beobachtungsfragen wird zusammengestellt, bei der Erstellung eines Überarbeitungsvorschlags berücksichtigt und hinsichtlich der Beantwortung der allgemeinen Forschungsfrage interpretiert.

[4] Dafür bräuchte es die konkrete Einbettung bzw. das Eingehen auf das Kraftkonzept, da hier die Energiebetrachtung allein keine Kausalität beschreibt. Später wird es dazu in der Weiterentwicklung eine Lösung über die Tendenz des Feldes geben (Richtung der Wechselwirkung).

Anmerkung zur Plausibilität der Feld-Attribute
Bisher noch nicht erwähnt wurde die Auswertung der Konzeptideen zu den Feld-Attributen, also die Konzeptideen (3) und (4). Diese wurden zwar implementiert, aber nicht explizit als Paraphrase oder Aufgabe kodiert. Sie wurden lediglich im Rahmen der Bewertung B2.3 in Bereich 2 („Das Gesamtfeld trägt Energie“) hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft. Es fällt auf, dass alle Schüler*innen die Aspekte Unsichtbarkeit, Unantastbarkeit und unendliche Ausdehnung als plausibel einschätzen. In der Paraphrase wurde die Nennung dieser Ideen zwar nicht erwartet, sie wurden aber auch seitens der Schüler*innen nicht erwähnt und auch bei der Bearbeitung der Aufgaben nicht explizit genannt. Dies lässt darauf schließen, dass diese Ideen schlüssig und plausibel sind, aber weder notwendig noch hilfreich für die Bearbeitung der Aufgaben erscheinen.[5] Dies macht auch insofern Sinn, als diese Konzeptideen eher die Vorstellung des Feldes unterstützen und weniger als Werkzeug gedacht sind. Auf Nachfrage bei B2.3 beurteilen die Schüler*innen die entsprechenden Ideen durchweg als verständlich, z. B. als „klar“ oder „selbstverständlich“.

8.4.1 Zusammenführung von problematischen Bereichen und Aspekten

Im Rahmen der Längsanalyse haben sich schon problematische Aspekte herausgestellt, die für die Schüler*innen schwierig erscheinen. Betrachtet man die einzelnen Fälle in Summe, so erkennt man Gemeinsamkeiten.

Problematik der Bereiche 2 und 3

Betrachtet man die Kodiertafel (Tab. 8.2 in Abschn. 8.2), so fallen insgesamt zwei Bereiche auf, die im Vergleich schwächer ausfallen: Bereich 2 (Das Gesamtfeld trägt Energie) und Bereich 3 (Es gibt nur Bewegungs- und Feldenergie). Innerhalb dieser Bereiche scheinen besonders die Aufgaben A2.2 (Fadenpendel) und A2.3 (Abprallende Magnetwägen) sowie Aspekt A3.2 (Lastenheber) schwierig zu sein. Dazu muss vorab gesagt werden, dass gerade $S1_1$ und $S2_1$ in diesen beiden Bereichen relativ schwach sind. Bei $S1_1$ wird dabei festgehalten, dass es sich hier weniger um Probleme mit den Konzeptideen und eher um das Bedürfnis nach mehr Details handelt. Insofern erhält $S1_1$ bei der Betrachtung hier eine Sonderrolle. Betrachtet man die entsprechenden Aspekte für die übrigen Fälle, so zeichnen sich Gemeinsamkeiten ab, welche auch aus Tabelle 8.3 ersichtlich werden. In dieser

[5] Um ein mentales Bild von Feldern mit fachlich angemessenen Merkmalen zu fördern, könnten diese Konzeptideen jedoch durchaus sinnvoll sein.

Problem	Schüler*innen					
	$S1_1$	$S2_1$	$S3_1$	$S4_1$	$S5_1$	$S6_1$
Fehlende Veranschaulichung	✗	✗	✗*		✗	✗*
Bezugspunktproblem		✗	✗	✗	✗	
Elektromagnetische Strahlung als Bewegungsenergie		✗	✗	✗	✗	
Unsicherheit bei der Suche nach Feldern/Bewegungen		✗		✗	✗	
Verwendung anderer Konzepte	✗	✗	✗			
Verwendung des Kraftkonzeptes statt EFA		✗	✗			
„Nähe zum Feld“ als Bedingung für Überlagerung		✗			✗	
Fehlen von Details zu Energie und Feldern	✗					
Fehlen eines Überblicks im Interview	✗					

Tabelle 8.3: Zusammenstellung der Problematik der Schüler*innen der ersten Runde von Akzeptanzbefragungen; sortiert nach der Häufigkeit des jeweiligen Problems. Ein Kreuz (✗) markiert das Auftreten eines Problems. Ein Stern „*“ markiert die Äußerung des Wunsches nach einer Anpassung des Erklärungsangebotes seitens des*r Schüler*in. Bei „Verwendung anderer Konzepte“ greift $S1_1$ auf das Potenzial, $S2_1$ auf die Reibungsenergie und $S3_1$ auf die Spannenergie zurück.

wurden die einzelnen Probleme aus der Längsanalyse als Kategorien integrativ zusammengeführt und das entsprechende Auftreten bei den jeweiligen Schüler*innen angegeben. Man sieht, dass die Probleme von Bereich 2 (also A2.2 und A2.3) mit der Verwendung des Kraftkonzeptes sowie dem Bezugspunktproblem und der damit verbundenen Nähe-Bedingung für die Überlagerung einhergehen.
Um diese Problematik zu lösen, muss das Prinzip des Gesamtfeldes insbesondere hinsichtlich seiner Entstehung aus Quellen-Konstellationen besser erläutert werden. Dabei könnte auch die bereits in den fallspezifischen Beschreibungen geforderte Veranschaulichung helfen. Konkrete Vorschläge werden im nächsten Abschnitt im Rahmen eines Überarbeitungsvorschlages gegeben.
Dass vor allem A3.2 (Lastenheber) in Bereich 3 problematisch ist, hängt (wie auch in Tab. 8.3 zu sehen) mit dem Rückgriff auf das Kraftkonzept, dem Bezugspunktproblem sowie der Unsicherheit bei der Suche nach Feldern und Bewegungen zusammen. Dies liegt vermutlich daran, dass bei der Aufgabe des Lastenhebers ein recht hohes Maß an Transfer erwartet wurde, denn die Schüler*innen sollten ausgehend von der Konzeptidee (Es gibt nur Feld- und Bewegungsenergie) selbst nach einem Feld im Bohrer bzw. seinem Akku suchen und so auf ein elektrisches Feld kommen. Da dies aber teilweise mit der erst danach eingeführten Idee der mikroskopischen Felder zusammenhängt, entstehen hier Unsicherheiten. Diese könnten durch einen einfacheren logischen Aufbau des Interviews vermieden werden.

Dazu muss als Anpassung eine bessere Trennung von makroskopischen und mikroskopischen Felder auch in der Interviewstruktur erkennbar sein. So könnte die Lernsequenz beispielsweise dadurch besser gegliedert werden, dass kurze Überblickssequenzen in Form von Zusammenfassungen und Ausblicken während des Interviews gegeben werden. Eine derartige strukturelle Rahmung des Gelernten verspricht ohnehin einen positiven Einfluss auf die Performanz von Schüler*innen, da hier eventuell auch die kognitive Belastung durch eine transparentere Struktur reduziert werden kann.

Bezugspunktproblem
Weitere problematische Aspekte neben den Bereichen 2 und 3 sind die Aspekte A1.3a, A4.2 und A7.2. Hier fällt auf, dass es sich, auch im Hinblick auf die eben diskutierten Aspekte, um Aufgaben handelt. Der Transfer der Konzeptideen scheint also problematisch zu sein, die Bewertung und Wiedergabe derselben aber einigermaßen plausibel bzw. einfach. Die drei problematischen Aufgaben seien im Folgenden kurz diskutiert. Aufgabe 1.3a (Fallender Ball) erfordert ein hohes Maß an Transfer, da dieses ein typisches Beispiel im Schulunterricht zu traditionellen Energieformen darstellt. Hier liegt es vielen Schüler*innen aufgrund ihrer Erfahrung nahe, dem Ball bzw. seinem Ort die potenzielle Energie zuzuschreiben und nicht dem Feld. Die Energieübertragung wird dabei entsprechend dem Kraftkonzept über die „Gravitation“ erklärt. Insofern ist es nicht überraschend, dass hier mehrere Schüler*innen auf das Kraftkonzept zurückgreifen (z. B. $S2_1$) bzw. Probleme haben, den Ball und die Erde als Bezugspunkte eines Feldes oder auch überhaupt das Gravitationsfeld als Superposition zu erkennen. An dieser Stelle könnte es helfen, wenn das Gesamtfeld zuerst eingeführt wird und diesem erst anschließend die Energie zugeordnet wird. Auf diese Weise könnte die Rolle des Gravitationsfeldes und der Erde-Ball Konstellation verdeutlicht werden.

Suche nach Feldern und Bewegungen schwierig
Das Problem mit der Suche nach Feldern und Bewegung kumuliert bei Aufgabe A.4.2 in Bereich 4 (Felder sind makro- und mikroskopisch). Diese stellt als erste Aufgabe (nach A3.2: Lastenheber) das mikroskopische Feld der Atome in den Fokus, nach dem hier auch explizit gesucht werden soll. Nachdem dieses Feld durch das Beispiel „Automotor“ in der Erklärung eingeführt werden sollte, scheint das Prinzip für die Beantwortung der Aufgabe Aber noch nicht klar genug zu sein. Hier bietet es sich folglich an, die Beispiele anzupassen und ggf. ähnlichere Kontexte zu wählen, um die Suche zu erleichtern. Darüber hinaus könnte auch eine Art Anleitung angeboten werden, das die unterschiedlichen Quellen und Felder zu-

sammenfasst und einen Überblick über typische Kontexte bietet. So könnte man Schüler*innen ein Werkzeug in die Hand geben, mit dem sie die neuen Konzeptideen auch auf mikroskopische und damit schwieriger greifbare bzw. vorstellbare Felder übertragen kann.

Rückgriff auf das Kraftkonzept
Problematisch war bei einzelnen Schüler*innen auch die Unterscheidung von Energie und Kraft (z. B. $S2_1$). Da die Schüler*innen dann häufig auf das Kraftkonzept zurückgreifen und die Konzepte Kraft und Energie vermischen, könnte hier (auch wenn diese Problematik eine allgemein physikdidaktische ist) eine explizitere Differenzierung helfen. Dazu bietet sich das Ersetzen bzw. Verknüpfen des Kraftbegriffs mit dem Begriff der Wechselwirkung an. Dieser hat den Vorteil, dass er den dynamischen Charakter der beidseitigen Anziehung bzw. Abstoßung mehr in den Fokus rückt. Hier könnte es von Vorteil sein, das Feld selbst stärker mit der Wechselwirkung der Quellen zu kombinieren, indem man betont, dass zwei Quellen über ihre Felder miteinander wechselwirken und sich diese zu einem Gesamtfeld überlagern. Die Energie könnte diesem dann anschließend als zusätzliche Größe zugeordnet werden.

Nähe als Bedingung für Überlagerung der Felder
Was den Aspekt „Nähe zum Feld“ als Bedingung für die Überlagerung oder der Wechselwirkung zweier Felder angeht, so ist dies zwar in keiner Erklärung explizit behandelt worden, muss aber dennoch für die Überarbeitung des Konzeptes berücksichtigt werden. Hier könnte es von Vorteil sein, die Unabhängigkeit der Überlagerung vom Abstand der Quellen explizit zu erläutern. Dazu sollte an die theoretisch unendliche Ausdehnung der Felder angeknüpft werden. So kann vermittelt werden, dass sich zwei Felder auch bei sehr großem Abstand überlagern, selbst wenn die Wechselwirkung nur sehr schwach ist; eine Überlagerung gibt es aber immer.[6]

Elektromagnetische Strahlung als Bewegungsenergie
Die Problematik zur elektromagnetischen Strahlung zählt zu den dominanten Problemen und zeigt sich in Aufgabe A7.2. Hier wird deutlich, dass elektromagnetische Strahlung mit Bewegungsenergie assoziiert wird. Die Begründungen dafür sind in der Kodierung bzw. der Längsanalyse erläutert worden und beziehen sich meist auf die Bewegung der Strahlung. Um hier den Feld-Charakter stärker in den Vordergrund zu rücken, findet der folgende Vorschlag Anwendung: Die Strahlung

[6] Dies gilt, sofern Felder nicht abgeschirmt werden.

muss als Feld stärker von der Bewegung eines Objektes abgegrenzt werden und als Überlagerung von elektrischem und magnetischem Feld explizit und plausibel ersichtlich mit Feldenergie verknüpft werden.

8.4.2 Interpretation der Beobachtungsfragen und Resümee

Dieser letzte Abschnitt setzt die Beobachtungsfragen in Beziehung zur eigentlichen Forschungsfrage nach der Umsetzbarkeit des EFA. Die in Kapitel 7 erläuterten Fragen seien zwecks Überblick hier noch einmal gebündelt dargestellt:

1. Welche Rolle spielt das Kraftkonzept in den Argumentationen der Schüler*innen?
    a. Wie viele Schüler*innen verwenden das Kraftkonzept anstelle des Feldkonzeptes bei der Lösung der Aufgaben?
    b. Wie entwickelt sich die Verwendung des Kraftkonzeptes während des Interviews? Wie oft wechseln sie zwischen Feld und Kraft und was sind mögliche Ursachen?
2. Welche anderen Konzepte werden ggf. anstelle der Konzeptideen des EFA verwendet?
3. Wie gelingt den Schüler*innen der Übergang von makroskopischen zu mikroskopischen Feldern?
4. Wie gelingt den Schüler*innen der Übergang von offensichtlichen zu weniger offensichtlichen Quelle-Feld Konstellationen (z. B. vom Satelliten zum Pendel)?

Für die Beantwortung der eigentlichen Forschungsfrage lassen sich aus den Antworten auf diese speziellen Fragen einige Schlüsse ziehen: Insgesamt greifen vier der sechs Schüler*innen auf das Kraftkonzept zurück, dies aber sehr unterschiedlich. Die Schüler*innen $S1_1$ und $S3_1$ verwenden das Kraftkonzept nur punktuell an einer Stelle dort, wo sie sich bei der Verwendung der Konzeptideen (insbesondere auch im Zusammenhang mit dem Bezugspunktproblem beim Gesamtfeld) unsicher sind. Aus dem gleichen Grund verwenden auch $S2_1$ und $S4_1$ das Kraftkonzept, da dieses offenbar für die Argumentation hilfreicher erscheint. Hinsichtlich der obigen Diskussionen ist dies auch beispielsweise für die Aufgabe des Fadenpendels nachvollziehbar, da hier das „Feld der Kugel“ weniger offensichtlich ist. Das Kraftkonzept bietet also anscheinend dann eine hilfreiche Alternative, wenn die Vorzüge des EFA nicht klar ersichtlich sind. Das Gleiche gilt für die Verwendung der traditionellen Energieformen, auf die stellenweise von $S2_1$ und $S3_1$ zurückgegriffen wird.

Diese werden meist dann genannt, wenn die Präsenz eines mikroskopischen Feldes nicht offensichtlich ist und sich demnach die Suche danach aufwendig gestaltet. Auf Nachfrage lässt sich hier aber auch der Transfer auf die mikroskopische Ebene motivieren. Anhand der Fälle $S2_1$ und $S4_1$ erkennt man, dass die Unsicherheit bei der Suche nach Feldern und Bewegung sowie der Rückgriff auf das Kraftkonzept in schwierigen oder unklaren Situationen mit der Schwierigkeit des Übergangs auf die mikroskopische sowie zu weniger offensichtlichen Quelle-Feld Konstellationen wie z. B. das Fadenpendel korreliert.

Diese Einblicke zeigen auf, dass einzelne Aspekte für die nächste Version überarbeitet werden müssen, um die EFA Konzeptideen attraktiver zu gestalten und damit den Rückgriff auf andere Konzepte zu reduzieren. Außerdem müssen Umstrukturierungen vorgenommen werden, um den Übergang auf die mikroskopische und weniger offensichtliche Ebene zu erleichtern. Die Ergebnisse lassen eine grundsätzliche Umsetzbarkeit vermuten. Aufbauend auf den obigen Überlegungen wird im Folgenden ein Vorschlag für die Weiterentwicklung des des Ansatzes zusammengestellt, der hier als „Überarbeitungsvorschlag“ bezeichnet sei.

8.4.3 Einschätzung der Schüler*innen

Am Ende eines Interviews wurden die Schüler*innen jeweils gefragt, wie sie den vorgestellten Ansatz generell finden; also wie sinnvoll und hilfreich sie die vorgestellten Inhalte und Beispiele einschätzen und ob sie diesen oder den traditionellen Ansatz für die Schule bevorzugen würden. Hier fällt auf, dass nahezu alle Schüler*innen (bis auf $S1_1$) den Ansatz als hilfreich und sinnvoll einschätzen. Schülerin $S1_1$ merkt an, dass sie den Ansatz zwar sinnvoll, aber zu wenig detailliert finde. Diese Einschätzung korreliert mit dem Gesamteindruck der Schülerin während des Interviews (s. Längsanalyse $S1_1$). Die anderen fünf Schüler*innen geben alle an, dass der Ansatz sinnvoll sei. Auch Schüler*innen mit schwächeren Performanzen wie beispielsweise $S2_1$ und $S4_1$ betonen, dass der Kerngedanke („Es gibt nur Bewegungs- und Feldenergie.“) sinnvoll sei. Schülerin $S4_1$ gibt an, dass sie nicht gedacht hätte, dass (obwohl die Physik generell kompliziert sei) es so einfach sein könne. Auch $S2_1$ äußert, dass man es nur „in den Kopf bekommen“ müsse. Äußerungen von $S5_1$ und $S6_1$ zufolge sei insbesondere die Wahl mancher Beispiele ein Benefit des Konzeptes. Diese werden grundsätzlich als hilfreich und anschaulich eingeschätzt, insbesondere das Beispiel der Mikrowelle und das der Sonne (vgl. $S5_1$, $S6_1$). In diesen beiden Fällen, welche hier überdurchschnittliche Performanzwerte aufweisen, wird der Ansatz insgesamt als „erleuchtend“ und „spannend“ ($S5_1$) bzw. sogar als „Lieblingslektion“ ($S6_1$) bezeichnet. Insbesondere

wird hier auch gelobt, dass man im Gegensatz zu den sonst unzusammenhängenden Energieformen im Unterricht einen Zusammenhang sehe ($S5_1$). Insgesamt erhält die LLE also von den Schüler*innen ein positives Feedback und eine positive Einschätzung hinsichtlich Sinnhaftigkeit und Verständlichkeit.

8.4.4 Zusammenführung des Überarbeitungsvorschlages

Führt man die Erkenntnisse aus Längs- und Queranalyse zusammen, ergibt sich ein Überarbeitungsvorschlag, der die Grundlage für die Anpassungen im Rahmen der Weiterentwicklung des EFA für den zweiten Zyklus darstellt. Im Folgenden seien die Entscheidungen ausgehend von den obigen Ausführungen näher erläutert. Im Fall von $S1_1$ wurde angemerkt, dass es sinnvoll sei, den abstrakten Begriff der Energie mit mehr Details bzw. Inhalt anzureichern. Auch wenn dies nur in einem Fall angesprochen wurde, könnte dies doch einige Vorteile mit sich bringen. Zum Beispiel ermöglicht ein Abriss zum abstrakten Konzept der Energie zu Beginn der Interviews eine Rahmung für die Schüler*innen. Dabei können wesentliche Aspekte, insbesondere die Bedeutung der Energie für Prozesse und unsere Welt, betont werden und als Motivation für die Behandlung des Themas und die Einführung von Feldern dienen. Wird das abstrakte Konzept der Energie beispielsweise mit repräsentativen Alltagskontexten angereichert, bietet man den Schüler*innen einen Anhaltspunkt, sich etwas darunter vorzustellen und im weiteren Verlauf auf diesen Anker zurückzugreifen.

Da die Idee des Feldes in dieser ersten Version mit Problemen, wie u. a. dem Bezugspunktproblem, behaftet ist und im Kontext des Gesamtfeldes häufig auf das Kraftkonzept zurückgegriffen wurde, könnte es hilfreich sein, die Bildung des Gesamtfeldes mit dem Begriff der Wechselwirkung als Synonym für die Kraft zu verknüpfen. Die Vorteile davon wurden bereits in der Längsanalyse skizziert. Hinzu kommt, dass ein Feld, insbesondere das Gesamtfeld, visualisiert werden muss, ggf. durch die Verknüpfung mit einer Analogie. Veranschaulichungen könnten dabei Feldlinien oder eine elastische Feder sein. Dementsprechend muss die Rolle des Feldes bei der Energieübertragung bzw. dessen Veränderungen als Entität über die Abstandsänderung hinaus verdeutlicht bzw. veranschaulicht werden. Beispielsweise könnte auch hier die Veränderung von Feldlinien oder die Stauchung oder Streckung einer elastischen Feder hilfreich sein.[7]

[7] Diese Analogie diente bereits Fiedler et al. (2022) als Veranschaulichung.

Hinsichtlich der elektromagnetischen Strahlung ist die Verknüpfung mit dem oft assoziierten Begriff „Welle“ denkbar. Dabei muss diese aber gegen die Bewegungsenergie von Objekten abgegrenzt werden, beispielsweise indem man die Strahlung als Überlagerung von elektrischem und magnetischem Feld von Objekten mit Masse explizit abgrenzt und somit die Assoziation zur Feldenergie plausibler gestaltet. Für die Argumentation in Aufgaben sollte verdeutlicht werden, wie das Feldkonzept mit dem Kraftkonzept zusammenhängt. Dabei muss über die Verwendung des Begriffs Wechselwirkung bzw. Kraft hinaus erklärt werden, was es für die Rolle des Feldes bedeutet, wenn eine Kraft anziehend oder abstoßend wirkt.
Zuletzt ist es vorteilhaft, die Interviewstruktur anzupassen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass makro- und mikroskopische Felder und deren Kontexte auch innerhalb des logischen Aufbaus des Interviews voneinander getrennt werden bzw. plausibler wird, wann welche Ebene relevant ist. Für die Strukturierung der Interviews können Überblickssequenzen zwischen den einzelnen Bereichen gegeben werden, die z. B. das bisher Gelernte und noch zu Lernende strukturieren. Auch wenn dies nur in einem Fall explizit gewünscht wurde, so bietet es doch die Möglichkeit, die Ideen und Kontexte besser voneinander zu trennen und gleichzeitig logisch miteinander zu verknüpfen. Für Hilfe bei der Suche nach Feldern und Bewegung sollte den Schüler*innen eine Art Anleitung, z. B. in Form einer Darstellung oder Tabelle gegeben werden. Die genaue Implementation ist Gegenstand des nächsten Kapitels. Die folgende Liste fasst den Überarbeitungsvorschlag für die zweite Version des EFA zusammen :

1. Energie und ihre Bedeutung für Prozesse erläutern
2. Entität „Feld“ mit Energie verknüpfen sowie das Gesamtfeld als Konstellation von Quellen und der Wechselwirkung zwischen ihnen erläutern; dabei die „Wechselwirkung“ (als Synonym für Kraft) als „Wirkung“ des Feldes gegen die Energie abgrenzen
3. Veranschaulichung bzw. Analogie mit bildlicher Visualisierung für Felder und das Gesamtfeld anbieten, z. B. durch:
   (a) Feldlinienbild
   (b) Einfache Darstellung der Konstellation (Quellen und Feld bzw. Felder)
   (c) Analogie der elastischen Feder
4. Begriff „Welle“ mit dem Feldbegriff verknüpfen und als Überlagerung von elektrischem und magnetischem Feld vorstellen; gegen bewegende Objekte abgrenzen

5. Richtung der Kraft (indirekt) an das Feldkonzept anschließen
6. Mikroskopische und makroskopische Ebene deutlicher voneinander abgrenzen; zusätzlich Überblickssequenzen anbieten
7. Anleitung für die „Suche nach Feldern und Bewegung“ bereitstellen

8.5 Diskussion und Resümee

Durch Längs- und Queranalyse konnten wesentliche Benefits und Schwierigkeiten des EFA-Konzeptes für Schüler*innen identifiziert werden. Grundsätzlich werden die Konzeptideen angenommen, was sich auch an der Kodierung von Bewertungen und Paraphrasen sowie der allgemein explizit positiven Einschätzung des Ansatzes seitens der Schüler*innen am Ende der Interviews erkennen lässt. Für die Verständlichkeit und Plausibilität scheinen die Konzeptideen überwiegend angemessen zu sein. Aus den Bewertungen der Feld-Attribute (Unsichtbarkeit, Unantastbarkeit und Ausdehnung) kann man beispielsweise schließen, dass diese Ideen keine Probleme bereiten. Sie werden als Konzeptideen in den weiteren Zyklen beibehalten. Von einer gesonderten Überprüfung ihrer Plausibilität kann aufgrund der hohen Akzeptanz abgesehen werden.

Es zeigt sich, dass die Schüler*innen teilweise Schwierigkeiten haben, die Ideen von der makroskopischen auf die mikroskopische und weniger offensichtliche Ebene zu übertragen. Die Suche nach Feldern gestaltet sich dabei teilweise schwierig. Dies äußert sich auch im Rückgriff auf alternative bzw. das Kraftkonzept anstelle der Energie. Außerdem ist das Gesamtfeld noch abstrakt und braucht eine Veranschaulichung. Für manche Schüler*innen ist es schwierig, das Feld als Überlagerung von Einzelfeldern zu verstehen und die Quellen zu identifizieren (Bezugspunktproblem). Dass die Probleme hauptsächlich bei Aufgaben zum Transfer der Ideen auftreten, liegt an den dargestellten Problematiken und ist auf einzelne Punkte zurückzuführen. Hier zeigt sich, dass für manche Aspekte Hilfestellungen bzw. mehr Details und Veranschaulichungen notwendig sind, bzw. einzelne Kontexte angepasst werden müssen.

Generell fällt aber auf, dass alle Schüler*innen versuchen, die Konzeptideen bestmöglich umzusetzen. Sie greifen auf ihnen bekannte Ressourcen zurück und inkorporieren die Konzeptideen oder zumindest Teile davon in ihr mentales Modell (vgl. *knowledge-in-pieces*, Kap. 2.3). Diese Beobachtung spricht für die Grundidee des EFA sowie die Einführung des Konzeptes inklusive der Idee des Gesamtfeldes. Schafft man es also, in den nächsten Versionen, auch die Anwendbarkeit der Konzeptideen zu erleichtern, so wirkt der EFA vielversprechend hinsichtlich seiner Umsetzbarkeit für den Schulunterricht. Der entwickelte Überarbeitungsvorschlag stellt die Grundlage für diese Weiterentwicklung dar.

KAPITEL 9

Zweite Version: Konzeption

In diesem Kapitel wird die Konzeption der zweiten Version des EFA als Weiterentwicklung auf Grundlage der empirischen Ergebnisse der ersten Version beschrieben. Für die Weiterentwicklung wurde an den am Ende des letzten Kapitels vorgestellten Überarbeitungsvorschlag angeknüpft und dieser auf konkrete Anpassungen der Konzeptideen und Kontexte übertragen. Auf diese Weise wurden die in Kapitel 7 festgelegten Konzeptideen angepasst bzw. erweitert und in einem neuen Interviewleitfaden implementiert.
Wie bereits im Kapitel 4 angedeutet, wurde der EFA für die zweite Version nicht nur hinsichtlich der letzten Ergebnisse angepasst, sondern auch um Aspekte der modernen Physik erweitert: das Quarkfeld und das Higgsfeld. Die Implementation dieser Ideen basiert auf den Expert*innen-Interviews (siehe Kapitel 4.2). Um die Unterscheidung von alten und neuen Konzeptideen sichtbar zu machen, wird die Bezeichnung der Konzeptideen für die zweite Version in Ideen der klassischen und modernen Physik getrennt. Ohne diese ohnehin unscharfe Unterteilung genau zu definieren, wird sie hier zwecks Unterscheidung von bereits teilweise empirisch überprüften und gänzlich neuen Ideen verwendet.

9.1 Weiterentwicklung der Konzeptideen

9.1.1 Anpassung der klassischen Konzeptideen

Der Überarbeitungsvorschlag aus Kapitel 8 gibt Möglichkeiten an, wie das Konzept angepasst werden kann, lässt aber Spielraum für Variationen der Umsetzung. Im Folgenden werden die Entscheidungen für die jeweilige Umsetzung erläutert.

Besonderheiten der zweiten Version im Überblick

Die zweite Version weist verglichen mit der ersten einige Besonderheiten auf:

- Rahmung durch ausführlichere Motivationen und Überleitungen, insbesondere zur Rolle der Energie in unserer Welt (z. B. Rahmenkontext Energie bei Achterbahn, Kernkraftwerk und CERN)
- Angebot einer Anleitung für die „Suche nach Feldern und Bewegung“
- Zusammenhang von Feldern und der Wechselwirkung ihrer Quellen
- Überprüfung von Veranschaulichungen des Gesamtfeldes mittels Skizzen
- Gesamtfeld als Akteur (Abgabe/Aufnahme von Energie, *Wille des Feldes*)
- Energieminimum von Feldern als Hilfe für die Prozessrichtung (am Rande auch Zusammenhang mit der Bindung von Atomen und Kernen)
- Verknüpfung von Energie und Masse mit dem Quark- und Higgsfeld über die Energie-Masse-Äquivalenz
- Halb offene Abschlussaufgabe (Suche nach Feldern und Bewegung bei einer Teilchen-Kollision am CERN)

Die Erläuterung der einzelnen Aspekte ist Teil der folgenden Abschnitte.

Reduktion der Feld-Attribute als Konzeptideen

Da die Breite des EFA auf Aspekte der modernen Physik vergrößert, die Interviewdauer von 2,5 Stunden aber nicht überschritten werden soll, müssen aus zeitökonomischen Gründen einzelne weniger relevante Aspekte als explizit zu evaluierende Konzeptideen ausgelassen werden. Hier werden einige Feld-Attribute nicht mehr explizit evaluiert, da diese in der ersten Version ohnehin eine breite Akzeptanz gezeigt haben. Diese Attribute sind die Unsichtbarkeit, Unantastbarkeit und unendliche Reichweite eines Feldes. Insbesondere die Reichweite wird im Hinblick auf die Überlagerung zum Gesamtfeld zwar noch in den Erklärungen verwendet, aber nicht explizit durch den Dreischritt der Akzeptanzbefragung evaluiert. Das heißt, die Schüler*innen müssen diese drei Ideen nicht mehr explizit bewerten.

Anreichern des Begriffs *Energie*

Um den Begriff der Energie mit Inhalt anzureichern, gibt es mehrere Möglichkeiten. Dabei sollte beachtet werden, dass es das Ziel ist, die Rolle der Energie für Prozesse hervorzuheben, ohne sie dabei explizit zu definieren. Denn fachlich gesehen ist die Definition der Energie für den Schulunterricht keine triviale Aufgabe und trägt auch nicht unbedingt zum erwünschten Lernerfolg bei (vgl. Kapitel 3.2). Aus diesem Grund wird hier trotz Wunsch nach mehr Details auf eine Definition der Energie verzichtet und dafür ihre phänomenologische Bedeutung in den Vordergrund rückt. Dies ist insofern ausreichend als die Rolle der Energie in Prozessen eben nicht von einer klaren Definition abhängt, sondern vielmehr das Alltagserleben bestimmt. Auf diese Weise soll begünstigt werden, dass Lernende den Zusammenhang von Energie und Feldern und deren Bedeutung für den Ablauf von Prozessen verstehen. Dafür sollte auch ein phänomenologisches Verständnis genügen. So können z. B. Gesetze wie das folgende schon wesentlich zum Lernen beitragen.

> *Wenn ein Feld Energie abgibt, dann muss diese Energie (aufgrund der Energieerhaltung) in ein anderes Feld oder eine Bewegung übertragen werden; es verändert sich ein Feld oder etwas wird schneller.*

Um diese und ähnliche Schlussfolgerungen in der Argumentation von Schüler*innen zu fördern, werden im Rahmen der Weiterentwicklung phänomenologische Beispiele gegeben, welche die Rolle der Energie, also ihre Bedeutung, für unseren Alltag, veranschaulichen. Dazu werden drei kurze Beispiele gegeben. Zur Einbettung in den logischen Aufbau und die Struktur des Interviewleitfadens sowie die Begründung für die Wahl der Kontexte siehe Abschnitt 9.2.

Verknüpfung der Entität *Feld* mit Energie und Wechselwirkung

Bereits in der ersten Version wird das Feld, insbesondere das Gesamtfeld, mit der Energie verknüpft. Hier soll nun das Gesamtfeld so erklärt werden, dass das Bezugspunktproblem vermindert wird. Dafür soll die Rolle des Gesamtfeldes und dessen Zusammenhang mit den Einzelfeldern der Quellen genauer erläutert werden. Um dabei gleichzeitig eine angemessene Verbindung mit dem Kraftkonzept zu begünstigen, wird das Gesamtfeld mit dem Begriff der Wechselwirkung verknüpft. Dabei dient der Begriff Wechselwirkung als Synonym für die Kraft und wird auch als solcher eingeführt. Seine Bedeutung ist hier, dass die Wechselwirkung die Kommunikation zweier oder mehrerer Felder darstellt. Das heißt, sie kommt als wesentlicher Parameter für das Gesamtfeld hinzu. Dieses wird wie folgt beschrieben:

> *Jede Quelle hat ein Feld. Zwei (oder mehr) Quellen wechselwirken miteinander über ihre Felder. Die Felder überlagern sich dabei zu seinem Gesamtfeld als Konstellation von Quellen und der Wechselwirkung zwischen ihnen.*

Für ein bestimmtes Gesamtfeld gibt es dann also entweder eine anziehende oder abstoßende Wechselwirkung, welche durch die Konstellation der Quellen bestimmt wird und die Dynamik des Feldes definiert.

Veranschaulichung des Gesamtfeldes

Um das Gesamtfeld zu veranschaulichen, werden im Überarbeitungsvorschlag drei Möglichkeiten vorgeschlagen. Eine davon ist die Verwendung des Feldlinienbildes. Diese auch im Rahmen des traditionellen Ansatzes gerne verwendete Darstellung ist zwar typisch, bringt aber einige Probleme mit sich (vgl. Kapitel 3.2). Ein Vorteil, den das Feldlinienbild mit sich bringt, wäre die räumliche Darstellung des Feldes und die damit zusammenhängende Veränderung der Krümmung der Feldlinien bei Abstandsänderung der Quellen. Diese „Verformung“ (vgl. auch den Vorschlag von Nordine et al. (2019)) ist zwar anschaulich, bringt durch die nicht triviale Darstellung aber Schwierigkeiten mit sich, wenn Schüler*innen das Feldlinienbild selbst skizzieren sollen (vgl. Kapitel 3.2). Außerdem hat sich in den Expert*innen-Interviews (vgl. Kapitel 4.2) gezeigt, dass die Versprachlichung mit „Verformung“ aus fachlicher Sicht ungünstig ist. Demnach ist es besser, nur über die „Veränderung“ zu sprechen, wodurch aber der geometrische Vorteil der Verformung und damit der Feldveränderung verloren geht. Aus diesem Grund wird hier auf die Feldliniendarstellung verzichtet und auf eine eher schematische Darstellung des Gesamtfeldes als Konstellation zurückgegriffen. Diese ist in Abbildung 9.1 skizziert.
Die Darstellung bringt zwar auch – wie alle Visualisierungen von abstrakten Entitäten – Limitationen mit sich, durch ihre einfache Handhabung aber auch Vorteile, insbesondere für die Vorstellung und Umsetzung seitens der Schüler*innen. Problematisch ist hier, dass die beiden Einzelfelder (innere Kreise) zwar in den Erklärungen als (im Idealfall) unendlich weit ausgedehnt beschrieben werden, dies aber in der praktischen Darstellung nicht möglich ist. Deshalb wird hier bei der Einführung in den Interviews darauf geachtet, die Grenzen der Darstellbarkeit explizit zu erwähnen und gegen die eigentliche Vorstellung (die unendliche Ausdehnung des Feldes) abzugrenzen.
Die Veranschaulichung dient hier nur als Visualisierung und nicht als exaktes Abbild. Der Vorteil dieser Darstellungsform ist neben der Einfachheit die offensichtliche Darstellung der Überlappung. Extrapoliert man die Überlappung ge-

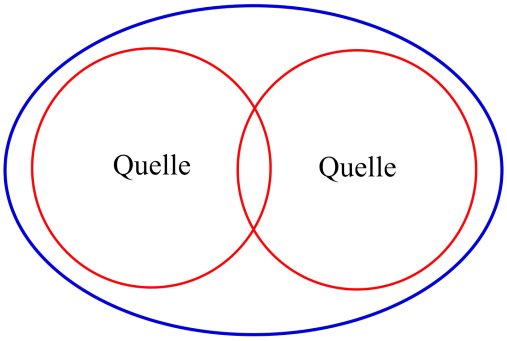


Abbildung 9.1: Skizze des Gesamtfeldes mit Quellen, Einzelfeldern (rot) und Gesamtfeld (blau) als Überlagerung dieser.

danklich für unendlich ausgedehnte Einzelfelder, so ergibt sich dann ein gesamtes Feld. Dieses Gesamtfeld ist hier als blaues Oval (außen) dargestellt und umfasst die gesamte Konstellation. Hierbei ist die Darstellung gänzlich unabhängig von der Art der Quelle, das bedeutet, sie kann sowohl auf Magnete als auch auf Ladungen oder Massen übertragen werden. Da gemischte Quellen (z. B. Ladung mit Masse, Magnet mit Masse) wenig Sinn ergeben, wird stets auf gleiche Quellen, d. h. zwei Magnete, zwei Massen oder zwei Ladungen eingegangen. [1] Ein weiterer Vorteil dieser Darstellung ist, dass die Darstellung theoretisch auch auf eine größere Anzahl von Quellen übertragen werden könnte. Die Darstellung würde dann zwar kompliziert, aber auch eine gedankliche Extrapolation ist naheliegend. Die Erweiterung auf Systeme mit mehr als zwei Objekten, wie z. B. atomare Konstellationen, ist hier ohne Weiteres möglich, was für die Feldliniendarstellung in dieser Einfachheit nicht der Fall ist. Die Visualisierung soll die Vorstellung für den Prozess der Überlagerung als Entstehung des Gesamtfeldes erleichtern und Schüler*innen einen visuellen Anker geben. Um zu überprüfen, ob der Sinn der Darstellung verstanden wird, kann diese auch abgefragt werden, indem die Schüler*innen in Interviews gebeten werden, die Darstellung auf ähnliche Beispiele zu übertragen und zu skizzieren bzw. die Erstellung zu beschreiben.

[1] Dabei spielt auch der Umstand eine Rolle, dass im Schulunterricht meist nur die Interaktion von gleichen Quellen behandelt wird. Selbst bei sich bewegenden Ladungen im Magnetfeld erzeugt die Ladung ein Magnetfeld, welches dann mit dem externen Feld ein Gesamtfeld bildet (im EFA aber vorerst nicht behandelt). Lediglich bei der elektromagnetischen Strahlung kommen elektrisches und magnetisches Feld zusammen, indem sie sich bei der Strahlung überlagern. Hier ist das Feld aber von den Quellen gelöst.

Analogie für das Gesamtfeld

Ein weiterer Vorschlag für die Veranschaulichung von Feldern ist der Vergleich zwischen Gesamtfeld und einer elastischen Feder. Hier steht weniger die bildliche Visualisierung als die praktische Nutzbarkeit des Gesamtfeldes im Vordergrund. Krause (2014) beschreibt beispielsweise, dass Analogien für abstrakte physikalische Konzepte als „Problemlösewerkzeuge“ dienen und eine Verknüpfung von bekanntem und unbekanntem Wissen schaffen können. Besonders die Hervorhebung von strukturellen Gemeinsamkeiten sei dabei sehr nützlich. Lancor (2013) gibt einen Überblick über die zahlreichen Analogien und Metaphern für Energie, die im Unterricht identifiziert werden können und Harrer (2017) erläutert den Nutzen, den Metaphern haben können, um die abstrakte und ungreifbare Größe „Energie“ zu fassen und zu beschreiben. Unabhängig von konkreten Analogien für Energie kann auch die Verknüpfung von Energie und Gesamtfeld als „etwas, das im Gesamtfeld steckt“ bereits als eine Art Veranschaulichung oder greifbare Konzeptualisierung dieses abstrakten Konzeptes verstanden werden.
Im Rahmen es EFA soll es dabei darum gehen, das Gesamtfeld für die Argumentation bei der Beschreibung von Prozessen hilfreich und nutzbar zu machen. Auch wenn man bereits mit dem Gesamtfeld selbst und der Energieübertragung in dieses oder aus diesem heraus argumentieren kann, so könnte hier für Schüler*innen zusätzlich eine Analogie mit materiellem Charakter und Alltagsbezug nützlich sein. Gleichzeitig sollte sie einen weniger abstrakten Charakter aufweisen, also ein eher Materie-verbundenes *Objekt* sein. Eine adäquate Analogie sollte also folgende Parallelen zum Gesamtfeld aufweisen:

- Es muss Energie in das Objekt übertragen werden können.
- Es muss Energie aus dem Objekt übertragen werden können.
- Das Objekt sollte bei Energieübertragung eine offensichtliche alltagsbezogene Eigenschaft ändern.
- Das Objekt sollte jedem*r Schüler*in bekannt und erfahrbar sein.

Um diese vier basalen Anforderungen zu erfüllen, bietet sich besonders eine Kategorie von Objekten an: elastische Festkörper. Insbesondere sind elastische Gummibänder oder Federn vielversprechend. Der gemeinsame Vorteil ist hier, dass man bei Energieübertragung eine makroskopische Größenänderung erfährt. Diese ist leicht mit der Abstandsänderung der Atome des gleichbleibenden Materials in Verbindung zu bringen und kann so eine Parallele zur Abstandsänderung der (ggf. sogar selben) Quellen eines Gesamtfeldes darstellen. Um hier die Bidirektionalität der Energieübertragung sicherzustellen, muss der Körper die Eigenschaft (in dem Fall die Größe) in zwei Richtungen ändern können. Dies ist für die Feder eher

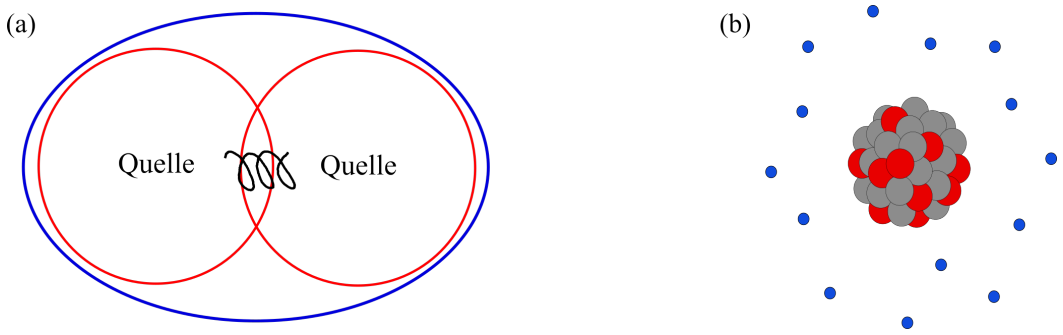


Abbildung 9.2: (a) Skizze des Gesamtfeldes mit Quellen, Einzelfeldern (rot) und Gesamtfeld (blau) als Überlagerung. Für die Repräsentation der Wechselwirkung wird eine elastische Feder (schwarz) als Analogie mit eingezeichnet. (b) Darstellung eines verallgemeinerten Atoms.

gegeben als für das Gummiband, da hier kein „Zusammendrücken“ möglich ist. Insofern ist es sinnvoll, die elastische Feder als Analogie zu verwenden.

Damit steht eine Analogie zur Verfügung, die zwei unterschiedliche Vergleiche zulässt: Ein Gesamtfeld mit anziehender Wechselwirkung, wie z. B. zwei Massen, kann man mit einer gestreckten Feder vergleichen. In beiden Fällen verringert sich der Abstand (von Ladungen im Feld bzw. beiden Enden der Feder), wenn Energie aus dem Feld übertragen wird und es vergrößert sich der Abstand, wenn Energie in das Feld hinein transferiert wird. Beide Prozesse sind möglich. Analog verhält es sich mit einer repulsiven Wechselwirkung, beispielsweise zwei gleiche Ladungen. Hier wird das Feld mit einer gestauchten Feder verglichen, deren Enden sich auseinander drücken. Dabei wird bei sich verringerndem Abstand Energie in Feld bzw. Feder übertragen und bei größer werdendem Abstand Energie abgegeben. Diese Analogie wird den Schüler*innen zusätzlich zur Veranschaulichung der Wechselwirkung gegeben. Dabei wird die Wechselwirkung wie in Abb. 9.2 (a) auch als Feder dargestellt. Die Weiterentwicklungen sollen im Rahmen der Evaluation hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit untersucht werden und zur Beantwortung der Forschungsfrage beitragen. Als Zwischenschritt können für die Auswertung der beschriebenen Ideen übergeordneten Beobachtungsfragen formuliert werden:

1. Wird der Ausdruck „Überlagerung“ verwendet (insbesondere bei den Feldern in Bereich 1)?
2. Wird der Ausdruck „Gesamtfeld“ verwendet (insbesondere bei den Feldern in Bereich 1)?
3. Wird auf die Feder-Analogie zurückgegriffen?

Elektromagnetische Strahlung

Entsprechend des Überarbeitungsvorschlages muss die elektromagnetische Strahlung besser von der Bewegungsenergie abgegrenzt werden. Fachlich gesehen ist es auch sinnvoll, der elektromagnetischen Strahlung (da diese gewissermaßen von deren Quelle(n) losgelöst ist) eine eine von der Feldenergie verschiedene Energie zuzuordnen. Um sie aber nach wie vor in den EFA integrieren zu können, muss eine Entscheidung getroffen werden. Auch wenn Schüler*innen die Interpretation als Bewegungsenergie intuitiver finden, so ist es dennoch von Vorteil, den Zusammenhang mit dem elektrischen und magnetischen Feld und dessen Propagation im Raum herauszustellen. Deshalb gilt es nun zu rechtfertigen, der Strahlung Feldenergie zuzuordnen. Als logische Konsequenz muss also die Abgrenzung zu sich bewegenden Objekten (mit Masse) herausgestellt und betont werden. Um dies zu erreichen, wird (ähnlich wie schon bei der ersten Version) der Ursprung der Strahlung am Beispiel des atomaren Übergangs motiviert, nur dass hier nun auch eine Darstellung (Abb. 9.3) gezeigt wird. Außerdem wird die Unterscheidung von der Bewegungsenergie explizit gemacht, d. h. gezielt eine Frage beantwortet:

> *Warum ist die Energie von elektromagnetischer Strahlung, obwohl sie sich bewegt, keine Bewegungsenergie?*

Im Rahmen der Beantwortung wird dann zum einen der Ursprung (als eine beispielhafte Möglichkeit) motiviert und die Strahlung als Überlagerung von elektrischem und magnetischem Feld aufgefasst, dass sich vom Atom löst. Diese sich ausbreitende Strahlung wird mit dem Begriff „elektromagnetische Welle“ gleichgesetzt. Zum anderen wird betont, dass Strahlen, wie z. B. Lichtstrahlen, auch elektromagnetisches Feld sind, nur in diesem Fall (räumlich) konzentriert, d. h. gebündelt. Falls die Frage nach dem Zusammenhang mit Photonen aufkommt, wird auch hier der Bezug zum Feld geschaffen, indem man es als (kleinstmögliches) Energiepaket bzw. kleinste Einheit von Feldenergie beschreibt. Dazu sei erwähnt, dass hier und auch in anderen Abbildungen für die Interviews der zweiten Version das dargestellte Atommodell verwendet wird. Auch wenn hier ein schwererer Kern abgebildet ist, der für viele Fälle deutlich zu viele Nukleonen besitzt, soll dieser repräsentativ für alle Kerne stehen (vgl. Abbildung 9.2 (b)). Diese, oder eine verwandte Art der Darstellung, kennen die meisten Schüler*innen bereits aus dem Unterricht oder aus Darstellungen und Videos im Internet, sodass hier kein Verständnisproblem entstehen sollte. Da es hier ohnehin nicht um das Atommodell an sich geht, sondern darum, sich generell ein Atom vorzustellen, soll diese Darstellung genügen. Der Fokus in Abbildung 9.3 ist auch bewusst nur auf ein Elektron gelegt, um hier die Konstellation eines negativen Elektrons mit dem positiven

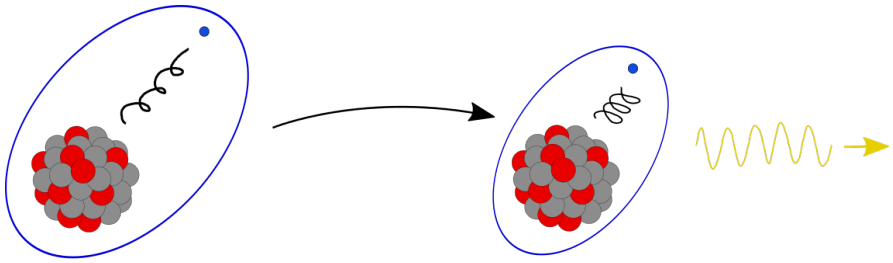


Abbildung 9.3: Darstellung zur Konzeptidee „Elektromagnetische Strahlung ist Feldenergie.“ Durch die Änderung des Abstands von Elektron und Atomkern (Änderung der Wechselwirkung; als Feder dargestellt) strahlt das Atom eine elektromagnetische Welle ab.

Kern bewusst zu machen. So kann beschrieben werden, dass sich das elektrische Gesamtfeld von Kern und Elektron ändert, wenn sich die Konstellation ändert. In Anlehnung an das Bohr'sche Atommodell, das vielen Schüler*innen geläufig ist, bedeutet dann ein „Annähern“ des Elektrons zum Kern, dass das Gesamtfeld Energie abgibt (aufgrund der anziehenden Wechselwirkung). In Kombination damit, dass sich auch das magnetische Feld (das existiert, weil sich die Ladung bewegt) ändert, verändern sich insgesamt also elektrisches und magnetisches Feld des Atoms. Hier findet die Überleitung zur elektromagnetischen Strahlung als sich vom Atom entfernende Welle statt.

Thermische Energie

Um das subjektive Verständnis von Wärme in den Hintergrund zu rücken und die fachlich angemessenere Form der thermischen Energie mit der mikroskopischen Bewegungsenergie zu verknüpfen, wird der Begriff *Wärme* durch *thermische Energie* ausgetauscht. Wärme wird nur beiläufig für die übertragene (thermische) Energie verwendet, wenn Schüler*innen dies einbringen. Der Prozess der Energieübertragung ist ggf, für den Menschen ‚spürbar/bemerkbar‘.

Aktivität des Feldes und Richtung von Prozessen
Einen wesentlichen Aspekt für die Anpassung des EFA stellt die Verknüpfung der Feld-Ideen mit dem vorteilhaften Prozesscharakter des Kraftbildes dar. Bei der ersten Version haben einige Schüler*innen auf Kräfte zurückgegriffen, weil diese auch die Richtung eines Prozesses bestimmen. Diese Information konnte bislang nicht aus dem EFA allein abgeleitet werden. Dazu werden zwei weitere Konzeptideen eingeführt:

- Ein Feld kann Energie aufnehmen oder abgeben; Energie kann also zwischen Feldern und Bewegungen übertragen werden.
- Ein Feld strebt (gemäß seiner Wechselwirkung) immer zu einem Zustand minimaler Energie, dies kann man auch als *Wille des Feldes* bezeichnen.

Sprachliche Anpassung

Die erste Idee ist eine sprachliche Abwandlung desselben Inhalts aus der ersten Version. Bisher war der Sprachgebrauch neutral aus der Beobachtungsperspektive gestaltet. Das bedeutet, dass Energie „in das oder aus dem Feld übertragen wird“ und „der Abstand der Quellen des Feldes kleiner oder größer wird“. Entsprechend des ersten Punktes wird der Inhalt nicht verändert, das Feld aber mehr in den Fokus gerückt, wodurch es eine „aktive“ Rolle einnimmt. Dadurch soll das Feld als eigenständige Entität und an Prozessen teilnehmender Akteur verstanden werden. So würde man den gleichen Inhalt beispielsweise so formulieren, dass „das Feld Energie aufnimmt oder abgibt“ und sich „das Feld zusammenzieht oder ausdehnt“[2]. Dieser auf sprachlicher Ebene wesentliche Unterschied soll auch die Verbindung zur oben vorgestellten Darstellung verstärken, bei der sich dann der Prozess auch mittels einer zusammenziehenden oder ausdehnenden Ellipse bzw. eines Ovales interpretiert werden kann[3]. Ob diese sprachliche Anpassung auch aus Sicht der Schüler*innen attraktiv bzw. hilfreich erscheint, ist dann Gegenstand der Evaluation der zweiten Version. Dementsprechend wird auch eine neue Beobachtungsfrage für diese Anpassung formuliert:

> Wird über die aktive Rolle des Feldes gesprochen?

Damit ist insbesondere gemeint, dass Aussagen dahingehend formuliert werden, dass darin die aktive Rolle des Feldes als Akteur in Prozessen erkennbar wird, also z. B. das Feld „sich zusammenzieht“ oder „Energie abgibt“ anstatt dass es verkleinert oder Energie aus dem Feld transferiert wird. Neben der Vermutung, dass das Feld durch das Angebot solcher Formulierungen für die Beschreibung von Prozessen an Bedeutung gewinnt, kann durch die Überprüfung der sprachlichen Übernahme auch untersucht werden, ob Schüler*innen darin auch selbst einen attraktiven Mehrwert sehen.

[2] Synonyme oder verwandte Begriffe sind hier auch denkbar, wie z. B. verkleinern bzw. expandieren oder vergrößern.

[3] Dabei sei stets auf die eigentliche Reichweite des Feldes hingewiesen. Die Begriffe Ellipse bzw. Oval beziehen sich also auf die Darstellung und nicht auf die tatsächliche (abstrakte und theoretisch unendliche) Ausdehnung des Feldes.

Prozessrichtung durch „Wille“ des Feldes

Die sprachliche Anpassung bietet noch keine Erklärung für die Prozessrichtung, also beispielsweise für die Frage, warum das Federpendel ab dem tiefsten Punkt wieder nach oben schwingt und auch wieder nach unten fällt. Dazu wird zusätzlich der „Wille“ des Feldes eingeführt. Dieser Ausdruck als weitere Komponente der „Aktivität“ des Feldes bestimmt die Richtung der Energieübertragung und gibt damit die Richtung eines Prozesses (also eine Art Ursache-Wirkungs-Beziehung) an. Im Wesentlichen fasst der Ausdruck die Richtung der Wechselwirkung nur in eine Feld-zentrierte Sprache. Das bedeutet, dass sich ein Feld immer gemäß seiner anziehenden oder abstoßend Wechselwirkung zwischen den Quellen zusammenziehen bzw. auseinanderdrücken „will“. Für den fallenden Ball bedeutet dies beispielsweise, dass sich das Gravitationsfeld aus Ball und Erde zusammenziehen möchte, deshalb nähert sich der Ball der Erde; er fällt nach unten. Um diese Darstellung auch noch mit der Richtung der Energieübertragung zu verbinden, sagt die zweite Konzeptidee aus, dass ein Feld immer Energie abgibt, wenn es es sich entsprechend seinem „Willen“ verändert. Dies geschieht, wenn es nicht durch äußere Einflüsse oder einen bereits ablaufenden Prozess daran gehindert wird.[4] So gibt z. B. das Gesamtfeld zweier freier gleichnamiger Ladungen stets Energie an die Bewegung der beiden Ladungen ab, da sich das Feld aufgrund der abstoßenden Wechselwirkung ausdehnt; es minimiert seine Energie so weit wie möglich. Beobachten kann man dies daran, dass die Ladungen beschleunigt werden.

Hierzu sei auch kurz das etwas kompliziertere Beispiel des Fadenpendels erläutert. Dieses würde man nach dem traditionellen Ansatz durch die *Umwandlung* von potenzieller und kinetischer Energie beschreiben. Um die Richtung zu erklären, müsste aber nach dem traditionellen Ansatz in das Kraftbild gewechselt werden, welches mit der Richtung der Gravitationskraft die Beschleunigung des Pendels zur Erde und ebenso die Abbremsung auf dem Weg nach oben erklärt. Im Rahmen der neuen Konzeptidee des EFA lässt sich dies auch sprachlich in das Feldkonzept übertragen und somit konsistent in die restlichen Konzeptideen einbetten:[5]

> Wenn sich das Pendel am untersten Punkt mit maximaler Bewegungsenergie befindet, muss ein Umkehrprozess stattfinden. Denn die Energie in der Bewegung muss entweder in dieser bleiben oder in eine andere Bewegung oder ein Feld übertragen werden. Aufgrund der Zwangs-

[4] Eine Hinderung ist eine Zwangsbedingung, wie beispielsweise, wenn der Ball auf einem Tisch liegt oder an einer Befestigung hängt.

[5] Hier wird der Prozess zwecks Veranschaulichung exemplarisch im Detail erläutert. In den Erklärungsangeboten geschieht dies nicht so ausführlich, sondern fokussiert auf die Konzeptideen.

> bedingung, dass die Kugel an einem Faden konstanter Länge hängt, kann sie sich nicht entlang des Bodens weiterbewegen, wie es z. B. der Fall wäre, wenn man in diesem Moment die Schnur durchtrennt. Stattdessen muss sie sich wieder nach oben bewegen. Durch den zunehmenden Abstand zur Erde wird dabei aber zwangsweise Energie in das Gravitationsfeld als Gesamtfeld von Kugel und Erde übertragen, welche die Kugel aus ihrer Bewegung abgibt; sie wird langsamer. Dieser Prozess setzt sich fort, bis die Kugel am obersten Punkt umkehrt, weil die gesamte Bewegungsenergie in das Gravitationsfeld übertragen wurde. An dieser Stelle ist nun die Frage, warum sie wieder nach unten fällt. Hier wird dem Gesamtfeld durch seine aktive Rolle eine dynamische Eigenschaft zugeordnet. Diese Eigenschaft ist das stete Bestreben, seine Energie zu minimieren.

Die Bestrebung des Feldes (traditionell über die Gravitationskraft bestimmt) wird in diesem Sinne indirekt mit dem Feld verknüpft, da sie den „Willen des Feldes“ darstellt, seine Energie zu minimieren, und die Energie an die Bewegung der Kugel abzugeben. Von hier an setzt sich der Prozess periodisch fort. So kann das Fallen der Kugel beschrieben werden, ohne direkt auf das Kraftkonzept zurückzugreifen und stattdessen das Feld in den Mittelpunkt zu stellen. Dazu sei noch angemerkt, dass man gemäß DiSessa (2017) nicht davon ausgehen muss, dass Schüler*innen nur wegen einer anthropomorphen Sprache (wie „Wille“ des Feldes) den Objekten bzw. Entitäten weitere menschliche Eigenschaften zuschreiben, weswegen hier diese besonders prominente Formulierung verwendet und folglich untersucht wird. Ein wesentlicher Benefit dieses Ansatzes ist, dass nicht nur die Richtung des Prozesses plausibel wird, sondern auch eine energetische Begründung gegeben werden kann. Denn die didaktische Rekonstruktion, dass hier Felder zu minimaler Energie tendieren, wird in dieser Form bislang noch nicht in der Schule behandelt und stellt möglicherweise eine zusätzliche Bereicherung dar. Mit dieser Sichtweise sind nämlich weitere Vorteile verbunden, wie beispielsweise die Erklärung chemischer (atomarer) und nuklearer Bindungen. Denn das Prinzip, dass alle Felder zu einem Energieminimum (und entsprechend einem Kräftegleichgewicht) streben, sorgt dafür, dass stabile Bindungen von Atomen und Nukleonen entstehen. Diese Idee wird stellenweise auch im Rahmen der zweiten Version des EFA in Ausblick gestellt, um ein umfassendes Bild zu liefern.
Zusammengefasst kann man also sagen, dass der „Wille des Feldes“ die Richtung der Energieübertragung in einem Prozess mit der Aktivität des Feldes (als Akteur anstelle eines passiven abstrakten Konzeptes) verknüpft und somit den Rückgriff auf das Feldkonzept bei Erklärungen gegenüber dem Kraftkonzept begünstigen

sollte. Diese Konzeption soll die Unbeliebtheit der Energie bei der Betrachtung von Phänomenen reduzieren (vgl. Kapitel 3.2) und ihre Relevanz und Vorzüge herausstellen. Auch für diese neuen Aspekte können Beobachtungsfragen formuliert werden, welche im Zuge der Evaluation beantwortet werden sollen:

- Welche Indikatoren für die Energieübertragung (Abstandsänderung, Bewegungsänderung, Feldveränderung) werden verwendet?
- Wird über den „Wille des Gesamtfeldes“ gesprochen?
- Wird auf das Prinzip der Minimierung der Feldenergie zurückgegriffen?

9.1.2 Einführung der modernen Konzeptideen

Wie bereits angedeutet, werden für die zweite Version des EFA auch Aspekte der modernen Physik eingebunden: Quark- und Higgsfeld. Diese Konzepte wurden in Kapitel 4 fachlich geklärt und sollen nun als Konzeptideen Einzug in den EFA erhalten. Der Vorteil ist, dass dadurch auch nukleare und Prozesse auf der Ebene von Elementarteilchen konsistent eingebettet werden können.

Quarkfeld

Für das Quarkfeld erfolgt die Einbettung analog zu den bisherigen Feldern. Hier kommt also ein Feld auf der subatomaren Ebene hinzu, dessen Quellen die Quarks sind. Für die Motivation wird der Aufbau der Materie und die Zusammensetzung der Masse unserer Materie über die Energie-Masse-Äquivalenz erläutert (siehe Kapitel 4.2 sowie Abschnitte und Kontexte des Interviewleitfadens in Anhang C). Dabei wird beschrieben, dass sich analog zu den anderen Feldern die Einzelfelder der Quarks zu einem Gesamtfeld überlagern. Die Energie dieses Feldes entspricht 90 % der Masse der Nukleonen und damit unserer Materie. Da sich die Quarkfelder der Nukleonen (durch quantenmechanische Überlappung) auch überlagern, bildet sich (vereinfacht gesprochen) ein gesamtes Quarkfeld für jeden Kern. Ändert sich dieser Kern, also auch die Konstellation der Nukleonen, z. B. durch Zerfall, so ändert sich auch das Quarkfeld und damit seine Energie. Diese Energiedifferenz entspricht nach der Energie-Masse-Äquivalenz einer Massendifferenz und der Prozess äußert sich damit durch die Veränderung der Masse. Nach diesem Prinzip lässt sich beispielsweise Kernspaltung oder Kernfusion im Rahmen des EFA beschreiben.

Higgsfeld

Der zweite neue Aspekt ist das Higgsfeld. Da sich hier kein Gesamtfeld im eigentlichen Sinne ergibt, wird eine sprachliche Umschreibung gewählt. Hier wird erklärt, dass das Higgsfeld, im Gegensatz zu den anderen Feldern, omnipräsent überall im Universum existiert und mit allen Elementarteilchen wechselwirkt, wie z. B. Elektronen und Quarks. Dadurch erhalten sie ihre Ruheenergie, also ihre Masse. Bemerkbar wird dies in Prozessen, in denen Elementarteilchen erzeugt oder vernichtet werden, beispielsweise bei der Paarerzeugung oder Positronen-Emissions-Tomographie (PET). Demnach lässt sich also in Näherung die gesamte Masse unserer Materie auf die Energie in Quarkfeldern (90 %) und die Energie durch das Higgsfeld (10 %) fassen.

Zusammenführung der Konzeptideen

Entsprechend der obigen Ausführungen können nun die weiterentwickelten Konzeptideen für die zweite Version formuliert werden.[6] Neue Konzeptideen (im Vergleich zur ersten Version) sind dabei kursiv dargestellt.

Konzeptideen der zweiten Version des EFA

1: Felder

1. Jede Quelle hat ein Feld. (Bewegte) Ladungen, Magnete, Massen und Quarks sind Quellen eines Feldes.
2. Man kann Felder weder sehen noch anfassen und sie sind (sofern kein äußerer Einfluss sie hindert) unendlich weit ausgedehnt.[a]
3. *Zwei (oder mehr) Quellen wechselwirken miteinander über ihre Felder.* Die Felder überlagern sich dabei zu seinem Gesamtfeld als Konstellation aus Quellen und der Wechselwirkung zwischen ihnen.
4. *Das Gesamtfeld kann man sich ähnlich vorstellen wie eine (elastische) Feder. Anziehende Felder ähneln einer auseinandergezogenen Feder, die sich zusammenziehen möchte; abstoßende Felder einer zusammengedrückten Feder, die sich auseinanderdrücken möchte.*
5. Jedes Gesamtfeld trägt Energie.
6. Es gibt (für die klassische Physik) nur elektrische, magnetische und Gra-

[6] Ab Punkt 2 (Energieübertragung) wird das „Gesamtfeld“ zwecks sprachlicher Vereinfachung nur noch als „Feld“ bezeichnet. Aus dem Kontext geht hervor, dass es sich stets um ein Gesamtfeld handelt.

vitationsfelder. Im Rahmen der modernen Physik kommen noch Quarkfelder und das Higgs-Feld dazu.

7. Das Higgsfeld durchsetzt das gesamte Universum (omnipräsent). Dadurch erhalten Elementarteilchen ihre Ruhemasse.

2: Energieübertragung

1. Es gibt nur Bewegungsenergie und Feldenergie, d. h. Energie in der Bewegung von Objekten mit Masse, die sich bewegen; und Energie in Feldern.
2. Ein Feld kann Energie aufnehmen oder abgeben; Energie kann also zwischen Feldern und Bewegungen übertragen werden.
3. *Ein Feld strebt (gemäß seiner Wechselwirkung) immer zu einem Zustand minimaler Energie, dies kann man auch als Wille des Feldes bezeichnen.*
4. *Bei Bindungen von Atomen und Kernen hat das Feld minimale Energie.*
5. Die Rolle eines Feldes in Prozessen erkennt man an der Energieübertragung:
   (a) Wenn Energie aus einem Feld oder in ein Feld übertragen wird, dann ändert sich eine Bewegung; etwas wird schneller oder langsamer.
   (b) Wenn Energie aus einem Feld oder in ein Feld übertragen wird, dann ändert sich das Feld. Das erkennt man daran, dass sich der Abstand der Quellen verändert *(das Gesamtfeld bzw. die Feder wird gestaucht oder gestreckt).*
   (c) *Ohne äußere Einwirkung verändert sich ein Feld („gemäß seinem Willen“) immer so, dass es seine Energie minimiert; es gibt dann Energie ab.*

3: Energie

1. Um ein Phänomen zu erklären, muss man also nur nach den Feldern und Bewegungen suchen.
   (a) Thermische Energie ist Bewegungsenergie. Wir bemerken sie z. B. als Wärme.
   (b) Elektromagnetische Strahlung ist Feldenergie.
   (c) *Feldenergie durch Quarkfelder und das Higgsfeld macht sich auch als Masse bemerkbar.*

2. Diese Prinzipien gelten in jeder Größenordnung (makro- und mikroskopisch) sowie fächerübergreifend (Astronomie, Biologie, Chemie).
3. Da Energie nur zwischen Feldern und Bewegung übertragen werden kann, bleibt die Gesamtenergie von beiden (Felder und Bewegungen) und also in unserer Welt zusammen immer gleich; Energie ist erhalten.[b]

[a] Diese Konzeptidee ist eine implizite Konzeptidee, d. h. sie wird nicht direkt überprüft; ehemals Konzeptideen 3 und 4 der ersten Version.
[b] Diese Konzeptidee wird implizit vermittelt.

9.2 Weiterentwicklung des Interviewleitfadens

Ausgehend von den Konzeptideen muss nun der Interviewleitfaden als Grundlage für die Akzeptanzbefragungen weiterentwickelt werden. Dazu werden einige Änderungen im Vergleich zur ersten Version vorgenommen.

9.2.1 Aufbau des Interviewleitfadens

Grundsätzlich wird der logische Aufbau des Leitfadens beibehalten, es wird also mit makroskopischen Feldern begonnen und dann auf mikroskopische erweitert. Geändert wird allerdings die Reihenfolge der ersten beiden Bereiche, sodass nun zuerst die Zusammensetzung des Gesamtfeldes samt Wechselwirkung erklärt wird. Darauf aufbauend folgt dann die Idee „Das Gesamtfeld trägt Energie“. Auf diese Weise soll dem Bezugspunktproblem vorgebeugt werden, indem zuerst ein Verständnis für Begriff und Vorstellung des Gesamtfeldes geschaffen wird.
Auch wenn die logische Abfolge ‚von makro zu mikro‘ gleich bleibt, so gab es in der ersten Version teilweise Transferaufgaben, die bereits auf die Suche nach mikroskopischen Felder abzielten, ohne diese vorher einzuführen. Dies wird in der zweiten Version strikter getrennt, sodass nur noch die Anwendung von Aspekten erwartet bzw. überprüft wird, welche auch Bestandteil der entsprechenden Erklärung sind. Diese Anpassung eliminiert beispielsweise den Kontext des Lastenhebers und ersetzt diesen durch ein Beispiel, das näher an der Erklärung liegt (Explosion eines Feuerwerks). Startet man darüber hinaus die neue Strukturierung mit den letzten beiden Punkten des Überarbeitungsvorschlages für die erste Version, so gibt es neben der Implementation der oben dargelegten Konzeptideen zwei Aspekte, die beachtet werden müssen: das Anbieten von Überblickssequenzen und das Bereitstellen einer Anleitung für die Schüler*innen. Ein Überblick über den Interviewleitfaden wird in Tabelle 9.1 und 9.2 gegeben.

Überblickssequenzen

Zwischen den Bereichen werden Überleitungen geboten, welche die zuletzt gelernten Konzeptideen noch einmal kurz zusammenfassen und Ausblick auf die neuen Ideen geben, um die Ideen insgesamt in einem größeren Rahmen verstehen zu können. Dazu zählen auch eine Einführungsinformation zum Thema Energie und ein kurzer Überblick über die Struktur des Interviews („Was wir heute lernen werden“, Einführungsinformation 0.2 in Tab. 9.1) sowie die wichtigsten Hauptideen des EFA (Überleitung am Ende der Einführungsinformation). Die genaue Gestaltung wird in den nächsten Abschnitt umrissen.

Anleitung für die Suche nach Feldern und Bewegung

Um die Suche nach Feldern und Bewegung zu unterstützen, wird den Schüler*innen eine Anleitung in Form einer zweiseitigen PDF-Datei zur Verfügung gestellt (siehe Anhang C). In dieser werden zum einen die wichtigsten Orientierungsfragen für die Beantwortung von Aufgaben gegeben und zum anderen eine Tabelle bereitgestellt, in der die unterschiedlichen Felder, deren Quellen, deren Anwendungsbereich und typische Prozesse gesammelt sind (siehe Anhang C). Die Idee dabei ist, dass Schüler*innen dort nachschauen können, wenn sie bei der Suche nach Feldern Schwierigkeiten haben, z. B. wenn sie sich bei der Art der involvierten Felder nicht sicher sind. Die Datei wird ihnen nach der Einführung zur Verfügung gestellt und kurz erläutert (Einführungsinformation 0.3 in Tab. 9.1). Es wird darauf verwiesen, dass von der Seite des Interviewers nicht mehr explizit darauf eingegangen wird, ihnen aber hiermit eine Hilfe zum Nachschauen gegeben sein soll, die sie jederzeit nutzen können, wenn sie sich unsicher sind. Um die Attraktivität der angebotenen Anleitung abschätzen zu können, wir die folgende Beobachtungsfrage für die Evaluation formuliert:

> Wird erkennbar auf die Anleitung zur Suche nach Feldern/Bewegung zurückgegriffen?

Mediale Gestaltung der Interviews

Da die Befragungen aufgrund der COVID-19 Situation analog zur ersten Runde wieder online als Videokonferenz durchgeführt werden, gibt es keine Live-Experimente. Stattdessen müssen die Inhalte der Erklärungen über andere Medien veranschaulicht werden. Um eine Strukturierung zu gewährleisten, werden wie in der ersten Runde Präsentationsfolien verwendet. In dieser werden die mündlichen Erklärungen sowie Aufgaben durch kurze Abbildungen oder Videos veranschaulicht. Die Videos sind dabei eine Teilmenge der Videos der ersten Runde.

Tabelle 9.1 und 9.2 geben einen Überblick über die verwendeten Medien für die zugehörigen Bereiche und Kontexte.

9.2.2 Abschnitte und Kontexte des Interviewleitfadens

Überblick

Die Interviews gliedern sich in eine Begrüßung (analog zur ersten Runde), die Eingangsinformation, drei Hauptideen, einen Einschub als Überleitung zur modernen Physik und die Schlussbemerkungen. Die Hauptideen bieten dabei lediglich eine Einteilung der Bereiche und dienen als Orientierung:

> **Hauptidee 1:** Ein Gesamtfeld trägt Energie. Energie kann in ein Feld oder aus einem Feld übertragen werden.
> **Hauptidee 2:** Es gibt nur Feld- und Bewegungsenergie. Dies gilt immer und überall (makro- und mikroskopisch sowie fächerübergreifend).
> **Hauptidee 3:** Unsere Welt besteht aus Feldern und Bewegungen. Bei der Änderung von Masse wird Energie zwischen Feld und Bewegung übertragen (moderne Physik).

Diesen Hauptideen sind die jeweiligen Bereiche der Konzeptideen untergeordnet. Jeder Bereich ist jeweils begleitet von einer Bewertung, Paraphrase und zwei Aufgaben. Insgesamt werden einige Kontexte aus der ersten Version übernommen, angepasst bzw. ausgetauscht. So wird z. B. auf die Verwendung von Schwingungen in den Aufgaben verzichtet, da sich diese in der ersten Version als schwierig herausstellten. Hier wird auf weniger komplexe Beispiele zurückgegriffen, bei denen die Fragestellung eindeutiger formuliert werden kann und für dessen Beantwortung nur die Konzeptideen aus den Erklärungen benötigt werden.

Hauptidee/Thema	Bezeichnung	Nummer	Kontext	Medium
Begrüßung				
Einführungsinformation	0.1 Phänomenologie der Energie			Abbildungen
	0.2 Was wir heute lernen werden			
	0.3 Anleitung			PDF
	Überleitung			
Hauptidee 1: Ein (Gesamt-)Feld trägt Energie. Energie kann in ein Feld oder aus einem Feld übertragen werden.	1.1 Quelle und Gesamtfeld	E1.1	Skizze Gesamtfeld, Beispiel Stabmagnete, Beispiel Satellit	Skizzen
		A1.1a	Quelle und Gesamtfeld zweier abstoßender Ladungen	Skizze
		A1.1b	Quelle und Gesamtfeld zweier geladener Luftballons	Skizze
	1.2 Energie im Gesamtfeld und Energieübertragung	E1.2	Abstoßende Magnetwägen, abprallende Magnetwägen	Videos
		A1.2a	Luftballons stoßen sich ab	Video
		A1.2b	Satellitenbewegung um die Erde	Simulation
	1.3 Indikatoren für Feldveränderung und Energieübertragung	E1.3	Abprallende Magnetwägen	Mündlich
		A1.3a	Luftballons	Mündlich
		A1.3b	Satellitenbewegung	Mündlich
		Z	Zusammenfassung	
		A1.3c	Fallender Ball	Mündlich
Hauptidee 2: Es gibt nur Feld- und Bewegungsenergie.	2.0 Einleitung Nur Feld- und Bewegungsenergie			Mündlich, Abbildung

Tabelle 9.1: Struktur des Interviewleitfadens zu Version 2 des EFA (Teil 1)

Hauptidee 2: Es gibt nur Feld- und Bewegungsenergie.	2.1 Überall: Mikrokosmos und andere Fächer	E2.1	Schleuder und Muskelkontraktion	Abbildungen
		A2.1a	Automotor	Mündlich
		A2.1b	Explosion	Abbildung
		Z2.1	Zusammenfassung	Mündlich
	2.2.1 Immer: Thermische Energie	E2.2.1	Fadenpendel	Abbildung
		A2.2.1a	Kugelbahn	Video
		A2.2.1b	Erwärmung in der Mikrowelle	Mündlich
	2.2.2 Immer: Elektromagnetische Strahlung	E2.2.2	Abstrahlung eines Atoms, Mikrowelle	Abbildung bzw. mündlich
		A2.2.2a	Laser	Abbildung
		A2.2.2b	Solarzelle	Abbildung
		Z2.2	Zusammenfassung	Mündlich
Einschub			Gravitationslinse	Abbildung
Hauptidee 3: Moderne Physik	3.1 Quarkfeld	E3.1	Aufbau Materie, Alpha-Zerfall	Abbildungen
		A3.1a	Kernspaltung	Abbildung
		A3.1b	Kernfusion	Abbildung
	3.2 Higgsfeld	E3.2	Paarerzeugung	Abbildung
		A3.2a	Annihilation PET	Abbildung
		A3.2b	CERN-Experiment	Abbildung
Schlussbemerkungen				

Tabelle 9.2: Struktur des Interviewleitfadens zu Version 2 des EFA (Teil 2)

Einführungsinformation: Energie an phänomenologischen Beispielen

Wie bereits oben motiviert, werden zu Beginn eines Interviews drei phänomenologische Beispiele gegeben (0.1), welche die Rolle der Energie und ihre Bedeutung für unseren Alltag veranschaulichen: Die Energieumwandlung bei Betrieb einer Achterbahn, bei Betrieb eines Kernkraftwerks und bei Kollisionen im LHC am CERN. Die Auswahl dieser Kontexte knüpft an den logischen Aufbau des Interviews an, bei der mit makroskopischen Feldern begonnen und dann auf mikroskopische Felder und letztlich auf Quark- und Higgsfeld erweitert wird.
Der Sinn hinter der Auswahl der drei Kontexte Achterbahn, Kernkraftwerk und CERN stellt neben der Widerspiegelung der Struktur des Interviews auch einen Anknüpfungspunkt zum traditionellen Ansatz dar. Denn alle drei Beispiele können sowohl mit traditionellen Energieformen als auch im Bild des EFA beschrieben werden. So kann beispielsweise die Fahrt einer Achterbahn so beschrieben werden, dass potenzielle Energie in kinetische umgewandelt wird. Um den Prozess zu beschreiben, bietet sich das Betrachten der Energie an, beispielsweise um das Tempo des Wagens zu bestimmen. Die logische Struktur setzt sich für die anderen beiden Beispiele fort (siehe Interviewleitfaden in Anhang C). Neben der Einführungsin-

formation werden diese drei Beispiele wieder bei 2.0 (Einleitung „Es gibt nur Feld- und Bewegungsenergie.“, Hauptidee 2) aufgegriffen. Hier wird die Kern-Aussage des EFA motiviert, indem die zu Beginn erläuterten drei Beispiele nun mittels Feldern und Bewegungen erläutert werden. So wird beispielsweise die Achterbahn durch Energieübertragung zwischen Gravitationsfeld und Bewegung des Wagens beschrieben. Auf diese Weise wird die Bedeutung des Ansatzes motiviert.

Hauptidee 1: Das Gesamtfeld

Die zweite Version des Interviewleitfadens beginnt mit der Beschreibung und Visualisierung des Gesamtfeldes. Hier wird den Schüler*innen die oben diskutierte Skizze am Beispiel zweier Stabmagnete und der Satellit-Erde Konstellation vorgestellt (E1.1). Diese Veranschaulichung sollen die Schüler*innen dann auf die Konstruktion des Gesamtfeldes zweier positiver Ladungen (A1.1a) und zweier mittels Reibungselektrizität elektrostatisch geladener Luftballons (A1.1b) übertragen. Die dabei zu erstellende Skizze sollen sie (sofern technisch möglich) über die Whiteboard-Funktion der Videokonferenz erstellen, sodass das entstehende Bild gespeichert werden kann. Dadurch ist die Argumentation der Schüler*innen auch visuell nachvollziehbar. An dieser Stelle lassen sich auch Informationen darüber ableiten, ob die Schüler*innen die Konzeptideen des elektrischen Feldes zweier einzelner Ladungen auf kompliziertere elektrisch geladene Körper übertragen können.
Auf die Konstruktion des Gesamtfeldes folgen die Konzeptideen zur Energie und Energieübertragung (1.2) sowie zu den drei Indikatoren der Energieübertragung (1.3, vlg. Konzeptideen). Hier werden als Indikatoren für die Energieübertragung die Abstandsänderung (Änderung des Feldes; es zieht sich zusammen oder dehnt sich aus), die Bewegungsänderung (etwas wird schneller oder langsamer) und die Richtung der Feldveränderung erklärt. Zusätzlich werden im Rahmen der Feldveränderung der „Wille des Feldes“ und die damit verbundene Energieabgabe bzw. die Energieaufnahme „gegen den Willen des Feldes“ als Indikatoren für die Richtung der Energieübertragung erläutert.
Die Ideen werden mit Aufgaben zu den Luftballons (A1.2a, A1.3a) und der Satellitenbewegung (A1.2b, A1.3b) überprüft. Dabei wird für die Satellitenbewegung wieder eine Simulation gezeigt, bei welcher der Satellit die Erde auf einer deutlich erkennbaren Ellipse umrundet und sich sein Tempo sichtbar vergrößert, wenn er sich der Erde nähert. Es wird angenommen, dass die Erde-Satellit-Konstellation weit genug von der täglichen Erfahrung der Gravitation entstellt ist, um hier das Erkennen der Einzelfelder und des Gesamtfeldes zu erleichtern (z. B. im Vergleich zum fallenden Ball) . Auf diese Weise sollte die Frage nach der Herkunft der zu-

sätzlichen Bewegungsenergie auch für das Gravitationsfeld zu beantworten sein; insbesondere auch deshalb, weil die Darstellung dieses Feldes bereits in der Instruktion E1.1 (Gesamtfeld) ausführlich beschrieben wurde. Interessant ist dabei auch, ob den Schüler*innen der Übergang von den Luftballons zur Satellitenbewegung gelingt, also von einem repusiven zu einem attraktiven Feld. Das heißt bei den Luftballons gibt das Feld mit größer werdendem Abstand Energie ab, beim Gravitationsfeld nimmt das Feld die Energie auf. Da im Zuge der Beobachtungsfragen zur zweiten Version auch der problematische Kontext „Fallender Ball“ erneut untersucht werden soll, um zu sehen, ob die Schüler*innen den Transfer von offensichtlichen zu weniger deutlichen Quelle-Feld Konstellationen schaffen, wird diese Aufgabe auch einer kurzen Zusammenfassung der besprochenen Ideen als letzter Aspekt von Bereich 1 (Gesamtfeld) überprüft (A1.3c).

Im Rahmen der Auswertung können ausgehend von der Analyse dieser Aufgabe dann auch Rückschlüsse auf die Beantwortung der folgenden Beobachtungsfrage gezogen werden:

> Wie gelingt den Schüler*innen der Übergang von offensichtlichen zu weniger offensichtlichen Quelle-Feld Konstellationen?

Je nachdem, wie die Schüler*innen die Konzeptideen von den (eher offensichtlichen Quelle-Feld Konstellationen) Magnetwägen und Luftballons auf die weniger offensichtliche Quelle-Feld Konstellation bei der Aufgabe des fallenden Balles übertragen können (Ball und Erde bestimmen das Gravitationsfeld), lässt sich darauf schließen, in welchem Ausmaß sie die Entstehung und Funktion des Gesamtfeldes im Kontext Gravitation verstanden haben.
Auf die Überprüfung der Plausibilität der Feld-Attribute Unsichtbarkeit, Unantastbarkeit und unendliche Ausdehnung wird in der zweiten Version verzichtet, da die Evaluation der ersten Version zeigt, dass diese Aspekte ohnehin keine großen Probleme bereiten. Aus ökonomischen Gründen sind diese Attribute also zwar Teil von Instruktionen, müssen aber nicht paraphrasiert werden.

Hauptidee 2: Zweiteilung der Energie in Feld- und Bewegungsenergie

Nach Motivation der Idee mit den bekannten Beispielen vom Anfang wird das Prinzip des Gesamtfeldes auf die mikroskopische Ebene mittels Darstellungen der Atom-Konstellationen über den Kontext „Schleuder“ eingeführt und auf das etwas abstraktere Beispiel der Muskelkontraktion erweitert (E2.1). Hier soll überprüft werden, ob die Schüler*innen mit klarer Trennung der mikroskopischen von der makroskopischen Ebene die Konzeptideen auf atomare Felder übertragen können.

Überprüft wird dies am Beispiel des Automotors (A2.1a, bereits aus der ersten Version bekannt) und der Explosion bei einem Feuerwerk (A2.1b). Hier wird bewusst (auch in Anlehnung an die erste Version und deren Evaluation) darauf geachtet, auf den Alltag übertragbare Kontexte zu wählen, damit Schüler*innen die Ideen auch allgemein als nützlich wahrnehmen (s. auch Fischer und Draxler, 2007).

Anschließend wird die Hauptidee dahingehend plausibel gemacht, das Prinzip auf die thermische Energie (hier als Umbenennung von „Wärme“ aus der ersten Version, Kontext Fadenpendel E2.2.1) und die elektromagnetische Strahlung (Kontext Abstrahlung eines Atoms sowie Mikrowelle, E2.2.2) zu übertragen. So soll veranschaulicht werden, dass auch traditionelle Energieformen wie thermische Energie und Strahlungsenergie auf Bewegungsenergie bzw. Feldenergie zurückgeführt werden können. Da die Videos von BB-Bag und „Kugel auf Feder“ in der ersten Version einen relativ trivialen Sachverhalt gestaltet haben, wird hier auf die Videos verzichtet und stattdessen auf einfache Abbildungen des Fadenpendels zurückgegriffen. Das Beispiel der Kugelbahn aus der ersten Version bleibt erhalten (A2.2.1a) und der springende Ball durch das Beispiel „Erwärmung in der Mikrowelle“ ersetzt. Dadurch soll der Fokus auf die Erwärmung, d. h. Zunahme an thermischer Energie, gerichtet werden anstatt auf den mechanischen Prozess. Auf die Funktionsweise wird hier noch nicht eingegangen, sondern lediglich gefragt, was in der Speise passiert, wenn diese erwärmt wird. In der Erklärung zur elektromagnetischen Strahlung wird dann neben der Umsetzung der oben angepassten Konzeptideen das Beispiel der Mikrowelle aufgegriffen und mit dem entsprechenden Feld erklärt. Die Akzeptanz der Ideen wird durch die Kontexte Laser (A2.2.2a) und Solarzelle (A2.2.2b) überprüft. Bei ersterem wird das Schneiden einer Metallplatte durch einen starken Laser beschrieben (Energieübertagung von elektromagnetischem Feld zu Bewegungsenergie der Atome bzw. atomarem Feld), bei letzterem wird die Energieübertragung von elektromagnetischer Strahlung zu elektrischem Feld betrachtet.

Hauptidee 3: Moderne Physik mit Quark- und Higgsfeld

Bis hierher werden die Konzeptideen der klassischen Physik der angepassten bzw. erweiterten ersten Version des EFA umgesetzt. Nun folgt die moderne Physik mit Hilfe eines kurzen motivierenden Einschubs. Dazu wird das Phänomen der Gravitationslinse qualitativ erläutert, um den Zusammenhang von Feldenergie und Masse über die Energie-Masse-Äquivalenz zu motivieren. Dazu wird den Schüler*innen auch der Bezug der Gravitationslinse als belegendes Experiment für Einsteins allgemeine Relativitätstheorie und die Formel $E = m \cdot c^2$ geboten (vgl. Povh

und Soergel, 2014).[7] Die darauf aufbauende Frage lautet dann: „Kann Masse auch Feldenergie sein?“

Auf diese Frage folgt ein kurzer Einblick in den Aufbau der Materie von Atomen zu Quarks, um die einzelnen Begriffe zu klären (E3.1). Darauf aufbauend wird erläutert, dass Quarkfelder Energie tragen und folglich hauptsächlich zur Masse der Materie beitragen. Als Anwendung wird die Freisetzung der Bewegungsenergie des Alpha-Teilchens beim entsprechenden Zerfall erklärt. Auch wenn hier fachlich gesehen das elektrische Feld eine wesentliche Rolle spielt, wird nur über das Quarkfeld und dessen Veränderung als Folge der Umordnung des Kerns gesprochen (vgl. auch Rückl, 1991). Dies ist insofern zu rechtfertigen, als die Definition des Quarkfeldes bereits dessen elektrisches Feld beinhaltet (vgl. Kapitel 4). Das Verständnis vom Zusammenhang von Quarkfeld, Massendifferenz und Energieübertragung wird hier über die Aufgaben zu Kernspaltung (A3.1a) und Kernfusion (A3.1b) getestet.

Als letzter Aspekt folgt die Begründung für die Ursache der Masse von Elementarteilchen über das Higgsfeld. Dieses wird am Kontext Paarerzeugung erläutert (E3.2) und am Beispiel der Annihilation bei der PET (A3.2a) und einem Experiment des CERN (A3.2b) als Aufgabe überprüft. Insbesondere die letzte Aufgabe ist so konzipiert, dass hier unterschiedliche Antworten als angemessen gelten können. Hier wird gefragt, wo die Energie vor und nach der Kollision zweier Protonen zu finden ist. Hier umfasst das Antwortspektrum beispielsweise die Feldenergie der elektromagnetischen Strahlung, der Quarkfelder, der Quarkmassen durch das Higgsfeld oder die Bewegungsenergie selbst. Der Vorteil einer solchen Antwortvielfalt ist, dass so beobachtet werden kann, welche Felder bzw. Energien die Schüler*innen von sich aus nennen. Dies lässt Rückschlüsse darauf zu, welche Arten ihnen als besonders adäquat und zugleich präsent erscheinen. Es sind also möglicherweise auch Aussagen darüber möglich, welche Aspekte der angebotenen Inhalte den Schüler*innen integrativ als besonders attraktiv erscheinen. Die Beantwortung dieser und insbesondere der Beobachtungsfragen ist Gegenstand der Evaluation, welche im nächsten Kapitel beschrieben wird.

[7] Povh und Soergel (2014) beschreiben die Diskrepanz zwischen Newton’scher Berechnung der Ablenkung des Lichtes durch einen Stern oder ein schwarzes Loch und die Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie (ART). Die ART gibt dabei eine doppelt so große Ablenkung an, was 1919 auch experimentell belegt werden konnte.

KAPITEL 10

Zweite Version: Auswertung der Interviews

Auf der Grundlage der Auswertung der ersten Version des EFA wurde dieser wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben zur zweiten Version durch Anpassungen bestehender und Integration neuer Aspekte weiterentwickelt. Diese Weiterentwicklung wurde dann im Rahmen einer zweiten Evaluationsrunde hinsichtlich der Beantwortung der Forschungsfrage untersucht. Analog zur ersten Runde folgt die Auswertung auf eine kurze Beschreibung von Rahmenbedingungen und Stichprobe der zweiten Runde. Die Auswertung gliedert sich in die Beschreibung des ersten Eindrucks aus der Kodiertafel sowie der detaillierten Längs- und Queranalyse mit Beantwortung der Beobachtungsfragen und Erstellung eines Überarbeitungsvorschlages. Anschließend werden die Ergebnisse aus der ersten und zweiten Runde verglichen. Die Erkenntnisse stellen den Ausgangspunkt der dritten und letzten Design- und Evaluationsrunde dar.

10.1 Allgemeine Rahmenbedingungen und Stichprobe

Die Interviews wurden, wie auch die erste Runde, aufgrund der anhaltenden COVID-19 Pandemie online als Videokonferenz durchgeführt. Dafür wurden Lehrpersonen von drei verschiedenen Schulen gebeten, in ihren Klassen und bei Kolleg*innen Werbung für die Teilnahme ein einem 2,5-stündigen Interview zu machen. Interessierte Schüler*innen konnten wieder per E-Mail oder online über ein

Kürzel	Geschl.	Jgst.	Schultyp	Interviewdauer in Stunden	Note	Performanz
$S1_2$	m	12	Real-Gym	2,0	-	1,88
$S2_2$	m	12	Real-Gym	2,3	2	1,85
$S3_2$	w	12	Real-Gym	1,5	2	1,97
$S4_2$	w	12	Real-Gym	2,0	3	1,70
$S5_2$	w	12	Real-Gym	2,3	3-4	1,68
$S6_2$	w	12	Real-Gym	2,75	3	1,69
$S7_2$	w	12	Real-Gym	2,0	3	1,84

Tabelle 10.1: Schüler*innen $S1_2$ bis $S7_2$ der zweiten Runde für die Evaluation des EFA mittels Online-Akzeptanzbefragungen. „Real-Gym“ bezeichnet die Schulform Real-Gymnasium. Die Note bezieht sich auf die letzte Klausur der*s jeweiligen Schülers*in (Information fehlt für $S1_2$). Die Performanz-Werte sind bereits aus der nachfolgenden Auswertung übernommen.

Formular ihr Interesse bekunden und ihre Kontaktdaten angeben. Um eine ausreichende Stichprobengröße zu erhalten, wurde eine Aufwandsentschädigung in Höhe von zwanzig Euro sowie eine Teilnahmebescheinigung angeboten. Dies hatte auch zum Ziel, nicht nur die besonders an Physik interessierten Schüler*innen anzusprechen (auch im Kontrast zur ersten Runde), sondern eine breitere Stichprobe zu erreichen.

Im Dezember 2020 wurde mit der Akquise begonnen und in den Monaten Dezember 2020 und Januar 2021 insgesamt sieben Interviews mit Schüler*innen der zwölften Jahrgangsstufe durchgeführt. Da der übliche Schulunterricht der Sekundarstufe II zum Großteil online stattfand, schien die Motivation der Schüler*innen, an einer freiwilligen (aber für sie dennoch zusätzlichen) Online-Veranstaltung teilzunehmen, eher gering zu sein. Insgesamt meldeten sich sieben Schüler*innen für ein Interview (siehe Tabelle 10.1). Als aktuelles Thema wurde bei allen zum Zeitpunkt der Interviews die Radioaktivität behandelt. Insofern war zu erwarten, dass die Schüler*innen Vorwissen zu einzelnen Kontexten mitbringen. Die angeführte Note ist die aktuelle Zwischennote aus der letzten Klausur des*r jeweiligen Schüler*in. Es geht hervor, dass die Schüler*innen Leistungen im mittleren Notenbereich aufweisen, was einen Kontrast zur ersten Runde darstellt.[1] Eine gleiche oder sogar bessere Performanz als in der ersten Runde würde also für die Wirksamkeit der Anpassungen sprechen.

[1] Auch wenn die letzte Klausurnote in Physik von vielen Einflussfaktoren abhängt, wird diese Information für eine Abschätzung der internen Leistung erhoben. Gemäß Krapp et al. (1993) hängen Interesse und Leistungsfähigkeit bedingt zusammen und die Note gibt ein grobes Abbild der Schüler*innen.

10.2 Kodierung und Ersteindruck

Die Kodierung der Interviews erfolgte anhand eines Kodierleitfadens (siehe Anhang E). Eine Besonderheit für die zweite Version ist die Kodierung für die Indikatoren (Bereich 1.3) und die offene Frage zum CERN (Aufgabe A3.2). Dabei wird vollständig (also als vollumfänglich angemessen) kodiert, wenn mindestens zwei der drei Indikatoren (Abstands-, Bewegungs- und Feldveränderung) fachlich richtig und von selbst verwendet werden. Bei der Aufgabe zur Protonen-Kollision (CERN) wird jede Antwort akzeptiert, sofern für den Zustand vor und nach der Kollision jeweils mindestens zwei Energien/Felder fachlich angemessen beschrieben werden. Die resultierende Kodiertafel für die zweite Runde ist in Tabelle 10.2 dargestellt. Für die Schüler*innen $S1_2$ und $S7_2$ wurde ein Interrate durchgeführt, was zu einer Interrater-Reliabilität (Cohens Kappa) von $\kappa = 0,61$ und damit zu einer guten Übereinstimmung führt (vgl. Kapitel 5.4.3).

Bereich			**Schüler*innen**							
Konzeptidee/Thema	Kontext	Nummer	$S1_2$	$S2_2$	$S3_2$	$S4_2$	$S5_2$	$S6_2$	$S7_2$	
Quelle und Gesamtfeld		B1.1	2	2	2	2	2	2	2	1,93
		P1.1	2	2	2	2	2	2	2	
	Ladungen	A1.1a	2	2	2	1	1	2	2	
	Luftballons	A1.1b	2	2	2	2	2	2	2	
Energie im Gesamtfeld & Energieübertragung		B1.2	2	2	2	2	2	2	2	1,75
		P1.2	2	2	2	2	2	2	2	
	Luftballons	A1.2a	2	2	2	2	2	2	2	
	Satellit und Erde	A1.2b	1	0	1	2	1	1	1	
Indikatoren Feldveränderung		B1.3	2	2	2	2	2	2	2	1,74
		P1.3	2	2	2	2	2	2	2	
	Luftballons	A1.3a	2		2	2		2		
	Satellit und Erde	A1.3b	1	2	2	2		2	2	
	Fallender Ball	A1.3c	2	0	2	1	0	2	0	
Überall: Mikrokosmos und andere Fächer		B2.1	2	2	2	2	1	2	2	1,92
		P2.1	2	2	2	2	2	2	2	
	Automotor	A2.1a	2	2	2	2	1	2	2	
	Explosion (Feuerwerk)	A2.1b			2	2	2	2	2	
Immer: Thermische Energie		B2.2.1	2	2	2	1	2		2	1,63
		P2.2.1	2	2	2	1	2	1	2	
	Kugelbahn	A2.2.1a	2	2	2	1	2	0	2	
	Mikrowelle	A2.2.1b	2	2	2	0	1	1	2	
Immer: elektromagnetische Strahlung		B2.2.2	1	2	2	2	2	2	2	1,86
		P2.2.2	2	2	2	1	2	2	2	
	Laser	A2.2.2a	2	0	2	2	2	2	1	
	Solaranlage	A2.2.2b	2		1	2	2	2	2	
Quarkfeld		B3.1	2	2	2	1	2	1	2	1,79
		P3.1	2	2	2	1	2	0	1	
	Kernspaltung	A3.1a	2	2	2	2	2	2	2	
	Kernfusion	A3.1b	2	2	2	2	2	2	2	
Higgsfeld		B3.2	1	2	2	2	2	2	2	1,79
		P3.2	2	2	2	2	1	2	2	
	PET	A3.2a	2	2	2	2	1	0	2	
	CERN-Kollision	A3.2b	2	2	2	2	1	2	2	
Performanz			1,88	1,78	1,97	1,7	1,68	1,69	1,84	**1,80**

Tabelle 10.2: Kodiertafel der Interviews zur zweiten Version des EFA. Das Interview mit $S2_2$ musste in Bereich 2.2.2 unterbrochen und zu einem anderen Termin fortgesetzt werden, weswegen hier Konzeptideen des entsprechenden Bereiches wiederholt wurden. Eine grüne Kodierung (2) bedeutet angemessene, eine gelbe (1) teilweise problematische und eine rote Kodierung (0) trotz Hilfestellung problematische Performanz. Leere Felder kennzeichnen Auslassungen bzw. fehlende Daten. Die Performanz ergibt sich als Mittelwert der entsprechenden Schüler*innen bzw. Bereiche.

Der Grund für die auffällige Unterteilung in zwei Spalten bei Schüler $S2_2$ in Bereich 2.2.1 (Elektromagnetische Strahlung) ist die zwangsweise Zweiteilung des Interviews. Hier wurde der Bereich wiederholt (für nähere Informationen siehe Längsanalyse von $S2_2$). Für die Darstellung der Performanz- und Bereichswerte wurde auch hier die in Kapitel 5.4.3 beschriebene Farbkodierung verwendet.

Insgesamt zeigt die Stichprobe mit $P = 1,84$ eine bessere Performanz als die aus der ersten Runde ($P = 1,75$). Hier gibt es drei schwächere Schüler*innen, die vornehmlich auch den Hauptanteil der Probleme der Bereiche Thermische Energie (2.2.1) und elektromagnetische Strahlung (2.2.2) sowie der modernen Physik (3.1: Quarkfeld, 3.2: Higgsfeld) ausmachen. Die Bewertungen und Paraphrasen verlaufen überwiegend problemlos, die meisten Problematiken scheinen sich bei den Aufgaben zu ergeben. Hier stechen besonders die Aufgaben A1.2b (Satellit und Erde) und A1.3c (Fallender Ball) heraus, die scheinbar fast allen Schüler*innen schwer fallen.
Positiv fällt auf, dass neben den Bewertungen und Paraphrasen auch meist nur eine von zwei Aufgaben pro Schüler*in problematisch ist. Dies sorgt für insgesamt viele unproblematische Aspekte und für (bis auf einzelne Aspekte) hervorragende Bereichswerte. Insbesondere die ersten vier Bereiche, in denen vornehmlich die Darstellung des Gesamtfeldes sowie dessen Rolle und Zusammenhang mit der Energieübertragung bei Phänomenen thematisiert werden, zeigen eine hohe Akzeptanz und Übertragbarkeit für die Argumentation in Aufgaben. Besonders die Darstellung des Gesamtfeldes, die einen neuen zusätzlichen Inhalt der zweiten Version darstellt, wird von fast allen Schüler*innen akzeptiert und angemessen wiedergegeben sowie angewendet.
Hinsichtlich der eher mittleren Schulleistungen der Schüler*innen sind die Performanzwerte beachtlich, was generell für die Akzeptanz und Anwendbarkeit des Konzeptes spricht. So akzeptieren die meisten Schüler*innen auch den Zusammenhang von Feldenergie und Masse im Kontext Quark- und Higgsfeld (und damit den Zusammenhang $E = m \cdot c^2$) und können das Konzept anwenden. Auch die Übertragung der Ideen auf die offene Aufgabe zur CERN-Kollision verläuft meist problemlos. Welche Problematiken sich bei den kritischen Aspekten und Bereichen ergeben und welche Bedeutung dies für die Umsetzbarkeit und die Weiterentwicklung des Ansatzes hat, wird im Folgenden untersucht.

10.3 Längsanalyse

Wie bei der ersten Runde beginnt die Evaluation mit der fallzentrierte Längsanalyse für die einzelnen Schüler*innen. Dieser Abschnitt beschreibt die Analyse und Erkenntnisse über Schwierigkeiten und Benefits der zweiten Version. Die Aspekte zur Veranschaulichung des Gesamtfeldes und die CERN-Aufgabe sind neu für diese Version. Deshalb werden die Ergebnisse im Rahmen der Längsanalyse für jede*n Schüler*in detailliert dargelegt.

10.3.1 Analyse Fall S1_2

Allgemeine und positive Aspekte

Schüler S1_2 merkt an, dass er durch eigenes Interesse bereits Videos zu Themen der modernen Physik gesehen hat, in denen es beispielsweise um die Rolle des Gluon-Feldes für die Masse von Materie geht. Er betont, dass er deshalb und dadurch, dass zeitgleich das Thema Radioaktivität in der Schule behandelt wird, bereits Vorwissen besitze und es ihm deshalb teilweise schwerfalle, sich nur auf die vorgestellten Erklärungen zu konzentrieren. Dennoch übernimmt er generell die Konzeptideen bei seinen Paraphrasen und Erklärungen und greift wenig auf traditionelle Ideen zurück. Es scheint insgesamt, dass ihm durch die erwähnten Videos einiges von den vorgestellten Inhalten bekannt vorkommt, er sich aber auch auf Nachfrage nicht an konkrete wissenschaftliche Inhalte der von ihm erwähnten Videos erinnern kann. Dies äußert sich auch darin, dass er ausschließlich auf die im Interview vorgestellten Ideen zurückgreift. Sein Vorwissen fördert also das Interesse, bringt aber keine Konflikt-behafteten Konzepte hervor.
Als Besonderheit für den Fall muss hier erwähnt werden, dass für S1_2 noch keine Veranschaulichungen (Bilder) für die Kontexte Muskelkontraktion (E2.1) sowie Kernfusion (A1.3b) existieren. Diese wurden ab dem Interview mit Schüler S2_2 ergänzt, nachdem S1_2 hier anmerkt, dass es „etwas schlechter vorstellbar“ (B2.1) sei. Aber auch ohne die hier angedachte, aber nicht abrufbare Darstellung konnte der Schüler die Konzeptideen entsprechend angemessen übernehmen. Die Anleitung zur Suche nach Feldern und Bewegung wurde hier aufgrund des ohnehin reibungslosen Verlaufs bei E2.2.1 (Thermische Energie) mit der Einführung weiterer Felder ausgegeben. Auf diese wurde jedoch während des gesamten Interviews nicht zurückgegriffen.
Insgesamt zeigt der Schüler mit einem Performanzwert von 1,88 die zweitstärkste Performanz der Stichprobe. Dies spiegelt sich darin wider, dass er alle Paraphrasen angemessen und vollständig formuliert und bis auf jeweils zwei Bewertungen und

Aufgaben alle Ideen akzeptiert und anwenden kann. Die problematischen Aufgaben beziehen sich dabei nur auf das Beispiel mit dem Satelliten aus den Bereichen 2 und 3. Im Zuge der Paraphrase zur thermischen Energie macht sich bemerkbar, dass er das Prinzip der Zweiteilung der Energie als Kernidee des EFA akzeptiert:

> „Man hat nur Bewegungs- und Feldenergie, also kann alle Formen nur auf diese beiden zurückführen." (P2.2.1)

Bei den Aufgaben zu mikroskopischen Feldern (A2.1a/b) führt der Schüler die Funktionsweise des Automotors selbst auf „kleine Explosionen" zurück, welche dann zur Kolbenbewegung führen. Da er hier das Prinzip mikroskopischer Explosionen im Weiteren vollkommen richtig erklärt, wird die separate Aufgabe zur Explosion des Feuerwerks (A2.1b) mit dieser zusammengefasst und nur einmal kodiert.

Problematische Aspekte

Falsche Richtung der Energieübertragung
In Bereich 1.2 (Energie im Gesamtfeld und Energieübertragung) bewertet und paraphrasiert der Schüler ohne Auffälligkeiten. Auch die Aufgabe zu den beiden Luftballons (A1.2a) löst er souverän. Bei der Übertragung auf die Satellitenbewegung (A1.2b) hingegen verbindet er auch für das attraktive Gravitationsfeld die Expansion mit Energieabgabe. Diese Übertragung ist nachvollziehbar, da der Aufbau der vorigen Erklärung auf diese Aufgabe übertragen wird. Es ist zu vermuten, dass er der Konzeptidee das *knowledge-piece* „größeres Feld bedeutet Energieabgabe" entnommen hat. Allerdings handelt es sich hier um den umgekehrten Fall: Bei einem attraktiven Feld wird Energie aufgenommen, wenn sich der Abstand vergrößert. Hier ist scheinbar nicht bewusst, dass Energie aufgenommen wird, was man aber an der Bewegung des Satelliten erkennen kann. Allerdings wurden die Indikatoren für die Energieübertragung an dieser Stelle noch nicht explizit eingeführt, weswegen das Beispiel des Satelliten hier aufgrund der umgekehrten Richtung der Wechselwirkung eine Schwierigkeit darstellt. Auf Nachfrage kann der Schüler die Aufgabe richtig lösen. Das Prinzip der Energieübertragung aus einem Feld bzw. in ein Feld wird hier von Beginn an verwendet. Nachdem die Abstands- und Bewegungsänderung sowie der „Wille des Feldes" in Bereich 1.3 (Indikatoren für Feldveränderung und Energieübertragung) eingeführt werden, wiederholt sich das Problem bei Aufgabe A1.3b (Satellitenbewegung). Hier spricht er erst über maximale Energie bei minimalem Abstand, formuliert die Beziehung aber anschließend richtig um. Eine Hilfestellung ist hier nicht mehr nötig. Um dieses Problem zu lösen, muss also der Unterschied für die Richtung der Energieüber-

tragung deutlicher gemacht werden. Dazu ist eventuell eine ausführlichere und explizitere Erklärung für die Abgrenzung nötig.

Unklare Interaktion von elektromagnetischem und atomarem Feld
Im Zuge der Bewertung zur elektromagnetischen Strahlung (B2.2.2) ist dem Schüler beim Kontext Mikrowelle nicht klar, ob sich hier das elektromagnetische und das elektrische Feld der Atome überlagern oder ob es eher zu einer Interaktion kommt. Hier entsteht Unklarheit an einer Schnittstelle zwischen Strahlung und ihrer Wechselwirkung mit Materie.
Um plausibel zu machen, dass die Erwärmung der Speise (durch Energieübertragung) über die Interaktion des Feldes der Strahlung mit dem Feld der Atome der Speise stattfindet, kann die Erklärung dahingehend erweitert werden. Da es sich hier aber um eine Feinheit handelt, die nicht zwingend ein Problem darstellt, kann der Bedarf eher als sekundär eingeschätzt werden, sofern nicht auch weitere Schüler*innen diese Problematik aufweisen.

Rolle des Higgsfeldes unklar
Bei der Bewertung merkt der Schüler folgendes an:

> „Die Funktion von dem Higgsfeld ist etwas schwer zu verstehen: Sie sorgt für Energie? Ich habe ja Masse, also was für eine Energie?“ (B3.2)

Hier wird erkennbar, dass ihm der Zusammenhang von Masse und Energie und die Rolle des Higgsfeldes noch nicht klar ist. Diese Fragestellung tritt im Kontext der Paarerzeugung auf, in der die Energie der Strahlung (also elektromagnetische Feldenergie) in Masse (also Energie durch das Higgsfeld) übertragen wird. Auf seine Frage wurde folgende Erklärung nachgeliefert:

> *Die Strahlung verschwindet und es gibt nur noch Masse. Die Masse ist Energie, aber wo steckt die Energie? – Sie hängt mit einem Feld zusammen, denn Bewegung ist es nicht, wenn die Teilchen ruhen. Der Grund für die Masse ist also die Präsenz des Higgsfeldes. Also: Es gibt überhaupt nur Masse wegen des Higgsfeldes.*

Diese Argumentation akzeptiert er und bewertet sie letztlich als plausibel. Hier muss in den Erklärungen der nächsten Version auf ausreichende Ausführung geachtet werden. Erwähnenswert ist noch, dass der Schüler am Ende des Interviews die folgende Frage stellt:

> „Kann man es sich so vorstellen, dass (weil die Masse lokal ist) es überall kleine Higgsfelder gibt, in denen die Energie steckt?“ (A3.2)

Auch wenn diese Anschauung fachlich nicht korrekt ist, so spiegelt sie doch eine gewisse Analogie zum EFA wider, indem der Schüler die Konzeptideen auch ohne weitere Instruktion auf das Higgsfeld überträgt. Die anschließende Klärung erscheint ihm aber ebenfalls plausibel.

Skizze des Gesamtfeldes

Aus technischen Gründen konnte die Skizze über die Whiteboard-Funktion der Videokonferenz nicht erstellt werden und der Schüler musste die Darstellung verbalisieren. Hier zeigt sich, dass er keine Probleme dabei hat, die vorgestellte Veranschaulichung auch auf das Beispiel der Ladungen (A1.1a) und Luftballons (A1.1b) zu übertragen:

> „Zwei Felder können sich zu einem Gesamtfeld zusammenschließen und die Wechselwirkung zwischen diesen stellt eine Kraft dar.“ (Nachtrag von B1.3)

Offene Aufgabe CERN

In Aufgabe A3.2b sollte erläutert werden, in welchen Bewegungen oder Feldern sich Energie befindet. Hier sollten jeweils für den Zustand vor und nach der Kollision mindestens zwei fachlich angemessene Beschreibungen genannt werden. Der Schüler nennt für die zwei Protonen vor der Kollision die Energie im sich bewegenden Feld der Protonen (Bewegung der Masse). Er gliedert die Teilchen-Masse richtig in die Energie durch das Quark- und Higgsfeld. Nach der Kollision schlüsselt er die Energie in das Higgsfeld der neu erzeugten Teilchen (ihre Masse) sowie die Bewegungsenergie der Teilchen auf. Diese Darstellung ist angemessen und zeigt, dass er sich hier streng an den zuletzt vorgestellten Konzeptideen zur Teilchenphysik orientiert. Die dabei vorgestellten Ideen scheinen also mindestens hier für einen solchen Kontext mit entsprechend offener Fragestellung hilfreich und auch in ihrer Anwendung brauchbar zu sein.

10.3.2 Analyse Fall S2_2

Allgemeine und positive Aspekte

Schüler S2_2 weist mit einem Wert von 1,78 ebenfalls eine starke Performanz auf. Es zeigt sich, dass er nicht nur alle Erklärungen als plausibel bewertet und angemessen paraphrasiert, sondern bis auf drei Aufgaben alle Erklärungen auch korrekt anwenden kann. Trotz seiner guten Performanz wirkt der Schüler gelegentlich unsicher bzw. versteht die Fragestellung nicht. Oft betont er auch zu Beginn einer

Argumentation, dass ihm keine bessere Antwort einfällt; teilweise gefolgt von einer Entschuldigung. Es könnte sein, dass er hier stellenweise leicht nervös ist. Es ist auch bemerkbar, dass er sehr gezielte Fragestellungen braucht, um zu wissen, was von ihm verlangt bzw. erwartet wird. Infolgedessen liefert er auf eine Nachfrage hin dann aber meist eine angemessene Erklärung.
Besonders problemlos und entsprechend erfolgreich verläuft die Performanz des Schülers in den Bereichen 1.1 (Quelle und Gesamtfeld), 2.1 (Mikrokosmos), 2.2.1 (Thermische Energie) sowie zum Quark- und Higgsfeld (3.1 und 3.2). Die problematischen Stellen beziehen sich also nur auf zwei Aufgaben (A1.2b, A1.3c und A2.2.2b).
Ähnlich zu Fall $S1_2$ geht auch $S2_2$ im Rahmen der Erklärung von Aufgabe A2.1a (Automotor) bereits auf kleine Explosionen ein:

> „Die Energie kommt daher, dass an einem ganz kleinen Ort eine Explosion erzeugt wird, die dann den Druck verändert.“ (A2.1a)

Deshalb wird auch hier A2.1a mit A2.1b zusammengefasst kodiert. Bei Aufgabe A2.21a (Kugelbahn) geht der Schüler nicht nur auf die mikroskopische Bewegung der Atome ein, sondern sogar auf die Rolle des elektrischen Feldes dieser bei der Erwärmung ein. Bei der Überleitung zum Quarkfeld (E3.1) denkt er sofort daran, dass die Masse von Teilchen mit dem Higgsfeld (er spricht hier erst vom „Higgs-Teilchen“) zusammenhängt. Der Begriff scheint hier also bereits bekannt zu sein.
Eine Besonderheit dieses Interviews ist, dass es aus persönlichen Gründen in Bereich 2.2.2 (Elektromagnetische Strahlung) unterbrochen und auf einen weiteren Termin vertagt werden musste. Dies geht mit einem starken Abfall der Aufmerksamkeit seitens des Schülers im ersten Durchgang in diesem Bereich einher. Das Interview wurde daraufhin unterbrochen und (aufgrund der Weihnachtszeit) ca. zwei Wochen später fortgesetzt. Dazu beginnt das zweite Interview mit einer kurzen Zusammenfassung der wesentlichen Konzeptideen bis zum Beginn von Bereich 2.2.2. Das Nachfolgeinterview beginnt also erneut mit der Bewertung B2.2.2, weswegen dieser Bereich zwei Spalten in der Kodierungtafel aufweist. Für die Kodierung wird auf den vollständigen zweiten Durchgang zurückgegriffen, da davon ausgegangen wird, dass dieser unter normalen Bedingungen repräsentativer ist.

Problematische Aspekte

Bezugspunktproblem/keine Feldidee
Bei Aufgabe A1.2b (Satellit und Erde) greift der Schüler nicht auf die vorgestellten Konzeptideen zurück. Hier verwendet er nicht den Feldbegriff, sondern argumentiert im Kraftbild. Er führt an, dass die größere Energie bzw. die schnel-

lere Bewegung des Satelliten durch den kleineren Abstand und somit durch die größere Kraft zu Stande käme. Diese Aussage ist nicht nur unvollständig, sondern auch nicht völlig korrekt und hat keinen Bezug zu den vorgestellten Ideen. Auch auf Nachfrage weicht der Schüler hier nicht vom Kraftkonzept ab:

> „Für mich macht es nur Sinn mit der stärkeren Anziehung aufgrund des kleineren Abstands.“ (A1.2b)

Nachdem die Aufgabe aufgelöst wird, gibt er zu:

> „Achso, ja, so kann man es sehen. [...] Ich habe jetzt nicht daran gedacht, dass sich dann das Gesamtfeld verändert aufgrund der Entfernung des Satelliten zu der Erde.“ (A1.2b)

Das gleiche Verhalten zeigt sich jedoch auch bei Aufgabe A1.3c zum fallenden Ball, bei dem der Schüler auch auf Nachfrage keine direkte Gemeinsamkeit zur Satellitenbewegung sieht (A1.3c):

I: Wo kommt die [Bewegungsenergie] her?
$S2_2$: Von der Gravitationskraft.
I: Hast du eine Idee, wie man das mit Feldern erklären kann?
$S2_2$: Ich könnte es wieder nicht anders erklären.
I: Kannst du hier Gemeinsamkeiten mit dem Satelliten-Beispiel sehen?
$S2_2$: Der orbitiert ja nicht um irgendetwas sondern er kommt einfach [...].

Es scheint so, als wäre dies hier die einzig plausible Erklärung für ihn, der Übergang von den offensichtlichen Quelle-Feld-Konstellationen der Magnete und Luftballons wird hier offenbar nicht übertragen und scheint dem Schüler somit nicht attraktiv oder logisch. Dies kann daran liegen, dass sich dieses Beispiel auf das Gravitationsfeld bezieht, welches im traditionellen Unterricht typischerweise im Kraftbild bzw. über potenzielle Energie des entsprechenden Körpers aber keinesfalls über Felder erklärt wird. Da er hier auch auf Nachfrage keine Gemeinsamkeit zur Satellitenbewegung sieht, könnte eine Hilfestellung nützlich sein, um den Feldaspekt attraktiver zu gestalten. Dabei müsste explizit die Gemeinsamkeit zu anderen Feldern sowie dessen Rolle für den Prozess hervorgehoben werden.

Bewegungsenergie statt Feldenergie der elektromagnetischen Strahlung
Auch wenn Schüler $S2_2$ die Erklärung als plausibel einschätzt und auch korrekt wiedergibt, so hat er sowohl im ersten als auch im zweiten Interview Probleme

mit dem Aspekt des elektromagnetischen Feldes in Bereich 2.2.2. Im ersten Durchgang akzeptiert er die Idee, dass elektromagnetische Strahlung Feldenergie trägt, widerruft seine Bewertung aber im Zuge der Aufgabe A2.2.2a (Laser), da er es nur als Bewegungsenergie sinnvoll fände. Er formuliert:

> „Ich weiß wir haben das gerade gemacht, aber ich könnte jetzt schwer nachvollziehen, warum der Strahl Feldenergie ist.“ (A2.2.2a)

Auch wenn das erste Interview hier endet und die Aufmerksamkeit gegen Ende nahezu verschwunden ist, zeigt sich hier dennoch eine Dissonanz von Konzeptidee und der Beurteilung des Schülers. Für das zweite Interview wurde die Erklärung E2.2.2 zur Konzeptidee wiederholt und mit der Bewertung und Paraphrase erneut begonnen. Auch hier beurteilt und paraphrasiert der Schüler die Idee wieder problemlos. Auch Aufgabe A2.2.2a erklärt er souverän mit Hilfe der vorgestellten Idee, dass elektromagnetische Strahlung Feldenergie trägt. Erst bei A2.2.2b (Solaranlage) schreibt er der Strahlung wieder Bewegungsenergie zu: „Am Anfang habe ich Bewegungsenergie und dann Feldenergie“ (A2.2.2b). Auch wenn er hier anschließend die richtige Erklärung liefert, so betont er hier doch, dass er sich diesen Aspekt nach wie vor nicht vorstellen könne. Für ihn sei ein Strahl ein Strahl und habe Energie; und ob es Bewegungs- oder Feldenergie sei, da könne er von selbst nicht erkennen. Wenn er es sich aussuchen könnte, würde er Bewegungsenergie wählen, weil sich ein Lichtstrahl „irgendwo hin“ bewege und weil diese nicht von einer anderen Quelle beeinflusst werde. Nach einer anschließenden Erklärung, dass es sich um ein Feld handelt, das sich von der Quelle löst und ausbreitet, scheint er die Idee zwar zu akzeptieren, aber dennoch skeptisch zu bleiben. Davon unabhängig gelingt ihm aber der Umgang mit der Idee. Bei Aufgabe A3.1b zur Kernfusion wird noch einmal nachgefragt, was für eine Energie die „Sonnenstrahlen“ tragen und er antwortet dann angemessen mit „Feldenergie“.

Nachfrage Photon
Schüler $S2_2$ fragt bei B2.2.2 nach dem Zusammenhang mit dem Photon. Die Nachfrage ist unproblematisch, drückt aber den Wunsch nach weiteren Informationen aus.

Skizze des Gesamtfeldes

Die Skizze für A1.1a/b konnte aus technischen Gründen nicht direkt in der Videokonferenz erstellt werden, allerdings erstellt und erläutert der Schüler bei A1.1a eine handschriftliche Skizze. Dabei zeichnet er das Gesamtfeld als eine Art Oval in Hantelform (siehe Abb. 10.1 (a) in der Queranalyse, Abschn. 10.4.1). Er zeichnet

zwar nicht explizit die Einzelfelder ein, nimmt diese aber in seine Beschreibung auf. Auffallend ist hier auch, dass er das Feld nicht als reines Oval darstellt, sondern in der Mitte Einbuchtungen vorsieht, die ein Auseinanderziehen der Felder andeuten, ähnlich der Zellteilung. Hier spricht er davon, dass sich das Gesamtfeld wieder zu zwei Einzelfeldern aufteile und sich die Einzelfelder wieder trennten, wenn der Abstand so groß wird, dass die Kraft zu gering werde und sie sich gegenseitig kaum bzw. nicht mehr beeinflussen:

> „Wenn sie weit auseinander wären, dann überlagert sich das Feld nicht zu einem ovalen Feld, oder? Wenn es sich abstößt wird es irgendwann kein gesamtes Feld mehr sein, oder?“ (A1.1a)

Die Tatsache, dass sich Felder ohne äußeren Einfluss beeinflussen und also überlagern, wurde in der Instruktion nicht explizit angeführt und an dieser Stelle nachgeliefert. Da das Prinzip der Überlagerung des Weiteren vollständig richtig beschrieben ist, wird die Darstellung und Antwort als angemessen kodiert. Bei der zweiten Aufgabe A1.1b erkennt er die Gemeinsamkeit zur Erde-Satellit Konstellation, weswegen hier keine Skizze erstellt wird.

Offene Aufgabe CERN

Bei der CERN-Aufgabe nennt er die Feldenergie aus dem Quarkfeld und durch das Higgsfeld der Elementarteilchen als Komponenten für die Energie vor der Kollision:

> „[Das Higgsfeld] interagiert mit den Quarks [gibt denen Masse] und da ist dann auch das Quarkfeld, weil ein Proton aus drei Quarks besteht.“ (A3.2b)

Auf die Bewegungsenergie geht er selbst nicht ein. Für den Prozess nach der Kollision wird aus Zeitgründen verzichtet, da die erste Erklärung bereits souverän verläuft. Bei der Zusammenfassung wird deutlich, dass der Schüler den Prozess ohnehin auf diese Weise verstanden hat; die Ausführungen findet er plausibel.

10.3.3 Analyse Fall S3_2

Allgemeine und positive Aspekte

Schülerin S3_2 zeigt mit nur einer teilweisen problematischen Kodierung eine fast perfekte und damit die stärkste Performanz der Stichprobe. Sie findet alle Erklärungen sinnvoll, gibt sie inhaltlich adäquat wieder und argumentiert in nahezu allen Erklärungen auch ohne Hilfestellung oder Nachfrage souverän. Sie scheint

die vorgestellten Inhalte insgesamt gut verarbeiten und verstehen zu können. Dies ist auch dadurch bemerkbar, dass sie sich in ihren Erklärungen stets auf die Konzeptideen bezieht und an keiner Stelle auf andere Konzepte zurückgreift. Selbst in Bereich 2.2.2 zur elektromagnetischen Strahlung akzeptiert und verwendet sie die Idee, dass Strahlung Feldenergie trägt und von einem Atom abgestrahlt werden kann ohne Bedenken. Zu Beginn von Bereich 3.1 (Quarkfeld) erwähnt sie, dass es komplizierter werde, sie aber noch folgen könne. Dass sie selbst die schwierigeren abstrakteren Konzeptideen zur modernen Physik auch gut versteht, spiegelt sich in den Aspekten, insbesondere im sicheren Umgang in den Aufgaben wider. Sie fasst die Kernaussage im Rahmen der Paraphrase bereits prägnant und treffend zusammen:

> „Die Energie zwischen den Quarks macht fast die gesamte Masse, die gesamte Energie.“ (P3.1)

Auch beim Übergang zum Higgsfeld akzeptiert sie die Ideen und merkt an, dass es verständlich sei, da es sich um das gleiche Prinzip handle, es gehe nur immer in kleinere Teile (B3.2).

Problematische Aspekte

Bezugspunktproblem
Für den Fall $S3_2$ gibt es nur einen problematischen Aspekt bei der Aufgabe zu Satellit und Erde (A1.2b). Hier schreibt sie die Energie dem „Feld der Erde“ zu anstatt dem Gesamtfeld von Erde und Satellit:

> „Wenn er näher ist, dann nimmt er mehr Energie von dem Feld der Erde auf.“ (A2.1b)

Hier scheint ihr nicht auf Anhieb bewusst zu sein, dass für das Feld zwei Quellen bzw. Felder notwendig sind und es sich um ein Gesamtfeld handelt. Die Argumentation mit dem Feld der Erde könnte von einer Verwendung des Feld-Probekörper-Bildes aus dem Schulunterricht resultieren. Um hier die Rolle des Satelliten bewusst zu machen, sollte ein Hinweis eingeschoben werden, der die Überlagerung zum Gesamtfeld bewusst macht. Da das Problem hier nur im Kontext Gravitationsfeld auftritt, könnte in diesem Zusammenhang auch auf die Gemeinsamkeit zu anderen Feldern hingewiesen werden. Auf die Nachfrage „Steckt die Energie in dem Gesamtfeld oder in dem Feld der Erde?“ antwortet die Schülerin richtig mit dem Gesamtfeld. Auch in der weniger offensichtlichen Aufgabe zum fallenden Ball (A1.3c) argumentiert sie mit zwei Quellen des Feldes. Die Problematik scheint hier also untergeordnet, aber dennoch erwähnenswert zu sein.

Skizze des Gesamtfeldes

Für die Skizze des Gesamtfeldes bei A1.1a beginnt sie zunächst mit der Andeutung der Feldlinien (siehe Abb. 10.1 (b) in Abschn. 10.4.1). Auf Nachfrage überträgt sie aber problemlos die vorgestellte Darstellung auf das Beispiel der beiden Ladungen und beschreibt dies auch angemessen. Die Darstellung für die beiden Magnete wird ausgelassen, begleitet von der Anmerkung ihrerseits, dass dies „genau wie bei den Ladungen“ auszusehen habe (A1.1b).

Offene Aufgabe CERN

Auch die Aufgabe zur Protonen-Kollision beantwortet sie souverän. Sie nennt sowohl für vor als auch nach der Kollision die Beteiligung von Bewegungsenergie sowie die Feldenergie durch das Higgsfeld. Auf die Nachfrage nach einer anderen Energie bei den Nukleonen vor der Kollision fügt sie noch das Quarkfeld hinzu. Dasselbe passiert für den Prozess der Hadronisierung danach: Auf die Frage „Was passiert, wenn sich Quarks zusammenschließen?“ antwortet sie mit der Feldenergie im Quarkfeld; zusätzlich zum Higgsfeld für die Masse der Einzelteilchen.

10.3.4 Analyse Fall S4_2

Allgemeine und positive Aspekte

Die Schülerin zeigt zwar mit einem Performanzwert von 1,70 eher eine schwächere Gesamtleistung, dies liegt aber vornehmlich daran, dass ihr der Bereich 2.2.2 (Thermische Energie) Probleme bereitet. Die meisten Erklärungen findet sie sinnvoll und kann diese auch inhaltlich angemessen wiedergeben. Bis auf die problematischen Aspekte sind auch die Argumentationen in ihren Erklärungen schlüssig und mit den Konzeptideen konform. Dass sie Bereich 2.2.2 (Elektromagnetische Strahlung) nahezu problemlos absolviert, spricht dafür, dass die Probleme in 2.2.2 sowie anfängliche Schwierigkeiten bei Bewertung und Paraphrase von Bereich 3.1 (Quarkfeld) keine generelle, sondern eine bereichsbezogene Problematik darstellen. Besonders bei Fall S4_2 existiert eine sprachliche Barriere. Die Schülerin hat gelegentlich Schwierigkeiten, sich sprachlich angemessen auszudrücken, was aber daran liegt, dass sie Deutsch nicht als Muttersprache spricht. Dies könnte auch ein Grund dafür sein, dass sie zwar versucht, die Felder miteinander in Verbindung zu bringen und die Grundidee erkannt hat, aber auch teilweise an Stellen Felder beschreibt, wo Bewegungen betrachtet werden sollten. Es fällt auf, dass sie teilweise lediglich etwas mehr Zeit benötigt, um die richtige Beschreibung zu finden. Wenn sie eine Idee verstanden hat, wendet sie diese in der Regel korrekt an. Bei

ihrer Einschätzung am Ende des Interviews merkt die Schülerin auch an, dass die Wörter alle sehr gleich seien. Hier haben also die sprachlichen Schwierigkeiten einen Einfluss auf das Lerntempo und entsprechend die Performanz.

Problematische Aspekte

Überlagerung nur bei Anziehung
Bei der Skizze zum Gesamtfeld formuliert die Schülerin die folgende Prämisse: „Bei Abstoßung überlagern sie sich nicht, oder?“ (A1.1a). Hier hat sie offenbar den Teil der Erklärung noch nicht angenommen, dass die Überlagerung zweier Felder unabhängig von deren Abstand sowie Wechselwirkung ist. Nachdem dies infolgedessen richtig gestellt wird, skizziert und beschreibt sie die Überlagerung sowohl für die Ladungen (A1.1a) als auch für die Luftballons (A1.1b) korrekt.

Bezugspunktproblem
Die ersten Aspekte von Bereich 1.3 (Indikatoren für Feldveränderung und Energieübertragung) absolviert die Schülerin souverän und angemessen. Bei der Aufgabe zum fallenden Ball (A1.3c) hingegen hat sie Probleme, das zweite Feld neben dem des Balles zu finden. Auf Nachfrage nach dem Feld schließt sie nämlich erst auf das Feld der Luft. Dies zeigt, dass hier für eine Antwort nach einer Verfügbarkeitsheuristik geantwortet wird und nicht strategisch mit oder Konzeptidee. Auf die Antwort wird die Nachfrage gestellt, ob sie Gemeinsamkeiten mit dem Satelliten-Beispiel sehe. Darauf hin vergleicht sie das Springen des Balles mit der näher-weiter-Bewegung des Satelliten. Durch diese Überlegung gelangt sie dann zum Feld des Bodens bzw. der Erde als zweite Quelle. Dieser Argumentationsverlauf zeigt, dass hier generell ein Hinweis zum Vergleich mit anderen Feldern helfen könnte. Die hier entstehende Verwirrung stellt auch eine Schwierigkeit beim Übergang von offenbaren zu weniger deutlichen Quelle-Feld Konstellationen wie beispielsweise dem Gravitationsfeld von Ball und Erde dar.

Thermische Energie nicht als Bewegungsenergie
Die Schülerin zeigt in Bereich 2.2.1 zur thermischen Energie durchweg eine schwache Performanz, die hauptsächlich auf die Vermischung von thermischer Energie und Feldenergie zurückzuführen ist. Auch, wenn die Zuschreibung der Energie an ein sich veränderndes Feld der Atome bzw. Moleküle in Material und Luft legitim sein kann, so wird in der Instruktion doch nur auf die Verbindung zur Bewegungsenergie eingegangen. Sie vermischt bei der Beschreibung der Energieabgabe beim schwingenden Fadenpendel (P2.2.1) Bewegungsenergie, thermische Energie und Wärme durch einen unangemessenen kausalen Zusammenhang:

> „Die Energie von den Atomen wird zu Bewegungsenergie [...] und durch Wärme wird es bewegt.“ (P2.2.1)

Sie nutzt zwar vermutlich die Ressource „mehr Wärme bedeutet mehr (Teilchen-) Bewegung“, bringt die logische Kette aber durcheinander. Ihr ist an dieser Stelle nicht bewusst, dass Wärme der Energietransfer bzw. das subjektive Empfinden ist und keine Energieform mit Wirkung. Auch bei Aufgabe A2.2.1a zur Kugelbahn versucht sie, die Energie einem Feld zuzuschreiben und nicht etwa der Bewegung der Atome in Material oder Luft. Zwar erkennt sie, dass die Energie in die Bahn und in die Luft übertragen wird, sucht hier aber ein Feld und verknüpft Wärme bzw. thermische Energie nicht mit der Bewegungsenergie der Atome. An dieser Stelle wurde die Antwort als teilweise problematisch kodiert, da streng genommen auch mit der Übertragung in ein Feld argumentiert werden kann. Ausgehend davon überträgt sie die Konzeptidee auch bei Aufgabe A2.2.1b (Erwärmung in der Mikrowelle) nicht. Zwar argumentiert sie nicht mehr mit dem Feld, macht aber einen fachlichen Fehler, indem sie die Bewegung falsch zuordnet: Auf die Frage, warum wir das Gefühl haben, dass die Speise warm wird, kommt sie nicht unmittelbar auf die mikroskopische Bewegung der Atome. Als dann nachgefragt wird, was mit den Atomen in der Speise passiert, argumentiert sie erneut mit einer ad-hoc Antwort, dass die Bewegungsenergie von der Drehung der Platte in der Mikrowelle komme. Ihr wird anschließend die richtige Erklärung geboten, die sie akzeptiert. Dass sie Wärme nicht direkt mit thermischer Energie gleichsetzt, wird auch durch die folgende Äußerung deutlich:

> „[Das] Feld gibt Energie an die Bewegung, dann wird die Energie in Wärme umgewandelt.“ (P2.2.2)

Sie scheint hier den Begriff Wärme als eigenständige Energieform zu verstehen und eventuell auch deshalb über die Umwandlung dieser zu sprechen, weil sie aufgrund mangelnden Überblicksverständnisses auf die traditionellen Energieformen zurückgreift. Dieses Problem scheint von einer fehlenden Vorstellung zu resultieren.

Zusammenhang von Masse und Feldenergie

Zu Beginn von Bereich 3.1 (Quarkfeld) ist der Schülerin noch nicht klar, dass Feldenergie und Masse äquivalent sind. Das macht sich dadurch bemerkbar, dass sie bei der Bewertung B3.1 länger überlegt, aber keinen konkreten Mangel nennt und dann aber bei der Paraphrase folgende Aussage zum Kontext Alpha-Zerfall formuliert:

> „Warum geht Masse verloren? Geht sie dann in das Feld?“ (P3.1)

Das Problem kann teilweise auch auf die sprachliche Barriere und auf das langsamere Lerntempo zurückgeführt werden. Dass die Schülerin nach Aufklärung die Aufgaben souverän löst, bekräftigt diese Vermutung. Die Aussagekraft der Aspekte von Bereich 3.1 von $S4_2$ werden folglich aufgrund des hier speziellen Falls im Rahmen der Queranalyse mit Vorsicht betrachtet.

Weitere Aspekte
Bei Aufgabe A1.2b (Satellitenbewegung) argumentiert die Schülerin angemessen, verspricht sich aber an einer Stelle, indem sie Anziehung mit Abstoßung verwechselt. Hier liegt zwar kein wirkliches Problem vor, aber dies könnte dennoch ein Indiz dafür sein, dass das Beispiel zu stark mit dem vorigen Kontext der Luftballons verwechselt werden kann. Hier muss darauf geachtet werden, dass die Richtung der Wechselwirkung und entsprechend der Energieübertragung in oder aus einem Feld für die einzelnen Felder deutlich unterschieden wird.[2]

Skizze des Gesamtfeldes

Abgesehen von der bereits oben erwähnten Annahme, dass sich die Felder nur bei Anziehung überlagern, skizziert und erläutert die Schülerin die Darstellung ohne Probleme (siehe Abb. 10.1 (c) bzw. (d) in Abschn. 10.4.1). Die angefertigte Zeichnung entspricht sowohl farblich als auch strukturell der vorgegebenen Visualisierung. Die Darstellungsform scheint hier also auf Resonanz zu stoßen.

Offene Aufgabe CERN

Für die Energie vor der Kollision nennt die Schülerin die Bewegungsenergie der Teilchen (Protonen) sowie die Feldenergie aus der Überlagerung bei der Kollision und das elektromagnetische Feld aufgrund der Ladung der Protonen. Auf die Nachfrage, woraus die Protonen bestehen, ergänzt sie auch Quarkfeld und Higgsfeld. Dabei kommt sie von selbst auf die Felder, braucht aber etwas Zeit für die Überlegungen. Für die Situation nach der Kollision gibt sie die Feldenergie des elektromagnetischen Feldes an, der Zusammenhang von Feldenergie und Masse der entstehenden Teilchen ist ihr aber noch nicht ganz klar (in diesem Zusammenhang ist aber auch nicht nach der Masse, sondern nach der Energie gefragt); der Zustand vor der Kollision erscheint ihr einfacher. Hier zeigt sich, dass neben den üblichen naheliegenden Feldern (Quark und Higgs) auch das elektromagnetische Feld aufgrund der Ladung genannt wird. Dies spiegelt auch wider, dass ihr

[2]Die Vermutung ergibt sich daher, dass die Richtung der Energieübertragung bereits bei anderen Fällen problematisch war.

der Bereich zur elektromagnetischen Strahlung besonders plausibel und hilfreich erscheint.

10.3.5 Analyse Fall S5_2

Allgemeine und positive Aspekte

Schülerin S5_2 zeigt mit $P = 1,68$ die schwächste Performanz der Stichprobe. Zwar antwortet sie in den meisten Fällen angemessen und bis auf jeweils einen Aspekt sind auch die Bewertungen und Paraphrasen unproblematisch, allerdings überlegt sie stellenweise lange und braucht Zeit, um die Konzeptideen zu ordnen und richtig anzuwenden. Die Problemstellen liegen hier deutlich bei den Aufgaben; in Bereich 2.1 (Mikrokosmos) ist sie die einzige Schülerin mit Schwierigkeiten. Auffallend ist jedoch, dass sie auch als einzige Schülerin auf die Feder-Analogie zurückgreift, dies aber auch nur in der entsprechenden Paraphrase (P1.1). Die problematischen Aspekte beschränken sich meist auf jeweils eine Aufgabe in den Bereichen, in Bereich 3.1 (Quarkfeld) hat sie keine Probleme.
Besonders fällt in diesem Fall auf, dass die Schülerin hauptsächlich auf den Begriff der Wechselwirkung zurückgreift und auf den Feldbegriff verzichtet, dies jedoch auf meist angemessene Weise. So spricht sie beispielsweise von der „Energie zwischen einander“ im Kontext Wechselwirkung der Atome bei der Explosion des Feuerwerks (A2.1b). Hier antwortet sie auch auf die Frage „Was verändert sich, wenn die Energie frei wird?“ nicht etwa mit dem Feld der Atome sondern damit, dass sich deren Wechselwirkung ändert. Der auffällige Verzicht auf den Feldbegriff spiegelt sich auch bei der Paraphrase zum Higgsfeld (P3.2) wider, bei der sie vorerst über das „Higgs-Modell“ statt über das Feld spricht.

Problematische Aspekte

Bei Schülerin S5_2 treten einige unterschiedliche Problematiken auf, die aber meist auf bereits bekannte zurückgeführt werden können:

Wechselwirkung statt Feldbegriff
Wie bereits beschrieben verwendet die Schülerin meist den Begriff der Wechselwirkung statt des Feldbegriffs. Dieser Verzicht zeigt sich bereits bei der ersten Aufgabe zur Darstellung des Gesamtfeldes (A1.1a). Hier erwähnt sie die „gesamte Wechselwirkung“, nicht aber die Überlagerung oder das Gesamtfeld. Auf die Nachfrage „Was passiert mit den beiden Feldern?“ formuliert sie:

> „Es baut sich ein allgemeines großes Feld auf.“ (A1.1a)

Die Wechselwirkung und deren Richtung bei den sich abstoßenden Ladungen ist auch in der Skizze zu erkennen (siehe Abb. 10.1 (e) bzw. (f)). In ihrer sprachlichen Ausführung geht sie vorerst nicht auf das Gesamtfeld oder die Überlagerung ein, sondern spricht über eine „gesamte Wechselwirkung“. Sie stellt diese aber in ihrer Zeichnung als Feld dar. Bei der nachfolgenden Aufgabe zu den beiden Luftballons (A1.1b) zeichnet sie dann das Gesamtfeld ein und erklärt den Mechanismus zufriedenstellend:

> „[Es gibt] ein großes Feld [...] Das kommt aus den beiden einzelnen Feldern, die sich dann überlagern.“ (A1.1b)

Ein ähnliches Problem entsteht bei A2.1a (Automotor), bei dem sie zwar erkennt, dass die Energie aus dem Treibstoff kommen muss, aber nicht, dass hier mikroskopische Felder involviert sind. Durch eine helfende Nachfrage argumentiert sie dann mit dem Zustand bzw. der Tendenz des Feldes. Insgesamt ist sie unsicher dabei, mit dem Feld zu argumentieren:

> „Verändert sich die Energie der Atome, um die Energie von vorher beizubehalten?“ (A2.1a)

Verwechslung von Gravitationsfeld und Magnetfeld
Die Konzeptideen zur Energie im Gesamtfeld und Energieübertragung (Bereich 1.2) kann die Schülerin gut zusammenfassen und auch auf die erste Aufgabe (A1.2a: Luftballons) übertragen. Bei der Satellitenbewegung (A1.2b) hingegen verwechselt sie das Gravitationsfeld erst mit dem Magnetfeld und schreibt diesem „großen Magnetfeld“ die Energie zu. Nach Aufklärung, dass es um Gravitation gehe, kann sie die Aufgabe dann aber angemessen lösen. Die Verknüpfung mit dem Magnetfeld zu Beginn scheint hier als heuristische Herangehensweise aufgrund der Verfügbarkeit von vorigen Beispielen zu resultieren. Auch wenn es sich hier um kein grundsätzliches Problem des Ansatzes handelt, könnte der anfänglichen Verwirrung hier vorgebeugt werden, indem eine Frage der Art „Warum wird der Satellit schneller?“ integriert wird, um die Aufmerksamkeit zunächst auf die Gravitation zu lenken.

Bezugspunktproblem beim Gravitationsfeld
Bei Aufgabe A1.3c zum fallenden Ball kann sie nicht angemessen argumentieren. Zunächst benennt sie die Hand, aus welcher der Ball fallen gelassen wird, als zweite Quelle des Feldes. Daraufhin wird sofort auf die Verwechslung hingewiesen und sie argumentiert:

> „Die Wechselwirkungsenergie war vorher [oben] nicht so stark.“ (A1.3c)

Es kommt also zu einer Vermischung von Energie und Kraftkonzept, bei dem die Wechselwirkung bei kleinerem Abstand größer wird. Die Diskussion mit der Schülerin zu Paraphrase P1.3 gestaltete sich ausführlich, weswegen die Aufgaben A1.3a (Luftballons) und A1.3b (Satellitenbewegung) nicht überprüft wurden, weshalb hier nur A1.3c analysiert werden kann. Ob die Schülerin also den gleichen Fehler auch bei der vorigen Aufgabe gemacht hätte, bleibt nur zu vermuten. An dieser Stelle kann aber davon ausgegangen werden, dass sie im Kontext Gravitationsfeld nur auf das Kraftkonzept zurückgreift, das im Zusammenhang mit den traditionellen Energieformen steht. Dieses Problem wird dadurch begünstigt, dass sie meist auf den Feldaspekt verzichtet und mit Hilfe der Wechselwirkung argumentiert. Sie merkt am Ende an, dass die Hand für sie eine Rolle spiele, weil sie es so mit potenzieller und kinetischer Energie gelernt habe; ohne Hand und mit Feldern mache es aber mehr Sinn (A1.3c).

Muskelkontraktion unklar
Die Schülerin merkt an, dass sie das Beispiel der Schleuder plausibler findet als das der Muskelkontraktion, dieses sei ihr nicht ganz klar. Das liegt auch daran, dass dieses Beispiel bewusst abstrakt ist, um das Prinzip auch für weniger offensichtliche Kontexte zu verdeutlichen. Nach einer zusätzlichen Erläuterung akzeptiert sie die Idee und kann sie auch in der darauf folgenden Paraphrase angemessen wiedergeben.

Suche nach mikroskopischer Bewegungsenergie schwierig
Im Kontext Mikrowelle (A2.2.1b) argumentiert die Schülerin zunächst wie folgt:

> „Das Essen dreht sich; dadurch wird ihm die Bewegungsenergie zugeführt und daraus wird dann die Wärme.“ (A2.2.1b)

Sie sucht hier offenbar nach einer Bewegung, die dann den Energietransfer bzw. die empfundene Wärme erklärt, greift aber wie $S4_2$ auf die ihr naheliegende Drehung der Platte zurück anstatt auf die mikroskopische Bewegung der Atome der Speise. Auf die Bewegungsenergie der Teilchen kommt sie erst durch eine Hilfestellung. Dies ist insofern verwunderlich als sie die vorherige Aufgabe zur Kugelbahn (A2.2.1a) souverän erklärt und erst hier einen Fehler macht. Grund dafür könnte tatsächlich die fehlende Vorstellung von der Funktionsweise der Mikrowelle sein; die Verbindung zur Teilchenbewegung wird erst auf Nachfrage gezogen.

Rolle des Higgsfeldes unklar
Bei der Bewertung in Bereich 3.2 (Higgsfeld) spricht die Schülerin erst nur über das „Higgs-Modell“ im Zusammenhang mit der Wechselwirkung nicht über das Higgsfeld:

> „Die Masse kommt aus der Wechselwirkung der Elektronen mit den Quarks durch das Higgs-Modell?“ (P3.2)

Den Prozess der Paarbildung kann sie zwar adäquat wiedergeben, beim umgekehrten Prozess der Annihilation bei A3.2a hat sie aber Schwierigkeiten:

I: Was für eine Energie haben die beiden Teilchen?
$S5_2$: Reibungsenergie?
[...]
I: Wenn ich am Anfang die Massenenergie habe; was für eine Energie ist das, wo kommt die her?
$S5_2$: Das ist die Energie, die durch die Teilchen und das Higgsfeld entstanden ist.

Insgesamt scheint sie das Prinzip nach einer gewissen Zeit zu verstehen, dies macht sich auch in der letzten Aufgabe A3.2b (CERN) bemerkbar. Allerdings scheint ihr hier zur Rolle des Higgsfeldes noch nicht klar zu sein, dass die Elementarteilchen durch die Wechselwirkung mit dem Feld ihre Energie, also ihre Masse, erhalten. Bei A3.2 greift sie zwar auf das Quarkfeld zurück, aber scheinbar nur ungern, da sie es nur auf Nachfrage nennt.

Insgesamt ist die erste Problematik sehr dominant, bei der die Schülerin generell den Begriff und das Konzept des Feldes durch die Wechselwirkung ersetzt, was aber manche Erklärungen erschwert, insbesondere wenn es um die Identifikation der Feldenergie mit Masse geht. Dieser zentrale Umstand sorgt dann in weiterer Konsequenz auch für begleitende Probleme.

Skizze des Gesamtfeldes

Die Skizze kann generell als adäquat eingeschätzt werden. Die Problematik, dass hier verbal nur die Wechselwirkung, aber nicht das Feld erläutert wird, wurde bereits bei den problematischen Aspekten erläutert.

Offene Aufgabe CERN

Die offene Frage zur Protonen-Kollision beantwortet sie souverän. Hier nennt sie für den Zustand vor der Kollision die Bewegungsenergie, die elektromagnetische

Energie sowie die Energie von der Zusammenwirkung mit dem Higgsfeld. Auf das Quarkfeld geht sie allerdings auch auf Nachfrage nicht ein. Dies ist insofern verwunderlich als sie diese Konzeptidee (Bereich 3.1) problemlos durchlaufen hat. Auch hier spiegelt sich wider, dass die Schülerin ungern auf den Feldbegriff zurückgreift. Für die Argumentation nach der Kollision muss nachgefragt werden, hier antwortet sie erst spät mit der „Energie durch die Wechselwirkung unter den Quarks“ (A3.2b).

10.3.6 Analyse Fall S6_2

Allgemeine und positive Aspekte

Die Schülerin ist mit einer Performanz von 1,69 eine der drei schwächeren Schüler*innen, was aber vornehmlich an den hinteren Bereichen zu thermischer Energie (2.2.1) und zur modernen Physik liegt. Generell akzeptiert sie fast alle Ideen, auch wenn sie diese nicht immer sofort umsetzen kann. Neben kleineren sprachlichen Schwierigkeiten fallen ihr manche Aufgaben schwer, die sie aber mit etwas Zeit bzw. mit kurzer Hilfestellung lösen kann. Insgesamt kann sie gut folgen. Dennoch fällt auf, dass die Aufmerksamkeit stellenweise nachlässt, was ggf. an der Länge des Interviews, vermutlich aber auch an gelegentlichen Störungen liegt (z. B. durch Personen, die den Raum der Schülerin betreten). Dies macht sich insbesondere in Bereich 2.2.1 (Thermische Energie) bemerkbar, da sie dort selbst einfache Erklärungen nicht wiedergeben kann. Bis zu diesem Bereich verläuft die Performanz in den ersten vier Bereichen (mit Ausnahme von A1.2b: Satellit und Erde; Energieübertragung) problemlos, was dafür spricht, dass sie das Grundprinzip und die Kernideen des EFA akzeptiert und auch übertragen kann.

Problematische Aspekte

Bezugspunktproblem und traditioneller Ansatz beim Gravitationsfeld
Bei Aufgabe A1.2b (Satellit und Erde) spricht die Schülerin zunächst über die Felder von Erde und Satellit, schreibt die Energie aber dem Satelliten zu. Hier denkt sie offenbar noch nicht an das Gesamtfeld als Energieträger, sondern bezieht sich auf das traditionelle Bild, in dem der Satellit als Objekt im Schwerefeld der Erde selbst die (potenzielle) Energie trägt. Ähnlich deutet sich das Problem auch bei A1.3c (Fallender Ball) an, wenn die Schülerin zuerst nur an das Gravitationsfeld der Erde denkt; die Argumentation ist dort aber letztendlich richtig. Als Hilfestellung wird ihr für Aufgabe A1.2b der Vergleich mit den beiden Magnetwägen und Luftballons nahegelegt, woraufhin sie richtig argumentiert:

> „Also es [i. e. die Energie] war im Feld und jedes Mal, wenn sich der Satellit nähert, dann wird sie in Bewegungsenergie umgewandelt.“ (A1.2b)

Um die Argumentation hier zu erleichtern, bietet sich eine Hilfestellung bzw. ein Hinweis an, um die Präsenz und Relevanz des Gesamtfeldes auch für die Gravitation bewusst zu machen.

Thermische Energie als Feldenergie
Ähnlich zu einem vorigen Fall verbindet die Schülerin die thermische Energie mit der Energie in mikroskopischen Feldern anstatt mit Bewegung. Dies zeigt sich bereits bei der Paraphrase (P2.2.1) im Kontext Fadenpendel:

> „Der Ball hat selbst ein Feld und dieses überlagert sich mit den Atomen in der Luft.“ (P2.2.1)

Auf die Nachfrage, wo die Energie dann insgesamt „hingegangen“ sei, antwortet sie mit dem Feld der Halterung. Hier wird die mikroskopische Bewegung der Atome vernachlässigt bzw. übersehen. Bei Aufgabe A2.2.1a (Kugelbahn) ergibt sich dasselbe Problem. Auch hier sucht sie nach einem Feld, welches dadurch erzeugt werde, dass der Ball rollt:

> „In dem elektrischen Feld [durch die Wechselwirkung von Ball und Bahn/Luft]?“

Nachdem diese Erklärung zu keinem sinnvollen Ergebnis führt, gibt sie zu: „Ich glaube ich habe es doch nicht so gut verstanden.“ Trotz Aufklärung verfällt sie aber auch in der nachfolgenden Aufgabe A2.2.1b (Erwärmung in der Mikrowelle) wieder in das gleiche Muster und versucht, die Energieübertragung damit zu erklären, dass sich die Atome „rekonstruieren“ bzw. „verändern“ (A2.2.1b). Auf die Nachfrage „Was ist das, was wir dann als Wärme merken?“ antwortet sie schließlich richtig:

> „Die mikroskopischen Bewegungen sorgen dafür, dass es wärmer wird.“ (A2.2.1b)

Am Ende dieses schwierigen Bereichs sagt sie: „Immer, wenn Sie etwas fragen, denke ich an magnetisches und elektrisches Feld; an die vorigen Beispiele.“

Fehlende Verknüpfung von Feldenergie und Masse
Sowohl bei der Bewertung als auch bei der Paraphrase zu Bereich 3.1 (Quarkfeld) zeigt sich, dass der Schülerin der Zusammenhang von Feldenergie und Masse noch nicht klar ist. So fragt sie bei B3.1 zum Kontext Alpha-Zerfall, warum der Anfangskern Masse verliere. Die vorgestellte Erklärung begründet dies mit der Tatsache, dass der Heliumkern Bewegungsenergie besitzt, die vorher nicht vorhanden war und aus dem Anfangskern freigesetzt wurde. Die übertragene Feldenergie macht sich als Massendifferenz bemerkbar. Dies ist der Schülerin an dieser Stelle noch nicht klar. Das gleiche Problem zeigt sich bei der Paraphrase P3.1, in der sie zwar den Aufbau der Materie korrekt beschreibt, den Zusammenhang mit der Masse aber auslässt. Hier scheint die Erklärung zu viele neue Begriffe zu enthalten, denn sie hat anfangs auch Schwierigkeiten, diese richtig zu wiederholen. So spricht sie von „Nikluin“ oder „Nikleon“ statt Nukleon. Das Problem tritt später auch beim „Hexelion“ (eigentlich Higgsfeld) auf. Im Anschluss an eine erneute Zusammenfassung der Erklärung ist sie allerdings in der Lage, die beiden Aufgaben souverän zu beantworten. Hier scheint also der Umfang der Erklärung ein Problem zu sein.

Rolle des Higgsfeldes unklar
Das Problem bei Aufgabe A3.1a (Annihilation bei der PET) ist ähnlich. Auch hier hat sie Schwierigkeiten, die Rolle des Higgsfeldes einzuordnen und greift stattdessen auf das elektromagnetische und das Feld der Luft zurück. Die Schülerin wirkt hier bereits ermüdet und verwechselt Aspekte des Higgsfeldes mit Aspekten des Quarkfeldes. Für die letzte Aufgabe kann sie sich noch einmal konzentrieren. Die Antwort lässt vermuten, dass es sich bei dem Grund für die Probleme auch um ein Aufmerksamkeitstief handelt, das auch mit der Länge des Interviews und den gelegentlichen Störungen zusammenhängen könnte.

Skizze des Gesamtfeldes

Die Darstellung des Gesamtfeldes für A1.1a (Ladungen) und A1.1b (Luftballons) erstellt die Schülerin problemlos (siehe Abb. 10.1 (g) bzw. (h) in Abschn. 10.4.1). Sie merkt bei den Luftballons an, dass sie es hier bereits sinnvoll finde, dass elektrisches und magnetisches Feld gleichermaßen behandelt werden (A1.1b).

Offene Aufgabe CERN

Für die Energie vor der Kollision nennt die Schülerin die Bewegungsenergie, die „Wechselwirkung zwischen den Quarks und dem Higgsfeld“ sowie die „Wechselwirkung zwischen den Quarks selbst“ (die Masse; A3.2b). Hier fällt auf, dass sie

nicht mehr auf den Feldbegriff, sondern stattdessen auf die Wechselwirkung eingeht. Der Grund dafür ist unklar, die Ausführungen sind aber richtig. Für die Situation nach der Kollision geht sie auf elektromagnetische Strahlung sowie die „Masse in Form von Quarks in Wechselwirkung mit dem Higgsfeld“ ein.

10.3.7 Analyse Fall $S7_2$

Allgemeine und positive Aspekte

Schülerin $S7_2$ zeigt mit $P = 1,84$ eine der besseren Performanzen. Dies spiegelt wider, dass sie alle Ideen als plausibel bewertet und auch (bis auf P3.1: Quarkfeld) fehlerfrei paraphrasieren kann. Bei den Aufgaben braucht sie (insbesondere bei er elektromagnetischen Strahlung, A2.2.2a: Laser) teilweise etwas Hilfe bzw. eine unterstützende Nachfrage; am Ende argumentiert sie bei den Aufgaben aber stets richtig. Die einzige Problemstelle ist auch hier wieder der Kontext Gravitationsfeld, was sich an der nur teilweise angemessenen Beschreibung bei den Aufgaben A1.2b (Satellit und Erde; Energieübertragung) und A1.3c (Fallender Ball) zeigt.

Problematische Aspekte

Bezugspunktproblem beim Gravitationsfeld
Die Performanz über die ersten Aspekte von $S7_2$ verlaufen problemlos. Bei Aufgabe A1.2b (Satellit und Erde) im Bereich zur Energie im Gesamtfeld und Energieübertragung tritt jedoch das Bezugspunktproblem auf. Hier spricht die Schülerin zwar über die Anziehung durch die Massen, greift aber nicht auf den Feldaspekt zurück (A1.2b):

I: Wo ist die Energie, wenn der Satellit noch weiter weg ist?
$S7_2$: Sie ist grundsätzlich bereits in den Massen enthalten.
I: Wo meinst du ist denn die Energie, wenn du das hier mit den beiden anderen Beispielen vergleichst?
$S7_2$: An der Oberfläche? [...] Das heißt je kleiner das Feld geworden ist, umso schneller wird der Satellit dann um die Erde?

Das bedeutet, es wird zunächst eher nach dem traditionellen Bild argumentiert, in dem die Energie den Objekten selbst zugeordnet wird. Ähnlich sieht die Argumentation bei Aufgabe A1.3c (Fallender Ball) aus. Hier wird die Energie einerseits den Objekten, andererseits aber auch dem Feld zugeschrieben:

> „Sie [i. e. die Energie] war in den Objekten, aber dadurch, dass der Ball fällt, ist er ins Feld gekommen.“ (A1.3c)

Hier wird also nicht nur den Objekten die Energie zugeschrieben, sondern auch das Gravitationsfeld der Erde als alleiniges und einzelnes bzw. begrenztes Feld aufgefasst. Auf die Änderung der Bewegungsenergie wird hier nicht eingegangen. Dies zeigt, dass der Kontext der Gravitation aus Sicht der Schülerin nicht analog zu den anderen Feldern zu beschreiben ist, denn den Fall einer anziehenden Konstellation fasst sie bereits bei P1.3 in eigenen Worten zusammen. Die Übertragung der Konzeptideen zum Gravitationsfeld scheint der Schülerin hier aber nicht hilfreicher zu sein als der Rückgriff auf den traditionellen Ansatz.

Elektromagnetische Strahlung als Bewegungsenergie
Auch das Problem, dass der elektromagnetischen Strahlung Bewegungsenergie zugeordnet wird, tritt hier auf. In diesem Fall spricht die Schülerin von der Bewegung des Strahls. (A2.2.2a: Laser) Hier muss aber dazu erwähnt werden, dass die Schülerin zwar erst davon ausgeht, dass der Strahl Elektronen in sich tragen müsse, aber auch nach Aufklärung an der Bewegungsenergie festhält. Hier bleibt sie also in dem Bild, dass Strahlung Bewegungsenergie trägt, weil sie sich fortbewegt.:

$S7_2$: [Der Strahl muss] Elektronen in sich haben.
I: Was hat Licht für eine Energie?
$S7_2$: Bewegung, weil Licht eine Geschwindigkeit hat?
I: Was hatten wir gesagt hat Strahlung für eine Energie?
$S7_2$: Strahlung war Bewegungsenergie.

Fehlende Verknüpfung von Feldenergie und Masse
Da die Schülerin den Bereich zum Quarkfeld (3.1) generell einwandfrei löst, handelt es sich hier um ein sekundäres Problem, dennoch sei es erwähnt: Wie bereits bei anderen Fällen beobachtet, erwähnt sie bei der Paraphrase P3.1 nicht den Zusammenhang mit der Masse, dies kann aber auch daran liegen, dass ihr der Aspekt zu eindeutig erscheint. Denn bei den umliegenden Aspekten sowie im nachfolgenden Bereich zum Higgsfeld (3.2) argumentiert sie angemessen.

Skizze des Gesamtfeldes

Aus technischen Gründen konnte die Skizze nicht angefertigt werden, deshalb wurde auf eine verbale Beschreibung zurückgegriffen. In dieser beschreibt die Schülerin sowohl die Entstehung bzw. Darstellung des elektrischen Gesamtfeldes der Ladungen als auch der Luftballons treffend. Hier spricht sie zunächst in der Paraphrase davon, dass die Quellen ein „größeres Feld“ um sich bilden (P1.1) und formuliert folgendes für die erste Skizze:

> „Man hat ein Feld um jeden dieser Punkte, und um die beiden gibt es eine Eklipse [sic], das ist der Bereich, wo sie sich überlagern würden und dann gibt es ein Gesamtfeld über beide Punkte.“ (A1.1a)

Da diese Beschreibung die vorgestellte Darstellungsweise abbildet, wird sie als angemessen kodiert. Für den Fall der beiden Luftballons (A1.1b) fügt sie hinzu:

> „Das Prinzip wäre das Gleiche: Jeder der Luftballons haben [sic] einen Kreis und daraus ergibt sich das Gesamtfeld.“ (A1.1b)

Ihre Äußerungen sprechen für die Akzeptanz der Darstellung des Gesamtfeldes.

Offene Aufgabe CERN

Für den Zustand vor der Kollision beschreibt die Schülerin zuerst die Energie durch das Higgsfeld. Auf Nachfrage zu weiteren Energien nennt sie dann konkreter das Higgsfeld für die Masse der einzelnen Quarks und auch das Quarkfeld. Die Situation nach der Kollision wird mittels Bewegungsenergie der neuen Teilchen und dem elektromagnetischen Feld aufgrund der Ladung der Protonen beschrieben. Auf Nachfrage nennt sie auch das Higgsfeld und auf die Frage „Wo steckt die Energie, wenn sich Quarks zusammenschließen?“ folgt „Im Gesamtfeld der Quarks“ (A3.2b).

10.4 Queranalyse

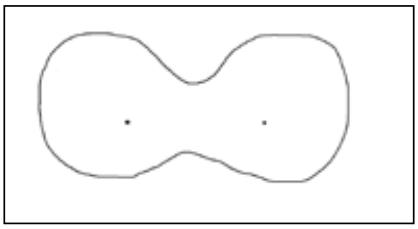
Ausgehend von der Längsanalyse werden nun zunächst die über den Ersteindruck hinaus unproblematischen Aspekte integrativ beleuchtet. Weiters folgt die Interpretation der Beobachtungsfragen hinsichtlich der Forschungsfrage. Anschließend werden die Fälle mit ihren Problematiken zusammengeführt und daraus ein gemeinsamer Überarbeitungsvorschlag erstellt. Das Kapitel schließt mit einem Vergleich mit den Ergebnissen der ersten Runde und einem Resümee der Erkenntnisse.

10.4.1 Unproblematische Aspekte

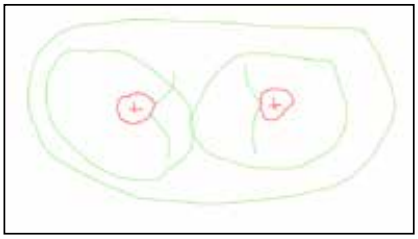
Positiv aufgefallen sind insbesondere die Aufgaben zur Darstellung des Gesamtfeldes (A1.1a und A1.1b in Bereich 1.1) und die offene Aufgabe zur Protonen-Kollision am CERN (A3.2b).

Darstellung des Gesamtfeldes

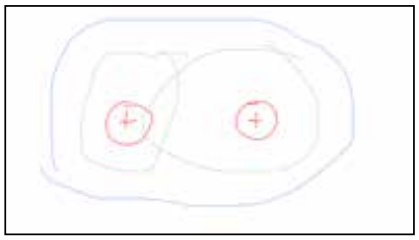
Bei den Darstellungen des Gesamtfeldes wurden von fünf der sieben Schüler*innen Skizzen erstellt (siehe Abb. 10.1). Die anderen beiden ($S1_2$ und $S7_2$) mussten auf verbale Erklärungen zurückgreifen. Alle Darstellungen waren inklusive der zugehörigen Erläuterungen angemessen, bei $S4_2$ und $S5_2$ gab es in der Erklärung hingegen leichte Unstimmigkeiten.



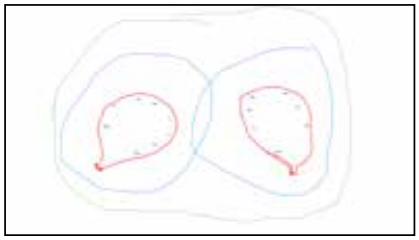
(a) Gesamtfeld Ladungen $S2_2$



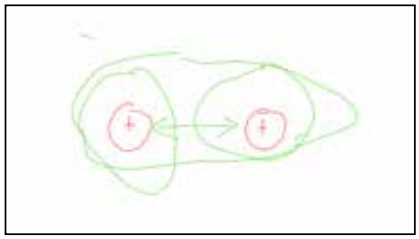
(b) Gesamtfeld Ladungen $S3_2$



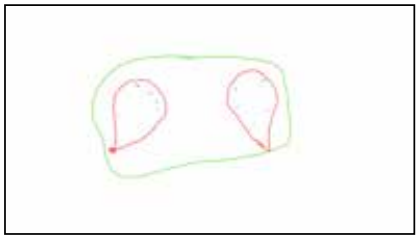
(c) Gesamtfeld Ladungen $S4_2$



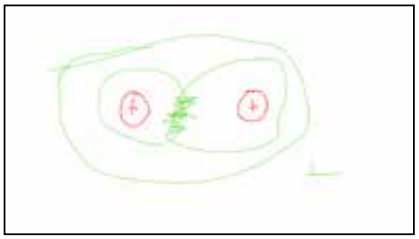
(d) Gesamtfeld Luftballons $S4_2$



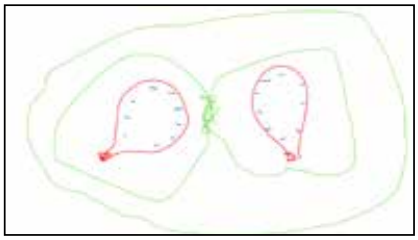
(e) Gesamtfeld Ladungen $S5_2$



(f) Gesamtfeld Luftballons $S5_2$



(g) Gesamtfeld Ladungen $S6_2$



(h) Gesamtfeld Luftballons $S6_2$

Abbildung 10.1: Skizzen für das Gesamtfeld von Ladungen (A1.1a) bzw. elektrostatisch aufgeladene Luftballons (A1.1b). Die Skizze für $S2_2$ wurde rekonstruiert.

$S4_2$ spricht zunächst fälschlicherweise davon, dass sich die Felder nur bei Abstoßung überlagern, $S5_2$ spricht vorerst nur über die Wechselwirkung und nicht über das Feld. Wenn man die Skizzen mit den zugehörigen Beschreibungen betrachtet, so erscheinen alle (mit den beiden vorigen Einschränkungen) adäquat. Teilweise wird auch die farbliche Gestaltung (Einzelfelder in Rot, Gesamtfeld in Blau) übernommen ($S4_2$). Bei der Skizze bzw. Beschreibung der Folgeaufgabe zu den beiden Luftballons (A1.1b) können alle Antworten als angemessen eingestuft werden. Bemerkenswert ist hier, dass die Schüler*innen an dieser Stelle lediglich die Information erhalten, dass die Luftballons gerieben werden und sich dadurch elektrostatisch aufladen. Dass sich in diesem Kontext ein makroskopisches elektrisches Feld für mehrere Ladungen genauso darstellen lässt wie das Feld einzelner Ladungen, wurde nicht thematisiert; die Schüler*innen schlussfolgern dies aber alle selbst.
Insgesamt stößt die Darstellung auf hohe Akzeptanz, was auch an der fehlerfreien Kodierung von Bewertung und Paraphrase erkennbar ist. Ebenso plausibel erscheint den Schüler*innen die Anwendung für andere Quellen. Auch die Übertragbarkeit des Schemas unabhängig von der Art der Quelle (Magnete, Massen, Ladungen) scheint den Schüler*innen keine Schwierigkeiten zu bereiten. Dass die Darstellungsform an sich sowohl pragmatisch vereinfachend als auch bereichsübergreifend für die Vorstellung von Feldern hilfreich sein kann, wird auch am Beispiel von $S1_2$ deutlich, als der Schüler bei A3.2 über „kleine Higgsfelder“ spricht.
Auch wenn diese Formulierung für das Higgsfeld ungeeignet ist, so zeigt dies doch die Tendenz zur Übertragung auf andere Felder, was insofern für den Nutzen der Darstellung und der damit verbundenen Vorstellung spricht, als der Schüler hier eine allgemeine „Masche“ (wie auch in der Einschätzung von $S7_2$ erwähnt, s. u.) als erstrebenswert erachtet. Darüber hinaus verlaufen die Aspekte in den Bereichen 1.1 (Gesamtfeld), 1.2 (Energie im Gesamtfeld und Energieübertragung) und die Vorstellung von den anderen (insbesondere auch den mikroskopischen) Feldern durchweg problemlos, was die Feld-Vorstellung angeht. Die in Bereich 1.1 gebotene Visualisierung des an sich abstrakten Feld-Konzeptes scheint also durchaus eine Hilfestellung für das Verständnis und die Argumentation der Schüler*innen zu sein.

Offene Aufgabe CERN

Die offene Aufgabe zur Protonen-Kollision am CERN dient der Identifikation der für die Schüler*innen naheliegenden Energien und Felder. Hier sind bis auf Schülerin $S5_2$ alle Antworten hinreichend angemessen und ausführlich. Die naheliegendsten Felder sind hier Quark- und Higgsfeld, da diese den Kontext Teilchenphysik

einleiten. Alle Schüler*innen nennen das Higgsfeld als Teil-Ursache für die Energie vor der Kollision, fünf von sieben übertragen dies auch explizit auf die Situation nach der Kollision. Teilweise muss hier etwas nachgefragt werden, dies liegt aber hauptsächlich daran, dass der Prozess abstrakt und ungewohnt ist. Das Quarkfeld wird auf Nachfrage auch in fast allen Fällen genannt. Für den Zustand nach der Kollision werden die Schüler*innen auch gefragt, wo man die Energie im Falle einer Hadronisierung (Quarks schließen sich zusammen) findet. Auch hier kommen einige auf die Energie des dabei entstehenden Quarkfeldes. Dies ist insofern bemerkenswert, als dieser Prozess nicht trivial ist, mit der Erklärung der Energie durch das Feld bzw. die Wechselwirkung bei Zusammenschluss aber Quarks aber für manche Schüler*innen eine schlüssige Beschreibung darstellt. Es ist also möglich, auch kompliziertere teilchenphysikalische Prozesse mit Hilfe der eingeführten Felder zu motivieren.
Zusätzlich zur Energie als Masse ist auch die Bewegungsenergie der Protonen naheliegend. Diese wird von vier Schüler*innen genannt, hauptsächlich vor der Kollision. Neben der Bewegungsenergie wird noch die Energie des elektromagnetischen Feldes genannt, das aufgrund der Ladung und Bewegung der Protonen entsteht. Diese wird in drei Fällen genannt und ist zwar für den Ablauf des Prozesses nicht ausschlaggebend, aber hinsichtlich der Erzeugungs- und Annihilationsprozesse aus dem vorigen Kontext für einige Schüler*innen offenbar naheliegend. Zu dieser Aufgabe kann man zusammenfassen, dass die Schüler*innen die Konzeptideen insgesamt gut auf offene Fragestellungen übertragen können, wenngleich sie stellenweise etwas Unterstützung bei der Suche brauchen.

Einschätzung der Plausibilität der Feld-Attribute

In der zweiten Version werden die trivialen Aspekte zu den Feld-Attributen (Unsichtbarkeit, Unantastbarkeit, Ausdehnung) nicht explizit über eine Bewertung hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft. Hier zeigen sich diesbezüglich aber auch keine Probleme. Gerade in Bereich 1.1 (Gesamtfeld) scheinen die Attribute keine Schwierigkeiten zu bereiten und werden scheinbar auch problemlos übernommen. Dies erkennt man auch daran, dass bei den Darstellungen zum Gesamtfeld teilweise explizit über die theoretisch unendliche (aber nicht darstellbare) Ausdehnung des Feldes gesprochen wird. Insofern scheint es eine angemessene Reduktion gewesen zu sein, hier auf eine explizite Bewertung zu verzichten.

Problem	Schüler*innen						
	$S1_2$	$S2_2$	$S3_2$	$S4_2$	$S5_2$	$S6_2$	$S7_2$
Bezugspunktproblem		✗	✗	✗	✗	✗	✗
Thermische Energie als Feldenergie				✗	✗	✗	
Elektromagnetische Strahlung als Bewegung	✗	✗					✗
Rolle des Higgsfeldes unklar	✗				✗	✗	
Zusammenhang Masse & Feldenergie unklar				✗		✗	✗
Falsche Richtung der Energieübertragung	✗			✗			
Nachfrage Photon	✗	✗					

Tabelle 10.3: Zusammenstellung der Problematik der Schüler*innen der zweiten Runde von Akzeptanzbefragungen; sortiert nach der Häufigkeit des jeweiligen Problems. Ein Kreuz (✗) markiert das Auftreten eines Problems.

10.4.2 Zusammenführung problematischer Bereiche und Aspekte

Aufgaben A1.2b und A1.3c

Betrachtet man die Kodiertafel (Tab. 10.2 in Abschn. 10.2), fallen in den sonst unproble matischen Bereichen 1.1, 1.2 und 1.3 zwei Aspekte (A1.2b: Satellit und Erde; A1.3c: Fallender Ball) auf, welche fast allen Schüler*innen Schwierigkeiten bereiten. Betrachtet man Tabelle 10.3, in der die auftretenden Problematiken fallspezifisch zusammengefasst sind, so wird deutlich, dass der Grund für die Schwierigkeiten bei den beiden Aufgaben hauptsächlich auf das Bezugspunktproblem zurückgeführt werden kann. Hier wird bei beiden Aufgaben oft nur über das Feld des Balles oder der Erde bzw. des Satelliten gesprochen, nicht aber über das Gesamtfeld. Bei der weniger offensichtlichen Quelle-Feld-Konstellation des fallenden Balles ist dies verständlich, bei der Bewegung des Satelliten jedoch erstaunlich. Denn obwohl das System von Erde und Satellit als entferntes und von der täglichen Vorstellung entrücktes Szenario eigentlich hinreichend genug von den alltäglichen Phänomenen der Gravitation abgegrenzt sein sollte, wird hier dennoch teilweise auf die Feld-Ideen verzichtet. Die Auswirkungen sind dann unterschiedlich. So wird zwar in manchen Fällen ein zweites Feld für die Überlagerung gesucht, aber beispielsweise das „Feld der Luft“ gewählt ($S4_2$) oder ohnehin nur über das Feld der Erde gesprochen. In diesem Zusammenhang kommt es auch vor, dass überhaupt nicht über Felder, sondern über Kräfte ($S2_2$, $S5_2$) oder traditionelle Energieformen gesprochen wird ($S6_2$, $S7_2$).

Im weiteren Zusammenhang mit den beiden Aufgaben steht der Kontext der Gravitation. Hier fällt auf, dass sich das Bezugspunktproblem nur bei Aspekten zeigt, bei denen das Gravitationsfeld involviert ist. Dieser Umstand wird im Rahmen der Analyse nachvollziehbar, denn der Kontext Gravitation ist ein in der Schule, d. h. nach dem traditionellen Ansatz, unterrichtetes Thema zur Umwandlung potenzieller und kinetischer Energie. Hier spielt insbesondere auch die Gravitationskraft eine zentrale Rolle, indem sie als Ursache für das Fallen des Balles oder die Bewegung des Satelliten fungiert. Das bedeutet, es ist naheliegend, dass die Schüler*innen hier wahrscheinlicher auf diese Konzepte zurückgreifen als es für die anderen Felder der Fall ist. Diese Vermutung wird durch die Beobachtungen der Längsanalyse gestützt. Um diese Problematik also zu umgehen, ist es notwendig, die Rolle des Feldes und insbesondere des Gesamtfeldes im Kontext der Gravitation besonders explizit aufzuzeigen. Dass es für einige Schüler*innen nicht einfach ist, die Konzeptideen auf das Gravitationsfeld zu übertragen, wird auch dadurch deutlich, dass die Richtung der Energieübertragung beim Prozess von A1.2b (Satellit und Erde) nicht immer richtig erkannt wird. So verwechseln die Schüler*innen $S1_2$ und $S4_2$ ein sich ausdehnendes Feld mit einer Energieabgabe, obwohl hier der Satellit langsamer wird und Energie in das Feld transferiert werden muss. Die richtige Zuordnung ist hier auch deshalb noch schwierig, weil die Indikatoren für Energieabgabe und -aufnahme erst in Bereich 1.3 erklärt werden; die Richtung der Energieübertragung ist bei diesem Beispiel nicht eindeutig genug. Neben diesen Hauptaspekten treten auch kleinere Randprobleme auf, z. B. dass auf die Frage „Woher kommt die zusätzliche Bewegungsenergie des Satelliten?“ mit dem Magnetfeld der Erde geantwortet wird.

Bereich 2.2.2: Thermische Energie

Problematisch ist auch der gesamte Bereich zur thermischen Energie. Hier haben hauptsächlich die Schüler*innen $S4_2$ und $S6_2$ Probleme. Diese Probleme sind, wie sich aus der Längsanalyse ergibt, hauptsächlich die Verwechslung von thermischer Energie mit Energie in einem Feld statt Bewegungsenergie. Dabei wird in den Fällen versucht, ein Feld zu finden, dem die Energie zugeschrieben werden kann. Grund dafür könnte sein, dass die thermische Energie in der Instruktion nur auf mikroskopische Bewegungsenergie zurückgeführt wird, dies aber im Kontrast zur bisherigen logischen Struktur steht, denn bis dorthin wurden die traditionellen Formen auf unterschiedliche Felder zurückgeführt. Auch, wenn die Suche nach einem mikroskopischen Feld grundsätzlich erstrebenswert ist, so soll hier doch ersichtlich werden, dass auch Energieübertragung zu mikroskopischer, also „unsichtbarer“ Bewegungsenergie eine Erklärung für Prozesse sein kann. Oft wird auf

den Hinweis hin, dass hier eine Bewegung relevant sei, die Drehung der Mikrowelle genannt ($S4_2$, $S5_2$). Diese ad-hoc Erklärung ist auch ein Indiz dafür, dass hier die Verknüpfung von thermischer Energie bzw. Wärme und mikroskopischer Bewegung aus der Instruktion noch nicht verstanden wurde.
Über die in der Kodiertafel auffallend problematischen Bereiche hinaus lassen sich weitere Probleme aus der Längsanalyse extrahieren, die hier nun integrativ zusammengefasst werden. Die entsprechenden Häufigkeiten sind der Kodierung (Tabelle 10.2 in Abschn. 10.2) zu entnehmen.

Elektromagnetische Strahlung als Bewegungsenergie

In weniger Fällen problematisch, aber dennoch auffällig zeigt sich das aus der ersten Runde bekannte Problem der Verbindung von elektromagnetischer Strahlung und Bewegungsenergie. Wenngleich fast alle Schüler*innen die Erklärung der Instruktion als plausibel bewerten und auch entsprechend adäquat paraphrasieren, so wird die Strahlung im Rahmen der Aufgaben gelegentlich mit Bewegungsenergie in Verbindung gebracht. Bei den problematischen Fällen $S1_2$, $S2_2$ und $S7_2$ stellt sich heraus, dass hier zwar akzeptiert wird, dass elektromagnetische Strahlung Feldenergie trägt, diese Idee aber in den Aufgaben nicht übernommen wird. Das bedeutet, hier wird dem Laserstrahl oder der Sonnenstrahlung als „sich bewegendes Licht“ Bewegungsenergie zugeschrieben. Dass die Zuschreibung von Bewegungsenergie hier sinnvoller bzw. plausibler wäre, wird auch teilweise explizit formuliert ($S1_2$ und $S2_2$). Dabei wird auch in den Fällen $S1_2$ und $S2_2$ nach dem Zusammenhang mit dem Photon gefragt (E2.2.2 bei $S1_2$, B2.2.2 bei $S2_2$). Dieses scheint den Schüler*innen als sich bewegendes Teilchen-artiges Quant intuitiver Bewegungsenergie statt Feldenergie zu tragen.

Rolle des Higgsfeldes und Zusammenhang von Feldenergie und Masse unklar

Für jeweils drei Schüler*innen scheint die Funktion des Higgsfeldes bzw. die Rolle der Feldenergie als Masse nicht von Anfang an klar zu sein. Erst die erneute Klarstellung (siehe beispielsweise Fall $S1_2$ bzw. Überarbeitungsvorschlag) macht die Rolle deutlich. Bei Schülerin $S5_2$ tritt ein ähnliches Problem auf, denn ihr ist vorerst nicht bewusst, dass Elementarteilchen auch im Ruhezustand eine Energie (durch das Higgsfeld) besitzen. Bei Schülerin $S6_2$ ergeben sich ähnliche Probleme, welche aber auch mit sprachlichen Schwierigkeiten und eingeschränkter Aufmerksamkeit zusammenhängen könnten. Hier ist jedenfalls eine Konkretisierung der Instruktion mit Bezug der Rolle des Higgsfeldes für die Energie und ergo

der Masse von Elementarteilchen notwendig. Bezüglich des Zusammenhangs von Quarkfeld und der Masse von Nukleonen bzw. Kernen fällt auf, dass das Quarkfeld und die Energie zwar meist genannt und verwendet wird, aber nicht immer die Masse. Das bedeutet, dass die Schüler*innen (hier $S4_2$, $S6_2$ und $S7_2$) nicht explizit über den Massendefekt sprechend, wenn es um die Zusammenfassung der Konzeptidee (P3.1) geht.

Weitere weniger relevante Probleme

Neben den bereits beleuchteten Problematiken stellen sich in der Längsanalyse mehrere Probleme bei Einzelfällen heraus, die aber keinen konkreten oder speziellen Handlungsbedarf mit sich bringen. So wird beispielsweise von Schüler $S2_2$ an einer Stelle angemerkt, dass unklar sei, inwiefern sich die Interaktion von elektromagnetischer Strahlung mit Materie bei deren Erwärmung gestaltet. Hier könnte man darauf eingehen, dass dafür eine Wechselwirkung statt einer Überlagerung der beiden Felder notwendig ist; diese Anmerkung tritt über den Fall hinaus aber nicht weiter auf. Ein weiteres Problem ist die fast ausschließliche Verwendung des Wechselwirkungs- statt des Feldbegriffs bei Fall $S5_2$. Dies ist zwar nicht immer von Vorteil, in den meisten Fällen aber sowohl sehr von der individuellen Präferenz abhängig als auch aus fachlicher Sicht zu rechtfertigen. Würde diese Problematik bei mehreren Fällen auftreten, könnte man ggf. auf eine geringere Attraktivität des Feldbegriffes schließen. Da es sich hier aber nur um einen Fall handelt, stellt dies ein weniger relevantes Problem dar und wird deshalb bei der Weiterentwicklung nicht berücksichtigt.

10.4.3 Interpretation der Beobachtungsfragen

Die Deutung der Antworten auf die zu Beginn gestellten Beobachtungsfragen kann Aufschluss über die Akzeptanz und Umsetzbarkeit einzelner Aspekte und Ideen des EFA geben. Die Beobachtungsfragen sind, wie bereits in der ersten Runde, als Anreicherung für die Grundlage der qualitativen Analyse zu verstehen und nicht unbedingt mit problematischen Aspekten oder unvollständigen Kodierungen verknüpft. In Tabelle 10.4 sind die Antworten auf die Beobachtungsfragen zusammengefasst:

1. Verzichten die Schüler*innen auf das Kraftkonzept?
2. Verzichten die Schüler*innen auf die Verwendung anderer Konzepte (außer dem Kraft- und Feldkonzept)?

3. Wie gut gelingt den Schüler*innen der Übergang von der makroskopischen zur mikroskopischen Ebene?
4. Wie gut gelingt den Schüler*innen der Übergang von offensichtlichen zu weniger offensichtlichen Quelle-Feld Konstellationen?

Zusätzlich werden für die zweite Version spezifische Beobachtungsfragen gestellt:

5. Wird der Ausdruck „Überlagerung“ bei den Feldern verwendet? Und falls nein, was wird stattdessen verwendet?
6. Wird über das „Gesamtfeld“ gesprochen?
7. Wird der Kraft- oder Wechselwirkungsbegriff verwendet?
8. Welche Indikatoren für die Energieübertragung (aus E1.3: Abstandsänderung, Bewegungsänderung, Feldveränderung) werden verwendet?
9. Wird über den „Willen des Feldes“ bzw. von der aktiven Rolle des Feldes gesprochen?
10. Wird auf das Prinzip der Minimierung der Feldenergie zurückgegriffen?
11. Wird auf die Feder-Analogie zurückgegriffen?
12. Wird auf die Anleitung zur Suche nach Feldern und Bewegung zurückgegriffen?

Widerspiegelung der Problematiken

Einzelne Beobachtungen spiegeln die bereits beschriebenen Problematiken wider. Hier ist beispielsweise erkennbar, dass Schüler*innen Probleme mit dem Übergang von offensichtlichen zu weniger deutlichen Quelle-Feld Konstellationen haben (Frage 4). Statt auf die Konzeptideen greifen sie dann eher auf eine Argumentation mit Kräften (Frage 1) oder anderen Konzepten wie z. B. traditionelle Energieformen (Frage 2) zurück. Dies ist insofern nicht verwunderlich, als die Beantwortung dieser Fragen eine zusätzliche Fundierung für den Befund des Bezugspunktproblems von oben darstellt.

	Beobachtungsfrage		Schüler*innen						
			$S1_2$	$S2_2$	$S3_2$	$S4_2$	$S5_2$	$S6_2$	$S7_2$
Aus dem ersten Zyklus übernommene Beobachtungsfragen									
1	Kein Rückgriff auf das Kraftkonzept anstelle der Konzeptideen		✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
2	Kein Rückgriff auf andere Konzepte anstelle der Konzeptideen		✓	✓	✓	(✗)	(✓)	(✓)	(✗)
3	Übergang von makro- zu mikro-Ebene funktioniert		✓	✓	✓	✓	(✓)	✓	✓
4	Übergang von offensichtlichen zu weniger offensichtlichen Quelle-Feld Konstellationen funktioniert		✓	✗	✓	✗	✗	✓	✗
Spezielle Beobachtungsfragen für den zweiten Zyklus									
5	Ausdruck „Überlagerung“ verwendet		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	Ausdruck „Gesamtfeld“ verwendet		✓	✓	✓	✓	(✗)	✓	✓
7	Kraft- oder Wechselwirkungsbegriff angemessen verwendet	Kraft	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✗
		Wechselwirkung	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✗
8	Indikatoren für Energieübertragung genannt	Abstand	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Bewegung	✓	✓	✓	✓	(✓)	✓	✓
		Feldveränderung	✓	✓	✓	✗	(✓)	✗	✓
9	„Wille des (Gesamt-)Feldes“ bzw. aktive Rolle des Feldes		✓	✓	(✗)	(✗)	(✗)	(✓)	(✓)
10	Prinzip der Minimierung der Feldenergie verwendet		✓	(✗)	-	✗	✓	✓	✓
11	Feder-Analogie verwendet		✗	✗	✗	✗	(✗)	✗	✗
12	Anleitung für die Suche nach Feldern verwendet		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Tabelle 10.4: Beantwortung der Beobachtungsfragen der zweiten Version des EFA. Ein grüner Haken kennzeichnet, dass die Beobachtungsfrage mit „ja“ beantwortet werden kann (z. B. weil ein bestimmter Aspekt erfüllt wird). Ist die Antwort „nein“, ist dies durch ein rotes Kreuz gekennzeichnet. Ein grünes Kreuz bei den Indikatoren bedeutet, dass ein Aspekt nicht genannt wurde, dies aber nicht unbedingt notwendig war. Die Klammer-Schreibweise kennzeichnet ein stellenweises Auftreten, wenn der Aspekt nicht öfter vorkommt.

Positive Aspekte und beliebte Prinzipien

Vielversprechend ist der Übergang von makro- zu mikroskopischen Feldern. Dieser gelingt nicht nur in Bewertung und Paraphrase, sondern auch bei den Aufgaben. Weiters ist zu bemerken, dass von allen Schüler*innen sowohl über die Überlagerung als auch das Gesamtfeld selbst gesprochen wird. Lediglich Schülerin $S5_2$ (Präferenz des Wechselwirkungsbegriffs) greift darauf nur rudimentär zu Beginn der Befragung zurück, alle anderen nutzen das Prinzip wie auch die Versprachlichung durchgehend. Hier wird teilweise abgeändert und über ein „Überlappen“ sowie über ein „gemeinsames Feld“, ein „großes“ Feld, ein „allgemeines Feld“ oder ein „gesamtes Feld“ gesprochen. Inhaltlich entspricht dies aber stets der vorgestellten Konzeptidee. Es fällt auch auf, dass mehrere Schüler*innen explizit davon sprechen, dass Energie im Feld „gespeichert“ ist. Ohne dass diese Formulierung in der Instruktion vorkommt, greifen einige Schüler*innen von selbst auf diesen Begriff zurück. Er scheint sich also nicht nur als naheliegend, sondern auch als nützlich zu erweisen und auch aus Schüler*innen Perspektive mit dem Konzept kompatibel zu sein.
An dieser Stelle kann man also festhalten, dass das Konzept des Gesamtfeldes generell positiv aufgenommen und auch auf Anwendungen gerne übertragen wird. Es fällt auf, dass in fachlich angemessener Weise Kraft und Wechselwirkung als Begriff insgesamt gleichermaßen beliebt sind. Hier stellt sich heraus, dass die Begriffe von ein und dem*r selben Schüler*in aber selten beide gleichermaßen verwendet werden, sondern vielmehr eine Präferenz vorliegt. Dass hier aber keine klare Tendenz zu einem der beiden Begriffe vorliegt, spricht zum einen dafür, dass auch aus Sicht der Schüler*innen keine zwingende Unterscheidung der beiden Termini nötig ist. Weiters wird dadurch deutlich, dass auch in den Instruktionen der Weiterentwicklungen durchaus begrifflich gemischt werden darf, ohne dabei Verwirrung zu erzeugen.

Bei den Indikatoren für die Energieübertragung zeichnet sich ein klarer Favorit ab: Hier gehen alle Schüler*innen auf die Abstandsänderung als augenscheinliches und hilfreiches Kriterium ein. Dieses scheint dann auch aus Sicht der Schüler*innen konsistent im Einklang mit der Bewegungsänderung zu stehen. Die Änderung vom Abstand der Quellen und dem Tempo der entsprechenden Objekte sind also beliebte Indikatoren für die Beschreibung von Phänomenen mit Energieübertragung zwischen Feldern und Bewegungen. Weniger dominant wird auf die Veränderung des Feldes selbst eingegangen. Dies kann damit zusammenhängen, dass hier den tatsächlichen Observablen ein größerer Nutzen beigemessen wird als der Feldveränderung.

Weniger beliebte Prinzipien

Eher unerwartet ist die geringe Resonanz für die aktive Rolle des Feldes. Hier wird nur in vier von sieben Fällen explizit die Rolle des Feldes versprachlicht, also vom „Wille des Feldes“ gesprochen oder davon, dass sich das Feld „zusammenzieht“ bzw. „auseinanderdrückt“. Dennoch wird bei allen Schüler*innen zumindest an einer Stelle (meist im Rahmen der Paraphrase in Bereich 1.3: Indikatoren) eine entsprechende Formulierung verwendet. Es ist also möglich, dass hier die sprachliche Abweichung von der üblicherweise passiv neutralen Formulierung ungewohnt ist und deshalb nicht strikt übernommen wird. Dennoch scheint die Versprachlichung hin zu einer aktiveren Rolle des Gesamtfeldes in der Instruktion – und das macht sich bereits durch die Verwendung des Gesamtfeldes bemerkbar – gemeinsam mit der bildlichen Vorstellung des Gesamtfeldes einen positiven Einfluss auf die Vorstellung zu haben.

Gleiches zeigt sich für die Minimierung der Energie. Auf dieses Prinzip wird nicht von allen Schüler*innen zurückgegriffen, für manche wiederum scheint es eine hilfreiche Argumentationsstütze zu sein, wie sich bereits in der Längsanalyse gezeigt hat. Hier wird oft auch von einer Art Ruheposition ($S1_2$, $S2_2$, $S5_2$) oder Normal-Position ($S6_2$) des Feldes gesprochen, in Anlehnung an die Gleichgewichtsposition der elastischen Schleuder. Von dem in der Instruktion (Bereich 2.1: Mikrokosmos und Bereich 3.1: Quarkfeld) angesprochenen Prinzip der Bindung von Atomen und Kernen in diesem Zusammenhang wird jedoch nicht gesprochen. Dazu muss aber gesagt werden, dass der Rückgriff auf dieses Prinzip an keiner Stelle gefordert war. Hier sollte erwogen werden, ob eine diesbezügliche explizite Überprüfung z. B. im Rahmen einer Paraphrase nützlich wäre. Dazu müsste aber die Instruktion gezielter auf den Aspekt der Bindung von Systemen eingehen und diese gezielt und expliziter mit dem Prinzip der Minimierung der Feldenergie verknüpfen. In diesem Zusammenhang kann es auch von Vorteil sein, über das „Speichern“ von Energie in Feldern zu sprechen, um dann über das Freisetzen der Energie durch einen „Auslöser“ wie z. B. das Loslassen der elastischen Schleuder oder das Anzünden der Feuerwerksrakete diskutieren zu können.

Besonders unvorteilhaft erschienen die Feder-Analogie und der Rückgriff auf die angebotene Anleitung. Beide Ressourcen wurden von keinem*r Schüler*in genutzt und scheinen somit wenig hilfreich für die Bearbeitung von Aufgaben zu sein. Die Feder-Analogie wurde lediglich im Rahmen der Paraphrase von Schülerin $S5_2$ aufgegriffen, in weiterer Folge aber wie bei den anderen Schüler*innen nicht mehr verwendet. Für die Weiterentwicklung wird dieser Teil des Konzeptes aufgrund dieser geringen Resonanz aufgegeben. Gleiches gilt für das Angebot der Anlei-

tung. Hier ist auch anzumerken, dass deren Mehrwert ohnehin nicht besonders hoch gewesen wäre, da die Schüler*innen dieser Runde bei der Suche nach Feldern und Bewegungen im Gegensatz zu denen der ersten Runde wenig Hilfestellung benötigen haben. Auch wenn bei A1.3c (Fallender Ball) das Bezugspunktproblem auftritt, so versuchen einige Schüler*innen dennoch, ein Feld zu finden („Hand“, $S5_2$ oder „Luft“, $S6_2$). Dies spricht auch für die logische Struktur des Interviews. Hier scheint also die Orientierung innerhalb der LLE ausreichend gewesen zu sein, sodass die Schüler*innen nicht nur wussten, worum es gerade geht, sondern stets auf die richtigen Felder schließen. Ausnahme stellt aus den beschriebenen Gründen nur der Bereich zur thermischen Energie dar. Insgesamt ist also die Orientierung durch den Aufbau des Interviews als positiv zu bewerten, was auch durch die positive Beantwortung der Beobachtungsfrage 3 und einige Bemerkungen seitens der Schüler*innen gestützt wird.
Hinsichtlich der Umsetzbarkeit der zweiten Version des EFA kann also integrativ gesagt werden, dass die Konzeptideen grundsätzlich verständlich sowie für die Anwendung hilfreich erscheinen und eine angemessene Grundlage für den Umgang mit dem Konzept der Energie für die Schüler*innen darstellen. Auch wenn sich eine Verallgemeinerung nur schwer rechtfertigen lässt, so scheint die zweite Version doch bereits in breiten Bereichen ein für das Lernen förderliches Modell zu sein.

10.4.4 Einschätzung der Schüler*innen

Am Ende eines jeden Interviews wurden die Schüler*innen wieder gefragt, was sie von dem Ansatz im Allgemeinen halten und wie sie dessen Nutzen im Vergleich mit dem bekannten traditionellen Unterricht einschätzen.
Insgesamt geben alle Schüler*innen positives Feedback. Ähnlich zur ersten Runde finden sie den Ansatz sinnvoll und logisch ($S1_2$, $S2_2$). Einzelne Schüler*innen heben auch explizit hervor, dass sie viel gelernt hätten (z. B. $S6_2$ und $S7_2$) und das Prinzip plausibel und hilfreich finden (vgl. $S3_2$ bis $S7_2$). Von manchen wird der Ansatz sogar ausführlich gelobt. Hier werden insbesondere auch die zahlreichen Beispiele und Bilder sowie deren Alltagsbezug gelobt, explizit werden die Beispiele zu Satellit, fallendem Ball sowie zur Mikrowelle und zum Automotor als anschaulich und hilfreich beschrieben (vgl. $S3_2$ bis $S7_2$).
Im Vergleich zum Schulunterricht wird der Ansatz durchweg als „gut“ bzw. „besser“ bezeichnet. Es wird beispielsweise angemerkt, dass das Konzept anders sei, aber gut erkläre, wie es [i. e. die Physik] vom kleinsten Punkt an zu Stande komme ($S2_2$). Hier wird insbesondere auf den Aufbau des Interviews Bezug genommen, die von makroskopischen zu mikroskopischen Feldern verläuft und letztlich mit dem Higgsfeld als Ursache für die Energie der kleinsten Teilchen schließt.

Schülerin $S7_2$ merkt an, dass der Energieunterricht so mehr Sinn mache, wenn man verstehe, wie sich die Welt aus den Teilchen ergebe. Sie führt auch an, dass es interessant sei, solche komplexen Vorgänge einfach zu erklären, weil es dem Ganzen „eine Art Masche“ und einen Sinn gebe und man sich so ein Bild davon machen könne ($S7_2$). Andere Schüler*innen merken auch an, dass der Ansatz auf diese Weise konsistent mit dem Schulunterricht sei ($S3_2$) und es einfacher als in der Schule sei, weil die Felder zusammenhängen würden ($S6_2$). Eine Schülerin erwähnt, dass es sinnvoll wäre, den Ansatz bereits früher in der Schule zu lernen ($S5_2$). Für die Schüler*innen scheint der generelle Mehrwert des Ansatzes auch hauptsächlich darin zu bestehen, dass man „alles auf Feld- und Bewegungsenergie zurückführen kann“ ($S3_2$) und somit „eine Gemeinsamkeit zwischen den Energieformen“ ($S5_2$) geschaffen werde. Dies wird auch gegen den traditionellen Ansatz in der Schule abgegrenzt, bei dem man „tausende Formeln“ lerne, die sich niemand merke ($S4_2$ und $S1_2$). Der wahrgenommene Mehrwert spiegelt also auch den Kerngedanken des Konzeptes wider.
Zusammenfassend kann man also festhalten, dass alle Schüler*innen den Ansatz sinnvoll, logisch und hilfreich finden und in manchen Fällen sogar dem traditionellen Unterricht vorziehen würden. Besonders die konsistente logische Struktur „vom Großen zum Kleinen“ und die zahlreichen bildlichen Beispiele stoßen auf positive Resonanz. Der stellenweise Wunsch nach einem besseren Überblick in der ersten Runde bleibt hier folglich aus, was für die Sinnhaftigkeit der bisherigen Anpassungen spricht. Für die Weiterentwicklung lässt sich daraus schließen, dass die Grundstruktur des Interviews und auch einige Beispiele beibehalten werden können.

10.4.5 Zusammenführung des Überarbeitungsvorschlages

Auf der Grundlage der obigen Problembeschreibungen wird hier der Überarbeitungsvorschlag zusammengestellt und kurz erläutert.

Bezugspunktproblem und Richtung der Energieübertragung

Das Bezugspunktproblem stellt eines der dominanteren Probleme der zweiten Runde dar. Dieses tritt hauptsächlich im Kontext Gravitation auf, die Ursachen wurden oben erläutert. Um dieses Problem zu adressieren, muss im Kontext Gravitationsfeld (insbesondere bei Aufgabe A1.3c: Fallender Ball) deutlich gemacht werden, dass sich genauso hier – auch wenn es für manche Schüler*innen weniger intuitiv ist – ein Gesamtfeld immer aus der Überlagerung von Einzelfeldern von Quellen (Massen) und zugehöriger Wechselwirkung ergibt. Eine Möglichkeit ist die Ein-

bindung eines sogenannten kognitiven Stoppschildes (vgl. Haagen-Schützenhöfer, 2016; Haagen-Schützenhöfer und Hopf, 2020); eine Art prägnanter Merksatz, der Schüler*innen daran hindert, in alte Muster zurückzufallen. Dies könnte beispielsweise die Aussage „Bedenke, dass Energie immer in einem Gesamtfeld steckt.“ oder „Es geht immer um das Gesamtfeld“ sein. Diese Hilfestellung könnte die Übertragung der Konzeptideen des Gesamtfeldes auf das Gravitationsfeld erleichtern. Diesbezüglich könnte es auch helfen, explizit Gemeinsamkeiten zu den anderen (elektrischen und magnetischen) Feldern aufzubauen.
Was die Richtung der Energieübertragung in ein bzw. aus einem Feld angeht, so muss das Gravitationsfeld besonders explizit herausgestellt werden. Denn im Gegensatz zu anderen Feldern ist dieses ausschließlich anziehend und gibt entsprechend Energie ab, wenn es sich zusammenzieht. Um die Situation offensichtlicher zu gestalten könnte man auch einen asymptotisch freien Satelliten beschreiben, der langsamer wird, wenn er sich von der Erde entfernt.

Elektromagnetische Strahlung

Zum einen sollte bei der dritten Version darauf geachtet werden, die Verwirrung zu vermeiden, dass sich das elektromagnetische Feld der Mikrowelle nur mit dem Feld der Atome überlagert. Dazu sollte hier gezielt formuliert werden, dass die beiden Feldern miteinander interagieren bzw. wechselwirken und dadurch Energie übertragen wird.
Zum anderen muss, da diesbezüglich mehrere Nachfragen gestellt wurden, die elektromagnetische Strahlung als Feld mit Photonen und Lichtstrahlen verknüpft werden. Um die Energie der Strahlung plausibler als Feldenergie zu motivieren und noch deutlicher gegen die Bewegungsenergie abzugrenzen, kann ein Photon als *Paket eines Feldes* bzw. *Energiepaket* beschrieben werden, welches die kleinste Energie-Einheit des elektromagnetischen Feldes darstellt. Gleichzeitig kann man einen Lichtstrahl als räumlich konzentrierte, d. h. gebündelte Feldenergie fassen. Auf diese Weise sollte es auch möglich sein, den Kontext des Lasers (A2.2.2a) mit dem Feld statt mit einem (für einige Schüler*innen naheliegenden) Teilchenstrahl in Verbindung zu bringen und so gegen die Bewegung von Objekten mit Masse und also die Bewegungsenergie abzugrenzen.

Thermische Energie

In der zweiten Runde fällt es einigen Schüler*innen schwer, die thermische Energie mit der mikroskopischen Bewegungsenergie zu identifizieren und Wärme als die übertragenen Energie zu verstehen. Um diese Zusammenhänge zu verdeut-

lichen, muss dieser Themenbereich gegen die anderen Konzeptideen abgegrenzt werden. Denn durch die Einbettung in Bereiche und Aspekte, die eher von Feld-Ideen dominiert sind, entsteht die Gefahr zur Verwechslung bzw. Generalisierung. Hier muss also in der Instruktion zur thermischen Energie bewusst ein logischer Bruch zu den anderen Bereichen vorgenommen werden, ohne dabei aber die eigentliche Grundidee (Es gibt nur Bewegungs- und Feldenergie) aus dem Blick zu verlieren. Darüber hinaus könnte es von Vorteil sein, den Zusammenhang mit der Bewegungsenergie analog zur ersten Version nicht nur mittels Abbildung, sondern wieder ein Video und Feder-Analogie einzubetten.

Rolle des Higgsfeldes

Da in manchen Fällen nicht klar ist, inwiefern das Higgsfeld ausschlaggebend für die Energie von Elementarteilchen ist, muss hier eindeutig formuliert werden, dass dieses für die „Entstehung und Existenz“ der Masse von Elementarteilchen verantwortlich ist. Hier wird die Zusatzerklärung von Fall $S1_2$ in den Fokus gerückt:

> „Die Strahlung verschwindet und es gibt nur noch Masse. Die Masse ist Energie, aber wo steckt die Energie? – Sie hängt mit einem Feld zusammen, denn Bewegung ist es nicht, wenn die Teilchen ruhen. Der Grund für die Masse ist also die Präsenz des Higgsfeldes. Also: Es gibt überhaupt nur Masse wegen des Higgsfeldes.“ (übernommen aus der Zusatzerklärung für Fall $S1_2$)

Verknüpfung von Feldenergie und Masse

Sowohl für das Higgsfeld als auch für Quarkfelder wurde seitens der Schüler*innen gelegentlich zwar über die Energie, nicht aber über die Masse gesprochen, auch wenn dies erforderlich war. Um hier den Zusammenhang der beiden Größen und dessen Relevanz in den Vordergrund zu bringen, sollte für beide Felder mehr auf die Bedeutung des Massendefektes in Prozessen eingegangen werden. Die Äquivalenz von Masse und Energie muss auch bei den beiden Feldern erneut explizit aufgegriffen werden. Nur so kann die logische Struktur verfolgt werden, dass der Grund für die Ruhe-Energie von Elementarteilchen die Wechselwirkung mit dem omnipräsenten (und ohne Quelle das gesamte Universum durchdringende) Higgsfeld ist. Diese Energie entspricht dann der Masse der Teilchen. Hier sollte auch der Gegensatz zu den anderen Feldern zumindest erwähnt werden, um eben diese Omnipräsenz zu rechtfertigen und nicht über „lokale kleine Higgsfelder“ sprechen zu müssen.

Für das Quarkfeld ergibt sich eine ähnliche logische Struktur, nur dass hier die Quarks selbst als Namensgeber und Quellen des Feldes fungieren. Um das Grundprinzip verständlich zu erklären und den Zusammenhang von Feldenergie und Masse ausreichend in den Fokus rücken zu können, sollte die bisherige Instruktion gekürzt werden. Hier wäre es möglich, auf die Motivation über das Phänomen der Gravitationslinse zu verzichten und stattdessen die Energie-Masse-Äquivalenz direkt in die Erklärung des jeweiligen Feldes einzubetten.

Der Überarbeitungsvorschlag gestaltet sich somit wie folgt:

1. *Bezugspunktproblem und Richtung der Energieübertragung* (vornehmlich bei A1.2b und A1.3c): Gravitationsfeld explizit als Überlagerung von zwei Einzelfeldern hervorheben und Hilfestellung bei A1.3c (Fallender Ball) anbieten; repulsive und attraktive Felder voneinander Abgrenzen
2. *Interaktion von elektromagnetischem und atomarem Feld*: Wechselwirkung von elektromagnetischem Feld und dem Feld der Atome erläutern
3. *Thermische Energie*: Thermische Energie stärker mit Bewegungsenergie über Visualisierung verknüpfen
4. *Elektromagnetische Strahlung stärker von Bewegungsenergie abgrenzen*: Photon und Lichtstrahl in Instruktion einbetten
5. *Rolle des Higgsfeldes*: Rolle des Higgsfeldes erläutern
6. *Verknüpfung von Feldenergie und Masse*: Rolle von Higgsfeld und Quarkfeld für die Masse und den Massendefekt hervorheben

10.5 Vergleich zur ersten Runde und Resümee

Generell verbessert sich im Vergleich zur ersten Runde die Gesamt-Performanz der Stichprobe leicht von $P = 1,75$ auf $P = 1,80$ in der zweiten Runde. Dabei fallen zwei spezielle Verbesserungen auf: Zum einen steigen die niedrigsten in der Stichprobe vertretenen Performanzwerte der Schüler*innen von 1,43 und 1,53 der ersten Runde auf 1,68 und 1,69 für die zweite Runde. Zum anderen treten problematische Aspekte nicht gestreut, sondern in Mustern (Clustern) auf, die auch im Rahmen der Queranalyse zu Beginn erläutert wurden. Hier zeigt sich, dass die problematischen Aspekte hauptsächlich bei zwei Aufgaben zur Gravitation (A1.2b und A1.3c) bzw. bei zwei Schüler*innen ($S4_2$ und $S6_2$) kumulieren. Dies spiegelt die beschriebene Beschränkung auf wenige Problematiken im Gegensatz zu verteilten Problemen wider. Die Bewertungen und Paraphrasen stellen sich in der zweiten Runde ähnlich problemlos dar wie in der ersten.

Besonders verbessert hat sich der Bereich zum Gesamtfeld (vorher $P = 1,63$, jetzt 1,93 in Bereich 1 bzw. 1,75 in Bereich 2). Auch wenn hier wegen der ausführlichen Anpassungen kein direkter Vergleich gezogen werden kann, so wird doch deutlich, dass die Erweiterung um eine Visualisierung und die explizite Vorstellung des Gesamtfeldes einen positiven Einfluss auf die Performanz der Schüler*innen hat. Denn sowohl in der Versprachlichung als auch in der Anwendung greifen die Schüler*innen überwiegend souverän auf das Konzept des Gesamtfeldes zurück. Hier scheint die detailliertere Auseinandersetzung mit der Entstehung und Darstellung des Gesamtfeldes zu helfen. In diesem Zusammenhang tritt auch das Bezugspunktproblem der ersten Runde weniger dominant auf. Diese Problematik zeigte sich bereits in der ersten Runde, dort ergab sie sich allerdings als allgemeines Problem, wenn es darum ging, das Konzept des Gesamtfeldes auf Beispiele zu übertragen. In der zweiten Runde zeigt sich dieses Problem nur im Kontext des Gravitationsfeldes, was zumindest eine Verbesserung darstellt. Die Problematik konnte durch die Weiterentwicklung also auf den Kontext Gravitationsfeld eingegrenzt werden.

Der Bereich zur elektromagnetischen Strahlung weist nach wie vor einzelne Probleme auf, wenn es um die Verwechslung von Strahlung und Bewegungsenergie geht. Hier hat die explizitere Abgrenzung als Weiterentwicklung von der ersten Version bereits erste Vorteile gebracht, was an der Akzeptanz der Schüler*innen zu erkennen ist. Dennoch entstehen hier teilweise Verwechslungen, die in einer dritten Version reduziert werden sollen. Als einzige wesentliche Verschlechterung zur ersten Runde erscheint der Bereich zur thermischen Energie. Diese ergab sich in der ersten Runde als wenig problematisch, in der zweiten Runde hingegen schwieriger.

Die neu eingeführten Aspekte zur aktiven Rolle des Feldes („Wille des Feldes“ und Energieminimierung) zeigen keine konkreten Probleme und stoßend weder auf hohe Akzeptanz noch auf Ablehnung. Hier ist eine weitere Beobachtung in der nächsten Runde nötig, um weitere Aussagen über deren Nutzen ziehen zu können. Jedenfalls stellt sich heraus, dass die Tendenz des Gesamtfeldes hilfreich für die Begründung der Richtung der Energieübertragung scheint, sofern die Idee verstanden wird. Hier zeigt sich auch, dass eine hohe Attraktivität und Plausibilität eines Konzeptes notwendig sind, damit Schüler*innen dieses nachhaltig übernehmen.
Die Ideen zu Feder-Analogie und Anleitung für die Suche nach Feldern und Bewegung hingegen erweisen sich als wenig hilfreich und werden deshalb für die nächste Version aus dem Konzept entfernt. Was die Aspekte der modernen Physik angeht, so zeigen sich keine großen Probleme. Insbesondere die Akzeptanz

der Energie-Masse-Äquivalenz erscheint aufgrund der hohen Akzeptanz vielversprechend. Auch die Motivation zum Aufbau der Materie stellt sich als hilfreich heraus, da so auch Schüler*innen integriert werden, welche die Begriffe u. U. noch nicht kennen. An einzelnen Stellen müssen allerdings Anpassungen vorgenommen werden, um dieses Prinzip stärker für die Verknüpfung von Higgs- und Quarkfeld mit der Masse von Teilchen verwenden zu können.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Anpassungen für die zweite Version zu einer Verbesserung der LLE geführt haben. Die Schüler*innen nehmen die Konzeptideen insgesamt positiv auf, Akzeptanz, Paraphrase und Anwendung bereiten wenige Probleme. Der Aufbau des Interviews und damit der Konzeptideen scheint die Suche nach Feldern und Bewegung zu unterstützen und den Schüler*innen ausreichend Orientierung zu bieten. Die Ergebnisse dieser Evaluation bieten folglich eine vielversprechende Grundlage für die Weiterentwicklung zur dritten Version des EFA.

KAPITEL 11

Dritte Version: Konzeption

Dieses Kapitel beschreibt die Konzeption der dritten und letzten Version des Energie-Feld-Ansatzes als Weiterentwicklung auf Grundlage der Ergebnisse aus Kapitel 10. Es werden die Anpassungen der Konzeptideen und des Interviewleitfadens erläutert und die Beobachtungsfragen für die Evaluation der dritten Runde aktualisiert und ergänzt.

11.1 Weiterentwicklung der Konzeptideen

Die dritte Version des EFA weist im Vergleich zur zweiten Version einige Änderungen in den Konzeptideen auf. Die folgende Auflistung gibt einen Überblick über die Konzeptideen der dritten Version. Veränderte Konzeptideen bzw. Erweiterungen zur zweiten Version sind in blau dargestellt. Die Konzeptidee zur Analogie der elastischen Feder (ehemals Konzeptidee 3 der zweiten Version) wurde gestrichen. Die Umsetzung der im Folgenden beschriebenen Überlegungen kann im Interviewleitfaden der dritten Version nachvollzogen werden (siehe Interviewleitfaden in Anhang C).

Verzicht auf die Federanalogie

Wie sich in der Evaluation der zweiten Version gezeigt hat, scheint die Federanalogie für die Schüler*innen nicht hilfreich. Aus diesem Grund wird auf deren Verwendung verzichtet und das Modell aus den Konzeptideen gestrichen.

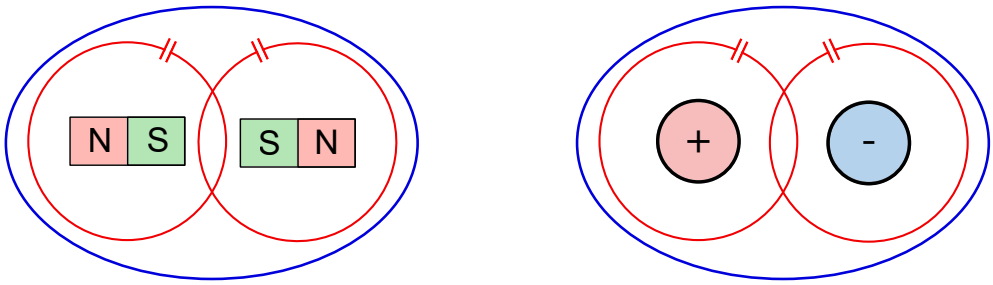


Abbildung 11.1: Angedeutetes Wegstreichen der Einzelfelder für zwei sich abstoßende Stabmagnete (links) und zwei sich anziehende Ladungen (rechts) aus dem Interviewleitfaden.

Rolle der Einzelfelder

Da in der letzten Version (auch im Rahmen des Bezugspunktproblems) teilweise den Einzelfeldern eine Energie zugeschrieben wurde, wird hier eine klarere Abgrenzung vorgenommen. Bei der Einführung des Gesamtfeldes wird also erklärt, dass für unsere Betrachtungen (später wird klar, dass es sich dabei um die Energieübertragung handelt) nur das Gesamtfeld, also die Überlagerung der Felder relevant ist und somit die Einzelfelder keine Rolle mehr spielen. Auf diese Weise soll bewusst gemacht werden, dass bei allen Betrachtungen nach einem Gesamtfeld, also nach mindestens zwei sich überlagernden Feldern, gesucht werden muss. Dadurch soll insbesondere das Bezugspunktproblem bei der Satellitenbewegung sowie beim fallenden Ball in Bereich 1 (Gesamtfeld, Energieübertragung und Indikatoren) reduziert werden. Neben der durchgehenden expliziten Versprachlichung als *Gesamtfeld* im ersten Bereich, wird dies dort auch durch zwei Kernaussagen unterstrichen:

> *Dann spielen die einzelnen Felder keine Rolle mehr und wir interessieren uns nur noch für das Gesamtfeld.* (E1.1)

Sowie:

> *Dieses Gesamtfeld trägt Energie. Wichtig dabei ist zu wissen, dass die Energie immer NUR im Gesamtfeld mit der Wechselwirkung steckt, also in der Überlagerung. NICHT die Einzelfelder der Quellen tragen Energie, sondern erst die Konstellation als Überlagerung, also das Gesamtfeld.* (E1.2)

Um die Bedeutung des Gesamtfeldes zusätzlich zu verdeutlichen und zu zeigen, dass die Einzelfelder nach der Überlagerung keine Bedeutung mehr besitzen, wird in der Beispiel-Zeichnung ein Wegstreichen der Einzelfelder angedeutet (vgl. Abb. 11.1 sowie E1.1; Interviewleitfaden, S. 5).

Rolle des Higgsfeldes

Um zu verdeutlichen, welche Rolle das Higgsfeld für die Energie und Masse der Elementarteilchen spielt, wird nicht nur erwähnt, dass diese ihre Energie *durch das Higgsfeld erhalten*, sondern dass die Elementarteilchen ihre Energie und damit (wegen der Energie-Masse-Äquivalenz) auch ihre Ruhemasse durch die Wechselwirkung mit diesem Feld erhalten; auch wenn sie sich in Ruhe befinden. Im Interviewleitfaden wird diese Konzeptidee wie folgt implementiert und dient damit als Ausgangspunkt für die Beschreibung der Paarerzeugung:

> *Wir haben gelernt, dass Masse das gleiche wie Energie ist. Das bedeutet, die Masse von Elektronen und Quarks ist im Grunde nur Energie. Und wie zuvor kommt sie durch ein Feld zustande; dem Higgsfeld. Dies ist ein Feld, das unser gesamtes Universum durchsetzt und immer existiert. Durch die Wechselwirkung der Elektronen und Quarks mit dem Higgsfeld erhalten diese Teilchen (auch wenn sie sich nicht bewegen) ihre Ruheenergie. Diese Energie ist ihre Masse. Das Higgsfeld ist also notwendig, damit die Elementarteilchen ihre Masse bekommen. Auf diese Weise kann man die Masse der Elementarteilchen, also deren Energie, auf das fundamentale Higgsfeld zurückführen.* (E3.2)

Zusammenhang von Feldenergie und Masse

Über die explizitere Beschreibung des Higgsfeldes hinaus wird im Überarbeitungsvorschlag der zweiten Version die Betonung des Zusammenhangs von Energie im Quarkfeld und durch das Higgsfeld mit der Masse von Kernen und Elementarteilchen gefordert. Dazu wird die Konzeptidee so angereichert, dass deutlich wird, dass die Masse der Atomkerne maßgeblich durch die Energie im Quarkfeld zustande kommt und die Elementarteilchen ihre Masse als Energie durch die Wechselwirkung mit dem Higgsfeld erhalten. Dabei wird der Unterschied vom Higgsfeld zu den anderen Feldern durch seine Omnipräsenz klargestellt, um Verwirrung zu vermeiden.

Tendenz des Feldes

Um eine übermäßige Anthropomorphisierung des Feldes zu vermeiden und mehr Schüler*innen zur Übernahme der Formulierung zu motivieren, wird der Ausdruck *Wille des Feldes* durch die *Tendenz des Feldes* ersetzt. Auf diese Weise wird die aktive Rolle des Feldes in Prozessen mit Energieübertragung aufrechterhalten und zugleich das Feld als physikalische Entität gewahrt. Diese Anpassung erfolgt zwar

nicht aus einer empirisch basierten Notwendigkeit, ist aber eine sinnvolle Weiterentwicklung im sprachlichen Gebrauch. Da ein zu großer Zusammenhang mit menschlicher Kognition (einem Willen) für manche Schüler*innen eher befremdlich empfunden werden könnte, ist hier ein eher neutraler Begriff (Tendenz) passender. Praktisch wird also ab nun auch im Interviewleitfaden davon gesprochen, dass das Feld dazu *tendiert*, sich auszudehnen oder zusammenzuziehen (bzw. zu expandieren oder zu kontrahieren).

Bindungszustände und Auslöser

Ein Gesamtfeld hat die Tendenz, seine Energie nach Möglichkeit zu minimieren, was zu Bindungszuständen von Atomen und Nukleonen führen kann. Diese Idee wurde in der zweiten Version zwar bereits im Leitfaden erwähnt, aber die Akzeptanz dieser Idee nicht explizit überprüft. Dies ändert sich für die dritte Version, indem die Bindung von Atomen und Nukleonen zu Festkörpern bzw. Kernen explizit erläutert wird. Hierzu wird erklärt, dass ein Festkörper deshalb stabil ist, weil das Feld der Atome seine Energie minimiert hat. Um den Festkörper zu verändern, also um ihn z. B. zu verändern oder zu zerstören, muss dem Feld zunächst Energie zugeführt werden. Um das Prinzip zu veranschaulichen, wird stellvertretend für Festkörper ein typisches Gitter-Modell gezeigt, das sich auch nur durch äußere Einwirkung verformen lässt (Atome als Kugeln an einem kubischen Gitter). Dies wird anschließend auf die elastische Schleuder übertragen:

> *Denn um so einen Festkörper, wie beispielsweise eine Schleuder, zu verändern, muss man zunächst Energie in das Feld stecken, damit man es verändern kann. Ohne dem Feld also Energie von außen zuzuführen, wird es sich nicht verändern und damit ist der Festkörper stabil.* (Interviewleitfaden, S. 14)

In diesem Zusammenhang wird auch der Begriff „Auslöser“ genannt. Denn für einige Beispiele, bei denen ein Gesamtfeld seine Energie minimiert, muss diesem zuerst Energie zugeführt werden. Dies wird als Auslöser bezeichnet und findet beispielsweise beim Spannen der Schleuder (E2.1: Schleuder und Muskelkontraktion), beim Zünden eines Feuerwerks (A2.1b: Explosion) oder beim Kernzerfall (E3.1: Quarkfeld, A3.1a: Beschuss mit thermischen Neutronen bei der Kernspaltung) Anwendung. Der Auslöser stellt also für das Gesamtfeld die Möglichkeit zur Veränderung und damit zur Minimierung der Energie dar. Ob das Prinzip auch über den Begriff Auslöser oder anderweitig von den Schüler*innen erklärt wird, ist Gegenstand einer Beobachtungsfrage:[1]

[1] Dies wird nicht als Konzeptidee kodiert, da man auch ohne die Verwendung dieses Begriffs

> Wird der Begriff *Auslöser* bei der Beschreibung von Energieübertragung in ein bzw. aus einem Feld verwendet?

Die Energie, die bei der Veränderung von Feldern in atomaren oder nuklearen Bindungen übertragen wird, wird hier mit dem aus dem Schulunterricht bekannten Begriff Bindungsenergie verknüpft. Um die Akzeptanz für den Zusammenhang von Bindungen und Feldenergie zu überprüfen, wird Paraphrase P2.1b im Bereich zum Mikrokosmos (Kontext Schleuder und Festkörper) eingeführt:

> *Warum gibt es gebundene Zustände, also warum fällt z. B. unsere Schleuder nicht auseinander?*

Hier sollen Schüler*innen zusammenfassen, dass das Gesamtfeld (der Atome) seine Energie minimiert hat und deshalb für eine Veränderung des Körpers zunächst Energie von außen (in das Feld) zugeführt werden muss.

Thermische Energie

Um die thermische Energie gegen die Feldenergie abzugrenzen und sie offensichtlicher mit der Bewegungsenergie zu verknüpfen, wird die entsprechende Konzeptidee um den sprachlichen Zusatz *mikroskopische* (Bewegungsenergie) erweitert. Außerdem wird anstatt der beiden Abbildungen zur Reibung mit Luft bzw. Halterung das Videomaterial der ersten Version (BB-Bag und Kugel auf Feder) wieder implementiert. Auf diese Weise soll der Zusammenhang von thermischer Energie und mikroskopische Bewegungsenergie der Atome von Luft bzw. Halterung verdeutlicht werden.

Elektromagnetische Strahlung

Die Forderung aus dem Überarbeitungsvorschlag der zweiten Runde nach einer Motivation der elektromagnetischen Strahlung als Feldenergie statt Bewegungsenergie wird als Konzeptidee festgehalten. Dabei wird auch ein Licht- bzw. Laserstrahl als sich ausbreitendes gebündeltes/fokussiertes Feld motiviert. So soll die Vorstellung, dass sich Licht bzw. ein Lichtstrahl bewege und deshalb Bewegungsenergie besitze aufgegriffen und durch eine adäquatere Vorstellung ersetzt werden. Zusätzlich wird beibehalten, dass elektromagnetische Strahlung, anders

von der Abgabe von Energie aus einem Feld sprechen kann, bzw. nur über die Energieübertragung in ein oder aus einem Feld. Eine Äußerung kann also auch fachlich angemessen sein, ohne dass dabei der Begriff *Auslöser* verwendet wird. Ob er aber verwendet wird, kann interessante Erkenntnisse über dessen Attraktivität liefern und wird deshalb gesondert untersucht.

als ein sich bewegendes Objekt, keine Masse hat und folglich keine Bewegungsenergie, sondern Feldenergie besitzt. Auf den Zusammenhang mit dem Modell *Welle* wird hier nun verzichtet:

> *Auf den ersten Blick könnte man meinen, dass es sich um Bewegungsenergie handelt, da sich das Licht oder auch ein Photon bewegt. Allerdings ist das Licht im Gegensatz zu bewegenden Objekten kein Teilchen, denn es besitzt keine Masse. Es ist vielmehr eine Überlagerung des abgestrahlten elektrischen und magnetischen Feldes. Das bedeutet, dass die elektromagnetische Strahlung, so wie der Name sagt, ein elektromagnetisches Feld ist und dementsprechend Feldenergie trägt.Auch wenn elektromagnetische Strahlung in gebündelter Form, z. B. einem Lichtstrahl oder Laserstrahl, vorkommt, so ist es immer noch Feldenergie, nur eben gebündelt.* (E2.2.2)

Auf das Photon selbst wird hier nicht eingegangen. Auf Nachfrage wird allerdings erwidert:

> *Das Gleiche gilt für das Photon, denn dieses ist nichts anderes als die kleinste Einheit Feldenergie. Im Gegensatz zu Objekten mit Bewegungsenergie hat dieses aber — genau wie der Lichtstrahl — keine Masse, also auch keine Bewegungsenergie, sondern nur Feldenergie.* (E2.2.2)

Zusammenführung der Konzeptideen

Auf Grundlage der Überlegungen seien hier die weiterentwickelten Konzeptideen für die dritte Version zusammengefasst.Neue Konzeptideen (im Vergleich zur zweiten Version) sind kursiv dargestellt.

Konzeptideen der dritten Version des EFA

1: Felder

1. Jede Quelle hat ein Feld. (Bewegte) Ladungen, Magnete, Massen und Quarks sind Quellen eines Feldes.
2. Man kann Felder weder sehen noch anfassen und sie sind (sofern kein äußerer Einfluss sie hindert) unendlich weit ausgedehnt.[a]
3. Zwei (oder mehr) Quellen wechselwirken miteinander über ihre Felder. Die Felder überlagern sich dabei zu seinem Gesamtfeld als Konstellation aus Quellen und der Wechselwirkung zwischen ihnen.

4. Jedes Gesamtfeld trägt Energie. *Für die Energiebetrachtung spielen die Einzelfelder keine Rolle mehr, sondern nur noch deren Überlagerung: das Gesamtfeld.*
5. Es gibt (für die klassische Physik) nur elektrische, magnetische und Gravitationsfelder. Im Rahmen der modernen Physik kommen noch Quarkfelder und das Higgs-Feld dazu.
6. Das Higgsfeld durchsetzt das gesamte Universum (omnipräsent). *Durch die Wechselwirkung mit dem* Higgsfeld erhalten *(auch ruhende)* Elementarteilchen eine Energie; ihre Ruheenergie.

2: Energieübertragung

1. Es gibt nur Bewegungsenergie und Feldenergie, d. h. Energie in der Bewegung von Objekten mit Masse, die sich bewegen; und Energie in Feldern.
2. Ein Feld kann Energie aufnehmen oder abgeben; Energie kann also zwischen Feldern und Bewegungen übertragen werden.
3. Ein Feld strebt (gemäß seiner Wechselwirkung) immer zu einem Zustand minimaler Energie, dies kann man auch als *Tendenz des Feldes*[b] bezeichnen.
4. *Die Bindung von Atomen und Kernen entsteht durch die Minimierung von Feldenergie.*[c]
5. Die Rolle eines Feldes in Prozessen erkennt man an der Energieübertragung:
   (a) Wenn Energie aus einem Feld oder in ein Feld übertragen wird, dann ändert sich eine Bewegung; etwas wird schneller oder langsamer.
   (b) Wenn Energie aus einem Feld oder in ein Feld übertragen wird, dann ändert sich das Feld. Das erkennt man daran, dass sich der Abstand der Quellen verändert.
   (c) Ohne äußere Einwirkung verändert sich ein Feld *(entsprechend seiner Tendenz)* immer so, dass es seine Energie minimiert; es gibt dann Energie ab.

3: Energie

1. Um ein Phänomen zu erklären, muss man also nur nach den Feldern und Bewegungen suchen.
   (a) Thermische Energie ist *mikroskopische* Bewegungsenergie. Wir bemerken sie z. B. als Wärme.
   (b) Elektromagnetische Strahlung ist Feldenergie. *Ein Lichtstrahl (als räumlich gebündeltes Feld) trägt Feldenergie.* [d]
   (c) Feldenergie durch Quarkfelder und das Higgsfeld macht sich auch als Masse bemerkbar. *Quarkfelder tragen Energie, diese erfahren wir z. B. als Masse von Atomkernen. Das Higgsfeld verleiht den Elementarteilchen Masse (wie z. B. Elektronen und Quarks).*
2. Diese Prinzipien gelten in jeder Größenordnung (makro- und mikroskopisch) sowie fächerübergreifend (Astronomie, Biologie, Chemie).
3. Da Energie nur zwischen Feldern und Bewegung übertragen werden kann, bleibt die Gesamtenergie von beiden (Felder und Bewegungen) und also in unserer Welt zusammen immer gleich; Energie ist erhalten.[e]

[a] Diese Konzeptidee ist eine implizite Konzeptidee, d. h. sie wird nicht direkt überprüft; ehemals Konzeptideen 3 und 4 der ersten Version.
[b] Vorher in der zweiten Version als *Wille des Feldes* bezeichnet.
[c] Sprachliche Anpassung: Es wird über die „Entstehung“ von Bindungen statt über den Zustand der Bindungen gesprochen.
[d] Falls notwendig, wird auf Nachfrage eines*r Schüler*in dem Photon als Feld-Paket (räumlich konzentriertes Feld) auch Feldenergie zugeschrieben.
[e] Diese Konzeptidee wird implizit vermittelt.

11.2 Weiterentwicklung des Interviewleitfadens

Hier werden nun die zusätzlichen Weiterentwicklungen des Interviewleitfadens beschrieben, welche über die reine Implementation der obigen Änderungen hinausgehen. Die Weiterentwicklungen des Leitfadens beziehen sich hauptsächlich auf Umstrukturierungen von Aufgaben und Kontexten.

Verzicht auf die Anleitung

Wie sich in Kapitel 10 herausgestellt hat, greifen die Schüler*innen nicht auf die Anleitung, also Hilfestellung zur Suche nach Feldern und Bewegungen, zurück. Außerdem scheint ihnen die Interviewstruktur eine hinreichende Orientierung zu bieten, sodass sie in der Regel ohnehin angemessen auf Konzeptideen zurückgrei-

fen und die Suche nach Feldern kaum ein Problem darstellt. Aus diesem Grund wird für die überarbeitete dritte Version auf die Anleitung verzichtet. Dies bietet zusätzlich den Vorteil, dass die ohnehin bereits große Dauer des Interviews etwas reduziert werden kann.

Umstrukturierung von Bereich 1: Gesamtfeld und Energieübertragung

Durch die auch in Version 2 noch vorliegende Bezugspunktproblematik wird der erste Bereich zu Prinzip und Darstellung des Gesamtfeldes sowie zur Energieübertragung umstrukturiert: Insgesamt wird (wie oben beschrieben) auf die Federanalogie verzichtet. Die Entstehung und Darstellung des Gesamtfeldes wird nach wie vor am Beispiel zweier sich abstoßender Stabmagneten eingeleitet. Die in der ersten Version darauf folgende Übertragung auf das Gravitationsfeld wird allerdings durch das Beispiel zweier sich anziehender Ladungen ersetzt. Das hat mehrere Gründe:

1. Da die Aufgabe zu Erde und Satellit im Rahmen des Bezugspunktproblems häufig schwierig erscheint, wird die Entstehung des Gesamtfeldes als Aufgabe anstelle der beiden Ladungen gesetzt. Dadurch wird das Gravitationsfeld als Gesamtfeld nicht nur in der Instruktion erwähnt, sondern die Schüler*innen müssen sich selbst Gedanken machen und sollten so bereits zu Beginn erkennen, dass hier das Gesamtfeld und nicht nur das Feld der Erde von Bedeutung ist. Darauf kann dann später die Beschreibung der Energieübertragung fußen.
2. Die Beschreibung des Feldes der beiden Ladungen hat sich in der zweiten Runde als problemlos erwiesen. Somit kann diese hier bedenkenlos als zweites Beispiel in der Erklärung E1.1 verwendet werden. Zusätzlich ist hier beim Übergang von Magnetfeld zu elektrischem Feld leicht zu zeigen, dass die Existenz eines Gesamtfeldes sowohl für abstoßende als auch für anziehende Wechselwirkungen möglich ist. Die Darstellung ist also von der Richtung der Kraft unabhängig. Hier ist zu erwarten, dass diese einfache aber essenzielle Konzeptidee aufgrund des geringeren Alltagsbezuges mit der Kombination von Magneten und Ladungen besser zu fokussieren ist als mit Magneten und Massen.
3. Das Beispiel der beiden Luftballons sollte nach der Instruktion mit den beiden Einzelladungen keine Probleme bereiten. Für die Bewältigung der Aufgabe ist die Umstellung insofern interessant, als hier nun zwei unterschiedliche Quellen bzw. Felder (abstoßende Ladungen, dann anziehende Massen) vorkommen. Dies war vorher mit Ladungen und geladenen Luftballons (beide Fälle abstoßend) nicht der Fall und verlief problemlos.

KAPITEL 12

Dritte Version: Auswertung der Interviews

In diesem Kapitel wird die Evaluation der dritten Version des EFA vorgestellt. Wie bereits in den ersten beiden Zyklen werden zunächst die allgemeinen Rahmenbedingungen und die Stichprobe beschrieben. Anschließend wird auf den Ersteindruck der Analyse eingegangen. Es folgen die Längs- und Queranalyse der Interviews nach dem bekannten Prinzip, die Interpretation der Beobachtungsfragen, die Einschätzung des Konzeptes seitens der Schüler*innen und die Hinführung zum Überarbeitungsvorschlag. Das Kapitel schließt mit einem Vergleich zur zweiten Runde. Aufgrund der zufriedenstellenden Ergebnisse stellt diese dritte Runde den letzten Zyklus der Akzeptanzbefragungen dar und ist somit Ausgangspunkt für eine breitere Untersuchung im Klassensetting.

12.1 Allgemeine Rahmenbedingungen und Stichprobe

Rahmenbedingungen und Akquise

Die Stichprobe setzt sich wie in den vorangegangenen beiden Zyklen aus Schüler*innen verschiedener Schulen zusammen. Die Schüler*innen wurden über den Kontakt zur Lehrperson angeworben. Vor der Instruktion und Erhebung wurde die Zustimmung von Direktion, Lehrpersonen, Erziehungsberechtigten und Schüler*innen eingeholt. Die Werbung wurde wieder mit einem Informationsblatt ver-

Schüler*in	Geschlecht	Schule	Klasse	Dauer in Std.	Performanz	Note
$S1_3$	w	1	8	2,50	1,85	2
$S2_3$	w	1	8	2,25	1,94	1
$S3_3$	w	2	7	2,25	1,88	1-2
$S4_3$	w	2	8	2,25	1,85	2
$S5_3$	w	3	7	2,50	1,76	2
$S6_3$	w	3	7	2,25	1,88	1
$S7_3$	w	4	8	2,00	1,88	1-2
$S8/9_3$	m/w	5	7	2,25	2,00	2/3

Tabelle 12.1: Schüler*innen $S1_3$ bis $S8/9_3$ dritten Runde für die Evaluation des EFA mittels Online-Akzeptanzbefragungen. Die Stichprobe besteht aus sieben Einzelinterviews ($S1_3$ bis $S7_3$) sowie einem Doppelinterview ($S8/9_3$). Die Interviewdauern sind viertelstündig gerundet. Die Performanz-Werte sind bereits aus der nachfolgenden Auswertung übernommen (siehe Abschnitt 12.2) und die Note bezieht sich auf die letzte Zeugnisnote in Physik.

knüpft, auf dessen Grundlage ein schriftliches Einverständnis zur Teilnahme an der Erhebung und zur anonymisierten Verarbeitung der Daten von allen Schüler*innen bzw. Erziehungsberechtigten gegeben wurde (siehe Anhang B). Im Informationsschreiben wurden die wichtigsten Eckpunkte angegeben: die Dauer von zweieinhalb Stunden, ein kurzer Abriss des zu erwartenden Themas und Formates, ein Hinweis auf die zu erhaltende Teilnahmebescheinigung und Aufwandsentschädigung in Höhe von zwanzig Euro sowie eine Aufklärung zur anonymen Verarbeitung der Daten. Freiwillige konnten sich per E-Mail oder über ein Online-Formular für ein Interview melden. Die Interviews wurden an sechs verschiedenen Real-Gymnasien über die entsprechende Lehrperson beworben. Insgesamt haben sich neun Schüler*innen aus fünf verschiedenen Schulen zu einem Interview bereit erklärt. Die Interviews wurden zwischen März und Mai 2021 durchgeführt. Die Eckdaten sind der Tabelle 12.1 zu entnehmen.

Stichprobe

Auch in diesem Zyklus lassen sich aufgrund der geringen Stichprobengröße keine quantitativen Aussagen oder Zusammenhänge über die einzelnen Kennwerte treffen. Dennoch seien hier einige Basisdaten erwähnt, um die Stichprobe möglichst umfassend abzubilden: Die Schüler*innen verteilen sich auf fünf verschiedene Schulen. Die Dauer der Interviews liegt im Schnitt bei etwa 2,25 Stunden. Sie weist weniger Streuung auf und ist nur leicht länger als im zweiten Zyklus, was insgesamt den gleichmäßigen und nahezu reibungslosen Verlauf der einzelnen Interviews abbildet.

Die letzte Physiknote ist bei den Schüler*innen dieser Runde generell besser als im vorigen Zyklus. Dies liegt vermutlich unter anderem auch an der begrenzten Bereitschaft, an weiteren Online-Formaten in der Corona-Pandemie teilzunehmen. Dazu muss auch gesagt werden, dass es sich hier um unterschiedliche Lehrpersonen handelt, sodass die Note selbst nur ein sehr grobes und klassenspezifisches Maß für die Leistung eines*r Schüler*in darstellt. Die Bereitschaft der Schüler*innen S8 und S9, war an die Bedingung geknüpft, nur zu zweit gemeinsam an einem Interview teilzunehmen, weswegen hier ein Doppelinterview durchgeführt wurde (für nähere Infos siehe Längsanalyse).

12.2 Kodierung und Ersteindruck

Tabelle 12.2 zeigt die Kodierung der Interviews zur dritten Version des EFA. Für die Schüler*innen $S1_3$ und $S6_3$ wurde ein Interrate durchgeführt, was zu einer Interrater-Reliabilität (Cohens Kappa) von $\kappa = 0,60$ und damit zu einer guten Übereinstimmung führt (vgl. Kapitel 5.4.3). Insgesamt fällt auf, dass nur wenige Aspekte problematisch sind. Im Gegensatz zur vorherigen Version treten diese auch nicht in Clustern (gruppiert) auf, sondern vereinzelt. Dieser fehlende Zusammenhang lässt sich, wie sich herausstellen wird, auf teils unspezifische Problematiken zurückführen. So treten stellenweise bekannte Probleme wieder auf, aber mit geringerer Tragweite und weniger rigide, d. h. sie können durch gezielte Nachfragen oder Hilfestellungen aufgelöst werden. Einzelne problematische Stellen lassen sich auch auf fehlende Konzentration oder missverständliche Fragestellungen zurückführen. Um eine bessere Übersicht über die spezifischen, also mit Lernschwierigkeiten verbundenen, Probleme zu erhalten, wird eine zweite Übersicht über die Kodierung in Tabelle 12.3 gegeben. Hier wurden Aspekte, die nur aufgrund von mehrmaligen Nachfragen oder abfallender Konzentration bzw. Aufmerksamkeit entstehen, aus der Kodierung entfernt und mit einem (*) markiert. So lässt sich besser abschätzen, welche Probleme aus einem inhaltlichen Grund auftreten und deshalb tatsächlich adressiert werden müssen. Nur diese Aspekte lassen Schlüsse auf mögliche Verbesserungen des Konzeptes zu.

Bereich			Schüler*innen								
Konzeptidee/Thema	Kontext	Nummer	$S1_3$	$S2_3$	$S3_3$	$S4_3$	$S5_3$	$S6_3$	$S7_3$	$S8/9_3$	
1.1 Quelle und Gesamtfeld		B1.1	2	2	2	2	2	2	2	2	1,97
		P1.1	2	2	2	2	2	2	2	2	
	Luftballons	A1.1a	2	2	2	1	2	2	2	2	
	Satellit und Erde	A1.1b	2	2	2	2	2	2	2	2	
1.2 Energie-übertragung		B1.2	2	2	2	2	2	2	2	2	1,91
		P1.2	1	2	2	2	2	2	2	2	
	Luftballons	A1.2a	1	2	2	2	2	2	2	2	
	Satellit und Erde	A1.2b	2	2	2	2	1	2	2	2	
1.3 Indikatoren		B1.3	1	2	2	2	1	2	2	2	1,80
		P1.3	1	2	2	1	2	0	2	2	
	Luftballons	A1.3a	2	2	2	2	2	2	2	2	
	Satellit und Erde	A1.3b	2	2	2	2	1	2	2	2	
	Fallender Ball	A1.3c	1	2	2	2	2	2	2	2	
2.1 Überall: Mikrokosmos und andere Fächer		B2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	1,89
		P2.1a	2	2	2	2	2	1	2	2	
		P2.1b	2	2	2		2	2	2		
	Automotor	A2.1a	2	2	2	1	1	2	2	2	
	Explosion	A2.1b	2	2	2	2	2	1	2	2	
2.2.1 Thermische Energie		B2.2.1	2	2	2	2	2	1	2	2	1,97
		P2.2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	
	Kugelbahn	A2.2.1a	2	2	2	2	2	2	2	2	
	Mikrowelle	A2.2.1b	2	2	2	2	2	2	2	2	
2.2.2 Elektro-magnetische Strahlung		B2.2.2	2	2	2	1	2	1	2	2	1,84
		P2.2.2	2	0	1	2	2	2	2	2	
	Laser	A2.2.2a	2	2	2	2	2	2	2	2	
	Solarzelle	A2.2.2b	2	2	2	2	2	2	2	2	
3.1 Quarkfeld		B3.1	2	2	2	2	2	2	1	2	1,91
		P3.1	2	2	2	2	2	1	2	2	
	Kernspaltung	A3.1a	2	2	2	2	1	2	2	2	
	Kernfusion	A3.1b	2	2	2	2	2	2	2	2	
3.2 Higgsfeld		B3.2	2	2	2	2	2	2	2	2	1,84
		P3.2	2	2	2	2	2	2	1	2	
	PET	A3.2a	2	2	1	2	2	1	1	2	
	CERN	A3.2b	2	2	2	2	2	2	1	2	
3.3 Zusatz	Gravitationslinse	A3.3a	2	1	0	1	0	2			1,00
	Rotverschiebung	A3.3b				1		1			
Performanz			1,85	1,94	1,94	1,88	1,85	1,76	1,88	2,00	**1,89**

Tabelle 12.2: Kodiertafel der Interviews zur dritten Version des EFA. Eine grüne Kodierung (2) bedeutet angemessene, eine gelbe (1) teilweise problematische und eine rote Kodierung (0) trotz Hilfestellung problematische Performanz. Leere Felder kennzeichnen Auslassungen bzw. fehlende Daten. Die Performanz ergibt sich als Mittelwert der entsprechenden Schüler*innen bzw. Bereiche. Die Zusatzaufgaben wurden dabei nicht berücksichtigt.

Bereich			Schüler*innen								
Konzeptidee/Thema	Kontext	Nummer	$S1_3$	$S2_3$	$S3_3$	$S4_3$	$S5_3$	$S6_3$	$S7_3$	$S8/9_3$	
1.1 Quelle und Gesamtfeld		B1.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2,00
		P1.1	2	2	2	2	2	2	2	2	
	Luftballons	A1.1a	2	2	2	*	2	2	2	2	
	Satellit und Erde	A1.1b	2	2	2	2	2	2	2	2	
1.2 Energie-übertragung		B1.2	2	2	2	2	2	2	2	2	1,91
		P1.2	1	2	2	2	2	2	2	2	
	Luftballons	A1.2a	1	2	2	2	2	2	2	2	
	Satellit und Erde	A1.2b	2	2	2	2	1	2	2	2	
1.3 Indikatoren		B1.3	1	2	2	2	*	2	2	2	1,84
		P1.3	1	2	2	*	2	0	2	2	
	Luftballons	A1.3a	2	2	2	2	2	2	2	2	
	Satellit und Erde	A1.3b	2	2	2	2	1	2	2	2	
	Fallender Ball	A1.3c	1	2	2	2	2	2	2	2	
2.1 Überall: Mikrokosmos und andere Fächer		B2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	1,92
		P2.1a	2	2	2	2	2	1	2	2	
		P2.1b	2	2	2		2	2	2		
	Automotor	A2.1a	2	2	2	*	1	2	2	2	
	Explosion	A2.1b	2	2	2	2	2	1	2	2	
2.2.1 Thermische Energie		B2.2.1	2	2	2	2	2	*	2	2	2,00
		P2.2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	
	Kugelbahn	A2.2.1a	2	2	2	2	2	2	2	2	
	Mikrowelle	A2.2.1b	2	2	2	2	2	2	2	2	
2.2.2 Elektro-magnetische Strahlung		B2.2.2	2	2	2	*	2	1	2	2	1,97
		P2.2.2	2	*	1	2	2	2	2	2	
	Laser	A2.2.2a	2	2	2	2	2	2	2	2	
	Solarzelle	A2.2.2b	2	2	2	2	2	2	2	2	
3.1 Quarkfeld		B3.1	2	2	2	2	2	2	*	2	1,94
		P3.1	2	2	2	2	2	1	2	2	
	Kernspaltung	A3.1a	2	2	2	2	1	2	2	2	
	Kernfusion	A3.1b	2	2	2	2	2	2	2	2	
3.2 Higgsfeld		B3.2	2	2	2	2	2	2	2	2	1,93
		P3.2	2	2	2	2	2	2	*	2	
	PET	A3.2a	2	2	1	2	2	1	*	2	
	CERN	A3.2b	2	2	2	2	2	2	*	2	
3.3 Zusatz	Gravitationslinse	A3.3a	2	1	0	1	0	2			1,00
	Rotverschiebung	A3.3b				1		1			
Performanz			1,85	2,00	1,94	2,00	1,88	1,81	2,00	2,00	**1,93**

Tabelle 12.3: Kodierung der Interviews zur dritten Version des EFA mit Hinblick auf spezifische Probleme. Hier wurden Probleme, die sich nicht auf eine spezifische Schwierigkeit der Schüler*innen zurückführen lassen, herausgenommen und mit einem (*) markiert. Diese tragen nicht zu Erkenntnissen über Lernendenschwierigkeiten oder zur Weiterentwicklung bei und sind somit von der spezifischen Kodierung ausgenommen. Diese Darstellung beinhaltet also nur spezifische Probleme, die nicht nur aufgrund von mehrmaligem Nachfragen oder einem Abfall von Konzentration oder Aufmerksamkeit entstehen. Eine grüne Kodierung (2) bedeutet angemessene, eine gelbe (1) teilweise problematische und eine rote Kodierung (0) trotz Hilfestellung problematische Performanz. Leere Felder kennzeichnen Auslassungen bzw. fehlende Daten. Die Performanz ergibt sich als Mittelwert der entsprechenden Schüler*innen bzw. Bereiche. Die Zusatzaufgaben wurden dabei nicht berücksichtigt.

Problematisch erscheinen die Bereiche zu den Indikatoren und zum Higgsfeld, wobei Tabelle 12.3 zu entnehmen ist, dass die Probleme beim Higgsfeld überwiegend von geringerer Aufmerksamkeit bzw. Konzentration herrühren. Dies liegt insbesondere daran, dass diese abstrakte Konzeptidee am Ende steht und zu diesem Zeitpunkt bereits einige Schüler*innen in ihrer kognitiven Leistungsfähigkeit erschöpft sind. Besonders erfolgreich stellen sich die ersten beiden Bereiche 1.1 (Gesamtfeld) und 1.2 (Energieübertragung) zu den Basis-Konzeptideen und die Bereiche 2.2.1 (thermische Energie) und 3.1 (Quarkfeld) dar. Hier haben Schüler*innen wenig Probleme, die Ideen zu akzeptieren, wiederzugeben und angemessen anzuwenden.

Nach zeitlicher Möglichkeit wurden am Ende der Interviews noch Zusatzaufgaben angesprochen (A3.3a und A3.3b). Hier stellt sich heraus, dass die wenigsten Schüler*innen ohne Hilfe eine angemessene Erklärung liefern, was allerdings auch zu erwarten war. Dennoch gelingt es vielen, mit den bereits bekannten Konzeptideen angemessene Teile einer Lösung bzw. eine adäquate ad hoc Beschreibung formuliert werden. Insgesamt zeichnet sich also ab, dass die Probleme vereinzelt auftreten und weniger stabil sind, also leicht durch Nachfragen gelöst werden können. Dieser Umstand führt letztlich dazu, dass die Interviewstudie zum EFA mit dieser dritten Runde abgeschlossen werden kann (siehe Diskussion in Abschnitt 12.5).

12.3 Längsanalyse

Die folgenden Abschnitte erläutern die Fälle der einzelnen Schüler*innen und bieten einen detaillierteren Einblick in die Problematiken, bevor diese dann in der Queranalyse zu einem Überarbeitungsvorschlag zusammengeführt werden. Die Erläuterungen fallen teilweise kürzer aus als in den vorangegangenen Zyklen, da sich weniger und auch keine unbekannten Probleme ergeben, die diskutiert werden müssen.

12.3.1 Analyse Fall $S1_3$

Allgemeine und positive Aspekte

Die Schülerin $S1_3$ besitzt eine hohe Auffassungsgabe und geht mit den meisten Konzeptideen souverän um. Probleme ergeben sich lediglich in den Bereichen 1.2 (Gesamtfeld und Energieübertragung) und 1.3 (Indikatoren). Bis auf diese Bereiche findet sie alle Aspekte plausibel und kann diese auch angemessen wiedergeben und anwenden. Sie findet das Konzept insgesamt „logisch“, da man

Phänomene „vom Kleinen zum Großen“ erklären könne. Dass thermische Energie („Hitze“) mikroskopische Bewegungsenergie ist, wurde wohl in der Schule nicht erklärt, sei aber sinnvoll. Sie findet, damit könne man die Beispiele sinnstiftend erklären und somit besser verstehen als in der Schule. Gerade der Kontext Atome und Kerne werde mit der Feldenergie klarer (Bsp. Kernspaltung). Man verstehe hier, wie die Prozesse möglich seien (z. B. die Kernspaltung). Beim Gesamtfeld spricht sie von vornherein von einem „gemeinsamen Feld“. Die Prinzipien kann sie auch auf die mikroskopische Ebene übertragen:

> „Die Rakete wird angezündet und dadurch verändert sich wahrscheinlich das Feld von den Atomen in der Rakete, wodurch sie diese [i. e. die Energie] dann wieder abgeben, wenn sie explodiert.“ (A2.1b)

Bei der offenen Aufgabe zur Protonen-Kollision am LHC spricht sie vom Quarkfeld und der Bewegungsenergie der Protonen vor der Kollision. Mit etwas Hilfe erwähnt sie auch das Higgsfeld als Ursache für die Energie der Quarks. Für die Situation nach der Kollision greift sie auf die Kernaussage des EFA zurück und äußert folgendes:

> „[Es gibt] dieselben Arten von Energie, denn es kann nur Feldenergie und Bewegungsenergie und Licht, also auch Feldenergie, sein.“ (A3.2b)

Auch bei der Zusatzaufgabe zur Gravitationslinse ist sie in der Lage, eine angemessene Antwort zu geben:

> „Die Lichtstrahlen [haben/bestehen aus einem] Feld und haben Feldenergie, ist ja logisch. Und Licht ist also sozusagen auch Feldenergie. Deswegen nehme ich an in Wechselwirkung. Ich nehme an, dass die Lichtstrahlen dadurch angezogen werden vom schwarzen Loch.“ (A3.3a)

Sie verknüpft die Strahlung mit Feldenergie und beschreibt, dass sie dadurch in Wechselwirkung mit dem Gravitationsfeld tritt. Die angegebene Beschreibung ist zwar kurz, aber hinsichtlich der Verwendung der ihr bekannten Konzeptideen treffend.

Problematische Aspekte

In Bereich 1.2 tritt das bekannte Problem auf, dass sie die Energie erst den Einzelfeldern und nicht dem Gesamtfeld zuschreibt. So geht sie bei der Paraphrase zu den Magnetwägen davon aus, dass die Energie zwischen Gesamt- und Einzelfeldern transferiert werden kann:

> „Wenn sie dann wieder auseinander fahren, geht diese Energie in diese Einzelfelder, oder?“ (P1.2)

Damit hängt auch zusammen, dass sie bei der Bewertung B1.3 (Indikatoren) angibt, die Richtung (der Energieübertragung) nicht so ganz verstanden zu haben. Hier muss der Zusammenhang von Minimierung der Feldenergie in Richtung der Energieübertragung noch einmal erläutert werden. Bei der Paraphrase P1.3 und der Aufgabe des fallenden Balles braucht sie noch Hilfe:

> „Wenn wird darüber reden, dass das Feld Energie abgibt, reden wir dann von dem gemeinsamen Feld oder von den einzelnen Feldern?“ (A1.3c)

Im Anschluss an die Erklärung des Sachverhalts wird ihr das Prinzip klar und sie greift auf das Prinzip im Laufe des weiteren Interviews angemessen zurück. Hier ist auch anzumerken, dass die Probleme nur daher rühren, dass sie die Energie nicht dem Gesamtfeld zuschreibt. Im Gegensatz zu anderen Schüler*innen ist dies aber nicht mit dem Bezugspunktproblem verbunden, sondern eine reine Verständnisschwierigkeit, die sich vermutlich aufgrund einer unzureichenden Betonung dieses Aspektes in der Erklärung speziell für diese Schüler*in ergibt.[1] Dass nach ausreichender Besprechung in Bereich 1.3 keine weiteren Schwierigkeiten auftreten, spricht für diese Vermutung.

12.3.2 Analyse Fall $S2_3$

Allgemeine und positive Aspekte

Schülerin $S2_3$ gibt an, dass sie sich in der Schule weniger für Physik als für Biologie und Mathematik interessiere und den Schulunterricht nicht besonders verständlich finde. Trotz ihrer kritischen Selbsteinschätzung ist ihre Performanz mit $P = 1,94$ neben der von $S3_3$ die beste dieser Befragungsrunde. Sie bestreitet alle Bereiche souverän. Lediglich bei der Paraphrase P2.2.2 (elektromagnetische Strahlung) hat sie Probleme, die sich aber nach der Besprechung auflösen. Der Übergang auf die mikroskopische Ebene gelingt ihr reibungslos, sie spricht sogar über die „minimale Energie“ (A2.1a) der atomaren Konstellation beim Automotor. Das Gleiche geschieht beim Feuerwerk. Bei der Aufgabe zum Laser formuliert sie das Zusammenspiel prägnant:

[1] Sie ist die einzige Schüler*in, bei der das Problem auftritt. Dies hängt auch damit zusammen, dass die entsprechende Stelle der Erklärung unzureichend erklärt wurde, was allerdings erst in der späteren Transkription auffiel. Jedenfalls ist dies kein allgemeines Problem der Stichprobe.

> „Der Laser hat Feldenergie. In der Platte befinden sich Atome, die in Bewegung versetzt werden. [Die Energie befindet sich dann] in dem gemeinsamen Feld von dem Laser und den Atomen.“ (A2.2.2a)

Sie beschreibt die Energieübertragung also durch die Überlagerung von elektromagnetischem und atomarem Feld, ohne dass dies näher erläutert wurde. So überbrückt sie die eigentlich ausgelassene Lücke der Wechselwirkung von Strahlung und Materie durch die Anwendung des Gesamtfeld-Prinzips auf dieser Ebene.

Bei der CERN-Aufgabe nennt sie zunächst die Bewegungsenergie der Protonen und die Energie durch das Higgsfeld; auf Nachfrage auch das Quarkfeld. Für die Situation nach der Kollision bezieht sie das elektromagnetische Feld entstehender Strahlung sowie das Higgsfeld und das Quarkfeld bei eventuell entstehenden Protonen und Neutronen mit ein.

Bei der Aufgabe zur Gravitationslinse versucht sie, mit Ideen des Higgsfeldes und des Gravitationsfeldes der Erde, eine Beschreibung zu finden. Dabei verwendet sie unterschiedliche Konzeptideen zum Gesamtfeld zwar angemessen (aus Sicht der bekannten Aspekte), aber auf der fachlichen Ebene nicht treffende Erklärungen (z. B. Gesamtfeld von Strahlung und Gravitationsfeld der Erde). Es ist dennoch bemerkenswert, dass sie an sich korrekte Konzeptideen kreativ miteinander verknüpft, um so zu einer Lösung zu gelangen. Daran erkennt man, dass es aus ihrer Sicht offenbar sinnvoll ist, die neu erlernten Konzeptideen zu verwenden und miteinander zu vernetzen (auch wenn hier nicht unbedingt zielführend).

Problematische Aspekte

Bei P2.2.2 verknüpft sie die elektromagnetische Strahlung mit Bewegungsenergie:

I: Welche Energie hat die elektromagnetische Strahlung?
$S2_3$: Elektromagnetische Energie.
I: Wenn wir das in unser Konzept einordnen, welche Energie ist es dann; Feld- oder Bewegungsenergie?
$S2_3$: Beides? Bewegungsenergie?
I: Warum?
$S2_3$: Weil es sich bewegen muss, damit es hier [auf der Erde] ankommt?
I: Weil es keine Masse hat, hat es keine Bewegungsenergie. Also was wäre stattdessen plausibler?
$S2_3$: Die thermische [Energie].

Offenbar hat sie die Konzeptidee hier noch nicht angenommen und greift auf schnell verfügbare ad-hoc Antworten zurück. Neben der bereits bekannte Verknüpfung von Fortbewegung und Bewegungsenergie verwendet sie dabei auch traditionelle Energieformen (thermische Energie), in keinem Fall findet aber eine Auseinandersetzung mit der präsentierten Konzeptidee statt. Nach wiederholter Aufklärung verwendet sie die Idee in weiterer Folge allerdings angemessen und konsistent, ohne Bedenken zu äußern. Die fehlerhafte Paraphrase scheint mit unzureichender Aufmerksamkeit zusammenzuhängen. Bei allen nachfolgenden Aspekten und Aufgaben, auch im Zusammenhang mit der elektromagnetischen Strahlung, wird explizit nach diesem Aspekt gefragt, um die nachhaltige Übernahme zu prüfen. Die Schülerin antwortet dabei stets angemessen. Aus diesem Grund ist das Problem als unspezifisch einzustufen (vgl. Tabelle 12.3).

Ein weiterer, aber unproblematischer Aspekt betrifft die Aufgabe A1.3b (Satellitenbewegung). Hier ist erst unklar, ob sie das Richtige meint, da die Schülerin eine falsche Aussage formuliert, der aber sofort eine Richtigstellung folgt. Da die bisherigen Aspekte des Bereichs problemlos erscheinen und die Ausführungen sinnvoll und an den Konzeptideen orientiert sind, wird hier als richtig kodiert. Man kann aber festhalten, dass die Aufgabe nicht einfach ist und Potenzial für Probleme bietet. Dies hängt in diesem Fall hauptsächlich damit zusammen, dass das Entfernen des Satelliten von der Erde ad-hoc mit einer Zunahme seiner Energie verbunden wird. Erst beim Nachdenken über die Indikatoren, z. B. sein Tempo, wird die richtige Richtung erkannt.

12.3.3 Analyse Fall $S3_3$

Allgemeine und positive Aspekte

Schülerin $S3_3$ weist mit einer Performanz von 1,94 den selben Performanzwert auf wie $S2_3$, beantwortet also fast alle Aspekte problemlos. Insgesamt akzeptiert die Schülerin alle Ideen und auch die Paraphrasen verlaufen nahezu problemlos. Bei den Aufgaben muss gelegentlich nachgefragt werden, die meisten Erklärungen sind aber angemessen. Die Indikatoren führt sie sogar treffend zusammen:

> „Bewegung (schneller und langsamer), Feld gibt Energie ab [wenn etwas schneller wird], Abstand (weiter und näher), Richtung: Wenn es sich von selbst auseinander drückt, wird Energie abgegeben. Wenn man das Feld zwingt [...,] steckt man Energie hinein.“ (P1.3)

Die Zusammenhänge kann sie dann problemlos auch auf die mikroskopische Ebene übertragen: „Sie [die Atome des Festkörpers] sind anziehend und deshalb sind sie

so nahe beieinander, so kompakt. [...] Man muss Energie hineinstecken. [... Die Energie ist] so gering wie möglich.“ (P2.1b)

Aufgabe A3.2b (CERN) analysiert sie auch angemessen. Hier nennt sie das Higgs- und Quarkfeld vor der Kollision sowie über die Bewegungsenergie der neuen Teilchen am Ende des Prozesses. Higgs- und Quarkfeld werden auf Nachfrage („Und wenn die eine Masse haben?“) auch ergänzt.

Problematische Aspekte

Bei der Paraphrase zur elektromagnetischen Strahlung (P2.2.2) verknüpft sie die Strahlung zunächst mit Wärme, ordnet ihr aber angemessen Feldenergie zu. Die Alltagsvorstellung der „Wärme von Strahlung“ ist nicht ungewöhnlich, trat aber im Rahmen des EFA in dieser Form noch nicht auf.

I: Welche Energie hat die elektromagnetische Strahlung?
$S3_3$: [...] auch Wärme, wegen der Energie.
I: Ist es Bewegungs- oder Feldenergie?
$S3_3$: Feldenergie

Ein weiteres Problem tritt im Kontext des Higgsfeldes (A3.2a, PET) auf. Hier erfolgt die logische Verknüpfung von Ursache und Wirkung im Zusammenhang mit dem Higgsfeld falsch herum:

$S3_3$: Am Anfang Feldenergie.
I: Was für eine Feldenergie?
$S3_3$: Die von dem Gerät oder so ausgeht?
Auf Nachfrage: „Die Teilchen haben ein Feld und auch ein Gemeinsames Feld und dadurch, dass sie Masse haben, auch so ein Higgsfeld. Und das entsteht dadurch, dass sie Masse haben.“

Dabei ist der Schülerin die Omnipräsenz des Higgsfeldes noch nicht bewusst. Stattdessen wird die (bisher auch angemessen verwandte) Konzeptidee des Gesamtfeldes auf das Higgsfeld generalisiert. Diese Problematik wird bereits bei der Paraphrase durch die folgende Äußerung deutlich: „Es [das Higgsfeld] erzeugt eine Wechselwirkung mit der Feldenergie des Teilchens und dadurch erzeugt es halt Energie.“ Auf die Nachfrage, „Was ist die Rolle des Higgsfeldes?“, antwortet $S3_3$ wieder angemessen: „Das macht eine Wechselwirkung und dadurch eine Energie.“ Auch bei der Folgeaufgabe zum CERN wird dann angemessen von der Masse der Teilchen auf das Higgsfeld geschlossen.

Erwähnenswert ist auch, dass sie an mehreren Stellen erwähnt, dass „Energie entsteht“; inhaltlich meint sie aber (dies lässt sich aus ihren Antworten schließen), dass Energie übertragen wird und sich dann z. B. in einer Bewegung äußert.[2] Die Zusatzaufgabe zur Gravitationslinse gestaltet sich schwierig. Hier greift sie zwar auch auf die letzten Konzeptideen zurück, gelangt aber trotzdem zu keiner sinnvollen Antwort.

12.3.4 Analyse Fall S4_3

Allgemeine und positive Aspekte

Schülerin S4_3 weist mit $P = 1,88$ eine sehr gute Performanz auf. Dennoch wirkt sie anfangs sehr zurückhaltend und unsicher, obwohl sie die Ideen angemessen aufnehmen und verwenden kann. Sie erwähnt am Ende, dass sie am Vormittag bereits eine Mathematik-Klausur geschrieben habe und deshalb erschöpft sei. An einem normalen Tag hätte sie sich nach eigener Aussage die Inhalte schneller merken können. Mit ihrer Sprache ist sie stellenweise etwas ungenau, z. B. sagt sie „in die Atome“, wenn sie deren Feld oder Bewegung meint. Hier muss gelegentlich nachgefragt werden, was genau sie meint. Aus dem Kontext wird meist klar, dass ihre Antwort richtig ist; beim Feld der Atome spricht sie außerdem oft über deren Lage oder Anordnung. Positiv fällt auch auf, dass die Schülerin die Konzeptideen trotz vorangegangener Klausur am Vormittag fast alle sofort angemessen aufnehmen, wiedergeben und auch anwenden kann. Gelegentlich nutzt sie auch anthropomorphe Formulierungen wie „Das Feld *will* etwas.“

Die Teilchenkollision am CERN leitet sie mit dem elektromagnetischen Feld ein und nennt anschließend das Higgsfeld, „weil sie so ihre Masse bekommen“. Für die Situation nach dem Stoß kommt noch das Quarkfeld hinzu.
Bei den Zusatzaufgaben verwendet sie für beide die Konzeptideen des letzten Bereich, d. h. im Sinne einer Ankerheuristik greift sie auf das Higgsfeld zurück, um die Prozesse zu beschreiben. Zur Betrachtung der Gravitationslinse vermutet sie sofort einen Zusammenhang mit der Masse des schwarzen Loches; ebenso nennt sie das Gravitationsfeld bei der Rotverschiebung. Für die Argumentation braucht sie gezielte Nachfragen, um zusammenhängende Beschreibungen zu geben. Zu einer angemessenen Antwort gelangt sie also nur mit Hilfe. Jedenfalls greift sie trotz Schwierigkeiten ausschließlich auf besprochene Konzeptideen und nicht auf andere Konzepte oder Alltagsvorstellungen zurück.

[2] Hier handelt es sich eher um eine sprachliche Ungenauigkeit als um eine Fehlvorstellung.

Problematische Aspekte

Probleme ergeben sich bei verschiedenen Aspekten, allerdings ist diesen gemeinsam, dass sie allesamt unspezifisch sind: Aufgrund der Zurückhaltung ist bereits bei A1.1a ein häufigeres Nachfragen nötig, die Aussagen bzw. Antworten sind aber letztlich alle korrekt und vollständig. So ist es auch bei P1.3 (Indikatoren und Richtung der Energieübertragung), wo die Schülerin richtig argumentiert, aber etwas Zeit braucht, den Zusammenhang von Wechselwirkungsrichtung und Richtung der Energieübertragung zu formulieren. Letztlich hat sie das Prinzip aber richtig verstanden und nutzt dieses auch in weiterer Folge sinnvoll.
Bei der Aufgabe zum Automotor (A2.1a) nutzt sie den Begriff *Auslöser* für das Ursache-Wirkung-Prinzip, indem sie das Drehen des Schlüssels mit der Verbrennung bzw. Energieübertragung verbindet. Dies ist zwar generell richtig, aber keine konkrete Beschreibung des Phänomens auf der Teilchenebene. Auf Nachfrage, woraus denn der Treibstoff bestehe, argumentiert sie angemessen mit dem atomaren Feld:

> „Aus Atomen. [...] Das Atomfeld [...] und sobald man das durch das Verbrennen durcheinander bringt, wird von dem Feld Energie abgegeben." (A2.1a)

Bei der Bewertung B2.2.2 zur elektromagnetischen Strahlung ist sie sich zunächst unsicher, ob sie die Idee richtig verstanden habe und äußert „das ist schon komplizierter". Sie paraphrasiert darauf hin, um ihr Verständnis zu prüfen. Die Ausführungen sind richtig und vollständig. Hier gibt es auch kein Indiz dafür, dass sie Schwierigkeiten hätte, zu folgen oder die Idee anzunehmen. Man kann lediglich festhalten, dass die Verknüpfung von Strahlung und Feldenergie eventuell auch für sie ungewohnt ist und wie bei den anderen Schüler*innen mit Sorgfalt behandelt werden muss.

12.3.5 Analyse Fall $S5_3$

Allgemeine und positive Aspekte

Mit einem Performanzwert von 1,85 weist das Interview von Schülerin $S5_3$ fünf problematische Aspekte und neben $S1_3$ und $S6_3$ eine im Vergleich schwächere, aber dennoch sehr zufriedenstellende Performanz auf. Auch sie verwendet sprachliche Formulierungen, welche die aktive Rolle des Gesamtfeldes betonen. So erläutert sie beispielsweise bei der Aufgabe zu den Luftballons (A1.3a): „Sie [i. e. die Luftballons] werden nicht von außen gezwungen, zusammen zu bleiben, deshalb geht die

Energie hinaus.“ Die gleiche Beschreibung verwendet sie auch bei der gespannten Schleuder:

> „Die Schleuder kann man sich als Gesamtfeld vorstellen, das alles zusammenhält. Sonst würde es auseinander fallen. Und wenn man sie auseinander zieht, dann steckt man Energie hinein, um die Schleuder zu spannen. Und wenn man sie loslässt zieht sich das Feld wieder ganz schnell zusammen.“ (P2.1)

Positiv fällt auch auf, dass sie bereits bei P1.1, d. h. vor der eigentlichen Konzeptidee, das Feld mit Energie verknüpft und von einem „Gesamtenergiefeld“ spricht. Dieser Umstand ist zwar angesichts der thematische Rahmung und Motivation nicht verwunderlich, es ist aber dennoch erwähnenswert, dass die Schüler*in diese Schlussfolgerung bereits hier verbalisiert und dadurch ihre Akzeptanz demonstriert. Bei P2.2.1 (thermische Energie) gelangt sie von selbst auf die Verbindung zur Erwärmung der Hände, wenn man diese im Winter aneinander reibt.

Problematische Aspekte

Zu Beginn ist eine Eingewöhnung in das Konzept nötig. Bei A1.2b (Satellit und Erde) braucht sie etwas länger, um auf eine passende Beschreibung zu kommen. Sie beschreibt hier zunächst die Nähe von Satellit und Erde (Nähe-Bedingung) als Ursache für die Bildung des Gesamtfeldes. Auf Nachfrage argumentiert sie allerdings angemessen.
Bei den Indikatoren empfindet sie die Idee zur Richtung der Energieübertragung zunächst als schwierig:

> „Ich habe es nicht ganz verstanden. Also wenn sich das Feld abstößt, nimmt es Energie auf oder gibt es sie ab?“ (B1.3)

Nachdem die Tendenz des Feldes noch einmal kurz erläutert wurde, äußert die Schülerin aber, dass es dann verständlich sei und kann die Idee anschließend auch in eigenen Worten treffen wiedergeben. Die anschließende Aufgabe zu den Luftballons A1.3a löst sie sicher, bei der Aufgabe zum Satelliten (A1.3b) hingegen tritt das Problem noch einmal kurz auf. Der Rest des Interviews verläuft dahingehend aber unproblematisch.

Sowohl bei Aufgabe A2.1a (Automotor) als auch bei A3.1a (Kernspaltung) muss nachgefragt werden, um eine stichhaltige Argumentation zu erlangen. Beim Automotor sucht die Schülerin zwar nach dem Gesamtfeld, allerdings zunächst an den falschen Stellen (Gesamtfeld von Treibstoff und Auto bzw. Reifen). Der Übergang

auf die Mikroebene gelingt erst mit gezielten Nachfragen als Hilfestellung. Ähnlich ist es bei der Kernspaltung, wo sie das Prinzip des Gesamtfeldes der Kernbestandteile erwähnt, auf den Begriff des Quarkfeldes zunächst nicht eingeht, sondern über „Atome in den Kernen“ spricht. Hier ist ihr offenbar nur die Nomenklatur bzw. Struktur der Materie noch nicht vertraut. Ihre Beschreibung folgt ohnedies dem Aufbau der Konzeptideen. Insgesamt braucht $S5_3$ also einzelne helfende Nachfragen, liefert aber anschließend immer angemessene Beschreibungen.

12.3.6 Analyse Fall S6_3

Allgemeine und positive Aspekte

Mit einem Performanzwert von 1,76 treten bei $S6_3$ die meisten Probleme auf. Insgesamt ist die Schülerin bei mehreren Bewertungen skeptisch, meist aber nach eigener Aussage ohne besonderen Grund. Auch wenn die Schülerin bei manchen Bewertungen erst skeptisch ist, ob sie die Erklärung richtig verstanden habe, kann sie diese in der Regel angemessen zusammenfassen. So beispielsweise auch bei der Energieübertragung zwischen Bewegung und Gesamtfeld:

> „In das Feld. [...] Das heißt es beruht darauf, dass die Atome auch selber ein Feld haben und es wie vorher ist, dass das Gesamtfeld die Energie abgibt.“ (B2.1)

Das Gesamtfeld und die Feldenergie von Quarks führt sie bei Aufgabe A3.2 (CERN) gemeinsam mit dem Higgsfeld an. Außerdem gibt sie für die Aufgabe der Gravitationslinse eine angemessene Antwort, welche die Konzeptideen sinnvoll vereint, um das Phänomen zu beschreiben (A3.3a):

I: Wieso wird das Licht abgelenkt?
$S6_3$: Wegen den Feldern, oder?
I: Und warum?
$S6_3$: Dass sich die beiden Felder, von dem Licht die Feldenergie, sich anziehen.
I: Warum wird das angezogen?
$S6_3$: Das Gesamtfeld wirkt anziehend vom schwarzen Loch und vom Licht.
I: Und warum gibt es ein Gesamtfeld von einer Masse und einer Strahlung?
$S6_3$: Naja eine Masse ist ja auch Energie und eine Strahlung hat Energie, die sich auch in einem Feld äußert.

Für die Rotverschiebung gibt sie eine ähnlich angemessene Beschreibung: „Wenn die Entfernung größer wird, dann hat es nicht mehr die Tendenz, die es ursprüng-

lich hatte. [...] Je weiter der Strahl nach oben geht, umso weniger Energie hat er, das ist entgegen der Tendenz. [...]“. Obwohl diese Beschreibung insofern nicht vollständig ist, als sie nicht auf das Gesamtfeld eingeht, folgen die Argumentationen den Konzeptideen auf bemerkenswerte Weise. Die Übertragung auf kompliziertere Prozesse scheint für $S6_3$ also sinnvoll zu sein.

Problematische Aspekte

Die anfängliche Skepsis der Schülerin äußert sich in Bereich 2.1 (Mikroebene) bei der Paraphrase und den Aufgaben. Gelegentlich muss nachgefragt werden, was sie meint; in der Regel sind ihre Erklärungen aber angemessen. Ihre Unsicherheit spiegelt sich auch in ihrer Zusammenfassung wider:

> „Anfangs fand ich es eher schwierig, weil es neu war, aber es wurde etwas einfacher. Am Ende hat es Sinn ergeben. Die Higgsenergie kannte ich noch nicht.“ (Einschätzung am Ende)

Zu Beginn von Bereich 1.3 (Indikatoren) verwechselt die Schülerin die Richtung der Energieübertragung:

> „Ziel des Feldes ist es, die Energie abzugeben. Wenn es [die Magnetwägen] sich abstößt, gibt es die Energie ab. Und andersherum, wenn es sich anzieht, nimmt es die Energie auf; weil dann die Bewegungsenergie in die Feldenergie umgewandelt wird.“ (P1.3)

Das Prinzip ist richtig, den Zusammenhang von Energieübertragung und Tendenz des Feldes zu verstehen, fällt ihr aber zunächst schwer. Hier muss viel nachgeholfen werden. Am Ende kann aber davon ausgegangen werden, dass sie die Konzeptidee angenommen hat, als sie wie folgt zusammenfasst:

> „Also immer wenn die Tendenz gebrochen wird [...]. Wenn es nicht schafft, seine Tendenz durchzuführen, wenn es das nicht schafft, nimmt es die Energie auf.“ (P1.3)

Dabei wird durch Begriffe wie „nicht schaffen“ und „aufnehmen“ auch deutlich, dass sie auf die aktive Rolle des Feldes zurückgreift. Die nachfolgenden Aufgaben dieses Bereiches beantwortet sie korrekt.

Beim Übergang zum Mikrokosmos benötigt sie eine Weile, um zu verstehen, dass die Atome jeweils selbst ein Feld haben und diese sich zu einem Gesamtfeld überlagern. Die Entstehung des Gesamtfeldes und damit der Zusammenhang bzw. die Übertragung der Konzeptideen auf die Mikroebene dauern etwas länger, werden

aber am Ende verstanden (A2.1b). Bei der Bewertung zur thermischen Energie (B2.2.1) äußert sie unspezifische Skepsis, also ohne einen Grund zu nennen, warum ihr die Erklärung ungewohnt erscheint. Weitere Probleme ergeben sich in diesem Bereich aber nicht. Bei der nächsten Bewertung (B2.2.2: elektromagnetische Strahlung) ist ihr erst nicht klar, dass die Strahlung selbst ein Feld ist. Hier handelt es sich aber eher um ein Problem dadurch, dass sie sich erst daran gewöhnen muss und nicht um einen Aspekt, der inhaltlich problematisch ist. Das Gleiche gilt für die Paraphrase P3.1 (Quarkfeld), bei der sie mehr Zeit braucht, das Prinzip zu verinnerlichen.
Ähnlich zu Schülerin $S3_3$ ist ihr hier die Rolle des Higgsfeldes nicht eindeutig klar. Dies bezieht sich konkret auf den Kontext der PET (A3.2a). Die Paraphrase zuvor war aber bereits angemessen; ggf. handelt es sich hier um ein Verständnisproblem im Kontext, das aber nicht genau definiert werden kann.

12.3.7 Analyse Fall $S7_3$

Allgemeine und positive Aspekte

Mit einer Performanz von 1,88 weist die Schülerin $S7_3$ ein reibungsfreies Interview auf. Wie schon in Tabelle 12.2 ersichtlich, ergeben sich erst ab der modernen Physik Probleme, wobei die Bewertung zum Quarkfeld (B3.1) unspezifisch ist. Das bedeutet: Für sie birgt hauptsächlich nur der Bereich zum Higgsfeld Schwierigkeiten. Insbesondere zu Beginn in Bereich 1.1 zum Gesamtfeld stellt die Schülerin einige gute Nachfragen zum Zusammenhang von Kraft und Feld sowie zur Reichweite von Feldern. Es fällt auch auf, dass sie die Konzeptideen bewusst wiedergibt, anwendet und so auch auf Begriffe zur aktiven Rolle des Feldes wie „zwingen“, „wollen“ oder „versuchen“ zurückgreift. Bei der thermischen Energie ist ihr sogar bewusst, dass hier bei der Erwärmung auch das Feld der Atome eine Rolle spielen muss, da sich diese nicht bewegen „wollen“:

> „Stecken da nicht auch die Felder dahinter, da sich die Atome nicht bewegen wollen?“ (A2.2.1b)

Bei der Aufgabe zum CERN führt sie spontan die Bewegungsenergie und die „Energie der Masse“ an, ohne dabei speziell auf Higgs- und Quarkfeld einzugehen, wobei sie letzteres auf Nachfrage noch von selbst nennt. Diese Problematik mit dem Higgsfeld wird im Folgenden erläutert. Die Zusatzaufgaben wurden aufgrund der nachlassenden Konzentration ausgelassen.

Problematische Aspekte

Die erste Unsicherheit ergibt sich bei B3.1 (Quarkfeld), wo allerdings keine Einwände formuliert werden, sondern scheinbar nur unspezifisch mehr Zeit für eine gründliche Überlegung benötigt wird: „Das habe ich nicht ganz verstanden; das finde ich kompliziert."

Fehler fallen erst beim Higgsfeld (Bereich 3.2) auf. Hier ist allerdings festzustellen, dass die Aufmerksamkeit deutlich nachlässt und sich die Schülerin die Inhalte schlechter merken kann; Fragestellungen müssen öfters wiederholt werden. Sie äußert hier auch, dass sie am Ende etwas überfordert ist. Es wird an verschiedenen Stellen erwähnt und deutlich, dass sie die Rolle des Higgsfeldes und speziell den Zusammenhang mit der Masse bzw. die Bedeutung für die Elementarteilchen nicht verstanden habe:

> „Das weiß ich nicht. Ich tue mich da schwer mitzukommen und finde das sehr abstrakt. Aber ich verstehe es ungefähr. Das mit dem Higgsfeld da komme ich nicht ganz mit, ich verstehe nicht, woher das jetzt kommt." (A3.2b)

Es werden also auch hier Bedenken geäußert. Hauptsächlich wird ihr der Zusammenhang mit der Masse der Teilchen erst allmählich klar. Nach entsprechender Diskussion und gezielten Nachfragen als Hilfestellung wendet sie die Idee aber angemessen an. Dazu sei auch angemerkt, dass hier bereits der Abfall der Aufmerksamkeit und Merkfähigkeit als Folge einsetzender Müdigkeit eine Rolle spielen.

12.3.8 Analyse Fall S8/9_3: Doppelinterview

Allgemeine und positive Aspekte

Das letzte Interview der dritten Runde zeichnet sich dadurch aus, dass hier eine Schülerin und ein Schüler gemeinsam teilnehmen, da sie nicht einzeln befragt werden wollten. Das Interview verläuft reibungsfrei und fehlerfrei ($P = 2,0$). Der Schüler ist dominanter und ergreift öfter das Wort als die Schülerin. Er gibt zu, im letzten Test die Note fünf und auf dem Zeugnis eine drei gehabt zu haben. Insgesamt wirkt er aber sicher im Umgang mit den Ideen und wendet diese angemessen an. Die Schülerin äußert sich auch meist angemessen, hält sich aber in der Regel zurück und lässt dem Mitschüler den Vortritt. Er ergänzt meist auch zu ihren Angaben noch etwas. Gelegentlich wird seitens des Interviewers nachgefragt, falls die Schülerin skeptisch oder zögerlich wirkt. Für die Kodierung werden die Antworten

des Schülers verwendet, da seine Antworten nahezu unbeeinflusst von der Schülerin sind und ohnehin den Hauptteil darstellen.[3] Bemerkenswert ist insbesondere, dass sowohl der Schüler als auch die Schülerin die aktive Rolle des Feldes in ihren Sprachgebrauch übernehmen. Bereits bei der Aufgabe zu den Luftballons (A1.3a) ergibt sich folgender Konversationsabschnitt:

S8/9_3:	Da wird die Bewegungsenergie über das Feld an den zweiten Luftballon weitergegeben und der kann sich dann fortbewegen. [...]
I:	Und woran erkenne ich, dass da Energie übertragen wird?
S8/9_3:	Dass er schneller wird und der Abstand größer wird zwischen den beiden. Weil sich eine Quelle bewegt.
I:	Wie würde ich das mit der Tendenz des Felds beschreiben?
S8/9_3:	[...] Weil sich die beiden nähern und es Energie abgeben will. Und wenn sie sich nähern, dann will es sein Energieminimum behalten und deshalb drückt es den anderen Ballon weg.

Hier sei festgehalten, dass die Schüler*innen über den „Willen des Feldes“ sprechen, ohne dass dies in der Instruktion erwähnt wurde. Die Formulierung der Tendenz des Feldes sorgt also dafür, dass Schüler*innen von selbst anthropomorphe Formulierungen (wie in der zweiten Version des EFA) verwenden. Außerdem wird nicht nur auf die Tendenz des Feldes eingegangen, sondern auch auf das Prinzip der Energieminimierung.

Die CERN-Aufgabe wird für die Situation vor der Kollision mit der kinetischen Energie, der elektrischen Feldenergie und der Energie durch das Higgsfeld eingeleitet. Auf Nachfrage, wie es sich mit den Protonen verhalte, werden auch Quarkfelder erwähnt. Für die Energie nach der Kollision werden die gleichen Aspekte genannt.

Problematische Aspekte

Der einzige Aspekt, der näherer Nachfrage bedarf, ist A2.1a (Automotor), bei dem zunächst ad-hoc auf die entstehende „Hitze“ eingegangen wird. Durch die Aufforderung, dies zu spezifizieren, gelangen die beiden Schüler*innen aber von selbst zum atomaren Feld. Es liegt also kein Problem vor, sondern lediglich eine längere Überlegung.

[3] Die Äußerungen der Schülerin allein genügen nicht, um darauf basierend eine aussagekräftige Analyse durchzuführen.

12.4 Queranalyse

12.4.1 Unproblematische Aspekte

Im Verlauf der dritten Runde stellen sich einige positive Aspekte heraus. Die wesentlichen seien hier zusammengefasst: Obwohl die Feld-Attribute (u. a. Unsichtbarkeit des Feldes) nicht explizit verbalisiert werden müssen, sprechen einzelne Schüler*innen darüber, dass ein Feld „unendlich groß“ sei. Schülerin $S4_3$ antwortet beispielsweise auf die Frage, wie das Gesamtfeld entstehe: „Durch mehrere kleine Felder, die aber eh alle ziemlich groß sind.“ (A1.2b)

Durch die Wiedereinführung des Videos zum BB-Bag und zur schwingenden Kugel bzw. einem Festkörpermodell als Visualisierung der Teilchenbewegung in Bereich 2.2.1 (thermische Energie) verknüpfen alle Schüler*innen die thermische Energie korrekt mit der Teilchenbewegung. Dieser Bereich stellt keinerlei Probleme dar (Bereichswert 1,97) und manche Schüler*innen verwenden sogar treffend den Ausdruck „schwingen“, insbesondere bei den Atomen der Halterung. Es ist anzunehmen, dass dies mit dem Video des „Atom-Modells“ zusammenhängt. Hier wird also auch auf visueller Ebene eine angemessene sprachliche Vorstellung angeregt.
Ein weiterer sprachlicher Aspekt ist die Übernahme bestimmter Begriffe zur Beschreibung des Gesamtfeldes. Hier wird deutlich dessen aktive Rolle angenommen:

1. Es wird über die „natürliche“ Veränderung für die Quellen eines Feldes gesprochen (z. B. $S4_3$) und auf die Begriffe „zwingen“, „wollen“ oder „versuchen“ zurückgegriffen (z. B. $S7_3$).
2. Es fällt auf, dass auf das Wort „Tendenz“ selbst wenig zurückgegriffen wird, eher wird das entsprechende Verb (tendieren) verwendet. Noch eher wird aber formuliert, dass sich ein Feld ausdehnt oder zusammenzieht bzw. eine Abstoßung oder Anziehung vorliegt und entsprechend Energie übertragen wird. Das bedeutet, dass Formulierungen wie „Das abstoßende Feld dehnt sich aus und deshalb gibt es Energie ab.“ bevorzugt werden. Dies ist insofern hilfreich zu wissen, als solche sehr konkreten Beschreibungen scheinbar aus Sicht vieler Schüler*innen (und damit möglicherweise auch allgemein) bevorzugt und kognitiv besser verarbeitet werden.
3. Teilweise wird auch darüber gesprochen, dass das Feld bzw. die Quellen etwas „wollen“, das ist aber nicht die Regel. Die meisten Formulierungen sind weniger anthropomorph und auf die konkrete Wechselwirkung bezogen (s. o.).

4. Darüber hinaus gibt es weniger Probleme mit der Konzeptidee der Tendenz/Richtung der Energieübertragung, wenn diese mit dem Ausdruck „zwingen“ verbunden wird. So werden Formulierungen wie „Ein Feld nimmt Energie auf, wenn es von außen gezwungen wird.“ leicht übernommen und es kommt selten zu Problemen (z. B. $S5_3$ bei A1.3a).

Positiv fällt auch auf, dass einige Schüler*innen (z. B. $S3_3$) bei der Aufgabe zum Laser (A2.2.2a) nicht nur die naheliegende thermische Energie der Platte bei der Erwärmung nennen, sondern auch die Feldenergie durch das Verändern der Platte, also des Festkörpers. Die Ursache ist möglicherweise, dass die Veränderung von Festkörpern (wie z. B. das Zerbrechen eines Tisches oder Stiftes) durch Energieübertragung in das atomare Feld erklärt werden kann. Hier steht also bereits ein Modell zur Veränderung von Festkörpern und der Energie zur Verfügung, weswegen hier mit größerer Wahrscheinlichkeit auf die Veränderung der Metallplatte eingegangen wird.

Außerdem wird die Paraphrase P2.1a, bei der die Bindung von Atomen aufgrund der Energieminimierung bzw. Tendenz des Feldes beschrieben werden soll, durchweg angemessen wiedergegeben. Hier geben fast alle Schüler*innen eine treffende Beschreibung. Lediglich Schülerin $S6_3$ hat hier Probleme, da sie noch nicht verstanden hat, dass sich das Gesamtfeld auch auf mikroskopischer Ebene aus den Einzelfeldern der Atome ergibt.

Bei der Aufgabe zur Teilchenkollision am CERN (A3.2b) sprechen die meisten Schüler*innen passende Felder an (meist Higgs- und Quarkfeld). Gelegentlich wird auch die Bewegungsenergie der Protonen bzw. die entstehende elektromagnetische Strahlung erwähnt. Insgesamt wird angemessen argumentiert, sofern den Schüler*innen die entsprechenden Ideen einfallen. Hier spielt auch die Ankerheuristik der letzten zwei Bereiche zu Quark- und Higgsfeld eine Rolle, wodurch diese in fast allen Fällen genannt werden.

Zusatzaufgaben

Bei den Zusatzaufgaben zu Gravitationslinse und Rotverschiebung wurde aufgrund ihrer Schwierigkeit nicht erwartet, dass die Schüler*innen die Konzeptideen konsistent und angemessen auf die Beispiele übertragen und damit die Phänomene vollständig beschreiben können. Allerdings ist ein entsprechender Versuch mit angemessenem Rückgriff auf die zuvor erlernten Ideen ein weiteres Indiz für die allgemeine Akzeptanz des Konzeptes. Insgesamt konnte die Aufgabe A3.3a (Gravitationslinse) in sechs von acht Interviews gestellt werden. Die gravitative

Rotverschiebung (A3.3b) konnte nur zweimal angesprochen werden. Um die Ideen der Schüler*innen zu den einzelnen Aufgaben abzubilden, werden die Antworten zu beiden Kontexten im Folgenden kurz zusammengefasst.

Gravitationslinse
Wie bereits der Kodierung in Tab. 12.2 und der Längsanalyse zu entnehmen ist, können die Schüler*innen $S1_3$ und $S6_3$ eine angemessene Antwort geben. Die anderen vier Schüler*innen haben dabei Probleme. In den Fällen, wo Nachfragen und Hilfestellungen notwendig sind, versuchen die Schüler*innen, die erlernten Konzeptideen zu kombinieren, gelangen aber zu keiner adäquaten Formulierung. Beispielsweise wird nach einem Gesamtfeld gesucht, das aber nicht zur Lösung führt:

> „Die Erde hat auch ein Feld und vielleicht wechselwirken ja die beiden Feldenergien miteinander und deshalb kann man es beobachten." ($S3_3$, A3.3a)

Teilweise wird also mit dem Prinzip des Gesamtfeldes (angemessen oder auch unangemessen) argumentiert.[4] Auch auf den Begriff „Wechselwirkung" wird zurückgegriffen. Jedenfalls verwenden die Schüler*innen ausschließlich erlernte Konzeptideen, um Prozesse dieser Wechselwirkung zu beschreiben. Auf andere Konzepte wird nicht zurückgegriffen.
In zwei Fällen wird auch versucht, das Higgsfeld mit in die Argumentation einzubeziehen, wenn ad-hoc keine Lösung gefunden wird ($S3_3$, $S4_3$). Die Schüler*innen $S2_3$ und $S5_3$ gelangen zu Teilen der Lösung, können diese allerdings nicht zu einer Beschreibung zusammenfassen: „Ich dachte das elektromagnetische Feld könnte sich mit dem Gravitationsfeld [des schwarzen Loches] zu einem anderen Feld [i. e. Gesamtfeld] bilden." ($S2_3$) bzw. „Masse ist Feldenergie und weil es eine Feldenergie hat, muss es auch eine Masse haben?" ($S5_3$). Implizit wird in vielen Fällen davon ausgegangen, dass Masse und Energie sich entsprechen und dadurch die Gravitation eine Rolle bei diesem Phänomen spielt. Auch wenn dies nicht notwendigerweise zu einer sinnvollen Erklärung führt, spiegelt es dennoch die Akzeptanz der vorgestellten Ideen sowie deren sinnstiftende Verwendung wider.

Rotverschiebung
Die Rotverschiebung stellt ebenso wie die Gravitationslinse ein kompliziertes Beispiel dar. Dennoch wird von beiden Schüler*innen ($S4_3$ und $S6_3$) ein angemessener

[4] Unangemessen ist dies dann, wenn z. B. das Gesamtfeld von Strahlung und Erde oder von schwarzem Loch und Erde genannt wird. Die Beschreibungen sind dann im Rahmen der Konzeptideen vertretbar, aber für die Beschreibung des Phänomens nicht zielführend.

Problem	Schüler*innen						
	$S1_3$	$S2_3$	$S3_3$	$S4_3$	$S5_3$	$S6_3$	$S7_3$
Falsche Richtung der Energieübertragung	✗	✗		(✗)	(✗)	✗	
Begriff „Quarkfeld“ nicht übernommen					✗	✗	✗
Rolle des Higgsfeldes unklar			(✗)			✗	(✗)
Elektromagnetische Strahlung als Bewegung		(✗)	✗	(✗)			
Gesamtfeld nicht als Überlagerung				(✗)		✗	
Nähe als Bedingung für Überlagerung					✗		
Energie den Einzelfeldern zugeschrieben	✗						

Tabelle 12.4: Zusammenstellung von Problemen und Schüler*innen der dritten Runde. Die Kreuze ✗markieren, wenn ein Problem bei einem*r Schüler*in auftritt. Kreuze in Klammern kennzeichnen unspezifische Problematiken (Aufmerksamkeitsabfall, Müdigkeit Nachfragen oder mehr Zeitbedarf). Im Doppelinterview mit $S8/9_3$ treten keine spezifischen Probleme auf.

Versuch unternommen, das Phänomen aus der Energieperspektive zu beschreiben. So versucht $S6_3$ beispielsweise, über die Tendenz des Gravitationsfeldes zu einer Lösung zu gelangen:

> „Wenn die Entfernung größer wird, dann hat es nicht mehr die Tendenz, die es ursprünglich hatte. [...] Je weiter der Strahl nach oben geht, umso weniger Energie hat er, das ist entgegen der Tendenz.“ (A3.3b)

Auch $S4_3$ versucht hier, über das Gesamtfeld zu argumentieren, gelangt aber ebenfalls zu keiner vollständigen Beschreibung. Dennoch ist es bemerkenswert, dass hier mit verschiedenen Konzeptideen (Gesamtfeld und dessen Energie sowie Tendenz) eine Lösung gesucht wird.

12.4.2 Zusammenführung problematischer Bereiche und Aspekte

Die Gesamtproblematik ergibt sich in der Queranalyse durch die Integration der Problematiken der einzelnen Fälle. Tabelle 12.4 fasst die Probleme der Schüler*innen zusammen. Insgesamt entstehen wenige Probleme; außerdem sind diese, wie bereits in der Betrachtung der einzelnen Fälle deutlich wurde, oft unspezifisch und treten im Gegensatz zu den bisherigen Runden nicht mehr gebündelt, sondern vereinzelt gestreut auf (vgl. Tabelle 12.2). Probleme, die unspezifisch auftreten, also z. B. aufgrund von Aufmerksamkeitseinbrüchen, Müdigkeit, ungünstigen Fragestellungen oder unklarer Kommunikation entstehen, sind durch Klammern gekennzeichnet, wenn die Antworten grundsätzlich angemessen sind.

Die Probleme sind bereits aus den vorigen Versionen des EFA bekannt. Es entstehen also keine neuen Schwierigkeiten, sondern die bekannten bleiben allenfalls bestehen; allerdings in einem deutlich geringeren Maße, was durch die Häufigkeit und fehlende Spezifikation deutlich wird.

Dass die Richtung der Energieübertragung im Zusammenhang mit der Tendenz des Feldes für viele Schüler*innen schwierig ist, war bereits bekannt. Hier fällt allerdings auf, dass dieses Problem mit ausreichend Zeit und ggf. durch Nachfragen als Hilfestellung überwunden werden kann. Dies zeichnet sich auch dadurch ab, dass diese Probleme nicht über die nachfolgenden Konzeptideen fortpflanzen, sondern lokal ergeben und auch lokal gelöst werden können. So gehen die Probleme von Schülerin $S1_3$ beispielsweise nicht über Bereich 1.3 (Indikatoren) hinaus, nachdem der problematische Aspekt verstanden wurde. Dennoch sollte bei der Umsetzung des EFA in jedem Fall sichergestellt werden, diesen Aspekt besonders gründlich zu unterrichten.

Dass das Quarkfeld als Begriff unbekannt ist, war zu erwarten. Aus diesem Grund weichen manche Schüler*innen anfangs noch auf andere Begriffe oder Formulierungen aus, z. B. „Atome in Kernen“ (siehe $S5_3$ bei A3.1a). Dies ändert aber nichts daran, dass die Konzeptidee generell angenommen und auch größtenteils angemessen wiedergegeben und angewendet wird.
Eine Sonderrolle stellt seit seiner Einführung das Higgsfeld dar, da es im Gegensatz zu den anderen Feldern durch seine omnipräsente Natur und die Abgrenzung zur Idee des Gesamtfeldes aus der Reihe der übrigen Konzeptideen fällt. Dadurch ist seine Rolle für manche Schüler*innen zunächst unklar bzw. zu abstrakt (z. B. $S3_3$, $S6_3$). Dass hier das Higgsfeld die Ursache für die Masse der Elementarteilchen durch seine Wechselwirkung mit ihnen ist, müssen die Schüler*innen erst akzeptieren. Manche Schüler*innen nennen diese Energie der Teilchen „Higgsenergie“. Diese Formulierung könnte für das Lernen förderlich sein, um die Rolle noch weiter zu veranschaulichen. Denn das Wort Higgsenergie verknüpft das Feld mit dem zugehörigen Mechanismus, nämlich dem Zuschreiben bzw. „Verleihen“ von Energie und damit der Masse. Allerdings sollte sie nicht mit der Energie des Higgsfeldes selbst verwechselt werden, stellt keinen etablierten Fachbegriff dar und bedürfte einer fachlichen und didaktischen Analyse. Letztlich scheint auch diese Konzeptidee hilfreich für das Beschreiben von Phänomenen der Elementarteilchenphysik zu sein, da die Schüler*innen nach Möglichkeit darauf zurückgreifen. Dies sieht man auch daran, dass das Higgsfeld bei der Aufgabe zum CERN von fast allen Schüler*innen sofort genannt wird.

Ein weiteres Problem ist die Zuschreibung anderer Energien als der Feldenergie bei der elektromagnetischen Strahlung. Dieses Problem war bereits in den vorigen Versionen dominant, stellt nun aber eine untergeordnete Rolle dar. Für die meisten Schüler*innen bietet die Verknüpfung von elektromagnetischer Strahlung und Feldenergie keine Schwierigkeiten. Lediglich Schülerin $S3_3$ verbindet die Strahlung zusätzlich mit Wärme als Energieform.

Ein eher Aufgaben-spezifisches Problem ergibt sich für zwei Schüler*innen beim Automotor (A2.1a): $S4_3$ und $S5_3$ haben Probleme, die Energie dem atomaren Feld des Treibstoffs zuzuordnen. Hier sind teilweise Nachfragen nötig, um sie zur Suche nach Feldern auf der mikroskopischen Ebene zu motivieren und nicht nur den Treibstoff selbst als Energie zu bezeichnen oder das Gesamtfeld bei Auto und Treibstoff bzw. Autoreifen zu suchen.

Das Problem, dass die Energie den Einzelfeldern und nicht dem Gesamtfeld zugeordnet wird, ist in der dritten Version nahezu verschwunden. Hier wird die Energie fast ausnahmslos erst mit dem Gesamtfeld in Verbindung gebracht; lediglich Schülerin $S1_3$ braucht hier eine Hilfestellung. Ebenso tritt das Problem „Nähe als Bedingung für die Überlagerung der Felder“ nur bei einer Schülerin ($S5_3$) auf, und zwar allein zu Beginn der Befragung (A1.2b). Die Implementation der Rolle und Darstellung des Gesamtfeldes sowie dessen Zusammenhang mit der Energie erscheint in der dritten Runde also zielführend.

12.4.3 Interpretation der Beobachtungsfragen

Die Beobachtungsfragen aus der zweiten Runde werden grundsätzlich beibehalten. Es kommen allerdings durch die inhaltliche Erweiterung der zweiten Version um den Teil „Zusatz“ zwei neue Fragen hinzu, welche sich auf den Begriff des Auslösers und die Zusatzaufgaben zur Gravitationslinse bzw. Rotverschiebung beziehen (Beobachtungsfragen 10 und 11):

1. Kraftkonzept: Wird auf das Kraftkonzept oder traditionelle Energieformen anstelle des Feldkonzeptes zurückgegriffen? (Welche Rolle für die Lernperformanz spielt das Kraftkonzept für die Schüler*innen?)
2. Gelingt der Übergang von offensichtlichen zu weniger offensichtlichen Quelle-Feld Konstellationen problemlos? (Satellit und fallender Ball)
3. Übergang zur Mikroebene: Wie gut gelingt den Schüler*innen der Übergang von der makroskopischen zur mikroskopischen Ebene
4. Wird der Ausdruck „Überlagerung“ bei den Feldern verwendet? Und falls nein, was wird stattdessen verwendet?

5. Wird über das „Gesamtfeld“ gesprochen?
6. Wird der Kraft- oder Wechselwirkungsbegriff verwendet?
7. Welche Indikatoren für die Energieübertragung (aus E1.3: Abstandsänderung, Bewegungsänderung, Feldveränderung) werden verwendet?
8. Wird über die Tendenz des Feldes bzw. von der aktiven Rolle des Feldes gesprochen?
9. Wird auf das Prinzip der Minimierung der Feldenergie über P2.1 hinaus zurückgegriffen?
10. Wird der Begriff „Auslöser“ bei der Beschreibung von Energieübertragung in bzw. aus einem Feld verwendet? (neu)
11. Wie beantworten Schüler*innen die Aufgaben zur Gravitationslinse und zur gravitativen Rotverschiebung? (neu)

Die bisherigen Beobachtungsfragen 1 (Kraftkonzept) und 2 (andere Konzepte) wurden zur Beobachtungsfrage 1 für diese neue Version zusammengeführt, da sich herausgestellt hat, dass hauptsächlich auf Kräfte und traditionelle Energieformen als alternative Konzepte in den Beschreibungen der Schüler*innen zurückgegriffen wird. Die alte Beobachtungsfrage 10 (Minimierung der Energie) wurde gestrichen, da dieser Aspekt mit der Paraphrase 2.1b abgedeckt wird. Stattdessen wird mit Frage 9 beobachtet, ob dieses Prinzip auch über die Paraphrase hinaus verwendet wird. Die alten Beobachtungsfragen zur Federanalogie und zur Anleitung wurden entsprechend der Anpassung der Konzeptideen ersatzlos gestrichen. Die Darstellung/Zeichnung der Gesamtfelder (A1.1a/b) seitens der Schüler*innen ist aus technischen Gründen (andere, restriktivere Version der Videokonferenz) nicht möglich. Deshalb wird die Skizze durch eine rein verbale Beschreibung ersetzt.

Die Ergebnisse zu den Beobachtungsfragen sind in Tabelle 12.5 zusammengefasst. Sie ergeben sich aus der Analyse der einzelnen Fälle. Hier kennzeichnen grüne Symbole (Haken) eine problemlose Umsetzung, rote Symbole (Kreuze) hingegen problematische Aspekte. Ist ein Symbol in Klammern gefasst, so bedeutet dies, dass Schüler*innen zögerlich sind oder ggf. eine Nachfrage notwendig ist (grüne Symbole in Klammern) bzw. mit Nachfragen dennoch eine geringfügige Übernahme des jeweiligen Begriffes oder Konzeptes stattfindet (Kreuze in Klammern).

	Beobachtungsfrage		Schüler*innen							
			$S1_3$	$S2_3$	$S3_3$	$S4_3$	$S5_3$	$S6_3$	$S7_3$	$S8/9_3$
1	Nicht das Kraftkonzept statt Konzeptideen verwendet		✓	✓	(✓)	✓	✓	(✓)	✓	(✓)
2	Übergang von offensichtlichen zu weniger offensichtlichen Quelle-Feld Konstellationen funktioniert		(✓)	(✓)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	Übergang von makro- zu mikro-Ebene funktioniert		✓	✓	✓	(✗)	(✓)	(✗)	✓	(✓)
4	Ausdruck „Überlagerung“ verwendet		✗	✗	✓	✗	✓	✓	(✗)	✓
5	Ausdruck „Gesamtfeld“ verwendet		✓	(✓)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	Kraft- oder Wechselwirkungsbegriff angemessen verwendet	Kraft	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗
		Wechselwirkung	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✓
7	Indikatoren für Energieübertragung genannt	Abstand	✓	✓	✓	(✓)	✓	✓	✗	✓
		Bewegung	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓
		Feldveränderung	(✗)	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
8	Tendenz des (Gesamt-)Feldes bzw. aktive Rolle des Feldes		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
9	Prinzip der Minimierung der Feldenergie verwendet		✗	✓	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	✓	✓
10	Ausdruck „Auslöser“ verwendet		✗	✗	✗	✗	✗	✗	(✓)	✗

Tabelle 12.5: Beantwortung der Beobachtungsfragen zu Version 3 des EFA. Ein grüner Haken kennzeichnet, dass die Beobachtungsfrage mit „ja“ beantwortet werden kann (z. B. weil ein bestimmter Aspekt erfüllt wird). Ist die Antwort „nein“, ist dies durch ein rotes Kreuz gekennzeichnet. Die Klammer-Schreibweise kennzeichnet ein stellenweises Auftreten, wenn der Aspekt nicht öfter vorkommt.

Wie man sieht, werden die meisten Aspekte der Konzeptes konzepttreu übernommen; beispielsweise die Begriffe „Überlagerung“ und „Gesamtfeld“ (Beobachtungsfragen 4 und 5). Falls einer dieser Begriffe nicht verwendet wird, dann wird meist trotzdem eine angemessene und gleichbedeutende Formulierung verwendet, z. B. „schließen sich zusammen“. Schüler*innen, die nicht explizit den Begriff Überlagerung verwenden, umschreiben dieses Prinzip dadurch, dass sie generell von der „Bildung eines Gesamtfeldes“ oder eines „gemeinsamen Feldes“ sprechen. Ebenso wird auf die Tendenz des Feldes zurückgegriffen, insbesondere wenn es gefordert wird (Bereich 3; Beobachtungsfrage 8). Darüber hinaus etabliert sich die aktive Rolle des Feldes auch im Sprachgebrauch mehrerer Schüler*innen (s. o.). Damit geht auch die Konzeptidee zur Minimierung der Feldenergie (Beobachtungsfrage 9) einher, die von den meisten Schüler*innen angenommen und auch bei Bedarf angewendet wird. Dabei wird jedoch nicht auf den Begriff „Auslöser“ zurückgegriffen, der den Startpunkt der Energieübertragung darstellt. Die entsprechenden Prozesse werden meist adäquat beschrieben, allerdings ohne diesen Begriff.

Festzuhalten ist auch, dass keine*r der Schüler*innen auf das Kraftkonzept in einer Form zurückgreift, die mit dem EFA in Konflikt steht, also weder unangemessen noch anstelle einer EFA-Konzeptidee. Wenn Schüler*innen auf das Kraftkonzept zurückgreifen, dann verknüpfen sie dieses entweder angemessen mit den Konzeptideen oder verwenden den Wechselwirkungsbegriff in passender Weise. In der Regel versuchen die Schüler*innen, selbst bei komplizierten Beispielen wie den Zusatzaufgaben, mit den vorgestellten Konzeptideen zu argumentieren.

12.4.4 Einschätzung der Schüler*innen

Ähnlich zu den bisherigen Interviews beurteilen die meisten Schüler*innen das Unterrichtskonzept als sinnvoll ($S1_3$, $S2_3$, $S6_3$, $S7_3$) und „interessant“ bzw. „spannend“ ($S5_3$, $S6_3$, $S7_3$). Insgesamt werden die Erklärungen auch hier als verständlich und nachvollziehbar beschrieben, wie z. B. die folgende Beschreibung zeigt:

> „Ich muss sagen, ich mache gar nicht in der Schule mit und es interessiert mich nicht so, aber jetzt fand ich es echt interessant. [...] Ich finde es war für mich so ein bisschen wie Latein, wo man Vokabeln lernt und dann versteht man auf einmal, von wo ein französisches, englisches oder spanisches Wort kommt und da [im EFA] ist das halt auch so, z B. warum werden die Nudeln so schnell kalt? Halt weil man die Ursprünge und die Gründe, warum Dinge so verlaufen, sich erklären kann. [...] Ich finde es ist echt gut erklärt gewesen jetzt.“ ($S5_3$)

Offenbar erkennt Schülerin $S5_3$ den tieferen Sinn hinter den Konzeptideen. Dass sie die Inhalte im Gegensatz zum Schulunterricht hier interessant findet, spricht für das Konzept. Darüber hinaus bezeichnen mehrere Schüler*innen den Ansatz als leichter verständlich oder „besser“ geeignet als den traditionellen Schulunterricht ($S1_3$, $S2_3$, $S3_3$, $S4_3$, $S7_3$). Im Speziellen werden Aussagen wie „Hätte man es so erklärt, hätte es viele Stunden erspart in der Schule.“ ($S2_3$, $S3_3$) formuliert oder die Verständlichkeit der Zusammenhänge gegenüber dem Schulunterricht herausgestellt ($S4_3$, $S7_3$). So fasst Schüler*in $S7_3$ es wie folgt zusammen:

> „[Den EFA finde ich] besser als in der Schule, da man die Zusammenhänge tiefer versteht und so Antworten auf das warum bzw. was/wie genau bekommt, die es so mit den Energieformen in der Schule nicht gibt. Man kann sich die Inhalte so besser merken, wenn man sie versteht, anstatt sie nur auswendig zu lernen.“

Besonders positiv werden die zahlreichen Beispiele sowie deren Anschauung und (je nach Kontext) ihre Alltagsrelevanz aufgenommen. Insbesondere die zahlreichen Veranschaulichungen und der logische Aufbau, dass man „vom Kleinen zum Großen“ gelangt, wird für das Verständnis als hilfreich hervorgehoben ($S1_3$, $S2_3$ und $S5_3$). Zu den besonders beliebten Kontexten gehören das Beispiel zur Kernspaltung sowie die Veranschaulichung zur thermischen Energie mittels BB-Bag und Festkörpermodell.
Einzelne Schüler*innen merken auch an, dass es anfangs etwas dauere, sich auf das Konzept einzulassen, dass aber durch Aufbau und Beispiele ein Nachvollziehen gut möglich sei. Schüler*in S8 fasst die diese Kern-Aussage (im Rahmen von P1.3) wie folgt zusammen:

> „Die Idee von Feld und Energie und die Wechselwirkung zwischen denen [...] war immer eine Art Fakt im Unterricht, aber es wurde nie darauf hingewiesen, dass es eigentlich so schön einfach ist. Es wurde nie darauf hingewiesen, dass die alle gleich funktionieren (elektrisches Feld und magnetisches Feld, Gravitation usw.).“

Die Schüler*innen stellen also die Aspekte des Mehrwertes heraus, die bereits zu Beginn der Konzeption beabsichtigt waren. Dieser Befund zeigt das Potenzial des Ansatzes, das Energiekonzept sinnstiftend mit Feld-Ideen zu verknüpfen und inhaltlich aussagekräftig zu vermitteln, zumindest aus der Sicht der Schüler*innen. Hier sei abschließend noch die Einschätzung des Schülers S8 aus dem Doppelinterview angeführt, da er einige Aspekte des Stimmungsbildes treffend zusammenfasst. Auch die Problematik des Blackbox-Charakters der traditionellen Energieformen greift er auf:

> „Ich finde es toll, ich bin schwerst begeistert. Weil Physik eher ein Fach ist, das in Richtung Mathe geht und ein Fach ist, das den meisten schwerfällt, und ich glaube das liegt einfach daran, dass es im Gegensatz zu allen anderen naturwissenschaftlichen Fächern (z. B. Biologie, Psychologie) viel zu abstrakt ist und ich glaube ein Mensch braucht immer dieses logische Schlussfolgern. Das läuft darauf hinaus, und bei mir auch sehr oft, dass man es nicht versteht, eine Formel oder sowas, und man akzeptiert einfach, dass sie funktioniert und lernt es auswendig [...], aber das ist natürlich sehr abstrakt, wenn man überhaupt kein Verständnis dafür da ist [sic]. In anderen Naturwissenschaften wie z. B. der Biologie ist ein Verständnis da, aber so eine Art Hausverstand, wenn z. B. ein Raubtier ein anderes Tier frisst; oder in Psychologie Emotionen usw., das sind extrem menschliche Dinge, die man einfach weiß (die man einfach kennt und weiß, wie es funktioniert). Und das [i. e. die LLE] bringt sozusagen das Menschliche in die Physik hinein und geht weg von dem Abstrakten und damit können dann vielmehr Menschen auch etwas anfangen. Es bindet auch mehr und es hat auch aufmerksamer gemacht. [...] Es hat sehr viele von meinen Fragen geklärt, auch im Hinblick auf das Higgsfeld, das kannte ich [...] Ich habe bisher gewusst einzelne Dinge, aber ich habe die Verbindung zwischen diesen nicht kapiert. Jetzt macht das Ganze an sich Sinn. [...] Es war bisher auch nicht klar: was ist Energie eigentlich? Man sagt immer so potenzielle Energie und elektrische Energie und... kinetische Energie ist ja noch die, die [...] jedermann noch am einfachsten nachvollziehen kann [...] Es sind eigentlich nur so Namen [...] aber man versteht eigentlich nicht so genau was das ist und das [die LLE] hat das Ganze etwas geklärt.“

Es ist bemerkenswert, dass der angestrebte Mehrwert des Ansatzes bereits für Schüler*innen erkennbar ist und sie dies auch in dieser Form ausdrücken. Die Äußerungen sprechen dafür, dass auch bei einer Implementation im Unterricht eine gewisse Akzeptanz zu erwarten ist.

12.4.5 Zusammenführung des Überarbeitungsvorschlages

Die Konzeptideen zur Bildung des Gesamtfeldes als Überlagerung von Einzelfeldern, die Indikatoren (Tempoänderung und Abstandsänderung) sowie der Zusammenhang von Tendenz des Feldes und Richtung der Energieübertragung sowie das Prinzip der Energieminimierung werden aufgrund ihrer hohen Akzeptanz und an-

gemessenen Verwendung unverändert beibehalten. Ebenso wird der logische Aufbau des Konzeptes von makroskopischen zu mikroskopischen und subatomaren Prozessen beibehalten, da er den Lernprozess offenbar angemessen unterstützt, für die Schüler*innen sinnvoll erscheint und sogar in dieser Form begrüßt wird. Das Gleiche gilt für den Aufbau sowie die Beispiele und Kontexte beim Übergang von offensichtlichen zu weniger offensichtlichen Quelle-Feld-Konstellationen (z. B. Satellit/Erde zu Ball/Erde, Automotor, etc.). Die Begriffe „Wechselwirkung“ und „Überlagerung“ werden wegen ihrer Bedeutung und Sinnhaftigkeit für das Konzept sowie der Tatsache, dass einige Schüler*innen diese Begriffe explizit in ihre Beschreibungen integrieren, ebenfalls beibehalten.

Die bekannten Probleme zum Gesamtfeld (siehe Tab. 12.4) in Verbindung mit der Überlagerung von Einzelfeldern und Zuschreibung der Energie stellen in dieser Runde nur in wenigen Einzelfällen Schwierigkeiten dar. Deshalb kann man davon ausgehen, dass die Anpassungen und insbesondere die sorgfältige Erläuterung einzelner Aspekte der Konzeptideen (vgl. Kapitel 11) zielführend waren. An der Gestaltung kann entsprechend festgehalten werden.

Auf den Begriff „Auslöser“ wird nur einmal von Schülerin $S7_3$ in der entsprechenden Paraphrase (P2.1: Mikrokosmos) zurückgegriffen, als er eingeführt wird. Darüber hinaus verwendet aber kein*e Schüler*in diesen Ausdruck, weswegen er soweit als nicht notwendig für das Verständnis der Konzeptideen eingeschätzt wird. Scheinbar ist die Tatsache, dass sich ein Feld verändert, sobald es die Möglichkeit dazu hat, ausreichend, um die Tendenz des Feldes mit der Entstehung von Bindungszuständen zu beschreiben. So können Schüler*innen die Stabilität von Molekülen (Konzeptidee Mikrokosmos 2.1) und Kernen (Konzeptidee Quarkfeld 3.1) erkennen, dass es einen Grund braucht, damit sich diese Zustände „minimaler Energie“ verändern. Da die Verwendung des Begriffs Auslöser weder zu Missverständnissen oder Problemen führt, noch hinderlich für den Lernprozess erscheint, wird er für die weiterentwickelte Konzeptversion vorerst beibehalten. So kann dessen Attraktivität bzw. Notwendigkeit auch in anderen Setting weiter überprüft werden. Sollte der Begriff weiters nicht aufgenommen werden, kann er ausgelassen werden.

Richtung der Energieübertragung und moderne Physik
Die Richtung der Energieübertragung stellte bereits im zweiten Zyklus eine Schwierigkeit dar. Dieser Befund festigt sich, da auch hier drei Schüler*innen ($S1_3$, $S2_3$, $S6_3$) Hilfestellungen benötigen, um den Zusammenhang korrekt zu erkennen.

Die Beispiele zur Unterstützung der Konzeptidee sowie die Idee selbst scheinen produktiv für Schüler*innen zu sein. Denn sobald sie diese verstanden haben, greifen sie für Argumentationen darauf zurück, insbesondere auf die Tendenz des Feldes. Für die weitere Umsetzung und Evaluation des EFA scheint eine Anpassung der Idee weniger notwendig als die deutliche Betonung dieses Aspektes. Die Erläuterungen des Prinzips müssen sorgfältig erfolgen und Schüler*innen genügend Gelegenheit für Nachfragen und logisches Nachvollziehen bieten. Mehrere Beispiele sollten dabei helfen.

Gleiches gilt für den Begriff „Quarkfeld“. Der Begriff scheint anschlussfähig für Schüler*innen zu sein, ist aber wie erwartet bei vielen unbekannt. Aus diesem Grund braucht es auch hier ausreichend Eingewöhnungszeit, damit sie den Terminus übernehmen und nicht etwa mit dem Ausdruck „Atome in den Kernen“ ($S5_3$) verbleiben. Die elektromagnetische Strahlung von der Bewegungsenergie abzugrenzen gelingt hier besser als in den ersten beiden Versionen, bedarf aber auch Sorgfalt. Hier ist es nützlich, Schüler*innen ihre Bedenken äußern zu lassen und diesen explizit zu begegnen, z. B. indem man bei Bedarf das Photon in die Ideen einbettet. Die Rolle des Higgsfeldes muss bewusst von den anderen Konzeptideen abgegrenzt werden. Gelingt eine schlüssige Argumentation, warum es hier kein Gesamtfeld gibt und wie das Feld für die Masse der Elementarteilchen sorgt, greifen Schüler*innen darauf zurück. Dies spiegelt sich auch durch die Nennung bei der Aufgabe zum CERN (A3.2b) wider.

12.5 Vergleich zur zweiten Runde und Resümee

Die dritte Version des EFA zeichnet sich durch eine hohe Akzeptanz und Übernahme der Konzeptideen sowie einer besonders positiven Einschätzung des EFA seitens der Schüler*innen aus. Dies äußert sich darin, dass keine bisher unbekannten Probleme auftreten und sich bereits bekannte nur in weniger rigider Form manifestieren. Ausgesprochen positiv erscheint auch der Rückgriff der Schüler*innen auf die Ideen zur aktiven Rolle des Feldes. Neben Anthropomorphismen wie *das Feld will sich zusammenziehen* werden an manchen Stellen auch andere Formulierungen wie die Felder *schließend sich zusammen* oder ein Feld *wird gezwungen* verwendet. Auch wenn in manchen Fällen über den Willen des Feldes gesprochen wird, gestalten sich die Betrachtungen stets angemessen.[5] Wie bereits von DiSessa (2017) festgehalten wurde, gibt es kein Indiz dafür, dass Schüler*innen davon ausgehen, unbelebte Objekte hätten einen wirklichen Willen. Die Ergeb-

[5] Diese extreme Anthropomorphisierung ist allerdings eine Ausnahme.

nisse stützen diese Aussage, denn die Befragungen bieten keine Anzeichen eines problematischen Umgangs mit Anthropomorphismen.

Die Attraktivität der Konzeptideen und des Feldes als Akteur in Prozessen scheint für Schüler*innen produktiv zur Beschreibung von Phänomenen zu sein. Auch der Wechselwirkungsbegriff wird dabei angemessen inkorporiert. Dies erkennt man daran, dass selbst in komplizierten Situationen anschließend auf Konzeptideen zurückgegriffen wird, während bei der zweiten Version des EFA stellenweise noch andere Konzepte verwendet werden.

Im direkten Vergleich ist die Performanz der dritten Version in allen Bereichen etwa gleich oder besser als in der zweiten Runde. Die Bereiche 1.1 bis 1.3 der Basisideen sowie 2.2.1 (thermische Energie) und im Besonderen die moderne Physik (3.1 und 3.2) weisen eine deutliche Verbesserung auf. Auffallend ist auch der Bereichswert von 1,97 für die thermische Energie (vorher 1,63), die auch auf die angebotene Visualisierung durch das BB-Bag und das Festkörpermodell zurückzuführen ist. Außerdem weisen einige Aspekte weniger bzw. keine Probleme mehr auf, die in der zweiten Version noch deutlichere Schwierigkeiten bereiteten. So fällt den Schüler*innen beispielsweise der fallende Ball (A1.3c) in der dritten Version deutlich leichter und die Indikatoren (Bereich 1.3) führen zu weniger Problemen ($P = 1,8$ im Vgl. zu 1,74 vorher). Der Zusammenhang von Richtung der Energieübertragung und Tendenz des Feldes fällt zwar einigen Schüler*innen auch in der dritten Version schwer, ist aber vergleichsweise deutlich besser geworden.

Insgesamt verbessert sich die Performanz der Stichprobe von 1,80 auf 1,89 bzw. für die spezifische Kodierung sogar auf 1,93 und weist keine problematischen Bereiche mehr auf. Die Probleme treten im Gegensatz zur vorherigen Version nicht mehr gruppiert (in Clustern) auf, sondern sind unspezifisch verteilt. Damit ist das Ziel der Akzeptanzbefragungsstudie erreicht und die angepasste Version des EFA kann in einem größeren Setting weiter evaluiert werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Erklärungen von schwierigen Bereichen und Aspekten wie beispielsweise Bereich 1.3 (Indikatoren) und die moderne Physik sorgfältig und ausführlich unterrichtet und durch anschauliche Beispiele unterstützt werden.

KAPITEL 13

Erhebung im Klassensetting: Design

Die Durchführung und Evaluation der Interviews zum Energie-Feld-Ansatz stellen den Ausgangspunkt für die Erprobung des Konzeptes in einem größeren Rahmen dar. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass Schüler*innen die Konzeptideen bei Instruktion nach dem Energie-Feld-Ansatz in Einzelinterviews angemessen wiedergeben und in Kontextaufgaben anwenden können. Als weiteren Schritt wird eine Lehr-Lern-Einheit konzipiert, die auf den bisher evaluierten Konzeptideen und Kontexten basiert. Diese LLE wird dann nicht im Einzelgespräch, sondern in einer authentischen Unterrichtssituation erprobt. Ziel ist dabei die Untersuchung des Konzeptes auf seine Umsetzbarkeit im realen Klassensetting. Dabei soll also die Frage beantwortet werden, wie Schüler*innen über das Konzept des EFA lernen, wenn sie nach der konzipierten LLE im authentischen Klassensetting von ihrer Lehrperson unterrichtet werden. Für die Beantwortung dieser Frage wird die LLE in der Sekundarstufe II (Jahrgangsstufen 10, 11 und 12) von der jeweiligen Physik-Lehrperson unterrichtet und anschließend mittels qualitativer Prä- und Posttests evaluiert.

Natürlich müssen bei der Umsetzung Entscheidungen betreffend der Rahmenbedingungen und Einschränkungen getroffen werden. Diese Entscheidungen über Limitationen anhand ihrer Vor- und Nachteile sowie das Design der LLE und der Evaluationswerkzeuge werden im Folgenden erläutert. Zuerst wird die Kommunikation mit den Lehrpersonen beschrieben. Darauf folgt eine Darstellung des Designs der LLE, gegliedert nach den Materialien für die Lehrpersonen (Handreichung, Arbeitsblätter). Im Anschluss wird das Design des verwendeten Testinstruments

(Prä- und Posttest) beschrieben. Durchführung und Auswertung der Erprobung richten sich nach der in Kapitel 5.5 beschriebenen Methode.

13.1 Kommunikation mit den Lehrpersonen

Für die Erprobung werden über Schulen und Personen mit Kontakt zur Universität Lehrpersonen gebeten, das Konzept zu erproben. Dabei wird von den Lehrpersonen auch Werbung bei Kolleg*innen gemacht. Lehrpersonen, die daran interessiert sind, das Konzept in ihrer/n Klasse/n zu unterrichten, werden kontaktiert. Der Erstkontakt besteht darin, die zeitlichen Rahmenbedingungen abzuklären. Den Lehrpersonen wird erläutert, dass insgesamt sechs Schulstunden in einer zehnten, elften oder zwölften Jahrgangsstufe für die Durchführung des Konzeptes und die begleitende Erhebung benötigt werden. Darüber hinaus erhalten sie einen Artikel mit Erläuterungen zum Energie-Feld-Ansatz (Becker und Hopf, 2021) als erste Lektüre. Können sich Lehrpersonen anschließend vorstellen, das Konzept in ihren Klassen zu unterrichten, erhalten sie Zugriff auf die Handreichung, eine zugehörige Folienpräsentation und Arbeitsblätter, um sich einen genaueren Überblick zu verschaffen. Gleichzeitig werden sie zu einer Vorbesprechung eingeladen, in dem dann weitere formale und organisatorische Aspekte sowie die Umsetzung des Konzeptes besprochen werden (Instruktion). Im Anschluss an die Erprobung werden die Lehrpersonen in einer Nachbesprechung befragt, wie sie die Umsetzung erlebt haben.

13.1.1 Vorbesprechung und Instruktion

Die Eingangsinstruktion der Lehrpersonen erfolgt individuell, d. h. jede Lehrperson wird einzeln über das Konzept und die LLE aufgeklärt und auf die in der Handreichung beschriebenen Kernaspekte hingewiesen. So kann bestmöglich auf Verständnisschwierigkeiten und individuelle Bedürfnisse reagiert werden. Im Einzelgespräch kann somit ein besseres Feedback erreicht und sichergestellt werden, dass die Lehrperson die wesentlichen Informationen angenommen hat. Die Instruktion erfolgt dabei im Dialog anhand der Handreichung mit wesentlichen Basisinformationen zur Umsetzung und einer Beschreibung der LLE. Die Lehrpersonen können und sollen also Fragen äußern und klären, die sich nach dem Lesen der Handreichung ergeben. In der Handreichung erhalten sie auch Hinweise zur Umsetzung von Erklärungen, Experimenten und Tipps zum Umgang mit möglichen Lernschwierigkeiten der Schüler*innen. Die Handreichung orientiert sich logisch und inhaltlich an der letzten Version der Akzeptanzbefragungen und stellt damit

den zentralen Leitfaden für die Durchführung der LLE dar. Durch die Orientierung an der Handreichung und die Betonung sowie Erläuterung der wesentlichen Aspekte des Konzeptes soll sichergestellt werden, dass die Kernaussagen erkannt werden. Dazu zählt, dass Hinweise und Tipps zu Erklärungen, Erläuterung von Beispielen und Durchführung von Experimenten gegeben wird. Die Lehrpersonen werden über mögliche Lernendenschwierigkeiten aufgeklärt. Außerdem wird erläutert, welche Begriffe wesentlich sind und beibehalten werden sollen (z. B. *Gesamtfeld* oder *Tendenz des Feldes*). Insgesamt wird also herausgestellt, welche Aspekte konzepttreu beibehalten und worauf besonders geachtet werden soll.
Darüber hinaus wird erörtert, an welchen Stellen Spielraum bei der Umsetzung besteht. Beispielsweise kann bei erweiternden Beispielen (z. B. schwingende Magnetringe oder die Zusätze zu Gravitationslinse und Rotverschiebung am Ende der LLE) auch zeitlich gekürzt werden, wenn der Unterrichtsverlauf dies zulässt. Den Lehrpersonen wird deutlich gemacht, dass die Schüler*innen die Konzeptideen und Eingangsbeispiele unbedingt verstehen sollen und erweiternde Beispiele oder Aufgaben bei Zeitknappheit gekürzt werden können. Insbesondere kann an solchen Stellen auch auf die Dynamik der Klasse reagiert werden, wenn z. B. die Schüler*innen eine bestimmte Konzeptidee bereits angenommen und übertragen haben. Hier kann die Lehrperson die Klasse individuell besser einschätzen und beurteilen, welchen Stellen mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden muss und wo Flexibilität besteht. Des Weiteren wird eingeräumt, dass es den Lehrpersonen frei steht, die Durchführung der LLE zu verlängern. Das heißt, sollten die Lehrpersonen mehr Zeit als die geplanten vier Unterrichtsstunden (plus insgesamt zwei für Prä- und Posttest) zur Verfügung haben, dürfen sie länger unterrichten bzw. die Zusätze mit einbeziehen. Diese Option soll den Lehrpersonen die Freiheit geben, die Inhalte nach eigenem Ermessen auf die verfügbare Zeit aufzuteilen.

13.1.2 Zusatzinformationen zur Verlaufskontrolle

Am Ende der Instruktion werden die Lehrpersonen gebeten, für jede Unterrichtsstunde ein kurzes Verlaufsprotokoll zu führen. Dabei soll jeder Eintrag kurz festhalten, was aus ihrer Sicht gut funktioniert hat, wo Probleme oder Schwierigkeiten aufgetreten sind und warum, bzw. welche Aspekte wie verbessert werden können. Auf diese Weise soll die Reflexion der Lehrpersonen über das Unterrichtete gesichert sowie Eindrücke zu etwaigen Benefits bzw. Besonderheiten oder Problemen in der Realsituation dokumentiert werden. In der Nachbesprechung haben sie dann die Möglichkeit, etwaige Punkte anzuführen und zu diskutieren. Aufgrund der COVID-19 Maßnahmen waren begleitende Beobachtungen nicht möglich. Lediglich eine exemplarische Stunde bei einer Lehrperson konnte besucht werden.

13.1.3 Materialien

Jede Lehrperson wird während der Instruktion auf die zur Verfügung stehenden Materialien hingewiesen. Neben der Handreichung zählen dazu eine passende Folienpräsentation, Arbeitsblätter mit Lösungen, Prä- und Posttests sowie eine Zusammenstellung von Materialien zum Experimentieren und ein zugehöriger Hinweiszettel. Bis auf die Präsentation werden den Lehrpersonen alle Materialien in gedruckter Form sowie zum Herunterladen online in einem Dateiordner zur Verfügung gestellt. Die Folienpräsentation wird den Lehrer*innen lediglich digital zur Verwendung mit eigenen Geräten gegeben. Für die technische Ausstattung vor Ort (Laptop, Beamer, etc.) muss selbst gesorgt werden.

Die Folienpräsentation orientiert sich an der Präsentation der Akzeptanzbefragungen und greift die Abbildungen und Experimente der LLE aus der Handreichung auf. Ihr Zweck ist die graphische Unterstützung von Erklärungen und der Demonstration von Experimenten im Unterricht. Die Lehrpersonen sind angehalten, die Experimente (z. B. die zwei auseinander fahrenden Magnetwägen) in der Realsituation vorzuführen. Sollte dies allerdings aus irgendeinem Grund nicht möglich sein oder der Unterricht in einem online- oder hybriden Setting stattfinden, können sie auf die Präsentation als Alternative zurückgreifen. Dort sind auch die durchzuführenden Experimente als Kurzvideos (bzw. ein Link zur Simulation der Satellitenbewegung) zu finden. Auf die einzelnen Folien der Präsentation wird auch in der Handreichung an den entsprechenden Stellen verwiesen.

Der Unterricht wird weiters durch ein Angebot an Arbeitsblättern unterstützt. Diese gliedern sich thematisch und nach den Aufgaben der LLE und werden ebenfalls an den entsprechenden Stellen in der Handreichung erwähnt. Die zugehörigen Lösungen gibt es sowohl als Lösungsblatt als auch in der Handreichung bei der entsprechenden Aufgabe. Die Lehrpersonen bleiben flexibel darin, mit welcher methodischen Gestaltung, in welcher Sozialform bzw. in welchem Rahmen sie die Arbeitsblätter im Unterricht einsetzen.

Für die wesentlichen Experimente werden Experimentiermaterialien sowie eine Materialliste und ein zugehöriger Hinweiszettel zur Verfügung gestellt. Zu den Experimenten zählen die beiden auseinander fahrenden bzw. umkehrenden Magnetwägen, die schwingenden Magnetringe, die elektrostatisch geladenen Luftballons und das BB-Bag für die Veranschaulichung der mikroskopischen Bewegungsenergie der Luft-Atome (Beispiel Fadenpendel). Der Hinweiszettel gibt dabei Tipps

zur Durchführung der Experimente[1]. Für die Erhebung werden den Lehrpersonen auch Prä- und Posttest in entsprechender Stückzahl ausgedruckt.
Zusätzlich zu Handreichung und unterstützenden Präsentationsfolien wird zu jedem Abschnitt der Handreichung (siehe Abschnitt 13.2) ein Arbeitsblatt zur Verwendung im Unterricht zur Verfügung gestellt. Sie umfassen Aufgaben, die in der Handreichung beschrieben sind.

13.1.4 Nachbesprechung mit den Lehrpersonen

Im Anschluss an die Erprobung werden die Lehrpersonen wieder zu einem Einzelgespräch eingeladen und gefragt, wie sie die Umsetzung der LLE empfunden haben. Dabei soll herausgefunden werden, inwiefern sie die LLE konzepttreu unterrichtet haben und wo eventuell Abweichungen bzw. Änderungen erfolgt sind. Gegebenenfalls werden Fragen bzw. Schwierigkeiten diskutiert. Außerdem soll das von den Lehrpersonen geführte Verlaufsprotokoll (Erhebungstagebuch) als Grundlage dienen, um Benefits und Schwächen des Konzeptes zu identifizieren. Dabei sollen sie folgende Punkte festhalten:

- Was hat gut funktioniert?
- Was ist nicht so gut gelaufen und warum?
- Welche (unerwarteten oder erwarteten) Schwierigkeiten sind aufgetreten?

Das Gespräch orientiert sich neben Fragen zur allgemeinen Umsetzung an der Handreichung. So sollen die Lehrpersonen beim erneuten Durchgehen dieser an entsprechenden Stellen kognitiv stimuliert und an Auffälligkeiten erinnert werden.

13.2 Handreichung

Die Handreichung stellt als Zusammenstellung von Erklärungen, Beispielen, Kontexten und Experimenten sowie Hinweisen zu Konzeptideen, Umsetzung und Lernschwierigkeiten die Verschriftlichung des Unterrichtskonzeptes und damit die Grundlage der LLE dar. Anhand dieser Grundlage sollen Lehrpersonen ihren Unterricht unter Verwendung der angebotenen Materialien strukturieren und gestalten. Die Handreichung stellt also als Produkt des Designprozesses den Orientierungsrahmen der LLE für die Lehrer*innen dar. Wie bereits erläutert, folgt die logische und inhaltliche Gestaltung der Handreichung der letzten Version des Interviewleitfadens. Deshalb wird im Folgenden nur auf die wesentlichsten Aspekte und

[1] Hier wird beispielsweise darauf hingewiesen, dass sich die zwei umkehrenden Magnetwägen in der Mitte am Umkehrpunkt nicht berühren sollten, um die Verwechslung mit einem mechanischen elastischen Stoß mit Kontakt zu vermeiden.

Besonderheiten eingegangen. Details und die genauen Formulierungen können der Handreichung entnommen werden (siehe Anhang F).

13.2.1 Struktur der Handreichung

Das Dokument ist so aufgebaut, dass die Lehrpersonen zunächst einige Basisinformationen zur Handreichung und zum Konzept erhalten. Anschließend gliedert es sich in die folgenden Teile:

Einführung: Phänomenologie der Energie und Überblick
Teil 1: Energie in Feldern

- Grundbegriff des Feldes
- Das Gesamtfeld
- Tendenz des Gesamtfeldes
- Energie im Gesamtfeld

Teil 2: Energieübertragung (und Indikatoren)
Teil 3: Arten von Feldern und thermische Energie

- Atomare Felder
- Elektromagnetische Strahlung
- Thermische Energie

Teil 4: Moderne Physik

- Quarkfelder
- Higgsfeld

Zusatz: Gravitationslinse und gravitationsbedingte Rotverschiebung

Die einzelnen Teile sind in Bereiche von Konzeptideen unterteilt und beinhalten Erklärungsangebote. Die entsprechenden Konzeptideen werden zum besseren Überblick in der Handreichung stets zu Beginn eines Abschnitts in einem Kasten angegeben. Zusätzlich gibt es praktische und didaktische Hinweise zur Umsetzung (z. B. zu Erklärungen, Lernendenvorstellungen oder zur Durchführung von Experimenten). Darüber hinaus werden Aufgaben sowie Lösungen analog zum Interviewleitfaden beschrieben. An wesentlichen Stellen wird auf die begleitenden Präsentationsfolien hingewiesen, welche die Grafiken der Handreichung aufgreift und unterstützende Videos beinhaltet.

13.2.2 Basisinformationen für Lehrpersonen

Die Lehrpersonen erhalten auf den ersten drei Seiten Basisinformationen zu folgenden Punkten:

- Einleitung zur Handreichung
- Materialien
- Spielraum (Anpassungen)
- Farbschema/Gestaltung der Handreichung
- Grundstruktur des Konzeptes und Umsetzung
- Limitationen
- Prä- und Posttest
- Ziel des Konzeptes

Zunächst erhalten die Lehrpersonen in einer kurzen Einleitung Informationen zum Sinn und Ziel der LLE und Handreichung. Darauf folgt ein kurzer Überblick über die Materialien. Sollte eine Durchführung von Experimenten vor Ort nicht funktionieren, gibt es die Möglichkeit, auf Abbildungen und kurze Videos in den Präsentationsfolien zurückzugreifen. Unter „Spielraum“ wird erläutert, in wie weit die eigene Unterrichtsgestaltung der Lehrpersonen in die Durchführung mit einfließen darf. So sollen beispielsweise der Aufbau von Erklärungen und wesentliche Begriffe (z. B. „Gesamtfeld“ oder „Tendenz“) möglichst beibehalten werden. Außerdem soll auf die angegebenen Beispiele und Aufgaben zurückgegriffen werden. In der methodischen Gestaltung wird den Lehrpersonen Freiraum gelassen, Sozialform, Medien, Tempo und individuelle Aktivierung der Schüler*innen) des Unterrichts angeht. Wichtig ist, dass die LLE konzepttreu durchgeführt wird, d. h. dass die Struktur der Inhalte, insbesondere der Konzeptideen und Kontexte, beibehalten wird. Der Abschnitt „Grundstruktur des Konzeptes“ gibt einen Überblick über den Inhalt und den logischen Zusammenhang der Bereiche. Darauf folgen Hinweise zu Limitationen. Die Basisinformationen schließen mit Hinweisen zu Prä- und Posttest sowie einem kurzen Hinweis zum Ziel des Energie-Feld-Ansatzes.

13.2.3 Abweichungen zum Interviewleitfaden

Für die LLE wurde in der Handreichung neben den restlichen Beispielen aus dem letzten Zyklus von Akzeptanzbefragungen auch das Experiment zu den schwingenden Magnetringen aufgenommen. Dieses stellt als einziges Beispiel den Energie-Austausch zwischen magnetischem Feld, Gravitationsfeld und Bewegung dar und kann im Anschluss an die Besprechung der Magnetwägen als erweiterndes Beispiel diskutiert werden. Außerdem wird die Reihenfolge der Konzeptideen zu elektro-

magnetischer Strahlung und thermischer Energie getauscht. Da die elektromagnetische Strahlung mit der Feldenergie verknüpft wird, sollte die Besprechung logisch an die anderen Felder (atomares Feld, Bsp. Schleuder und Muskelkontraktion) anknüpfen. Dann folgt die Einordnung der thermischen Energie als mikroskopische Bewegungsenergie.

13.3 Testinstrument

13.3.1 Design-Entscheidungen zum Testinstrument

Die Erprobung im Klassensetting wird mittels eines Testinstruments evaluiert, bestehend aus einem schriftlichen Prätest kurz vor der Durchführung und einem Posttest direkt im Anschluss an den EFA-Unterricht. Dafür ist jeweils eine Schulstunde vorgesehen. Dabei soll das Konzept-Verständnis der Schüler*innen untersucht werden – im Sinne der Fähigkeit der Schüler*innen, die Inhalte des Konzeptes angemessen wiederzugeben und in Kontexten anzuwenden. An dieser Stelle wird nicht auf herkömmliche bzw. bereits existierende Items aus Testinstrumenten zur Energie zurückgegriffen, sondern neue offene Items erstellt (Posttest siehe Anhang G). Die Items von Prä- und Posttest sind dabei (bis auf die Basisdaten, s. u.) identisch, um die Veränderung des Antwortverhaltens der Schüler*innen zu untersuchen. Es handelt sich um offene Items (Fragen und Aufgaben), die sich an den in der LLE diskutierten Beispielen und Aufgaben orientieren. Die Problematik eines „teaching to the test“ ist hier weniger relevant, da es bei der Erhebung um die Einschätzung der generellen Umsetzbarkeit des EFA geht. Übernehmen Schüler*innen die Konzeptideen und zeigt die Evaluation Benefits des Konzeptes auf, so spricht dies für das Potenzial und die weitere Untersuchung des Ansatzes.

Die Aufgaben und Beispiele aus der Perspektive von Energie und Feldern zielen auf Beschreibungen von Prozessen ab. Es wird also geprüft, inwiefern Schüler*innen die vermittelten Inhalte des Konzeptes wiedergeben und anwenden können. Ähnlich wie bei den Akzeptanzbefragungen wird hier auf die qualitative Untersuchung des Verständnisses fokussiert. Dementsprechend stellen die meisten Items qualitative (offene) Fragen bzw. Aufgabenstellungen dar, bei denen die Schüler*innen Prozesse beschreiben sollen. Da die Schüler*innen aufgefordert werden, die Fragen wenn möglich aus der Perspektive von Bewegungen und Feldern zu beschreiben, können durch den Vergleich von Prä- und Posttest Informationen über den Umgang der Schüler*innen mit dem unterrichteten Konzept und deren Rückgriff auf die vermittelten Konzeptideen gewonnen werden.

Konstrukt	Item	Skala	Zeitpunkt/Stelle
Interesse (selbst eingeschätzt)	1	5-stufige Likert-Skala	Beginn Prätest
Note Physik (letztes Zeugnis)	15	Notenstufen 1 bis 5	Ende Prätest
Kernidee der letzten Physikstunden	1	offene Frage	Beginn Posttest
Einschätzung des Konzeptes	15	5-stufige Likert-Skala	Ende Posttest
Positive Eindrücke	16	offene Frage	Ende Posttest
Verbesserungsvorschläge	17	offene Frage	Ende Posttest

Tabelle 13.1: Überblick über die sich unterscheidenden Items von Prä- und Posttest der Erhebung im Klassensetting

13.3.2 Erhebung von Basisdaten und Kodierung

Auf die Erhebung psychometrischer Daten bzw. weiterer Aspekte wie z. B. die kognitive Belastbarkeit, das Transfervermögen, Vorwissen, Selbstkonzept oder die Sprachkompetenz wird hier verzichtet. Grund dafür ist neben den zeitlichen Rahmenbedingungen der bedingte Nutzen für die Evaluation. Derartige Informationen bieten nur eine geringfügige Auskunft darüber, wie geeignet das Konzept in seiner Umsetzbarkeit ist und werden erst bei einer breiteren Vergleichsstudie zwischen EFA-Konzept und traditionellem Energieunterricht in eventuellen Folgestudien relevant. Stattdessen werden einzelne Aspekte für eine detaillierte Abbildung der Stichprobe erhoben (siehe Tab. 13.1 und 13.2).

Die Selbst-Einschätzung des allgemeinen Interesses an Themen der Physik soll ein (sehr grobes) Abbild der Klassen erstellen. Dieses wird über eine 5-stufige Likert-Skala von ‚überhaupt nicht' (1) bis ‚sehr interessiert' (5) erhoben.[2] Da es sich bei den Inhalten des EFA durchaus auch um abstrakte bzw. stark fachlich ausgerichtete Inhalte handelt (z. B. moderne Physik), gibt es möglicherweise einen Zusammenhang von Interesse und Performanz der Schüler*innen. Jedenfalls wird dieses Item erhoben, um einen Eindruck von der entsprechenden Klasse zu gewinnen und die Ergebnisse klassenübergreifend vergleichen zu können. Um eine vom Thema unabhängige und möglichst unvoreingenommene Antwort zu erhalten, steht dieses Item am Beginn des Prätests (siehe Tab. 13.1).

Die letzte Zeugnisnote in Physik wird ebenfalls zur Einschätzung einzelner Performanzen von Schüler*innen im klasseninternen Vergleich erhoben. Zwar ist die letzte Zeugnisnote eine klassenspezifische Bezugsgröße und damit nur bedingt ver-

[2] Hier wird bewusst nur eine grobe Abschätzung des Interesses erhoben.

gleichbar, sollte aber dennoch erhoben werden, um ggf. die Performanz von schwächeren Schüler*innen einordnen zu können.[3]

Am Ende des Posttests wird die Einschätzung der Schüler*innen (‚Gefallen') zum Konzept über eine 5-stufige Likert-Skala von ‚überhaupt nicht' (1) bis ‚sehr gut' (5) erhoben. Zum einen bewerten sie damit den Gesamteindruck der letzten Schulstunden, zum anderen formulieren sie anschließend in zwei offenen Items konkret, was ihnen besonders gefallen hat und wo sie Verbesserungsmöglichkeiten sehen. Diese Items erfassen das Stimmungsbild nach der LLE. Je nachdem, ob Schüler*innen hier positives oder negatives Feedback geben und ob dieses spezifisch auf die Umsetzung der entsprechenden Lehrperson oder auf das Konzept selbst zurückgeführt werden kann, sind Rückschlüsse auf die grundsätzliche Umsetzbarkeit und Attraktivität der LLE und damit auch des Konzeptes möglich.
Um Prä- und Posttest eines*r bestimmen Schüler*in zuordnen zu können, erstellen die Schüler*innen auf der ersten Seite von Prä- und Posttest einen Code aus personenbezogenen Daten (erste Buchstaben des Vornamens der Mutter, Geburtsmonat, etc.). So können die Tests anonym kodiert sowie Prä- und Posttests einander zugeordnet werden.[4] Für die Auswertung und Evaluation wird den einzelnen Schüler*innen eine fortlaufende Nummer zugewiesen.

13.3.3 Design der Items

Die inhaltlichen Items sollen das Verständnis der Schüler*innen zum EFA erfassen. Dazu werden Items (Fragen und Aufgaben) zum Thema Energie entwickelt, die sowohl mit Formulierungen des traditionellen Energieunterrichts (Energieformen oder Kräfte) als auch mit den Konzeptideen des EFA beantwortet werden können. Die inhaltlichen Items sind für eine Vergleichbarkeit in Prä- und Posttest identisch. Prä- und Posttest unterscheiden sich also nur in den Items zu den Basisdaten bzw. zur Kernidee und Einschätzung des Konzeptes. Insgesamt umfassen die Tests jeweils elf offene Items (Beschreibung eines Prozesses) und zwei Multiple-Choice (MC) Items. Eine Auflistung aller Items und die dabei relevanten Konzeptideen sind in Tab. 13.2 aufgelistet. Zwecks Übersichtlichkeit sind die genauen Formulierungen der Items dem Anhang G zu entnehmen. Insgesamt wird darauf geachtet, klar definierte Operatoren für die Aufgabenstellungen zu verwenden. So werden bis auf wenige Ausnahmen die Formulierungen „erkläre", „konstruiere",

[3] Insbesondere auch zusammen mit der Angabe des allgemeinen Interesses können hier schlechtere Werte als Koinzidenz Aufschluss über eine eventuell schwächere Performanz im klasseninternen Vergleich geben.

[4] Beispiel: Maxim Mustermensch geht in die Klasse 11a und die Mutter heißt Sophie. Maxim wohnt in der Musterstraße, wurde im April geboren und hat folglich den Code 11aSoMu04.

„beschreibe“, „begründe“, „kreuze an“ verwendet. Bei einzelnen Items, bei denen die Energie einem bestimmten System (z. B. Feld oder Bewegung) zugeordnet werden soll, werden auch andere Formulierungen verwendet („Wo befindet sich...?“ oder „Warum geht hier scheinbar Masse verloren?“). Damit sich die Schüler*innen in ihren Antworten auf die wesentlichen Aspekte beschränken, werden die Fragen bzw. Aufgaben kurz und prägnant formuliert und der Platz für Antworten durch Linien vorgegeben.

Der Posttest beginnt mit einem offenen Item (I1), bei dem die Schüler*innen die Kernidee der letzten Physikstunden formulieren sollen. Das nachfolgende zweiteilige Item I2a/b in Prä- und Posttest erheben dann Vorstellungen zum Konzept „Energie“. Dabei sollen die Schüler*innen kurz beschreiben, was sie unter Energie verstehen (I2a) und wozu man in der Physik über Energie spricht (I2b). Die Antwortmöglichkeiten zu diesem offenen Item sind vielfältig und sollen durch den Vergleich von Prä- und Posttest Aufschluss darüber geben, ob bzw. inwiefern sich ggf. die Vorstellungen durch die LLE verändern. Mit Item I3 wird die Wiedergabe bzw. Anwendung der Konzeptidee des Gesamtfeldes als Überlagerung der Einzelfelder von Quellen (I3a) sowie dessen Veranschaulichung (I3b) überprüft. Hier sollen die Schüler*innen erklären, was man unter dem Begriff „Gesamtfeld“ versteht und dessen Entstehung in Form einer Skizze konstruieren.

Darauf folgen zwei Items zu den beiden Konzeptideen, dass das Gesamtfeld Energie trägt (I4a, I5a) und zum Zusammenhang von Tendenz des Feldes und Richtung der Energieübertragung (Prinzip Energieminimierung; I4b, I5b). Dabei werden zwei bekannte Kontexte verwendet: die auseinander fahrenden Magnetwägen (I4) und die für Schüler*innen erfahrungsgemäß schwierige Konstellation von Satellit und Erde (I5). Die Wahl der Kontexte ist hier und bei den folgenden Items bewusst in der Form, dass sich die zwei Fragen „Woher stammt die Energie?“ und zur Tendenz des Feldes für die beiden Kontexte wiederholen. So kann festgestellt werden, ob Schüler*innen in der Lage sind, die Konzeptideen auf ein einfaches Beispiel und auf die schwierigere Konstellation anzuwenden. Außerdem handelt es sich hier um eine abstoßende (Magnetwägen) und eine anziehende Konstellation (Satellit und Erde). Es ist davon auszugehen, dass Schüler*innen im Prätest noch nicht auf die Tendenz des Feldes eingehen und ggf. das Kraftkonzept zurückgreifen. Es folgt ein weiteres Item zur Tendenz des Feldes, bei dem kurz begründet werden soll, wie die Bindung von Atomen zu einem Molekül zu Stande kommt (I6). Hier sollen sie mit der Tendenz des atomaren Gesamtfeldes argumentieren, welches nach Möglichkeit Energie abgibt und die Atome sich somit binden.

Item	Inhalt	Aspekt des Konzeptes
1	Prätest: Item zum allgemeinen Interesse an physikalischen Themen (Prätest; 5-stufige Likert-Skala) Posttest: Erhebung Kernidee der letzten Physikstunden (offene Frage)	
2	Energie (allg,)	Erfassung Lernendenvorstellungen zu Definition und Zweck der Energie in der Physik
3	Felder (allg.)	Erklärung und graphische Konstruktion Gesamtfeld als Überlagerung von Einzelfeldern von Quellen
4	Magnetwägen	Energie in Magnetfeld bzw. Gravitationsfeld und Richtung der Energieübertragung (Tendenz des Feldes)
5	Erde und Satellit	
6	Bindung von Atome zu einem Molekül	Minimierung der Feldenergie (Tendenz des Feldes)
7	elektromagnetische Strahlung	Entscheidung Bewegungs- oder Feldenergie (MC-Item)
8	thermische Energie	
9	Feuerwerk	Energie im atomaren Gesamtfeld
10	Schleuder	Energie im atomaren Gesamtfeld
11	Erwärmung	Energie in elektromagnetischem Feld und mikroskopische Teilchenbewegung
12	Kernspaltung	Energie als Masse m Quarkfeld
13	Positronen-Emissions-Tomographie	Energie als Masse durch das Higgsfeld
14	LHC des CERN	offene Frage zur Erhebung verschiedener Konzeptideen (Energie in verschiedenen Feldern und Bewegungen)
15	Prätest: letzte Zeugnisnote in Physik (Noten 1 bis 5) Posttest: Einschätzung der letzten Physikstunden (5-stufige Likert-Skala)	
16	„Was hat Dir am meisten gefallen?“ (nur Posttest)	
17	„Was könnte man verbessern?“ (nur Posttest)	

Tabelle 13.2: Übersicht über die Items und entsprechenden Inhalte/Kontexte. Die rechte Spalte zeigt die zugehörigen überprüften Konzeptideen.

Im Anschluss an diese einführenden Items zu Feldern, Gesamtfeld und dessen Tendenz folgen die beiden MC-Items (I7 und I8; „kreuze an“). Hier ordnen Schüler*innen elektromagnetische Strahlung und thermische Energie der jeweiligen Repräsentation im EFA zu (also Feldenergie bzw. mikroskopische Bewegungsenergie). Da die Anwendung dieser beiden Konzeptideen bei späteren Items (I11, I13, ggf. I14) wieder relevant wird, sollen hier zwei einfache MC-Items zur unmissverständlichen Abfrage der Zuordnung genügen. Diese Zuordnung wird so explizit untersucht, weil sie in den Akzeptanzbefragungen öfter falsch vorgenommen wurde.

Die nachfolgenden Items beziehen sich alle auf spezielle Kontexte/Beispiele, bei denen ein Prozess der Energieübertragung beschrieben wird. Zu den meisten Items gibt es eine Abbildung, die den Schüler*innen bereits während der LLE gezeigt wurde, und welche eine kognitive Unterstützung darstellt. Alle Aufgaben bzw. Fragen zielen dabei darauf ab, zu beschreiben, wo sich die Energie zu einem bestimmten Zeitpunkt (zu Beginn oder am Ende eines Prozesses) befindet. Dazu gibt es zwei Kontexte zur Energie im atomaren Gesamtfeld (I9 und I10), ein Item zur Energie im elektromagnetischen Feld und mikroskopischer Bewegung (I11 als Kontext zu I7 und I8), sowie ein Item zum Quarkfeld (I12) und ein Item zum Higgsfeld (I13). Item I14 stellt dann mit dem Kontext „LHC des CERN“ eine besonders offene Frage dar, bei der die Schüler*innen beschreiben sollen, welche Energie vor bzw. nach der Kollision zum Tragen kommt. Hier wird nicht erwartet, dass alle Möglichkeiten genannt werden. Stattdessen wird erwartet, dass Schüler*innen auf diejenigen Konzeptideen zurückgreifen, welche ihnen besonders hilfreich bzw. attraktiv erscheinen.

13.3.4 Validierung des Testinstruments

Das Testinstrument wird in zwei Schritten validiert: Zuerst wird das unabhängige Feedback von Expert*innen (Arbeitsgruppe der Physikdidaktik) mit unterschiedlicher Kenntnis über das Konzept eingeholt, um die Auswahl und Gestaltung der Items zu validieren. Das Feedback wird dann gesammelt, zusammengeführt und in Summe reflektiert. So können dann Aspekte des Testinstrumentes dahingehend überarbeitet werden, dass ein möglichst großer Konsens der Expert*innen erreicht wird. So wird aus Sicht von Expert*innen sichergestellt, dass die Aufgaben und Fragestellungen hinreichend verständlich sind und auf die intendierten Konzeptideen abzielen. Außerdem werden formale und visuelle Aspekte einbezogen (Entscheidungen und Auswahl von Abbildungen, Platz für Antworten, Abwägung offene Fragen vs. MC-Items). Da es es sich bei der Auswertung um die

Erhebung von qualitativen Daten handelt und der Fokus auf einer qualitativen Auswertung (Interpretationen) liegt, wird auf eine elaborierte Validierung mittels Werkzeugen/Modellen der klassischen bzw. probabilistischen Testtheorie verzichtet (z. B. Rasch-Analyse). Für die Evaluation der ersten Erprobung genügt ein Stichprobenumfang von wenigen Klassen.

Im einem zweiten Schritt wird das Testinstrument von Schüler*innen bearbeitet, die das Konzept bereits aus den Akzeptanzbefragungen kennen. Dabei wird anhand der Antworten überprüft, wie die Fragestellungen von Schüler*innen verstanden werden. Darüber hinaus soll dabei die Bearbeitungszeit abgeschätzt werden. Da Prä- und Posttest inhaltlich gleich aufgebaut sind und in etwa gleich viel Zeit beanspruchen sollten, wird der Posttest validiert.

Der Posttest wurde von einem Experten mit umfassender Kenntnis über das Konzept sowie von zwei Schüler*innen bearbeitet. Es stellt sich heraus, dass alle etwa 25 bis 30 Minuten benötigen, um den Fragebogen zu bearbeiten. Es kann also davon ausgegangen werden, dass der Umfang für eine Schulstunde angemessen ist. Inhaltlich ergeben sich keine Probleme, die Aufgaben und Fragestellungen werden angemessen aufgefasst und bearbeitet. Es ist also davon auszugehen, dass das Testinstrument nach der Überarbeitung auf Grundlage des Expert*innen-Feedbacks ein für seine Zwecke hinreichend valides Testinstrument für die erste Evaluation der LLE darstellt.

KAPITEL 14

Erprobung im Klassensetting: Analyse

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den Akzeptanzbefragungen wurde das Konzept des EFA im Klassensetting evaluiert. Wie in Kapitel 5.5 beschrieben, erprobten Lehrpersonen das Konzept in ihren Klassen und die Umsetzbarkeit wird durch die Analyse von geschlossenen und offenen Items von Prä- und Posttest untersucht. Das Kapitel beginnt mit einer Darstellung der Stichprobe und einem Überblick über die Kommunikation mit den Lehrpersonen. Darauf folgt die Beschreibung des Ersteindrucks der Kodierung vor dem Hintergrund der Erkenntnisse. Den Hauptteil stellt die genauere Analyse der einzelnen Items dar. Das Kapitel schließt mit der Darstellung der Einschätzung der Schüler*innen (Benefits und Verbesserungsvorschläge) und Lehrpersonen sowie einem Resümee der Ergebnisse.

14.0.1 Beschreibung der Stichprobe

Die Erhebung wurde an drei verschiedenen Gymnasien von je einer Lehrperson durchgeführt (siehe Tab. 14.1). Die Lehrer*innen zeichnen sich dadurch aus, dass sich alle drei in der ersten Dekade ihrer Berufstätigkeit befinden. Ihr Unterrichtsstil gestaltet sich typischerweise eher frontal. Lehrperson B legt Wert auf das Unterrichten von Formeln, die anderen beiden fokussieren sich meist mehr auf das Unterrichten von qualitativen Zusammenhängen. Es gab eine Klasse der zehnten Jahrgangsstufe an Schule A („Klasse 10“), drei Klassen der elften Jahrgangsstufe (Klasse „11a“ und „11b“ an Schule B und Klasse „11c“ an Schule C) sowie eine Klasse (Klasse „12“) an Schule C. Merkmale wie Klassengröße, Mittelwert der

Schule/ Lehrperson	Jgst. (Id Klasse)	Wochen- stunden	Anzahl S*S	Rücklauf Prätest	Rücklauf Posttest	Passende Tests
A	10 (10)	3	26	21	20	18
B	11 (11a)	2	15	9	9	8
B	11 (11b)	2	15	13	12	11
C	11 (11c)	3	11	10	11	8
C	12 (12)	2	17	10	12	8
Summe			84	63	64	**53**
Anteil in %			100	75	76	63

Tabelle 14.1: Stichprobe der Erhebung im Klassensetting an drei Schulen durch drei Lehrpersonen (A bis C) mit einer zehnten, drei elften und einer zwölften Jahrgangsstufe (Jgst.) mit zugehöriger Anzahl der Schüler*innen (S*S). Insgesamt besteht die Stichprobe aus 84 Schüler*innen. Rücklauf von Prä- und Posttest sowie die Anzahl von passenden Prä- und Posttest (beides von einer*m Schüler*in beantwortet) werden auch angegeben.

letzten Zeugnisnote im Fach Physik sowie die Rücklaufquote der Testinstrumente sind auch Tabelle 14.1 zu entnehmen. Die drei Schulen verteilen sich auf drei verschiedene Bezirke Wiens mit unterschiedlichem sozioökonomischen Hintergrund. Die Gesamtpopulation der Stichprobe beläuft sich auf 83 Schüler*innen. Davon bearbeiteten 53 Schüler*innen sowohl den Prä- als auch den Posttest und werden deshalb für die Analyse berücksichtigt. Ein Grund, warum nur 63 % zwei passende Tests bearbeiteten, ist der Ausfall einzelner Schüler*innen im Unterricht. Insbesondere in Klasse 12 bearbeiteten nicht alle die Tests, da es den Schüler*innen freigestellt war, den Unterricht zu besuchen. Dementsprechend erschienen sie nur unregelmäßig. In Klasse 11a fehlten einige Schüler*innen, was zusätzlich zu einer geringen Rücklaufquote beitrug. Hier sei auch noch angemerkt, dass keine*r der Schüler*innen zuvor an einem Interview im Rahmen einer Akzeptanzbefragung zum EFA teilnahm. Das Konzept war den Schüler*innen also vor der Erprobung noch nicht bekannt.

14.1 Kommunikation mit den Lehrpersonen

14.1.1 Vorbesprechung

Die Lehrpersonen gaben in der Vorbesprechung jeweils an, motiviert und interessiert zu sein, das Unterrichtskonzept in ihren Klassen zu erproben. Alle willigten ein, die sechs Unterrichtsstunden dafür aufzuwenden (inklusive je einer Schulstunde für Prä- bzw. Posttest). Bei der Vorstellung und Auseinandersetzung mit der Handreichung gab es einen detaillierten Austausch mit den Lehrpersonen. Sie

gaben an, ausgehend von den Informationen das Konzept so gut wie möglich umsetzen zu wollen. Lehrer*in A und B gaben an, dass sie das Konzept aufgrund seiner Abstraktheit als schwierig für ihre Schüler*innen der zehnten und elften Jahrgangsstufe einschätzen.

14.1.2 Verlaufskontrolle und Hospitation

Für die Verlaufskontrolle wurden die Lehrpersonen gebeten, ein Erhebungstagebuch zu führen (siehe Kapitel 13.1.4), welches dann als Grundlage für die Nachbesprechung dient. Darüber hinaus konnte in Klasse 10 (Lehrperson A) während einer Schulstunde hospitiert werden.[1] In dieser Stunde wurde die Konzeptidee zu Energieübertragung, Indikatoren und Tendenz des Feldes behandelt. Strukturell begann die Stunde mit einer Wiederholung der letzten Einheit (ca. 15 min). Es fiel auf, dass der Unterricht insgesamt frontal abgehalten wird. Die Lehrperson stellte Fragen und die Schüler*innen antworteten. Auf die Folienpräsentation wurde zurückgegriffen und die Erklärungen wirkten durchgehend konzepttreu. Auch die Antworten der Schüler*innen stellten sich als überwiegend angemessen dar. Für die Beschreibung der schwingenden Magnetringe verwendete die Lehrperson ein selbst erstelltes Arbeitsblatt. Als einzige Schwierigkeit fiel auf, dass Schüler*innen bei der Besprechung über das „elektrische Feld der Magnetringe“ anstelle des magnetischen Feldes sprachen, die Lehrperson darauf aber nicht einging. Andere Probleme traten nicht auf. Insgesamt wirkte der Unterricht also angemessen, Aussagen über die anderen Stunden können nicht getroffen werden.

14.1.3 Nachbesprechung

Alle drei Lehrpersonen griffen nach eigener Aussage auf die Handreichung, Präsentationsfolien und Arbeitsblätter zurück. Prä- und Posttest wurden wie geplant durchgeführt. Der Unterricht gestaltete sich in allen drei Fällen eher frontal mit Erklärungen sowie Fragen der Lehrperson und Antworten der Schüler*innen. Jede Stunde wurde mit einer kurzen Wiederholung der letzten Einheit eingeleitet. Es wurden jeweils die geplanten vier Unterrichtsstunden für die Erprobung des Konzeptes aufgewendet.

Lehrperson A

Lehrperson A gab an, sich an den Ablauf der Handreichung gehalten zu haben. Als Abweichung wird erwähnt, dass das BB-Bag nicht als Veranschaulichung verwen-

[1] Aufgrund der COVID-19 Maßnahmen waren keine weiteren Hospitationen möglich.

det und stattdessen viel über den Zusammenhang von thermischer Energie und Bewegung von Teilchen diskutiert worden sei. Die Lehrperson äußerte, dass ihre Schüler*innen es gewohnt seien, viele Nachfragen zu stellen und Sachverhalte im Detail verstehen zu wollen, weswegen teilweise vom Thema abgewichen wurde. So sei insbesondere bei mikroskopischen (chemischen) Prozessen und der modernen Physik viel diskutiert worden. Die Lehrperson gab hier an, dass den Schüler*innen teilweise Begriffe (z. B. „Nukleon“) fehlten und diese zunächst erläutert werden mussten. Sie gab auch zu, dass die Klasse ab dem Kontext zur Kernspaltung (Konzeptidee zum Quarkfeld) nicht mehr besonders konzentriert gewesen sei. Die nachfolgenden Aspekte, auch zum Higgsfeld, seien deswegen nicht mehr behandelt worden. Bezüglich der anderen Kontexte wurde das Beispiel der Satellitenbewegung und des fallenden Balles als schwierig empfunden. Die Lehrperson stellte aber auch heraus, dass ihr das Konzept gut gefallen habe. Auch von den Schüler*innen habe es positives Feedback gegeben, insbesondere die Idee des Gesamtfeldes und dessen Tendenz sei positiv aufgenommen worden.

Lehrperson B

Die Klassen 11a und 11b (elfte Jahrgangsstufe) wurden von Lehrperson B unterrichtet. Die Präsentationsfolien wurden teilweise durch Wiederholungsfolien ergänzt. Die Lehrperson gab an, das Konzept sei insgesamt machbar und sie könne sich vorstellen, dieses auch in einer achten Klasse einzusetzen und ggf. auch begleitend bereits ab der zehnten Jahrgangsstufe einzuführen. Die Schüler*innen beider Klassen seien motiviert und interessiert gewesen. Es wurden ein paar Abweichungen zur Handreichung angegeben: Zum einen führte die Lehrperson den Zusammenhang von Gesamtfeld und Energie für dessen Motivation bereits frühzeitig mit dem Gesamtfeld ein. Zum anderen wurden Begriffe wie „auseinanderdrücken“ oder „zusammenziehen“ umschrieben und nur mit der Tendenz des Feldes ausgedrückt. Anstatt über das „Gravitationsfeld“ zu sprechen, wurde über das gravitative Gesamtfeld gesprochen, um eine Parallele zu den anderen Ausdrücken zu schaffen. Auf die Beschreibung von Bindungen sei besonderer Wert gelegt worden. Das Konzept sei insgesamt positiv aufgenommen worden. Die Schüler*innen gaben allerdings an, es sei stellenweise etwas abstrakt, insbesondere bei der modernen Physik. Die Beispiele wurden sehr begrüßt und die Lehrperson äußerte, die Schüler*innen hätten die Kernidee verstanden und auch sinnvoll gefunden. Insbesondere sei die Struktur, dass man alles „immer weiter runter“ verfolgen könne (z. B. Higgsfeld), als interessant wahrgenommen worden.

Lehrperson C

Die Lehrperson unterrichtete die Klassen 11c und 12. Sie schätzte das Konzept als „mächtig“ ein, da es Sachverhalte umfassend erkläre. Auch, weil es im bisherigen Unterricht teilweise zur Verwechslung der traditionellen Energieformen gekommen sei, finde sie den Ansatz sehr sinnvoll. Besonders Begriffe wie „chemische Energie“ würden durch das Konzept klarer. Sie gab an, dass man einzelne Aspekte (z. B. zur thermischen Energie) bereits in der siebten Jahrgangsstufe einführen könnte. Die Konzeption zur modernen Physik (Quarkfeld und Higgsfeld) für die Rekonstruktion der Kern- und Elementarteilchenphysik nahm sie als sehr „elegant“ wahr. Sie äußerte aber auch, dass das Vorwissen zu Energieformen sorgfältig mit den Konzeptideen verknüpft werden müsse, um keine Verwirrung zu erzeugen. Große Schwierigkeiten fielen der Lehrperson nicht auf. Sie merkt lediglich an, dass die Tendenz des Feldes den schwierigsten Aspekt darstelle und das Konzept stellenweise sehr abstrakt sei. Mit der „neuen“ Darstellung des Gesamtfeldes seien Feldlinienbilder aus ihrer Sicht nicht mehr notwendig, das „Wegstreichen“ der Einzelfelder brauche es auch nicht. Die Lehrperson äußerte, dass manche Schüler*innen nur das Gesamtfeld einzeichneten, weil die Einzelfelder irrelevant seien. Außerdem sei manchen Schüler*innen die Tendenz des Feldes schwer gefallen, hier müsse die Richtung der Energieübertragung sorgfältig behandelt werden. Bei den Kontexten zum Mikrokosmos sei aufgefallen, dass die Schüler*innen Probleme hätten, die abstrakten Zusammenhänge zu verstehen. Hier gibt die Lehrperson an, auch selbst den Zusammenhang von chemischer Energie und Feldenergie noch nicht ganz verstanden zu haben. Abweichungen von der Handreichung habe es keine gegeben, sie habe sich streng an die Vorgaben gehalten, auch an den Aufbau und die Wortwahl. Seitens der Schüler*innen sei das Konzept weder besonders gelobt noch kritisiert worden. Wesentlich ist allerdings festzuhalten, dass es den Schüler*innen der achten Klasse freigestellt war, den Unterricht zu besuchen. Dadurch kann nicht gesagt werden, in wie weit den einzelnen Schüler*innen das Konzept vermittelt wurde.

14.2 Kodierung

Die Antworten von Prä- und Posttest werden entsprechend eines Erwartungshorizontes kodiert (Musterlösung, siehe Anhang G). Für eine effektive Analyse wurden die einzelnen Antworten ähnlich zu den Akzeptanzbefragungen nach dem folgenden Schema kodiert:

grün	(Code 2)	korrekt
orange/gelb	(Code 1)	teilweise korrekt
rot	(Code 0)	falsch

Entspricht die Antwort eines*r Schüler*in den Erwartungen der Musterlösung, so wird das entsprechende Item mit dem Code 2 kodiert. Verwendet der*die Schüler*in zwar Konzeptideen des EFA, macht aber einen Fehler oder lässt einen wesentlichen Bestandteil der Beschreibung aus, wird mit Code 1 kodiert. Der Code 0 wird vergeben, wenn keine EFA-Ideen verwendet werden oder größere Probleme auftreten.
Die Kodierungen der einzelnen Items sind in Tabelle 14.3 und 14.4 für den Prätest sowie Tab. 14.5 und 14.6 für den Posttest dargestellt. Tabelle 14.2 fasst die Kennwerte als Mittelwerte der einzelnen Klassen zusammen. Es fällt auf, dass die Multiple-Choice (MC) Items sowohl im Prä- als auch im Posttest überwiegend angemessen beantwortet werden. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass besonders in Klasse 10 viele Items ausgelassen werden. Für den Prätest liegt dies daran, dass den Schüler*innen das Konzept nicht vertraut war. Beim Posttest spiegelt sich wider, dass (wie Lehrperson A angab) der Bereich zur modernen Physik ab dem Kontext PET ausgelassen wurde. Die Klassen 11a und 11b (Lehrperson B) zeigen eine akzeptable und im Vergleich zu den anderen Klassen deutlich bessere Performanz. Klasse 11b ist beim Posttest ab dem Bereich zum Mikrokosmos etwas schwächer. Klasse 12 zeigt die schwächste Performanz der Stichprobe. In den letzten Bereichen zum Mikrokosmos und zur modernen Physik gibt es fast keine angemessenen Ideen. Interessant hierbei ist, dass den Schüler*innen dieser Klasse das Konzept trotzdem eher gefällt (siehe Tab. 14.2). Die Einschätzung des Konzeptes liegt insgesamt zwischen 3,2 und 3,8 (Median 3, Mittelwert 3,5). Das eigens angegebene Interesse schwankt um einen Mittelwert von 3,3 (3 ist die Mitte der Likert-Skala; Median ist 3). Dabei ist Klasse 8 mit einem Interessenswert von 2,6 im Schnitt etwas weniger interessiert. Die Noten schwanken deutlich um ihren Mittelwert von 2,3.

				Performanz Posttest					
Klasse	Int.	Note	Einsch.	**Gesamt**	HI	B1	B2	B3	B4
10	3,2	2,6	3,2	**0,8**	1,0	1,1	1,0	0,4	0,9
11a	3,5	2,1	3,4	**1,5**	1,3	1,7	1,4	1,6	1,0
11b	3,6	1,3	3,5	**1,0**	1,4	1,3	0,9	0,8	0,7
11c	3,5	2,3	3,8	**0,8**	0,8	1,2	0,6	0,3	0,6
12	2,6	3,0	3,5	**0,4**	0,0	0,7	0,5	0,0	0,1
Mittelwert	3,3	2,3	3,5	**0,9**	1,0	1,2	0,9	0,6	0,7

Tabelle 14.2: Kennwerte der einzelnen Klassen als Mittelwert der jeweiligen Kenngröße: Interesse (Int.), letzte Zeugnisnote in Physik, Einschätzung des Konzeptes (Einsch.), Gesamtperformanz des Posttests (Gesamt) und Performanzen für Hauptidee (HI), Bereich 1 (B1, klassische Physik), Bereich 2 (B2, Bindungen), Bereich 3 (B3, Mikrokosmos) und Bereich 4 (B4, moderne Physik). Die letzte Zeile gibt den Mittelwert an.

14.3 Analyse Posttest

Der Prätest zeigt eine Gesamtperformanz von 0,1. Dies bedeutet, dass Schüler*innen nicht über Präkonzepte zum EFA verfügen. Somit können erfolgreich beantwortete Items im Posttest auf eine Übernahme der vorgestellten Konzeptideen zurückgeführt werden. Wie in Kapitel 5.5 beschrieben, werden die Antworten kodiert und Kategorien der auftretenden Probleme gebildet. So kann das Antwortverhalten der Schüler*innen interpretiert und verglichen werden. Die folgende Analyse beschreibt die Problematik relevanter Aspekte sowie erkennbare Benefits des EFA.

14.3.1 Item 1: Kernidee

Die Kernidee[2] wird von ca. jeder*m fünften Schüler*in korrekt wiedergegeben (11 von 53, siehe Abb. 14.1). Dass es in den letzten Unterrichtsstunden um Felder bzw. Feldenergie ging, beschreiben neun Schüler*innen (ca. 17 %). Ebenso viele geben an, dass es um Quarks und das Quarkfeld ging. Diese Lernenden beziehen die Frage ggf. nur auf die letzte Physikstunde, nicht auf die gesamte LLE. Immerhin fünf Lernende geben an, dass es um Energie ging. Weitere Schüler*innen stellen einzelne Kontexte heraus oder geben an, dass es um „verständliche Erklärungen“ gegangen sei. All diese Antworten greifen zumindest einen Aspekt treffend auf. Einige geben sogar gezielt die Kernidee wieder.

[2]Kernidee: Es gibt nur Bewegungs- und Feldenergie.

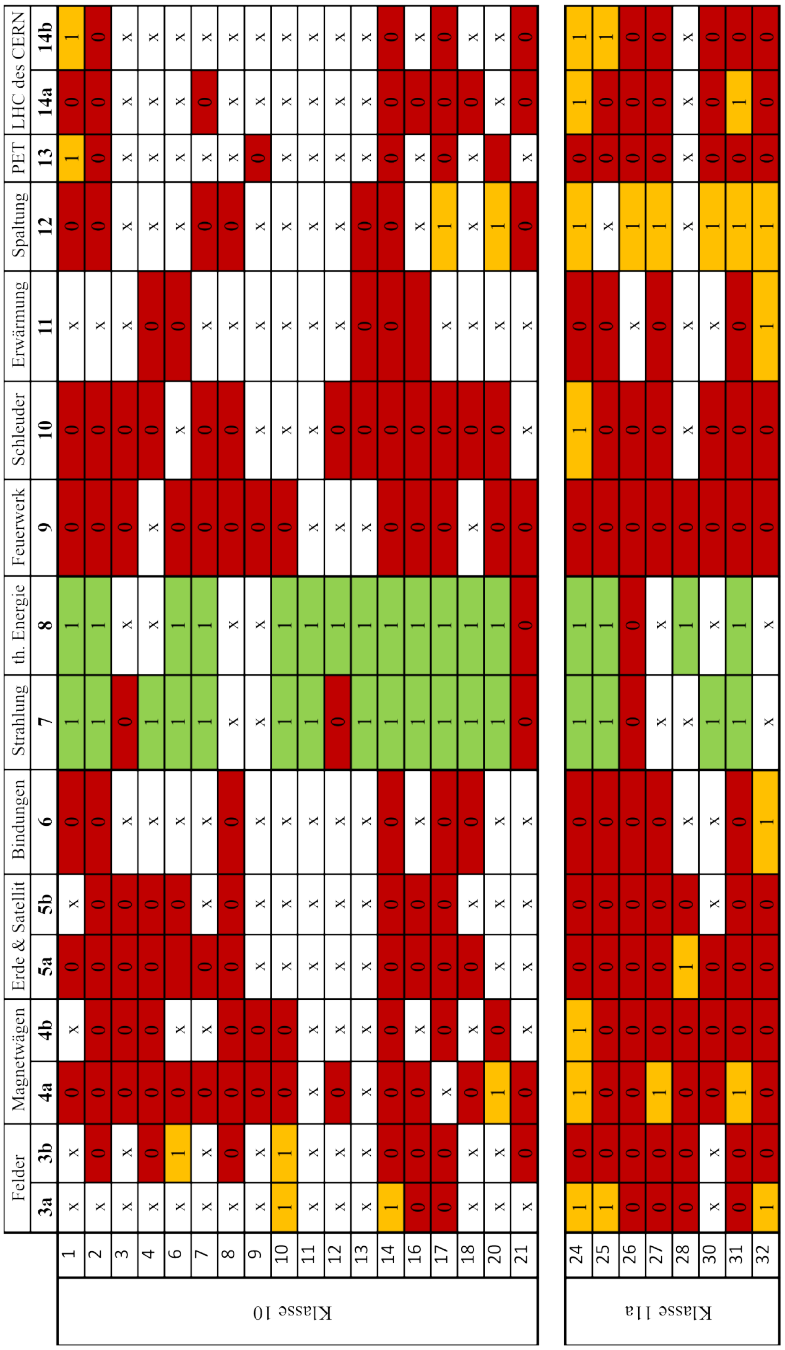


Tabelle 14.3: Kodierung der Items des **Prätests** im Klassensetting für die Klassen 10 und 11a. Eine grüne Kodierung (2) bedeutet angemessene, eine gelbe (1) teilweise problematische Antworten mit den EFA Konzeptideen. Eine rote Kodierung (0) bedeutet falsche Antworten bzw. keine Nennung von Ideen des EFA. Bei den MC-Items 7 und 8 wird nur zwischen falsch (0) und korrekt (1) unterschieden. Leere Felder (x) kennzeichnen Auslassungen.

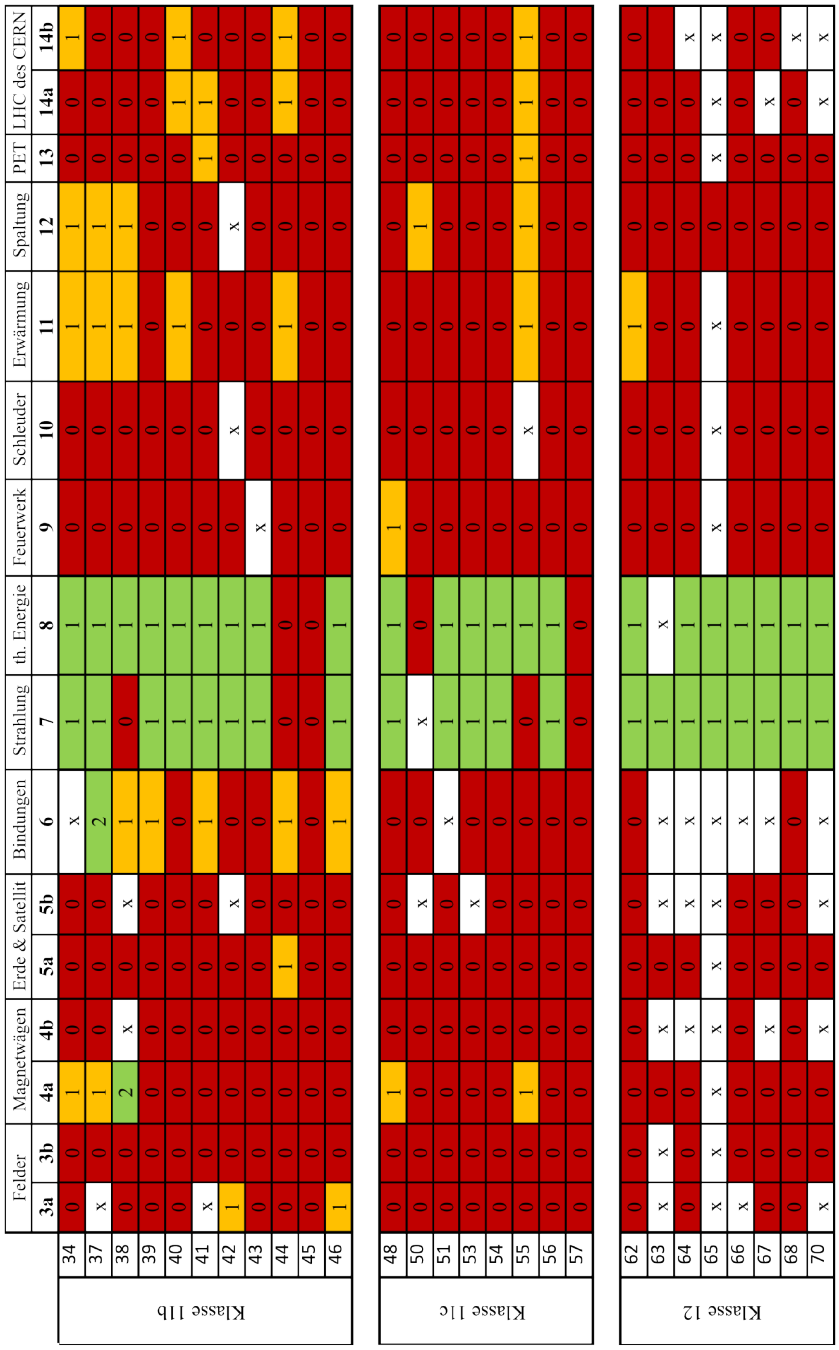


Tabelle 14.4: Kodierung der Items des **Prätests** im Klassensetting für die Klassen 11b, 11c und 12. Eine grüne Kodierung (2) bedeutet angemessene, eine gelbe (1) teilweise problematische Antworten mit den EFA Konzeptideen. Eine rote Kodierung (0) bedeutet falsche Antworten bzw. keine Nennung von Ideen des EFA. Bei den MC-Items 7 und 8 wird nur zwischen falsch (0) und korrekt (1) unterschieden. Leere Felder (x) kennzeichnen Auslassungen.

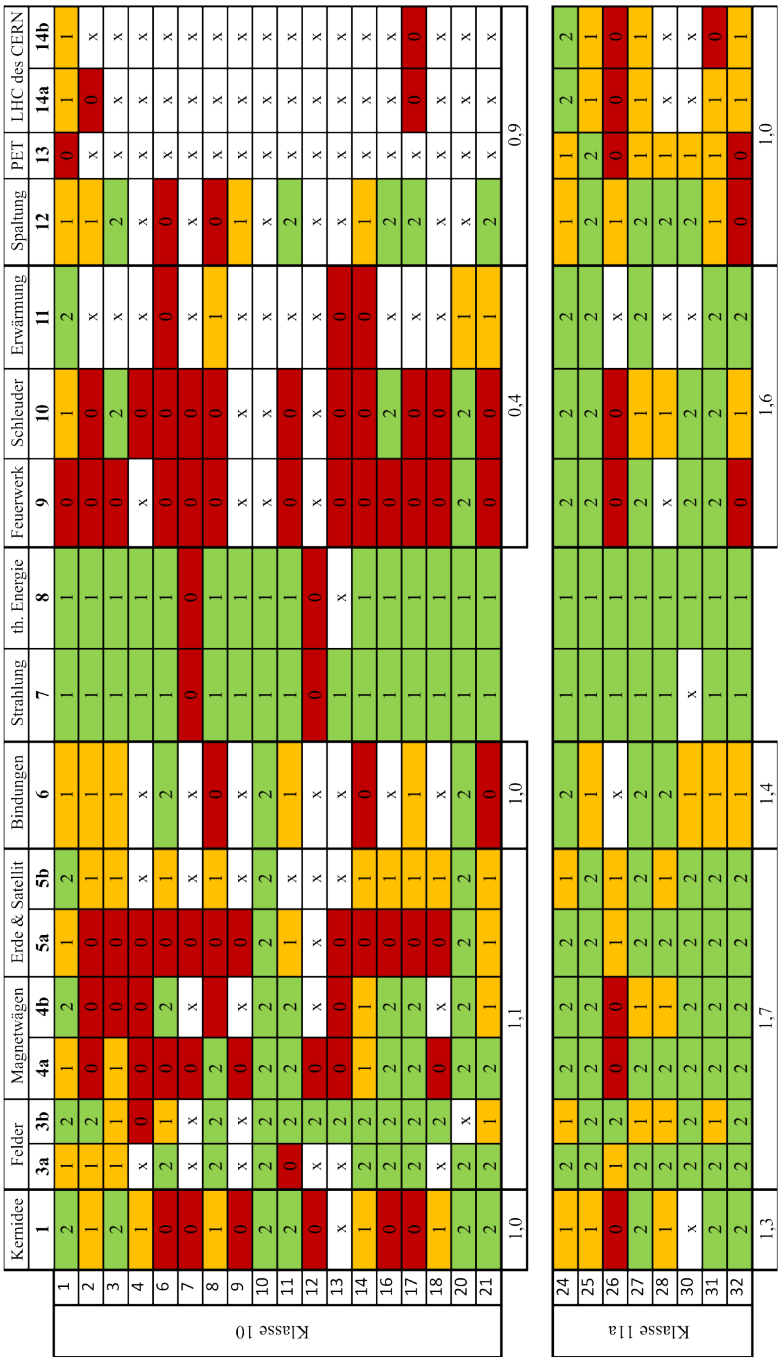


Tabelle 14.5: Kodierung der Items des **Posttests** im Klassensetting Klassen 10 und 11a. Eine grüne Kodierung (2) bedeutet angemessene, eine gelbe (1) teilweise problematische Antworten mit den EFA Konzeptideen. Eine rote Kodierung (0) bedeutet falsche Antworten bzw. keine Nennung von Ideen des EFA. Bei den MC-Items 7 und 8 wird nur zwischen falsch (0) und korrekt (1) unterschieden. Leere Felder (x) kennzeichnen Auslassungen. Die klassenspezifischen Performanzwerte (dicker Rahmen unter den Klassenblöcken) ergeben sich als Mittelwerte der einzelnen Performanzen der Schüler*innen.

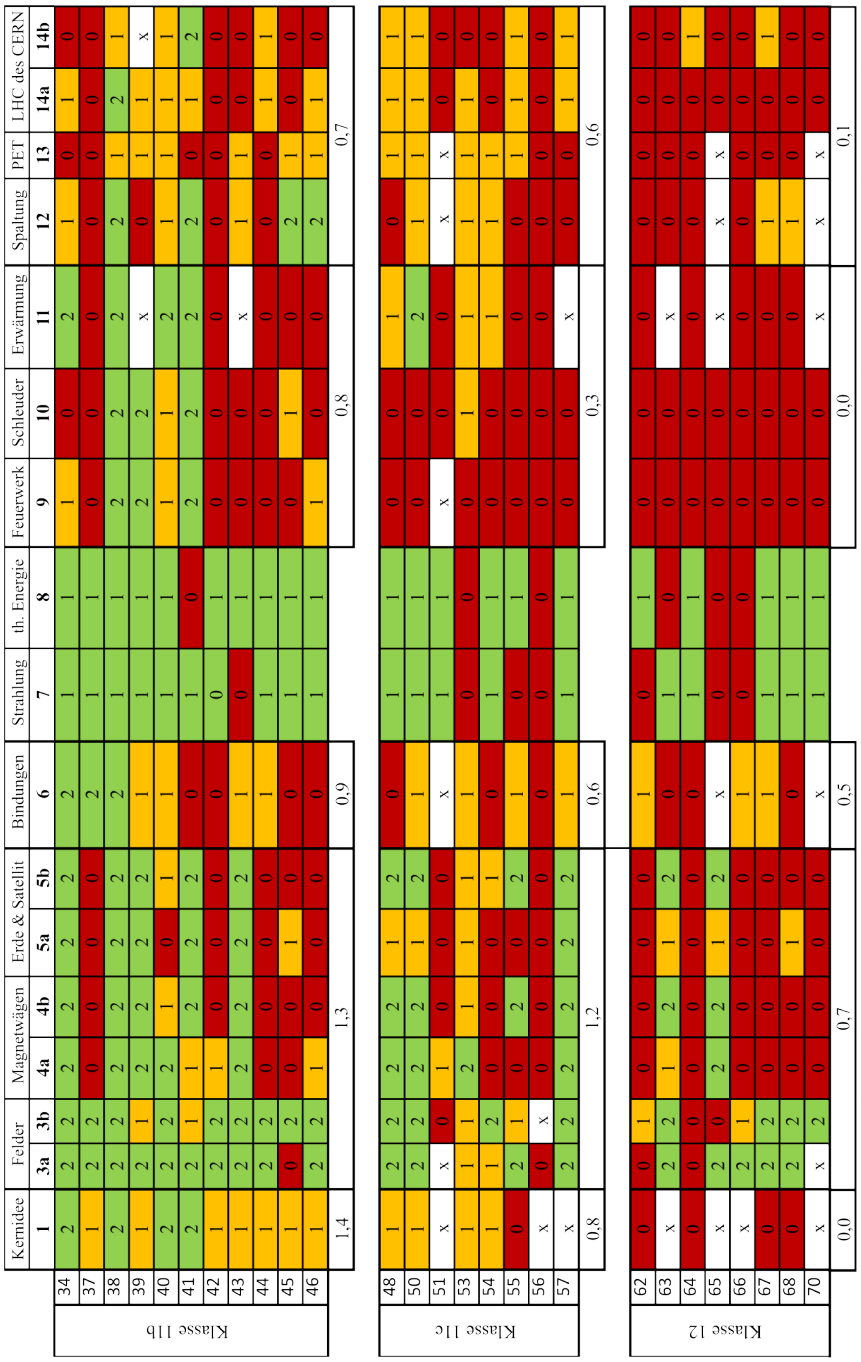


Tabelle 14.6: Kodierung der Items des **Posttests** im Klassensetting für die Klassen Klassen 11b, 11c und 12. Eine grüne Kodierung (2) bedeutet angemessene, eine gelbe (1) teilweise problematische Antworten mit den EFA Konzeptideen. Eine rote Kodierung (0) bedeutet falsche Antworten bzw. keine Nennung von Ideen des EFA. Bei den MC-Items 7 und 8 wird nur zwischen falsch (0) und korrekt (1) unterschieden. Leere Felder (x) kennzeichnen Auslassungen. Die klassenspezifischen Performanzwerte (dicker Rahmen unter den Klassenblöcken) ergeben sich als Mittelwerte der einzelnen Performanzen der Schüler*innen.

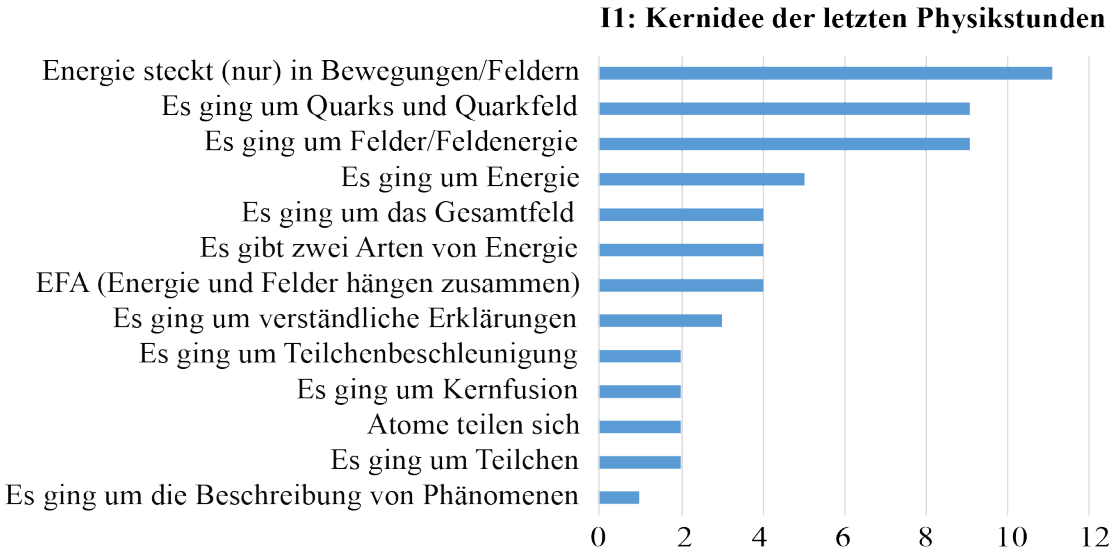


Abbildung 14.1: Übersicht über die relevanten Antworten zu Item 1 (Kernidee) des Posttests.

14.3.2 Items 2a und 2b: Definition und Rolle der Energie

Für das zweite Item sollten Schüler*innen angeben, was sie unter Energie verstehen (I2a) und wozu man in der Physik über Energie spricht (I2b). Beim Vergleich der Antworten von Prä- und Posttest von Item 2a fällt positiv auf, dass sich die Antworten der Schüler*innen generell von teilweise problematischen Lernendenvorstellungen (z. B. „etwas das verloren geht“) zu angemessenen hin verändert (siehe Abb. 14.2). Antworten, die Energie mit Atomen/Teilchen oder mit der Übertragung/Umwandlung zusammen bringen, treten nach wie vor auf.
Im Posttest spricht niemand mehr über Energieverlust. Dabei nimmt auch die Aussage „etwas das erhalten ist“ zu. Dies ist auch insofern bemerkenswert, als die Energieerhaltung meist ein implizites Prinzip war. Darüber hinaus wird im Posttest weniger über Arbeit gesprochen und der Kraftbegriff nur noch selten mit der Energie gleichgesetzt. Die dominante Verknüpfung mit Kraft und Arbeit aus dem Prätest verändert sich im Posttest zu Gunsten der Feld-Ideen und Energieerhaltung. Auch die Aussage, dass Energie etwas sei, das man nicht genau definieren könne, verschwindet im Posttest fast vollständig. Dass Energie konkret mit Feldern und Bewegungen (4) sowie mit der Masse (4) verknüpft wird, zeigt die Übernahme grundlegender Konzeptideen.

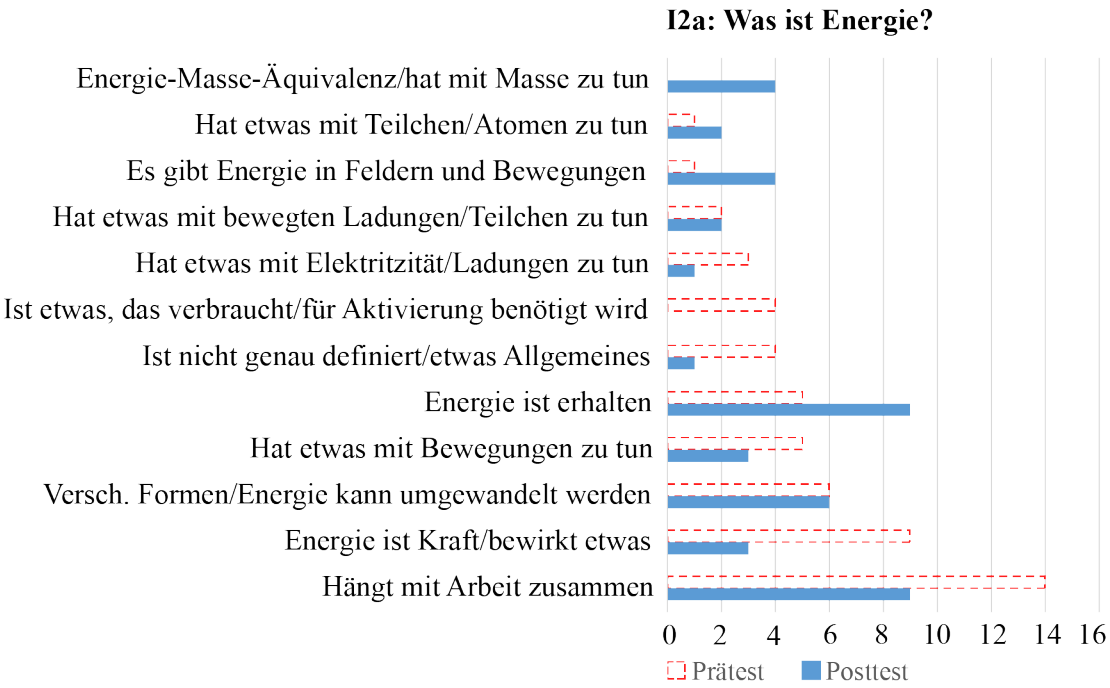


Abbildung 14.2: Übersicht über die relevanten Antworten zu Item 2a (*Beschreibe kurz, was Energie ist!*) im Vergleich von Prätest (ungefüllt, gestrichelt) und Posttest (gefüllt).

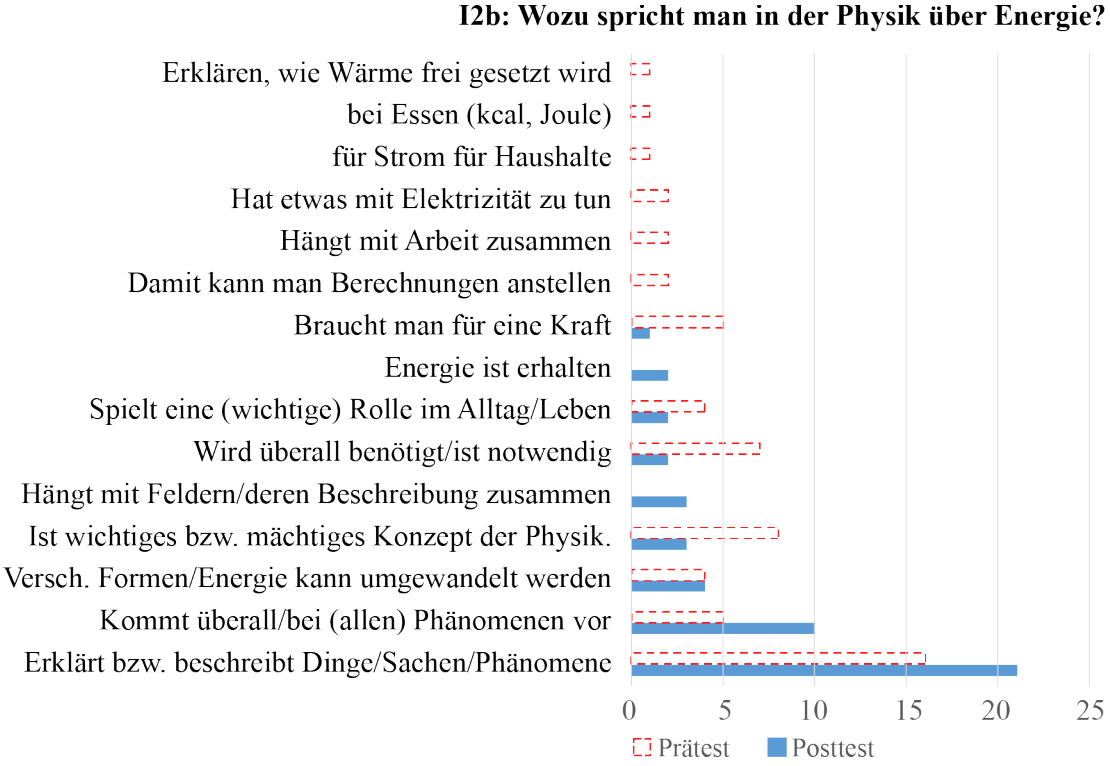


Abbildung 14.3: Übersicht über die relevanten Antworten zu Item 2b (*Wozu spricht man in der Physik über Energie?*) im Vergleich von Prätest (ungefüllt, gestrichelt) und Posttest (gefüllt).

Die Bedeutung des Energiekonzeptes für die Physik (I2b, siehe Abb. 14.3) wird nach der LLE auch anders aufgefasst als im Prätest. Im Posttest gibt es weniger Variation in den Antworten. Außerdem verschwinden Aussagen, die Energie mit Wärme, Essen, Strom/Elektrizität oder Arbeit verknüpfen. Der Zusammenhang mit der Kraft nimmt stark ab. Stattdessen gehen die Schüler*innen darauf ein, dass Energie dazu dient, Phänomene zu beschreiben. Es reduziert sich die Aussage, die Energie sei in mächtiges Konzept der Physik. Dafür kommen aber die Energieerhaltung als wesentliches Konzept der Physik und die Verknüpfung mit Feldern sowie deren Beschreibung neu hinzu. Die Vorstellungen der Schüler*innen verändern sich also offenbar in Richtung eines epistemologisch treffenderen Bildes von der Energie als fundamentales Konzept der Physik.

14.3.3 Items 3a und 3b: Gesamtfeld und Skizze

Im Prätest wurde die Erklärung des Begriffs *Gesamtfeld* meist mit der traditionellen Definition eines Feldes beschrieben.[3] Einzelne Äußerungen beinhalteten aber auch die Fehlvorstellung, dass Feldlinien die Bewegung von Teilchen im Raum beschreiben. Einzelne Schüler*innen sprachen davon, dass Felder durch Teilchen/Ladungen entstünden. Die Skizze des Feldes (Item 3b) im Prätest war fast ausschließlich ein Feldlinienbild; korrekt (27 Nennungen) oder falsch (3 Nennungen). Im Posttest geben die meisten Schüler*innen eine angemessene Antwort bzw. Skizze (vgl. Kodierung in Tab. 14.5). Wenn Probleme auftreten, dann liegt dies daran, dass bei I3a nicht auf die Überlagerung eingegangen wird oder die Einzelfelder nicht erwähnt werden. In manchen Fällen (9) werden Einzelfelder und Gesamtfeld gezeichnet, aber keine Überlagerung. Vier Schüler*innen zeichnen das Gesamtfeld ohne Einzelfelder, nur ein*e Schüler*in zeichnet die Einzelfelder ohne Gesamtfeld. Nur wenige (4) zeichnen nach wie vor das Feldlinienbild. Die Darstellung des Gesamtfeldes wird also von vielen Schüler*innen übernommen.[4]

14.3.4 Items 4a und 4b: Magnetwägen

Beim Item zu den abstoßenden Magnetwägen (I4a) soll beschrieben werden, woher die Bewegungsenergie der Magnete kommt. Hier sprechen im Posttest nur noch dreizehn statt 28 Schüler*innen von der Abstoßung der Magnete und einige Schüler*innen gehen auf das magnetische Gesamtfeld ein (siehe Abb. 14.4). Die Äußerung „durch die Abstoßung der Ladung“ verschwindet. Es ist aber möglich, dass

[3] Beschreibung als Verteilung einer physikalischen Größe im Raum, siehe Kapitel 3.1

[4] Da hier nur diese wenigen Probleme auftreten, wird auf eine graphische Darstellung der Item-Antworten verzichtet.

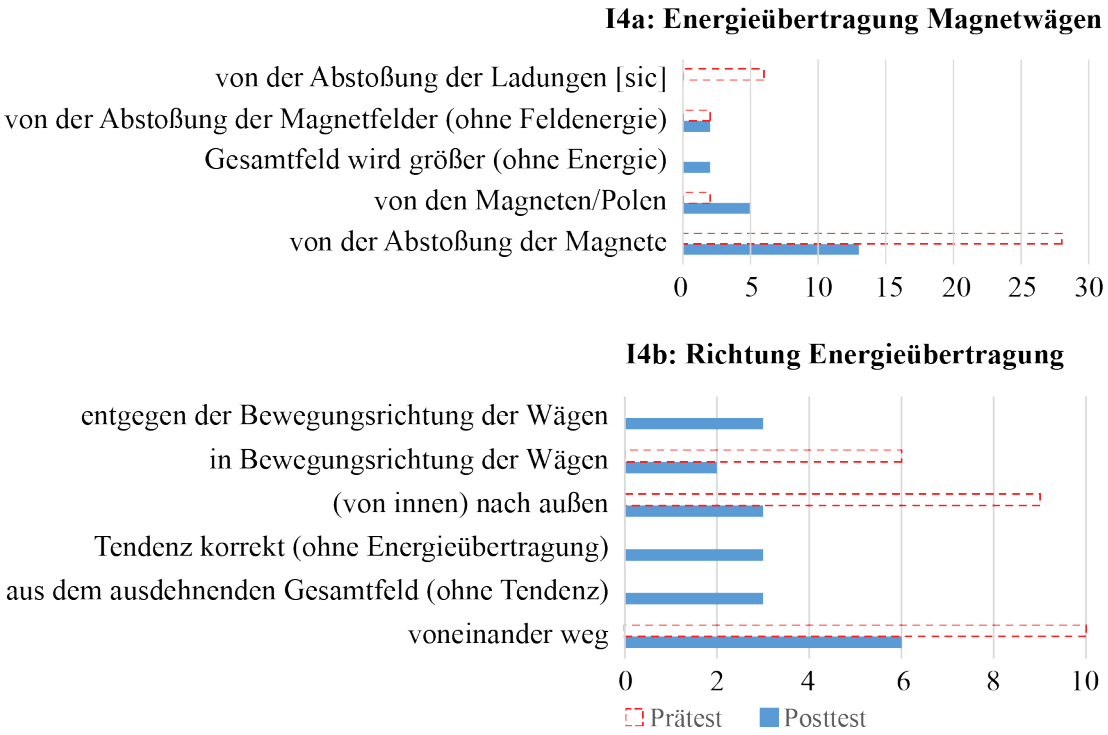


Abbildung 14.4: Übersicht über die relevanten Antworten zu Item 4a und 4b (Magnetwägen: *Energieübertragung (a) und deren Richtung mit Tendenz des Feldes (b)*) im Vergleich von Prätest (ungefüllt, gestrichelt) und Posttest (gefüllt).

hier die Fragestellung (*Woher kommt die Energie?*) von manchen Schüler*innen als Frage nach einer Ursache wahrgenommen wird anstatt nach einem *Ort* bzw. Feld. Interessant ist auch, dass in einzelnen Fällen die „Anziehung der Magnete“ oder das elektrische statt dem magnetischen Feld als Ursache für die Energieübertragung genannt wird. Es zeigt sich bei manchen Schüler*innen die bekannte Lernendenvorstellung, dass elektrisches und magnetisches Feld das gleiche seien: „Magnetismus: 2 gleiche Ladungen stoßen sich ab, entgegengesetzte Ladungen ziehe sich an“ (S67). Andererseits gibt es auch Schüler*innen, die das Konzept angemessen anwenden:

> „Zuerst wird Energie durch die erzwungene Annäherung der Wägen zueinander ins Gesamtfeld übertragen. Das Gesamtfeld hat die Tendenz, sich auszudehnen → Feldenergie“ (S20, Item 4a)

Im Prätest fiel auf, dass die Richtung der Energieübertragung mit der Bewegungsrichtung der Wägen gleichgesetzt wurde, z. B. „von einander weg“ (10), „von innen nach außen“ (9) oder „in Bewegungsrichtung“ (6). Im Posttest werden diese räumlichen Vorstellungen weniger genutzt (insgesamt 14 statt 25). Einige Schüler*innen argumentieren stattdessen entweder mit dem Gesamtfeld oder der Tendenz des Feldes, lassen deren Zusammenhang aber aus.

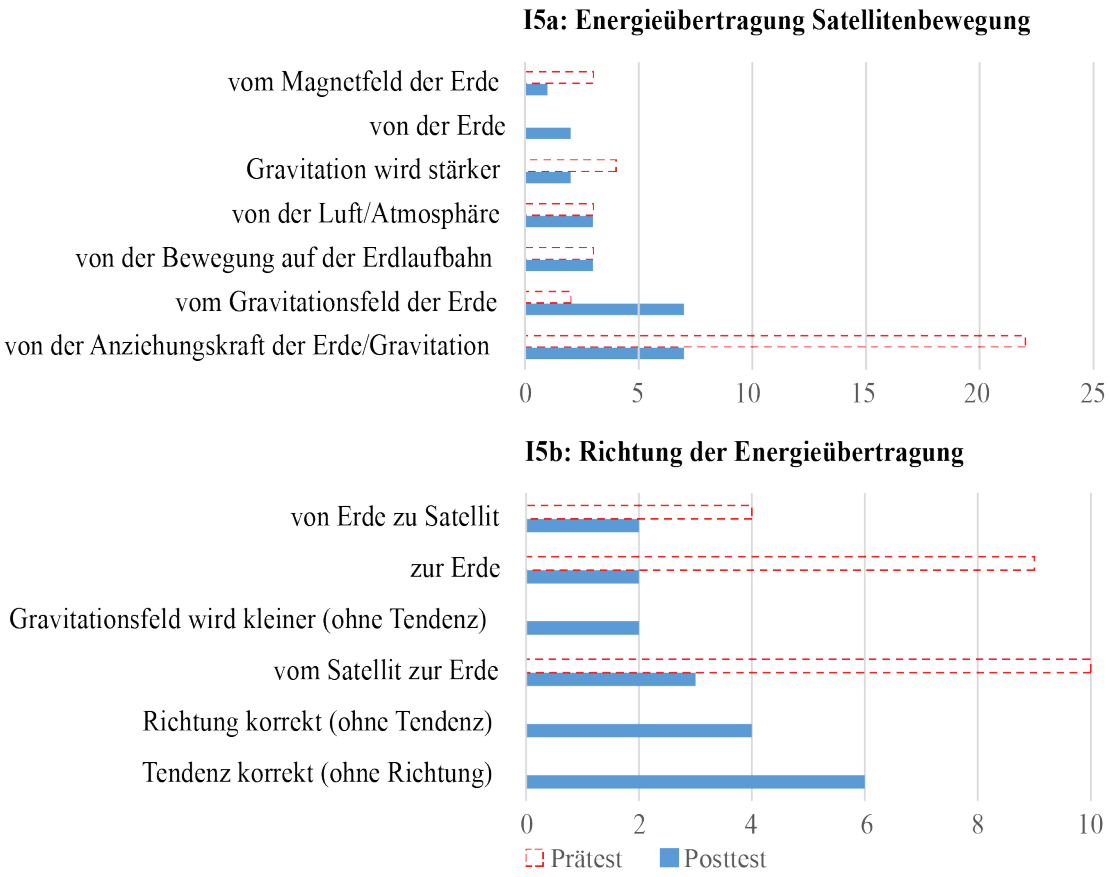


Abbildung 14.5: Übersicht über die relevanten Antworten zu Item 5a und 5b (Satellitenbewegung: *Energieübertragung (a) und deren Richtung mit Tendenz des Feldes (b)*) im Vergleich von Prätest (ungefüllt, gestrichelt) und Posttest (gefüllt).

14.3.5 Items 5a und 5b: Satellitenbewegung

Das aus den Akzeptanzbefragungen als problematisch bekannte Beispiel der Satellitenbewegung gestaltet sich auch im Klassensetting schwierig. Im Prätest nennen 22 Schüler*innen die Anziehungskraft der Erde (siehe Abb. 14.5). Analog zu den Magnetwägen wurde hier auf die Wechselwirkung Bezug genommen. Weitere Antworten waren das Magnetfeld der Erde (3), die Bewegung auf der Umlaufbahn (3) oder die Luft/Atmosphäre (3). Überraschend wenige Schüler*innen argumentierten mit der Energieumwandlung der traditionellen Energieform der potenziellen Energie in Bewegungsenergie (3). Im Posttest sinkt die Anzahl der Nennungen „durch die Anziehungskraft“ von 22 auf 7. Zwei Schüler*innen, die im Posttest von der Anziehungskraft sprachen, übernehmen die Konzeptideen teilweise und nennen das Gravitationsfeld der Erde. Auch wenn hier noch das Bezugspunktproblem (bei 7 Schüler*innen) auftritt, werden die Konzeptideen ganz oder teilweise angenommen. Interessanter Weise wird in manchen Fällen das Magnetfeld der Erde, das Weltall oder die Masse des Satelliten als Herkunft der Energie genannt.

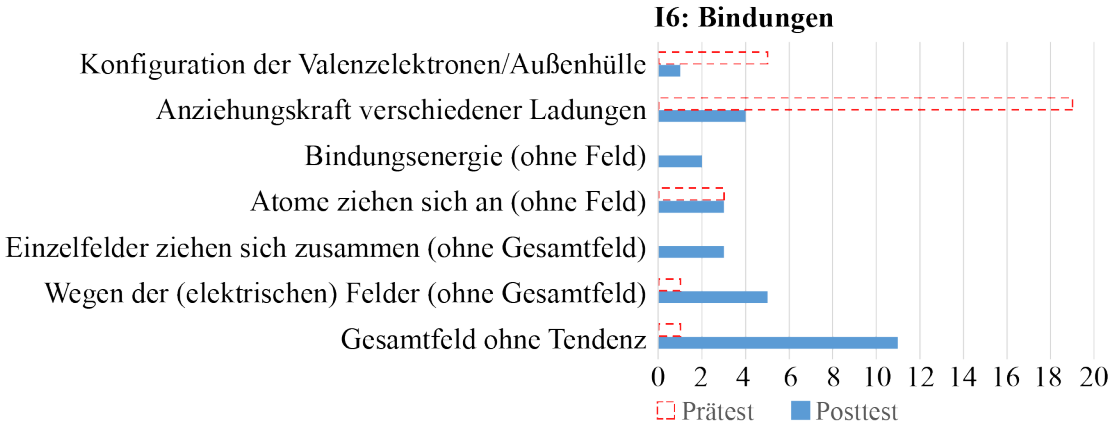


Abbildung 14.6: Übersicht über die relevanten Antworten zu Item 6 (Bindungszustände: *Begründe kurz, warum die Bindung von Atomen zu einem Molekül zu Stande kommt!*) im Vergleich von Prätest (ungefüllt, gestrichelt) und Posttest (gefüllt).

Die Richtung der Energieübertragung (I5b) wird in vielen Fällen auch im Posttest noch missverstanden. Im Prätest sprachen 21 Schüler*innen von einer Übertragung der Energie „zur Erde“, davon zehn über die Energie „vom Satelliten“ zur Erde und 14 von einer Energieübertragung zwischen Satellit und Erde. Im Posttest nimmt diese Zahl deutlich ab. Hier sprechen nur noch sieben Lernende von der Energieübertragung zwischen den Objekten. Einige greifen auf die Feld-Ideen zurück, vergessen aber, die Tendenz mit einzubeziehen (8). Dabei ist die Richtung (von Feld zu Bewegung) allerdings oft korrekt (4). Sechs Schüler*innen argumentieren korrekt mit der Tendenz des Feldes, gehen aber nicht auf die Richtung der Energieübertragung ein.

14.3.6 Item 6: Bindungen

Im Prätest gaben 19 Schüler*innen die Anziehungskraft der Ladungen/Atome als Ursache für die Bindung von Atomen an (siehe Abb. 14.6). Davon sprachen drei Schüler*innen über die Anziehung der Atome und zwei darüber, dass sich diese zu einem Molekül zusammenschließen. Drei Schüler*innen sprachen über anziehende Felder. Im Posttest hingegen spricht kaum jemand (4) mehr über die Anziehung der Ladungen bzw. Atome. Stattdessen wird das Kraftbild durch das Feld-Bild ersetzt.
Die meisten Schüler*innen versuchen, mit dem Gesamtfeld zu argumentieren, gehen aber nicht auf die Tendenz oder Energieminimierung ein (11). Manche Schüler*innen erläutern die elektrischen Felder (ohne Gesamtfeld) bzw. Einzelfelder, die sich „zusammenziehen“ (3). Es fällt auf, dass die Klassen 11b und 11c eine starke Performanz aufweisen. Dies liegt vermutlich nicht zuletzt auch daran, dass

die Lehrperson B hier nach eigener Aussage ausreichend Zeit investiert hat, um das Prinzip sorgfältig zu erläutern.

14.3.7 Items 7 und 8: Strahlung und thermische Energie

Die Multiple-Chice Items werden auch im Posttest hauptsächlich korrekt beantwortet. Insbesondere Schüler*innen, die im Prätest beide Items falsch beantworteten (siehe S21, S26, S44, S45, S57), beantworten im Posttest beide Items korrekt. Interessant ist auch die Betrachtung der Fälle, die im Prätest noch ein oder beide Item korrekt beantworteten, im Posttest aber falsch. Diese Fälle seien im Folgenden kurz betrachtet; sofern möglich auch vor dem Hintergrund der Items I9 (Feuerwerk) und I11 (Erwärmung des Bodens):

Beide Items korrekt im Prätest, beide falsch im Posttest

Fünf Schüler*innen (S7, S53, S56, S65, S66) beantworten die beiden MC-Items falsch, obwohl sie im Prätest korrekte Antworten gaben. Schüler*in S7 beantwortet generell nur vier Items und gibt mit einer Performanz von Null nur falsche Antworten. Die Kodierung der MC-Items kann hier also nicht im Kontext interpretiert werden, da die Performanz der*s Schüler*in wenig aussagekräftig ist. Ähnlich ist es bei S56, wo kein Item angemessen beantwortet wird (Performanz 0). Die offenen Antworten sind hier sehr allgemein gehalten, beziehen sich zwar gelegentlich auf Felder, aber ohne konkrete Konzeptideen zu verwenden. Hier wird eher im traditionellen Bild argumentiert. Trotzdem wird angegeben, das Konzept habe der*m Schüler*in gefallen. Zu S65 können keine Aussagen gemacht werden, da es hier nur wenig aussagekräftige Antworten auf die weiteren Items gibt.

S53 spricht bei Item I9 (Feuerwerk) davon, dass die Strahlung ihre Wärme abgebe. Die Konzeptideen zu thermischer Energie und elektromagnetischer Strahlung wurden beide nicht verstanden. Auch Schüler*in S66 zeigt eine schwache Performanz und spricht bei I11 nur über die Energieübertragung auf den Boden, nicht aber über Feld oder Bewegung.

Strahlung korrekt im Prätest und falsch im Posttest

Nur S43 antwortet ausschließlich auf das MC-Item zur elektromagnetischen Strahlung falsch. Hier wird bei Item I11 (wie bei S66) darüber gesprochen, dass die Strahlung Energie auf den Boden übertrage, aber nicht auf Feld-Ideen zurückgegriffen. Die Antworten sind insgesamt unpräzise.

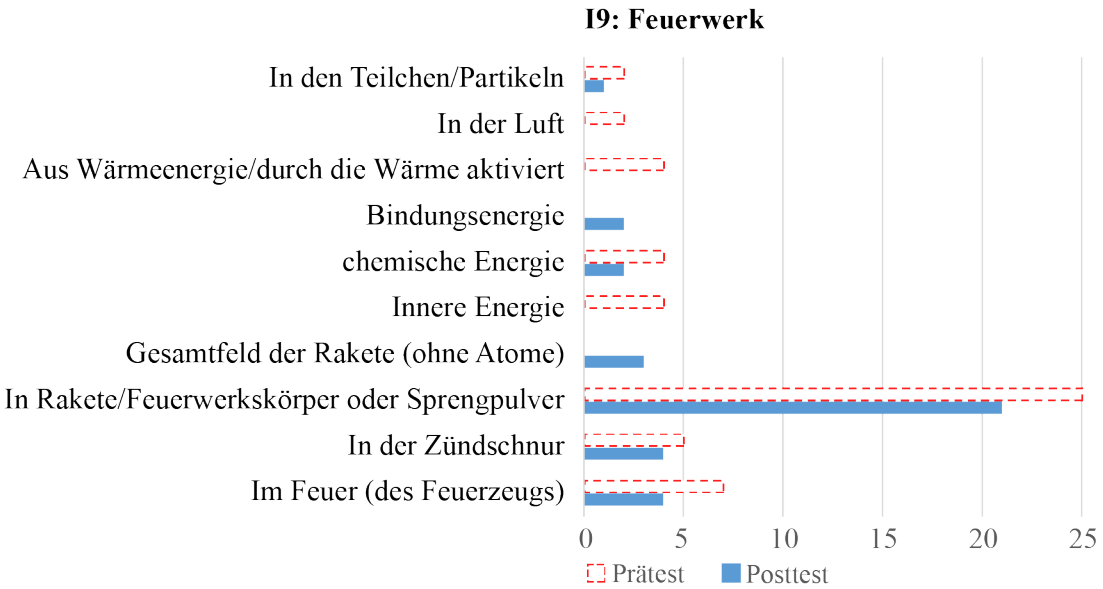


Abbildung 14.7: Übersicht über die relevanten Antworten zu Item 9 (Feuerwerk: *Wo befindet sich die Energie für die Bewegung der Partikel, bevor die Rakete explodiert?*) im Vergleich von Prätest (ungefüllt, gestrichelt) und Posttest (gefüllt).

Thermische Energie korrekt im Prätest und falsch im Posttest

Drei Schüler*innen antworten nur im Posttest falsch auf Item I8 (S12, S41 und S62). Bei S12 ist anzunehmen, dass geraten wird, da die Items ab der Aufgabe zu den Magnetwägen (I4b) nicht mehr beantwortet werden. Schüler*in S62 beschreibt die folgenden Items ohne die Verwendung von Konzeptideen („im Sprengpulver“ bei I9 und „Umwandlung in Wärmeenergie“ bei I11). Auch die Gesamtperformanz der*s Schüler*in (0,2) zeigt, dass die Ideen des EFA nicht übernommen werden. Im Gegensatz zu den anderen Schüler*innen beantwortet Schüler*in S41 das MC-Item zur thermischen Energie falsch, obwohl die Idee ansonsten mit Bewegung assoziiert wird. Bei I11 wird beispielsweise genannt, dass die Erwärmung des Sandes auf die Bewegung der „Sandteilchen“ zurückzuführen ist.[5]

14.3.8 Item 9: Feuerwerk

Die Aufgabe zum Feuerwerk gestaltet sich bis auf Klasse 7a für alle schwierig und es gibt nur wenige korrekte Antworten. Dies liegt vornehmlich daran, dass die wenigsten Schüler*innen auf mikroskopische Felder eingehen und die Energie sowohl im Prä- als auch im Posttest der Rakete, dem Feuerwerkskörper bzw. dem Sprengpulver zuschreiben (siehe Abb. 14.7). Darüber hinaus gibt es wenig spezifische Antworten, d. h. die Schüler*innen beschreiben den Prozess nur sehr knapp

[5]Diese Beschreibung ist zwar nicht angemessen, die Verbindung von thermischer Energie und Bewegungsenergie kleiner Teilchen existiert aber.

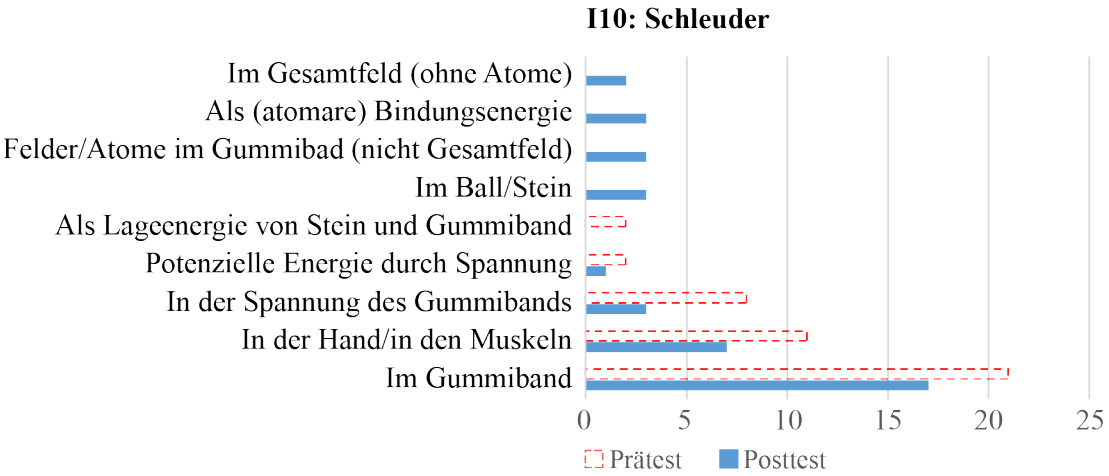


Abbildung 14.8: Übersicht über die relevanten Antworten zu Item 10 (Schleuder: *Wo befindet sich die Energie für die Bewegung des Geschosses, wenn die Schleuder noch gespannt ist?*) im Vergleich von Prätest (ungefüllt, gestrichelt) und Posttest (gefüllt).

oder mit einem Wort. Positiv fällt auf, dass die Nennungen von chemischer Energie abnehmen und innere Energie nicht mehr genannt wird. Außerdem versuchen einige Schüler*innen im Posttest, das Gesamtfeld mit einzubeziehen, allerdings nicht das Feld der Atome oder Ladungen. Stattdessen sprechen sie unspezifisch vom „Gesamtfeld der Rakete“. Eine Argumentation auf der mikroskopischen Ebene findet also nur in wenigen Fällen statt.

14.3.9 Item 10: Schleuder

Wie bereits bei Item 9 sind auch die Antworten zum Kontext *Schleuder* eher unspezifisch. Wenige Schüler*innen greifen auf die Beschreibung mit mikroskopischen Feldern zurück. Es fällt aber auch auf, dass einige Schüler*innen versuchen, über atomare Bindungen zu sprechen und diese mit dem Gesamtfeld in Verbindung zu bringen. Dies gelingt allerdings selten, da teilweise über das Gesamtfeld von Ball und Schleuder, Hand und Schleuder oder über die einzelnen Felder der Atome ohne das Gesamtfeld gesprochen wird. Auch, wenn die Beschreibungen meist nicht vollständig sind, gibt es dennoch Versuche, die Konzeptideen mit dem Beispiel zu verknüpfen. Einfache Antworten wie „im Gummiband“ (17 statt 21), „in der Hand“ (7 statt 11) oder „in der Spannung des Gummibandes“ (3 statt 8) nehmen im Posttest zu Gunsten dieser Versuche ab.

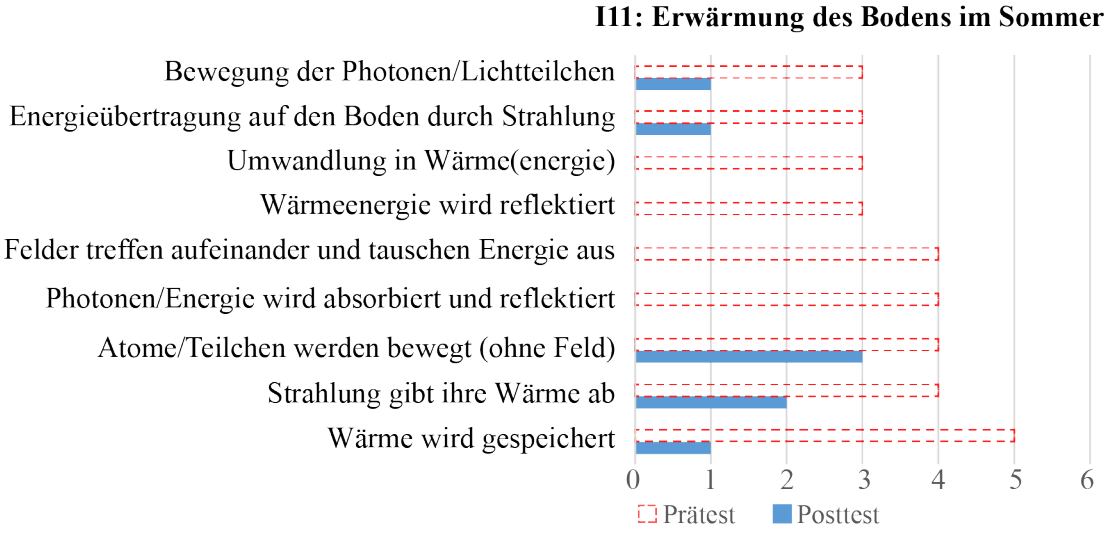


Abbildung 14.9: Übersicht über die relevanten Antworten zu Item 11 (Erwärmung des Bodens im Sommer: *Beschreibe den Prozess der Energieübertragung!*) im Vergleich von Prätest (ungefüllt, gestrichelt) und Posttest (gefüllt).

14.3.10 Item 11: Erwärmung des Bodens im Sommer

Bei der Aufgabe zur Erwärmung des Bodens im Sommer verknüpfen nur zwei Schüler*innen die elektromagnetische Strahlung direkt mit Bewegungsenergie (siehe Abb. 14.9). Schüler*in S42 spricht hier beispielsweise von der Bewegung der „Lichtteilchen“. Dass es sich bei der Strahlung um ein Feld handelt, ist allerdings den meisten Schüler*innen noch nicht klar. Wenn sie über das Feld sprechen, treten verschiedene Fehlvorstellungen auf. So nennen einzelne Schüler*innen die Energieübertragung zwischen Boden und „Gesamtfeld von Sonne und Erde“ (S44), dass sich das Gesamtfeld „erwärmt“ (S46), oder: „Atome der Sonne bewegen sich schnell (heiß) und Boden wird warm“ (S14). Letztere*r Schüler*in verbindet offenbar die atomare Bewegungsenergie mit *Hitze*, allerdings in einem Zusammenhang, der kausal nicht korrekt ist. Man kann daraus schließen, dass die Strahlung eher mit Wärme als mit einem Feld verknüpft wird, auch wenn Versuche zur Verknüpfung mit den Feld-Ideen existieren. Positiv fällt auf, dass einzelne problematische Antworten im Prätest nicht mehr vorkommen, wie z. B. dass „Wärmeenergie“ umgewandelt oder reflektiert werde, Felder aufeinander treffen und dabei Energie austauschen oder Photonen bzw. deren Energie absorbiert werden. Insgesamt wird weniger über Photonen und deutlich weniger über Wärme gesprochen und stattdessen, auch wenn in manchen Fällen inkorrekt, auf Feld-Ideen zurückgegriffen (z. B. das ‚Gesamtfeld von Strahlung und Erde‘).

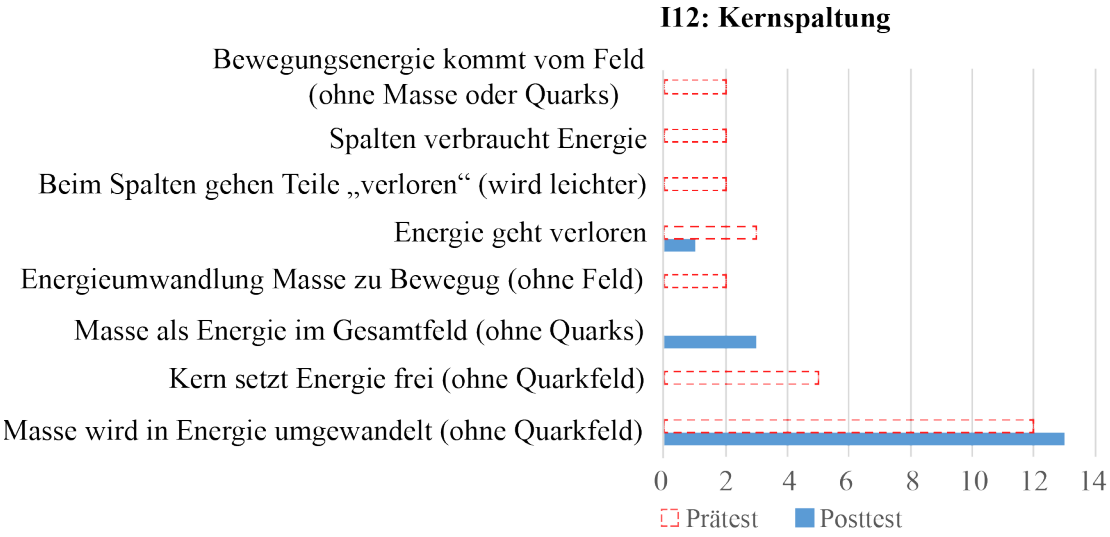


Abbildung 14.10: Übersicht über die relevanten Antworten zu Item 12 (Kernspaltung: *Warum geht hier scheinbar Masse „verloren“? Woher kommt die Bewegungsenergie?*) im Vergleich von Prätest (ungefüllt, gestrichelt) und Posttest (gefüllt).

14.3.11 Item 12: Kernspaltung

Abbildung 14.10 veranschaulicht die häufigsten Antworten zu Item 12. Es ist zu sehen, dass einzelne ad-hoc Antworten aus dem Prätest verschwinden. So wird der Verbrauch bzw. Verlust von Energie fast nicht mehr erwähnt.[6] Auch die Begründung, dass Masse „verloren“ geht wird nicht mehr genannt. Dass Energie freigegeben wird, wurde teilweise im Prätest ohne Erläuterung angegeben und verschwindet im Posttest. Stattdessen wird die Masse mehr mit dem Gesamtfeld verknüpft. Auch wenn einige Schüler*innen nicht spezifizieren, dass es sich dabei um das Quarkfeld handelt, werden dennoch Feld-Ideen mit der Masse verknüpft. Interessant ist auch, dass in manchen Fällen über die „Quarkenergie“ gesprochen wird, nicht aber über das Feld. Auch Formulierungen wie „Es wird kein Kleber mehr gebraucht, um die Quarks zusammenzuhalten“ (S14) werden geäußert. Einzelne Schüler*innen beschreiben den Prozess sogar verhältnismäßig ausführlich:

> „$E = mc^2$, also Energie = Masse. Die „verlorene“ Masse, die eigentlich Feldenergie der Quarkfelder der Quarks war, wurde in die Bewegungsenergie der Tochterkerne umgewandelt, als der Kern sich spaltete.“ (S38, I12)

Es fällt allerdings auch auf, dass der Begriff *Quarkfeld* insgesamt selten verwendet wird. Eher wird über das Gesamtfeld oder die Quarks bzw. Quarkenergie gesprochen.

[6] Diese Beobachtung spiegelt auch die Erkenntnisse zu den Items 2a und 2b wider.

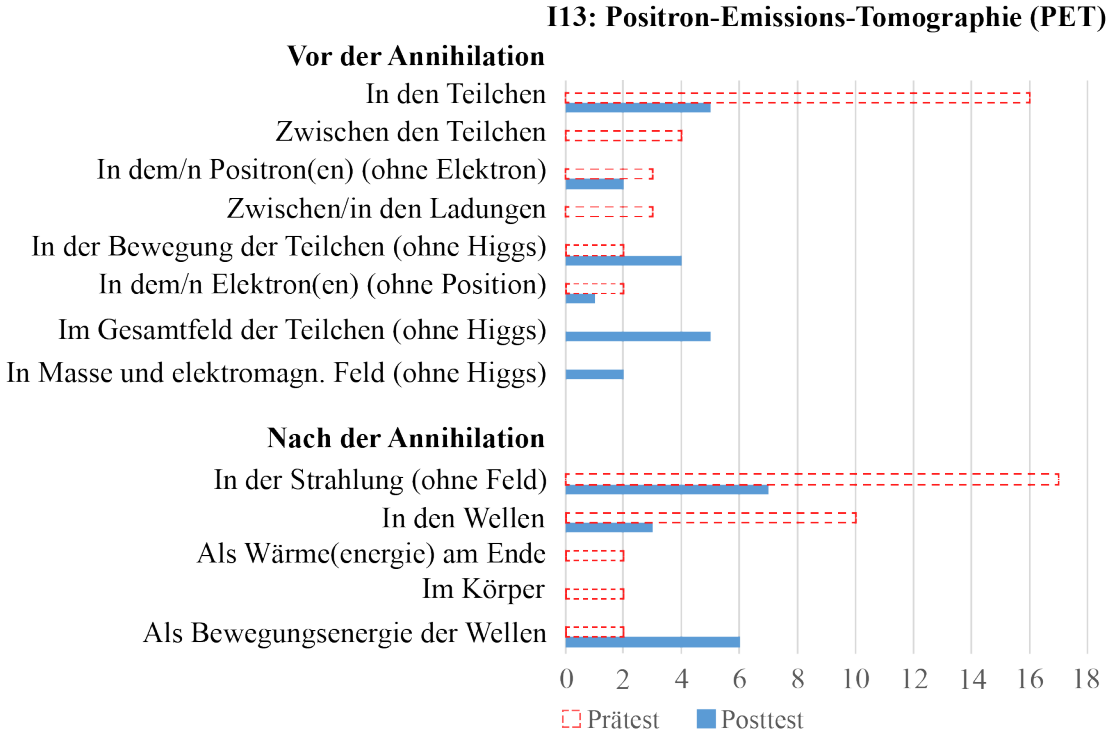


Abbildung 14.11: Übersicht über die relevanten Antworten zu Item 13 (PET: *Beschreibe kurz: Wo befindet sich die Energie am Anfang und wo am Ende?*) im Vergleich von Prätest (ungefüllt, gestrichelt) und Posttest (gefüllt).

14.3.12 Item 13: Positron-Emissions-Therapie (PET)

Der Abbildung 14.11 ist zu entnehmen, dass sich das Antwortverhalten von Prä- und Posttest deutlich unterscheidet. Auffällig ist, dass auch im Posttest wenig auf das Higgsfeld zurückgegriffen wird. Zwar werden Masse und Energie verknüpft, aber selten der Bezug zum Higgsfeld hergestellt. Für viele Schüler*innen genügt es, den Zusammenhang von Energie und Masse (Energie-Masse-Äquivalenz) herzustellen, ohne dabei auf das Higgsfeld als Ursache für die Masse der Elementarteilchen einzugehen. Ein weiterer problematischer Aspekt ist die Zuschreibung der Energie zur „Bewegung der Wellen“. Im Prätest sprachen nur zwei Schüler*innen explizit über die „Bewegungsenergie der Wellen“, im Posttest hingegen sechs. Dafür wird die Energie als Bewegungsenergie spezifiziert und nicht nur allgemein den Wellen zugeordnet (vorher zehn Schüler*innen, im Posttest zwei). Drei der Schüler*innen (S41, S43, S46) wechseln explizit darin, dass sie die Energie „in den Wellen“ lokalisierten (Prätest) und dann der Bewegung der Wellen zuschreiben (Posttest). S34 und S56 wechseln von der Antwort „in der Strahlung“ zu „in den Wellen“. Die Zuschreibung der Energie zur Strahlung nimmt insgesamt zu Gunsten des Wellen- bzw. Feldbildes ab.

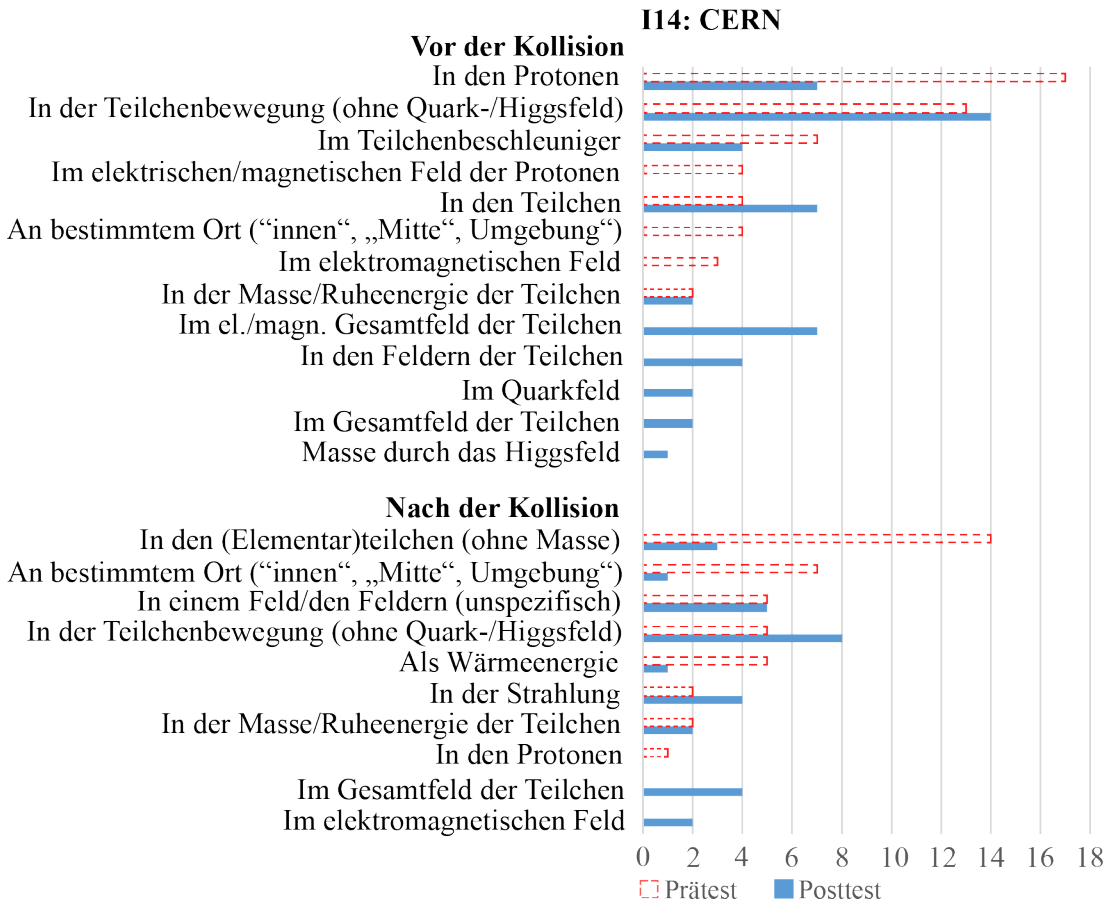


Abbildung 14.12: Übersicht über die relevanten Antworten zu Item 14 (CERN) im Vergleich von Prätest (ungefüllt, gestrichelt) und Posttest (gefüllt).

Dass die Energie zu Beginn wenig konkret den Teilchen zugeschrieben wird, kommt im Posttest deutlich seltener vor. Auch die Nennung „zwischen“ den Teilchen bzw. Ladungen kommt nicht mehr vor. Dafür wird die Energie öfter dem Gesamtfeld der Teilchen (ohne Higgsfeld) bzw. der Masse zugeschrieben. Auch wenn die Begründungen nicht immer korrekt sind, wird auf Feld-Ideen zurückgegriffen und nach Feldern gesucht. Drüber hinaus wird im Posttest nicht mehr über Wärme gesprochen, im Prätest hingegen schon. Auch die Antwort, die Energie werde in den Körper übertragen verschwindet (vorher zwei im Prätest).

14.3.13 Item 14: Protonen-Kollision am CERN

Wenngleich manche Schüler*innen das Quark- und Higgsfeld bei ihren Beschreibungen einbeziehen, werden diese dennoch nur selten explizit verwendet. Allerdings fällt auf, dass unspezifische Antworten wie „im Teilchenbeschleuniger“ oder „in den Teilchen“ deutlich seltener vorkommen (siehe Abb. 14.12). Stellvertretend werden die Felder der Teilchen oder das elektromagnetische Feld mit einbezogen.

Zwar wird teilweise über das Gesamtfeld gesprochen, ohne dies zu explizieren, insgesamt werden die Antworten aber spezifischer und verwenden Konzeptideen des EFA. Weiters ist zu bemerken, dass „Wärmeenergie“ im Posttest fast nicht mehr genannt wird. Außerdem schrieben einige Schüler*innen die Energie im Prätest noch einem bestimmten Ort im Beschleuniger zu (z. B. „innen“, „in der Mitte“ oder „in der Umgebung“). Im Posttest geschieht dies nur bei einem*r Schüler*in.

14.3.14 Weitere Auffälligkeiten

Zusammenhang von Note, Interesse, Einschätzung und Performanz

Die Basisdaten und Performanzwerte der Schüler*innen können auch hinsichtlich ihres Zusammenhangs betrachtet werden. Bildet man Mittelwerte der Basisdaten abhängig von der Note der Schüler*innen, so ist Tabelle 14.7 zu entnehmen, dass die Performanz für unterschiedliche Noten der Schüler*innen weder besser noch schlechter ausfällt. Die Daten lassen also nicht vermuten, dass das Konzept besser oder schlechter für eine bestimmte Leistungsstärke von Schüler*innen geeignet ist. Gleiches gilt für die Einschätzung des Konzeptes. Diese zeigt, dass es abhängig von der Note auch nicht mehr oder weniger als hilfreich eingestuft wird. Außerdem ist es interessant, diesbezüglich speziell zwei Fälle zu betrachten: Schüler*in S9 weist eine einwandfreie Performanz auf, beendet den Posttest aber nach Item 8. Mit einem selbst eingeschätzten Interesse von 2 und Note 4 zählt diese*r Schüler*in klassenintern zu den weniger interessierten und weniger leistungsstarken und bewertet das Konzept mit Stufe 1 auf der Likert-Skala. Im Gegensatz dazu weist auch S20 eine nahezu perfekte Performanz auf und beendet den Test ebenfalls frühzeitig (nach Item 11). Die Note 2 deutet eine leicht überdurchschnittliche Stärke im Vergleich mit den Mitschüler*innen an und das Interesse wird mit 5 (sehr interessiert) angegeben. Das Konzept wird mit 5 (gefällt sehr gut) bewertet. Aus dem Vergleich dieser beiden Fälle geht hervor, dass eine starke Performanz nicht zwangsläufig mit einer hohen Leistungsstärke im Unterricht einhergeht. Interessanter Weise bedeutet dies aber auch nicht, dass den Schüler*innen das Konzept gefallen muss, damit sie die Ideen verstehen und übernehmen. Für bestimmte Interessenswerte der Selbsteinschätzung ist auch kein Zusammenhang mit der Performanz oder Einschätzung des Konzeptes erkennbar (s. Tab. 14.8). Lediglich die Note und der Interessenswert scheinen zusammenzuhängen. So zeigen Schüler*innen mit einer guten Note auch eine hohe Einschätzung des eigenen Interesses an Physik.[7]

[7]Nach Bortz und Schuster (2011, S. 178) ergibt sich ein Rangkorrelationskoeffizient (Spearman-Rho) von $\rho = -.77$ und damit eine starke Korrelation. Der Koeffizient ist negativ, da eine gute Note einem kleinen Wert und ein großes Interesse einem hohen Wert entspricht.

Note	1	2	3	4	5
Anzahl Schüler*innen	20	10	14	8	1
Interesse	3,1	3,6	3,0	2,9	1,0
Einschätzung	3,1	3,8	3,3	3,9	4,0
Performanz	0,9	1,2	0,8	0,6	0,4

Tabelle 14.7: Überblick über Interesse, Einschätzung und Performanz der Schüler*innen abhängig von ihrer letzten Zeugnisnote in Physik. Die Werte ergeben sich als Mittelwerte der Schüler*innen mit der entsprechenden Note. Ausnahme ist die Spalte für Note 5, da hier nur ein*e Schüler*in vorhanden ist und es sich daher um einen Einzelfall handelt.

	‚überhaupt nicht'		...		‚sehr interessiert'
Interesse	1	2	3	4	5
Anzahl Schüler*innen	1	8	24	14	6
Note	4,0	3,3	2,5	1,6	1,2
Einschätzung	1,0	3,5	3,0	3,2	2,7
Performanz	1,8	0,8	1,0	0,7	0,5

Tabelle 14.8: Überblick über Note, Einschätzung und Performanz der Schüler*innen abhängig von ihrem selbst eingeschätzten Interesse für Physik. Die Werte ergeben sich als Mittelwerte der Schüler*innen mit dem entsprechenden Interessenswert. Ausnahme ist die Spalte für Interesse „1", da hier nur ein*e Schüler*in vorhanden ist und es sich daher um einen Einzelfall handelt.

Rückgriff auf Energieformen und „Wärme(energie)"

Es fällt auf, dass im Prätest selten auf angemessene Ideen des traditionellen Unterrichts zurückgegriffen wird. Nur vereinzelt wurde sich auf die Umwandlung bzw. Umformung von Energieformen bezogen. Teilweise wurden Begriffe wie „potenzielle" oder „Bewegungsenergie" bzw. „chemische Energie" (z. B. Feuerwerk) oder „Wärme" verwendet, diese aber meist nicht genauer beschrieben bzw. verknüpft. Außerdem wurde von einigen Schüler*innen bei unterschiedlichen Items im Prätest auf Wärme bzw. „Wärmeenergie" zurückgegriffen. Bei der Erwärmung des Bodens (Item 11) wurde die Erwärmung beispielsweise oft auf ein „Übertragen" oder „Abgeben" der Wärme zurückgeführt, die von der Strahlung transportiert wird. Diesbezüglich wurde auch über die Aufnahme oder Reflexion der Wärme gesprochen. Insgesamt beschrieben die Schüler*innen die Energieübertragung bei Item 9 (Feuerwerk), Item 11 (Boden im Sommer) und den Items zur modernen Physik öfters mit der Umwandlung von/in Wärme(energie); dies allerdings meist ohne angemessene Begründung. Die Antworten hatten hier einen problematischen Charakter, da sie eher als ad-hoc Antworten erschienen und selten mit treffenden physikalischen Konzepten verknüpft waren. „Wärme" schien hier für manche als eine Art Blackbox-Antwort für komplexe Phänomene zu dienen. Im Posttest ver-

schwindet diese Tendenz und die Meisten greifen vermehrt auf Konzeptideen des EFA zurück. So wechseln bei Item 9 (Feuerwerk) vier Schüler*innen (S17, S24, S45, S46) auf alternative Antworten aus, bei Item 11 wird im Posttest häufiger über die Strahlung gesprochen, ohne dabei auf die Übertragung von Wärme einzugehen. Ebenso beziehen sich die Schüler*innen bei Item 13 (PET) mehr auf Feld-Ideen, auch wenn diese nicht immer angemessen verwendet werden.

Vergleich der Klassen

Klasse 10 (Lehrperson A) zeigt eine gemischte Performanz und wurde nicht zur modernen Physik unterrichtet. Die Klassen 11a und 11b (Lehrperson B) zeigen eine im Vergleich deutlich bessere Performanz und kommen auch zu großen Teilen mit den Konzeptideen zu Quark- und Higgsfeld zurecht. Die Klassen 11c und 12 (Lehrperson C) hingegen haben Schwierigkeiten ab den Items zum Mikrokosmos. Hier bildet sich der Eindruck ab, der sich bereits bei den Nachbesprechungen zeigte: Das Konzept wurde von den drei Lehrpersonen unterschiedlich unterrichtet. Während Lehrperson A die moderne Physik grundsätzlich ausließ, führte Lehrperson B die Ideen zu Gesamtfeld, Energie und Tendenz des Feldes sorgfältig ein. Diese Sorgfalt scheint sich in der Performanz der beiden Klassen widerzuspiegeln. Lehrperson C stellt ihren Schüler*innen frei, den Unterricht zu besuchen und unterrichtete frontal. Klasse 11c macht den Eindruck, dass einzelne Aspekte (z. B. Feuerwerk, Schleuder) nicht oder nur sehr knapp unterrichtet wurden. Außerdem erhielt die Lehrperson wenig Feedback der Schüler*innen, weswegen sie keinen detaillierten Einblick erhielt, wie das Konzept verstanden wurde. Diese Faktoren scheinen sich in einer verhältnismäßig schwachen Performanz abzubilden. Wie groß das Maß der konzepttreuen Umsetzung der einzelnen Lehrperson war, kann nicht bestimmt werden.

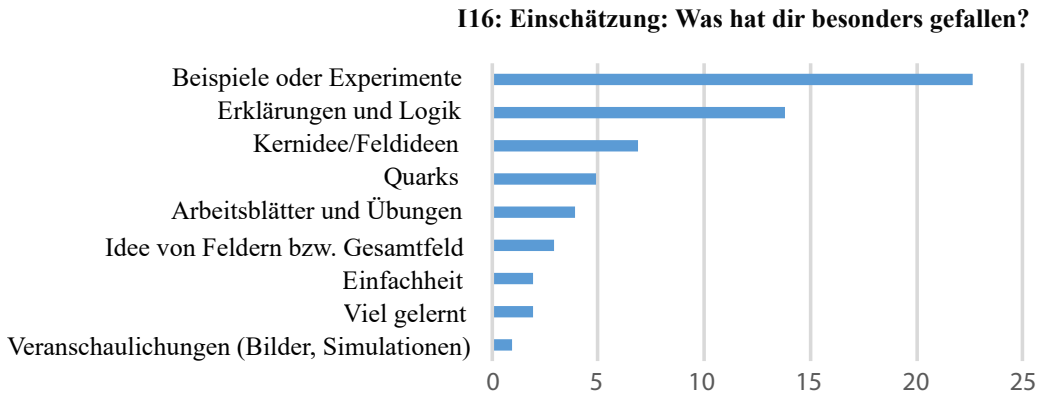


Abbildung 14.13: Übersicht über die Einschätzung des EFA seitens der Schüler*innen.

14.4 Einschätzung des Konzeptes

Neben der Einschätzung des Konzeptes auf der fünfstufigen Likert-Skala in Item 15 sollten die Schüler*innen angeben, welche Aspekte des Konzeptes ihnen besonders gefallen haben und wo sie Verbesserungspotenzial sehen. Im Folgenden werden die Anmerkungen zusammengefasst.

14.4.1 Benefits und Verbesserungsvorschläge

Benefits

Den Äußerungen der Schüler*innen in Abb. 14.13 ist zu entnehmen, dass ihnen besonders die verschiedenen Beispiele und Experimente bzw. Veranschaulichungen gefallen haben. Dabei loben neun Schüler*innen die Experimente allgemein und einzelne heben die Beispiele zu Magnetwägen, Ringmagneten Luftballons, Feuerwerk, Pendel, Mikrowelle, PET, Kernspaltung und Satellitenbewegung hervor. Auch die Beschreibungen/Erklärungen und der Aufbau des Konzeptes werden von 14 Schüler*innen begrüßt und explizit als hilfreich herausgestellt. Die Kernidee von Energie und Feldern habe sieben Lernenden besonders gefallen. Gelobt werden auch die Ideen zu Quarks und Quarkfeld, die Arbeitsblätter und Übungen sowie die „Einfachheit“ des Konzeptes. Dabei werden auch die Ideen zu Feldern, Gesamtfeld und dessen Veranschaulichung in einzelnen Fällen explizit erwähnt. Schüler*in S38 fasst den Eindruck wie folgt zusammen:

> „Dass eine allgemeinere und grundlegende [sic] Erklärung für Energien gezeigt wurde, also nicht viele versch. Energieformen mit versch. Namen (z. B. elektrische. . .) ohne einen Zusammenhang[.]“

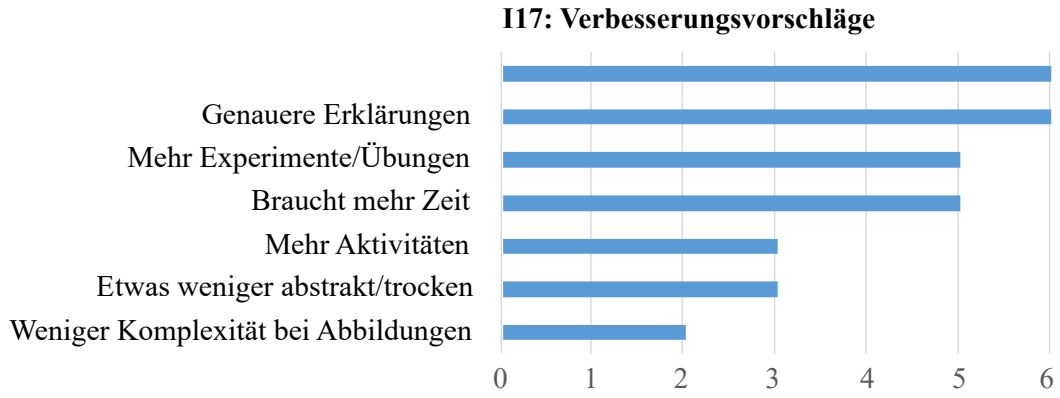


Abbildung 14.14: Übersicht über die Verbesserungsvorschläge der Schüler*innen zum Energie-Feld-Ansatz.

Verbesserungsvorschläge

Ein paar Schüler*innen merken an, dass die Erklärungen kompliziert seien und die Inhalte etwas einfacher erklärt werden sollten (6) bzw. mehr Zeit benötigt werde (5; vgl. Abb 14.14). Auch der Wunsch nach mehr Übungen (5) oder Aktivitäten (3) kommt auf. Insgesamt scheinen die Inhalte für manche Schüler*innen noch sehr abstrakt und kompliziert zu sein. Es werden ausführlichere und konkretere Erklärungen und Beispiele gefordert, welche die Beschreibung der abstrakten Komponenten des Konzeptes sorgfältig unterstützen.

14.4.2 Feedback der Lehrpersonen

Die Lehrer*innen geben an, dass ihnen das Unterrichten gemäß dem EFA gefallen habe und sie das Konzept in dieser oder einer angepassten Form weiter verwenden würden. Die empfundene „Einfachheit“ des Konzeptes in seiner Sachstruktur wird dabei besonders betont. Lehrperson A gibt an, dass sie sich vorstellen könne, das Konzept bereits in der Sekundarstufe I einzuführen. Dann sei es aber sinnvoll, auch über Energieformen zu sprechen, um das Konzept mit dem traditionellen Unterricht zu verknüpfen.

14.4.3 Feedback aus Fortbildungen für Lehrpersonen

Über die Erprobung im Klassensetting hinaus wurde der EFA auf zwei Fortbildungen für Lehrpersonen vorgestellt. Das Konzept wurde dazu anhand der Handreichung erläutert und diskutiert. Am Ende sollten die Teilnehmenden ein kurzes und offenes schriftliches Feedback abgeben, wie sie das Konzept einschätzen. Dabei stellte sich heraus, dass die Kernidee des EFA von den meisten begrüßt wird.

Wie bereits von den Lehrpersonen im Klassensetting wurde explizit die „Einfachheit“ des Konzeptes und seinem Aufbau gelobt. Besonders elegant erscheine dabei, dass man mit wenigen Grundideen viele Phänomene plausibel beschreiben könne. Auch die Erläuterungen zur elektromagnetischen Strahlung (Entstehung durch die Veränderung des atomaren Feldes) wurden von einzelnen Lehrpersonen explizit gelobt.
Wenn Kritik auftrat, dann unter der Annahme, dass das Konzept relativ abstrakt wirke und nicht für alle Jahrgangsstufen geeignet sei. Auf der anderen Seite geben einzelne Lehrer*innen an, dass sie den EFA in ihrem Energieunterricht erproben wollen. Auch die frühzeitige Eingliederung fundamentaler Aspekte des Konzeptes im Einführungsunterricht zur Energie könnten sich einzelne Personen vorstellen.

14.5 Diskussion und Resümee

Die Erprobung des EFA in der Unterrichts-Praxis lieferte aufschlussreiche Einblicke in das Lernen gemäß dem EFA im Klassensetting. Einige Schüler*innen sind in der Lage, die Richtung der Energieübertragung im Zusammenhang mit der Tendenz des Feldes angemessen zu beschreiben und auf verschiedene Phänomene anzuwenden. Auch auf das Gesamtfeld und dessen aktive Rolle bei der Beschreibung von Prozessen wird von vielen Schüler*innen zurückgreifen. Bei der Beschreibungen aus der Feld-Perspektive werden die Feld-Ideen oft adäquat angewendet. So ist im Vergleich von Prä- und Posttest ein deutlicher Übergang von Alltagsvorstellungen zu Feld-Ideen zu beobachten. Ebenso wird im Posttest, insbesondere im Kontext der elektromagnetischen Strahlung, weniger auf die Energieform ‚Wärme‘ bzw. ‚Wärmeenergie‘ zurückgegriffen und die Prozesse stattdessen angemessener über Feldenergie beschrieben. Außerdem werden die Begriffe *Arbeit* und *Kraft* weniger verwendet. Im Prätest wurden Kraft und Energie oft noch unangemessen gleichgesetzt. Diese aus der Literatur bekannte Fehlvorstellung (vgl. Kapitel 3.2) ist in den Antworten des Posttest kaum mehr zu erkennen. Stattdessen wird Energie öfter explizit als Erhaltungsgröße herausgestellt. Die Erkenntnisse deuten also darauf hin, dass sich das epistemische Verständnis von Energie nach der Instruktion mit dem EFA hin zu fachlich angemesseneren Vorstellungen entwickelt.

Neben vielen positiven Aspekten zeigen sich in der Analyse auch einzelne Probleme, die bereits aus den Akzeptanzbefragungen zum EFA bekannt sind. Dazu zählt das Bezugspunktproblem und die Suche nach mikroskopischen Feldern und Bewegungen. Dabei wird deutlich, dass teilweise *synthetische Modelle* eine Rolle spielen (siehe Kap. 2.3), beispielsweise wenn Schüler*innen bei der Aufgabe „Erwärmung

des Bodens“ über das ‚Gesamtfeld von Strahlung und Erde‘ sprechen. Die Analyse zeigt, dass die Lernenden solchen schwierigen Stellen zwar auf die Konzeptideen zurückgreifen, diese aber teilweise noch mit Alltagsvorstellungen oder typischen Fehlvorstellungen vermischen. Darüber hinaus zeigen die Aufgaben zur Beschreibung von Prozessen auf mikroskopischer Ebene (z. B. atomare Felder beim Feuerwerk), dass den Schüler*innen teilweise eine Begründung auf mikroskopischer Ebene nicht notwendig erscheint. Sie greifen dann meist auf makroskopische Beschreibungen zurück und vernachlässigen die Betrachtung mikroskopischer Felder.

Die Ergebnisse spiegeln die Erkenntnisse zu Benefits und Schwierigkeiten aus den Akzeptanzbefragungen wider. Aus ihnen resultieren einzelne Überarbeitungsvorschläge für die weitere Umsetzung des Konzeptes: Es ist ratsam, das Gesamtfeld über dessen Energie zu motivieren und einzuführen. Dabei sollten die Feld-Attribute deutlich kommuniziert und Relevanz des Feldes für die Beschreibung von Prozessen herausgestellt werden. Dabei nimmt die Tendenz des Feldes eine besondere Stellung ein. Sie muss sorgfältig und mit genügend Beispielen erläutert werden. Insbesondere die Sensitivität der Richtung der Energieübertragung in Abhängigkeit von einer attraktiven bzw. repulsiven Wechselwirkung muss den Schüler*innen deutlich gemacht werden. In diesem Zusammenhang ist es sinnvoll, die Konzeptideen inhaltlich und sprachlich zu befolgen und die logische Abfolge beizubehalten.
Dem Feedback der Lehrer*innen war zu entnehmen, dass es für die Verbindung von elektromagnetischer Strahlung mit Feldenergie wichtig ist, den Schüler*innen die ‚Entstehung‘ der Strahlung zu erläutern. Dafür scheint sich die Motivation über die Abstrahlung eines Atoms zu bewähren. Auch die Konzeptualisierung von thermischer Energie mit Bewegungsenergie gelingt reibungsloser, wenn ausreichend Veranschaulichungen gegeben werden, beispielsweise durch das BB-Bag. Besondere Sorgfalt ist beim Übergang von der makroskopischen auf die mikroskopische Ebene geboten. Hier muss Schüler*innen bewusst gemacht werden, dass sich die Feld-Ideen auch auf die atomare bzw. subatomare Ebene übertragen lassen. Abstrakte Zusammenhänge, insbesondere bei Quark- und Higgsfeld, sollten von konkreten Beispielen begleitet und mit ausreichend Zeit vermittelt werden. Insgesamt ist dem Feedback der Lehrpersonen und Schüler*innen ist zu entnehmen, dass die Prinzipien des EFA als sinnvoll und hilfreich eingeschätzt werden, mehr Zeit und weitere Beispiele aber helfen würden, die teils komplizierten Zusammenhänge noch genauer zu vermitteln bzw. zu verstehen.

Die Stichprobengröße ($N = 53$ zusammengehörige Prä- und Posttests) ermöglichte einen breiteren Einblick in das Lernen von Schüler*innen mit dem EFA. Über die detaillierten qualitativen Einblicke der Akzeptanzbefragungen hinaus konnte so die Umsetzbarkeit des Konzeptes auf einer größeren Skala untersucht werden. Auch wenn die Ergebnisse für eine generelle Realisierbarkeit des Ansatzes für den Schulunterricht sprechen, bringt die Evaluationsmethode die folgenden Limitationen mit sich.

Da es sich bei der Erhebung um eine gezielte Überprüfung der Übernahme und Anwendung der Konzeptideen handelt, ist ein Vergleich mit dem Lernen nach dem traditionellen Energieunterricht nur eingeschränkt möglich. So liefert die Erprobung zwar Evidenzen dafür, dass der EFA das Energieverständnis verbessert und die Feld-Ideen die Beschreibung von Prozessen unterstützen. Wie genau einzelne Aspekte der Umsetzung im Klassensetting aber den Lernprozess beeinflussen, konnte nicht betrachtet werden. Für einen gezielten Vergleich mit dem traditionellen Ansatz wäre also eine kontrollierte Vergleichsstudie notwendig. Auch die Übertragbarkeit auf die Sekundarstufe I bleibt offen. Die Resultate legen nahe, dass einzelne Aspekte auch bereits in tieferen Jahrgangsstufen eingeführt werden könnten, konkrete Aussagen über die Umsetzbarkeit oder Wirksamkeit für diese Altersklasse können aber nicht getroffen werden. Die Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse ist mit Vorsicht zu betrachten. Die bewusst gering gewählte Stichprobengröße begrenzt die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Grundgesamtheit. Die Befunde sind somit als lokales Abbild der Zielgruppe zu verstehen. Dass die Eigenschaften der Schüler*innen und Lehrpersonen nicht kontrolliert wurden, beschränkt die Generalisierbarkeit zusätzlich.

Zusätzlich ist die Aussagekraft der Erprobung durch die schwer zu bestimmende Konzepttreue der Umsetzung limitiert. Auch wenn eine konzepttreue Implementation durch die Lehrpersonen teilweise mittels Verlaufsprotokollen und Nachbesprechungen überprüft werden konnte, lassen die Ergebnisse dennoch Fragen zur tatsächlichen Umsetzung offen. Die COVID-19 Maßnahmen sorgten dabei für Abweichungen vom Präsenz-Unterricht. Teilweise wurden Aspekte nicht unterrichtet bzw. verschiedene Schwerpunkte gesetzt. Aus den Daten im Zusammenhang mit den Nachbesprechungen geht hervor, dass die Konzeptideen abhängig von den Lehrpersonen mit unterschiedlicher Sorgfalt unterrichtet wurden. Insgesamt sprechen die Befunde dafür, dass das Maß der Konzepttreue beim Unterrichten des EFA einen großen Einfluss auf das Verständnis der Schüler*innen und damit die Übernahme und den Umgang mit den Konzeptideen hat. Mehr Zeit und größere Sorgfalt scheinen zu einer besseren Performanz und einer wahrscheinlicheren Übernahme zu führen.

KAPITEL 15

Mathematisierung des EFA: Konzeption

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass es möglich ist, Schüler*innen das Thema Energie nach dem Energie-Feld-Ansatz über die Energie in Feldern und Bewegungen nahezubringen. Die Konzeptideen des EFA eignen sich, um Zusammenhänge zwischen Energie und Feldern zu vermitteln. Außerdem können Schüler*innen die Konzeptideen nutzen, um damit Prozesse fachlich angemessen aus der Energieperspektive zu beschreiben. Folglich ist des denkbar, dass der EFA als Einbettung im Physikunterricht der Sekundarstufe II das bisherige Verständnis von Energie verbessert. Da das EFA-Konzept in seiner bisherigen Form allerdings lediglich qualitative Argumente zur Beschreibung von Phänomenen bietet, wird es noch um eine quantitative Komponente erweitert. Diese Erweiterung soll die Brücke zwischen bisherigem Konzept (bestehend aus qualitativen Beschreibungen) und den Formeln des traditionellen Unterrichts bilden. Damit ist gemeint, dass eine Anknüpfung zum typischerweise auch quantitativ ausgerichteten Unterricht der Sekundarstufe II geschaffen wird. Denn dieser nutzt Formeln, die stark mit den traditionellen Energieformen verknüpft sind, um Berechnungen zu ermöglichen. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Entwicklung einer Erweiterung des bisher qualitativen Konzeptes beschrieben; den hier sogenannten EFA-M (Mathematisierung des Energie-Feld-Ansatzes). So sind dann Beschreibungen aus der Energieperspektive nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ möglich. Der Ansatz lässt sich so in den traditionellen Unterricht einbetten, um nicht nur ein inhaltlich tieferes Verständnis zu fördern, sondern auch den entsprechenden

mathematischen Formalismen einen tieferen Sinn und damit eine Bedeutung zu geben. Die Überlegungen der Konzeption sind an die Vorschläge zur Mathematisierung in Kapitel 3.4 angelehnt.

15.1 Ziel und Designprinzipien des EFA-M

15.1.1 Ziel des EFA-M

Wann immer Prozesse durch Formeln beschrieben werden, sollen diese mit den Konzeptideen des EFA verknüpft werden. Dadurch wird den formalen Ausdrücken eine inhaltliche konzeptuelle Bedeutung beigemessen. Ziel dabei ist, dass Schüler*innen die Formeln nicht nur auswendig lernen oder durch Übung anwenden können, sondern auch deren Bedeutung verstehen. Bereits Ernst Mach formuliert diesbezüglich, dass mathematische Formeln noch keine Physik seien, solange man nicht sagen könne, was ihre Symbole bedeuten (Mach, 1912, S. 19). Nach Sherin (2001) kann Schüler*innen über die inhaltliche Ausgestaltung der *Symbolic Forms* vermittelt werden, dass Symbole und Terme in Gleichungen nicht nur eine Zusammenstellung von Zeichen sind, sondern dass sie eine physikalische Bedeutung tragen (s. auch Kapitel 3.4). Das Argument ist hier also, dass Ausdrücke in Formeln auf eine Weise mit Inhalt verknüpft werden, dass die Formeln selbst dadurch verständlicher und – was ein Vorteil dieser Verknüpfung wäre – leichter zu merken werden. Die Mathematisierung des Energie-Feld-Ansatzes stellt diese Verknüpfung von Konzeptideen und Formeln als inhaltliche Erweiterung dar. Dabei dient die Mathematik u. a. als Werkzeug der Physik. Schüler*innen erleben dies im Schulunterricht meist dadurch, dass Formeln für die quantitative Beschreibung von Prozessen eingeführt werden. Dabei werden die zur Beschreibung verwendeten Energieformen mit einer entsprechenden Formel verknüpft, wie z. B. elektrische Energie, potenzielle Energie (im Gravitationsfeld) oder Spannenergie.
Ziel des EFA-M ist es also, Energieübertragung in Phänomenen/Prozessen auch mathematisch verständlich zu machen. Dazu werden den Schüler*innen insbesondere zwei wesentliche Vorteile der Mathematik genannt (Nutzen):

- Prozesse lassen sich kompakt beschreiben. So kann man in einer Formel erkennen, wie sich Objekte und Felder verhalten werden. Dies liefert also Aussagen über die *Richtung eines Prozesses*.
- Man kann nicht nur sagen „was passiert“, sondern auch berechnen, „in welchem *Ausmaß*“. So kann man z. B. nicht nur begründen, dass ein fallender Ball Energie zu seiner Bewegung aus dem Gravitationsfeld erhält und dabei schneller wird, sondern auch berechnen, wie schnell er wird.

Es sei noch angemerkt, dass implizit zwischen Prozess- und Zustandsgrößen unterschieden wird. So wird beispielsweise sprachlich zwischen Wärme (übertragene Energie) und thermischer Energie (einem System zugeschriebene Energie) unterschieden. Im Rahmen des EFA-M werden sowohl absolute Energien als auch Energiedifferenzen betrachtet.

15.1.2 Designprinzipien

Im Folgenden werden wesentliche Prinzipien beschrieben, die bei der Verknüpfung von EFA und den entsprechenden Formeln des traditionellen Unterrichts beachtet werden. Die Zusammenhänge sollen dabei möglichst einfach und intuitiv gehalten werden, sodass der Rückgriff auf die Konzeptideen auch als Werkzeug verstanden werden kann.
Bewegungsenergie (kinetische Energie) wird im Schulunterricht meist mit der Formel $E = \frac{m}{2}v^2$ assoziiert. Dieser Zusammenhang kann für den EFA-M so beibehalten werden, da sie sich — wie auch die Zuordnung der Bewegungsenergie im EFA — auf Objekte mit Masse und ihr Tempo bezieht.
Für die Formen potenzieller Energie ist es etwas komplizierter: Für Feldenergie gibt es im Schulunterricht mehrere bereits bekannte Formeln für verschiedene Energieformen, z. B. elektrische Energie, potenzielle Energie (im Gravitationsfeld), Energie im geladenen Kondensator, Spannenergie einer elastischen Feder, etc. Entsprechend vielfältig sind auch die verschiedenen Formeln (siehe Tab. 15.1). Um die Hauptidee des EFA (Dichtotomie der Energie) auch formal auszudrücken, werden die traditionellen Energieformeln auf eine Formel für Bewegungsenergie und eine allgemeine Formelgestalt für Feldenergie zurückgeführt. Die entsprechende Formulierung folgt im nächsten Abschnitt. Hier seien zunächst die folgenden Prinzipien festgehalten:

1. Traditionelle Formeln für Energie werden in zwei Kategorien eingeteilt: Formeln für Bewegungsenergie (kinetische Energie) und für Feldenergie (potenzielle Energie).
2. Die traditionellen Energieformeln setzen sich aus Termen bzw. Faktoren zusammen, die jeweils eine Bedeutung und einen Zusammenhang zu den Konzeptideen haben sollen.
3. Um zu verdeutlichen, dass Symbole in Formeln eigenständige physikalische Größen repräsentieren, werden wesentliche Ausdrücke in Formeln (Terme, einzelne Brüche, Faktoren, etc.) explizit durch ein Multiplikationszeichen ($\cdot$) getrennt.

traditionelle Energieform	Formel	EFA-Repräsentation
kinetische Energie	$E = \frac{m}{2} v^2$	Bewegungsenergie
thermische Energie	$E = \frac{3}{2} k_B T$	(mikroskopische) Bewegungsenergie von Teilchen
Lage-/potenzielle Energie	$E = \gamma m_1 m_2 \frac{1}{r}$	Energie im Gravitationsfeld
Lageenergie in Erdnähe	$E = m g h$	Energie im Gravitationsfeld
elektrische Energie zweier Ladungen	$E = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$	Energie im elektrischen Feld zweier Ladungen
elektrische Energie im Atom (Kern und ein Elektron)	$E = \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$	Energie im elektrischen Feld von Kern und Elektron
elektrische Energie eines Plattenkondensators	$E = \frac{C}{2} U^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$	Energie im elektrischen Feld
Spannenergie	$E = \frac{k}{2} x^2$	Energie im atomaren Feld der Feder (o. ä.)

Tabelle 15.1: Beispielhafte Zuordnung von traditionellen Energieformen und ihrer Formel aus dem Schulunterricht sowie der qualitativen Repräsentation im EFA

15.2 Konzeptideen

Analog zur Konzeption des qualitativen EFA werden auch für die Erweiterung EFA-M zwei Konzeptideen formuliert (unter Berücksichtigung der Designprinzipien): Eine erste Konzeptidee stellt Zusammenhang von mathematischem Formalismus (Formeln) und der Hauptaussage des EFA her. Eine zweite ermöglicht eine Einordnung von Energieformeln in die Kategorien Feld- und Bewegungsenergie.

15.2.1 Balkendarstellung Feld- und Bewegungsenergie

Um die Energie-Dichotomie mit Formeln zu verknüpfen, wird zunächst ein Zusammenhang zur Energieerhaltung über die Visualisierung mit Hilfe einer Balkendarstellung hergestellt (siehe Abb. 15.1): Die Kombination von Kernaussage und Energieerhaltung fordert, dass die Summe aus Feld- und Bewegungsenergie

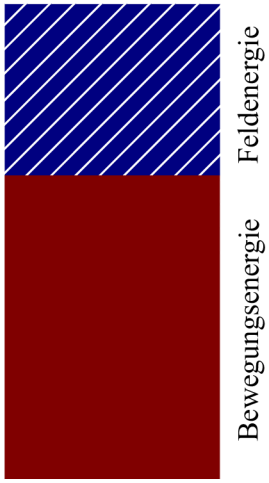


Abbildung 15.1: Balkendarstellung: Die Gesamtenergie eines Systems lässt sich als Balken darstellen. Die Summe aus Feldenergie und Bewegungsenergie ist gemäß dem EFA konstant (Energieerhaltung). Ebenso ist die Größe des Balkens konstant; lediglich die Anteile von Feld- und Bewegungsenergie ändern sich. Entsprechend verschiebt sich die Grenze zwischen den beiden Bereichen bei einem Prozess mit Energieübertragung zwischen Bewegung und Feld.

konstant ist. Da im EFA nur zwischen Feld- und Bewegungsenergie unterschieden wird, ist die Darstellung der jeweiligen Anteile an der Gesamtenergie relativ einfach. Hier bieten sich beispielsweise Kreis- oder Balkendiagramme an, in denen es dann zwei verschiedene Teile gibt, sie zwischen Null und 100 % variieren können. Hier wird zur Veranschaulichung eine Balkendarstellung gewählt. In einem Prozess mit Energieübertragung zwischen Feld und Bewegung kann dann (für einen einfachen Fall mit genau einem involvierten Feld und einer Bewegung) die Grenze zwischen den beiden Bereichen *Feldenergie* und *Bewegungsenergie* verschoben werden. So lässt sich der Prozess praktisch veranschaulichen. Ein weiterer Vorteil dieser Darstellung ist, dass man den beiden Bereichen/Teilen des Balkens (also den beiden Energien) nur eine entsprechende Formel zuordnen muss, um eine Gleichung für die Energieübertragung aufzustellen. Wird beispielsweise des schneller werdenden Satelliten Energie aus dem Gravitationsfeld zur Bewegung des Balles übertragen, verschiebt sich die Grenze im Balken hin zu mehr Bewegungsenergie (in Abb. 15.1 nach oben). Außerdem lässt sich intuitiv leicht die Formel

$$\Delta E_{\text{Feld}} = -\Delta E_{\text{Bewegung}} \tag{15.1}$$

aufstellen. Diese kleine und intuitive Erweiterung sollte einen hinreichend einfachen Übergang zur Quantifizierung des Phänomens darstellen, der auch von Schüler*innen mit geringerem Abstraktionsvermögen bewältigt werden kann. Erst in einem weiteren Schritt müssen dann die beiden Ausdrücke durch konkrete For-

meln mit Variablen und physikalischer Bedeutung ersetzt werden. Die Balkendarstellung bietet also eine Brücke zwischen qualitativ intuitiver Beschreibung des Prozesses mit den Konzeptideen des EFA und der formalen Ausformulierung des Phänomens.

15.2.2 Allgemeine Formelgestalt für Bewegungs- und Feldenergie

Für die Ausformulierung der obigen Gleichung 15.1 werden die traditionellen Energieformeln herangezogen. Die Bewegungsenergie wird dabei (wie oben bereits beschrieben) mit $E = \frac{m}{2} \cdot v^2$ repräsentiert. Diese hängt vom Tempo v und der Masse m des sich bewegenden Objektes ab.[1] Für die obige Formel muss natürlich die Differenz $\left(E_{\text{kin,nachher}} - E_{\text{kin,vorher}}\right)$ gebildet werden. Diese Formel wird für alle Beispiele mit Bewegungsenergie übernommen.[2]
Die Formeln für verschiedene traditionelle Formen potenzieller Energie werden auf eine allgemeine Repräsentation zurückgeführt. Eine Formel, welche drei Terme enthält: einen Term mit Konstanten, einen Term mit Quelleneigenschaften und einen Wechselwirkungsterm in Abhängigkeit vom Abstand der Quellen:

$$E = (\text{Konstanten}) \cdot (\text{Quelleneigenschaften}) \cdot Wechselwirkung(\text{Abstand}) \tag{15.2}$$

Grundlage für diese Formel ist die Definition der potenziellen Energie:

$$E_{\text{pot}} = \int \vec{F}\,(\vec{r})\; d\vec{r} \tag{15.3}$$

Dabei hängt die potenzielle Energie von Konstanten und Parametern ab, welche die Kraft im jeweiligen Feld bestimmen sowie vom Abstand $r = |\vec{r}|$ als Indikator der Feldveränderung.[3] Natürlich führt die Gleichung 15.2 nur in wenigen Fällen direkt auf eine der bekannten Formeln aus Tabelle 15.1 (z. B. für das Gravitationsfeld oder die elektrische Energie zweier Ladungen). Allgemein ist es aber gerechtfertigt, im Rahmen der didaktischen Rekonstruktion die Formel 15.2 als entsprechende allgemeine Form zu wählen. Denn Formeln wie beispielsweise für

[1] Durch diese konkrete Beschreibung wird der Unterschied von sich bewegenden Objekten (Bewegungsenergie) und elektromagnetischer Strahlung (Feldenergie) über die vorhandene bzw. nicht vorhandene Masse auch formal verdeutlicht.

[2] Ausnahmen stellen hier nur Fälle dar, bei denen thermische Energie betrachtet wird.

[3] Die übertragene Energie ΔE hängt von den beiden Abständen r_{nachher} und r_{vorher} ab. Für die reine Motivation des Zusammenhangs von Energie im Feld und allgemeiner Formelgestalt soll aber die Stammfunktion, die sich aus Gl. 15.3 ergibt, als einfache Darstellung genügen.

die Energie eines Plattenkondensators beinhaltet zwar andere Faktoren und Naturkonstanten, diese lassen sich allerdings auf die Wechselwirkung zurückführen. So soll plausibel gemacht werden, dass formale Ausdrücke wie Formeln gleichzeitig konzeptuelle Inhalte repräsentieren, z. B. einzelne Konzeptideen des EFA. Dadurch sollte es zumindest möglich sein, das Erkennen der Relevanz und Aussagekraft von Formeln zu motivieren. Über ein „Mapping Mathematics to Meaning“ wird ihnen eine Bedeutung zugemessen (vgl. Kapitel 3.4). Diese Repräsentation ist insofern limitiert, als sie Formeln aus der Perspektive des EFA beleuchtet. Dass die Formeln sehr unterschiedlich sind, geht bereits aus Tabelle 15.1 hervor. Eine ‚Schablone‘ wie die Konzeptidee zu einer allgemeinen Formelgestalt darüber zu legen, kann bei der Interpretation helfen, bedarf aber immer auch der Kenntnis über die Bedeutung der einzelnen Symbole. Nur so können die Teile einer Formel angemessen mit den entsprechenden physikalischen Größen verbunden werden.

Für die Motivation des Zusammenhangs von EFA und Energieformeln soll also die Rückführung auf eine allgemeine Form als grobes Werkzeug zur Einordnung des „Erscheinungsbildes“ von Formeln für Feldenergie genügen. Die Erscheinungsform ist die Symbolstruktur (vgl. Sherin, 2001) mit Oberflächenmerkmalen (vgl. Strahl et al., 2010). Betrachtet man die für den Schulunterricht typischen Formeln für verschiedene Arten potenzieller Energie, so ist es durchaus möglich, eine Unterscheidung in die drei o. g. Terme vorzunehmen. Denn jede Formel enthält zumindest indirekt Zahlen bzw. Naturkonstanten wie z. B. die Gravitationskonstante γ oder auch ϵ_0, ϵ_r, etc. Außerdem enthält jede Formel eine Abhängigkeit von den Quelleneigenschaften (Massen, Ladungen, etc.) oder aber Materialkonstanten, welche indirekt auf die Eigenschaften der Quellen zurückgeführt werden können. Ein Term, der die Abhängigkeit vom Abstand der Quellen beinhaltet, existiert meist auch. Die genaue Abhängigkeit ($\propto r$, $\propto \frac{1}{r}$, $\propto r^2$, etc.) soll dabei keine relevante Rolle spielen; lediglich, dass die Formeln für Feldenergie eine Abhängigkeit vom Abstand enthalten.

Beispiel: Gravitationsfeld

Anhand der Formel $E = \gamma\, m_1\, m_2\, \frac{1}{r}$ kann dieses Prinzip leicht veranschaulicht werden. Hier wird die Energie im Gravitationsfeld durch eine Naturkonstante (γ), die Quelleneigenschaften (Massen) m_1 und m_2 sowie dem Abstand r der beiden Quellen bestimmt. Für den Fall, dass es sich um einen Ball in der nähe der Erde handelt, vereinfacht sich die Formel zu der bekannten Gleichung[4] $E = m \cdot g \cdot \Delta h$.

[4]Die Näherung $h = (r_{\text{nachher}} - r_{\text{vorher}}) \ll r_{\text{vorher}} \approx r_{\text{nachher}} \approx r_{\text{Erde}}$ (Abstandsänderung ist sehr viel geringer als der Abstand der Quellen) für ein Objekt mit Masse m_2 in der Nähe der

Dabei ist die Abstandsabhängigkeit nach wie vor gegeben (h), in diesem Fall allerdings als Abstandsänderung (Differenz). Die Quelleneigenschaft des Balles (m) ist auch ersichtlich und die Konstante g als Erdbeschleunigung beinhaltet Naturkonstanten (γ) und die Eigenschaft der zweiten Quelle (Masse der Erde) sowie deren Radius r_{Erde}. Mit diesem einfachen Beispiel kann motiviert werden, dass die drei Terme direkt oder indirekt bei Formeln für Feldenergie identifiziert werden können.

Vorteile dieser Repräsentation

Die Betrachtung verschiedener Formeln für potenzielle Energie aus der Perspektive der allgemeinen Form 15.2 hat den Vorteil, dass die Gemeinsamkeiten der zahlreichen Formeln herausgestellt und bewusst gemacht wird. So ist es möglich, auch auf den ersten Blick für Schüler*innen zusammenhanglose Formeln und beliebig wirkende Symbole miteinander zu vereinen und diesen eine physikalische Bedeutung zu geben. Beispielsweise wird so deutlich, dass der Begriff Feldenergie für verschiedene Arten von Feldern übergreifend ist und auch formal so repräsentiert ist. Denn es ändert sich je nach Feld zwar die Art der Quellen, nicht aber unbedingt die formale Erscheinung und insbesondere nicht die Regelmäßigkeit der allgemeinen Form. So sind Formeln für die Energie im Gravitationsfeld zweier Massen und die Energie im elektrischen Feld zweier Ladungen in der allgemeinen Form isomorph.
Des Weiteren wird bei dieser Herangehensweise der Fokus von der Benennung einzelner Größen durch beliebige Symbole genommen. So wird eine Ladung z. B. einmal mit q und einmal mit e bezeichnet oder der Abstand zweier Quellen mit d, r oder a. So soll implizit auch vermittelt werden, dass die physikalische Bedeutung einzelner Terme und Symbole entscheidend ist und nicht die Nomenklatur.[5] Der Fokus liegt somit auf dem Verständnis der Systematik von Formeln und bedient sich den Überlegungen zu den *symbolic forms* nach Sherin (2001) (siehe Kap. 3.4). Hier wird die Symbolstruktur („symbolic template“) möglichst übersichtlich dargestellt und einzelne Elemente optisch durch Ordnung und räumliche Trennung separiert (Bruchstrich, Multiplikationszeichen für „Teile eines Ganzen“). So soll die kognitive Strukturierung und Verknüpfung mit dem kognitiven Schema und Inhalt des Konzeptes unterstützt werden.

Erde mit Masse m_1 sorgt dafür, dass sich die Masse der Erde als zweite Quelleneigenschaft hinter der Erdbeschleunigung $g = \frac{\gamma m_1}{r^2_{\text{Erde}}}$ verbirgt.

[5] Das gilt insbesondere, weil sich die Bezeichnung (Symbole) ändern kann, wodurch die Erscheinung einer Formel variiert, die inhaltliche Aussage aber gleich bleibt.

Die **Konzeptideen** können also wie folgt zusammengefasst werden:

1. **Balkendarstellung:**
   Die Summe von Bewegungsenergie und Feldenergie ist immer gleich (konstant; Energieerhaltung). Dies kann man durch einen zweigeteilten Balken darstellen, der sich farblich in Bewegungs- und Feldenergie aufteilt (vgl. Abbildung 15.1). Ebenso wie die Gesamtenergie immer konstant bleibt, besitzt auch der Balken immer die gleiche Größe. Lediglich die Verteilung von Bewegungs- und Feldenergie ändert sich.

2. **Formelgestalt:**
   Die Energie in einem Feld wird durch die Eigenschaften der Quellen sowie deren Abstand bestimmt. Indikatoren für Energieübertragung sind Änderung von Tempo (Bewegung) oder Feldveränderung (Abstand der Quellen).
   Die Formel für die Bewegungsenergie hängt vom Tempo ab und beinhaltet als Faktor die Masse des sich bewegenden Objektes. Die Formel, die man für die Bewegungsenergie verwendet ist daher:

   $$E = \frac{m}{2} \cdot v^2$$

   Die allgemeine Formelgestalt für Feldenergie setzt sich meist aus drei Termen (Faktoren) zusammen: jeweils einen Term für Konstanten (Zahlen oder Naturkonstanten), den Quelleneigenschaften (Ladung, Masse, Materialkonstanten) und einer Abhängigkeit vom Abstand der Quellen entsprechend der Wechselwirkung:

   $$E = (\text{Konstanten}) \cdot (\text{Quelleneigenschaften}) \cdot Wechselwirkung(\text{Abstand})$$

15.3 Interviewleitfaden des EFA-M

Um zu untersuchen, wie Schüler*innen die Ideen des EFA-M auffassen, werden erneut online Interviews im Einzelgespräch mit Schüler*innen geführt, die bereits das Konzept kennen. Das Format entspricht dabei der in Kapitel 5.6 beschriebenen Vorgehensweise.

15.3.1 Struktur der Interviews

Der Interviewleitfaden für die Befragungen zum EFA-M orientiert sich logisch an den bisherigen Akzeptanzbefragungen (siehe Anhang C). Da für den EFA-M Schüler*innen befragt werden, mit denen bereits ein Interview zum EFA geführt wurde, bietet es sich an, mit einer kurzen Wiederholung der EFA-Konzeptideen zu beginnen. Auf diese Weise kann zusätzlich untersucht werden, wie sich Schüler*innen an die Inhalte erinnern können. Da (je nach Version des EFA) zwischen erstem Interview und Interview zur Mathematisierung mehrere Monate liegen, wird nicht erwartet, dass Schüler*innen alle Konzeptideen angemessen erinnern und wiedergeben können. Allerdings lassen die Daten eine Interpretation hinsichtlich leicht bzw. schwer memorierter Inhalte zu. Sollten sich Schüler*innen besonders leicht an bestimmte Konzeptideen erinnern, so würde dies ebenfalls für den Mehrwert des Konzeptes sprechen. Zusätzlich zu diesen Informationen stellt eine kurze Schüler*innen-zentrierte Wiederholung einen guten Ausgangspunkt für die Vermittlung der neuen Inhalte dar. So können die Inhalte des EFA-M bestmöglich eingebettet werden. Außerdem kann nur so sichergestellt werden, dass alle Schüler*innen die gleiche Ausgangssituation besitzen und ein Zusammenhang von Formeln und wesentlichen Konzeptideen überhaupt einheitlich möglich ist. Die Wiederholung startet mit der Aufforderung zur Erläuterung, woran sie sich insgesamt noch erinnern können. Anschließend werden einzelne wesentliche Konzeptideen angesprochen und wiederholt:

1. Hauptaussage des EFA
2. Begriff des Gesamtfeldes
3. Arten von Feldern
4. Indikatoren
5. Zusammenhang von Masse und Energie
6. Einordnung von elektromagnetischer Strahlung und thermischer Energie

Diese Konzeptideen werden auch noch einmal kurz am Beispiel der beiden sich auseinander bewegenden Magnetwägen anhand eines Videos wiederholt. Außerdem wird das Beispiel des fallenden Balles angesprochen.

Thema	Bereich	Kontext
0. Wiederholung erstes Interview	0.1 allgemeine Erinnerung	
	0.2 spezifische Nachfragen	Hauptidee „Energie und Felder“
		Gesamtfeld
		Arten von Feldern
		Indikatoren
		Zusammenhang Energie und Masse
		Thermische Energie und elektromagnetische Strahlung
	0.3 Überprüfung einzelner Kontexte	Magnetwägen
		Fallender Ball
Einführung und Motivation	Zusammenhang EFA mit Formelgestalt	Vorteile von Formeln
1. Balkendiagramm		A1a: Magnetwägen
		A1b: Satellit und Erde
Überleitung	Bedeutung der Indikatoren Tempo und Abstand der Quellen	
2. Formelgestalt	Aufgaben	A2a: elektrisches Feld
		A2b: Bohr-Atom
	Erinnerung	Gespannte Feder
	Aufgaben	A2c: gespannte Feder
		A2d: Plattenkondensator
		A2e: Massendefekt (für SuS ab Version 2 des EFA)
		A2f: Thermische Energie

Tabelle 15.2: Struktur des Interviewleitfadens zum EFA-M

Die Befragung gliedert sich also in drei Teile: eine kurze Wiederholung der Inhalte des ersten Interviews (allgemein und anschließend angeleitet durch Fragen), die erste Konzeptidee (Balkendarstellung) und die zweite Konzeptidee (Formelgestalt). Insgesamt dauert ein Interview ca. 60 Minuten. Tabelle 15.2 gibt einen Überblick über die Struktur der Interviews.

Die Interviews starten jeweils mit kurzen organisatorischen Informationen (Kontrolle der Einverständnis der Erziehungsberechtigten, Klärung von Ablauf und technischen Voraussetzungen, Aufklärung über Audio-Aufzeichnung und anonyme Verarbeitung der Daten).

15.3.2 Erste Konzeptidee: Balkendarstellung

Im Anschluss an die Wiederholung wird das Thema mit Hilfe der beiden oben beschriebenen Aspekte zum Nutzen der Mathematik im Physikunterricht motiviert (vgl. Abschnitt 15.1.1) und ein kurzer Ausblick darauf gegeben, dass im Folgenden der Zusammenhang von bekannten Ideen und Formeln aus dem Unterricht geschaffen wird.

Die erste Konzeptidee startet mit der Balkendarstellung und deren Zusammenhang mit der Energie-Dichotomie und Energieerhaltung. Dazu wird die Formel

$$E_{\text{kin}} + E_{\text{Feld}} = \text{konst.} \tag{15.4}$$

gezeigt und anschließend mittels Energieübertragung zwischen Feld und Bewegung am Beispiel der folgenden Formel zum fallenden Ball erläutert:

$$\frac{m}{2} \cdot v^2 \quad = \quad m \cdot g \cdot h \tag{15.5}$$

$$\text{aufgenommene Energie (}\textbf{Bewegung}\text{)} \quad = \quad \text{abgegebene Energie (}\textbf{Feld}\text{)} \tag{15.6}$$

Als Aufgabe sollen Schüler*innen dann die Balkendarstellung nutzen und anhand dieser den Prozess der beiden umkehrenden Magnetwägen beschreiben. Es folgt eine weitere Aufgabe, bei der sie am Beispiel von Erde und Satellit die Satellitenbewegung beschreiben sollen. Dazu wird ihnen zunächst die Balkendarstellung für die Situation zu Beginn und am Ende des Prozesses gezeigt.[6] Daraufhin sollen Schüler*innen die folgende Gleichung interpretieren und erläutern, wie diese mit der Balkendarstellung zusammenhängt:

$$\frac{m}{2} \cdot \left(v^2_{\text{nachher}} - v^2_{\text{vorher}}\right) = \left(\gamma \cdot m \cdot M \cdot \frac{1}{r_{\text{nachher}}}\right) - \left(\gamma \cdot m \cdot M \cdot \frac{1}{r_{\text{vorher}}}\right) \tag{15.7}$$

Dabei sollen Schüler*innen erkennen, dass gemäß Gl. 15.4 der rechte Term von Gl. 15.7 der Differenz der Feldenergie entspricht bzw. die linke Seite die Änderung der Bewegungsenergie darstellt. Nach dieser Konzeptidee folgt eine Überleitung, in der kurz erklärt wird, wie die Indikatoren der Feldveränderung mit der Energieübertragung zusammenhängen. Dabei wird erläutert, dass die Änderung des Tempos eines Objektes bzw. des Abstands von Quellen ggf. auch in der entsprechenden Formel für die Energieübertragung erkennbar ist. So hat eine Änderung des Tempos v Auswirkungen auf die Formel der kinetischen Energie, ebenso wie die Änderung des Abstands h von Objekt und Erde die Feldenergie verändert (siehe Gl. 15.5). So wird dann die Möglichkeit vorbereitet, die Indikatoren als zentrale Bestandteile von Energieformeln aufzufassen.

[6] Hier sehen Schüler*innen einen Balken mit weniger Bewegungsenergie zu Beginn und weniger Feldenergie am Ende; also den Prozess des Annäherns von Erde und Satellit, bei dem Energie vom Gravitationsfeld zur Bewegung übertragen wird.

15.3.3 Zweite Konzeptidee: Formelgestalt

Die Zweite Konzeptidee wird mit der Formel für Bewegungsenergie eingeleitet und dabei das explizite Vorkommen von Masse (als wesentliche Eigenschaft und Abgrenzung zur Strahlung) und Tempo (als Indikator) betont. Anschließend wird für Feldenergien die allgemeine Formelgestalt vorgestellt und in die drei Terme *Konstanten*, *u*nd Wechselwirkung bzw. *Abstand* gegliedert. Zur Verdeutlichung wird das oben beschriebene Beispiel des Gravitationsfeldes herangezogen (siehe 15.2.2). Nachdem die Schüler*innen diese Konzeptidee dann bewertet und paraphrasiert haben, werden ihnen verschiedene, teils bereits aus der Schule bekannte, Formeln für Energie gezeigt, welche sie dann anhand der vorgestellten Konzeptidee interpretieren sollen. Dabei sollen sie die Konzeptidee nutzen und versuchen, die Formel in die drei Terme zu unterteilen und diese zu identifizieren sowie eine Vermutung äußern, um welche Energie bzw. um welches Feld es sich jeweils handelt.[7] Die Aufgaben sind so gestaltet, dass Schüler*innen bei ihrem kognitiven Strukturierungs- und Urteilsprozess bei der Interpretation unterstützt werden. Die Erkennbarkeit der *symbolic forms* und der „Oberflächenmerkmale“ (siehe Kap 3.4 bzw. Strahl et al., 2010) soll dabei helfen.
Insgesamt werden ihnen vier bzw. fünf Formeln für Feldenergie präsentiert: Die Energie für das elektrische Feld zweier Ladungen, die Energie im Bohr-Atom mit Ordnungszahl Z, die Energie einer gespannten Feder, die Energie eines Plattenkondensators und für Schüler*innen, welche die zweite und dritte Version des EFA kennen, die Energie-Masse-Äquivalenz (vgl. Tabelle 15.1). Im Folgenden werden die einzelnen Formel kurz erläutert. Um eine einheitliche Darstellung zu schaffen und den Schüler*innen die Möglichkeit zu geben, das Schema zu erkennen, sind die Formeln alle nach dem gleichen Schema aufgebaut. Jede Formel stellt eine Gleichung dar, bei der auf der linken Seite immer die Energie E steht. Auf der rechten Seite befindet sich dann ein Ausdruck für die Energie des jeweiligen Feldes. Dabei werden Größen explizit durch das Multiplikationszeichen „$\cdot$“ getrennt (z. B. $q \cdot Q$), um Lesbarkeit und Unterscheidbarkeit der Bestandteile zu gewährleisten. So soll auch im Sinne der *symbolic forms* die Identifikation und Zuordnung von formalen Termen/Ausdrücken und inhaltlicher konzeptueller Bedeutung erleichtert werden. Außerdem werden die Terme so angeordnet, dass eine Unterteilung in die drei Terme auf verschiedene Weisen möglich, die Darstellung aber gleichzeitig sinnstiftend ist. Das bedeutet, dass beispielsweise der Abstandsterm meist auch durch ein Multiplikationszeichen getrennt wird, um die Zusammensetzung der Formel erkennbar zu gestalten.

[7] Durch diesen kognitiven Strukturierungs- und Urteilsprozess soll die oben beschriebene kenntliche Gliederung der Formeln bei der Erkennung der *symbolic forms* helfen.

Zu beachten ist, dass es sich bei den Formeln für die Feldenergien nicht immer um absolute Energien handelt, sondern teilweise um die Stammfunktion der Kraft gemäß Formel 15.3, z. B. für das elektrische Feld zweier Ladungen (siehe Aufgabe A2a).

Aufgabe A2a: Elektrisches Feld zweier Ladungen

$$E = \frac{q \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \tag{15.8}$$

Die Energieformel des elektrischen Feldes zweier Ladungen q und Q im Abstand r ergibt sich als Stammfunktion aus dem unbestimmten Integral der Kraft nach dem Abstand (vgl. Gl. 15.3). Es handelt sich also folglich nicht um einen absoluten Energiewert, der dem Feld zugeschrieben werden kann, sondern vielmehr um eine Formel zur Berechnung der Energieübertragung, wenn man die Differenz für zwei Abstände bestimmt.[8] Vorgestellt wird die Formel als eine Formel für Feldenergie, später (nach der Antwort der Schüler*innen) als Formel, die Auskunft über die Energie des elektrischen Feldes gibt.
Die Schüler*innen sollen hier in einem ersten Schritt zunächst versuchen, die Formel in die drei Terme einzuteilen. Anschließend wird in einem zweiten Schritt beobachtet, ob sie die Zuordnung auch fachlich richtig vornehmen können, d. h. den Term $4 \cdot \pi\epsilon_0$ als Konstante(n), $q \cdot Q$ als Quelleneigenschaften und r als Abstand bzw. $1/r$ als Abstandsabhängigkeit identifizieren. Anschließend erkennen sie im Idealfall, dass es sich bei q und Q um die Ladungen und folglich um ein elektrisches Feld handelt. Dieser Schluss ist für die zielführende Anwendung der Konzeptidee nicht notwendig, da dies ein gewisses Vorwissen voraussetzt und mit der eigentlichen Idee nicht zusammenhängt; eine sinnvolle Zuordnung ist allerdings wünschenswert.[9]

Aufgabe A2b: Elektrisches Feld im Bohr-Atom

$$E = -\frac{Z \cdot e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \tag{15.9}$$

Ähnlich zur vorherigen Formel sollen Schüler*innen die Energieformel 15.9 für das Bohr-Atom mit Ordnungszahl Z interpretieren.[10] Hier ergeben sich nur insofern Änderungen, als ein Minuszeichen aufgrund der entgegengesetzten Ladungen

[8] Um die Komplexität gering zu halten, wird den Schüler*innen dieser Umstand nicht explizit erläutert.

[9] Es könnte sich auch um ein anderes Feld handeln, weswegen sich die Zuordnung von (q, Q) und den Ladungen nicht notwendigerweise ergibt.

[10] Dies ist der potenzielle Anteil der Energie, die Bewegungsenergie des Elektrons wurde hierbei nicht berücksichtigt.

von Kern und Elektron hinzukommt und die Kernladung durch $Z \cdot e$ bestimmt ist. Hier wird nicht erwartet, dass Schüler*innen erkennen, dass es sich um die Ordnungszahl und die Elektronenladung oder bzw. ein Atom handelt. Allerdings besteht die Erwartung, dass analog zur Formel für zwei Ladungen auch hier die Konstanten und der Abstand erkannt und folglich die Quelleneigenschaften über das Ausschlussprinzip identifiziert werden können.

Aufgabe A2c: Elastische Feder

$$E = \frac{K}{2} \cdot x^2 \tag{15.10}$$

Um den Zusammenhang mit dem Gesamtfeld von Atomen in Festkörpern herzustellen, wird das Beispiel der elastischen Feder präsentiert. Dazu wird zunächst kurz wiederholt, dass die Feder aus Atomen besteht und wie hier Energie übertragen wird (Anlehnung an das Beispiel „Steinschleuder“ aus der zweiten und dritten Runde). So soll motiviert werden, dass die Ausdehnung der Feder auch der Veränderung des Feldes entspricht und somit x gewissermaßen den Abstand der Atome repräsentiert. Schüler*innen sollen dann nach den anderen Termen suchen und erkennen, dass $\frac{...}{2}$ die Konstante und K die Quelleneigenschaften repräsentiert. Dabei sollte in weiterer Folge diskutiert werden, dass die Federkonstante die Quelleneigenschaften (im weiteren Sinne die Ladung und Konstellation der Atome der Feder) beinhaltet, da sie von Materialeigenschaften abhängt, die je nach Art und Bauweise der Feder unterschiedlich sein können.

Aufgabe A2d: Plattenkondensator

$$E = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} \tag{15.11}$$

$$= \frac{1}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot \frac{d}{A} \cdot Q^2 \tag{15.12}$$

Für das Beispiel des Plattenkondensators wird zunächst Formel 15.11 diskutiert. Dabei ist es nicht trivial, Q der Gesamtladung bzw. den Ladungen als Quelleneigenschaft und C der Kapazität zuzuordnen. Dass Q bzw. Q^2 für die Ladung steht, könnten Schüler*innen ggf. durch Analogie mit den Aufgaben A2a und A2b erschließen. Weiters ist es dann aber möglich, dass einige C als Abstand interpretieren, was insofern unproblematisch ist, da sich hinter der Kapazität tatsächlich der Abstand der Platten und damit der Ladungen verbirgt.

Geschieht dies, wird den Schüler*innen erläutert, dass C die Kapazität darstellt und mehrere Größen beinhaltet. So wird ihnen die Substitution

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

vorgegeben und sie sollen Formel 15.12 interpretieren. Hier wird die Zuordnung erneut überprüft.

Aufgabe A2e: Energie-Masse-Äquivalenz und Massendefekt

$$E = c^2 \cdot m \tag{15.13}$$

Um zu untersuchen, ob Schüler*innen, welche die zweite und dritte Version des EFA kennengelernt haben, die Masse von Kernen mit der Konstellation von Quarks in Zusammenhang bringen können, wird ihnen Gl. 15.13 zur Äquivalenz von Masse und Energie gezeigt. Das geschieht in umgedrehter Reihung von c^2 und m, um sie an die bisherigen Formeln anzulehnen, bei denen die Konstanten eher links stehen. Hier sollten Schüler*innen, die sich noch an den Zusammenhang von Masse und Energie in Atomkernen erinnern, die Masse mit dem Quarkfeld assoziieren und folglich deren Eigenschaften hinter der Masse vermuten. Um die sehr allgemeine Aussagekraft dieser Formel auf diesen Fall zu spezifizieren, wird den Schüler*innen zuvor der Aufbau der Atome und Kerne noch einmal mit Hilfe der entsprechenden Grafik in Erinnerung gerufen. Der Kontext Massendefekt sollte sie dann dazu motivieren, hier über die Veränderung des Quarkfeldes nachzudenken und einen Zusammenhang mit der Formel herzustellen.

Aufgabe A2f: Thermische Energie und Temperatur

$$E = \frac{3}{2} k_B \cdot T \tag{15.14}$$

Die Gleichung 15.14 stellt eine Ausnahme zu den bisher betrachteten Formeln dar, da sie sich auf die thermische Energie bezieht und folglich als Bewegungsenergie zu kategorisieren ist. Schüler*innen wird hier mitgeteilt, dass es sich nicht um Feldenergie handelt, sondern um *eine Formel für thermische Energie*. Sie werden anschließend gebeten, zu erläutern, welche Größen sie kennen. Sollten sie T als Temperatur nicht selbst nennen, wird ihnen dies vorgegeben und gefragt, ob sie den Zusammenhang von Temperatur und Energie nach dem EFA beschreiben können. Sie sollten dann begründen, dass die Temperatur T ein Maß für das Tempo bzw. die Bewegung von Teilchen ist und diese mehr Bewegungsenergie besitzen, wenn sie sich schneller bewegen. Diese Formel soll veranschaulichen, dass es nicht nur verschiedene Formeln für Feldenergien gibt, sondern auch kontextabhängige

Repräsentationen für die Bewegungsenergie existieren. Es wird dazu auch herausgestellt, dass die zweite Konzeptidee zur allgemeinen Formelgestalt nur auf Formeln für Feldenergie anwendbar ist.

KAPITEL 16

Mathematisierung des EFA: Auswertung der Interviews

Um die Umsetzbarkeit der mathematischen Ergänzung zu untersuchen, wurde diese wie in Kapitel 5.6 beschrieben im Rahmen von Einzelinterviews mit Schüler*innen qualitativ evaluiert. Dazu wurden Interviews mit Schüler*innen geführt, die bereits an einem Interview zum EFA in einem der drei Design-Zyklen teilgenommen hatten. Sie erhielten dann Erklärungsangebote zu den beiden Ideen des EFA-M. Das Format lehnte sich an das Prinzip der Akzeptanzbefragungen an, wobei auf eine detaillierte Kodierung der Bewertungen, Paraphrasen und Aufgaben verzichtet und die Ergebnisse stattdessen qualitativ kategorisiert und berichtet wurden. Hier ging es darum, herauszufinden, wie sinnvoll bzw. hilfreich Schüler*innen die Ideen finden und inwiefern sie diese auf traditionelle Formeln aus dem Unterricht übertragen können.[1]
Das Kapitel beschreibt die Vorgehensweise und Ergebnisse der Auswertung. Auf eine Beschreibung der Stichprobe folgt die Wiederholung der wesentlichsten EFA-Konzeptideen. Darauf folgt die Analyse der zwei Konzeptideen zur Balkendarstellung und Formelgestalt. Die Betrachtungen schließen mit der Zusammenstellung der Einschätzung der Schüler*innen zur Sinnhaftigkeit und Verständlichkeit der Erweiterung.

[1] Wie im Folgenden zu sehen, erübrigt sich eine detaillierte Kodierung auch durch die bis auf Ausnahmen problemlosen Performanzen der Schüler*innen.

Code	Jgst.	Monat & Zwischenzeit	Zyklus	Performanz
$S6_3$	11	Mai 2021 (7)	3	1,76
$S7_2$	12	Dezember 2020 (13)	2	1,84
$S2_3$	12	März 2021 (9)	3	1,94
$S4_3$	12	Mai 2021 (7)	3	1,88
$S1_2$	12	Dezember 2020 (13)	2	1,88
$S7_3$	12	Mai 2021 (7)	3	1,88
$S2_1$	11	August 2020 (17)	1	1,43
$S4_1$	12	Oktober 2020 (15)	1	1,71
$S5_1$	11	Oktober 2020 (15)	1	1,85

Tabelle 16.1: Stichprobe zur Erweiterung für die Verknüpfung von EFA und traditionellen Formeln für den Energieunterricht (EFA-M). Gelistet sind der Code der Schüler*innen aus den drei Design-Zyklen, die Jahrgangsstufe zur Zeit des ersten Interviews zum EFA (Jgst.), der Monat des ersten Interviews, die Zwischenzeit zwischen dem ersten Interview und dem Interview zum EFA-M (in Monaten) sowie die Performanz im ersten Interview.

16.1 Beschreibung der Stichprobe

Eine Evaluation der Konzeptideen des EFA-M setzt voraus, dass die Schüler*innen bereits mit dem Konzept vertraut sind. Damit dies auch zeit-ökonomisch möglich ist, wurden Schüler*innen akquiriert, die bereits an einem der Interviews zum EFA teilgenommen hatten, d. h. Teilnehmer*in in einem der drei Zyklen waren (siehe Kap. 5.6). Die insgesamt neun Freiwilligen verteilten sich auf die drei Zyklen, wie in Tab. 16.1 angegeben. Dabei handelte es sich um Schüler*innen mit schwachen bis starken Performanzwerten aus dem ersten Interview. Drei Schüler*innen nahmen an in der ersten Runde des EFA teil, zwei kannten die zweite Version des Konzeptes und vier Schüler*innen waren mit der letzten Version des EFA vertraut. Somit bietet die Stichprobe eine angemessene Verteilung auf Zyklen und Performanz.

16.2 Wiederholung der Konzeptideen des EFA

Für die Wiederholung der Inhalte des ersten Interviews wurden die Schüler*innen zunächst gefragt, woran sie sich ad-hoc noch erinnern können. Angesichts der relativ langen Zwischenzeit war hier nicht zu erwarten, dass Schüler*innen noch viel aus dem 2,5-stündigen Interview erinnern; insbesondere auch, weil die Konzeptideen nicht Teil des eigentlichen Schulunterrichts sind und die Schüler*innen somit in der Zwischenzeit vermutlich keinen weiteren Kontakt mit dem Konzept hatten. Umso bemerkenswerter ist es, dass sechs der neun Schüler*innen noch angeben

können, dass das Besondere am EFA die Beschreibung der Energie ist; vier davon geben auch an, dass es dabei um den Zusammenhang mit Feldern ging ($S4_3$, $S7_3$, $S2_1$, $S5_1$):

> „Wir haben versucht, jede der Energien als ein Feld zu erklären." ($S2_1$)

Oder:

> „Es geht darum, dass man Energieübertragung erklärt mit Hilfe von Feldern." ($S5_1$)

Die anderen geben zumindest beispielhaft an, dass es auch um Felder ging und gehen auf das elektromagnetische Feld ($S7_2$), die Felder von Atomen ($S2_3$, $S4_3$), die Quellen ($S1_2$) oder Einzelfelder ein ($S7_2$, $S1_2$, $S2_1$):

> „Jedes Objekt ist von einem Feld umgeben und zwei Felder von bestimmten Objekten interagieren." ($S7_2$)

Das Gesamtfeld als wesentliches Element wird immerhin von den Schüler*innen $S6_3$ und $S1_2$ („Gesamtfeld" bzw. „Hauptfeld") erwähnt. Die Schüler*innen $S7_2$, $S2_3$ und $S1_2$ stellen explizit heraus, dass es auch wesentlich um Energieerhaltung ging. Lediglich $S4_1$ geht nur darauf ein, dass es um Energie ging, an weitere Dinge kann sie sich allerdings ad-hoc nicht erinnern.

Im Anschluss an diese allgemeine Erinnerung folgen Nachfragen zu einzelnen Aspekten des EFA, um festzustellen, ob sich die Schüler*innen gezielt daran erinnern können. Tabelle 16.2 stellt dar, welche Schüler*innen sich an die einzelnen Arten von Feldern erinnern können. Die Felder werden dazu nicht vorweggenommen, sondern gefragt, an welche Arten von Feldern sie sich noch erinnern können. Dabei wird deutlich, dass das magnetische Feld besonders dominant erinnert wird, was auch an dem prägnanten Beispiel mit den Magnetwägen liegt. Aus den EFA-Interviews ist bereits bekannt, dass dieser Kontext von einigen Schüler*innen als besonders anschaulich wahrgenommen wurde, weshalb dieses Ergebnis nicht überraschend ist. Das elektrische Feld und das Gravitationsfeld werden auch von mehreren Schüler*innen erinnert; nicht zuletzt auch aufgrund der Kontexte zu den Luftballons bzw. elektrischen Feldern auf atomarer Ebene sowie den Beispielen zum Satellit und zum fallenden Ball. In den meisten Fällen kommt es vor, dass Felder oder allgemein Konzeptideen, die nicht explizit erinnert werden, trotzdem im jeweiligen Kontext aufgegriffen werden. Beispielsweise erinnert sich Schülerin $S4_3$ nicht ad-hoc an das Gesamtfeld, bezieht dies aber beim Kontext des fallenden Balls mit ein.

	Schüler*innen								
Aspekt	$S6_3$	$S7_2$	$S2_3$	$S4_3$	$S1_2$	$S7_3$	$S2_1$	$S4_1$	$S5_1$
Gesamtfeld	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓
Arten von Feldern									
magnetisches Feld	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓
Gravitationsfeld	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓
elektrisches Feld	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗
elektromagnetisches Feld	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Higgsfeld	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
atomares Feld	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗
Quarkfeld	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Tabelle 16.2: Antworten der Schüler*innen bei der Wiederholung einzelner Aspekte des EFA mit Bezug zu Feldern im Rahmen des EFA-M. Links: Art des Feldes; rechts: Schüler*innen, welche sich an das entsprechende Feld erinnern (✓) bzw. nicht erinnern (✗).

Auf Nachfrage erinnern sich sechs der neun Schüler*innen an das Gesamtfeld oder das Prinzip der Überlagerung von Einzelfeldern. So sprechen $S7_2$ und $S2_1$ zunächst nicht über das Gesamtfeld als solches, sondern über das „Überlappen“ von einzelnen Feldern. Schüler*in $S6_3$ erwähnt, dass sich „einzelne Felder [...] zu einem größeren“ überlagern, $S5_1$ erinnert sich auch an die Überlagerung und kann den Begriff „Gesamtfeld“ sogar erläutern. Im Fall von $S7_3$ wird auch noch erwähnt, dass das Gesamtfeld einen „Willen“ besitze und sich ausdehne bzw. kleiner werde. Auch wenn der Begriff Gesamtfeld nicht allen Schüler*innen wieder einfällt oder bestimmte Aspekte nicht sofort präsent sind, scheint es dennoch so, dass sie implizit existieren und bei entsprechenden Anreizen (z. B. Kontexte) wieder erinnert und angewendet werden.

Bezüglich der Indikatoren äußern die Schüler*innen in der Regel beide Aspekte, also Abstandsänderung und Tempo- bzw. Bewegungsänderung, wenn sie gefragt werden. Insbesondere im Zusammenhang mit Beispielen wie Satellit und Erde fällt es den allen Schüler*innen leicht, beide Indikatoren einzubeziehen. Lediglich $S7_2$ vergisst, dass auch der Abstand der Quellen relevant ist.
Die Felder der modernen Physik werden hingegen von wenigen erinnert, vermutlich auch aufgrund ihres höheren Abstraktionsgrades. Dazu sei aber erwähnt, dass die Kontexte zur modernen Physik nicht explizit aufgegriffen und auch nicht weiter nachgefragt wird. An den Zusammenhang von Energie und Masse mit dem Quarkfeld können sich die Schüler*innen nicht erinnern. Hier liegt das Interview wohl schon zu weit zurück, um diesen abstrakten Aspekt zu reflektieren. Zwar wird teilweise erinnert, dass es auch ein subatomares Feld im Kern gibt, aber der

Begriff Quarkfeld und besonders der Zusammenhang mit der Masse wird nicht mehr hergestellt.
Die Zuordnung von thermischer Energie und elektromagnetischer Strahlung zu Bewegungsenergie bzw. Feldenergie gelingt fünf der neun Schüler*innen noch problemlos. Bei den anderen fehlt die Erinnerung komplett und sie mussten raten ($S1_2$ und $S4_1$) oder sie erinnern sich nur an einen der beiden Aspekte korrekt ($S7_2$ nur Strahlung, $S5_1$ nur thermische Energie).
Zum Ende der Wiederholung werden die zwei Beispiele zu den Magnetwägen und zum fallenden Ball besprochen. Hier sollen Schüler*innen die Energieübertragung zwischen Feld und Bewegung beschreiben. Die Aufgabe zu den Magnetwägen gelingt sieben von neun Schüler*innen. Eine Schülerin hat hier Schwierigkeiten, mit Hilfe des Feldes zu argumentieren ($S4_3$) und die andere schreibt die Energie zunächst dem Raum „zwischen den Wägen“ zu, ohne dabei sofort über das Feld zu sprechen. Bei Erde und Ball gelingt sechs von neun Schüler*innen die Argumentation über das Gravitationsfeld von Erde und Ball. Bei einer Schülerin wurde die Frage ausgelassen und bei den beiden anderen tritt das gleiche Problem auf, nur eines der Objekte als Quelle des Feldes zu betrachten. Folglich tritt hier die bereits bekannte Fehlvorstellung auf, das Gravitationsfeld gehe nur von der Erde aus bzw. die Energie sei im Ball selbst gespeichert.

16.3 Konzeptidee zur Balkendarstellung

Die Bewertung der Konzeptidee gestaltet sich einheitlich positiv. Die Visualisierung und der Zusammenhang mit der Energieübertragung werden als „anschaulich“ ($S2_3$) beschrieben. Ebenso ist die Paraphrase stets unproblematisch und die Schüler*innen können die beschriebenen Aspekte fehlerfrei wiedergeben.
Die Beschreibungen zur Aufgabe mit den Magnetwägen (A1a) gestalten sich ebenfalls problemlos. Schülerin $S4_3$ kann hier unter Zuhilfenahme der Balkendarstellung sogar die Energieübertragung adäquat beschreiben, obwohl sie dabei während der vorangegangenen Wiederholung zum ersten Interview noch Probleme hatte. Das einzige Problem tritt bei $S5_1$ auf, bei der die Vorstellung auftritt, dass sich die Einzelfelder erst überlappen, wenn sie nahe genug beieinander sind. Bis auf dieses Problem ist die Beschreibung des Prozesses aber angemessen.
Aufgabe A1b bezieht sich auf den Kontext Satellit und Erde. Hier hat nur $S7_2$ Probleme dabei, die Richtung der Energieübertragung richtig zuzuordnen. Alle anderen Schüler*innen können die Verschiebung der Grenzlinie in der Balkendarstellung mit der Energieübertragung zwischen Bewegung und Feld korrekt verknüpfen. Dies ist insofern bemerkenswert, als bei diesem Kontext die Bestimmung

der Richtung der Energieübertragung oft ein Problem im ursprünglichen Interview war. Hier könnte also die Balkendarstellung dabei helfen, die Schwierigkeit abzuschwächen und die Vorstellung zu unterstützen. In einem zweiten Teil dieser Aufgabe sollten die Schüler*innen die Formel 16.1 mit diesem Prozess in Verbindung bringen und argumentieren, was die verschiedenen Terme repräsentieren.

$$\frac{m}{2} \cdot \left(v^2_{\mathrm{n}achher} - v^2_{vorher}\right) = \left(\gamma \cdot m \cdot M \cdot \frac{1}{r_{\mathrm{n}achher}}\right) - \left(\gamma \cdot m \cdot M \cdot \frac{1}{r_{vorher}}\right) \quad (16.1)$$

Auch hier gelingt es allen Schüler*innen, eine angemessene Antwort zu geben. Zwar ist nicht allen immer bekannt, wofür die einzelnen Faktoren stehen (z. B. γ als Gravitationskonstante), sie können aber die linke Seite der Gleichung der Bewegungsenergie und die rechte Seite der Feldenergie zuordnen. Darüber hinaus erkennen vier der Schüler*innen ($S4_3$, $S1_2$, $S7_3$, $S2_1$) auch sofort, dass die Energieübertragung zwischen Bewegung und Feld in der Formel über die Differenz ausgedrückt wird.

16.4 Konzeptidee zur Formelgestalt

Die Bewertung der Konzeptidee zur Formelgestalt zeigt sich einheitlich positiv. Alle Schüler*innen empfinden die Kategorisierung durch die drei Faktoren (Konstanten, Quelleneigenschaften und Abstand) als plausibel. Bis auf $S2_3$ können auch alle die Idee problemlos wiedergeben. Schülerin $S2_3$ nennt hier allerdings „Geschwindigkeit, Masse und Distanz“, vermutlich in Kombination mit $\frac{m}{2} \cdot v^2$ und in Anlehnung an die Formel $m \cdot g \cdot h$. Die Geschwindigkeit wird hier genannt, weil die Tempoänderung ein Indikator für die Energieübertragung zwischen Bewegung und Feld ist. Andere Schüler*innen verwenden die Begriffe Radius (bei der Satellitenbewegung) bzw. Höhe für den Abstand, was im entsprechenden Kontext legitime Ausdrücke für den Abstand der Quellen sind. Für den Begriff „Term“ wird von $S5_1$ auch der Ausdruck „Komponenten“ verwendet. In der Regel greifen die Schüler*innen also auf die vorgegebenen Begriffe der Konzeptideen zurück.

Im Folgenden werden die Antworten der Schüler*innen auf die Aufgaben A2a bis A2f erläutert. Tabelle 16.3 fasst diese hinsichtlich der folgenden Fragestellungen zusammen. Zuerst wird beobachtet, ob die Schüler*innen die zuvor beschriebene Konzeptidee nutzen, um die vorgegebenen Formeln zu interpretieren, d. h. die Symbole in Terme einzuteilen und mit Hilfe der Konzeptidee einer der drei Kategorien zuzuordnen. Dabei wäre es bereits zielführend, wenn sie das Prinzip angemessen anwenden, also auf die vorgegebenen Kategorien (Konstanten, Quel-

leneigenschaften und Abstand) zurückgreifen. Ob dann die Zuordnung tatsächlich auch aus fachlicher Sicht zutreffend ist, hat erst in einem zweiten Schritt untergeordnete Bedeutung. Denn durch die Vielzahl an unterschiedlichen Symbolen für Konstanten (π, ϵ, c, etc.) und Abstände (h, d, a, r, etc.) ist eine korrekte Zuordnung aus Sicht der Schüler*innen teilweise Zufall bzw. muss erraten werden. Gerade bei den Quelleneigenschaften existieren neben der Masse m bzw. M und der Ladung q bzw. Q auch Symbole, in denen die Quelleneigenschaften implizit verborgen sind, wie beispielsweise bei der Federkonstante K. Auch der Abstand ist nicht immer direkt ersichtlich und ggf. hinter einer anderen Größe verborgen, wie bei der Kapazität C eines Kondensators. Eine fachlich angemessene Einteilung in Terme oder gar deren Zuordnung stellt auch nicht das Ziel des EFA-M dar, sondern vielmehr die sinnvolle Anwendung des Prinzips für eine sinnstiftende Auseinandersetzung mit den Formeln. Aus diesem Grund werden hier zwei Beobachtungsfragen formuliert. Zum einen, ob die Schüler*innen angemessen nach den Termen suchen, d. h. nach entsprechenden Faktoren gesucht und versucht wird, diese als Terme in die drei Kategorien einzuteilen. Zum anderen wird dann spezifisch beobachtet, ob die Zuordnung bestimmte Kriterien erfüllt:

A2a: Werden q und Q als Ladung und Quelle des elektrischen Feldes erkannt?
A2b: Wird $Z \cdot e^2$ als Quelle(n) des elektrischen Feldes erkannt?
A2c: Wir der Abstand mit x assoziiert[2] und werden die Quelleneigenschaften hinter der Federkonstanten K vermutet?
A2d: Wir die Quelleneigenschaft mit der Ladung Q des Kondensators verknüpft und der Abstand hinter der Kapazität C vermutet?
A2e: Wird die Masse m mit den Quarks als Quellen des Quarkfeldes verknüpft?
A2f: Wird die Temperatur mit dem Tempo der Teilchen in Verbindung gebracht?

Insgesamt fällt auf, dass alle Schüler*innen versuchen, die Formeln mit Hilfe der drei Terme zu interpretieren (bis auf eine Ausnahme: $S7_2$ bei A2c). Dies geschieht unter Verwendung der entsprechenden Begriffe stets auf angemessene Weise. Das bedeutet, die Konzeptidee kann hier bereits als hilfreich und sinnvoll eingestuft werden. Denn schon durch die bloße Zuhilfenahme dieses Prinzips sind Schüler*innen in der Lage, über Formeln zu sprechen und sie sinnstiftend mit den Konzeptideen des EFA zu verknüpfen. Bis auf Aufgabe A2e (Masse und Energie) kann die Mehrheit der Schüler*innen die meisten Terme auch richtig zuordnen und mindestens die Quelleneigenschaften oder den Abstand identifizieren.

[2]Die Variable x wurde in der Aufgabe bereits als Ausdehnung der Feder ausgezeichnet.

		Schüler*innen							
Aufgabe		$S6_3$		$S7_2$		$S2_3$		$S4_3$	
A2a	el. Feld	✓	(✓)	✓	(✓)	✓	✓	✗	✓
A2b	Bohr-Atom	✓	(✓)	✓	✗	✓	✓	✓	✓
A2c	Feder	✓	✓	✓	✗	✓	(✓)	✓	✗
A2d	Kondensator	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓
A2e	Masse	✓	(✓)	✗	✗	✓	✗	✓	✓
A2f	Temperatur	✓		(✓)		✓		✗	

	Schüler*innen									
Aufgabe	$S1_2$		$S7_3$		$S2_1$		$S4_1$		$S5_1$	
A2a	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	(✓)	✓	✓
A2b	✓	(✓)	✓	✗	✓	✗	✓	(✓)	✓	✓
A2c	✓	(✓)	✓	✓	✗	✗	✓	(✓)	✓	✓
A2d	✓	(✓)	✓	(✓)	✓	✓	✓	✗	✓	✓
A2e	✓	✓	-	(✓)	-	-	-	-	-	-
A2f	✓		✓		✓		✓		✓	

Tabelle 16.3: Beurteilung der jeweiligen Äußerungen der Schüler*innen hinsichtlich der Beobachtungsfragen: Links: Wird das Prinzip der Einteilung von Formeln zur Feldenergie in die drei Terme „Konstanten, Quelleneigenschaften, Abstand“ angewendet? Rechts: Werden die Symbole und Terme auch fachlich korrekt zugeordnet? Bedeutung der Beurteilung: „✓/✗“ an erster Stelle bedeutet Angemessene oder keine/unangemessene Suche nach den Termen und Zuordnung; „✓/(✓)/✗“ an zweiter Stelle bedeutet richtige „✓“ bzw. teilweise richtige „(✓)“ oder keine/falsche „✗“ Zuordnung aus fachlicher Sicht. Bei $S2_1$, $S4_1$ und $S5_1$ kennzeichnet „-“ Auslassungen, da sie das Quarkfeld bei A2e nicht aus dem ersten Interview kennen.

Aufgabe A2a: elektrisches Feld zweier Ladungen

Bis auf $S4_3$ beginnen alle Schüler*innen damit, die Formel in die drei Terme einteilen. Dies geschieht auch stets angemessen. Lediglich die Zuordnung fällt manchen Schüler*innen schwer. So gelingt es $S1_2$, $S7_3$ und $S2_1$ weder q bzw. Q als Ladung zu identifizieren noch auf das elektrische Feld zu schließen. Dies ändert allerdings nichts daran, dass sie die Zuordnung angemessen hinsichtlich der Einteilung in *Konstanten, Quelleneigenschaften, Abstand* vornehmen. Die Symbole werden also richtig zugeordnet, allerdings physikalisch nicht korrekt interpretiert. Bei $S6_3$, $S7_3$, $S2_1$ und $S4_1$ fehlt nur die Identifikation als Ladung, $S7_2$ kann diese zuordnen, erkennt das Feld allerdings nicht als elektrisches Feld.

Aufgabe A2b: Bohr-Atom

Bei Formel 15.9 greifen alle Schüler*innen auf die Konzeptidee zurück. Auch die Identifikation von $Z \cdot e^2$ bzw. e^2 als Quelleneigenschaften gelingt den meisten. Allerdings fällt es einigen ($S6_3$, $S7_2$, $S7_3$, $S4_1$) schwer, e als die elektrische Ladung bzw. Z als Kernladungszahl zu identifizieren:

> „Ich weiß nicht, ob $Z \cdot e^2$ die Quelleneigenschaft ist, oder ob man das trennen muss." ($S5_1$)

Die Schüler*innen $S7_2$, $S7_3$ und $S4_1$ vermuten erst, dass es sich bei e um die euler'sche Zahl handelt. Hier braucht es teilweise Hilfe, um den Zusammenhang mit der Elektronenladung herzustellen. Im Fall von $S1_2$ ist es interessant, dass hier die Elementarladung und Ordnungszahl als solche sofort erkannt werden, allerdings keine Verbindung zum elektrischen Feld hergestellt wird.

Aufgabe A2c: Gespannte Feder

Bis auf $S2_1$ wird auch hier nach de drei Termen gesucht. Schülerin $S2_1$ denkt hier aufgrund der quadratischen Abhängigkeit von x zunächst an die Bewegungsenergie. Sie verwechselt auch zunächst die Konstanten und Quelleneigenschaften: „[...] x als Ausdehnung, K als Federkonstante und Konstante für Quellen." Bei den anderen Schüler*innen gelingt die Zuordnung problemlos, $S2_3$ und $S5_1$ fassen hier die Überlegung treffend zusammen:

> „Wenn es ein Feld ist, muss es die drei Eigenschaften [i. e. Terme] haben." ($S2_3$)

> „Die Energie muss in einem Feld sein, da es noch keine Bewegung gibt [...] in einem elektrischen Feld, weil sich die Atome auseinander ziehen." ($S5_1$)

Schüler $S6_3$ formuliert es sogar noch ausführlicher: „K [steht] für das Gesamtfeld der Atome in der Feder." Lediglich zwei Schüler*innen ($S2_3$ und $S2_1$) erkennen x nicht als Maß für den Abstand. Die Identifikation von K als Federkonstante gelingt allen bis auf $S4_1$, die hier erst auf eine Konstante schließt. Bei Erläuterung erkennt sie dann aber, dass es „ähnlich wie bei g [Erdbeschleunigung]" ist, wo die Quelleneigenschaften (bei g ist es die Masse der Erde) darin inbegriffen sind.

Aufgabe A2d: Plattenkondensator

Auch hier greifen alle Schüler*innen auf die Konzeptidee zurück. Für die Identifikation der Terme birgt Formel 15.11 dann insofern Schwierigkeiten, als hier zwar

Q^2 durch die Analogie zu den Formeln für die elektrischen Felder der zwei Ladungen bzw. des Bohr-Atoms naheliegend als Quelleneigenschaft identifiziert werden kann, der Ausdruck $\frac{\cdot\cdot}{C}$ aber auch schnell als Abstand angenommen werden kann. Diese Annahme ist mit der Konzeptidee allerdings vereinbar. Die Mehrheit der Schüler*innen ist in der Lage, die richtigen Zuordnungen vorzunehmen und auch die substituierte Formel 15.12 zu interpretieren. Sie sind also in der Lage, Q als Quelleneigenschaft zu verstehen und C mit dem Abstand in Verbindung zu setzen, so z. B. auch $S6_3$: „Der Abstand müsste im C stecken".
Den Schüler*innen $S7_2$, $S1_2$, $S7_3$ und $S4_1$ gelingt die richtige Zuordnung der Abstandsabhängigkeit hier nicht. Schülerin $S4_1$ vertauscht Abstand und Ladung und $S7_2$ identifiziert die Konstante $\frac{1}{2}$ als Abstand. Beide stimmen nach kurzer Diskussion aber zu, dass eine andere Zuordnung sinnvoller ist. $S7_2$, $S1_2$ und $S7_3$ identifizieren C unmittelbar als Abstand.

Aufgabe A2e: Energie-Masse-Äquivalenz

Die Formel der Energie-Masse Äquivalenz mit dem Quarkfeld in Verbindung zu bringen fällt einigen Schüler*innen schwer. Drei von sechs Schüler*innen ($S2_3$, $S4_3$ und $S1_2$) versuchen zwar, eine Zuordnung vorzunehmen, bis auf $S4_3$ und $S1_2$ (teilweise $S7_3$) verknüpfen sie die Masse aber nicht mit der Energie des Quarkfeldes oder gar den Quarks als Quellen des Feldes. Schüler $S6_3$ erinnert sich zumindest aber an den Zusammenhang von Masse und Feldenergie: „Wenn ich von dem Feld Energie abgebe, verliere ich Masse." Die Lichtgeschwindigkeit als Konstante zu erkennen gelingt den meisten allerdings problemlos. Im Fall von $S7_2$ ist die Formel gänzlich nichtssagend, sie kann weder die Lichtgeschwindigkeit als Konstante identifizieren, noch die Masse mit dem Feld in Verbindung bringen.

Aufgabe A2f: Thermische Energie und Temperatur

Bei Formel 15.14 sollen Schüler*innen erkennen, dass die Energie von der Temperatur abhängt. Über die Verbindung von thermischer Energie und Teilchenbewegung sollen sie dann darauf schließen, dass die Temperatur mit dem Tempo der Bewegung zusammenhängt. Dieser Zusammenhang sollte aus dem ersten Interview bzw. manchen Schüler*innen auch aus dem übrigen Physikunterricht bekannt sein. Wie der Tabelle 16.3 zu entnehmen ist, haben die Schüler*innen damit keine Probleme. Der Zusammenhang wird beispielsweise von $S6_3$ präzise formuliert: „Temperatur hängt mit der Bewegung der Teilchen zusammen." Schülerin $S4_1$ formuliert dies sogar noch spezifischer als Je-desto-Beziehung: „Bewegte Teilchen; die Teilchen werden schneller und es [der Stoff] erwärmt sich." Lediglich $S7_2$

braucht etwas mehr Zeit, um auf den Zusammenhang von Temperatur und Tempo der Teilchenbewegung zu schließen und $S4_3$ kann diese Verbindung auch bei Nachfragen nicht herstellen. Insgesamt bietet die Verknüpfung von Bewegungsenergie und Temperatur bzw. Teilchenbewegung keine Schwierigkeiten und Schüler*innen können die Idee mit der Formel verknüpfen. Dazu muss nur im Vorfeld deutlich gemacht werden, dass es sich hier nicht um eine Formel für Feldenergie handelt, damit Schüler*innen nicht beginnen, die zweite Konzeptidee anzuwenden.[3]

16.5 Einschätzung der Schüler*innen

Zu Beginn sei hier das Feedback der Schüler*innen kurz erläutert, welches sie am Ende des Interviews zum EFA-M geben. Insgesamt fällt hier auf, dass (wie auch bei den letzten Zyklen der EFA Interviews) die Resonanz auf die vorgestellten Ideen durchweg positiv ist. Für die Schüler*innen mache diese Beschreibung von Formeln Sinn, sei „logisch“ ($S6_3$, $S1_2$, $S5_1$) und helfe, das Konzept so im Gesamten zu verstehen ($S6_3$, $S7_2$, $S2_1$, $S4_1$). Besonders hervorgehoben wird hier (auch wieder analog zur Beurteilung des EFA), dass der Zusammenhang der Formeln deutlich und verständlich werde (insbesondere bei den Feldenergien) und dass man das Prinzip der drei Terme auf alles anwenden könne, weil es nach dem gleichen Schema funktioniere (explizit $S1_2$, $S4_1$, $S5_1$):

> „Es funktioniert nach dem gleichen Schema. Und ich denke es kann auch helfen, dass man das große Ganze in den vielen verschiedenen kleinen Sachen [i. e. Formeln] auch sieht, sodass man eine Verbindung hat zwischen allem.“ (Einschätzung $S5_1$)

Sowohl der Vorteil, dass man so weniger auswendig lernen müsse ($S6_3$, $S1_2$, $S7_3$), als auch dass man sich Formeln bzw. deren Bedeutung oder Zusammensetzung besser merken könne ($S1_2$, $S7_3$, $S4_1$), wird von einigen Schüler*innen angemerkt. Schülerin $S2_3$ fasst zusammen: „Ich denke, wenn ich eine Formel sehe, dass es mir sofort wieder in den Kopf kommt.“. Auch Schülerin $S4_3$ gibt zu, dass sie in Mathe und Physik „nicht so das Ass“ sei, es für sie aber einfacher zu verstehen sei als in der Schule. Dies summiert die Absicht des EFA, Zusammenhänge zwischen Formeln deutlich zu machen und diese somit inhaltlich über die Verknüpfung zum Konzept anzureichern und verständlich zu machen.

[3] Im tatsächlichen Schulunterricht könnte man diskutieren, was die Schüler*innen sich unter dieser Formel vorstellen. Es sollte nur sichergestellt werden, dass sie hier nicht aufgrund des bisherigen Verlaufs aus verfügbarkeits- bzw. ankerheuristischen Gründen erwarten, eine Formel für Feldenergie zu betrachten.

Die traditionellen Formeln zu Feldenergien nach dem Prinzip des EFA-M aufzufassen und zu erläutern, scheint also für viele Schüler*innen verständlich und hilfreich zu sein:

> „Also hilfreich, dass man die Formeln auseinander nehmen und dann dementsprechend die Formel interpretieren, sodass es einfach mehr Sinn macht, wenn ich sie dann anwende und warum ich sie dann verwende. Also ich habe da jetzt einen Zusammenhang. Es ist nicht einfach eine sture Formel, die man einfach so auswendig lernen soll. [...] Jetzt habe ich dafür ein Verständnis entwickelt und es macht mehr Sinn [und ich weiß,] warum ich die dann verwende." ($S7_2$)

Besonders gut gefallen hat den Schüler*innen die farbliche Trennung in rot und blau bei der Balkendarstellung der Energieübertragung ($S2_3$). In diesem Kontext wird auch deren Anschaulichkeit kurz erwähnt.
Neben den positiven Aspekten gibt es auch zwei Verbesserungsvorschläge von Schüler*innen, die sich auf die zur Verfügung gestellten Informationen zu den Formeln beziehen: So wird vorgeschlagen, im Unterricht gleich bekannt zu geben, um was für eine Art von Formel (welches Feld bzw. welche Energie) es sich handelt. Dieser Wunsch spiegelt offenbar das Bedürfnis wieder, die vorliegende Formel einzuordnen, um dann die Terme sinnvoll bestimmen zu können. Ähnlich dazu wird auch darum gebeten, Konstanten zu definieren, sodass man schnell feststellen kann, wann es sich um eine Naturkonstante und wann um eine Variable handelt.
Zum Ende des Interviews wurden die Schüler*innen auch gefragt, wie sie sich selbst in Mathematik einschätzen. Dabei geben drei der neun ($S6_3$, $S4_1$, $S5_1$) an, dass ihnen der Umgang mit Formeln im Unterricht allgemein leicht falle. Dies fällt auch im Antwortverhalten auf, da $S6_3$, $S4_1$ und $S5_1$ selten Probleme haben, die Formeln zu interpretieren und auch die richtige Zuordnung zu finden. Die anderen sechs Schüler*innen geben an, nicht immer alle Formeln sofort zu verstehen bzw. „gute und schlechte Momente" ($S2_3$) zu haben. Alle geben an, dass es nicht immer leicht sei bzw. eine Weile dauere, bis sie die Formeln verstanden und „aufgenommen" hätten (z. B. $S7_2$). Die Schüler*innen $S1_2$ und $S7_3$ merken an, dass Formeln zwar notwendig seien, es im Unterricht aber oft nur um „auswendig lernen" ginge als um Verständnis. Umso wertvoller ist das oben erwähnte Feedback der Schüler*innen, die den Ansatz durchweg als verständlich und hilfreich bezeichnen. Eine Schülerin fasst beispielsweise ihre Beziehung zu Formeln folgendermaßen zusammen:

> „Generell in Mathe/Physik bin ich nicht so das Ass [...] aber es [der EFA-M] ist einfacher zu verstehen als in der Schule." ($S4_3$)

16.6 Diskussion und Resümee

Die Evaluation des EFA-M zeigt, dass die Schüler*innen durchweg auf die beiden Konzeptideen zurückgreifen. Insbesondere die Balkendarstellung scheint für die Kommunikation über den Energietransfer zwischen Feldern und Bewegung nützlich zu sein. So konnten einzelne Schüler*innen Kontexte wie z. B. das Beispiel von Erde und Satellit leichter erklären (insbesondere auch im Hinblick auf die richtige Zuordnung der Richtung der Energieübertragung), auch wenn es ihnen zuvor schwer fiel. Auch als Ausgangspunkt für die Hinführung zu den Formeln scheint die Darstellung geeignet zu sein. Denn durch die Veranschaulichung der sich verändernden Anteile von Feld- und Bewegungsenergie im Balken kann gerade der Vergleich von vorher und nachher beim Transferprozess unterstützt werden. Die farbige Unterteilung der beiden Balkenanteile unterstützt den kognitiven Prozess visuell.

Die Konzeptidee zur Formelgestalt erscheint den Schüler*innen ebenfalls sinnvoll und nützlich für die Interpretation von Formeln zur Feldenergie. Hier wird besonders der generalisierende Charakter (als „Schema“ für alle Formeln dieser Art) hervorgehoben. Wie bereits auch bei den drei Zyklen der Akzeptanzbefragungen bewerten Schüler*innen die Konsistenz und Übertragbarkeit der Konzeptideen als besonders sinnstiftend. Dies spiegelt sich auch im Antwortverhalten der Schüler*innen wieder, denn nahezu alle greifen auf die Konzeptidee zurück, um die Formeln in die drei vorgegebenen Terme einzuteilen. Nicht immer gelingt es den Schüler*innen, die Quelleneigenschaften oder Abstandsabhängigkeit richtig zuzuordnen, die Argumentationsstrukturen bzw. Suche nach diesen an sich gestaltet sich allerdings in fast allen Fällen angemessen. Erwähnenswert ist hier auch, dass sich die meisten Schüler*innen auch an den Zusammenhang von Feldveränderung und Energieübertragung im atomaren Feld erinnern und die Auslenkung der gespannten Feder mit den Atomen in Verbindung bringen können. Der Zusammenhang von Masse und Energie bzw. von Masse und Energie im Quarkfeld ist hingegen nur bei wenigen Schüler*innen noch präsent. Dies liegt wohl daran, dass dieser Teil des ersten Interviews generell neu sowie am Ende der Konzentrationsfähigkeit auch meist schwierig war, weswegen die Erinnerung nach einer langen Zeit von einigen Monaten nicht mehr so deutlich ist wie bei den Konzeptideen der klassischen Physik. Dennoch gibt es Schüler*innen, wie beispielsweise $S6_3$, die hier den Zusammenhang zum Quarkfeld zumindest teilweise herstellen können.
Das Zusammenspiel von Temperatur und Tempo der sich bewegenden Teilchen bei der thermischen Energie können fast alle Schüler*innen korrekt beschreiben.

Hier ist also zum Zeitpunkt des Interviews bei fast allen eine profunde Einbettung in den EFA erfolgt. Ob dies am EFA selbst oder an der weiteren Vorbildung der Schüler*innen liegt, kann nicht festgestellt werden. Allerdings zeigt sich, dass sie ausgehend von diesem Vorwissen befähigt sind, das konzeptuelle Verständnis sinnstiftend mit der Formel in Verbindung zu bringen.

Insgesamt scheinen die Schüler*innen die *symbolic form* „Teile eines Ganzen“ zu erkennen und die einzelnen Terme angemessen einzuteilen sowie auf Basis der ihnen zur Verfügung stehenden Informationen sinnvoll mit den Konzeptideen des EFA zu verknüpfen. So suchen sie aktiv nach einer Verbindung zwischen Symbolen/Termen und z. B. den Quellen eines Feldes oder nach Konstanten. Das *epistemic game* „Mapping Mathematics to Meaning“, bei dem Schüler*innen den Symbolen eine physikalisch Bedeutung zuschreiben, findet also Anwendung. Auch wenn die Zuordnung durch fehlende Information nicht immer perfekt ist (z. B. Nachfrage, was k_B bedeutet), so erkennen die Schüler*innen die Oberflächenstruktur und die Überlegungen erfolgen stets angemessen vor dem Hintergrund des EFA Konzeptideen. Es kann festgehalten werden, dass es wichtig ist, dass Schüler*innen die Bedeutung der Symbole und Terme einer Gleichung erkennen. Dabei scheint der EFA-M zu helfen.

Wichtig ist, dass den Schüler*innen dabei bewusst wird, um welche physikalischen Größen es sich bei den Symbolen handelt. Die beiden oben erwähnten Vorschläge seitens der Schüler*innen, direkt bei der Einführung einer Formel bekannt zu geben, um welche Art von Formel es sich handelt (d. h. für welches Feld) und zu jeder Formel zu definieren, welche Symbole darin Naturkonstanten bzw. Variablen repräsentieren, ist sinnvoll. Auf diese Weise sollten Formeln im Unterrichts tatsächlich ausführlich eingeführt und erläutert werden. Dies spiegelt auch die Empfehlungen von De Cock (2022) wider. Bei der Evaluation des EFA-M wurden diese Informationen bewusst ausgelassen, um zu überprüfen, ob Schüler*innen mit Hilfe der Konzeptidee in der Lage sind, selbst sinnvoll Terme zuzuordnen und zu interpretieren. Erhalten Schüler*innen folglich die nötigen Information im Unterricht, ist zu vermuten, dass sie damit ein besseres Verständnis für die Bedeutung der einzelnen Symbole und damit der Formel selbst erlangen. Es ist weiters anzunehmen, dass für Schüler*innen dadurch auch die Aussagekraft der Formeln für Energie als Ganzes steigt und ggf. auch quantitative Betrachtungen plausibler werden. So kann ein unüberlegtes „Recursive Plug-and-Chug“ möglicherweise vermieden und durch sinnstiftende Betrachtungen ersetzt werden. Diese Vermutungen müssten in weiteren Untersuchungen anderer Arbeiten empirisch überprüft werden.

Da die Schüler*innen bei der Einwilligung zu den Interviews nicht wussten, worum es geht, kann nicht davon ausgegangen werden, dass es sich nur um leistungsstarke Schüler*innen in Mathematik handelt, was sich auch mit ihren Selbsteinschätzungen deckt. Aus diesem Grund kann zumindest vor dem Hintergrund einer kleinen Stichprobe angenommen werden, dass die Vorgehensweise und Grundidee des EFA-M auch für das breitere Spektrum der Schüler*innen umsetzbar ist. In Zukunft sollte der EFA-M also gemeinsam mit dem EFA implementiert und auch in einem größeren Setting untersucht werden.

KAPITEL 17

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde im Rahmen des Energie-Feld-Ansatzes (EFA) ein Unterrichtskonzept zum Thema Energie für die Sekundarstufe II entwickelt und evaluiert. Dazu wurden die fachliche Klärung und Kenntnisse über Lernendenvorstellungen zu den Themen Energie und Felder in Beziehung gesetzt und mittels didaktischer Rekonstruktion Konzeptideen entwickelt und mit passenden Veranschaulichungen und Kontexten verknüpft (siehe Kapitel 2 und 4). Als Alternative zum traditionellen Unterricht führt der Ansatz typische Energieformen auf Bewegungsenergie und Feldenergie zurück. Damit wird die Umwandlung von Energie und die Einführung zahlreicher Energieformen obsolet. Es genügt, die Übertragung von Energie zwischen Bewegungen und Feldern zu betrachten.

Über die Methode der Akzeptanzbefragungen wurde das Konzept in drei Entwicklungs- und Evaluationszyklen (Design-Zyklen) hinsichtlich seiner Umsetzbarkeit untersucht und weiterentwickelt (siehe Kapitel 5). Anschließend wurde das Konzept durch Lehrpersonen in fünf Schulklassen erprobt und mit Hilfe eines Testinstruments evaluiert. Den Abschluss stellte die Untersuchung einer Erweiterung des Ansatzes durch Formeln im Rahmen von Akzeptanzbefragungen dar.

Die Ergebnisse des Projektes sind vielversprechend. Die drei Design-Zyklen führten entsprechend vorher festgelegter Kriterien zu einer ausgereiften und gut funktionierenden Version des EFA-Konzeptes. Entsprechend dem Paradigma der didaktischen Designforschung konnten dabei Erkenntnisse über Schwierigkeiten und Benefits beim Lernen mit dem EFA identifiziert werden. Bei der anschließenden

Erprobung im Klassensetting konnten die Erkenntnisse bestätigt und durch weitere Einblicke vertieft werden. Die folgenden Abschnitte fassen die wesentlichen Befunde zusammen, reflektieren diese vor dem Hintergrund des angestrebten Mehrwertes und gehen auf Limitationen ein. Das Kapitel schließt mit einer Darstellung offener Fragen und Ansatzpunkte für weitere Forschungsprojekte.

17.1 Reflexion der Vorannahmen

Der EFA erwies sich als produktiv für die Förderung des Energieverständnisses. In diesem Abschnitt wird erläutert, inwiefern die Ergebnisse die theoretischen Vorannahmen zu Mehrwert, normativen Festlegungen und Designprinzipien aus Kapitel 6 reflektieren.

Mehrwert des EFA

Für die Konzeption des Ansatzes wurde in Kapitel 6.2 der angestrebte Mehrwert des EFA formuliert. Dabei handelte es sich um die drei Aspekte *fachliche Angemessenheit*, *wissenschaftstheoretische Bedeutung (Propädeutik)* und *empirische Bedeutung*. Ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen kann hier festgehalten werden, dass der Energie-Feld-Ansatz den angestrebten Mehrwert bietet: Er fasst *Energie* als abstraktes Konzept auf. Dabei wird von einer Definition abgesehen und auch auf stoffliche Vorstellungen und Analogien (z. B. Geld oder Treibstoff-Modell, vgl. Kapitel 3.1) verzichtet. Statt eine Definition zu geben, wird Energie als abstrakte Bilanzierungsgröße verstanden, deren fächer- und kontextübergreifende Rolle bei der Beschreibung von Phänomenen betont wird. Es werden vornehmlich phänomenologische Bezüge hergestellt. Durch die Fokussierung auf die Dichotomie (Energie nur in Feldern und Bewegungen) wird auch die Energieerhaltung implizit ins Zentrum gerückt. Dies wurde auch von den Lernenden wahrgenommen. Die Erkenntnisse, insbesondere aus der Klassenerhebung (vgl. Item 2a/b in Kapitel 14.3.2), machen evident, dass der EFA ein epistemisch angemessenes Verständnis von Energie fördert. Damit kommt dem Ansatz eine *wissenschaftstheoretische Bedeutung* zu, indem sowohl Lernenden als auch Lehrenden eine gewisse „Mächtigkeit“ des Konzeptes bewusst wird. Die Einschätzungen der Schüler*innen und Lehrer*innen zeigten, dass die Beschreibung verschiedenster Phänomene mittels weniger konsistenter Konzeptideen auf hohe Akzeptanz stößt. Die Lernenden gaben an, dass so „das große Ganze“ Sinn ergebe, da alles „nach einer Masche“ funktioniere (vgl. Kapitel 10). Damit zeigt sich, dass die Lernenden eine wissenschaftstheoretische Relevanz erkennen.

Über die genaue Betrachtung verschiedener Felder wird der in der fachdidaktischen Literatur kritisierte Blackbox-Charakter der Energieformen im traditionellen Energieunterricht inhaltlich angereichert. Die Sinnhaftigkeit und Verständlichkeit wird oft im Feedback der Lernenden hervorgehoben. Durch die gleichzeitige Subsumption der Energieformen unter die Dichotomie werden den Schüler*innen die Zusammenhänge klarer. Darüber hinaus zeigen auch Akzeptanz und Rückmeldungen, dass diese *fachliche Angemessenheit* als Bereicherung verstanden wird.

Die *empirische Bedeutung* des EFA ist damit erfüllt, dass die vorliegende Arbeit neue Erkenntnisse zum Lernen über Energie und Felder bereitstellt. Mit dieser Arbeit steht ein ausgearbeitetes Unterrichtskonzept zur Verfügung, dass sich über verschiedene Methoden als für die Praxis vielversprechend umsetzbar und nützlich erwiesen hat.

Über die Erfüllung des Mehrwerte hinaus konnte auch das *optimistische Argument* aus Kapitel 6.2 bestätigt werden. Die durch die Subsumption reduzierte Begriffsvielfalt schien den Lernenden trotz der konzeptuellen Details zu einer gewissen „Einfachheit“ des Konzeptes zu führen. Der Sprachgebrauch einzelner Begriffe und Formulierungen stieß auf hohe Akzeptanz (z. B. ‚Gesamtfeld‘, die Tendenz des Feldes und dessen aktive Rolle). Es zeigte sich einen große Anwendbarkeit. Insgesamt werden die a priori Annahmen durch die Erkenntnisse dieser Arbeit zu Evidenz-basierten Annahmen.

Reflexion normativer Festlegungen und Designprinzipien

Zusätzlich zum Mehrwert wurden in Kapitel 6.4 die Designprinzipien für die Konzeption des EFA auf Basis von normativen Festlegungen definiert. Dazu wurde beschlossen, das Konzept des Gesamtfeldes einzuführen und diesem eine zentrale und aktive Rolle bei der Beschreibung von Prozessen der Energieübertragung zuzuschreiben. Dieses Prinzip stieß in den Evaluationsrunden auf eine hohe Akzeptanz und wurde meist problemlos und produktiv angewendet. Die Beschreibung der dynamischen Veränderung des Gesamtfeldes in Prozessen stellte sich als hilfreiches Werkzeug heraus; ebenso wie dessen graphische Darstellung, die von nahezu allen Schüler*innen übernommen wurde.

Durch die Einführung des Gesamtfeldes kommt der EFA ohne die direkte Verwendung der Konzepte *Kraft* und *Arbeit* aus. Mit dem Prinzip der *Tendenz des Gesamtfeldes* wird das Kraftkonzept implizit und sinnstiftend über die Wechselwirkung von Quellen bzw. Feldern mit der Energie verknüpft. Die Evaluation der

Akzeptanzbefragungen und der Klassenerhebung zeigen, dass dies zu einer reduzierten Vermischung der Konzepte Kraft, Arbeit und Energie führt (siehe z. B. Kap. 14.3.2). Insbesondere konnte durch den Vergleich von Prä- und Posttest im Klassensetting beobachtet werden, dass Schüler*innen nach der Instruktion mit dem EFA weniger auf traditionelle Konzepte und Alltagsvorstellungen zurückgriffen und deutlich seltener Energie und Kraft verwechselten.

Laut den Designprinzipien wurde das Konzept *Feld* bzw. *Gesamtfeld* bewusst abstrakt gehalten. Auch wenn dies einen höheren Abstraktionsgrad forderte, schien es die Lernenden nicht beim Aufbau eines adäquaten Feld-Bildes für ihr Energiekonzept zu hemmen. Die qualitative Herangehensweise an die Verknüpfung von Energie und Feldern funktionierte. In den Interviews zeigte sich, dass die Konzeptideen übernommen und in den meisten Fällen auch angemessen angewendet wurden. Darüber hinaus wurde der Übergang von der makroskopischen auf die mikroskopische Ebene als sinnstiftend wahrgenommen. Ebenso schien der Aufbau von konkreten zu abstrakten Inhalten produktiv zu sein. Dass die zentralen Konzeptideen (z. B. zum Gesamtfeld) auf eine beliebige Ebene und beliebige Kontexte übertragbar sind, wurde auch von Schüler*innen und Lehrer*innen als klarer Benefit des Konzeptes gesehen. Die Verknüpfung des Konzeptes mit mit traditionellen Energieformeln im Rahmen der Mathematisierung des EFA gestaltete sich außerdem vielversprechend (s. Kapitel 16). Die Schüler*innen waren in der Lage, Formeln aus der Perspektive der Konzeptideen zu interpretieren und somit die Symbol-Struktur mit ihrem konzeptuellen Verständnis zu verknüpfen.

17.2 Wichtige Erkenntnisse

Die Reflexion der Vorannahmen hebt bereits wichtige Befunde des Projektes hervor. Die folgende Liste fasst die daraus resultierenden wesentlichen Erkenntnisse zusammen, welche in den nachfolgenden Ausführungen anhand der speziellen Evidenzen zu den Benefits und Schwierigkeiten weiter erläutert werden.

Wichtige Erkenntnisse

1. Schüler*innen und Lehrer*innen **erkennen den Mehrwert** darin, traditionelle Energieformen auf Feld- und Bewegungsenergie zurückzuführen (Dichotomie).
2. Es ist möglich, das Thema **Energie ohne *Kraft* und *Arbeit*** zu unterrichten.

3. Die ***Tendenz des Feldes*** ermöglicht die Beschreibung der Richtung der Energieübertragung.
4. Der Vergleich der Tendenz des Gesamtfeldes mit der **Analogie einer elastischen Feder** zeigt sich dabei als **nicht produktiv**.
5. Prozesse der Energieübertragung können über die **Interaktion von Feldern und Bewegungen** beschrieben werden, sodass Schüler*innen diese Prinzipien verstehen und anwenden können.
6. Die aus der Dichotomie der Energie resultierende ***Suche nach Bewegungen und Feldern*** **hilft** Schüler*innen dabei, Prozesse zu beschreiben.
7. Die zentrale Rolle des Konzeptes ***Gesamtfeld*** **als Akteur** bei der Energieübertragung stößt auf **hohe Akzeptanz**. Es unterstützt Schüler*innen produktiv bei der Betrachtung von Phänomenen aus der Energieperspektive.
8. Eine einfache **Darstellung des Gesamtfeldes hilft** bei der Versprachlichung des Prinzips.
9. Der Übergang **von makroskopischen zu mikroskopischen Phänomenen** und Prozessen unterstützt das Konzeptverständnis.
10. Es ist sinnvoll, **von konkreten zu abstrakten Inhalten** vorzugehen.
11. Der Übergang **von offensichtlichen zu weniger offensichtlichen Quelle-Feld Konstellationen** funktioniert, bedarf allerdings Sorgfalt.
12. **Quark- und Higgsfeld** können konsistent mit anderen Feldern unterrichtet werden und helfen dabei, Phänomene der modernen Physik zu beschreiben.
13. **Formeln** des Energieunterrichts können **inhaltlich sinnstiftend** mit den Konzeptideen verknüpft werden, sodass Schüler*innen diese verstehen.

Die Akzeptanzbefragungen lieferten detaillierte Einblicke in den Lernprozess der Schüler*innen. Einige dieser Erkenntnisse konnten anschließend auch bei der Erhebung im Klassensetting identifiziert werden. Vor dem Hintergrund von Kapitel 2.3 konnte speziell in den Interviews beobachtet werden, wie Schüler*innen bei ihren Beschreibungen auf kognitive Ressourcen nach Hammer (2000) zurückgriffen. Auch die Vermischung von übernommenen Konzeptideen und bisherigen Vorstellungen in *synthetischen Modellen* nach Vosniadou und Brewer (1992) konnte beobachtet werden. Dabei fiel auf, dass gelegentlich typische Lernendenvorstellungen aus Kapitel 3.2 auftreten; insbesondere dann, wenn die Lernenden bei ihren Beschreibungen unsicher waren. Dann zeigten sich vorunterrichtlich gebildete Alltagvorstellungen und Fehlkonzepte wie beispielsweise die Gleichsetzung

von Energie und Kraft. Auch fachlich unangemessene ad-hoc Konstruktionen kamen teilweise vor; z. B. wenn bei der Erwärmung einer Speise in der Mikrowelle die Bewegungsenergie der Atome mit der Drehung des Tellers verknüpft wurde. So spielten gerade auch bei komplizierteren Beispielen naheliegende Antworten im Sinne der Verfügbarkeitsheuristik eine Rolle; beispielsweise wenn Schüler*innen das atomare Gesamtfeld eines Feuerwerkskörpers beschreiben sollten, stattdessen aber nur auf das ‚Gesamtfeld der Rakete' eingingen. Insgesamt zeigte sich, dass ein effektiver Konzeptwechsel auch bei der Vermittlung der EFA-Konzeptideen Sorgfalt und Zeit bedarf, wie es bereits von Vosniadou (2018) erläutert wurde (siehe Kap. 2.3). Im Folgenden seien die wesentlichen Erkenntnisse zu auftretenden Lernendenvorstellungen nach dem EFA beschrieben.

Gesamtfeld

Das Gesamtfeld stieß mit seiner aktiven Rolle in Prozessen auf hohe Akzeptanz. Sowohl die Konzeptidee zur Überlagerung von Einzelfeldern als auch die Veranschaulichung durch die Skizze zum Gesamtfeld wurden von den Schüler*innen als hilfreich wahrgenommen. Der Analogievergleich mit einer elastischen Feder erwies sich hingegen als wenig produktiv und wurde, wie auch bei Fiedler et al. (2022) festgestellt, nicht angenommen. Magnete, Ladungen, Massen und Quarks als Quellen von Feldern darzustellen und dass diese über ihre Felder miteinander wechselwirken, stellt sich als produktive Idee heraus. Das Prinzip der Überlagerung und die Veranschaulichung als Skizze brachten allerdings auch Schwierigkeiten mit sich. So wurde von manchen Schüler*innen beispielsweise angenommen, dass eine Überlagerung von Einzelfeldern und die Entstehung eines Gesamtfeldes nur dann zu Stande komme, wenn sich diese nahe sind (synthetisches Modell mit Nähe-Bedingung). Ebenso sprachen einzelne Schüler*innen davon, dass sich die Felder wieder trennen würden, wenn der Abstand größer werde, ähnlich dem Prozess einer Zellteilung. Diese Vorstellung widerspricht der Konzeptidee, dass Felder allgemein eine unendliche Ausdehnung besitzen. In manchen Fällen wurde dies allerdings nicht erkannt, was möglicherweise auch mit der Veranschaulichung zusammenhängt. Auch wenn den meisten Lernenden bewusst ist, dass die Darstellung eines unendlich großen Feldes praktisch nicht möglich ist und die Skizze deshalb bestimmten Limitationen unterworfen ist, verknüpfen einzelne Schüler*innen die sichtbare „Überlappung" mit der Nähe-Bedingung.
Nichtsdestotrotz wurden die Konzeptideen zum Gesamtfeld größtenteils angemessen übernommen und angewendet, sowohl in den Interviews als auch bei der Klassenerhebung. Es zeigt sich, dass es förderlich ist, zuerst das Gesamtfeld mit seinen Eigenschaften einzuführen und dann mit der Energie zu verknüpfen. Diese Rei-

henfolge ermöglicht es, die Notwendigkeit der Überlagerung mehrerer Felder zu betonen. Folglich veranschaulicht die Visualisierung des Gesamtfeldes auch dessen Entstehung und macht das Konzept für die Lernenden greifbar.

Suche nach Feldern und Bewegungen

Im Zusammenhang mit der Beschreibung des Gesamtfeldes steht auch die Suche nach Feldern und Bewegungen. Nur wenn die Lernenden erkannten, dass ein Feld für die Beschreibung eines Prozesses relevant ist, konnten sie das Gesamtfeld korrekt identifizieren. Wenn die Konstellation der Quellen bzw. Felder wenig offensichtlich war, also nicht direkt sichtbar, hatten manche Schüler*innen Schwierigkeiten, die Einzelfelder zu identifizieren. Folglich konnte auch nicht auf die Überlagerung und damit das Gesamtfeld geschlossen werden. Dies trat beispielsweise bei Erde und Satellit, Ball und Erde oder atomaren Feldern auf. Bei der Satellitenbewegung wurde beispielsweise gelegentlich auf das Magnetfeld der Erde verwiesen, da dies für manche Lernenden offenbar naheliegender war, als nach den Quellen des Gravitationsfeldes zu suchen. In den Fällen mit Schwierigkeiten war es notwendig, den Schüler*innen Hilfestellungen (z. B. kognitive Stoppschilder nach Haagen-Schützenhöfer (2016)) anzubieten und den Beschreibungsprozess schrittweise zu unterstützen. Einfachere Konstellationen wie beispielsweise bei den zwei Magnetwägen oder zwei Luftballons stellten keine Probleme dar. Bei Schüler*innen, die in der Lage waren, die involvierten Felder und Bewegungen schnell zu identifizieren, diente das Prinzip „Suche nach Feldern und Bewegungen“ als produktives Werkzeug bei der Beschreibung von Prozessen. Wenn sie sicher im Umgang mit den Feld-Ideen waren, konnten sie bei der Suche mit Hilfe des Ausschlussprinzips bestimmen, welche Felder oder Bewegungen als Akteure eine Rolle spielen.

Tendenz des Feldes

Im Zuge der Energieübertragung spielt die Tendenz des Gesamtfeldes eine zentrale Rolle bei Beschreibungen. Diese Konzeptidee besitzt eine große Relevanz für das Konzept, da sie es ermöglicht, die Richtung der Energieübertragung (aus einem Feld oder in ein Feld) zu bestimmen. Wie beim Übergang von offensichtlichen zu weniger klaren Quelle-Feld Konstellationen bedarf aber auch diese Konzeptidee einer sorgfältigen Einführung. Da die Richtung der Energieübertragung mit der Richtung der Wechselwirkung zusammenhängt und sowohl attraktive als auch repulsive Felder betrachtet werden, kann die Richtung für manche Schüler*innen verwirrend sein. Beim Gravitationsfeld beispielsweise nimmt das Feld Energie auf,

wenn sich der Satellit von der Erde entfernt. Bei dem zuvor eingeführten Beispiel der sich abstoßenden Magnetwägen war dies allerdings andersherum. Folglich greifen manche Schüler*innen auf die Schlussfolgerung „größere Entfernung bedeutet weniger Energie“ zurück, welche hier allerdings nicht zutrifft. Sie nutzen also eine kognitive Ressource, die zwar korrekt ist, allerdings nicht in allen Situationen. Um Schüler*innen für den Zusammenhang von Richtung der Wechselwirkung/Tendenz und Energieübertragung zu sensibilisieren, muss die Idee mit ausreichend anschaulichen Beispielen erläutert werden.
Gelingt dies, stellt das Prinzip eine solide Grundlage für die Begründung von Prozessrichtungen dar, die auch ohne die direkte Verwendung von Kräften auskommt. Als Konsequenz ist es möglich, auch atomare und nukleare Bindungszustände auf Basis der Feld-Ideen zu beschreiben. Darüber hinaus scheint diese aktive Rolle des Gesamtfeldes den Rückgriff auf die Konzepte Energie und Felder bei der Betrachtung von Phänomenen attraktiver zu gestalten. Dies zeigte sich auch dadurch, dass weniger auf traditionelle Konzepte (Kräfte, Arbeit, Energieformen) zurückgegriffen wurde und Schüler*innen stattdessen vermehrt versuchten, aus der Perspektive von Feldern zu argumentieren. Eine zu starke Anthropomorphisierung des Feldes zeigte sich trotz des aktiven Charakter nicht. Es fiel lediglich auf, dass neutralere Formulierungen mit der *Tendenz* des Feldes bevorzugt werden, auch wenn manche Schüler*innen gezielt vom *Willen des Feldes* sprechen.

Elektromagnetische Strahlung und thermische Energie

Ein Aspekt, bei dem in den Akzeptanzbefragungen und in der Klassenerhebung Probleme auftraten, ist die Zuordnung von elektromagnetischer Strahlung zu Feldenergie. Während die Zuordnung von thermischer Energie zu Bewegungsenergie meist problemlos funktioniert, hatten mehrere Schüler*innen Schwierigkeiten, bei der Strahlung den Feld-Charakter zu erkennen. Das Erklärungsangebot, dass Strahlung als abgegebene Energie des Feldes eines sich verändernden Atoms aufgefasst werden kann, wurde besonders von Lehrpersonen als sinnstiftend empfunden. Auch für Lernende schien diese Verknüpfung sinnvoll zu sein. Allerdings muss darauf geachtet werden, dass Strahlung explizit gegen die Bewegung von Teilchen abgegrenzt wird. Manche Schüler*innen gingen davon aus, elektromagnetische Strahlung trage Bewegungsenergie, da sie sich fortbewege. Ebenso verleitete die Verbindung mit dem Photon dazu, der Strahlung einen Teilchen-Charakter zuzuschreiben und hier synthetische Modelle zu erzeugen, welche Konzeptideen und alternative Vorstellungen inadäquat verknüpfen. Erst wenn den Lernenden durch sorgfältige und nachvollziehbare Argumentation erläutert wurde, dass Strahlung keine Masse besitzt, konnte sie nachhaltig mit der Feldenergie verbunden werden.

Die Verknüpfung von thermischer Energie mit nicht-sichtbarer Bewegungsenergie von Teilchen erfolgte meist problemlos. Es fiel jedoch auf, dass es hilft, den Schüler*innen eine Visualisierung anzubieten, um den kognitiven Prozess zu unterstützen. Dazu stellte sich die Verwendung des BB-Bags für die modellhafte Veranschaulichung der Teilchenbewegung als nützlich heraus.

Quarkfeld, Higgsfeld und moderne Physik

Die Konzeptideen zu Quark- und Higgsfeld wurden generell als spannend empfunden. Insbesondere die Tatsache, dass sich die Konzeptideen auf eine subatomare Ebene übertragen lassen, wurde von Lernenden und Lehrer*innen als elegant hervorgehoben. Probleme traten auf, wenn Schüler*innen den Zusammenhang von Feldenergie und Masse herstellen sollten. Während die Schüler*innen der Interviews die Energie-Masse-Äquivalenz noch nutzten, um Feldenergie und Masse miteinander zu verknüpfen, war dies in der Klassenerhebung nur selten der Fall. Hier ist allerdings zu vermuten, dass auch die Art der Umsetzung des Konzeptes durch die Lehrpersonen eine wesentliche Rolle spielte. Jedenfalls scheint die Konzeptidee zum Quarkfeld auch unabhängig vom formalen Zusammenhang $E = mc^2$ die Verknüpfung von Energie und Masse zu unterstützen.
Im Falle des Higgsfeldes muss darauf geachtet werden, dass dessen Rolle deutlich wird. Dass hier kein Gesamtfeld, sondern lediglich dessen Existenz für die Energie und damit Masse der Elementarteilchen relevant ist, muss Schüler*innen explizit vermittelt werden. Wenn dies gelang, erkannten viele den Mehrwert, auch Prozesse der modernen Physik beschreiben zu können.

Mathematisierung des EFA

Am Ende der empirischen Untersuchungen wurde der EFA mit typischen Formeln aus dem traditionellen Energieunterricht verknüpft. Dabei stellte sich heraus, dass die graphische Zweiteilung der Energie in Bewegungs- und Feldenergie durch eine Balkendarstellung auch das konzeptionelle Verständnis zu fördern scheint. Durch die Betrachtung der Balkendarstellung wurden Schüler*innen dabei unterstützt, die Richtung der Energieübertragung zu bestimmen und die Veränderung von Bewegungen und Feldern angemessen zu beschreiben. Darauf aufbauend konnte eine allgemeine Formelgestalt für Feldenergie motiviert werden. Diese wurde von den Lernenden als Hilfestellung für die Interpretation von Formeln wahrgenommen und half dabei, den Komponenten von Formeln über das *epistemic game* „Mapping Mathematics to Meaning“ eine Bedeutung zuzuschreiben und sie inhaltlich mit den Konzeptideen zu verbinden (siehe Kap. 3.4 und 16).

17.3 Limitationen

Als fachdidaktisches Entwicklungsprojekt besitzt der EFA einige Grenzen seiner Anwendbarkeit und Aussagekraft. Im Folgenden werden wesentliche Aspekte herausgestellt, die es bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten gilt.

Limitationen des Designs

Der EFA basiert auf Vorüberlegungen und Vorstudien der fachdidaktischen Gemeinschaft. Dabei sind verschiedene a priori Annahmen und Überlegungen in die Entwicklung von Konzept und Lehr-Lern-Einheit eingeflossen (siehe Kap. 6). Ebenso wie diese Entscheidungen fußen auch die Designprinzipien auf normativen Festlegungen, wodurch das Konzept eine bestimmte Ausrichtung besitzt. Diese Ausrichtung richtete sich nach dem angestrebten Mehrwert des Ansatzes. Da jede Entscheidung für eine bestimmte Idee gleichzeitig die Entscheidung gegen mögliche Alternativen darstellt, konnte nur die Wirksamkeit eines bestimmten Designs erforscht werden. Da hier für eine erste Abschätzung eine qualitative Herangehensweise gewählt und damit auf eine quantitative Untersuchung der Lernwirksamkeit verzichtet wurde, beziehen sich die gewonnenen Erkenntnisse auf die Umsetzbarkeit des Konzeptes unter den Vorannahmen. Um andere Inhalte oder Schwerpunkte als die angegebenen Konzeptideen und Kontexte zu untersuchen, müssten Anpassungen vorgenommen werden.

Aussagekraft der empirischen Ergebnisse

Die Erhebungen erfolgten mit dem Ziel, Schwierigkeiten und Benefits beim Lernen gemäß dem EFA zu identifizieren. Die dazu gewählte Methode der Akzeptanzbefragungen sowie die Erprobung im Klassensetting bringen gewisse Limitationen für die Aussagekraft der Ergebnisse mit sich. Da es sich bei den Akzeptanzbefragungen um Einzelinterviews handelte, sind die daraus abgeleiteten Aussagen fallspezifisch und als Erkenntnisse zu individuellen Lernprozessen und Problematiken zu sehen. Auch wenn der subjektive Einfluss des Forschers bei den Kodierungen durch die Bestimmung der Interrater-Reliabilität kontrolliert werden konnte, resultieren die Befunde aus Interpretationen von Lernprozessen. Zwar ermöglicht die Methode detaillierte Einblicke, eine Schlussfolgerung rein objektiver Ergebnisse ist aufgrund der Komplexität der kognitiven und kommunikativen Abläufe aber nicht möglich. Darüber hinaus stellt auch das Online-Format der Befragungen aufgrund der COVID-19 Maßnahmen eine Einschränkung dar. Inwiefern hier das Format den Lernprozess und damit die Ergebnisse beeinflusste, kann nicht be-

stimmt werden. Das Prä-/Posttest-Design der Erhebung im Klassensetting diente der Überprüfung von Übernahme und Anwendung der im Unterricht vermittelten Konzeptideen. Ein Vergleich mit dem alternativen Energieunterricht ist hier ohne größere Einschränkungen nicht möglich. Auch hier wurde die Umsetzbarkeit des EFA untersucht und dabei Einblicke in Schwierigkeiten und Benefits des Konzeptes gewonnen. Wie die Ergebnisse zeigen, hängt dieser Einblick allerdings auch stark vom Grad der Konzepttreue bei der Umsetzung ab (siehe Kap. 14). Die Konzepttreue konnte allerdings, auch durch die COVID-19 Maßnahmen, nur grob durch Verlaufsprotokolle und Nachbesprechungen überprüft werden. Es gab Indizien, dass die Lehrpersonen das Konzept unterschiedlich unterrichteten und dies Auswirkungen auf den Erfolg hatte. Inwiefern dabei spezielle Aspekte das Lernen beeinflusst haben, konnte aber nicht betrachtet werden. Diesbezüglich gestaltete sich auch die Einschätzung der Umsetzbarkeit der Konzeptideen zur modernen Physik schwierig. Zwar konnte festgestellt werden, dass die Ideen positiv aufgenommen und bewertet sowie im Ansatz angewendet wurden, wie genau sie angepasst werden müssen, konnte aber nicht festgelegt werden. Hier beeinflussten Zeitknappheit und Konzentrationsfähigkeit die Aussagekraft der Ergebnisse; sowohl in den Interviews als auch im Klassensetting.

Verallgemeinerbarkeit der empirischen Ergebnisse

Bei den Akzeptanzbefragungen (siehe Kap. 7 bis 12) nahmen pro Zyklus sechs bis neun Schüler*innen teil. Diese kleine Stichprobengröße wurde zum einen durch die Bereitschaft der Schüler*innen zur Teilnahme bestimmt, zum anderen wurde diese Größe als angemessen und für eine detaillierte qualitative Analyse als hinreichend eingeschätzt. Die Resultate waren dadurch wertvoll und aussagekräftig für die Evaluation der Design-Zyklen. Gleichzeitig bedeutet dies aber auch, dass die Ergebnisse auf individuellen Lernprozessen beruhen und damit nicht uneingeschränkt verallgemeinerbar sind. Zwar kann durch den Befund von Mustern und Regelmäßigkeiten bei Schwierigkeiten und Benefits angenommen werden, dass die Erkenntnisse auch für Lernenden im Allgemeinen zutreffen, eine Verallgemeinerung auf beliebige Schüler*innen ist allerdings nicht möglich.
Insgesamt ist auch anzunehmen, dass die Teilnehmer*innen eher zu den interessierteren Schüler*innen zählen, da sie sich freiwillig für ein relativ langes Online-Interview meldeten. Dies ist nicht repräsentativ für die Grundgesamtheit der Schüler*innen und bringt Limitationen für die Generalisierbarkeit mit sich. Dennoch stellt dies in sofern kein substantielles Problem dar, als es bei der Untersuchung um die generelle Umsetzbarkeit des Ansatzes ging. Der EFA kann also insgesamt mindestens als umsetzbar für eine bestimmte Population angenommen werden.

Auch die Zielgruppe des EFA wurde in diesem Projekt einschränkend festgelegt. Die Ergebnisse beziehen sich auf Schüler*innen der Sekundarstufe II an österreichischen allgemeinbildenden höheren Schulen (AHS/Gymnasium). Eine Erweiterung bzw. Modifikation für die Sekundarstufe I ist durchaus denkbar. Die Ergebnisse sprechen diesbezüglich für eine Realisierbarkeit bereits in tieferen Jahrgangsstufen, empirische Befunde für Schüler*innen dieser Altersstufen bietet dieses Projekt aber nicht.

17.4 Ausblick

Durch die Limitationen des Projektes ergeben sich offene Fragen, welche im Folgenden auch im Hinblick auf Empfehlungen für Folgestudien angeführt werden. Die normativen Festlegungen lassen die Fragestellung offen, ob es sinnvoller ist, das Konzept des EFA retrospektiv am Ende der Schulzeit einzuführen, ob eine frühzeitige Einführung in der Sekundarstufe I erstrebenswert ist, oder ob es vorteilhaft wäre, das Konzept begleitend mit dem traditionellen Unterricht einzuführen. Im Rahmen der Analyse wurde deutlich, dass sich Lehrpersonen teilweise dafür aussprechen, altersgemäß Teile des Konzeptes bereits früher zu unterrichten. Diesbezüglich ergibt sich dann die Frage, welche Aspekte sich für den Unterricht mit jüngeren Schüler*innen eigenen bzw. welche Konzeptideen und Kontexte wie angepasst werden können.

Vorstellungen zu Feldern

Welche konkreten Vorstellungen zu Feldern die Schüler*innen beim Lernen mit dem EFA besitzen, wurde im Projekt nicht untersucht. Diese Entscheidung erfolgte bewusst. Da das Feld bzw. Gesamtfeld zwar eine aktive und zentrale Rolle im Konzept einnimmt, aber möglichst abstrakt gefasst wird, bleibt offen, wie Schüler*innen die Feld-Ideen des EFA kognitiv mit ihrem Vorwissen verknüpfen. Gegebenenfalls entstehen hier *synthetische Modelle* aus verschiedenen Vorstellungen. Deshalb wäre es interessant, diese Vorstellungen zu erheben. Dahingehend könnte ein Vergleich mit bereits bekannten Lernendenvorstellungen zu Feldern gewinnbringend sein. Im Speziellen sollte in Folgestudien untersucht werden, wie genau die Ideen und Darstellungen des Gesamtfeldes das Verständnis von Feldern fördert. Hier wäre es spannend, den Einfluss bestimmter Faktoren wie der unendlichen Ausdehnung oder der Unantastbarkeit zu untersuchen. In diesem Zusammenhang sollten auch die identifizierten EFA-spezifischen Lernendenvorstellungen (z. B. die Nähe-Bedingung für Überlagerung) genauer erforscht werden. Hier lohnt

es, herauszufinden, wie ggf. eine noch angemessenere Darstellungsform für das Gesamtfeld aussehen kann. Möglicherweise bieten sich dafür digitale Optionen an, welche die unendliche Ausdehnung deutlicher veranschaulichen.
Darüber hinaus wäre es sinnvoll, festzustellen, wie die Konzeptidee zur *Tendenz des Gesamtfeldes* ein angemessenes Kraftkonzept bzw. ein Verständnis für den Zusammenhang von Kraft, Arbeit und Energie unterstützt. Hier bot die Evaluation Indizien für eine produktive Unterstützung, die es weiter zu untersuchen gilt.
Da die Konzeptideen und Kontexte zu Quark- und Higgsfeld im Vergleich zu den klassischen Feldern noch einen hohen Abstraktionsgrad besitzen, bieten sich auch hier Ansatzpunkte an. Folgestudien sollten hier den Einfluss von Erschöpfung und Aufmerksamkeitsabfall kontrollieren, der sich in diesem Projekt ergab. Dazu könnten die Aspekte der modernen Physik gezielt untersucht werden. Wenn es außerdem gelänge, die Inhalte noch anschaulicher zu gestalten und die neuen Begriffe weiter in der Lebenswelt der Schüler*innen zu vernetzen, könnte der Mehrwert des Ansatzes weiter herausgestellt werden.

Mathematisierung des EFA

Die Ergänzung des EFA um die Verbindung zu typischen Formeln des traditionellen Energieunterrichts stellte sich als zielführend heraus. Da es sich aber um eine erste Abschätzung der Sinnhaftigkeit der Idee zu Balkendarstellung und Formelgestalt handelte, bleiben einige Fragen offen. In Folgestudien sollte untersucht werden, wie genau Schüler*innen die formalen Strukturen interpretieren und mit den konzeptuellen Vorstellungen verbinden. Hier sollte herausgefunden werden, inwiefern sich die EFA-Konzeptideen eigenen, um auch Formeln konsistent zu vernetzen und inhaltlich greifbar zu machen.

Epistemisches Verständnis

Der logische Aufbau des EFA-Konzeptes von der makro- zur mikroskopischen Ebene stieß auf hohe Akzeptanz. Es wäre interessant, zu untersuchen, ob diese Vorgehensweise durch die Übertragung der Prinzipien auf atomare und subatomare Strukturen auch eine produktive Vorstellung von der Teilchen-Natur der Materie unterstützt. Darüber hinaus scheint das Konzept auch das allgemein epistemische Verständnis von Energie zu fördern (siehe Kap. 14). Wie genau sich die Anschauung von Lernenden durch den EFA verändert, auch generell zum Konzept der Energie, sollte vor dem Hintergrund des Bildungsanspruchs des Themas *Energie* ein Gegenstand zukünftiger Forschung sein.

Umsetzung im Klassensetting

Als Folgestudie bietet sich auch die Untersuchung der Akzeptanz von Lehrpersonen an. Dabei wäre es interessant, herauszufinden, wie die Aspekte des Konzeptes von einer größeren Stichprobe von Lehrer*innen angenommen wird. Es ergäben sich Einblicke darin, wie das EFA-Konzept angepasst werden müsste, um auch von der Mehrheit der Lehrenden als Bereicherung wahrgenommen zu werden. Außerdem ergäben sich Hinweise darauf, welche Komponenten aus der Sicht von Lehrer*innen als schwierig oder förderlich wahrgenommen werden und wie sich dies auf die Bereitschaft zur Umsetzung im eigenen Unterricht auswirkt.
Da sich die Kontrolle der Konzepttreue bei der Umsetzung im Klassenerhebung schwierig gestaltete, bleibt auch die Frage nach den Effekten im realen Unterrichtsgeschehen offen. Um die Wirksamkeit des Ansatzes unter Realbedingungen zu testen, sollte eine Studie mit stark kontrollierter Konzepttreue durchgeführt werden. So kann bestimmt werden, wie sich das Lernen einzelner Aspekte im Klassensetting gestaltet. Erst wenn bekannt ist, wie Abweichungen vom Konzept und die unterschiedliche Unterrichtsgestaltung verschiedener Lehrpersonen das Vermitteln und Erlernen des Konzeptes beeinflussen, kann der Einfluss der Konzepttreue auf die Wirksamkeit des EFA bestimmt werden. Welche Auswirkungen Modifikationen einzelner Aspekte des Konzeptes haben, bleibt also noch zu erforschen. Liegen hierzu in Zukunft Erkenntnisse vor, könnte der EFA in Studien mit größeren Stichproben hinsichtlich seiner Lernwirksamkeit untersucht und mit dem traditionellen Unterricht verglichen werden.

17.5 Schluss

Die Untersuchungen zeigen, dass der Energie-Feld-Ansatz als verständlich und hilfreich wahrgenommen wird und das Beschreiben von Phänomenen aus der Energieperspektive unterstützt. Schüler*innen lernen, Prozesse mit Feldern zu analysieren und geben Feldern und Energie dadurch eine zentralere Rolle. Sofern die Konzeptideen sorgfältig und mit genügend Beispielen erläutert werden, verändert sich das inhaltliche und epistemische Bild von Energie hin zu fachlich adäquateren Vorstellungen. Dabei wird deutlich, dass die Attraktivität und Plausibilität eines Konzeptes wichtig ist, damit Schüler*innen eine Idee übernehmen und nachhaltig an ihr festhalten. Darüber hinaus scheint der Erfolg des Konzeptes in der Sekundarstufe II unabhängig von Note, Interesse und Klassenstufe zu sein (siehe Kap. 14).

Der EFA macht es möglich, verschiedenste Prozesse aus der Energieperspektive zu betrachten. Mit dem Gesamtfeld als zentraler Akteur bei der Energieübertragung zwischen Bewegungen und Feldern bietet das Konzept Werkzeuge für Beschreibungen an, die sowohl einfachen Prinzipien (Konzeptideen) folgen als auch kontextunabhängig anwendbar sind. Damit bietet der EFA eine innovative Herangehensweise an den Energieunterricht ab und stellt ein auf einzigartige Weise übergreifendes Konzept dar, das ohne Kraft und Arbeit auskommt und Schüler*innen dabei unterstützt, das Thema Energie sowie dessen Relevanz besser zu verstehen.

Literaturverzeichnis

Apolin, M. (2017). *Big Bang 5 RG, Schülerbuch. 1.* Wien: Österreichischer Bundesverlag Schulbuch GmbH & Co. KG.

Aschauer, W. (2017). *Elektrische und magnetische Felder: Eine empirische Studie zu Lernprozessen in der Sekundarstufe II* (Bd. 241). Logos Verlag Berlin GmbH.

Backhaus, U. (1982). *Die Entropie als Größe zur Beschreibung der Unumkehrbarkeit von Vorgängen* [Diss., Uitgever niet vastgesteld].

Bader, M. (2001). *Vergleichende Untersuchung eines neuen LehrgangesËinführung in die mechanische Energie und Wärmelehre"* [Diss., lmu].

Bartelmann, M., & Schneider, P. (2001). Weak gravitational lensing. *Physics Reports*, *340*(4-5), 291–472.

Becker, M., & Hopf, M. (2021). Der Energie-Feld-Ansatz: Design-Forschung zur Entwicklung und Evaluation eines Unterrichtskonzeptes für den Energieunterricht der Oberstufe. *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.

Bennett, J., Lubben, F., & Hogarth, S. (2007). Bringing science to life: A synthesis of the research evidence on the effects of context-based and STS approaches to science teaching. *Science education*, *91*(3), 347–370.

Berger, R., & Wiesner, H. (1997). Zum Verständnis grundlegender Begriffe und Phänomene der Thermodynamik bei Studierenden. *Deutsche Physikalische Gesellschaft, Fachverband Didaktik der Physik: Didaktik der Physik*, 736–741.

Blumör, R. (1993). *Schülerverständnisse und Lernprozesse in der elementaren Optik: Ein Beitrag zur Didaktik des naturwissenschaftlichen Sachunterrichts in der Grundschule*. Westarp Wiss.

BMBWF/10008568. (2019). Lehrplan AHS Sekundarstufe II in Österreich [https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568, Abruf 27.04.2023].

Bortz, J., & Schuster, C. (2011). *Statistik für Human-und Sozialwissenschaftler: Limitierte Sonderausgabe*. Springer-Verlag.

Bransford, J. D., & Schwartz, D. L. (1999). Chapter 3: Rethinking transfer: A simple proposal with multiple implications. *Review of research in education*, *24*(1), 61–100.

Bransford, J. D., Brown, A. L., Cocking, R. R., et al. (2000). *How people learn* (Bd. 11). Washington, DC: National academy press.

Bünder, W., Duit, R., Häussler, P., Gräber, W., & Mayer, J. (1999). Naturwissenschaftsdidaktische Forschung: Perspektiven für die Unterrichtspraxis. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften. Biologie, Chemie, Physik*.

Burde, J.-P., & Wilhelm, T. (2021). Unterrichtskonzeptionen zu elektrischen Stromkreisen. In *Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht* (S. 231–277). Springer.

Chabalengula, V. M., Sanders, M., & Mumba, F. (2012). Diagnosing students' understanding of energy and its related concepts in biological context. *International Journal of Science and Mathematics Education*, *10*(2), 241–266.

Collins, A., Joseph, D., & Bielaczyc, K. (2004). Design research: Theoretical and methodological issues. In *Design-based research: clarifying the terms* (S. 15–42). Psychology Press.

Comenius, J. A. (1657). *Die Große Unterrichtslehre* (Bd. 3). Amsterdam.

Coopersmith, J. (2015). *Energy, the subtle concept: The discovery of Feynman's blocks from Leibniz to Einstein*. Oxford University Press, USA.

Crissman, S., Lacy, S., Nordine, J., & Tobin, R. (2015). Looking through the energy lens. *Science and Children*, *52*(6), 26.

De Berg, K. C. (1995). Revisiting the pressure-volume law in history-what can it teach us about the emergence of mathematical relationships in science? *Science & Education*, *4*(1), 47–64.

De Cock, M. (2022). The educational implications of the relationship between Physics and Mathematics. In *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education 3* (S. 111–128). International Commission on Physics Education.

Demtröder, W. (2006). *Experimentalphysik* (Bd. 4). Springer.

Design-Based Research Collective. (2003). Design-based research: An emerging paradigm for educational inquiry. *Educational researcher*, *32*(1), 5–8.

DiSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and instruction*, *10*(2-3), 105–225.

DiSessa, A. A. (2017). Conceptual Change in a Microcosm. *Human Development*, *60*(1), 1–37.

DiSessa, A. A. (2018). A friendly introduction to "knowledge in pieces": Modeling types of knowledge and their roles in learning. *Invited lectures from the 13th international congress on mathematical education*, 65–84.

Doménech, J. L., Gil-Pérez, D., Gras-Martí, A., Guisasola, J., Martínez-Torregrosa, J., Salinas, J., Trumper, R., Valdés, P., & Vilches, A. (2007). Teaching of energy issues: A debate proposal for a global reorientation. *Science & Education*, *16*(1), 43–64.

Driver, R., & Easley, J. (1978). Pupils and paradigms: A review of literature related to concept development in adolescent science students.

Driver, R., Squires, A., Rushworth, P., & Wood-Robinson, V. (2014). *Making sense of secondary science: Research into children's ideas*. Routledge.

Driver, R., & Warrington, L. (1985). Students' Use of the Principle of Energy Conservation in Problem Situations. *Physics Education*, *20*(4), 171–76.

Duden. (2019). Deutsches Universalwörterbuch, 9. *Auflage, Berlin*.

Duit, R. (2014). Teaching and learning the physics energy concept. In *Teaching and learning of energy in K–12 education* (S. 67–85). Springer.

Duit, R. (1981). Understanding Energy as a Conserved Quantity–Remarks on the Article by RU Sexl. *European journal of science education*, *3*(3), 291–301.

Duit, R. (1987). Unterricht über Energie: Ziele, Lernschwierigkeiten, Wege. *Praxis der Naturwissenschaften Physik*, *36*, 41–43.

Duit, R. (1991). Zur Elementarisierung des Energiebegriffs. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, *2*(6), 12–19.

Duit, R. (2007). Energie. *Ein zentraler Begriff der Naturwissenschaften und des Naturwissenschaftlichen Unterrichts: Unterricht Physik*, *18*(101), 4–7.

Duit, R. (2010). Piko-Briefe. *Der fachdidaktische Forschungsstand kurzgefasst. Physik im Kontext. Konzepte, Ideen, Materialien für effizienten Physikunterricht*, *98*.

Duit, R., Gropengießer, H., Kattmann, U., Komorek, M., & Parchmann, I. (2012). The model of educational reconstruction: A framework for improving teaching and learning science. In *Science education research and practice in Europe* (S. 13–37). Brill.

Erb, R. (2021). *Elektrizität und Magnetismus*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.

Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (1967). *The Feynamn Lectures on Physics, Vol. I.* Addison-Wesley Publishing, Reading, Massachusetts.

Fiedler, K., Kubsch, M., Neumann, K., & Nordine, J. (2022). Der potentiellen Energie ein Zuhause geben–Felder als didaktisches Hilfsmittel im Anfangsunterricht zum Energiekonzept. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, *28*(1), 1–19.

Fischer, F., Waibel, M., & Wecker, C. (2005). Nutzenorientierte Grundlagenforschung im Bildungsbereich. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, *8*(3), 427–442.

Fischer, H. E., & Draxler, D. (2007). Konstruktion und Bewertung von Physikaufgaben. In *Physikdidaktik* (S. 639–655). Springer.

Fortus, D., et al. (2019). Systems, transfer, and fields: Evaluating a new approach to energy instruction. *Journal for Research in Science Teaching*, 1–21. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/tea.21556

Furió, C., & Guisasola, J. (1998). Difficulties in learning the concept of electric field. *Science Education*, *82*(4), 511–526.

Green, M. B., Schwarz, J. H., & Witten, E. (2012). *Superstring theory: volume 2, loop amplitudes, anomalies and phenomenology*. Cambridge university press.

Greene, B. (2015). *Das elegante Universum: Superstrings, verborgene Dimensionen und die Suche nach der Weltformel*. Siedler Verlag.

Gribbin, J. (2009). *The search for superstrings, symmetry, and the theory of everything*. Back Bay Books.

Haagen-Schützenhöfer, C. (2016). *Lehr- und Lernprozesse im Anfangsoptikunterricht der Sekundarstufe I*. Kumulative Habilitationsschrift, Universität, Wien. https://static.uni-graz.at/fileadmin/nawi-institute/Physik/Physikdidaktik/Mitarbeiter/Habil_Haagen.pdf

Haagen-Schützenhöfer, C., & Hopf, M. (2020). Design-based research as a model for systematic curriculum development: The example of a curriculum for introductory optics. *Physical Review Physics Education Research*, *16*(2), 020152.

Hammer, D. (1996). More than misconceptions: Multiple perspectives on student knowledge and reasoning, and an appropriate role for education research. *American journal of physics*, *64*(10), 1316–1325.

Hammer, D. (2000). Student resources for learning introductory physics. *American Journal of Physics*, *68*(S1), S52–S59.

Harrer, B. W. (2017). On the origin of energy: Metaphors and manifestations as resources for conceptualizing and measuring the invisible, imponderable. *American Journal of Physics*, *85*(6), 454–460.

Hecht, E. (2003). An historico-critical account of potential energy: is PE really real? *The Physics Teacher*, *41*(8), 486–493.

Heimann, P., Otto, G., & Schulz, W. (1969). Unterricht, Analyse und Planung.

Helbig, G., Burkhardt, A., Ungeheuer, G., Wiegand, H. E., Steger, H., & Brinker, K. (2001). Handbücher zur Sprach-und Kommunikationswissenschaft.

Hempfling, R. (1994). Yukawa coupling unification with supersymmetric threshold corrections. *Physical Review D*, *49*(11), 6168.

Herrmann, F., Haas, K., Laukenmann, M., Mingirulli, L., Morawietz, P., & Schmälze, P. (2014). Der Karlsruher Physikkurs. http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/kpk_material.html

Herrmann-Abell, C. F., & DeBoer, G. E. (2017). Investigating a learning progression for energy ideas from upper elementary through high school. *Journal of Research in Science Teaching*, *55*(1), 68–93.

Hewitt, P. G. (1983). Millikan Lecture 1982: The missing essential — a conceptual understanding of physics. *American Journal of Physics*, *51*(4), 305–311.

Hewitt, P. G. (2009). *Conceptual Physics: The High School Physics Program*. Upper Saddle River, NY: Prentice Hall.

Higgs, P. W. (1964). Broken symmetries, massless particles and gauge fields. *Phys. Lett.*, *12*, 132–133.

Hoche, D., Meyer, L., Schmidt, G.-D., Küblbeck, J., Reichwald, R., Schwarz, O., & Spitz, C. (2020). *Duden, Basiswissen Schule-Physik: Abitur*. Dudenverlag.

Hopf, M. (2009). Physikdidaktik als nutzerorientierte Grundlagenforschung. *PLUS LUCIS*, 1–2.

Hopf, M., & Wiesner, H. (2008). Design-based research. In D. Höttecke (Hrsg.), *Kompetenzen, Kompetenzmodelle, Kompetenzentwicklung. Jahrestagung der GDCP in Essen 2007* (S. 68–70).

Hull, M. M., Becker, M., Budimaier, F., Abe, H., & Funahashi, H. (2023). Uses for the HEC BB Bag in Physics Instruction. *The Physics Teacher*, *61*(1), 26–30.

Jackson, J. D. (1999). Classical electrodynamics.

Jewett Jr., J. W. (2008a). Energy and the confused student I: Work. *The Physics Teacher*, *46*(1), 38–43.

Jewett Jr., J. W. (2008b). Energy and the confused student II: Systems. *The Physics Teacher*, *46*(2), 81–86.

Jewett Jr., J. W. (2008c). Energy and the confused student IV: a global approach to energy. *The Physics Teacher*, *46*(4), 210–217.

Jewett Jr., J. W. (2008d). Energy and the Confused Student V: The Energy / momentum approach to problems involving rotating and deformable systems. *The Physics Teacher*, *46*(5), 269–274.

Joshi, A., Kale, S., Chandel, S., & Pal, D. K. (2015). Likert scale: Explored and explained. *British journal of applied science & technology*, *7*(4), 396.

Jung, W. (1992). Probing acceptance, a technique for investigating learning difficulties (R. Duit, F. M. Goldberg & H. Niedderer, Hrsg.). *Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies. Kiel: IPN*, 278–295.

Jung, W., Weber, E., & Wiesner, H. (1977). Der Energiebegriff als Erhaltungsgröße. *Physica didactica*, *5*, 1–19.

Jung, W., Wiesner, H., & Blumör, R. (1988). Schülervorstellungen über elementare op¬ tische Sachverhalte. *Abschlußbericht, DFG Projekt Ju*, *150*, 3–2.

Kaiser, G., Forgasz, H., Graven, M., Kuzniak, A., Simmt, E., & Xu, B. (2018). *Invited lectures from the 13th International Congress on mathematical education*. Springer Nature.

Kaper, W. H., & Goedhart, M. J. (2002). 'Forms of energy', an intermediary language on the road to thermodynamics? Part II. *International Journal of Science Education*, *24*(2), 119–137.

Karam, R., de Mello Forato, T. C., & Pietrocola, M. (2011). Explanation versus Description: Philosophical Debate and Implications for Physics Teaching. In D. Raine, C. Hurkett & L. Rogers (Hrsg.), *Physics Community and Cooperation Vol 2: GIREP-EPEC & PHEC 2009 International Conference* (S. 171–179). Lulu / The Centre for Interdisciplinary Science, University of Leicester.

Karam, R., & Krey, O. (2015). Quod erat demonstrandum: Understanding and explaining equations in physics teacher education. *Science & Education*, *24*(5), 661–698.

Kattmann, U. (2007). Didaktische Rekonstruktion — eine praktische Theorie. In *Theorien in der biologiedidaktischen Forschung* (S. 93–104). Springer.

Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H., Komorek, M., et al. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, *3*(3), 3–18.

Kesidou, S., & Duit, R. (1993). Students conceptions of the second law of thermodynamics – an interpretative study. *Journal of Research in Science Teaching*, *30*(1), 85–106.

Klafki, W. (1969). Didaktische Analyse als Kern der Unterrichtsvorbereitung. In. In H. Roth & A. Blumental (Hrsg.), *Didaktische Analyse*.

Komorek, M., & Duit, R. (2004). The teaching experiment as a powerful method to develop and evaluate teaching and learning sequences in the domain of non-linear systems. *International Journal of Science Education*, *26*(5), 619–633.

Krapp, A., Schiefele, U., & Schreyer, I. (1993). Metaanalyse des Zusammenhangs von Interesse und schulischer Leistung. *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und pädagogische Psychologie*, *10*(2), 120–148.

Krause, E. (2014). Analogien im Physikunterricht-Warum Analogien in der Physik mehr sind als nur allgemeine heuristische Prinzipien. *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.

Krey, O., & Mikelskis, H. F. (2012). Zur Rolle der Mathematik in der Physik. *Wissenschaftstheoretische Aspekte und Vorstellungen Physiklernender (Dissertation). Münster: Logos-Verlag*.

Krüger, D. (2007). Die conceptual change-Theorie. In *Theorien in der biologiedidaktischen Forschung* (S. 81–92). Springer.

Krüger, D., Parchmann, I., & Schecker, H. (2014). *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Springer.

Kubsch, M., Nordine, J., Neumann, K., Fortus, D., & Krajcik, J. (2019). Probing the relation between students' integrated knowledge and knowledge-in-use about energy using network analysis. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, *15*(8), em1728.

Kuckartz, U. (2014). *Qualitative text analysis: A guide to methods, practice and using software*. Sage.

Kurnaz, M. A., & Arslan, A. S. (2011). A thematic review of some studies investigating students' alternative conceptions about energy. *International Journal of Physics & Chemistry Education*, *3*(1), 51–74.

Kuypers, F. (2016). *Klassische Mechanik*. John Wiley & Sons.

Lancor, R. A. (2013). The many metaphors of energy: Using analogies as a formative assessment tool. *Journal of College Science Teaching*, *42*(3), 38–45.

Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *biometrics*, 159–174.

Laughlin, R. B., & Pines, D. (2000). The theory of everything. *Proceedings of the national academy of sciences*, *97*(1), 28–31.

Lee, H.-S., & Liu, O. L. (2010). Assessing learning progression of energy concepts across middle school grades: The knowledge integration perspective. *Science education*, *94*(4), 665–688.

Lehrplan Berlin. (2021). Lehrplan Gymnasium Sek II in Berlin, Deutschland [https://www.berlin.de/sen/bildung/unterricht/faecher-rahmenlehrplaene/rahmenlehrplaene/, Abruf 27.04.2023].

Lindsey, B. A., Heron, P. R., & Shaffer, P. S. (2012). Student understanding of energy: Difficulties related to systems. *American Journal of Physics*, *80*(2), 154–163.

Liu, X., & McKeough, A. (2005). Developmental growth in students' concept of energy: Analysis of selected items from the TIMSS database. *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching*, *42*(5), 493–517.

Louis, J. (2008). Die vielen Saiten der Stringtheorie. *Physik Journal*, *7*(6), 29.

Mach, E. (1912). *Die Mechanik in ihrer Entwicklung: historisch-kritisch dargestellt*. Brockhaus.

Mathelitsch, L., Jaros, A., Nussbaumer, A., Nussbaumer, P., & Hofstätter, R. (2004). *Basiswissen Physik-compact 5. Klasse RG*. Verlag ÖBV Hölder-Pichler-Tempsky.

Mayring, P., & Fenzl, T. (2014). Qualitative inhaltsanalyse. In *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung* (S. 543–556). Springer.

Meschede, D. (2006a). *Gerthsen physik*. Springer.

Meschede, D. (2006b). *Gerthsen physik*. Springer.

Muckenfuß, H. (1995). *Lernen im sinnstiftenden Kontext: Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts*. Cornelsen Berlin.

Müller, R. (2015). *Klassische Mechanik*. de Gruyter.

Müller, R. (2021). *Mechanik. Physik für Lehramsstudierende. Band 1*. de Gruyter.

National Research Council. (2012). *Education for life and work: Developing transferable knowledge and skills in the 21st century*. National Academies Press.

Neumann, K., Viering, T., Boone, W. J., & Fischer, H. E. (2013). Towards a learning progression of energy. *Journal of research in science teaching*, *50*(2), 162–188.

Neumann, K., Kubsch, M., Fortus, D., Nordine, J. C., Krajcik, J. S., & Lehavi, Y. (2016). Assessing three-dimensional learning. *annual meeting of the National Association for Research in Science Teaching, April*, 14–17.

Nolting, W. (2013). Elektrodynamik. In *Grundkurs Theoretische Physik 3* (S. 221–435). Springer.

Nordine, J. (2016). *Teaching energy across the sciences, K-12*. NSTA Press, National Science Teachers Association.

Nordine, J., Fortus, D., Lehavi, Y., Neumann, K., & Krajcik, J. (2019). Modelling energy transfers between systems to support energy knowledge in use. *Studies in Science Education*, *54*(2), 177–206. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/03057267.2018.1598048

Nordine, J., Krajcik, J., & Fortus, D. (2011). Transforming energy instruction in middle school to support integrated understanding and future learning. *Science Education*, *95*(4), 670–699.

Papadouris, N., & Constantinou, C. P. (2016). Investigating middle school students' ability to develop energy as a framework for analyzing simple physical phenomena. *Journal of Research in Science Teaching*, *53*(1), 119–145.

Planck, M. (1887). *Das Princip der Erhaltung der Energie*. BG Teubner.

Plotz, T. (2017). *Lernprozesse zu nicht-sichtbarer Strahlung: Empirische Untersuchungen in der Sekundarstufe 2* (Bd. 240). Logos Verlag Berlin GmbH.

Posner, G. J., & Strike, K. A. (1992). A revisionist theory of conceptual change. In R. A. Duschl & R. J. Hamilton (Hrsg.). New York: State University of New York.

Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Toward a theory of conceptual change. *Science education*, *66*(2), 211–227.

Pospiech, G., Michelini, M., & Eylon, B.-S. (2019). *Mathematics in physics education*. Springer.

Povh, B., & Soergel, E. (2014). *Anschauliche Physik: für Naturwissenschaftler*. Springer-Verlag.

Quinn, H. (2014). A physicist's musings on teaching about energy. In R. F. Chen et al. (Hrsg.), *Teaching and learning of energy in K-12 education* (15–36). NY: Springer.

Redish, E. F. (2004). A theoretical framework for physics education research: Modeling student thinking. *arXiv preprint physics/0411149*.

Redish, E. F. (2006). Problem solving and the use of math in physics courses. *arXiv preprint physics/0608268*.

Redish, E. F., & Kuo, E. (2015). Language of physics, language of math: Disciplinary culture and dynamic epistemology. *Science & Education*, *24*(5), 561–590.

Reinfried, S., et al. (2009). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion. Eine innovative Methode zur fachdidaktischen Erforschung und Entwicklung von Unterricht. *Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung*, *27*(3), 404–414.

Riemeier, T. (2007). Moderater Konstruktivismus. In *Theorien in der biologiedidaktischen Forschung* (S. 69–79). Springer.

Rückl, E. (1989a). Genese der Atommodelle mit dem Feldenergiekonzept. *Praxis der Naturwissenschaften. Physik*, *6*.

Rückl, E. (1989b). Zum Energietransport in elektromagnetische Feldern - am Beispiel des Transformators. *NiU-P/C*, *5*.

Rückl, E. (1990). Bindungsenergie - Feldenergie - am Beispiel der NaCl-Kristallbildung. *Praxis der Naturwissenschaften. Chemie*.

Rückl, E. (1991). *Feldenergie: ein neues didaktisches Konzept*. BI-Wiss.-Verlag.

Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M., Duit, R., & Fischler, H. (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht*. Springer.

Schlichting, H., & Backhaus, U. (1984). Energieverbrauch und Energieentwertung. *Der Physikunterricht*, *3*, 24–40.

Selting, M., & Hinnenkamp, V. (2012). Einleitung: Stil und Stilisierung in der interpretativen Soziolinguistik. In *Stil und Stilisierung* (S. 1–24). Max Niemeyer Verlag.

Sexl, R., Wessenberg. (2017). Physik, Schülerbuch., 5. Klasse AHS.

Sherin, B. L. (2001). How students understand physics equations. *Cognition and instruction*, *19*(4), 479–541.

Smith III, J. P., DiSessa, A. A., & Roschelle, J. (1994). Misconceptions reconceived: A constructivist analysis of knowledge in transition. *The journal of the learning sciences*, *3*(2), 115–163.

Solomon, J. (1983). Messy, Contradictory and Obstinately Persistent: A Study of Children's Out-of-School Ideas about Energy. *School Science Review*, *65*(231), 225–29.

Starauschek, E. (2002). Ergebnisse einer Evaluationsstudie zum Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, *8*, 7–21.

Stokes, D. E. (1997). *Pasteur's quadrant: Basic science and technological innovation*. Brookings Institution Press.

Strahl, A., Mohr, M., Schleusner, U., & Müller, R. (2010). Wie Schüler Formeln gliedern–eine explorative Befragung. *PhyDid A-Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, *1*(9), 18–24.

Swackhamer, P. G. (2005). Cognitive resources for understanding.

Tipler, P. A., & Mosca, G. (2019). *Physik: für Studierende der Naturwissenschaften und Technik*. Springer-Verlag.

Trumper, R. (1993). Children's energy concepts: a cross-age study. *International Journal of Science Education*, *15*(2), 139–148.

Tuminaro, J., & Redish, E. F. (2007). Elements of a cognitive model of physics problem solving: Epistemic games. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, *3*(2), 020101.

Uhden, O. (2016). Verständnisprobleme von Schülerinnen und Schülern beim Verbinden von Physik und Mathematik. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, *22*(1), 13–24.

Van Huis, C., & van den Berg, E. (1993). Teaching energy: a systems approach. *Physics Education*, *28*(3), 146.

Vosniadou, S. (2018). Initial and scientific understandings and the problem of conceptual change. In *Converging Perspectives on Conceptual Change* (S. 17–25). Routledge.

Vosniadou, S., & Brewer, W. F. (1992). Mental models of the earth: A study of conceptual change in childhood. *Cognitive psychology*, *24*(4), 535–585.

Warren, J. (1983). Energy and Its Carriers: A Critical Analysis. *Physics Education*, *18*(5), 209–12.

Watts, D. M. (1983). Some alternative views of energy. *Physics education*, *18*(5), 213.

Wiener, G., Schmeling, S., & Hopf, M. (2015). Akzeptanzbefragung mit 12-Jährugen zum atomaren Aufbau der Materie.

Wiener, G. J., Schmeling, S. M., & Hopf, M. (2018). The technique of probing acceptance as a tool for teachers' professional development: A PCK study. *Journal of Research in Science Teaching*, *55*(6), 849–875.

Wiesner, H. (1995). Physikunterricht - an Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten orientiert. *Unterrichtswissenschaft*, *23*(2), 127–145.

Wiesner, H. (1993). *Verbesserung des Lernerfolgs im Physikunterricht durch Untersuchungen von Lernschwierigkeiten und Lernprozessen*.

Wilhelm, T., Schecker, H., & Hopf, M. (2021a). Unterrichtskonzeptionen – Forschungsstand und Desiderata (S. Habig, H. v. Vorst et al., Hrsg.), 164–167.

Wilhelm, T., Schecker, H., & Hopf, M. (2021b). *Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht*. Springer.

Wirtz, M., & Kutschmann, M. (2007). Analyse der Beurteilerübereinstimmung für kategoriale Daten mittels Cohens Kappa und alternativer Maße. *Die Rehabilitation*, *46*(06), 370–377.

Woodward, J. F. (2011). Data and phenomena: a restatement and defense. *Synthese*, *182*, 165–179.

Yang, Y.-B., Liang, J., Bi, Y.-J., Chen, Y., Draper, T., Liu, K.-F., & Liu, Z. (2018). Proton mass decomposition from the QCD energy momentum tensor. *Physical review letters*, *121*(21), 212001.

Abkürzungsverzeichnis

DBR Design-based Research

EFA Energie-Feld-Ansatz

EFA-M Mathematisierung des EFA

LLE Lehr-Lern-Einheit

MDR Modell der Didaktischen Rekonstruktion

STA System-Transfer-Ansatz

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

2.1 Schema Designforschung 7
2.2 Schema Didaktische Rekonstruktion 12

5.1 Überblick Methodisches Vorgehen des EFA 77
5.2 Schema Akzeptanzbefragung) 81
5.3 Schema Längs- und Queranalyse 86
5.4 Schema Klassensetting) 92

7.1 Abbildung BB-Bag 138

9.1 Skizze Gesamtfeld Version 2 des EFA 175
9.2 Skizze Feder-Analogie für Gesamtfeld bzw. Atommodell (EFA Version 2) 177
9.3 Abstrahlung elektromagnetische Welle 179

10.1 Skizzen Gesamtfeld zu Version 2 des EFA 223

11.1 Wegstreichen der Einzelfelder 242

14.1 Antworten zu Item 1: Kernidee des EFA 310
14.2 Antworten zu Item 2a: Beschreibe kurz, was Energie ist! 311
14.3 Antworten zu Item 2b: Wozu spricht man in der Physik über Energie? 311
14.4 Antworten zu Item 4a und 4b: Energieübertragung Magnetwägen 313
14.5 Antworten zu Item 5a und 5b: Energieübertragung Satellitenbewegung 314
14.6 Antworten zu Item 6: Bindungszustände 315
14.7 Antworten zu Item 9: Feuerwerk 317
14.8 Antworten zu Item 10: Schleuder 318

14.9 Antworten zu Item 11: Erwärmung des Bodens im Sommer 319
14.10 Antworten zu Item 12: Kernspaltung 320
14.11 Antworten zu Item 13: PET 321
14.12 Antworten zu Item 14: CERN 322
14.13 Einschätzung des EFA (Klassensetting) 326
14.14 Verbesserungsvorschläge der Schüler*innen zum EFA (Klassensetting) 327

15.1 Balkendarstellung des EFA-M 335

Tabellenverzeichnis

3.1 Überblick ausgewählter *symbolic forms* nach Sherin 37

4.1 Teilnehmer*innen der Expert*innen-Befragung 51
4.2 Kodierung Expert*innen-Interviews 56
4.3 Von Expert*innen genannte Anwendungsbeispiele zu einzelnen Feldern 66

5.1 Werte-Vorschrift für die Kodierung der Akzeptanzbefragungen . . 84
5.2 Beispiel Kodierung (Kodiertafel) 87
5.3 Schema für die Berechnung der Interrater-Reliabilität 88

7.1 Quellen und Felder der ersten Version des EFA 124
7.2 Struktur Interviewleitfaden Version 1 des EFA 133

8.1 Stichprobe der Akzeptanzbefragungen zu Version 1 des EFA . . . 142
8.2 Kodierung Version 1 des EFA 143
8.3 Problematik von Version 1 des EFA 161

9.1 Struktur Interviewleitfaden Version 2 des EFA (Teil 1) 189
9.2 Struktur Interviewleitfaden Version 2 des EFA (Teil 2) 190

10.1 Stichprobe der Akzeptanzbefragungen zu Version 2 des EFA . . . 196
10.2 Kodierung Version 2 des EFA 198
10.3 Problematik von Version 2 des EFA 226
10.4 Beantwortung der Beobachtungsfragen zu Version 2 des EFA . . . 231

12.1 Stichprobe der Akzeptanzbefragungen zu Version 2 des EFA . . . 252
12.2 Kodierung Version 3 des EFA 254
12.3 Kodierung Version 3 des EFA (spezifisch) 255

12.4 Probleme der dritten Runde von Akzeptanzbefragungen zum EFA 273
12.5 Beantwortung der Beobachtungsfragen zu Version 3 des EFA . . . 277

13.1 Sich unterscheidende Items von Prä- und Posttest der Klassenerhebung 293
13.2 Übersicht Items von Prä- und Posttest 296

14.1 Stichprobe der Lehrpersonen und Klassen (Erhebung Klassensetting) 300
14.2 Kennwerte der einzelnen Klassen (Erhebung Klassensetting) . . . 305
14.3 Kodierung Prätest Klassensetting Klassen 10 und 11a 306
14.4 Kodierung Prätest Klassensetting Klassen 11b, 11c und 12 307
14.5 Kodierung Posttest Klassensetting Klassen 10 und 11a 308
14.6 Kodierung Posttest Klassensetting Klassen 11b, 11c und 12 309
14.7 Zusammenhang von Interesse, Einschätzung und Performanz mit der Note 324
14.8 Zusammenhang von Note, Einschätzung und Performanz mit dem Interesse 324

15.1 Zuordnung von traditioneller Energieform und Formel 334
15.2 Struktur des Interviewleitfadens zum EFA-M 341

16.1 Stichprobe zur Mathematisierung des EFA (EFA-M) 350
16.2 Wiederholung der Konzeptideen der Akzeptanzbefragungen (EFA-M) 352
16.3 Umgang der Schüler*innen mit den Konzeptideen des EFA-M . . 356

Übersicht Anhang

Kurzzusammenfassung/Abstract **401**

Informationsschreiben **405**
Informationsschreiben zu Version 1 des EFA 405
Informationsschreiben zu Version 2 und 3 des EFA 407
Informationsschreiben zur Erhebung im Klassensetting 408

Interviewleitfäden **409**
Interviewleitfaden zu den Expert*innen-Interviews 409
Interviewleitfaden zu Version 1 des EFA 414
Interviewleitfaden zu Version 2 des EFA 422
Anleitung *Suche nach Feldern und Bewegungen* (zu Version 2 des EFA) 435
Interviewleitfaden zu Version 3 des EFA 437
Interviewleitfaden zum EFA-M (Mathematisierung des EFA) 452

Transkriptionsmanual **459**

Kodierleitfäden **463**
Kodierleitfaden zu Version 1 des EFA 463
Kodierleitfaden zu Version 2 des EFA 469
Kodierleitfaden zu Version 3 des EFA 474

Handreichung **481**

Testinstrument: Posttest mit Erwartungshorizont **515**

ANHANG A

Kurzzusammenfassung/Abstract

Kurzzusammenfassung Deutsch

Energie ist ein fundamentales Konzept. Ob beim Spannen einer elastischen Feder, der Explosion eines Feuerwerkskörpers, der Spaltung eines Atomkerns oder der Annihilation von Elementarteilchen; Energie spielt bei der Beschreibung dieser Phänomene eine wesentliche Rolle. Damit Schüler*innen die Prozesse aus der Energieperspektive betrachten können, benötigen sie ein profundes Verständnis des Konzeptes. Auch im Kontext aktueller gesellschaftlicher Herausforderungen wie Klimawandel und der Frage nach ‚erneuerbarer Energie' ist eine sinnvolle Bildung der Schüler*innen zu diesem Thema notwendig. Die physikdidaktische Forschung zeigt hingegen auf, dass viele Lernende auch am Ende ihrer Schulzeit noch kein nachhaltiges Verständnis von Energie besitzen.

Die vorliegende Dissertation dokumentiert die Entwicklung und Evaluation des Energie-Feld- Ansatzes (EFA). Dieser führt traditionelle Energieformen auf Bewegungsenergie und Feldenergie zurück. Als Projekt der fachdidaktischen Entwicklungsforschung wurden nach dem Modell der didaktischen Rekonstruktion die fachliche Klärung des Themas und Kenntnisse über Lernendenvorstellungen in Beziehung gesetzt und Konzeptideen entwickelt. Diese wurden mit geeigneten Kontexten in Akzeptanzbefragungen qualitativ evaluiert und in insgesamt drei Design-Zyklen weiterentwickelt. Dabei wurden die Lernprozesse der Schüler*innen analysiert, um Erkenntnisse über Schwierigkeiten und Benefits zu erlangen. Das

entstandene Unterrichtskonzept wurde anschließend im Klassensetting (mit insgesamt $N = 84$) Lernenden erprobt und evaluiert. Die Verknüpfung des Konzeptes mit typischen Formeln des Energieunterrichts rundet die Arbeit ab.

Gemäß dem Paradigma der Entwicklungsforschung konnten produktive und problematische Vorstellungen beim Lernen mit dem EFA identifiziert werden. Die Einblicke in die verschiedenen Lernprozesse ermöglichte die Entwicklung eines vielversprechenden Konzeptes, welches das inhaltliche und epistemische Energieverständnis zu fördern scheint. Das Konzept stellte sich als praktisch umsetzbar für den Schulunterricht heraus. Über die Subsumtion traditioneller Energieformen und die Verknüpfung mit typischen Formeln ist das Konzept anschlussfähig an den traditionellen Physikunterricht. Damit begegnet die Arbeit einem zentralen Problem und liefert einen wesentlichen Beitrag zur Beantwortung offener Fragen der Fachdidaktik. Nichtsdestotrotz eröffnen die Ergebnisse weitere Fragestellungen und zeigen die Notwendigkeit weiterer Forschungen zum Thema auf.

Abstract English

Energy is a fundamental concept. Whether describing the stretching of a spring, the explosion of a firework, nuclear fission, or the annihilation of elementary particles; energy plays an important role. To enable students to describe processes from an energy perspective, a profound understanding of the concept is needed. Also in the context of socio-scientific issues like climate change and ‘renewable energy’, reasonable education is required. However, physics education research shows that learners do not possess a sustainable understanding of energy, even at the end of their school career.

The presented thesis documents the design and evaluation of the Energy Field Approach (EFA). The approach traces traditional forms of energy back to kinetic and field energy. As a designbased research project, key ideas were constructed by relating scientific clarification and knowledge about students’ conceptions based on the model of educational reconstruction. The ideas were linked to appropriate contexts and evaluated using the method of probing acceptance in three design cycles. Thereby, students’ learning processes were analyzed to gain insights into benefits and difficulties. The resultant teaching concept was tested and evaluated in a class setting (with $N = 84$ students). In the end, typical formulas of energy are connected to the concept.

According to the paradigm of design-based research, productive and problematic students' conceptions regarding the EFA were identified. Insights into the different learning processes enabled the development of a promising and feasible concept that seems to enhance the scientific and epistemic understanding of energy. By subsuming traditional energy forms and connecting the ideas to typical energy formulas, the concept can be connected to current physics instruction. The dissertation faces a crucial problem and provides an essential contribution for addressing present issues of physics education research. Nonetheless, the results offer specific questions for subsequent investigations and point out the demand for further research on the topic.

ANHANG B

Informationsschreiben

universität wien
Zentrum für Lehrer*innenbildung

Energie und Felder: Energie verstehen

Interview zum Thema Energie im Physik-Unterricht

Informationen für Erziehungsberechtigte

Als Doktorand an der Universität Wien forsche ich auf dem Gebiet der Didaktik der Physik. In meiner Arbeit untersuche ich, wie man das Thema *Energie* im Physik-Unterricht mit Hilfe eines neuen Ansatzes besonders verständlich vermitteln kann. Um das herauszufinden, möchte ich Interviews mit Schüler*innen führen, in denen der neue Ansatz vorgestellt wird.
Da es einige Ideen zu besprechen gibt, ist das Interview etwas länger (ca. 2 Stunden). Die Interviews finden über Videochat statt. Als Dankeschön für die Teilnahme wird den Schüler*innen von der Universität Wien eine Teilnahmebescheinigung ausgestellt, die sie dann z.B. für spätere Bewerbungen nutzen können. Darüber hinaus stehe ich im Anschluss an das Interview auch gerne für alle Fragen zu Themen der Physik sowie rund um Studium und Universität zur Verfügung.

Die Interviews sind natürlich anonym und es werden keinerlei personenbezogenen Daten erhoben. Es wird lediglich das Gesprochene mit Hilfe eines üblichen Audio-Aufnahmegerätes aufgezeichnet und anschließend anonymisiert transkribiert. Es ist also nicht möglich, Informationen von einzelnen Personen hinterher zurückzuverfolgen. Die Interviews werden über *ZOOM* durchgeführt. Wenn Ihr Kind aber ein anders Programm bevorzugt, kann das Gespräch aber auch gerne über eine andere Plattform stattfinden.

Ich würde mich sehr freuen, wenn Ihr Kind an einem Interview teilnehmen würde!
Bei Fragen können Sie sich gerne jederzeit per E-Mail bei mir melden.

Vielen Dank und herzliche Grüße

Manuel Becker

Manuel Becker, M.Sc.

ZLB und AECC Physik
Universität Wien
manuel.becker@univie.ac.at

Einverständnis des*r Erziehungsberechtigten

Hiermit bestätige ich, dass mein Sohn/ meine Tochter an einem Interview teilnehmen darf. Ich bin einverstanden, dass das Gespräch zu Forschungszwecken anonymisiert aufgezeichnet wird.

_____ Datum

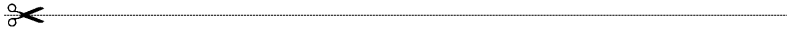
_____ Unterschrift

Einverständnis des*r Erziehungsberechtigten

Hiermit bestätige ich, dass mein Kind an einem Interview teilnehmen darf und etwaige Skizzen anonymisiert für Publikationen verwendet werden dürfen. Ich bin einverstanden, dass das Gespräch zu Forschungszwecken anonymisiert aufgezeichnet wird.

_____ _____

Datum Unterschrift



universität wien
Zentrum für Lehrer*innenbildung

AUSTRIAN EDUCATIONAL COMPETENCE CENTRE aecc

Energie und Felder: Unsere Welt verstehen

Interview zum Thema Energie im Physik-Unterricht

Informationen für Erziehungsberechtigte

Liebe*r Erziehungsberechtigte*r!

Als Doktorand an der Universität Wien forsche ich auf dem Gebiet der Didaktik der Physik. In meiner Arbeit untersuche ich, wie man das Thema *Energie* im Physik-Unterricht mit Hilfe eines neuen Ansatzes besonders verständlich vermitteln kann. Um das herauszufinden, möchte ich Interviews mit Schüler*innen führen, in denen der neue Ansatz vorgestellt wird. Da es einige Ideen zu besprechen gibt, ist das Interview etwas länger (ca. 2 ½ Stunden). Die Interviews finden über Videochat statt. Als Dankeschön für die Teilnahme erhalten die Schüler*innen von der Universität Wien eine Teilnahmebescheinigung sowie 20 €. Darüber hinaus stehe ich im Anschluss an das Interview auch gerne für Fragen zu Themen der Physik sowie rund um Studium und Universität zur Verfügung.
Die Interviews werden anonymisiert und mit keinerlei personenbezogenen Daten verknüpft. Es wird lediglich das Gesprochene mit Hilfe eines üblichen Audio-Aufnahmegerätes aufgezeichnet und anschließend anonymisiert transkribiert. Sollten Skizzen zu Aufgaben erstellt werden, so werden diese auch anonym verarbeitet. Es ist also nicht möglich, Informationen von einzelnen Personen hinterher zurückzuverfolgen. Die Interviews werden standardmäßig über *ZOOM* durchgeführt. Wenn Ihr Kind aber ein anders Programm bevorzugt, kann das Gespräch auch gerne über eine andere Plattform stattfinden.
Sofern Ihr Kind die Vergütung für das Interview erhalten möchte, ist die Bekanntgabe einer Bankverbindung (IBAN) zwecks Überweisung notwendig und es muss eine Empfangsbestätigung unterzeichnet werden, in der Wohnadresse und Name des*r Empfänger*in einzutragen sind. Diese Daten werden streng vertraulich behandelt und dienen nur der Vergütung und Refundierung der Interviews und stehen in keinem Zusammenhang mit den Interviewdaten. Nach dem Erhalt der unterzeichneten Empfangsbestätigung werden alle Kontaktdaten gelöscht.

Ich würde mich sehr freuen, wenn Ihr Kind an einem Interview teilnehmen würde!
Bei Fragen können Sie sich gerne jederzeit per E-Mail an mich wenden.

Vielen Dank und herzliche Grüße

Manuel Becker

Manuel Becker, M.Sc.

ZLB und AECC Physik
Universität Wien
manuel.becker@univie.ac.at

universität wien
Zentrum für Lehrer*innenbildung

Energie und Felder

Erprobung eines Unterrichtskonzeptes zum Thema Energie

Einverständniserklärung

Liebe*r Schüler*in!

Als Doktorand an der Universität Wien forsche ich auf dem Gebiet der Didaktik der Physik. In meiner Arbeit untersuche ich, wie man das Thema *Energie* im Physik-Unterricht mit Hilfe eines neuen Ansatzes besonders verständlich vermitteln kann. Um das herauszufinden, Erprobt dein*e Lehrer*in das Konzept in Eurer Klasse. Begleitend dazu sollst Du einen kurzen Fragebogen vor und nach der Erprobung ausfüllen. Bei diesem Fragebogen werden Dir Fragen zum Thema Energie gestellt. Außerdem werden auf der zweiten Seite einzelne Basisdaten erhoben, die aber nicht auf Dich als Person zurückgeführt werden können. Die Fragebögen werden anonymisiert und ausgewertet.
Damit die anonymen Daten wissenschaftlich weiterverarbeitet und publiziert werden können, wird Dein Einverständnis benötigt. Deshalb unterschreibe bitte kurz den folgenden Abschnitt.

Vielen Dank für Deine Mithilfe!

Herzliche Grüße

Manuel Becker

Manuel Becker, M.Sc.

ZLB und AECC Physik
Universität Wien
manuel.becker@univie.ac.at

✂

Einverständniserklärung

Hiermit bestätige ich, dass meine Daten (Antworten aus den Fragebögen) verarbeitet und für wissenschaftliche Zwecke (z. B. Publikationen) verwendet werden dürfen.

_____	_____	_____
Datum	Name	Unterschrift

ANHANG C

Interviewleitfäden

Fragen zur fachlichen Klärung des EFA an Expert*innen der Physik (klassische und moderne Physik)

Anmerkungen:

Im EFA geht es darum, Energie über Felder und Bewegungsenergie zu unterrichten.
Die Expert*innen-Interviews dienen dazu, die Elementarisierung zu den Konzeptideen zu validieren. Die Interviewfragen ergeben sich also aus der fachlichen Klärung und den Konzeptideen.

Hauptaussage: Energie erscheint nur auf zwei Arten: in Bewegungen und in Feldern. Damit können alle Phänomene des Energieunterrichts erklärt werden.

blau: besonders relevante Aspekte

0. <u>Leitfrage:</u>

Ist es legitim, Energie nur über Felder und Bewegungsenergie zu unterrichten?

I. Was sind Ihre ersten Gedanken im Hinblick darauf, Energie NUR über Bewegung und Felder zu unterrichten?

II. Welche Grenzfälle gibt es, bei denen eine Erklärung mit Feldern schwierig wird?

1. Fragen zum Hauptkonzept:

1. In einem Feld kann Energie gespeichert sein.

Darf man das sagen für das...

a) elektrische Feld?

b) magnetische Feld?

c) elektromagnetische Feld (em-Strahlung ist Feldenergie)?

d) Gravitationsfeld?

e) Higgs-Feld?

f) Gluon-Feld?

2. Darf man immer sagen: Ein Feld verformt sich bei Energieübertragung?

3. Gilt die Energie-Masse-Äquivalenz ($E=mc^2$) immer sowohl für Feld- als auch Bewegungsenergie?

4. Können alle Austauschteilchen als lokale Anregung eines Feldes beschrieben werden?

2. Fragen zu den einzelnen Feldern:

1. Gravitationsfeld

a) Wäre ein postuliertes Graviton das Austauschteilchen der Gravitation?

b) Wäre das eine Analogie zum Photon beim elektromagnetischen Feld?

c) Sind Gravitationswellen analog zu elektromagnetischen Wellen für das em-Feld?

d) Gravitationslinse: Darf man folgende Aussage treffen?

Elektromagnetische Strahlung verhält sich durch ihre Energie „masseähnlich“. Durch die quasi-Masse wirkt auf sie die Gravitation (Masse wechselwirkt mit der Strahlung).

e) Jets: Kann man die Energie eines Jets (schwarzes Loch) über Felder und Bewegungsenergie erklären?

2. Higgs-Feld

a) Darf man folgende Aussagen bzgl. Elementarteilchen und Higgs-Feldes treffen?

i. Die Ruheenergie (der Elementarteilchen) kommt aus dem Higgsfeld.

ii. Die Ruheenergie kommt durch die Kopplung an das Higgs-Feld (Higgs-Mechanismus).

iii. Durch das Higgs-Feld erhalten die Elementarteilchen ihre Ruheenergie.

b) Welchen Anteil der Kernmasse mach die Kopplung an das Higgs-Feld aus?

c) Wann bzw. wie spielt das Higgs-Feld bei der Paar-Erzeugung eine Rolle?

3. Gluon-Feld

a) Ist im Gluon-Feld Energie gespeichert?

b) Darf man folgenden Aussagen treffen?

i. Das Gluon-Feld trägt Energie.

ii. Die Ursache für die Kernmasse von Materie ist hauptsächlich das Gluon-Feld.

iii. Das ist die Bindungsenergie des Kerns.

c) Welchen Anteil der Materie/Kernmasse macht das Gluon-Feld aus?

4. Beta Zerfall und schwache Wechselwirkung

a) Kommt die Energie der Zerfallsprodukte beim Beta-Zerfall kommt (teilweise) aus dem Gluon-Feld?

b) Welches Feld spielt für die schwache WW eine Rolle?

3. Fragen zu Anwendungsbereichen:

Was für interessante Phänomene/Beispiele gibt es für das jeweilige Feld?

1. elektrisches Feld
2. magnetisches Feld
3. elektromagnetisches Feld
4. Gravitationsfeld
5. Higgs-Feld
6. Gluon-Feld

Interviewleitfaden für die Akzeptanzbefragungen zu Version 1 des EFA

Akzeptanzbefragung – Version 1 des EFA | Datum: | Codebuchstabe Schüler*in: | Schule:

Legende: *Text*, Instruktion , Konzeptideen

Begrüßung

- ☐ Hallo NAME! Schön, dass du dir für das Interview Zeit nimmst; das freut mich sehr. Du hilfst mir damit sehr bei meiner Forschung weiter! Ich weiß, dass das Interview sehr lang ist, aber ich hoffe, dass es dir etwas bringt und du dabei auch etwas interessantes lernen kannst. *Darf ich erfahren, von wem du von den Interviews erfahren hast? Was hat dich motiviert, dabei mitzumachen?*

  Auf jeden Fall schon mal vielen herzlichen Dank, dass du bei dem Interview mitmachst! Das finde ich ganz toll und hilft mir sehr bei meiner Forschung.

- ☐ *Gleich vorweg, bevor ich das vergesse: Hast du schon die Einverständniserklärung von deinen Eltern unterschreiben lassen? Kannst du sie mir zeigen?*

- ☐ [Screenshot machen]

- ☐ *Kannst du mich eigentlich gut verstehen? Falls irgendwelche Probleme auftreten, dann keine Sorge! Schreib mir dann einfach eine E-Mail oder versuche sobald es geht nochmal zu dem Meeting zu kommen. Ich werde auf jeden Fall hier warten, bis du wieder da bist und dann machen wir einfach weiter.*

  Auch wenn du zwischendurch etwas nicht verstehst; sag einfach Bescheid und ich wiederhole es noch einmal.

- ☐ *Vielleicht kurz nochmal eine Info, was ich eigentlich mache und wozu das Interview gut ist: Also ich untersuche im Moment, wie man den Physikunterricht in der Schule verbessern kann. Dabei interessiert mich insbesondere, wie man das Thema Energie so unterrichten kann, dass es möglichst verständlich ist. Dafür habe ich einen Ansatz entwickelt, den ich nun testen möchte und dafür brauche ich deine Hilfe.*

  In dem Interview stelle ich dir die Erklärungen vor und du sollst sie dann bewerten. Dabei kannst du einfach ganz offen sagen, was du verständlich oder unverständlich fandest. Anschließend frage ich dann ggf. nochmal nach oder stelle dir ein Aufgabenbeispiel, um zu schauen, ob die Erklärungen auch brauchbar sind. Dabei geht es nicht darum dich zu testen, sondern damit zu schauen, was ich an dem Ansatz noch verbessern muss, damit man ihn gut versteht. Es geht also nicht darum, ob du etwas weißt oder nicht weißt; sondern darum, dass wir gemeinsam herausfinden, ob der Ansatz so funktioniert und was man noch verbessern kann.

  Solltest du also irgendwo etwas unverständlich sein, dann kannst du das immer gerne auch sagen!

- ☐ *Weil ich mir natürlich nicht alles merken kann und damit ich das Interview aber am Ende auswerten kann, muss ich es aufzeichnen. Dazu habe ich hier ein gewöhnliches Aufnahmegerät [in die Kamera zeigen]; das zeichnet den Ton auf, aber nicht das Video. Ich bin dann auch der einzige, der das zu hören bekommt und ich werde es am Ende anonym machen, indem ich deinen Namen ändere. Das heißt alles, was wir hier besprechen bleibt unter uns.*

- ☐ [Aufnahme starten]

- ☐ *Ich werde auch zwischendurch immer mal wieder auf meinen Zettel schauen. Da steht drauf, was ich alles erzählen möchte, damit ich nichts vergesse.*

- ☐ *Da wir das Interview online machen müssen, kann ich dir leider keine live-Experimente zeigen. Aber ich habe das, was ich dir zeigen möchte vorher bereits als Video aufgenommen. Die werden ich dir dann immer mal wieder zeigen, um die Erklärungen etwas anschaulicher zu gestalten. Dafür teile ich dann meinen Bildschirm, sodass du die Videos sehen kannst.*

- ☐ *So! Das wäre auch schon das wichtigste. Hast du vielleicht noch irgendwelche Fragen, bevor wir loslegen? Alles klar, bist du bereit? Dann fangen wir an. Wenn du zwischendurch mal eine Pause brauchst, dann sag einfach Bescheid...*

1 „Ein Feld trägt Energie“

Phase	Text

1.1 Magnetisches Feld

E1.1	☐ Video-Setting ***„Magnetwägen stoßen sich ab“***
	☐ *Wie du siehst haben wir hier zwei Wägen mit je einem Magneten darauf. Wie du weißt können sich Magnete anziehen oder abstoßen; je nachdem, wie sie zueinander stehen. In diesem Fall sind die Magnete so montiert, dass sie sich abstoßen. Die Magnete werden zu Beginn festgehalten und dann losgelassen.*
	☐ *Was glaubst du wird passieren? - Schauen wir uns das an.*
	☐ [Video starten]
	☐ *Also die Magnete stoßen sich ab und die Wägen fahren auseinander. Sie befinden sich nach dem Loslassen also in Bewegung und haben entsprechend **Bewegungsenergie**. Aber wo kommt die her? Wir wissen ja, dass Energie erhalten ist, also weder aus dem Nichts erzeugt wird noch verschwindet. Wo kommt sie also hier her?*
	☐ *Die Antwort ist das Feld! Denn das Feld trägt Energie. Das heißt die Bewegungsenergie kam aus dem Feld.*

1.2 Gravitationsfeld

E1.2	☐ *Lass mich dir dazu noch ein Beispiel zeigen.*
	☐ [Satellit-Erde Simulation öffnen]
	☐ *Hier haben wir jetzt einen Himmelskörper (in diesem Fall der Satellit), der sich um die Erde bewegt. Was man beobachten kann ist, dass die Bahn nicht rund sondern **elliptisch** ist. Das bedeutet, dass sich der Satellit **mal näher und mal weiter weg** von der Erde befindet. Schau mal genau hin und beobachte, wie sich die Geschwindigkeit des Satelliten ändert, wenn er sich näher oder weiter weg von der Erde befindet.*
	☐ [Simulation durchführen]
	☐ *Wir sehen also, dass er sich langsamer bewegt, wenn er weiter weg von der Sonne bewegt. Und er wird schneller, wenn er sich nähert.*
Frage1.2	☐ *Was glaubst du, wo die Bewegungsenergie von dem Planeten herkommt? (Die muss ja vorher irgendwo sein.)*
E1.2	☐ *Sie steckt in dem Gravitationsfeld. Das Gravitationsfeld trägt also Energie, die dann in die Bewegung übertragen wird.*
B1.3	☐ *Wie findest du diese Erklärung für die Magnete und die Satelliten-Bewegung? Macht das für dich Sinn?*
P1.3	☐ *Kannst du mir das, was du gerade zu dem Feld und der Energie erklärt habe nochmal wiedergeben?*
A1.3a	(1a) Fallender Ball [Video] ☐ *Schauen wir uns den einfachsten Versuch der Welt an: Wir lassen einen Ball fallen. Und wir sehen, dass er schneller wird, sich also bewegt.* *Wie könnte man das mit dem Feld erklären?*
A1.3b	(1b) Luftballons [Video] ☐ *Hier sehen wir zwei Luftballons abstoßen. Kannst du beschreiben, was du hier siehst und wie man das erklären kann?*

Frage1.3	☐ *Was ist dir beim letzten Beispiel aufgefallen?*

2 „Das Gesamtfeld trägt Energie“

Phase	Text
E2.1	☐ *Wir haben jetzt gesehen, dass es bei dem elektrischen Feld genauso funktioniert.* ☐ *Ein Objekt setzt sich in Bewegung und dabei wird Energie aus dem Feld auf die Bewegung übertragen. Genauso wie wir das auch für das magnetische und das Gravitationsfeld gesehen haben.* ☐ ***Aber welches Feld ist das eigentlich? - Lass uns das nochmal genauer anschauen!*** ☐ *Also in dem Fall mit den sich abstoßenden Magneten haben wir ja zwei Magnete. Jeder dieser Magnete hat dabei ein Magnetfeld (das kennst du vielleicht schon – sie haben einen Nord- und einen Südpol und um den Magneten herum gibt es ein Feld). Das heißt ein Magnet ist quasi Quelle von einem Magnetfeld.* ☐ *So ein Feld kann man weder sehen noch anfassen. Das merkt man auch daran, dass man (wenn man da seine Hand hinhält oder auch wenn man genauer hinschaut) erst einmal kein Indiz dafür hat, dass da ein Feld ist. Aber wir wissen, dass da ein Feld ist, weil wir seine Quelle kennen; in dem Fall der Magnet. Und solange die Quelle da ist, breitet sich das Feld von dieser in den gesamten Raum (also überall hin) aus und ist unendlich weit ausgedehnt.* ☐ *Und jetzt kommt das wichtige zu der Energie: Die beiden Felder überlagern sich nämlich und ergeben ein Gesamtfeld. Und da steckt die Energie drin. Das bedeutet, wenn bei einem Prozess Energie übertragen wird, z.B. wenn sich die Magnete in Bewegung versetzen und schneller werden, dann wird die Energie aus dem Gesamtfeld (wir können auch einfach Feld sagen) in die Bewegung übertragen. (Oder eben auch umgekehrt.)* ☐ *Denken wir nochmal kurz an das Beispiel mit dem Satelliten um die Erde: Da hat auch der Satellit ein eigenes Gravitationsfeld und die Erde auch. Also ganz ähnlich zu dem Fall mit dem Magnetfeld. Das Gravitationsfeld ist auch nicht sichtbar und man kann es nicht anfassen. Aber trotzdem breitet es sich von den Quellen aus und ist unendlich weit ausgedehnt.* ☐ *Und wenn dann der Satellit schneller wird, dann wird Energie aus dem gemeinsamen Gravitationsfeld in die Bewegung des Satelliten übertragen.*
B2.2	☐ *Wie findest du diese Erklärung (für das Gesamtfeld und die Energieübertragung)?*

P2.2	☐ *Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal wiedergeben?* [Quellen, Felder, Gesamtfeld, Energieübertragung]
A2.2	(2a) Fadenpendel [Video] ☐ *Hier haben wir ein Fadenpendel. Ich lenke es nach oben aus und lasse es fallen. Es fängt natürlich an zu schwingen. Dabei wird es immer schneller auf dem Weg nach unten und wieder langsamer auf dem Weg nach oben.* *Wie kann man das mit dem Gesamtfeld erklären?*
B2.3	☐ „Jedes Feld hat eine Quelle“ 1. *Kannst du dir vorstellen, dass jeder Magnet Quelle von einem Feld ist?* 2. *Kannst du dir vorstellen, dass ein Gravitationsfeld auch eine Quelle besitzt?* *Was denkst du ist die Quelle beim Gravitationsfeld?* 3. *Kannst du dir das beim elektrischen Feld auch vorstellen?* *Was ist da wohl die Quelle?* ☐ „Unsichtbarkeit und Unantastbarkeit“ *Ist es für dich plausibel, dass man Felder weder sehen noch anfassen kann? Falls nein - bei welchem Feld kann man das denn?* ☐ „Ausbreitung und Ausdehnung“ 1. *Kannst du dir vorstellen, dass sich ein Feld von der Quelle aus ausbreitet?* 2. *Ist es für dich plausibel, dass das Feld unendlich weit reicht?* ☐ „Gesamtfeld“ 1. *Kannst du dir vorstellen, dass sich die zwei Felder der Quellen zu einem Gesamtfeld überlagern?* 2. *Ist es plausible, dass dieses Feld dann die Energie trägt?*

A2.3	(2b) Abprallende Magnetwägen [Video] ☐ *Wir sehen hier zwei Magnetwägen, die voneinander abprallen. Kannst du mir das mit dem Gesamtfeld und der Energieübertragung erklären?*

3 „Es gibt nur Bewegungsenergie und Feldenergie“

Phase	Text
E3.1	☐ *Wir haben jetzt gelernt, dass Energie aus einem Feld in eine Bewegung übertragen werden kann. Und jetzt kommt das besondere bei dem Modell:* ☐ *Das ist tatsächlich immer so. Immer, wenn Energie übertragen wird, dann geht es um Felder und Bewegung. Es gibt also nur zwei Arten von Energie, nämlich Feldenergie und Bewegungsenergie.Das ist ein **Unterschied** zu dem, was du vermutlich bisher gelernt hast. Aus der Unterstufe kennst du sicher viele verschiedene Energieformen. Aber wenn man sich das genauer anschaut, dann merkt man, dass Energie am Ende immer nur in einem Feld oder in Bewegung ist. Ganz gleich, was man sich für Phänomene ansieht, man kann sie alle mit diesem Modell erklären. Also nur mit Feld- und Bewegungsenergie.* ☐ *Und es gibt noch eine weitere wichtige Erkenntnis, die ich dir verraten möchte: Man kann nämlich alle Phänomene mit nur den drei Feldern erklären, die wir bereits kennen. Nämlich dem magnetischen, dem elektrischen und dem Gravitationsfeld.* ☐ *Also wenn es darum geht, ein Phänomen mit Hilfe der Energie zu erklären, dann reicht es, sich Bewegungs- und Feldenergie anzusehen. Und dabei nur die drei Felder.*
B3.2	☐ *Wie findest du diese Erklärung? Ist das plausibel?*
P3.2	☐ *Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal wiedergeben?*
A3.2	Lastenheber [Video] ☐ *Schau dir mal das folgende Video/Experiment an. Wie würdest du das, was hier passiert erklären?* [Hier sollte der/die Schüler*in nach dem Feld suchen und über die Bewegungsenergie bzw. Feldenergie des Gravitationsfeldes und das elektrische Feld der Batterie kommen.]
Frage3.2	☐ *Was denkst du ist hier im letzten Beispiel die Quelle des Feldes?*

4 „Felder sind makroskopisch und mikroskopisch.“

Phase	Text
A4.1	☐ *Wir haben uns jetzt das magnetische Feld, das Gravitationsfeld und das elektrische Feld angeschaut. Und die Quellen haben wir dabei als Magnete, Massen und Ladungen erkannt. Kannst du dir davon ausgehend vorstellen, dass die Erklärungen mit Feldern und Energie nicht nur im Großen (also bei ganzen Körpern) sondern auch bei Atomen so funktioniert?*
E4.1	☐ *Im letzten Beispiel haben wir das elektrische Feld angeschaut. Wie wir wissen entsteht das ja schon bei nur zwei Ladungen. Wie du vermutlich weißt besteht unsere gesamte Materie ja aus **Atomen** und dadurch auch aus **Ladungen** (also Protonen und Elektronen). Diese Ladungen haben natürlich auch ein **Gesamtfeld** und dementsprechend Energie.* ☐ *Man kann sagen, dass dieses Modell mit der Feld- und Bewegungsenergie nicht nur auf großen Skalen (makroskopisch) sondern auch im ganz Kleinen (mikroskopisch) gilt. Da funktioniert das quasi genauso. Lass mich dir dazu noch kurz ein Beispiel geben:* ☐ **[Anwendungsbeispiel:]** *Automotor* *Wenn man in einem Auto sitzt und beim Losfahren schneller wird. Wo kommt dann die Bewegungsenergie her? Klar – aus dem Motor. Aber wie genau? Also scheinbar muss da auch ein Feld involviert sein; und das ist es auch! Wie du weiß funktioniert der Motor mit Benzin. Das ist zwar selbst keine Energie, aber er besteht aus Atomen, zwischen denen es wiederum ein Feld gibt. Und wenn das Benzin verbrannt wird, dann wird Energie aus dem Feld von den Atomen im Benzin in die Bewegung der Räder übertragen.Wie findest du diesen Aspekt? Macht das für dich Sinn?*
B4.2	☐ *Wie findest du diesen Aspekt? Macht das für dich Sinn?*
P4.2	☐ *Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal wiedergeben?*
A4.2	Schleuder [Video] ☐ *Hier wird ein Ball durch das Gummiband weg geschleudert und dabei also in Bewegung versetzt.* *Kannst du mir erklären, woher die Bewegungsenergie kommt?*

5 „Energieübertragung und Veränderung des Feldes“

Phase	Text
E5.1	☐ *Lass mich dir nun einen Anhaltspunkt zeigen, an dem man erkennt, wann Energie zwischen Feld und Bewegung übertragen wird: Wir haben ja bei den Magneten gesehen, dass, wenn sie sich in Bewegung versetzen, von einander entfernen. Es ändert sich also ihre Konstellation, also der Abstand zwischen ihnen.* ☐ *Das gleiche haben wir bei der elliptischen Bahn des Satelliten um die Erde gesehen. Auf seiner Bahn entfernt sich der Satellit von der Erde und nähert sich wieder. Dabei wurde ständig Energie zwischen Feld und Bewegung übertragen. Genauso ändert sich der Abstand bei den Atomen bzw. Ladungen, wenn sich die Räder des Autos in Bewegung versetzen.* ☐ *In allen drei Feldern ändert sich also die Konstellation der Quellen und damit der Abstand, wenn Energie übertragen wird. Das ist tatsächlich immer so! Also daran, dass sich die Konstellation der Quellen, d.h. deren Abstand verändert oder etwas schneller oder langsamer wird, kann man erkennen, dass Energie übertragen wird.* ☐ *Wenn sich die Konstellation der Quellen und damit der Abstand der Quellen verändert, dann verändert sich natürlich auch gleichzeitig immer das Feld. Das heißt eine Energieübertragung erkennt man immer daran, dass sich ein Feld verändert.* ☐ **[**Anwendungsbeispiel**:** Magnetringe; Video mit den schwingenden Magnetringen] *Lass mich dir dazu ein Beispiel zeigen. Wir haben hier Magnetringe auf einem Stab. Genau wie bei den Magnetwägen stoßen sie sich hier ab. Schauen wir uns mal an, was passiert, wenn ich den oberen loslasse:* ☐ *Offenbar wird der obere Magnetring von dem unteren abgestoßen und beginnt zu schwingen. Wie kann man das wohl mit dem Feld und der Energie erklären?* ☐ *Also die Magnetringe haben ein Gesamtfeld. Das trägt Energie, die dann in die Bewegung des oberen Magnetrings übertragen wird. Dadurch bewegt er sich von dem unteren weg. Dadurch, dass sich der Ring nach oben bewegt, überträgt er natürlich seine Bewegungsenergie in das Gravitationsfeld. Dies geschieht, bis er irgendwann oben kurz stehen bleibt (also sich nicht mehr bewegt) und dann wieder nach unten fällt. Dabei wird Energie wieder in die Bewegung übertragen; der Magnetring wird schneller. Dabei wird aber auch gleichzeitig wieder Energie in das Magnetfeld übertragen, sodass der Ring anschließend nach unten wieder langsamer wird, bis er kurzzeitig unten stehen bleibt. Und so geht das dann weiter; der Magnetring schwingt zwischen oben und unten hin und her.* ☐ *Er wird immer wieder schneller und langsamer. Und dabei ändert sich ständig der Abstand zwischen dem unteren und dem oberen Magnetring. Daran erkennt man also, dass Energie zwischen Bewegung und Feld übertragen wird.*

B5.2	☐ *Wie findest du diese Erklärung? Macht das für dich Sinn?*
P5.2	☐ *Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal zusammenfassen?*
A5.2	(5a) Fadenpendel [Video] ☐ *Schauen wir uns noch einmal das Fadenpendel an. Das haben wir vorhin schon einmal besprochen. Kannst du mir sagen, woran man hier erkennt, dass Energie übertragen wird?* *Woran kann man sehen, wann die Energie wohin übertragen wird?*
B5.3	☐ *Kannst du dir vorstellen, dass man Energieübertragung daran erkennt, dass sich ein Feld verändert?* ☐ *Kannst du dir vorstellen, dass sich dann auch immer der Abstand ändert?* ☐ *Ist es für dich plausibel, dass dann Energie immer zwischen Feld und Bewegung übertragen wird?*
A5.3	(5b) Federpendel [Video] ☐ *Hier siehst du ein einfaches Federpendel. Kannst du mit dem, was wir gerade besprochen haben, die Bewegung erklären?*

6 „Wärme ist Bewegungsenergie“

Phase	Text
E6.1	☐ *Ich möchte dir jetzt noch eine weiteren Aspekt vorstellen. Dazu bleiben wir zunächst einmal bei unserem **Fadenpendel**. Ähnlich zu dem Fallenlassen des Balls wird hier die Energie aus dem Gravitationsfeld auf die Bewegung des Pendels übertragen, wenn dieses auf dem Weg nach unten schneller wird. Andersherum wird es langsamer, wenn es auf dem Weg nach oben ist.* ☐ *Dass die Energie dabei zwischen Bewegung und Feld wechselt, liegt, wie wir wissen, an der Energieerhaltung. Das Besondere bei der Energieerhaltung ist nämlich, dass, wenn wir eine bestimmte Energie im Feld haben, und ein Teil der Energie wird aus dem Feld heraus übertragen, **dann muss diese in ein anderes Feld oder in Bewegung gehen**. Das bedeutet: Wenn ein Feld Energie abgibt, dann finden wir diese abgegebene Energie in einem anderen Feld oder in Bewegung wieder. Das ist immer so.* ☐ *Bei manchen Phänomenen wirkt es auf den ersten Blick erst einmal so, also ob das nicht so wäre. Schauen wir uns dazu das Beispiel an. Bei dem Pendel wissen wir, dass es nicht unendlich lange weiter pendelt, sondern irgendwann stoppt. **Aber warum ist das so?*** ☐ *[Ggf.: Genau! Die Reibung. Hier treten zwei Arten von Reibung auf, einmal die mit der Luft und die an der Aufhängung. Diese beiden Fälle schauen wir uns gleich an. Aber lass uns kurz noch überlegen, was hier allgemein in beiden Fällen passiert:]* ☐ *Der Grund für das Stoppen ist offenbar, dass die **Energie** hier **irgendwo anders hin verschwindet**, wo wir sie nicht sehen können. Das merken wir auch daran, dass der Abstand zur Erde immer geringer wird. Aber wohin? Die Antwort ist ein weiteres für uns **unsichtbares Feld oder** eine **unsichtbare Bewegung**. Das Pendel stoppt, weil es immer weniger Bewegungsenergie hat bzw. das Gravitationsfeld immer weniger Energie trägt.* ☐ Fadenpendel mit Aufhängung [Video]

E6.1-A	**[Demonstration der Reibung an der Aufhängung]** ☐ *Das Pendel reibt an der Aufhängung. Diese Reibung sorgt dafür, dass die Bewegung des Pendels abnimmt. Überlegen wir uns kurz, was passiert, während das Pendel schwingt und die Schnur an der Stelle der Aufhängung reibt.* ☐ *Wie du vermutlich schon weißt besteht auch **Materie**, also das Material der Aufhänge-Stange, aus Teilchen/**Atomen**. Diese sind in einem Festkörper eingespannt und hängen deshalb zusammen. Deshalb ist ein Atom auch immer mit einem anderen verbunden. Ich zeige dir kurz ein Video von einem Modell, dass diese Situation simulieren soll.* ☐ Kugel auf Feder [Video] ☐ *Dieses **Modell simuliert** jetzt die Atome in dem Material. Die Kugel ist ein Atom und die Feder simuliert dessen Verbindung zu den anderen Atomen in dem Material. Wenn ich nun gegen das Modell stoße, dann wird die Kugel in Bewegung versetzt (und die Konstruktion beginnt zu schwingen). Ich übertrage ihm also **Bewegungsenergie**. Das heißt je mehr ich hier stoße, umso mehr Bewegungsenergie übertrage ich auf die Kugel in dem Modell.* ☐ *Und im Prinzip genauso kann ich mir das mit dem Material der Aufhängung vorstellen. Wenn nun das Pendel schwingt und dabei die Schnur an der **Aufhängung reibt**, dann versetzt sie immer wieder die Atome in dem Material in Bewegung. Diese erhalten dadurch Bewegungsenergie. Die kommt natürlich von dem Pendel. Das Pendel überträgt also, während es schwingt, immer weiter einen Teil seiner **Bewegungsenergie an das Material** der Aufhängung.* ☐ *Dadurch kann aber auch immer weniger Energie von der Bewegung in das Gravitationsfeld übertragen werden, weswegen das Pendel auch **immer weniger hoch schwingt**. Der Abstand, den es zur Erde schafft, wird also immer geringer, bis es irgendwann unten stehen bleibt. Dann ist die gesamte Energie in die Bewegung der Atome in der Aufhängung übertragen worden. Es scheint also insgesamt so, als ob die **Energie „verschwindet“**. In Wirklichkeit wird sie aber in mikroskopische Bewegung übertragen, die wir einfach nicht sehen können.* ☐ *Man kann sie aber **spüren** und in manchen Fällen auch sichtbar machen. Wenn du die Stelle angreifen würdest, dann kannst du spüren, dass sie etwas wärmer geworden ist als der Rest des Materials. Das ist die Bewegung der Atome.* ☐ *Die übertragene Energie erleben wir also als Wärme. Also bei solchen Prozessen, in denen eine Bewegung stoppt, wird Bewegungsenergie eines Objektes in Bewegungsenergie der Umgebung (in diesem Fall die Aufhängung) übertragen. Die sehen wir dann nicht mehr (sie ist quasi mikroskopisch), aber wir sehen, dass der Prozess stoppt.*

[Demonstration der Luftreibung]

E6.1-B

- ☐ *Lass uns nun noch den zweiten Fall mit der Luftreibung anschauen. Überlegen wir uns kurz, was passiert, während sich das Pendel durch die Luft bewegt. Wie du vermutlich schon weißt, besteht die Luft aus **Atomen**. Diese können sich (im Gegensatz zu denen im Material) frei bewegen. Schauen wir uns an, was passiert, wenn dann ein Pendel durch die Luft schwingt:*
- ☐ Sackerl mit Kügelchen [Video]
- ☐ *Hier haben wir ein **Modell** der Luft, in dem die Kügelchen die Luft-Teilchen simulieren. Wenn nun das Pendel gegen das Sackerl stößt, dann werden die Kügelchen in Bewegung versetzt. Ich übertrage ihnen also **Bewegungsenergie**. Das heißt je mehr es hier stößt, umso mehr Bewegungsenergie überträgt das Pendel auf die Kügelchen.*
- ☐ *Und im Prinzip genau so kann ich mir das mit der Luft vorstellen. Wenn nun das Pendel durch die Luft schwingt, dann **stößt** es immer wieder an den **Atomen in der Luft**. Diese werden dadurch in Bewegung versetzt und erhalten somit Bewegungsenergie. Die kommt natürlich von dem Pendel. Das Pendel überträgt also, während es durch die Luft schwingt, immer weiter einen Teil seiner Bewegungsenergie an die Luft. Dadurch kann aber auch immer weniger Energie von der Bewegung in das Gravitationsfeld übertragen werden, weswegen das Pendel auch **immer weniger hoch schwingt**. Der Abstand, den es zur Erde schafft wird also immer geringer, bis es irgendwann unten stehen bleibt. Dann ist die gesamte Energie in die Bewegung der Teilchen/Atome übertragen worden.*

B6.2

- ☐ *Wie findest du diese Erklärung? Kannst du dir das vorstellen?*

P6.2

- ☐ *Kannst du das, was wir gerade gelernt haben nochmal zusammenfassen?*

A6.2

(6a) Springender Ball [Video]

- ☐ *Betrachten wir einmal einen springenden Ball. Kannst du mir erklären, warum der irgendwann aufhört zu springen?*

B6.3

- ☐ *Ist es für dich plausibel, dass die übertragene/abgegebene Energie in Bewegungsenergie von Teilchen/Atomen übertragen wird?*
- ☐ *Kannst du dir vorstellen, dass Wärme auch nur eine Form von Bewegungsenergie ist?*
- ☐ *Kannst du nachvollziehen, dass Prozesse stoppen, weil dabei Energie übertragen wird?*

A6.3

(6b) Kugelbahn [Video]

- ☐ *Hier haben wir ein Video von einer Kugel, die rollt und dann irgendwann unten liegen bleibt. Wie erklärst du hier das Stoppen?*
- ☐ *Wie könnte man nachweisen, dass hier tatsächlich Energie übertragen wurde, die wir dann nicht mehr sehen können?*

7 „Elektromagnetische Strahlung ist Feldenergie“

Phase	Text

E7.1

- ☐ *Gehen wir nun noch etwas tiefer in die Materie hinein. Wir hatten bereits über Teilchen und Atome gesprochen. Schauen wir uns jetzt ein **einzelnes Atom** an. Wie du vermutlich schon gelernt hast, besteht ein Atom aus einem Atomkern und Elektronen. Wir betrachten der Einfachheit halber im Moment mal nur ein einfaches Proton als Kern und ein Elektron (das **Wasserstoffatom**). Wie wir bereits wissen gibt es dabei ein **elektrisches Feld** zwischen dem Proton und dem Elektron. Dieses Feld trägt Energie.*
- ☐ *Wir wissen auch: Wenn sich die **Konstellation** der beiden Quellen, also der beiden Ladungen (Proton und Elektron), ändert, dann kann das Feld Energie aufnehmen oder abgeben. Das bedeutet, das Atom kann **Energie aufnehmen oder abgeben**. Betrachten wir nun den Fall, dass sich die Energie von dem Feld verringert, also das Atom Energie aus seinem Feld abgibt.*
- ☐ *[Falls die Nachfrage kommt: Und wir wissen auch, dass dabei (weil uns das die Quantenmechanik sagt) das Elektron weder schneller noch langsamer wird. Es behält also die gleiche Bewegungsenergie.]*
- ☐ ***Hast du vielleicht eine Idee, was dann mit der Energie passiert, die das Feld abgibt?***
- ☐ *Was man beobachtet, wenn so etwas passiert, ist, dass ein Atom elektromagnetische Strahlung aussendet, z.B. Licht. Das heißt, immer wenn das passiert, also sich das Feld in einem Atom ändert, dann wird elektromagnetische Strahlung abgestrahlt. Diese Strahlung trägt also die abgegebene Energie aus dem Feld. Und es stellt sich heraus, dass die **elektromagnetische Strahlung selbst auch eine Art von Feld** ist; nämlich (so wie der Name schon vermuten lässt) eine Überlagerung von elektrischem und magnetischem Feld; also ein elektromagnetisches Feld.*
- ☐ *Du hast das sicher schon einmal im Zusammenhang mit **elektromagnetischen Wellen** gehört. Nun, Welle ist hier im Prinzip nur ein anderer Begriff für das Feld. Als Beispiel kennst du das Licht. Das ist auch ein elektromagnetisches Feld mit einer bestimmten Energie. Je nach Energie gibt man dem Feld dann **auch andere Namen**, wie zum Beispiel Gamma-Strahlung, Infrarot-Strahlung oder UV-Strahlung. Im Wesentlichen ist aber jedes einzelne davon ein elektromagnetisches Feld, das dann nur eine andere Energie trägt.*
- ☐ *Das heißt zusammengefasst: Die Veränderung des elektrischen Feldes im Atom bewirkt eine Übertragung von Energie. Diese Energie finden wir dann in einem anderen Feld wieder, nämlich dem elektromagnetischen Feld. Da sich das elektromagnetische Feld ausbreitet, wird die Energie des Feldes ständig übertragen. Das ist die Ausbreitung der Strahlung, z.B. des Lichtes, die wir beobachten.*
- ☐ **[Anwendungsbeispiel: Mikrowelle]**

  *In einer Mikrowelle wird Essen erwärmt. Dies geschieht dadurch, dass Feldenergie des elektromagnetischen Feldes (das in der Mikrowelle erzeugt wird), zur **Bewegungsenergie** der Teilchen/Moleküle im Essen übertragen wird. Die Bewegung der Moleküle im Essen bemerken wir als **Wärme** (wie bei der Erwärmung der Halterung und Luft beim Pendel).*

B7.2	☐ *Wie findest du diese Erklärung? Kannst du dir das vorstellen?*
P7.2	☐ *Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal zusammenfassen?*
A7.2	(7a) Boden ☐ *Kannst du mir damit erklären, warum im Sommer der Boden so heiß wird, dass man Barfuß darauf kaum laufen kann?*
B7.3	☐ *Kannst du dir vorstellen, dass elektromagnetische Strahlung (und auch Licht) eine Art von Feld ist?* ☐ *Kannst du dir vorstellen, dass diese Strahlung (also dieses Feld) Energie trägt?* ☐ *Ist es für dich plausibel, dass sich dieses Feld ausbreitet und dabei Energie übertragen wird?* ☐ *Ist es für dich plausibel, dass elektromagnetische Strahlung in Bewegungsenergie übertragen werden kann?* ☐ *Kannst du dir vorstellen, dass die Strahlungsarten, die wir kennen (also Licht, Gamma, Infrarot, UV) ein elektromagnetisches Feld ist?* ☐ *Kannst du dir vorstellen, dass sie sich dabei nur in ihrer Energie unterscheiden?*
A7.3	(7b) Radiometer [Video] ☐ *Unser letztes Beispiel für heute: Du siehst hier ein Radiometer. Wie das genau funktioniert ist uns eigentlich egal. Wir sehen aber, dass es anfängt, sich zu drehen. Kannst du mit dem, was du gerade gehört hast erklären, woher die Bewegung kommt?*

Schlussbemerkungen

☐ *Super! Dann haben wir es auch schon geschafft. Ich weiß das war lang, aber du hast super durchgehalten! Danke, dass du dir die Zeit genommen hast; das hilft mir auf jeden Fall sehr weiter.*

Fragen:

☐ *Hast du denn das Gefühl, heute etwas gelernt zu haben?*

☐ *Was fandest du interessant bzw. was nicht?*

☐ *Fandest du das Thema insgesamt eher leicht oder eher schwer?*

☐ *Wie hat dir der Ansatz insgesamt gefallen? Fandest du die Verknüpfung von Feldern und Energie eher gut oder eher schlecht? Warum?*

☐ *Wie sind (wenn ich fragen darf) denn deine Noten so in Physik und in den anderen Fächern?*

Vielen lieben Dank nochmal, dass du mitgemacht hast!

Die Urkunde bekommst du natürlich sobald ich sie habe zugeschickt.

☐ [Aufnahme beenden]

Interviewleitfaden für die Akzeptanzbefragungen zu Version 2 des EFA

Akzeptanzbefragung – Version 2 des EFA Datum: Codebuchstabe Schüler*in: Schule:

Legende: Text, Instruktion, Konzeptideen

Begrüßung

- ☐ Begrüßung, Danke, dass du dir für ein Interview Zeit nimmst!
- ☐ Falls die **Einverständniserklärung** noch nicht unterschrieben vorliegt:

  Gleich vorweg, bevor ich das vergesse: Hast du schon die Einverständniserklärung von deinen Eltern unterschreiben lassen? Kannst du sie mir zeigen?

  [Screenshot machen]
- ☐ Technische Gegebenheiten:
  1. Kannst du mich gut verstehen?
  2. Falls etwas schief geht (z.B. das Meeting beendet wird oder eine*r von uns aus dem Meeting geworfen wird): einfach nochmals beitreten!
  3. Falls etwas akustisch oder inhaltlich unklar ist: einfach nachfragen!
- ☐ Kurzfassung meiner Forschung
- ☐ **Struktur des Interviews:** Dreischritt; Erklärung, Paraphrase, Aufgabe/Beispiel
- ☐ Eigene Notizen zur Orientierung
- ☐ **Aufnahme**: gewöhnliches Audio-Aufnahmegerät [in die Kamera zeigen]; wird am Ende anonym in Text umgewandelt.

  [Aufnahme starten]
- ☐ Videos von Versuchen
- ☐ **Noch Fragen?**

0 Einführungsinformation

0.1 Phänomenologie der Energie







Energie ist etwas Abstraktes; erst einmal nur eine Zahl, die man nicht so richtig greifen kann. Sie ist für uns deshalb von Bedeutung, weil wir wissen, dass sie (wenn wir sie überall zusammenrechnen) erhalten ist. Das heißt die **Gesamtenergie in unserer Welt ändert sich nicht**.

Für uns bedeutet dies, dass uns die Energie angibt, **wie ein Prozess eines Phänomens ablaufen kann**. Beispiel:

a) Bei einer Fahrt mit der Achterbahn wird **potentielle Energie in Bewegungsenergie** umgewandelt. Wenn man eine Achterbahn mit Looping konstruiert und wissen möchte, wie schnell ein Wagen oben im Looping ist, kann man **die Energie betrachten.**

b) In einem Kernkraftwerk wird Energie durch **nukleare Prozesse** von einem Kraftwerk in elektrische Energie unserer **Haushalte** übertragen. Um zu verstehen, wie viele Haushalte man mit Energie versorgen kann, muss man wissen, **wieviel Energie, dort freigesetzt wird**.

c) Bei **Kollisionsversuchen** im LHC am CERN werden Teilchen mit besonders hoher **Bewegungsenergie** aufeinander geschossen und dabei neue **Teilchen erzeugt**. Um zu verstehen, wie und warum welche neuen Teilchen dabei entstehen können, muss man wissen, wieviel **Energie in der Kollision freigesetzt** wird.

All diese Beispiele zeigen uns, dass das **Verständnis von Energie und deren Übertragung bei Prozessen nützlich** und sogar notwendig ist, um Abläufe und Phänomene zu verstehen.

0.2 Was wir heute lernen werden

Der EFA soll uns dabei helfen, solche Phänomene zu erklären.

Was uns dabei hilft ist die Tatsache, dass wir alle Energieformen, die wir bisher aus der Schule kennen, auf **Bewegungen und Felder** zurückführen können. Wenn das so ist, dann macht das Erklärungen viel einfacher, weil wir dann immer **nur schauen** müssen, wo Energie übertragen wird und **welche Bewegungen und Felder dabei involviert** sind. Dabei werden wir später sehen, dass es dabei um die Bewegung von Objekten und Körper auf der einen Seite und verschiedene Felder (elektrische, magnetische, Gravitationsfelder oder auch Quarkfelder und das Higgsfeld) auf der anderen Seite geht.

Darstellung der Hauptideen:

1. Ein (Gesamt-)Feld trägt Energie. Energie kann in ein Feld oder aus einem Feld übertragen werden.
2. Es gibt nur Feld- und Bewegungsenergie. Dies gilt immer und überall (makro- & mikroskopisch sowie fächerübergreifend).
3. Unsere Welt besteht nur aus Feldern und Bewegungen. Wenn sich Masse verändert, dann wird Energie übertragen.

0.3 Anleitung

Wir werden sehen, dass je nach Phänomen andere Felder eine Rolle spielen, deshalb haben wir hier eine Anleitung, nach der wir uns richten können, wenn wir nach Feldern und Bewegungen suchen.

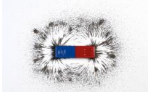
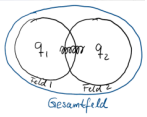
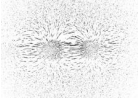
Überleitung

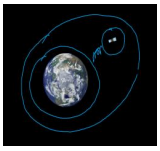
Felder kennen wir auf verschiedene Arten, z.B. Gravitationsfelder, elektrische und magnetische Felder oder auch elektromagnetische Felder wie z.B. Licht, IR- oder UV-Strahlung. Allen Feldern gemeinsam ist, dass man sie **weder direkt sehen noch anfassen** kann und dass sie von der **Quelle** aus (wenn sie denn können) **unendlich weit ausgebreitet** sind. Bemerkbar werden sie durch ihre Rolle bei Phänomenen; einige Beispiele dafür werden wir uns nun ansehen. Um das zu verstehen, schauen wir und zunächst an, worüber wir hier sprechen, wenn wir „**Feld**“ sagen. **Hast du soweit schon Fragen?**

Hauptidee 1: Ein (Gesamt-)Feld trägt Energie. Energie kann in ein Feld oder aus einem Feld übertragen werden.

1.1 Quelle und Gesamtfeld

Konzeptideen: Magnete, Ladungen und Massen sind Quellen von magnetischen, elektrischen oder Gravitationsfeldern. Zwei Quellen wechselwirken über ihre Felder miteinander (Magnete mit Magneten, Ladungen mit Ladungen bzw. Magneten, wenn sie sich bewegen und Massen mit Massen). Die Felder überlagern sich zu einem Gesamtfeld. Die anziehende oder abstoßende Wechselwirkung kann man sich wie eine elastische Feder vorstellen.

Phase	Text
E1.1	☐ **Magnete, Ladungen und Massen sind Quellen von Feldern**. Dabei erzeugen Magnete ein Magnetfeld, Ladungen ein elektrisches Feld (bzw. auch ein magnetisches Feld, **wenn sie sich bewegen**) und Massen ein Gravitationsfeld. Hier sehen wir das am Beispiel eines Stabmagneten.  ☐ **Gleiche Quellen**, wie z.B. zwei Magnete, **wechselwirken miteinander über ihre Felder.** Dabei **überlagern sich die beiden Felder** (weil sie ja unendlich weit ausgedehnt sind) zu einem **Gesamtfeld.**  ☐ Skizze Gesamtfeld ☐ Das **Gesamtfeld** will sich dann entsprechend der Wechselwirkung **entweder zusammenziehen oder auseinanderdrücken.** Die Wechselwirkung zwischen den Quellen kennen wir auch als **Kraft**. Vorstellen kann man sich das **wie eine elastische Feder**: Eine anziehende Wechselwirkung wirkt wie eine gespannte (auseinandergezogene) Feder und zieht das Gesamtfeld zusammen. Und eine abstoßende Wechselwirkung wirkt wie eine gestauchte (zusammengedrückte) Feder und drückt das Gesamtfeld auseinander.  ☐ Das mit der Überlagerung gilt für **alle Felder**, also egal ob magnetisch, elektrisch oder Gravitation. Schauen wir uns dazu zwei konkrete Beispiele an.

	Beispiel Stabmagnete (1.1a):
E1.1	☐ Ein **(Stab-)Magnet** ist Quelle eines Magnetfeldes. Bei zwei Stabmagneten überlagern sich die zwei Magnetfelder sich zu einem Gesamtfeld; das kann man sich vorstellen wie eine elastische Feder. In dem Fall, dass sich die beiden Pole abstoßen, haben wir also eine abstoßende Wechselwirkung und das **Gesamtfeld will sich auseinanderdrücken, wie eine gespannte Feder.**
	Beispiel Satellit (1.1b):
E1.1	 ☐ Ähnlich ist es beim **Gravitationsfeld**. Hier ist eine Masse eine Quelle eines Feldes, z.B. die Erde. Da ein Satellit, der um die Erde kreist, auch eine Masse besitzt, ist auch dieser Quelle eines Feldes. Wir wissen, dass sich zwei Massen anziehen, also miteinander **wie eine gestreckte Feder wechselwirken**. Dabei überlagern sich ihre Felder zu einem **Gesamtfeld, das sich zusammenziehen will.** Dieses Feld ist das, was wir normalerweise das Gravitationsfeld nennen. ☐ Also: Die **Konstellation von zwei Quellen**, deren Felder sich überlagern, ergibt ein Gesamtfeld. Dieses Gesamtfeld stellt dann eine anziehende oder abstoßende Wechselwirkung dar und man kann es sich als Feder vorstellen.
B1.1	☐ Wie findest du diese Erklärung? Macht das für dich Sinn?
P1.1	☐ Kannst du mir das, was du gerade gehört hast, nochmal zusammenfassen?
A1.1a	Quelle und Gesamtfeld zweier abstoßender Ladungen [Skizze]  ☐ Schauen wir uns zwei positive Ladungen an. Kannst du mir beschreiben, wie sich hier das Feld ergibt?
A1.1b	Quelle und Gesamtfeld bei geladenen Luftballons [Skizze]  ☐ Schauen wir uns zwei Luftballons an, die man zuvor an den Haaren gerieben hat. Kannst du mir beschreiben, wie sich hier das Feld ergibt?

1.2 Energie im Gesamtfeld und Energieübertragung

Konzeptideen: Das Gesamtfeld trägt Energie. Diese Energie kann in das Feld oder aus dem Feld übertragen werden, z.B. in Bewegungsenergie.

Phase	Text
	Abstoßende Magnetwägen (1.2a)
E1.2	☐ Video abstoßende Magnetwägen ☐ Wir haben hier **zwei Magneten auf Wägen in abstoßender Konstellation**. Sie werden gerade noch zusammengehalten. Was passiert wohl, wenn ich sie loslassen? Sie fahren auseinander. Die Frage ist nun: **Woher bekommen sie die Bewegungsenergie, die sie am Ende haben, wenn sie sich voneinander entfernen?** ☐ **Ein Magnet ist Quelle eines Magnetfeldes**. Die beiden **Magnetfelder überlagern sich zu einem Gesamtfeld**. Hier stoßen sich die beiden Magnete ab, das heißt wir haben eine **abstoßende Wechselwirkung**, also ein **Gesamtfeld, das sich auseinanderdrücken will**. ☐ Und jetzt kommt der für unseren Ansatz entscheidende Punkt: **Dieses Gesamtfeld trägt Energie**. Wichtig dabei ist zu wissen, dass die **Energie immer nur im Gesamtfeld mit der Wechselwirkung steckt, also in der Überlagerung**. Nicht die Einzelfelder der Quellen tragen Energie, sondern erst die **Konstellation als Überlagerung**, also das Gesamtfeld. ☐ Das Gesamtfeld trägt also Energie und diese kann **aus dem Feld in Bewegungsenergie übertragen werden**. Wenn man die beiden Magnetwägen also loslässt, dann gibt das Feld Energie an die Bewegung der beiden Magnetwägen ab.

Abprallende Magnetwägen (1.2b)

E1.2

☐ Video abprallende Magnetwägen

☐ Schauen wir uns dazu noch an, was passiert, wenn die Magnetwägen aufeinander zufahren:

Hier fahren jetzt die beiden Magnetwägen von gerade aufeinander zu, weil sie angestoßen wurden. Sie haben also Bewegungsenergie. Jeder Magnet hat als Quelle ein Magnetfeld und die beiden Felder überlagern sich (weil die Felder den gesamten Raum durchdringen) zu einem **Gesamtfeld; das trägt grundsätzlich Energie**. Wenn die beiden Wägen nun aufeinander zu fahren, wird Energie aus der Bewegung der Magnete in das Feld übertragen, bis sie in der Mitte keine Bewegungsenergie mehr besitzen. Da hat dann das **Gesamtfeld die gesamte Energie aufgenommen**. Da das **Feld sich nach wie vor auseinanderdrücken möchte**, überträgt es (sobald es die gesamte Energie hat) die **Energie zurück in die Bewegung** der Magnetwägen; sie werden wieder schneller.

☐ **Genauso funktioniert das mit allen Feldern**: **Ein Gesamtfeld kann Energie aufnahmen oder abgeben.** Dabei nimmt das Feld Energie aus einer Bewegung auf oder gibt Energie in die Bewegung ab.

B1.2 ☐ Wie findest du diese Erklärung, ist sie plausibel?

P1.2 ☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal wiedergeben?

A1.2a

Luftballons stoßen sich ab [Video]

☐ Hier haben wir wieder die beiden Luftballons. Wenn ich den einen näher an den anderen bringe, dann bewegt sich dieser weg; er erhält also Bewegungsenergie. Aber wo kommt die her?

A1.2b

Satellitenbewegung um die Erde [Simulation]

☐ Wir sehen hier den Satelliten von eben, wie er sich um die Erde bewegt. Da er sich auf einer Ellipse bewegt, gibt es einen Punkt wo er der Erde am nächsten ist und einen, an dem er am weitesten weg ist. Vom entfernten Punkt zum nächsten Punkt wird er dabei schneller. Woher erhält er die zusätzliche Bewegungsenergie?

1.3 Indikatoren für Feldveränderung und Energieübertragung

Konzeptideen: Wenn Energie in ein oder aus einem Feld übertragen wird, dann verändert sich das Feld. Das merkt man das daran, dass…

1. sich eine Bewegung verändert.
2. sich ein Feld zusammenzieht oder auseinanderdrückt.
3. der Abstand der Quellen sich ändert.

Wenn etwas **gegen den „Willen"** des Feldes geschieht, dann nimmt es Energie auf; wenn das Feld sich **nach seinem „Willen"** verändert, dann gibt es Energie ab. Es will also immer zum Zustand minimaler Energie.

Phase	Text
E1.3	☐ Da nur ein Gesamtfeld Energie trägt, ist es in Ordnung, wenn man bei Erklärungen **einfach „das Feld" sagt**. Gemeint ist dabei immer die Konstellation von zwei Quellen und der Überlagerung ihrer Felder. ☐ Wir haben gerade bei den Feldern von Magneten, Ladungen und Erde-Satellit gesehen, dass Energie in ein oder aus einem Feld übertragen werden kann. Das heißt das Gesamtfeld gibt Energie ab oder nimmt Energie auf. Nun wollen wir uns überlegen, woran man das erkennt bzw. **wann denn ein Feld Energie aufnimmt und wann es sie abgibt.** **Abprallende Magnetwägen** ☐ Schauen wir uns dazu nochmal das Beispiel mit den umkehrenden Magnetwägen von gerade an: Wenn die Magnete aufeinander zu fahren, **werden sie durch die abstoßende Wechselwirkung langsamer** und geben deshalb **Energie an das Feld** ab. **Das Feld nimmt also Energie aus ihrer Bewegung auf**. Dabei sieht man: Das Feld will sich auseinanderdrücken. Wenn es aber durch die Bewegung der Magnete **„gegen seinen Willen"** zusammengedrückt wird, **nimmt es Energie auf**. Das geschieht, bis die Magnetwägen in der Mitte all ihre Energie aus der Bewegung an das Feld abgegeben haben. Dann hat das Feld die gesamte Energie aufgenommen. Da es sich nach wie vor auseinanderdrücken will, kehren die Magnetwägen wieder um und werden schneller. Dabei erhält ihre Bewegung Energie aus dem Feld. **Das Feld gibt also Energie ab, wenn es sich „gemäß seinem Willen" auseinanderdrückt**. ☐ Wir lernen dabei, dass ein Feld (egal welches) bei **Veränderungen** gegen seinen **Willen** immer Energie aufnimmt und gemäß seinem Willen immer Energie abgibt. Es strebt also immer zum **Zustand minimaler Energie**. Als Folge davon ändert sich eine Bewegung und der Abstand der Quellen (da sie sich bewegen).
B1.3	☐ Wie findest du diese Erklärung? Ist das plausibel?
P1.3	☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal wiedergeben?

A1.3a	Luftballons ☐ Wenn wir uns nochmal die beiden Luftballons ansehen; woran erkennt man hier, dass das Feld Energie abgibt?
A1.3b	Satellitenbewegung ☐ Wenn wir uns nochmal die Bewegung des Satelliten ansehen; woran erkennt man hier, dass das Feld Energie abgibt?
Z1	**Zusammenfassung** 1) Magnete, Ladungen und Massen sind **Quellen** von magnetischen, elektrischen oder Gravitationsfeldern. Zwei Quellen **wechselwirken über ihre Felder** miteinander und die Felder überlagern sich zu einem **Gesamtfeld**. Dieses will sich je nachdem, ob wir eine anziehende oder abstoßende Wechselwirkung haben, immer **zusammenziehen oder auseinanderdrücken**. Das kann man sich auch wie eine **elastische Feder** vorstellen. 2) Das **Gesamtfeld trägt immer Energie**. Dabei kann Energie in ein Feld oder aus einem Feld in Bewegungsenergie übertragen werden, also ein **Feld Energie aufnehmen oder abgeben**. 3) Wenn Energie in ein oder aus einem Feld übertragen wird, dann **verändert sich das Feld**. Das merkt man das daran, dass… i. sich eine Bewegung verändert. ii. sich ein Feld zusammenzieht oder auseinanderdrückt. iii. der Abstand der Quellen sich ändert. Wenn etwas gegen den **„Willen" des Feldes** geschieht, dann nimmt es Energie auf; wenn das Feld sich nach seinem „Willen" verändert, dann gibt es Energie ab. Es will also immer zum Zustand minimaler Energie.
A1.3c	Fallender Ball ☐ Stell dir vor du lässt einen Ball fallen. Von oben nach unten erhält er Bewegungsenergie. Wo kommt die her?

Hauptidee 2: Es gibt nur Feld- und Bewegungsenergie. Dies gilt immer und überall (makro- & mikroskopisch sowie fächerübergreifend).

2.0 Einleitung „Nur Feld- und Bewegungsenergie“

Wie wir bisher gesehen haben, gibt es also Energie in Feldern und Energie in Bewegungen. Aber wie hängt das jetzt mit den Energieformen zusammen, die wir aus der Schule kennen?

Die Antwort darauf ist einfach und zentral für den Ansatz: **Es gibt in Wirklichkeit keine anderen Energieformen, sondern immer nur Feld- und Bewegungsenergie**. Das heißt, man kann alle Energieformen, die wir so kennen, auf Felder und Bewegungen zurückführen.

Schauen wir uns dazu die Beispiele vom Anfang an:

a) Bei der **Achterbahn** wird potenzielle Energie in Bewegungsenergie umgewandelt, würde man nach dem traditionellen Ansatz aus der Schule sagen. Die Frage ist aber: Was ist denn eigentlich die **potenzielle Energie?** Wie wir bei den Beispielen von **Satellit und Erde** sowie dem fallenden Ball gesehen haben, ist die Energie, die dabei in Bewegung übertragen wird die Energie, die das **Gravitationsfeld** abgibt. Das ist hier bei der Achterbahn genauso. Also wenn der Wagen von oben herunterfährt, dann gibt das Gravitationsfeld (also die Überlagerung der Felder von Wagen und Erde) einen Teil seiner Energie an die Bewegung ab. Dabei wird der Wagen schneller und **das Feld zieht sich zusammen**; der Wagen nähert sich der Erde.

b) Beim **Kernkraftwerk** funktioniert das ähnlich: Wir erhalten **elektrische Energie**, die vorher in nuklearen Prozessen frei wurde. Die Energie, die wir nutzen, ist elektrische Energie, oder - mit Feldern ausgedrückt – **Energie im elektrischen Feld der Ladungen in unseren Kabeln und Geräten**. Die Energie hat das elektrische Feld aus den nuklearen Prozessen im Kraftwerk aufgenommen, wo entsprechend **Energie von einem anderen Feld abgegeben** wurde. Welches Feld das genau ist, und wie man den Ansatz auch auf der **atomaren und nuklearen Ebene** verstehen kann, wollen wir uns im Folgenden anschauen.

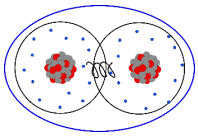
2.1 Überall: Mikrokosmos und andere Fächer

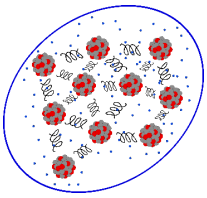
Konzeptideen: Energie kann auf jeder Skala in (auch mikroskopischen) Feldern gespeichert sein. Das gilt überall in unserer Welt, also in allen Bereichen/Fächern (Biologie und Chemie).

E2.1

Schleuder

- ☐ Schauen wir uns dazu zunächst ein Alltagsbeispiel an: Eine elastische Schleuder. Wenn man einen Ball in eine Steinschleuder spannt und dann loslässt, so fliegt der Ball davon. Dabei erhält er **Bewegungsenergie. Aber wo kommt die her?**
- ☐ Sie kommt aus dem Band der Schleuder. Traditionell würde man sagen hier wird **Spannenergie** umgewandelt. Wir wissen aber nach unserem neuen Ansatz, dass es nur Bewegungs- und Feldenergie gibt. Also ist die Frage: **Wo finden wir hier eine Bewegung oder ein Feld?** Ausgehend von den Feldern, die wir kennen, können wir hier schließen, dass es wohl **kein Gravitationsfeld** ist, denn der Ball wird nicht weggeschleudert, weil sich der Abstand zur Erde verändert. Und ein **magnetisches Feld ist hier auch nicht** involviert, weil wir keine Magnete haben. Also müsste es **elektrisch** sein, aber warum?



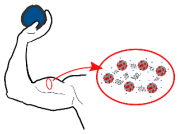


- ☐ Wenn wir uns die Schleuder genauer ansehen, dann wissen wir, dass sie aus **Atomen** besteht, welche durch die Überlappung ihrer elektrischen Felder ein elektrisches Gesamtfeld haben. Dieses **Gesamtfeld trägt Energie**. Wenn man nun das Band der Schleuder spannt, dann zieht man das Gesamtfeld der Atome auseinander. Die **Atome möchten aber (da wir hier einen Festkörper haben) in ihrer Konstellation bleiben**, da ihr Feld so die **minimale Energie** hat. Das kennen wir auch als **Bindung** bzw. **Bindungsenergie**. Das heißt man muss das **Feld gegen seinen Willen verändern**. Dabei nimmt das Feld Energie auf. Genauso wie beim Spannen einer elastischen Feder. Wenn man die gespannte Schleuder dann loslässt, zieht sich das Feld und damit das Band wieder zusammen und gibt die **Energie an die Bewegung des Balls** ab.

☐ Wir sehen also hier **zwei Dinge**: Erstens, dass es **nur Bewegungs- und Feldenergie** gibt, und zweitens, dass diese möglicherweise erst nicht ersichtlich ist, man sie aber finden kann, wenn man auch **auf der mikroskopischen Ebene sucht**. Wir haben also die uns bekannten Energieformen **Spannenergie bzw. Verformungsenergie** auf Feldenergie eines mikroskopischen elektrischen Gesamtfeldes der Atome zurückgeführt.

Muskelkontraktion

E2.1



☐ Schauen wir uns dazu noch ein Beispiel an, bei dem das ähnlich funktioniert: Die Muskelkontraktion des Menschen. Stell dir vor du wirfst einen Ball. Der Ball erhält dabei (genauso wie bei der Schleuder) Bewegungsenergie. Diese **muss aus einer anderen Bewegung oder einem Feld kommen, aber wie?**

☐ Dazu kann man sich überlagern, wie eine Muskelkontraktion funktioniert. Dabei laufen **im Körper chemische Reaktionen** ab, bei denen Moleküle, also **Konstellationen von Atomen**, **umgebaut** werden. Dieser Umbau ändert die Konstellation der Atome untereinander und damit ihr **Gesamtfeld**. Die Energie, die das Feld abgibt, wird in die Bewegung des Armes bzw. der Hand und damit an die Bewegung des Balles übertragen.

Das ist auch der Grund dafür, warum wir unserem Körper **immer wieder Nahrung**, also **neue chemische Verbindungen**, zuführen müssen, damit er seine Körperfunktionen aufrechterhalten kann. Denn ohne die neuen Moleküle kann keine Feldenergie mehr aus der Veränderung von Atom-Konstellationen bei chemischen Prozessen frei werden.

B2.1 ☐ Wie findest du diese Erklärung? Ist sie plausibel?

P2.1 ☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal wiedergeben?

Automotor

A2.1a ☐ Stell dir vor du sitzt im Auto und fährst los. Dabei wird Energie in die Bewegung des Autos übertragen. Aber wo kommt die hier? Wir wissen, dass das Auto durch die Verbrennung von Treibstoff angetrieben wird. Kannst du erklären, woher dabei die Energie kommt?

Explosion

A2.1b ☐ Stellt dir vor du beobachtest eine Explosion. Dabei fliegen die Einzelteile des Materials weg; woher kommt ihre Bewegungsenergie?

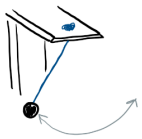


Zusammenfassung

Z2.1 Wir haben nun gelernt, dass es nur Bewegungs- und Feldenergie gibt und dass dies nicht nur makroskopisch, sondern auch mikroskopisch gilt. Wir haben also gesehen, dass es **auf jeder Ebene** so geht; **aber gilt das auch immer?** Schauen wir uns noch ein paar Beispiele dazu an, um das etwas weiter zu überprüfen.

2.2 Immer: Thermische Energie und Elektromagnetische Strahlung

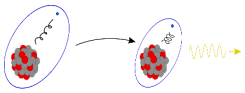
Konzeptideen: Thermische Energie (Wärme) ist mikroskopische Bewegungs- bzw. Feldenergie und elektromagnetische Strahlung ist Feldenergie.

Phase	Text
E2.2.1	☐ Wie ist das eigentlich bei **thermischer Energie bzw. Wärme**? Wie kann man das in unseren Ansatz einordnen? ☐ Dazu schauen wir uns die Bewegung eines Pendels an. Das Pendel schwingt raus und runter. Dabei wird ständig Energie aus dem Gravitationsfeld von Kugel und Erde in die Bewegung der Kugel übertragen und wieder zurück. Aber da der Prozess **nicht ganz reibungsfrei** von statten geht, wird das Pendel mit der Zeit immer weniger hoch kommen bzw. immer langsamer, bis es irgendwann stehen bleibt. Der Grund dafür ist die **Reibung in der Luft sowie an der Aufhängung**. Aber wo genau geht die Energie hin, die dann weder im Gravitationsfeld noch in der Bewegung der Kugel steckt? Nach unserem Ansatz muss sie in einem Feld oder in einer Bewegung sein, die wir **offenbar auf den ersten Blick nicht sehen**. Nun haben wir aber gerade zuvor gelernt, dass es auch mikroskopische Felder und Bewegungen gibt, nämlich die der **Teilchen, aus denen die Materie besteht. Schauen wir da also genauer nach:**  ☐ Zunächst in der Luft. Dort stößt das Pendel ständig mit den Luftatomen und versetzt diese dabei in Bewegung. Ein Teil der Energie von vorher wird also in die Bewegung der **Luftatome** übertragen. Wir kennen das auch als thermische Energie. ☐ Der andere Teil der Energie geht durch Reibung in die Aufhängung. Dort reibt die Schnur des Pendels permanent am Material der **Halterung**. Dabei stößt die Schnur ständig mit den Atomen der Halterung, welche dadurch in Bewegung versetzt werden. Genau genommen verändert sich dabei auch ihre Konstellation, also ihr **Feld**. Man kann also sagen, dass ein Teil der Energie von vorher nun in der **Bewegung** und dem Feld der Atome der Halterung steckt. Die Bewegungsenergie der Atome kennen wir auch als thermische Energie und merken diese durch z.B. Angreifen der Halterung. Wir können dann spüren, dass sie sich an der Stelle, wo die Schnur gerieben hat, leicht erwärmt wurde. Insgesamt kann man also sagen, dass die Energie insgesamt in mikroskopischen Feldern und Bewegungen steckt.

B2.2.1	☐ Wie findest du diese Erklärung? Macht das für dich Sinn?
P2.2.1	☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal zusammenfassen?
A2.2.1a	Kugelbahn [Video] ☐ Hier siehst du eine Kugel, die auf einer Metallbahn hin und her rollt. Nach einer Weile bleibt sie unten stehen. Wo ist die Energie hin, die sie am Anfang noch in ihrer Bewegung hatte?
A2.2.1b	Erwärmung in der Mikrowelle ☐ Stell dir vor du erwärmst Nahrung in einer Mikrowelle. Ungeachtet des Prozesses wie die Mikrowelle funktioniert. Was passiert in der Nahrung, wenn sie warm wird; wie beschreibt man das mit Energie?

2.2.2 Elektromagnetische Strahlung

☐ Wir wollen uns noch eine weitere Energieform anschauen, die man mit diesem Ansatz einbetten kann: die Strahlungsenergie der elektromagnetischen Strahlung.



☐ Dazu stellen wir uns vor**, wie denn eigentlich elektromagnetische Strahlung (also z.B. Licht) entsteht:** Wenn man ein Atom betrachtet, dann haben wir dort den Kern und die Elektronen, die sich um diesen bewegen. Da sowohl der Kern als auch die Elektronen **elektrisch geladen** sind, haben sie ein elektrisches **Gesamtfeld, das Energie trägt**. Wegen der Bewegung der Elektronen haben wir gleichzeitig auch ein magnetisches Feld. Wenn sich dann die **Konstellation eines Elektrons und dem Kern verändert**, dann verändern sich auch die Felder. Dabei zieht sich das Feld gemäß seinem Willen zusammen und gibt Energie ab. Diese Energie muss irgendwo hin und – in der Tat – wir beobachten, dass das Atom elektromagnetische Strahlung, z.B. als Licht, abstrahlt. Diese Strahlung trägt also die abgegebene Energie. Nun ist die Frage**: Ist dies Feld- oder Bewegungsenergie?**

E2.2.2

☐ Auf den ersten Blick könnte man ja meinen, dass es sich um Bewegungsenergie handelt, da sich das Licht bewegt. Allerdings ist das **Licht im Gegensatz zu anderen bewegenden Objekten kein Teilchen, sondern eine Welle**, die im Wesentlichen eine **Überlagerung des abgestrahlten elektrischen und magnetischen Feldes** ist. Das bedeutet, dass die elektromagnetische Strahlung, so wie der Name sagt, ein elektromagnetisches Feld ist und dementsprechend **Feldenergie** trägt. Auch wenn elektromagnetische Strahlung in **gebündelter** Form, z.B. einem starken Lichtstrahl, vorkommt, der sich bewegt, so ist es immer noch Feldenergie, nur eben **stark konzentriert**.

Beispiel Mikrowelle:

☐ Schauen wir uns dazu das Beispiel mit der **Mikrowelle** von eben an. Dabei hat die Bewegung der Atome der Nahrung Energie erhalten. Diese muss irgendwo herkommen: Wenn man die Mikrowelle einschaltet, dann erzeugen wir ein elektromagnetisches Feld (die Mikrowellen), das dann Feldenergie trägt und die Mikrowelle und damit auch die **Nahrung durchsetzt.** Wenn dieses Feld dann mit der Nahrung wechselwirkt, dann werden die Atome der Nahrung zur **Bewegung angeregt** und erhalten dabei ihre Energie. Diese Energie gibt das elektromagnetische Feld der Mikrowelle ab.

B2.2.2 ☐ Wie findest du diese Erklärung? Ist das plausibel?

P2.2.2 ☐ Kannst du das, was wir gerade gelernt haben nochmal zusammenfassen?

A2.2.2a

Laser [Bild]



☐ Betrachten wir einmal diesen Laser hier, er verformt das Metall darunter und zerschneidet es dabei. Kannst du erklären, von wo nach wo hier Energie übertragen wird?

A2.2.2b

Solarzelle [Bild]



☐ Kannst du erklären, welche Energieübertragung beim Betrieb einer Solarzelle stattfindet?

Zusammenfassung

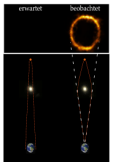
Z2.1

Wir haben jetzt gelernt, dass auch die Energieformen **thermische Energie bzw. Wärme und Strahlungsenergie** auch auf Energie in Bewegungen oder Feldern zurückzuführen sind. Teilweise muss man dafür tiefer in die Materie hineinschauen, aber **spätestens auf der mikroskopischen Ebene finden wir eine Erklärung.**

Einschub: Energie-Masse-Äquivalenz

Konzeptideen: (Feld-) Energie ist wie Masse: $E = mc^2$.

Erklärung Gravitationslinse



Wir haben jetzt einige Phänomene mit Hilfe unseres Ansatzes erklären können. Nun wollen wir sehen, wie weit man dabei gehen kann; wir wollen uns nun das ganz große und das ganz kleine ansehen.

Dazu starten wir mit einem Phänomen der Astronomie: Der Gravitationslinse.

Wir haben gelernt, dass Licht ein sich fortbewegendes Feld ist, also **Feldenergie** trägt. Wenn man in der Astronomie Sterne erforscht, dann gibt es teilweise Phänomene, die man mit der klassischen Physik nicht mehr erklären kann; wie beispielsweise die **Ablenkung** von Licht an einem schwarzen Loch. Schauen wir uns dazu das folgende Beispiel an: Zwischen unserer Erde und einem weit entfernten Stern liegt ein Schwarzes Loch, z.B. der Kern unserer Galaxie (der Milchstraße). Normalerweise würde man **erwarten, dass das Licht, das dieser Stern aussendet, nicht zu uns gelangen kann**, wenn das schwarze Loch den Weg versperrt. Tatsächlich sieht man aber einen Ring (Einsteinring genannt). Dieser Ring liegt genau in der Blickrichtung des Sterns und entsteht durch das Licht, das von ihm ausgesendet wird. Die Frage ist also: Wie kommt das Licht des Sterns zu uns, wenn er durch das schwarze Loch verdeckt wird? Die Antwort auf die Frage lieferte uns **Einstein** mit seiner heutzutage **gut bestätigten allgemeinen Relativitätstheorie**. Nach dieser Theorie wird das Licht **durch die Gravitation des schwarzen Loches abgelenkt**. Aber wie geht das? Gravitation wirkt doch nur auf Masse und Licht hat doch keine Masse, oder?

Tatsächlich doch; zumindest fast. **Licht hat Feldenergie**, wie wir schon herausgefunden haben. Und Einstein sagt und, dass $E = mc^2$ gilt. Das bedeutet, dass **Energie wie Masse** ist **und umgekehrt**. Für unseren Fall heißt das, dass die Gravitation des schwarzen Loches auf das Licht wirkt, weil es Energie hat, die sich wie Masse verhält. Deshalb wird das Licht abgelenkt und gelang zu uns auf die Erde. Das ist ein **Nachweis** dafür, dass Einsteins Theorie stimmt.

Für uns bedeutet das jetzt, dass wir nachweisen können, dass Licht, also das elektromagnetische Feld, Energie trägt, die wie Masse ist. Viel spannender ist nun also auch die Frage: **Geht das auch andersherum?** Also ist Masse auch Energie? Kurz und knapp: **Die Antwort darauf ist ja!** Einsteins Gleichung $E=mc^2$ sagt und das, denn man kann sie in beide Richtungen lesen. Aber wo merkt man das?

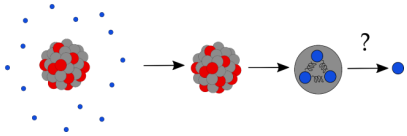
Hauptidee 3: Unsere Welt besteht nur aus Feldern und Bewegungen. Bei der Änderung von Masse wird Energie zwischen Feld und Bewegung übertragen.

3.1 Quarkfeld

Konzeptideen: Unsere Masse ist hauptsächlich Energie, und zwar Feldenergie. Diese steckt im Feld der Quarks in den Atomkernen.

E3.1

- ☐ Das einfachste Beispiel, um zu überprüfen, ob Energie auch Masse ist, ist die Waage. Wenn wir uns **morgens auf die Waage stellen**, dann erfahren wir unsere Masse. Wie finden wir heraus, ob diese nun auch Energie ist bzw. wenn das so ist; ist sie dann Feld- oder Bewegungsenergie?

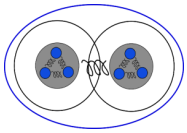


- ☐ Dazu schauen wir nun in uns **hinein, in die Materie**, so tief wie wir suchen müssen. Wir bestehen aus Molekülen, die wiederum aus Atomen bestehen. Die Atome bestehen aus Elektronen und einem Atomkern. Der Atomkern ist im Vergleich zu den Elektronen viel schwerer, das heißt unsere Masse kommt hauptsächlich durch die Masse unserer Atomkerne zu Stande. Die Atomkerne wiederum bestehen aus Nukleonen, den Protonen und Neutronen. Die Masse all dieser Nukleonen macht unsere Masse aus. Aber wenn man nun noch weiter hineinschaut, dann sieht man, dass die **Protonen und Neutronen aus Quarks** bestehen. Diese sind **Elementarteilchen** und (zumindest soweit wir das bis heute wissen) neben den Elektronen die kleinsten unteilbaren Teilchen unserer Welt. Jedes Proton und Neutron besteht aus drei Quarks. Nun würde man also vermuten, dass die **Masse der drei Quarks** zusammen die Masse eines Protons oder Neutron ergibt. Das ist aber nicht so. Die Quarks machen nur maximal 10 Prozent der Masse eines Nukleons aus. **Wo kommen also die restlichen 90 Prozent, also der Hauptanteil der Masse eines Protons oder Neutrons und damit von uns her?**

E3.1

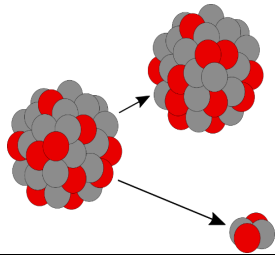
☐ Die Antwort ist tatsächlich das, was wir gesucht haben, nämlich **Energie**. Die **Quarks sind nämlich Quellen eines Feldes, das wir noch nicht kennen, das sogenannte Quarkfeld**. Das funktioniert genauso wie die Felder, die wir schon kennen. Jedes Quark ist also Quelle eines Feldes, die sich dann zu einem Gesamtfeld überlagern. Und in diesem **Gesamtfeld**, dem Quarkfeld, steckt Energie. Nach Einstein, also wegen $E=mc^2$, ist **Energie gleich Masse** und die fehlenden 90 Prozent unserer Masse ist in Wirklichkeit Energie, die im Quarkfeld steckt.

☐ Diese Energie kann auch abgegeben werden. Zum Beispiel **überlagern sich auch die Quarkfelder der Nukleonen**. Deshalb **halten die Kerne auch zusammen**, weil das Feld so die **minimale Energie** hat, die **Bindungsenergie**. Und wenn sich dann ein **Atomkern verändert, dann ändert sich auch das Quarkfeld und dabei nimmt das Feld Energie auf oder gibt sie ab**. Das bemerken wir immer daran, dass sich die Masse ändert.



Beispiel Alpha-Zerfall

☐ Ein Beispiel dafür ist der **Alpha-Zerfall**. Dabei gibt ein Atomkern ein Alpha-Teilchen ab, also zwei Protonen und zwei Neutronen, und wird dadurch zu einem kleineren Kern. Das Alpha-Teilchen hat dabei natürlich Bewegungsenergie. Die Frage ist nun, wo kommt die her?



E3.1

☐ Antwort: Aus dem **Massenunterschied**. Der Kern am Ende und das Alpha-Teilchen zusammen sind leichter als der Kern am Anfang. Das heißt ein Teil der Masse des Kerns am Anfang ist als Energie für die Bewegung des Alpha-Teilchens frei geworden. Diese freiwerdende Energie kommt aus dem **Quarkfeld**. Dadurch, dass sich der **Kern verändert**, ändert sich auch die **Konstellation der Kernbausteine, also der Protonen und Neutronen und damit die Überlagerung der Quarkfelder.** Das Quarkfeld will (so wie alle anderen Felder) stets die Energie minimieren. Das heißt es gibt Energie ab. Das bemerkt man also als Massenunterschied (wir kennen das auch als Massendefekt) und an der Bewegungsenergie des Alpha-Teilchens.

☐ So sieht man, dass das, was wir aus der Schule als **Massendefekt und Bindungsenergie** kennen, letztendlich auch auf Feldenergie im Quarkfeld zurückgeführt werden kann. Wir haben nun also gesehen, dass man Prozesse, bei denen Masse „verloren“ geht, durch die Abgabe von Energie aus dem Quarkfeld beschreiben können. Das geht grundsätzlich bei allen Kernprozessen so.

B3.1

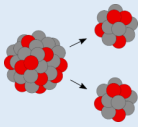
☐ Wie findest du diese Erklärung? Ist das plausibel?

P3.1

☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal zusammenfassen?

A3.1a

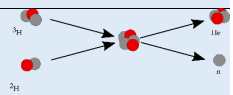
Kernspaltung [Bild]



☐ Wenn ein Kern gespalten wird, dann zerfällt er in zwei kleinere Kerne. Diese sind in der Summe leichter als der Mutterkern. Woher kommt die Massendifferenz (Massendefekt) und von wo nach wo wird hier Energie übertragen?

A3.2b

Kernfusion [Bild]



☐ Bei der Fusion werden zwei Kernen zu einem gemeinsamen Kern verschmolzen. Dabei ist der entstehende Kern leichter als die beiden einzelnen zusammen. Wie erklärt man hier die Massendifferenz und die Energieübertragung?

3.2 Higgs-Feld

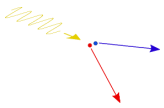
Konzeptideen: Die Masse der Elementarteilchen kommt durch das Higgs-Feld. Dies durchsetzt das gesamte Universum.

E3.2

☐ Der letzte Aspekt, den wir uns ansehen wollen, ist die Frage, **woher denn nun aber die Masse der Elementarteilchen kommt**. Also die Masse der Quarks selbst und die Masse der Elektronen. Wenn wir diese Frage auch mit der Energie von Feldern oder Bewegungen erklären können, dann scheint unser Ansatz **unsere gesamte Welt** (so wie wir sie kennen) **zu beschreiben**. Also woher kommt die Masse der Elementarteilchen?

☐ Wir haben gelernt, dass **Masse das gleiche wie Energie** ist. Das bedeutet die Masse von Elektronen und Quarks ist im Grunde nur Energie. Und wie zuvor kommt sie durch ein Feld zu Stande; dem **Higgsfeld**. Dies ist ein Feld, das unser **gesamtes Universum durchsetzt** und durch die **Wechselwirkung mit den Elektronen und Quarks für die Ruheenergie sorgt**. Auf diese Weise kann man die Masse der Elementarteilchen, also deren Energie, auf das fundamentale **Higgsfeld** zurückführen.

Beispiel Paarerzeugung



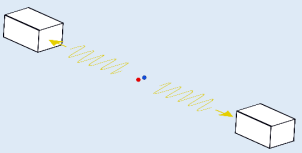
☐ Schauen wir und ein Beispiel an, wo das eine Rolle spielt: Zum Beispiel bei der **Entstehung von Elementarteilchen**. Da wir nun wissen, dass Energie gleich Masse ist, kann man **mit ausreichend Energie aus Bewegungen oder Feldern auch Teilchen mit Masse erzeugen**. Wenn man zum Beispiel zwei Lichtbündel, also zwei elektromagnetische Felder, aufeinandertreffen lässt, dann konzentriert sich deren Feldenergie im Treffmoment und wir haben Energie im Gesamtfeld, die theoretisch auch in andere Feldenergie oder Bewegungsenergie übertragen werden kann. So kann sich zum Beispiel **die Energie auch durch das Higgsfeld als Masse manifestieren** und wir erhalten neue Elementarteilchen. Man beobachtet das zum Beispiel bei der sogenannten Paarerzeugung, wo zwei elektromagnetische Felder in zwei Elementarteilchen, ein Elektron und ein Positron, umgewandelt werden. Das **Positron ist das Antiteilchen des Elektrons**. Das entsteht deshalb (und nicht noch ein zweites Elektron), weil neben der Energie auch die Ladung erhalten sein muss. Deshalb entstehen ein negativ geladenes Elektron und ein positives Positron.

B3.2 ☐ Wie findest du diese Erklärung? Ist das plausibel?

P3.2 ☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal zusammenfassen?

A3.2a

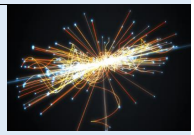
Annihilation PET [Bild]



☐ In der Medizin wird die PET verwendet, um Tumore im Körper zu lokalisieren. Dazu wird ein radioaktives Präparat verabreicht, das Positronen abgibt. Da sich das Präparat hauptsächlich an der Stelle des Tumors anreichert, werden dort besonders viele Positronen an das Gewebe abgegeben. Diese Positronen sind die Antiteilchen der Elektronen und vernichten sich mit diesen, wenn sie auf welche Treffen. Wenn ein Positron auf ein Elektron der Atome des Gewebes trifft, dann kommt es dort mit nahezu keiner Geschwindigkeit an. Wenn sich dann Positron und Elektron vernichten, dann verschwinden sie und es entstehen zwei Elektromagnetische Wellen, die sich genau entgegengesetzt auseinanderbewegen. Wenn man diese misst, dann kann man ihren Weg zurückverfolgen und den Tumor lokalisieren.
Aber warum geht das? Kannst du erklären, von wo nach Wo hier Energie übertragen wird?

A3.2b

CERN-Experiment [Bild]



☐ Im LHC am CERN werden Protonen mit hoher Geschwindigkeit aufeinander geschossen. Dabei treffen sie als Teilchen mit besonders großer Bewegungsenergie aufeinander.

Frage: Welche Energie haben wir insgesamt im Treffmoment, wenn wir diese Situation mit Bewegungs- und Feldenergie beschreiben wollen?

☐ Die konzentrierte Feld- und Bewegungsenergie im Treffmoment kann nun zur Entstehung neuer Elementarteilchen führen, die sich wiederum auch zu größeren Teilchen zusammensetzen können. Beobachten kann man das dann mit Detektoren, welche die einzelnen Teilchen nachweisen.

Frage: Kannst du erklären, wo die Energie der neuen Teilchen herkommt bzw. von wo nach wo hier Energie übertragen wird?

Schlussbemerkungen

☐ Super! Dann haben wir es auch schon geschafft. Ich weiß das war lang, aber du hast super durchgehalten! Danke, dass du dir die Zeit genommen hast; das hilft mir auf jeden Fall sehr weiter.

Fragen:

☐ Hast du denn das Gefühl, heute etwas gelernt zu haben?

☐ Was fandest du interessant bzw. was nicht?

☐ Fandest du das Thema insgesamt eher leicht oder eher schwer?

☐ Wie hat dir der Ansatz insgesamt gefallen?

Vielen lieben Dank nochmal, dass du mitgemacht hast!

Die Urkunde bekommst du selbstverständlich noch zugeschickt.

☐ Aufnahme beenden

Vorgehensweise zur Erklärung von Phänomenen:

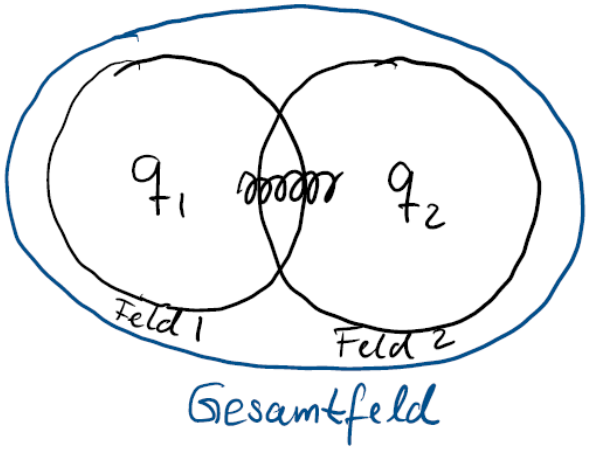
Wir suchen nach Feldern und Bewegungen in einem Prozess!

1. **Wo wird Energie übertragen? Wird etwas schneller oder langsamer?**
2. **Welche Felder sind im Prozess involviert?**
    a. Sind makroskopische Felder involviert?

        (Ändert sich die Konstellation von Magneten, Ladungen oder Massen?)

    b. Sind mikroskopische Felder involviert?

        (Ändert sich die Form eines Körpers oder die Konstellation von Atomen oder Kernen?)



Erklärung von Phänomenen mit Energie und Feldern

Felder	Quellen	Anwendungsbereich	Prozesse
Magnetisches Feld	Magnete oder bewegte Ladungen	makro- & mikroskopisch	• Magnete ändern ihre Konstellation • Ladungen ändern ihre Bewegung Beispiele: Stabmagnete, atomare Übergänge
Elektrisches Feld	Ladungen	makro- & mikroskopisch	• Ladungen ändern ihre Konstellation Beispiele: Geladene Körper, Bindungen von Atomen und Molekülen, Veränderung von Atomstrukturen
Gravitationsfeld	Massen	makroskopisch	• Massen ändern ihre Konstellation Beispiele: Satelliten und Himmelskörper, fallende Objekte
Quarkfeld	Quarks	mikroskopisch Prozesse mit Kernen oder Quarks	• Quarks ändern ihre Konstellation Beispiele: Veränderung von Kernstrukturen, Kernprozesse
Higgs-Feld	Elementarteilchen	mikroskopisch	• Elementarteilchen werden erzeugt oder vernichtet Beispiele: Erzeugung oder Vernichtung von Teilchen-Antiteilchen-Paaren (Elektron/Positron)

Interviewleitfaden für die Akzeptanzbefragungen zu Version 3 des EFA

Akzeptanzbefragung – Version 3 des EFA Datum: Codebuchstabe Schüler*in: Schule:

Legende: Text, Instruktion, Konzeptideen

Begrüßung

- ☐ Begrüßung, Danke, dass du dir für ein Interview Zeit nimmst!
- ☐ Falls die **Einverständniserklärung** noch nicht unterschrieben vorliegt:

  Gleich vorweg, bevor ich das vergesse: Hast du schon die Einverständniserklärung von deinen Eltern unterschreiben lassen? Kannst du sie mir zeigen?

  [Screenshot machen]
- ☐ Technische Gegebenheiten:
  1. Kannst du mich gut verstehen?
  2. Falls etwas schief geht (z.B. das Meeting beendet wird oder eine*r von uns aus dem Meeting geworfen wird): einfach nochmals beitreten!
  3. Falls etwas akustisch oder inhaltlich unklar ist: einfach nachfragen!
- ☐ Kurzfassung meiner Forschung
- ☐ **Struktur des Interviews:** Dreischritt; Erklärung, Paraphrase, Aufgabe/Beispiel
- ☐ Eigene Notizen zur Orientierung
- ☐ **Aufnahme**: gewöhnliches Audio-Aufnahmegerät [in die Kamera zeigen]; wird am Ende anonym in Text umgewandelt.

  [Aufnahme starten]
- ☐ Videos von Versuchen
- ☐ **Noch Fragen?**

0 Einführungsinformation

0.1 Phänomenologie der Energie







Energie ist etwas Abstraktes; erst einmal nur eine Zahl, die man nicht so richtig greifen kann. Sie ist für uns deshalb von Bedeutung, weil wir wissen, dass sie (wenn wir sie überall zusammenrechnen) erhalten ist. Das heißt die **Gesamtenergie in unserer Welt ändert sich nicht**.

Für uns bedeutet dies, dass uns die Energie angibt, **wie ein Prozess eines Phänomens ablaufen kann**. Beispiel:

a) Bei einer Fahrt mit der Achterbahn wird **potenzielle Energie in Bewegungsenergie** umgewandelt. Wenn man eine Achterbahn mit Looping konstruiert und wissen möchte, wie schnell ein Wagen oben im Looping ist, kann man **die Energie betrachten.**

b) In einem Kernkraftwerk wird Energie durch **nukleare Prozesse** von einem Kraftwerk in elektrische Energie unserer **Haushalte** übertragen. Um zu verstehen, wie viele Haushalte man mit Energie versorgen kann, muss man wissen, **wieviel Energie, dort freigesetzt wird**.

c) Bei **Kollisionsversuchen** im LHC am CERN werden Teilchen mit besonders hoher **Bewegungsenergie** aufeinander geschossen und dabei neue **Teilchen erzeugt**. Um zu verstehen, wie und warum welche neuen Teilchen dabei entstehen können, muss man wissen, wieviel **Energie in der Kollision freigesetzt** wird.

All diese Beispiele zeigen uns, dass das **Verständnis von Energie und deren Übertragung bei Prozessen nützlich** und sogar notwendig ist, um Abläufe und Phänomene zu verstehen.

0.2 Was wir heute lernen werden

Der EFA soll uns dabei helfen, solche Phänomene zu erklären.

Was uns dabei hilft ist die Tatsache, dass wir alle Energieformen, die wir bisher aus der Schule kennen, auf **Bewegungen und Felder** zurückführen können. Wenn das so ist, dann macht das Erklärungen viel einfacher, weil wir dann immer **nur schauen** müssen, wo Energie übertragen wird und **welche Bewegungen und Felder dabei involviert** sind. Dabei werden wir später sehen, dass es dabei um die Bewegung von Objekten und Körper auf der einen Seite und verschiedene Felder (elektrische, magnetische, Gravitationsfelder oder auch Quarkfelder und das Higgsfeld) auf der anderen Seite geht.

Darstellung der Hauptideen:

1. Ein (Gesamt-)Feld trägt Energie. Energie kann in ein Feld oder aus einem Feld übertragen werden.
2. Es gibt nur Feldenergie und Bewegungsenergie. Dies gilt immer und überall (makro- & mikroskopisch sowie fächerübergreifend).
3. Unsere Welt besteht nur aus Feldern und Bewegungen. Wenn sich Masse verändert, dann wird Energie übertragen.

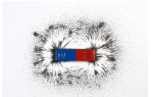
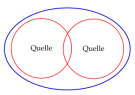
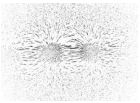
Überleitung

Felder kennen wir auf verschiedene Arten, z.B. Gravitationsfelder, elektrische und magnetische Felder oder auch elektromagnetische Felder wie z.B. Licht, IR- oder UV-Strahlung. Allen Feldern gemeinsam ist, dass man sie **weder direkt sehen noch anfassen** kann und dass sie von der **Quelle** aus (wenn sie denn können) **unendlich weit ausgebreitet** sind. Bemerkbar werden sie durch ihre Rolle bei Phänomenen; einige Beispiele dafür werden wir uns nun ansehen. Um das zu verstehen, schauen wir uns zunächst an, worüber wir hier sprechen, wenn wir „**Feld**“ sagen. **Hast du schon Fragen?**

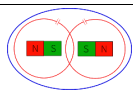
Hauptidee 1: Ein (Gesamt-)Feld trägt Energie. Energie kann in ein Feld oder aus einem Feld übertragen werden.

1.1 Quelle und Gesamtfeld

Konzeptideen: Magnete, Ladungen und Massen sind Quellen von magnetischen, elektrischen oder Gravitationsfeldern. Zwei Quellen wechselwirken über ihre Felder miteinander (Magnete mit Magneten, Ladungen mit Ladungen bzw. Magneten, wenn sie sich bewegen und Massen mit Massen). Die Felder überlagern sich zu einem Gesamtfeld. Die anziehende oder abstoßende Wechselwirkung kann man sich wie eine elastische Feder vorstellen.

Phase	Text	
E1.1	☐ **Magnete, Ladungen und Massen sind Quellen von Feldern**. Dabei erzeugen Magnete ein Magnetfeld, Ladungen ein elektrisches Feld (bzw. auch ein magnetisches Feld, **wenn sie sich bewegen**) und Massen ein Gravitationsfeld. Hier sehen wir das am Beispiel eines Stabmagneten.	
	☐ **Gleiche Quellen**, wie z. B. zwei Magnete, **wechselwirken miteinander über ihre Felder.** Dabei **überlagern sich die beiden Felder** (weil sie ja unendlich weit ausgedehnt sind) zu einem **Gesamtfeld.** Dann spielen die einzelen Felder keine Rolle mehr und wir **interessieren uns nurnoch für das Gesamtfeld**.	
	☐ Das **Gesamtfeld** tendiert dann entsprechend der Wechselwirkung dazu sich **entweder zusammenziehen oder zu ausdehnen.** Die Wechselwirkung zwischen den Quellen kennen wir auch als **Kraft**.	

Beispiel Stabmagnete (1.1a):

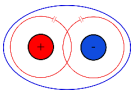


E1.1

☐ Skizze Gesamtfeld Stabmagnete

☐ Jeder **(Stab-)Magnet** ist Quelle eines Magnetfeldes. Bei zwei Stabmagneten überlagern sich die zwei Magnetfelder zu einem Gesamtfeld. Die **einzelne Felder spielen dann keine Rolle** mehr und es gibt quasi **nur noch ein gesamtes Feld**. In dem Fall, dass sich die beiden Pole abstoßen, haben wir also eine abstoßende Wechselwirkung und das **Gesamtfeld tendiert dazu, sich auszudehnen.**

Beispiel Ladungen (1.1b):



E1.1

☐ Das Prinzip funktioniert genauso für anziehende Kräfte, die Felder überlagern sich immer. Hier haben wir z. B. eine positive und eine negative Ladung. Beide sind Quelle eines elektrischen Feldes.Die beiden Felder überlagern sich zu einem **Gesamtfled, das sich** — da beide unterschiedlich geladen sind und sich somit anziehen — **zusammenzieht**.

☐ Wichtig ist: Es ist egal, ob wir ein **abstoßendes** Feld (wie bei den Magneten) **oder ein anziehendes Feld** (wie bei den Ladungen) haben; die **Felder überlagern sich immer**. Und: in einem idealen Raum (wenn das Feld nicht gestört wird) überlagern sich die Felder auch in weitem Abstand, wie bei Erde und Satellit.

☐ Das Prinzip der Überlagerung funktioniert für **alle Felder**, also egal ob magnetisch, elektrisch oder Gravitation. Schauen wir uns dazu zwei konkrete Beispiele an.

B1.1 ☐ Wie findest du diese Erklärung? Macht das für dich Sinn?

P1.1 ☐ Kannst du mir das, was du gerade gehört hast, nochmal zusammenfassen?

A1.1a

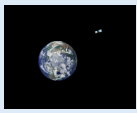
Quelle und Gesamtfeld bei geladenen Luftballons [Skizze]



☐ Schauen wir uns zwei Luftballons an, die man zuvor an den Haaren gerieben hat und die sich dadurch elektrostatisch negativ aufladen. Kannst du mir beschreiben, wie sich hier das Feld aus den Quellen ergibt?

A1.1b

Quelle und Gesamtfeld bei Satellit und Erde [Skizze]



☐ Hier haben wir einen Satelliten, der sich in einer bestimmten Entfernung von der Erde befindet. Schauen wir uns nun das Gravitationsfeld der beiden an. Wir wissen, dass in einem Gravitationsfeld eine anziehende Kraft wirkt und das Feld ergibt sich analog zu dem Feld von Magneten und Ladungen.

Kannst du mir beschreiben, wie sich hier das Feld aus den Quellen ergibt?

1.2 Energie im Gesamtfeld und Energieübertragung

Konzeptideen: Das Gesamtfeld trägt Energie. Diese Energie kann in das Feld oder aus dem Feld übertragen werden, z.B. in Bewegungsenergie.

Phase	Text
	Abstoßende Magnetwägen (1.2a)
E1.2	☐ Video abstoßende Magnetwägen ☐ Wir haben hier **zwei Magneten auf Wägen in abstoßender Konstellation**. Sie werden gerade noch zusammengehalten. Was passiert wohl, wenn ich sie loslasse? Sie fahren auseinander. Die Frage ist nun: **Woher war vorher die Bewegungsenergie, die sie am Ende haben, wenn sie sich voneinander entfernen?** ☐ **Ein Magnet ist Quelle eines Magnetfeldes**. Die beiden **Magnetfelder überlagern sich zu einem Gesamtfeld**. Hier stoßen sich die beiden Magnete ab, das heißt wir haben eine **abstoßende Wechselwirkung**, also ein **Gesamtfeld, das sich ausdehnt**. ☐ Und jetzt kommt der für unseren Ansatz entscheidende Punkt: **Dieses Gesamtfeld trägt Energie**. Wichtig dabei ist zu wissen, dass die **Energie immer NUR im Gesamtfeld mit der Wechselwirkung steckt, also in der Überlagerung**. NICHT die Einzelfelder der Quellen tragen Energie, sondern erst die **Konstellation als Überlagerung**, also das Gesamtfeld. ☐ Das Gesamtfeld trägt also Energie und diese kann **aus dem Feld in Bewegungsenergie übertragen werden**. Wenn man die beiden Magnetwägen also loslässt, dann gibt das Feld Energie an die Bewegung der beiden Magnetwägen ab.

	Abprallende Magnetwägen (1.2b)
E1.2	☐ Video abprallende Magnetwägen ☐ Schauen wir uns dazu noch an, was passiert, wenn die Magnetwägen aufeinander zufahren: Hier fahren jetzt die beiden Magnetwägen von gerade aufeinander zu, weil sie angestoßen wurden. Sie haben also Bewegungsenergie. Jeder Magnet hat als Quelle ein Magnetfeld und die beiden Felder überlagern sich (weil die Felder den gesamten Raum durchdringen) zu einem **Gesamtfeld; das trägt grundsätzlich Energie**. Wenn die beiden Wägen nun aufeinander zu fahren, wird Energie aus der Bewegung der Magnete in das Feld übertragen, bis sie in der Mitte keine Bewegungsenergie mehr besitzen. Da hat dann das **Gesamtfeld die gesamte Energie aufgenommen**. Da das **Feld nach wie vor** aufgrund der abstoßenden Wechselwirkung dazu tendiert, sich **auseinanderzudrücken**, überträgt es (sobald es die gesamte Energie hat) die **Energie zurück in die Bewegung** der Magnetwägen; sie werden wieder schneller. ☐ **Genauso funktioniert das mit allen Feldern**: **Ein Gesamtfeld kann Energie aufnahmen oder abgeben.** Dabei nimmt das Feld Energie aus einer Bewegung auf oder gibt Energie in die Bewegung ab.
B1.2	☐ Wie findest du diese Erklärung, ist sie plausibel?
P1.2	☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal wiedergeben?
A1.2a	Luftballons stoßen sich ab [Video] ☐ Hier haben wir wieder die beiden Luftballons. Wenn ich den einen näher an den anderen bringe, dann bewegt sich dieser weg; er erhält also Bewegungsenergie. Aber wo kommt die her?

Satellitenbewegung um die Erde [Simulation]

A1.2b

☐ Wir sehen hier den Satelliten von eben, wie er sich um die Erde bewegt. Da er sich auf einer Ellipse bewegt, gibt es einen Punkt wo er der Erde am nächsten ist und einen, an dem er am weitesten weg ist. Vom entfernten Punkt zum nächsten Punkt wird er dabei schneller. Woher erhält er die zusätzliche Bewegungsenergie?

Hinweis: Denk daran, dass wir hier am Anfang (ähnlich zu den Magneten und Luftballons) auch ein Gesamtfeld haben. Wie ergibt sich dieses Gesamtfeld aus den Quellen und was passiert mit der Energie?

1.3 Indikatoren für Feldveränderung und Energieübertragung

Konzeptideen: Wenn Energie in ein oder aus einem Feld übertragen wird, dann verändert sich das Feld. Das merkt man das daran, dass…

1. sich eine Bewegung verändert.
2. sich ein Feld zusammenzieht oder auseinanderdrückt.
3. der Abstand der Quellen sich ändert.

Wenn etwas **entgegen der Wechselwirkung, d. h. entgegen der Tendenz des Feldes,** geschieht, dann nimmt es Energie auf; wenn das Feld sich **entsprechend in Richtung der Wechselwirkung** verändert, dann gibt es Energie ab. Es verändert sich (sofern man es lässt) also immer zu einem Zustand minimaler Energie.

☐ Da nur ein Gesamtfeld Energie trägt, ist es in Ordnung, wenn man bei Erklärungen **einfach „das Feld" sagt**. Gemeint ist dabei immer die Konstellation von zwei Quellen und der Überlagerung ihrer Felder.

☐ Wir haben gerade bei den Feldern von Magneten, Ladungen und Erde-Satellit gesehen, dass Energie in ein oder aus einem Feld übertragen werden kann. Das heißt das Gesamtfeld gibt Energie ab oder nimmt Energie auf. Nun wollen wir uns überlegen, woran man das erkennt bzw. **wann denn ein Feld Energie aufnimmt und wann es sie abgibt.**

☐ **Grundsätzlich gibt es drei Indikatoren, an denen man das erkennt:**

1. Eine Bewegung verändert sich, d. h. etwas wird schneller oder langsamer.
2. Der Abstand von Quellen ändert sich, d. h. ein Feld dehnt sich aus oder zieht sich zusammen.
3. Immer dann, wenn ein Feld sich in Richtung der Wechselwirkung (Kraft) verändert, gibt es Energie ab. Wenn es sich entgegen der Wechselwirkung verändert, nimmt es Energie auf.

E1.3

Abprallende Magnetwägen

☐ Schauen wir uns dazu nochmal das Beispiel mit den umkehrenden Magnetwägen von gerade an: Wenn die Magnete aufeinander zu fahren, **werden sie durch die abstoßende Wechselwirkung langsamer** und geben deshalb **Energie an das Feld** ab. **Das Feld nimmt also Energie aus ihrer Bewegung auf**. Dabei sieht man: Das Feld dehnt sich aus; der **Abstand** der beiden Magnete (Quellen) **vergrößert sich entsprechend der Wechselwirkung**. Wenn es aber durch die Bewegung der Magnete entgegen der Wechselwirkung zusammengedrückt wird, nimmt es Energie auf. Das geschieht, bis die Magnetwägen in der Mitte all ihre Energie aus der Bewegung an das Feld abgegeben haben. Dann hat das Feld die gesamte Energie aufgenommen. Da es aufgrund der abstoßenden Wechselwirkung nach wie vor die Tendenz hat, sich auseinanderzudrücken, kehren die Magnetwägen wieder um und werden schneller. Dabei erhält ihre Bewegung Energie aus dem Feld. **Das Feld gibt also Energie ab, wenn es die Möglichkeit dazu hat**.

☐ Wir lernen dabei, dass ein Feld (egal welches) bei **Veränderungen in Richtung der Wechselwirkung** immer Energie abgibt; also, wenn sich ein abstoßendes Feld ausdehnt oder ein anziehendes Feld zusammenzieht.

	☐ Wenn es sich andererseits entgegen der Wechselwirkung verändert, dann nimmt es Energie auf. ☐ Es strebt also immer zum **Zustand minimaler Energie**. Als Folge davon ändert sich eine Bewegung und der Abstand der Quellen (da sie sich bewegen).
B1.3	☐ Wie findest du diese Erklärung? Ist das plausibel?
P1.3	☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal wiedergeben? Nachfragen: ☐ Wann nimmt ein Feld Energie auf und wann gibt es sie ab?
A1.3a	Luftballons ☐ Wenn wir uns nochmal die beiden Luftballons ansehen; woran erkennt man hier, dass das Feld Energie abgibt?
A1.3b	Satellitenbewegung ☐ Wenn wir uns nochmal die Bewegung des Satelliten ansehen; woran erkennt man hier, dass das Feld Energie abgibt?

Z1.3	**Zusammenfassung** 1) Magnete, Ladungen und Massen sind **Quellen** von magnetischen, elektrischen oder Gravitationsfeldern. Zwei Quellen **wechselwirken über ihre Felder** miteinander und die Felder überlagern sich zu einem **Gesamtfeld**. Dieses strebt dazu, sich je nachdem, ob wir eine anziehende oder abstoßende Wechselwirkung haben, immer **zusammenziehen oder auszudehnen**. 2) Das **Gesamtfeld trägt immer Energie**. Dabei kann Energie in ein Feld oder aus einem Feld in Bewegungsenergie übertragen werden, also ein **Feld Energie aufnehmen oder abgeben**. 3) Wenn Energie in ein oder aus einem Feld übertragen wird, dann **verändert sich das Feld**. Das merkt man das daran, dass… i. sich eine Bewegung verändert. ii. der Abstand der Quellen sich ändert und sich ein Feld ausdehnt oder zusammenzieht. iii. das Feld bei Veränderung in Richtung der Wechselwirkung Energie abgibt und entgegen der Richtung der Wechselwirkung Energie aufnimmt. Es tendiert also zu einem Zustand minimaler Energie.
A1.3c	Fallender Ball ☐ Stell dir vor du lässt einen Ball fallen. Von oben nach unten erhält er Bewegungsenergie. Wo war die vorher? **Hinweis**: Denk daran, dass wir hier (ähnlich zu den Magneten und Luftballons) auch ein Gesamtfeld haben, aus dem die Energie kommt. Überleg dazu, warum der Ball nach unten fällt und was die beiden Quellen sind. Woran erkennt man hier, dass das Feld Energie abgibt?

Hauptidee 2: Es gibt nur Feldenergie und Bewegungsenergie. Dies gilt immer und überall (makro- & mikroskopisch sowie fächerübergreifend).

2.0 Einleitung „Nur Feldenergie und Bewegungsenergie“

Wie wir bisher gesehen haben, gibt es also Energie in Feldern und Energie in Bewegungen. Aber wie hängt das jetzt mit den Energieformen zusammen, die wir aus der Schule kennen?

Die Antwort darauf ist einfach und zentral für den Ansatz: **Es gibt in Wirklichkeit keine anderen Energieformen, sondern immer nur Feldenergie und Bewegungsenergie**. Das heißt, man kann alle Energieformen, die wir so kennen, auf Felder und Bewegungen zurückführen.

Schauen wir uns dazu die Beispiele vom Anfang an:

a) Bei der **Achterbahn** wird potenzielle Energie in Bewegungsenergie umgewandelt, würde man nach dem traditionellen Ansatz aus der Schule sagen. Die Frage ist aber: Was ist denn eigentlich die **potenzielle Energie?** Wie wir bei den Beispielen von **Satellit und Erde** sowie dem fallenden Ball gesehen haben, ist die Energie, die dabei in Bewegung übertragen wird die Energie, die das **Gravitationsfeld** abgibt. Das ist hier bei der Achterbahn genauso. Also wenn der Wagen von oben herunterfährt, dann gibt das Gravitationsfeld (also die Überlagerung der Felder von Wagen und Erde) einen Teil seiner Energie an die Bewegung ab. Dabei wird der Wagen schneller und **das Feld zieht sich zusammen**; der Wagen nähert sich der Erde.

b) Beim **Kernkraftwerk** funktioniert das ähnlich: Wir erhalten **elektrische Energie**, die vorher in nuklearen Prozessen frei wurde. Die Energie, die wir nutzen, ist elektrische Energie, oder - mit Feldern ausgedrückt – **Energie im elektrischen Feld der Ladungen in unseren Kabeln und Geräten**. Die Energie hat das elektrische Feld aus den nuklearen Prozessen im Kraftwerk aufgenommen, wo entsprechend **Energie von einem anderen Feld abgegeben** wurde. Welches Feld das genau ist, und wie man den Ansatz auch auf der **atomaren und nuklearen Ebene** verstehen kann, wollen wir uns im Folgenden anschauen.

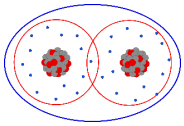
2.1 Überall: Mikrokosmos und andere Fächer

Konzeptideen: Energie kann auf jeder Skala in (auch mikroskopischen) Feldern gespeichert sein. Das gilt überall in unserer Welt, also in allen Bereichen/Fächern (Biologie und Chemie). Die Minimierung von Feldenergie sorgt für die Bindung von Atomen.

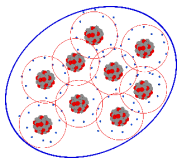
E2.1

Schleuder

- ☐ Schauen wir uns dazu zunächst ein Alltagsbeispiel an: Eine elastische Schleuder. Wenn man einen Ball in eine Steinschleuder spannt und dann loslässt, so fliegt der Ball davon. Dabei erhält er **Bewegungsenergie. Aber wo kommt die her?**
- ☐ Sie kommt aus dem Band der Schleuder. Traditionell würde man sagen hier wird **Spannenergie** umgewandelt. Wir wissen aber nach unserem neuen Ansatz, dass es nur Bewegungsenergie und Feldenergie gibt. Also ist die Frage: **Wo finden wir hier eine Bewegung oder ein Feld?**



- ☐ Wenn wir uns die Schleuder genauer ansehen, dann wissen wir, dass sie aus **Atomen** besteht, welche durch die Überlappung ihrer elektrischen Felder ein elektrisches Gesamtfeld haben. Dieses **Gesamtfeld trägt Energie**. Wenn man nun das Band der Schleuder spannt, dann zieht man das Gesamtfeld der Atome auseinander. Jetzt haben wir aber gelernt, dass ein Feld, immer wenn die Möglichkeit hat, seine **Energie minimiert**. Das ist auch der Grund dafür, dass Atome sich z. B. zu **Festkörper** binden und **nicht einfach auseinanderfallen**. Denn um so einen Festkörper, wie beispielsweise eine Schleuder, zu verändern, muss man zunächst Energie in das Feld stecken, damit man es verändern kann. Ohne dem Feld also Energie von außen zuzuführen, wird es sich nicht verändern und damit ist der Festkörper stabil. Das kennen wir als **Bindung** bzw. **Bindungsenergie.**



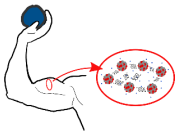
- ☐ Festkörpermodell zeigen
- ☐ Also immer, wenn wir die Konstellation von Atomen verändern, müssen wir zunächst Energie in das elektrische Feld stecken, weil wir es entgegen seiner anziehenden Wechselwirkung verändern. Das machen wir, wenn wir die Schleuder spannen. Wenn man die gespannte Schleuder dann loslässt, zieht sich das Feld wieder zusammen und die Energie wird frei. Das Band gibt diese **Energie dann an die Bewegung des Balls** ab.

☐ Wir sehen also hier **zwei Dinge**: Erstens, dass es **nur Bewegungsenergie und Feldenergie** gibt — in diesem Fall makroskopische Bewegung des Balles und Energie im **mikroskopischen Feld der Atome** — und zweitens, dass die Bindung von Atomen dadurch zu Stande kommt, dass das elektrische Feld der Atome seine Energie minimiert. Um einen Festkörper zu verändern muss man also zunächst Energie hineinstecken, quasi als **Auslöser**.

☐ Wir haben also die uns bekannten Energieformen **Spannenergie bzw. Verformungsenergie** und **Bindungsenergie** auf Feldenergie eines mikroskopischen elektrischen Gesamtfeldes der Atome zurückgeführt.

Muskelkontraktion

E2.1



☐ Schauen wir uns dazu noch ein Beispiel an, bei dem das ähnlich funktioniert: Die Muskelkontraktion des Menschen. Stell dir vor du wirfst einen Ball. Der Ball erhält dabei (genauso wie bei der Schleuder) Bewegungsenergie. Diese **muss aus einer anderen Bewegung oder einem Feld kommen, aber wie?**

☐ Dazu kann man sich überlagern, wie eine Muskelkontraktion funktioniert. Dabei laufen **im Körper chemische Reaktionen** ab, bei denen Moleküle, also **Konstellationen von Atomen**, **umgebaut** werden. Dieser Umbau ändert die Konstellation der Atome untereinander und damit ihr **Gesamtfeld**. Die Energie, die das Feld abgibt, wird in die Bewegung des Armes bzw. der Hand und damit an die Bewegung des Balles übertragen. Dazu braucht es (ähnlich wie beim Loslassen der Schleuder) ein **Auslöser**, hier das Signal unseres Gehirns für das „Wegwerfen". Mit diesem Auslöser laufen dann die Reaktionen ab, bei denen sich die chemischen Verbindungen und damit die atomaren Strukturen ändern und das Gesamtfeld die **Energie abgeben kann**. Dem Feld wird dann also ermöglicht, seine Energie weiter zu minimieren. Diese Energie wird dann in die makroskopische Bewegung des Armes und damit des Balles übertragen.

Das ist auch der Grund dafür, warum wir unserem Körper **immer wieder Nahrung**, also **neue chemische Verbindungen**, zuführen müssen, damit er seine Körperfunktionen aufrechterhalten kann. Denn ohne die neuen Moleküle kann keine Feldenergie mehr aus der Veränderung von Atom-Konstellationen bei chemischen Prozessen frei werden.

B2.1 ☐ Wie findest du diese Erklärung? Ist sie plausibel?

P2.1a ☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal wiedergeben?

P2.1b ☐ Warum gibt es gebundene Zustände, also warum fällt z. B. unsere Schleuder nicht auseinander?

Automotor

A2.1a ☐ Stell dir vor du sitzt im Auto und fährst los. Dabei wird Energie in die Bewegung des Autos übertragen. Aber wo kommt die hier? Wir wissen, dass das Auto durch die Verbrennung von Treibstoff angetrieben wird. Kannst du erklären, woher dabei die Energie kommt?

Explosion

A2.1b



☐ Stell dir vor du beobachtest eine Explosion. Dabei fliegen die Einzelteile des Materials weg; woher kommt ihre Bewegungsenergie?

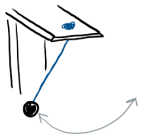
Zusammenfassung

Z2.1 Wir haben nun gelernt, dass es nur Bewegungsenergie und Feldenergie gibt und dass dies nicht nur makroskopisch, sondern auch mikroskopisch gilt. Wir haben also gesehen, dass es **auf jeder Ebene** so geht; **aber gilt das auch immer?** Schauen wir uns noch ein paar Beispiele dazu an, um das etwas weiter zu überprüfen.

2.2 Immer: Thermische Energie und Elektromagnetische Strahlung

Konzeptideen: Thermische Energie ist mikroskopische Bewegungs- bzw. Feldenergie und elektromagnetische Strahlung ist Feldenergie.

☐ Wie ist das eigentlich bei **thermischer Energie**? Wie kann man das in unseren Ansatz einordnen?



Dazu schauen wir uns die Bewegung eines Pendels an. Das Pendel schwingt raus und runter. Dabei wird ständig Energie aus dem Gravitationsfeld von Kugel und Erde in die Bewegung der Kugel übertragen und wieder zurück. Aber da der Prozess **nicht ganz reibungsfrei** von statten geht, wird das Pendel mit der Zeit immer weniger hoch kommen bzw. immer langsamer, bis es irgendwann stehen bleibt. Der Grund dafür ist die **Reibung in der Luft sowie an der Aufhängung**. Aber wo genau geht die Energie hin, die dann weder im Gravitationsfeld noch in der Bewegung der Kugel steckt? Nach unserem Ansatz muss sie in einem Feld oder in einer Bewegung sein, die wir **offenbar auf den ersten Blick nicht sehen**. Nun haben wir aber gerade zuvor gelernt, dass es auch mikroskopische Felder und Bewegungen gibt, nämlich die der **Teilchen, aus denen die Materie besteht. Schauen wir da also genauer nach:**

E2.2.1

☐ Video Luftreibung

☐ Zunächst in der Luft. Dort stößt das Pendel ständig mit den Luftatomen und versetzt diese dabei in Bewegung. Ein Teil der Energie von vorher wird also in die **mikroskopische Bewegung** der **Luftatome** übertragen. Wir kennen das auch als thermische Energie.

☐ Video Halterung

☐ Der andere Teil der Energie geht durch Reibung in die Aufhängung. Dort reibt die Schnur des Pendels permanent am Material der **Halterung**. Dabei stößt die Schnur ständig mit den Atomen der Halterung, welche dadurch in Bewegung versetzt werden. Die Bewegungsenergie der Atome kennen wir auch als thermische Energie und merken diese durch z. B. Angreifen der Halterung. Wir können dann spüren, dass sie sich an der Stelle, wo die Schnur gerieben hat, leicht erwärmt wurde. Immer wenn etwas warm wird, kann man das dadurch erklären, dass die Atome sich schneller bewegen **(mikroskopische Bewegungsenergie)**.

B2.2.1 ☐ Wie findest du diese Erklärung? Macht das für dich Sinn?

P2.2.1 ☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal zusammenfassen?

A2.2.1a

Kugelbahn [Video]

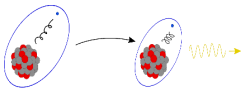
☐ Hier siehst du eine Kugel, die auf einer Metallbahn hin und her rollt. Nach einer Weile bleibt sie unten stehen. Wo ist die Energie hin, die sie am Anfang noch in ihrer Bewegung hatte?

A2.2.1b

Erwärmung von Nahrung

☐ Stell dir vor du erwärmst Nahrung. Ungeachtet des Prozesses wie das gemacht wird — was passiert in der Nahrung, wenn sie warm wird; was passiert hier, wenn man die Energie betrachtet?

2.2.2 Elektromagnetische Strahlung



E2.2.2

- ☐ Wir wollen uns noch eine weitere Energieform anschauen, die man mit diesem Ansatz einbetten kann: die Strahlungsenergie der elektromagnetischen Strahlung.
- ☐ Dazu stellen wir uns vor**, wie denn eigentlich elektromagnetische Strahlung (also z.B. Licht) entsteht:** Wenn man ein Atom betrachtet, dann haben wir dort den Kern und die Elektronen, die sich um diesen bewegen. Da sowohl der Kern als auch die Elektronen **elektrisch geladen** sind, haben sie ein elektrisches **Gesamtfeld, das Energie trägt**. Wegen der Bewegung der Elektronen haben wir gleichzeitig auch ein magnetisches Feld. Wenn sich dann die **Konstellation** eines Elektrons und dem Kern **verändert**, dann verändern sich auch die Felder. Dabei zieht sich das Feld in Richtung der Wechselwirkung zusammen und gibt Energie ab. Diese Energie muss irgendwo hin und – in der Tat – wir beobachten, dass das Atom elektromagnetische Strahlung, z.B. als Licht, abstrahlt. Diese Strahlung trägt also die abgegebene Energie. Nun ist die Frage**: Ist dies Feldenergie oder Bewegungsenergie?**
- ☐ Auf den ersten Blick könnte man ja meinen, dass es sich um Bewegungsenergie handelt, da sich das Licht bewegt. Allerdings ist das **Licht** im **Gegensatz zu bewegenden Objekten kein Teilchen,** denn es besitzt **keine Masse.** Es ist vielmehr eine **Überlagerung des abgestrahlten elektrischen und magnetischen Feldes**. Das bedeutet, dass die elektromagnetische Strahlung, so wie der Name sagt, ein elektromagnetisches Feld ist und dementsprechend **Feldenergie** trägt.
- ☐ Auch wenn elektromagnetische Strahlung in **gebündelter** Form, z. B. einem **Lichtstrahl oder Laserstrahl**, vorkommt, so ist es immer noch **Feldenergie**, nur eben **gebündelt**.
- ☐ **Auf Nachfrage:** Das Gleiche gilt für das Photon, denn dieses ist nichts anderes als die kleineste Einheit Feldenergie. Im Gegensatz zu Objekten mit Bewegungsenergie hat dieses aber — genau wie der Lichtstrahl — keine Masse, also auch keine Bewegungsenergie, sondern nur Feldenergie.

Beispiel Mikrowelle:

Schauen wir uns dazu das Beispiel mit der **Mikrowelle** von eben an. Dabei hat die Bewegung der Atome der Nahrung Energie erhalten. Diese muss irgendwo herkommen: Wenn man die Mikrowelle einschaltet, dann erzeugen wir ein elektromagnetisches Feld (die Mikrowellen), das dann Feldenergie trägt und die Mikrowelle und damit auch die **Nahrung durchsetzt.** Wenn dieses Feld dann mit der Nahrung wechselwirkt, dann werden die Atome der Nahrung zur **Bewegung angeregt** und erhalten dabei ihre Energie. Diese Energie gibt das elektromagnetische Feld der Mikrowelle ab.

B2.2.2 ☐ Wie findest du diese Erklärung? Ist das plausibel?

P2.2.2 ☐ Kannst du das, was wir gerade gelernt haben nochmal zusammenfassen?

A2.2.2a

Laser [Bild]



☐ Betrachten wir einmal diesen Laser hier. Hinweis: Wir wissen ein Laser ist nur ein starker Lichtstrahl. Dieser verformt hier das Metall und zerschneidet es dabei. Kannst du erklären, von wo nach wo hier Energie übertragen wird?

A2.2.2b

Solarzelle [Bild]



☐ Kannst du erklären, welche Energieübertragung beim Betrieb einer Solarzelle stattfindet — also wo wir Energie vorher und wo nachher haben?

Zusammenfassung

Z2.1 Wir haben jetzt gelernt, dass auch die Energieformen **thermische Energie und Strahlungsenergie** auch auf Energie in Bewegungen oder Feldern zurückzuführen sind. Teilweise muss man dafür tiefer in die Materie hineinschauen, aber **spätestens auf der mikroskopischen Ebene finden wir eine Erklärung.**

Überleitung

Wir haben jetzt einige Energieformen auf Bewegungsenergie und Feldenergie zurückführen können. Unser Ansatz, dass es nur diese beiden Arten von Energie gibt und man damit alle Phänomene erklären kann, scheint also so weit Sinn zu ergeben. Um dies noch weiter zu überprüfen, wollen wir uns nun als letzten Punkt noch den Zusammenhang mit der Masse ansehen.

Beispiel CERN:



Ich habe bereits erwähnt, bei **Kollisionsversuchen** im LHC am CERN neue Teilchen entstehen; „quasi aus dem Nichts". Natürlich geht das nicht so einfach, denn die Teilchen habe eine Energie, die nicht aus dem Nichts entstehen kann, sondern aus der Energie der Protonen kommt, die dabei sehr schnell aufeinander geschossen werden. Wie genau funktioniert es, dass Teilchen und deren Masse nur aus Energie entstehen können? Dazu wollen wir und im Folgenden anschauen, wie Energie und Masse zusammenhängen, und wie man dies in unserem Ansatz mit Feldenergie und Bewegungsenergie verstehen kann.

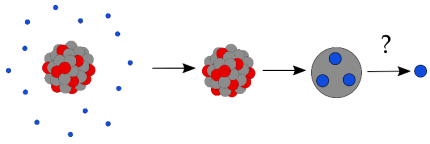
Hauptidee 3: Unsere Welt besteht nur aus Feldern und Bewegungen. Bei der Änderung von Masse wird Energie zwischen Feld und Bewegung übertragen.

3.1 Quarkfeld

Konzeptideen: Unsere Masse ist hauptsächlich Energie, und zwar Feldenergie. Diese steckt im Feld der Quarks in den Atomkernen.

E3.1

- ☐ Ein einfaches Beispiel, um sich über die Masse Gedanken zu machen ist die Waage. Wenn wir uns **morgens auf die Waage stellen**, dann erfahren wir unsere Masse. Wie finden wir heraus, ob diese nun auch Energie ist bzw. wenn das so ist; ist sie dann Feldenergie oder Bewegungsenergie?



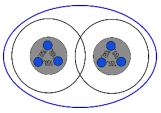
- ☐ Um zu verstehen, wo unsere Masse und auch die Masse der am LHC erzeugten Teilchen herkommt schauen wir nun etwas tiefer **in die Materie** hinein. Wir bestehen aus Molekülen, die wiederum aus Atomen bestehen. Die Atome bestehen aus Elektronen und einem Atomkern. Der Atomkern ist im Vergleich zu den Elektronen viel schwerer, das heißt unsere Masse kommt hauptsächlich durch die Masse unserer Atomkerne zu Stande. Die Atomkerne wiederum bestehen aus Nukleonen, den Protonen und Neutronen. Die Masse all dieser Nukleonen macht unsere Masse aus. Aber wenn man nun noch weiter hineinschaut, dann sieht man, dass die **Protonen und Neutronen aus Quarks** bestehen. Diese sind **Elementarteilchen** und (zumindest soweit wir das bis heute wissen) neben den Elektronen die kleinsten unteilbaren Teilchen unserer Welt. Jedes Proton und Neutron besteht aus drei Quarks. Nun würde man also vermuten, dass die **Masse der drei Quarks** zusammen die Masse eines Protons oder Neutron ergibt. Das ist aber nicht so. Die Quarks machen nur maximal 10 Prozent der Masse eines Nukleons aus. **Wo kommen also die restlichen 90 Prozent, also der Hauptanteil der Masse eines Protons oder Neutrons und damit von uns her?**

E3.1

☐ Die Antwort ist tatsächlich das, was wir gesucht haben, nämlich **Energie**. Die **Quarks sind nämlich Quellen eines Feldes, das wir noch nicht kennen, das sogenannte Quarkfeld**. Das funktioniert genauso wie die Felder, die wir schon kennen. Jedes Quark ist also Quelle eines Feldes, die sich dann zu einem Gesamtfeld überlagern. Und in diesem **Gesamtfeld**, dem Quarkfeld, steckt Energie. Nach Einstein, also wegen $E = m c^2$, ist **Energie gleich Masse** und die fehlenden 90 Prozent unserer Masse ist in Wirklichkeit Energie, die im Quarkfeld steckt. Das Besondere hier ist also, dass sich die Feldenergie als Masse äußert.

☐ Mit Hilfe dieser Energie kann man auch verstehen, warum Kerne nicht auseinanderfallen. Denn die positiven Protonen im Atomkern stoßen sich einander ab. Dadurch, dass sich die Quarkfelder der Nukleonen im Kern aber überlagern und die **Energie des Quarkfeldes minimiert** ist (ähnlich wie wir das auch von der **Bindung** der Atome kennen), fällt der Kern nicht auseinander, sondern ist stabil. Das nennt man auch die **Bindungsenergie** des Kerns.

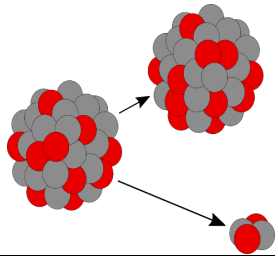
☐ Wenn sich dann ein Atomkern z. B. durch einen **äußeren Einfluss (einen Auslöser)** verändert und das Feld in einen **Zustand mit noch weniger Energie** übergehen kann, dann ändert sich das **Quarkfeld** und **gibt Energie ab**. Diese Energie wird dann in diesem nuklearen Prozess frei. Man merkt das auch dadurch, dass die Masse geringer wird; man nennt das den **Massendefekt**.



☐ Also immer, wenn sich in einem Prozess die Masse eines Kerns ändert und scheinbar Masse verliert (Massendefekt), dann ändert sich in Wirklichkeit das Quarkfeld und seine Energie. Die Energie, die das Feld abgibt, bemerken wir dann als Abgabe von Masse: Es geht scheinbar Masse verloren.

Beispiel Alpha-Zerfall

☐ Ein Beispiel dafür ist der **Alpha-Zerfall**. Dabei gibt ein Atomkern ein Alpha-Teilchen ab, also zwei Protonen und zwei Neutronen, und wird dadurch zu einem kleineren Kern. Das Alpha-Teilchen hat dabei Bewegungsenergie. Die Frage ist nun, wo kommt die her?



E3.1

☐ Antwort: Aus dem **Massenunterschied**. Der Kern am Ende und das Alpha-Teilchen zusammen sind leichter als der Kern am Anfang. Das heißt ein Teil der Masse des Kerns am Anfang ist als Energie für die Bewegung des Alpha-Teilchens frei geworden. Diese freiwerdende Energie kommt aus dem **Quarkfeld**. Dadurch, dass sich der **Kern verändert**, ändert sich auch die **Konstellation der Kernbausteine, also der Protonen und Neutronen und damit die Überlagerung der Quarkfelder.** Das Quarkfeld tendiert dazu, seine Energie zu minimieren. Das heißt es gibt Energie ab. Das bemerkt man also als Massenunterschied (wir kennen das auch als Massendefekt) und an der Bewegungsenergie des Alpha-Teilchens.

☐ So sieht man, dass das, was wir aus der Schule als **Massendefekt und Bindungsenergie** kennen, letztendlich auch auf Feldenergie im Quarkfeld zurückgeführt werden kann. Wir haben nun also gesehen, dass man Prozesse, bei denen Masse „verloren" geht, durch die Abgabe von Energie aus dem Quarkfeld beschreiben können. Das geht grundsätzlich bei allen Kernprozessen so.

B3.1

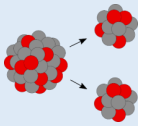
☐ Wie findest du diese Erklärung? Ist das plausibel?

P3.1

☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal zusammenfassen?

A3.1a

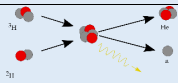
Kernspaltung [Bild]



☐ Wenn ein Kern gespalten wird, dann zerfällt er in zwei kleinere Kerne. Der Auslöser dafür ist, dass der Kern mit einem langsamen Neutron beschossen wird. Der Kern zerfällt daraufhin dann in zwei leichtere Kerne. Diese sind auch in der Summe leichter als der Anfangskern, bewegen sich aber. Warum geht hier scheinbar Masse „verloren" und woher kommt die Bewegungsenergie?

A3.1b

Kernfusion [Bild]



☐ Bei der Fusion werden zwei Wasserstoffkerne zu einem gemeinsamen Kern verschmolzen. Dabei ist der entstehende Heliumkern leichter als die beiden einzelnen zusammen. Zusätzlich bewegt er sich und es entsteht Strahlung (z. B. der Sonne). Warum geht hier scheinbar Masse „verloren" und woher kommt die Bewegungsenergie und die Energie des Lichtes?

3.2 Higgs-Feld

Konzeptideen: Die Masse der Elementarteilchen kommt durch das Higgs-Feld. Dies durchsetzt das gesamte Universum.

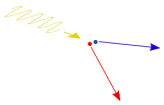
E3.2

☐ Der letzte Aspekt, den wir uns ansehen wollen, ist die Frage, **woher denn nun aber die Masse der Elementarteilchen kommt**. Also die Masse der Quarks selbst und die Masse der Elektronen. Wenn wir diese Frage auch mit der Energie von Feldern oder Bewegungen erklären können, dann scheint unser Ansatz **unsere gesamte Welt** (so wie wir sie kennen) **zu beschreiben**. Also woher kommt die Masse der Elementarteilchen?

☐ Wir haben gelernt, dass **Masse das gleiche wie Energie** ist. Das bedeutet die Masse von Elektronen und Quarks ist im Grunde nur Energie. Und wie zuvor kommt sie durch ein Feld zu Stande; dem **Higgsfeld**. Dies ist ein Feld, das unser **gesamtes Universum durchsetzt** und immer existiert. Durch die **Wechselwirkung der Elektronen und Quarks mit dem Higgsfeld** erhalten diese Teilchen (auch wenn sie sich nicht bewegen) ihre **Ruheenergie.** Diese Energie ist ihre **Masse**. Das Higgsfeld ist also notwendig, damit die Elementarteilchen ihre Masse bekommen. Auf diese Weise kann man die Masse der Elementarteilchen, also deren Energie, auf das fundamentale **Higgsfeld** zurückführen.

Beispiel Paarerzeugung

☐ Schauen wir und ein Beispiel an, wo das eine Rolle spielt: Zum Beispiel bei der **Entstehung von Elementarteilchen**. Da wir nun wissen, dass Energie gleich Masse ist, kann man **mit ausreichend Energie aus Bewegungen oder Feldern auch Teilchen mit Masse erzeugen**. Wenn man zum Beispiel zwei Lichtbündel, also zwei elektromagnetische Felder, aufeinandertreffen lässt, dann konzentriert sich deren Feldenergie im Treffmoment und wir haben Energie im Gesamtfeld, die theoretisch auch in andere Feldenergie oder Bewegungsenergie übertragen werden kann. So kann sich zum Beispiel **die Energie auch durch das Higgsfeld als Masse manifestieren** und wir erhalten neue Elementarteilchen. Man beobachtet das zum Beispiel bei der sogenannten Paarerzeugung, wo zwei elektromagnetische Felder in zwei Elementarteilchen, ein



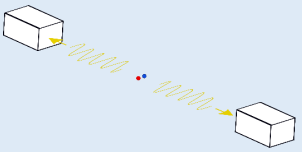
Elektron und ein Positron, umgewandelt werden. Das **Positron ist das Antiteilchen des Elektrons**. Das entsteht deshalb (und nicht noch ein zweites Elektron), weil neben der Energie auch die Ladung erhalten sein muss. Deshalb entstehen ein negativ geladenes Elektron und ein positives Positron.

B3.2 ☐ Wie findest du diese Erklärung? Ist das plausibel?

P3.2 ☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal zusammenfassen?

A3.2a

Annihilation PET [Bild]



☐ In der Medizin wird die PET verwendet, um Tumore im Körper zu lokalisieren. Dazu wird ein radioaktives Präparat verabreicht, das **Positronen** abgibt. Da sich das Präparat hauptsächlich an der Stelle des Tumors anreichert, werden dort besonders viele Positronen an das Gewebe abgegeben. Diese Positronen sind die **Antiteilchen der Elektronen** und vernichten sich mit diesen, wenn sie auf welche Treffen. Wenn ein Positron auf ein Elektron der Atome des Gewebes trifft, dann kommt es dort mit nahezu **keiner Geschwindigkeit** an. Wenn sich dann Positron und Elektron **vernichten**, dann verschwinden sie und damit auch ihre **Masse** und es entstehen zwei elektromagnetische Strahlen, die sich auseinanderbewegen. Wenn man diese misst, dann kann man ihren Weg zurückverfolgen und den Tumor lokalisieren. Aber warum geht das? Wo war hier die Energie der Strahlen vorher (als es noch die Teilchen gab) und wo ist sie am Ende?

A3.2b

CERN-Experiment [Bild]



- ☐ Im LHC am CERN werden Protonen mit hoher Geschwindigkeit aufeinander geschossen. Dabei treffen sie als Teilchen mit besonders großer Bewegungsenergie aufeinander.

  Frage: Welche Energie haben wir insgesamt im Treffmoment, wenn wir diese Situation mit Bewegungsenergie und Feldenergie beschreiben wollen?

- ☐ Die Feldenergie und Bewegungsenergie im Treffmoment kann nun zur Entstehung neuer Elementarteilchen führen, die sich wiederum auch zu größeren Teilchen zusammensetzen können. Beobachten kann man das dann mit Detektoren, welche die einzelnen Teilchen nachweisen.

  Frage: Welche Energie haben wir nach dem Treffmoment, wenn wir diese Situation mit Bewegungsenergie und Feldenergie beschreiben wollen?

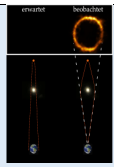
3.3 Zusatz

Zusatzbeispiele

Wir wollen uns nun noch zwei kurze Beispiele ansehen, die nichts mehr mit dem Higgs- oder Quarkfeld zu tun haben. Sie beschäftigen sich beide mit Phänomenen der allgemeinen Relativitätstheorie.

A3.3a

Gravitationslinse [Bild]



Wir schauen uns nun noch ein kurzes Phänomen als Ausblick in die Astronomie an — die **Ablenkung** von Licht an einem schwarzen Loch:

Zwischen unserer Erde und einem weit entfernten Stern liegt ein Schwarzes Loch, z. B. der Kern unserer Galaxie (der Milchstraße). Normalerweise würde man **erwarten, dass das Licht, das dieser Stern aussendet, nicht zu uns gelangen kann**, wenn das schwarze Loch den Weg versperrt. Tatsächlich sieht man aber einen Ring (Einsteinring genannt). Dieser Ring liegt genau in der Blickrichtung des Sterns und entsteht durch das Licht, das von ihm ausgesendet wird. Die Frage ist also: Wie kommt das Licht des Sterns zu uns, wenn er durch das schwarze Loch verdeckt wird? Die Antwort auf die Frage lieferte uns **Einstein** mit seiner heutzutage **gut bestätigten allgemeinen Relativitätstheorie**. Nach dieser Theorie wird das Licht **durch die Gravitation des schwarzen Loches abgelenkt**. Aber wie geht das? Gravitation wirkt doch nur auf Masse und Licht hat doch keine Masse, oder? Hast du eine Idee, wie man das erklären könnte?

A3.3b

Gravitative Rotverschiebung [Bild]



Wir betrachtet nun noch ein letztes Phänomen, bei dem Energie übertragen wird: Die sogenannte **gravitative Rotverschiebung**. Wenn man Lich bzw. einen Laserstrahl von der Erde aus nach oben richtet, dann kann man feststellen, dass die Frequenz der Strahlung kleiner wird, je weiter sich die Strahlung von der Erde entfernt; das Licht wird röter (daher der Name Rotverschiebung). Wenn man sich die Beziehung $\mathbf{E = h \cdot} f$ zwischen Frequenz und Energie der Strahlung anschaut, dann stellt man fest, dass eine Verringerung der Frequenz auch eine Verringerung der Energie bedeutet. Das Licht gibt also Energie ab. Aber wohin „verschwindet“ die Energie? Kannst du hier die Energieübertragung erklären?

Schlussbemerkungen

- ☐ Super! Dann haben wir es auch schon geschafft. Ich weiß das war lang, aber du hast super durchgehalten! Danke, dass du dir die Zeit genommen hast; das hilft mir auf jeden Fall sehr weiter.

Fragen zum Ansatz:

- ☐ Hast du denn das Gefühl, heute etwas gelernt zu haben?
- ☐ Was fandest du interessant bzw. was nicht?
- ☐ Fandest du das Thema insgesamt eher leicht oder eher schwer?
- ☐ Wie hat dir der Ansatz insgesamt gefallen?

Weiteres:

- ☐ Wie sind deine Physiknoten im Durchschnitt?

- ☐ Aufnahme beenden

Vielen lieben Dank nochmal, dass du mitgemacht hast!

Die Urkunde bekommst du selbstverständlich noch zugeschickt.

Mathematisierung des EFA (EFA-M)

Datum: Codebuchstabe Schüler*in: Schule:

Legende: Text, Instruktion, Konzeptideen

Begrüßung

- ☐ Begrüßung, Danke, dass du dir für ein Interview Zeit nimmst!
- ☐ Falls die **Einverständniserklärung** noch nicht unterschrieben vorliegt:

  Gleich vorweg, bevor ich das vergesse: Hast du schon die Einverständniserklärung von deinen Eltern unterschreiben lassen? Kannst du sie mir zeigen?

  [Screenshot machen]
- ☐ Technische Gegebenheiten:
  1. Kannst du mich gut verstehen?
  2. Falls etwas schief geht (z.B. das Meeting beendet wird oder eine*r von uns aus dem Meeting geworfen wird): einfach nochmals beitreten!
  3. Falls etwas akustisch oder inhaltlich unklar ist: einfach nachfragen!
- ☐ **Struktur des Interviews:** Dreischritt; Erklärung, Paraphrase, Aufgabe/Beispiel – so wie du das schon kennst
- ☐ Eigene Notizen zur Orientierung
- ☐ **Aufnahme**: gewöhnliches Audio-Aufnahmegerät wie bereits im ersten Interview; wird am Ende anonym in Text umgewandelt.

  [Aufnahme starten]
- ☐ **Noch Fragen?**

0 Wiederholung erstes Interview

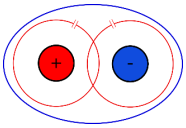
0.1 An was aus dem ersten Interview kannst du dich noch erinnern? – Worum ging es und was waren wesentliche Aspekte?

0.2 Nachfrage zu einzelnen Konzeptideen (falls nicht angesprochen)

Hier werden die Bilder aus dem ersten Interview jeweils als Gedankenstütze gezeigt.

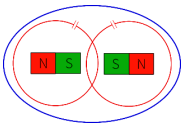
1. Was war das Besondere an dem Ansatz? Welche Energien gibt es bzw. wie haben wir die Energieformen aus der Schule zusammengefasst?

   (Dichotomie)



2. Was hat es mit dem Gesamtfeld auf sich; was weißt du noch darüber? (Gesamtfeld Ladungen und Magnete)

   (Das Gesamtfeld ergibt sich als Überlagerung der Einzelfelder bzw. aus der Wechselwirkung der Quellen.)



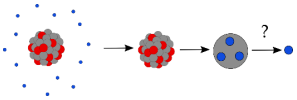
3. Welche Arten von Feldern haben wir kennengelernt?

   (magnetisch, elektrisch, Gravitation, elektromagnetisch, Quark- und Higgsfeld ab v1H)

4. Woran erkennt man, dass Energie zwischen Feldern und Bewegungen übertragen wird; was waren dabei die Indikatoren?

   (Tempo/Geschwindigkeits- und Abstandsänderung) (Satellit und Erde)

5. Wie war der Zusammenhang von Energie und Masse bzw. welche Felder hängen damit zusammen? (ab v1H) (Aufbau Materie & Kernspaltung/-zerfall)



6. Was für Energien sind thermische Energie und Strahlungsenergie im Energie-Feld-Ansatz?

   (mikroskopische Bewegungsenergie bzw. Feldenergie)

0.3 Überprüfung einzelner Kontexte

1. **Magnetwägen**: Von wo nach wo wird Energie übertragen, wenn sich zwei Magnetwägen voneinander abstoßen und beschleunigen? (Video)
2. **Ball-Erde**: Von wo nach wo wird Energie übertragen, wenn ein Ball aus einer bestimmten Höhe auf die Erde fällt?



Wo ist die Energie zu Beginn und wo ist sie am Ende?

Einführung und Motivation

Du lernst heute etwas über den **Zusammenhang des Energie-Feld-Ansatzes (EFA) und den Formeln,** die du **aus der Schule** kennst.

Die Ideen des EFA kennst du bereits aus dem ersten Interview. Nun wollen wir uns anschauen, wie diese Ideen über Energie und Felder mit den Formeln zusammenhängen, um besser zu **verstehen, warum die Formeln so aussehen, wie sie sind**.

Ziel ist es dabei, die Energieübertragung in Phänomenen/Prozessen nicht nur sprachlich zu beschreiben, sondern auch mathematisch. Die Mathematik hat dabei zwei **Vorteile**:

1. Prozesse lassen sich damit **kompakt beschreiben**. So kann man in einer Formel erkennen, **wie** sich Objekte und Felder verhalten werden, also die **Richtung** eines Prozesses.
2. Man kann nicht nur sagen „was passiert“, sondern auch **berechnen**, „in welchem **Ausmaß**“. So kann man z. B. nicht nur begründen, dass ein fallender Ball schneller wird und die Energie seiner Bewegung aus dem Gravitationsfeld der Erde kommt, sondern auch **berechnen**, wie schnell er genau wird.

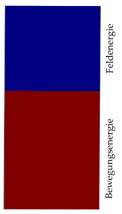
Überblick

Wir wollen heute…

1. an Beispielen, die du bereits kennst, überlegen, warum die zugehörigen dir aus dem Unterricht vertrauten Formeln so aussehen wie du sie kennst.
2. überlegen, wie uns das bei der Beschreibung von Phänomenen hilft.

Hauptidee 1: Darstellung der Energieübertragung im Balkendiagramm

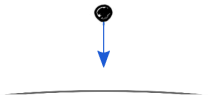
Konzeptideen: Die Summe von Bewegungsenergie und Feldenergie ist immer gleich (konstant; Energieerhaltung).

Phase	Text
E1	☐ Wenn die Energie E zwischen Bewegungen und Feldern übertragen wird, sprechen wir von **Energieübertragung**. ☐ Da die Energie nur in Feldern und Bewegungen steckt, ist die **Energie von Feldern und Bewegungen zusammen immer gleich** groß. Die Gesamtenergie ist also konstant, das ist die Energieerhaltung: $$E_{\text{Feld}} + E_{\text{Bewegung}} = \text{konstant}$$ ☐ Diese Gesamtenergie kann man sich auch **als gefüllten Balken veranschaulichen**, der, wie die Gesamtenergie, immer gleich groß ist und der sich aus einem Teil Bewegungsenergie und einem Teil Feldenergie zusammensetzt. Wird dann in einem Prozess die Energie beispielsweise von einem Feld zu einer Bewegung übertragen, nimmt die Feldenergie ab und die Bewegungsenergie zu. Die Energie verteilt sich dann anders, die Gesamtenergie bleibt aber erhalten. Man kann sich das so vorstellen, dass sich die **Grenze zwischen blauem und rotem Bereich bei der Energieübertragung verschiebt**. 

Beispiel

- ☐ Im Beispiel des fallenden Balles heißt dies, dass das **Gravitationsfeld** abgibt. Diese geht in die **Bewegung des Balles** während er schneller wird.
- ☐ Wenn man dann berechnet, wieviel Energie vom Feld abgegeben wird, dann weiß man auch, wieviel Energie der Ball in seiner Bewegung erhält, denn die **Menge von abgegebener und aufgenommener Energie ist gleich**. Kennt man dann den mathematischen Zusammenhang von Bewegungsenergie und Tempo des Balles, kann man auch berechnen, wie schnell der Ball am Ende ist, wenn er nach seinem Fall aus der Höhe *h* aufprallt:

$$\frac{m}{2} \cdot v^2 = m \cdot g \cdot h$$



aufgenommene Energie **(Bewegung) =** abgegebene Energie **(Feld)**

B1 ☐ Wie findest du diese Erklärung? Macht das für dich Sinn?

P1 ☐ Kannst du das, was du gerade gehört hast, nochmal zusammenfassen?

A1a

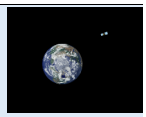
Beispiel zwei Magnetwägen (Video)

Schauen wir uns das Beispiel der zwei abprallenden Magnetwägen noch einmal an.

- ☐ Von wo nach wo wird hier Energie übertragen und wie würde man das mit dem Balkendiagramm veranschaulichen; wie verschiebt sich da die Grenze?

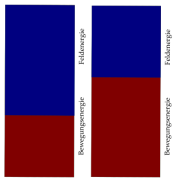
A1b

Beispiel Satellit und Erde (Bild/Video)



- ☐ Wie sieht das bei Satellit und Erde aus, wenn der die Erde umreisende Satellit der Erde näher kommt und dabei schneller wird? Hier wird Energie vom gemeinsamen Gravitationsfeld zur Bewegung des Satelliten übertragen. Wie äußert sich das im Diagramm?
- ☐ Wie kann man dann diese Formel interpretieren?

$$\frac{m}{2} \cdot ({v_{nachher}}^2 - {v_{vorher}}^2) = \left(\gamma \cdot m \cdot M \cdot \frac{1}{r_{nachher}}\right) - \left(\gamma \cdot m \cdot M \cdot \frac{1}{r_{vorher}}\right)$$



vorher nachher

Überleitung

Wir wissen, dass die Gesamtenergie von Feldern und Bewegungen insgesamt immer gleich bleibt und dass die **Zunahme der einen Energie die Abnahme der anderen bedeutet**. In anderen Worten: Wenn Energie zwischen Feld und Bewegung übertragen wird, dann ist die Energie, die das eine abgibt gleich der Energie, die das andere aufnimmt und umgekehrt.

Als nächsten Schritt schauen wir uns die Bedeutung der **Indikatoren Tempo und Abstand der Quellen** an.

Für jedes Feld gibt es eine Formel, welche die Energie genauer beschreibt, wie z. B. $E = m \cdot g \cdot h$ für das Gravitationsfeld. Diese Energie im Gravitationsfeld steigt, wenn der Abstand der beiden Quellen (z. B. Erde und Ball) steigt, also die Höhe größer wird. An der Veränderung des Abstandes kann man also auch erkennen, wie sich die Energie im Feld verändert.

Im Folgenden schauen wir uns an, wie die Formeln für die Energie bzw. Energieübertragung im Detail von den Indikatoren abhängen.

Hauptidee 2: Allgemeine Formelgestalt und Zusammenhang von EFA und traditionellen Energieformeln

Konzeptideen: Formelgestalt für Bewegungsenergie und Feldenergie (Konstanten, Quelleneigenschaften, Abhängigkeit vom Abstand)

E2.1

Formelgestalt Bewegungsenergie

- ☐ Die Bewegungsenergie lässt sich meist durch eine Formel beschreiben, die du bereits als Formel für die kinetische Energie kennst:

$$E = \frac{m}{2} \cdot v^2$$

Dabei ist das ½ nur eine Konstante, die uns nicht weiter interessiert, das m sagt uns, dass nur **Objekte mit Masse** eine Bewegungsenergie haben (also z.B. im Gegensatz zu Licht bzw. Strahlung) und v ist das Tempo des Objektes.

Formelgestalt Feldenergie

- ☐ Die meisten Formeln, die du aus der Schule kennst, sind allerdings Formen potenzieller Energie, also Feldenergie. Für die meisten dieser Formen gibt es **keine einheitliche Formel**, sie folgen aber oft einem **bestimmten Prinzip**:

$$E = (\text{konst.}) \cdot (\text{Quelleneigenschaften}) \cdot Wechselwirkung(\text{Abstand})$$

Dabei gibt es drei Faktoren, welche in den Formeln für die Feldenergie vorhanden sind: **Naturkonstanten** (z. B. G, h, Pi, Zahlen), den **Eigenschaften der Quellen** (e, m, Materialkonstanten) und einem **Wechselwirkungsterm**, in dem die **Abhängigkeit vom Abstand der Quellen** steckt.

- ☐ Die Eigenschaften der Quellen sowie deren Wechselwirkung miteinander haben also Einfluss auf die Energie in diesem Feld.
- ☐ **Nicht immer sind alle drei Terme direkt in einer Formel erkennbar**, man kann sich die Größen in den Formeln aber immer anschauen und **mindestens eine Abhängigkeit von den Quellen und deren Abstand finden**.

E2.2

Beispiel Gravitationsfeld

- ☐ Betrachten wir das Beispiel des fallenden Balles und die Formel für die Energie aus dem Gravitationsfeld; du kennst sie als potenzielle Energie:

$$E = \gamma \cdot m \cdot M \cdot \frac{1}{r}$$

Dabei ist Gamma eine Konstante, m und M die Massen als Quelleneigenschaften und 1/r die Abhängigkeit vom Abstand der Quellen. Wenn man sich die Energie nur für Objekte nahe der Erdoberfläche ansieht, dann ergibt sich mathematisch eine Formel, die du auch bereits kennst:

$$E = m \cdot g \cdot h$$

Dabei ist m wieder die Eigenschaft der Quelle (der Ball), in der auch die zweite Quelle (M) steckt und h der Abstand der Quellen, also von Ball und Erde, und hinter g (die **Erdbeschleunigung**) verbirgt sich neben Konstanten die zweite Quelle mit Masse M der Erde.

Wenn man also die Abstandsänderung und die Eigenschaften der Quellen kennt, kann man damit die Menge der Energie berechnen, die das Gravitationsfeld an die Bewegung des Balles abgibt. Dieser wird dann im entsprechenden Ausmaß schneller.

- ☐ Man kann die Gestalt von Formeln nachvollziehen, wenn man sich die einzelnen Faktoren anschaut und die Quelleneigenschaften und Abhängigkeiten vom Abstand der Quellen identifiziert. So wird es einfacher, sich Formeln zu merken bzw. sie zu verwenden.
- ☐ **Dieses Prinzip kann man auch auf andere Felder übertragen.**

B2 ☐ Wie findest du diese Erklärung? Ist sie plausibel?

P2 ☐ Kannst du das, was du gerade gehört hast nochmal zusammenfassen?

A2a

Elektrisches Feld

☐ Wie interpretierst du die folgende Formel?

$$E = \frac{q \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{1}{r}$$

☐ Tipp: Identifiziere die drei Terme in der Formel für die Energie im elektrischen Feld zweier Ladungen.

A2b

Bohr-Atom

☐ Wie interpretierst du die folgende Formel?

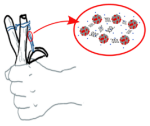
$$E = -\frac{Z \cdot e^2}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{1}{r}$$

Tipp: Identifiziere die drei Terme in der Formel für die Energie im elektrischen Feld zweier Ladungen.

Erinnerung

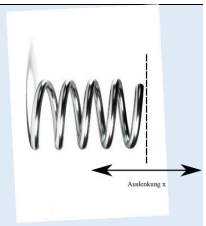
Gespannte Feder

Wenn du dich an das erste Interview erinnerst, dann haben wir uns auch die Energieübertragung bei einer Steinschleuder angeschaut. Diese funktioniert im Wesentlichen so wie eine gespannte Feder. Wenn man sie spannt, wird Energie in die Schleuder bzw. Feder übertragen. Weißt du noch, wohin genau die Energie dabei übertragen wurde?



A2c

Gespannte Feder



☐ Resümee des atomaren Feldes bei einer Feder; Energieübertragung in das atomare Feld beim Spannen und Stauchen.

☐ Wie interpretierst du die folgende Formel?

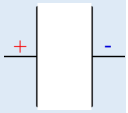
$$E = \frac{K}{2} \cdot x^2$$

Tipp: Identifiziere die drei Terme in der Formel für die Energie im elektrischen Feld zweier Ladungen.

Transfer

A2d

Plattenkondensator



☐ Kurze Erklärung Plattenkondensator (zwei Metallplatten mit unterschiedlicher Ladung).

☐ Wie interpretierst du die Formel für die Energie eines Kondensators: $E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C}$

☐ Was sind in einem geladenen Plattenkondensator die Quellen des Feldes und in welchem Ausdruck könnte sich die Abhängigkeit vom Abstand verbergen?

☐ Die Kapazität hängt vom Abstand d der Platten ab: $C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d}$ und damit gilt:

$$E = \frac{1}{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \cdot \frac{d}{A} \cdot Q^2$$

A2e

Massendefekt

☐ Erinnere dich, wie die Massendifferenz (Massendefekt) mit der Energie der Kerne zusammenhängt. Wie interpretierst du die folgende Formel?

$$E = c^2 \cdot m$$

A2f

Thermische Energie

☐ Wir schauen uns nun noch einen Spezialfall an, bei dem es sich nicht im Feldenergie handelt. Erinnerst du dich noch daran, was wir zur thermischen Energie gesagt haben?

☐ Wie könnte man die Formel für die thermische Energie interpretieren; siehst du hier einen Zusammenhang mit der Geschwindigkeit?

$$E = \frac{3}{2} k_B \cdot T$$

Abschlussfragen

- ☐ Super! Dann haben wir es auch schon geschafft. Danke, dass du dir (nochmal) die Zeit genommen hast; das hilft mir auf jeden Fall sehr weiter.

Fragen zur Erweiterung:

- ☐ Wie findest du die Erklärungen zum Zusammenhang von Konzept und Formeln? Hast du denn das Gefühl, dabei etwas gelernt zu haben?
- ☐ Was fandest du klar bzw. unklar?
- ☐ Gibt es einen Teil oder Aspekt, der dir besonders gefallen hat?
- ☐ Hast du andere Vorschläge, wie man den Zusammenhang mit den Formeln sinnvoll verknüpfen könnte?

Weiteres:

- ☐ Wie war deine letzte Zeugnisnote in Physik?
- ☐ Wie war deine letzte Zeugnisnote in Mathematik?

- ☐ Aufnahme beenden

Vielen lieben Dank nochmal, dass du mitgemacht hast!

Die Urkunde bekommst du selbstverständlich noch zugeschickt.

ANHANG D

Transkriptionsmanual

Transkriptionsmanual

für die Interviews zum EFA

Grundregeln:

1. Der Inhalt steht im Vordergrund. Das heißt Dialekt wird eingedeutscht, sofern die Wortbedeutung äquivalent bleibt und dadurch kein Inhalt verloren geht.
2. Es soll vollständig und wörtlich transkribiert werden. Unvollständigkeiten und Wiederholungen werden belassen.
3. Handelt es sich aber um irrelevanten oder privaten Inhalt, so wird dieser ausgelassen und mit (…) gekennzeichnet.
4. Wenn der Name des*r Proband*in erwähnt wird, so wird dieser durch den entsprechenden Code (z. B. S1) ersetzt.
5. Organisatorisches zu Beginn des Interviews wird nicht transkribiert. Das Transkript beginnt mit der angegebenen Zeit.
6. Nachfragen zur Verständlichkeit und Einschätzung am Ende des Interviews nach der Zeitmarke (Ende) müssen nicht wörtlich transkribiert werden. Hier reichen Stichpunkte mit den wesentlichen Informationen.

Konventionen:

( )	kennzeichnet unverständlichen Text.
(…)	kennzeichnet Auslassungen, deren Inhalt für die Analyse irrelevant ist (z. B. vom Inhalt unabhängige Einschübe oder private Inhalte).
(—)	kennzeichnet deutliche Pausen oder Stocken des Nachdenkens von einigen Sekunden. Kurze Pausen werden nicht transkribiert.
(Energie)	kennzeichnet vermuteten aber schwer verständlichen Text. Hier als Beispiel „Energie“.
(Lachen)	kennzeichnet Lachen. Dies wird nur transkribiert, wenn es in den Äußerungen der Proband*innen erscheint.
Ähm	kennzeichnet den verbalen Ausdruck des Nachdenkens. „Ähm“ wird nur transkribiert, wenn es eine tatsächliche Pause des Nachdenkens kennzeichnet.
Mmh (zustimmend)	kennzeichnet den verbalen Ausdruck der Zustimmung (auch zustimmendes Raunen). „Mmh“ wird nur transkribiert, wenn es synonym zu einem expliziten „Ja“ verstanden werden könnte; nicht aber, wenn es seitens des Interviewers nur Kennzeichnung für das gedankliche Folgen ist
?	kennzeichnet das Ende einer Frage bzw. das semantische Ende einer Äußerung mit Tonerhöhung

Form:

1. Der Titel jedes Transkripts ist der folgende:

   Transkript des Interviews von S1 zu Version 1 des EFA

   (Hier steht S1 für den/die jeweilige*n Proband*in S1 bis S7; „Version 1“ wird für die zweite Runde zu „Version 2“ angepasst.)
2. Äußerungen des Interviewers werden mit „**I**: “ (Fett, mit Leerzeichen nach dem Doppelpunkt) eingeleitet.
3. Äußerungen der Proband*innen werden mit „**S1**: “ (Fett, mit Leerzeichen nach dem Doppelpunkt) eingeleitet, wenn es sich um Proband*in S1 handelt; analog für alle anderen Proband*innen S2 bis S7.
4. Bei jedem Wortwechsel zwischen Interviewer und Proband*in erfolgt ein Absatz (ohne Leerzeile).

Beispiel:

I: Xxxxxxxxxx xxxxx xxx xxx Xxxx xxx xxxxx Xxxxxxx xxxxxx. Xxx Xxxxxxxxxxx xxxxxxxx Xxxx xxx.

S1: Xxxx Xxxxxxxxxx xxxxx xxx xxxx Xxxxx xxx xxxxxxx xxxxx.

I: Xxxxx xxxx xxxxx Xxx xxxxx.

ANHANG E

Kodierleitfäden

Kodierleitfaden der Interviews zu Version 1 des EFA

Grundlage für die Kodierung der Aufgaben sind die Lösungen.

Legende: *Text, Instruktion , Konzeptideen*

Kodierung der einzelnen Modi:

Kodierung für Bewertungen:

Kodierung: Kodierung gemäß Ja/Teilweise (Ja, mit Einschränkungen)/Nein

Kodierung für Paraphrasen:

Kodierung: Ja, wenn alle Aspekte genannt werden; Teilweise, wenn einer fehlt oder nicht korrekt verwendet wird; Nein, wenn mehr als ein Aspekt fehlt oder falsch wiedergegeben wird.

Kodierung für Aufgaben:

Kodierung: Ja, wenn alles richtig ist; Teilweise, wenn ein Fehler passiert (Nachfragen, weil wegen Klarheit ausgelassen sind okay); Nein, wenn mehrere Fehler passieren oder nicht auf die vorgestellten Erklärungen zurückgegriffen wird.

Hinweise zu den Lösungen:

Insgesamt gilt, dass Inhalt sinngemäß erklärt werden sollen. Sprachliche Abweichungen, welche die inhaltliche Aussage gleichwertig beschreiben wird als richtig kodiert.

[]: Alternative Antworten oder Anmerkung

(): optionale Antworten, die nicht explizit ausgesprochen werden müssen und sich teilweise indirekt aus dem Inhalt ergeben.

1 „Ein Feld trägt Energie“

Phase	*Text*
B1.3	☐ *Wie findest du diese Erklärung für die Magnete und die Satelliten-Bewegung? Macht das für dich Sinn?*
P1.3	☐ *Kannst du mir das, was du gerade zu dem Feld und der Energie erklärt habe nochmal wiedergeben?* **Vorgabe:** Ein (magnetisches oder Gravitations-)Feld trägt Energie. Energie wird aus dem Feld in Bewegung übertragen.
A1.3a	*(1a) Fallender Ball [Video]* ☐ *Schauen wir uns den einfachsten Versuch der Welt an: Wir lassen einen Ball fallen. Und wir sehen, dass er schneller wird, sich also bewegt.* *Wo kommt die Bewegungsenergie her, die er hat, wenn er unten aufkommt?* **Lösung:** (Der Ball wird schneller und erhält dabei Bewegungsenergie.) Diese kommt aus dem Gravitationsfeld.
A1.3b	*(1b) Luftballons [Video]* ☐ *Hier sehen wir zwei Luftballons, die vorher an den Haaren gerieben wurden, die sich abstoßen. Dabei wird der eine in Bewegung versetzt. Kannst du erklären, woher die Bewegungsenergie kommt, die er hier hat?* **Lösung:** (Der (linke) Luftballon bewegt sind; er erhält Bewegungsenergie.) Diese kommt vermutlich aus einem Feld (dem elektrischen Feld).
Frage1.3	☐ *Was ist dir beim letzten Beispiel im Vergleich zu dem, was wir vorher gesehen haben, aufgefallen?* **Lösung:** Die Energieübertragung von Feld zu Bewegung funktioniert nicht nur bei magnetischen und Gravitationsfeldern, sondern auch bei elektrischen.

2 „Das Gesamtfeld trägt Energie“

Phase	*Text*
B2.2	☐ *Wie findest du diese Erklärung (für das Gesamtfeld und die Energieübertragung)?*
P2.2	☐ *Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal wiedergeben?* **Vorgabe:** Magnete ODER Ladungen ODER Massen [eines davon reicht] sind Quellen von Feldern. Die Felder überlagern sich zu einem Gesamtfeld. Das Gesamtfeld trägt Energie; diese kann dann (z.B. in Bewegung) übertragen werden. Optional: Das Feld ist unendlich weit ausgedehnt und weder sichtbar noch antastbar.
A2.2	*(2a) Fadenpendel [Video]* ☐ *Hier haben wir ein Fadenpendel. Ich lenke es nach oben aus und lasse es fallen. Es fängt natürlich an zu schwingen. Dabei wird es immer schneller auf dem Weg nach unten und wieder langsamer auf dem Weg nach oben.* *Wie kann man mit dem Gesamtfeld erklären, woher die Bewegungsenergie kommt?* **Lösung:** Die Kugel des Pendels hat ein Gravitationsfeld, ebenso wie die Erde. Beide überlagern sich zu einem Gesamtfeld(, das Energie trägt). Wenn die Kugel (von oben nach unten) schneller wird [bzw. hinunter fällt], dann wird Energie aus dem Gravitationsfeld in die Bewegung übertragen. (Auf dem Weg nach oben genau umgekehrt.)
B2.3	☐ *Kannst du dir vorstellen, dass jedes Feld eine **Quelle** hat?* *Optionale Nachfragen:* 1. *Kannst du dir vorstellen, dass ein Gravitationsfeld auch eine Quelle besitzt? Was denkst du ist die Quelle beim Gravitationsfeld?* 2. *Kannst du dir das beim elektrischen Feld auch vorstellen? Was ist da wohl die Quelle?* ☐ *Ist es für dich plausibel, dass man Felder **weder sehen noch anfassen** kann?* ☐ *Macht es für dich Sinn, dass sich Felder (sofern sie können) **unendlich weit ausbreiten**?* ☐ *Ist die Überlagerung zweier Felder zu einem **Gesamtfeld** für dich plausibel?*

A2.3	*(2b) Abprallende Magnetwägen [Video]* ☐ *Wir sehen hier zwei Magnetwägen, die sich abstoßen. Am Anfang fahren sie aufeinander zu und haben Bewegungsenergie. In der Mitte drehen sie dann um und fahren wieder zurück. In der Mitte haben sie kurzzeitig keine Bewegungsenergie. Kannst du erklären, wo die Energie in dem Fall hin geht?* **Lösung:** Jeder Magnet hat ein Magnetfeld. Beide Felder überlagern sich zu einem Gesamtfeld(, das Energie trägt). Wenn die beiden Wägen aufeinander zu fahren und dabei langsamer werden, dann wird Energie aus der Bewegung (Bewegungsenergie) in das Magnetfeld übertragen. (In der Mitte trägt das Magnetfeld die gesamte Bewegungsenergie vom Beginn.) Wenn die Wägen wieder auseinanderfahren, dann wird wieder Energie aus dem Magnetfeld in die Bewegung übertragen.

3 „Es gibt nur Bewegungsenergie und Feldenergie“

Phase	*Text*
B3.2	☐ *Wie findest du diese Erklärung? Ist das plausibel?*
P3.2	☐ *Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal wiedergeben?* **Vorgabe:** Es gibt nur Bewegungsenergie und Feldenergie. Man kann alle Phänomene mit dem magnetischen, elektrischen und Gravitationsfeld erklären.
A3.2	*Lastenheber [Video]* ☐ *Schau dir mal das folgende Video/Experiment an. Hier wird eine Kugel an einer Schnur durch einen Akkubohrer nach oben gezogen. Da die Kugel hochgehoben wird, wird dabei wird Energie in das Gravitationsfeld gesteckt. Kannst du erklären, wo diese Energie herkommt?* **Lösung:** Wenn die Kugel nach oben gehoben wird, dann geht Energie in das Gravitationsfeld (die Bewegungsenergie bleibt gleich, weil die Kugel weder schneller noch langsamer wird. Diese Energie muss aus einem Feld oder einer Bewegung kommen.) Sie kommt aus der Bewegung des Bohrers. Diese Bewegungsenergie wiederum kommt aus dem Akku des Bohrers. Optional: Dort ist ein elektrisches Feld (da es kein Gravitationsfeld oder magnetisches Feld ist), das Feld der Atome in dem Akku. Diese überträgt Energie in die Bewegung des Bohrers und ergo in das Gravitationsfeld.
Frage3.2	☐ *Was denkst du ist hier im letzten Beispiel die Quelle des Feldes?* **Lösung:** Die Quelle für das elektrische Feld sind Atome und deren Ladungen (ähnlich wie beim Luftballon).

4 „Felder sind makroskopisch und mikroskopisch.“

Phase	*Text*
B4.2	☐ *Wie findest du diesen Aspekt? Macht das für dich Sinn?*
P4.2	☐ *Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal wiedergeben?* **Vorgabe:** Die Idee mit Bewegungen und Feldern funktioniert genauso im Kleinen (mikroskopisch, bei Atomen) wie im Großen (makroskopisch).
A4.2	*Schleuder [Video]* ☐ *Hier wird ein Ball durch das Gummiband weg geschleudert und dabei also in Bewegung versetzt.* *Kannst du mir erklären, woher die Bewegungsenergie kommt?* **Lösung:** (Der Ball erhält offensichtlich Bewegungsenergie.) Diese kommt von dem Gummiband, und zwar von einem (elektrischen) Feld (da hier weder Gravitationsfeld noch magnetisches Feld eine Rolle spielen). Das Gummiband besteht aus Atomen, die ein elektrisches Feld haben. Diese trägt Energie und wenn sich das Feld (bzw. die Konstellation der Atome) verändert, dann wird Energie aus dem Feld in die Bewegung übertragen.

5 „Energieübertragung und Veränderung des Feldes“

Phase	*Text*
B5.2	☐ *Wie findest du diese Erklärung? Macht das für dich Sinn?*
P5.2	☐ *Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal zusammenfassen?* **Vorgabe:** (Wenn sich ein Feld verändert, dann wird Energie übertragen.) Das erkennt man daran, dass sich die Bewegung verändert (etwas schneller oder langsamer wird) oder der Abstand in einem Feld verändert.
A5.2	*(5a) Fadenpendel [Video]* ☐ *Schauen wir uns noch einmal das Fadenpendel an. Das haben wir vorhin schon einmal besprochen. Kannst du mir sagen, woran man hier erkennt, dass Energie übertragen wird?* *Was (welche Größen) verändern sich, an denen man sehen kann, dass Energie übertragen wird?* **Lösung:** [Energieübertragung vorher schon erklärt: Die Energie wird aus dem Gravitationsfeld in die Bewegung übertragen und umgekehrt.] Das erkennt man daran, dass die Kugel schneller bzw. langsamer wird. Dabei ändert sich auch der Abstand von der Kugel zur Erde (ODER: die Höhe der Kugel).
A5.3	*(5b) Federpendel [Video]* ☐ *Hier siehst du ein einfaches Federpendel. Wenn es sich ganz oben befindet (also dort, wo es umkehrt und sich kurzzeitig nicht bewegt), steckt die gesamte Energie im Gravitationsfeld. Wenn es ganz unten ist, dann bewegt es sich auch nicht, aber es Energie ist aus dem Gravitationsfeld „verschwunden“. Kannst du erklären, wo sie hin ist?* **Lösung:** Im Vergleich oben und unten ist Energie aus dem Gravitationsfeld verschwunden (oben und unten keine Bewegung). Diese ist (in ein anderes Feld) übertragen worden: in die Feder. Da die Feder aus Atomen besteht (deren Anstand sich bei der Dehnung ändert), wird die Energie in das elektrische Feld der Atome übertragen.

6 „Wärme ist Bewegungsenergie“

Phase	*Text*
B6.2	☐ *Wie findest du diese Erklärung? Kannst du dir das vorstellen?*
P6.2	☐ *Kannst du das, was wir gerade gelernt haben nochmal zusammenfassen?* **Vorgabe:** Wärme (thermische Energie) ist im Wesentlichen Bewegungsenergie der Atome/Teilchen des Materials bzw. der Luft. (Das Pendel stoppt, weil Bewegungsenergie von der Kugel in die Bewegung der Atome/Teilchen der Halterung und Luft übertragen wird.)
A6.2	*(6a) Springender Ball [Video]* ☐ *Betrachten wir einmal einen springenden Ball. Aber warum hört der eigentlich irgendwann auf zu springen? Oben steckt er ja Energie im Gravitationsfeld, die dann in Bewegung übertragen wird. Aber wenn er am Ende unten liegen bleibt, dann bewegt er sich nicht mehr und die Energie ist „verschwunden“. Wo ist sie hin?* **Lösung:** (Wenn der Ball am Ende liegt, dann ist Energie aus dem Gravitationsfeld verschwunden.) Diese Energie ist (durch die Reibung) in die Bewegung der Atome von Luft und Boden übertragen worden. (Die Atome des Balls erhalten auch Bewegungsenergie.) (auf Nachfrage: das kann man dadurch sehen, dass der Boden leicht erwärmt wurde. Evtl. auch erst bei A6.3)
A6.3	*(6b) Kugelbahn [Video]* ☐ *Hier haben wir ein Video von einer Kugel, die rollt und dann irgendwann unten liegen bleibt. Wie kann man erklären, warum die Kugel irgendwann stoppt?* ☐ *Wie könnte man nachweisen, dass hier tatsächlich Energie übertragen wurde, die wir dann nicht mehr sehen können?* **Lösung:** Die Energie aus dem Gravitationsfeld (und ergo der Bewegung der Kugel) wurde in die Bewegung der Atome in Luft und Kugelbahn übertragen. (auf Nachfrage: auch in die Bewegung der Atome in der Kugel selbst; erkennbar durch Erwärmung, evtl. auch schon bei A6.2)

7 „Elektromagnetische Strahlung ist Feldenergie“

Phase	*Text*
B7.2	☐ *Wie findest du diese Erklärung? Kannst du dir das vorstellen?*
P7.2	☐ *Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal zusammenfassen?* **Vorgabe:** Elektromagnetische Strahlung/Wellen sind elektromagnetische Felder, die Feldenergie tragen. Diese Energie kann übertragen werden (z.B. in Bewegungen)
A7.2	*(7a) Boden* ☐ *Kannst du mir damit erklären, warum im Sommer der Boden so heiß wird, dass man Barfuß darauf kaum laufen kann?* **Lösung:** Elektromagnetisches Feld (auch ok: Strahlung/Welle) trifft auf den Boden und gibt Energie an die Bewegung der Atome des Bodens ab; dadurch erwärmt er sich.
A7.3	*(7b) Radiometer [Video]* ☐ *Unser letztes Beispiel für heute: Du siehst hier ein Radiometer. Wir sehen, dass es anfängt, sich zu drehen und irgendwann wieder stoppt. Kannst du mit dem, was du gerade gehört hast erklären, woher die Bewegungsenergie kommt?* **Lösung:** Elektromagnetisches Feld (auch ok: Strahlung/Welle) trifft auf das Radiometer und überträgt Energie in die Bewegung des Radiometer. (optional: durch die Bewegung der Atome des Radiometers und die Reibung wird Bewegungsenergie übertragen, die wir als Wärme beobachten können, wenn das Radiometer stoppt.)

Kodierleitfaden für die Interviews zur Version 2 des EFA

Legende: Text, Instruktion, Konzeptideen

Kodierung der einzelnen Modi:

Kodierung für Bewertungen:

> **Kodierung:** Kodierung gemäß Ja/Teilweise (Ja, mit Einschränkungen)/Nein

Kodierung für Paraphrasen:

> **Kodierung:** Ja, wenn alle Aspekte genannt werden; Teilweise, wenn einer fehlt oder nicht korrekt verwendet wird; Nein, wenn mehr als ein Aspekt fehlt oder falsch wiedergegeben wird.

Kodierung für Aufgaben:

> **Kodierung:** Ja, wenn alles richtig ist; Teilweise, wenn ein Fehler passiert (Nachfragen, weil wegen Klarheit ausgelassen sind okay); Nein, wenn mehrere Fehler passieren oder nicht auf die vorgestellten Erklärungen zurückgegriffen wird.

Hinweise zu den Lösungen:

Insgesamt gilt, dass Inhalt sinngemäß erklärt werden sollen. Sprachliche Abweichungen, welche die inhaltliche Aussage gleichwertig beschreiben wird als richtig kodiert.

[]: Alternative Antworten oder Anmerkung

(): optionale Antworten, die nicht explizit ausgesprochen werden müssen und sich teilweise indirekt aus dem Inhalt ergeben.

Anmerkungen:

1. Wenn (abgesehen von Bereich 1.1) „Feld“ statt „Gesamtfeld“ gesagt wird, aber aus dem Kontext hervorgeht, dass das Gesamtfeld gemein ist, dann ist das in Ordnung.
2. Wenn Aspekte ausgelassen werden weil sie als trivial erscheinen, aber aus dem Kontext hervorgeht, dass sie bewusst sind, dann ist dies in Ordnung.

Hauptidee 1: Ein (Gesamt-)Feld trägt Energie. Energie kann in ein Feld oder aus einem Feld übertragen werden.

1.1 Quelle und Gesamtfeld

P1.1

☐ Kannst du mir das, was du gerade gehört hast, nochmal zusammenfassen?

Vorgabe: (Zwei) Quellen haben Felder, die sich zu einem Gesamtfeld überlagern. (Dieses Gesamtfeld zieht sich zusammen oder drückt sich auseinander; je nachdem, ob es eine anziehende oder abstoßende Wechselwirkung/Kraft ist).

[Das Gesamtfeld ist wie eine Feder, die sich zusammenzieht oder auseinanderdrückt (je nachdem, ob es eine anziehende oder abstoßende Wechselwirkung/Kraft ist).]

A1.1a

Quelle und Gesamtfeld zweier abstoßender Ladungen [Skizze]

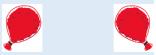


☐ Schauen wir uns zwei positive Ladungen an. Kannst du mir beschreiben, wie sich hier das Feld ergibt?

Lösung: Die Ladungen haben jeweils ein Feld, das sich zu einem Gesamtfeld überlagert. (Entsprechend ihrer Wechselwirkung drückt sich dieses auseinander [ODER: dehnt sich aus]).

A1.1b

Quelle und Gesamtfeld bei geladenen Luftballons [Skizze]



☐ Schauen wir uns zwei Luftballons an, die man zuvor an den Haaren gerieben hat. Kannst du mir beschreiben, wie sich hier das Feld ergibt?

Lösung: Beide Luftballons (sind elektrisch geladen) und haben (deshalb) jeweils ein (elektrisches) Feld, die sich zu einem Gesamtfeld überlagern. (Entsprechend ihrer Wechselwirkung drückt sich dieses auseinander.)

1.2 Energie im Gesamtfeld und Energieübertragung

P1.2

☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal wiedergeben?

Vorgabe: Das Gesamtfeld trägt Energie. Diese kann in die Bewegung übertragen werden, d.h. das Gesamtfeld kann Energie (von einem Objekt) aufnehmen oder (an dieses/dessen Bewegung) abgeben.

A1.2a

Luftballons stoßen sich ab [Video]

☐ Hier haben wir wieder die beiden Luftballons. Wenn ich den einen näher an den anderen bringe, dann bewegt sich dieser weg; er erhält also Bewegungsenergie. Aber wo kommt die her?

Lösung: (Die Luftballons haben jeweils ein elektrisches Feld.) Diese überlagern sich zu einem Gesamtfeld.) Wenn sich der Luftballon wegbewegt, dann gibt das Feld Energie an seine Bewegung ab.

A1.2b

Satellitenbewegung um die Erde [Simulation]

☐ Wir sehen hier den Satelliten von eben, wie er sich um die Erde bewegt. Da er sich auf einer Ellipse bewegt, gibt es einen Punkt wo er der Erde am nächsten ist und einen, an dem er am weitesten weg ist. Vom entfernten Punkt zum nächsten Punkt wird er dabei schneller. Woher erhält er die zusätzliche Bewegungsenergie?

Lösung: (Satellit und Erde haben jeweils ein Gravitationsfeld. Diese überlagern sich zu einem Gesamtfeld.) Wenn sich der Satellit der Erde nähert und schneller wird, dann gibt das Gesamtfeld Energie an dessen Bewegung ab [ODER: Wenn sich der Satellit entfernt/schneller wird, dann gibt er Energie an das Feld ab/dann nimmt das Feld Energie auf].

1.3 Indikatoren für Feldveränderung und Energieübertragung

P1.3

☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal wiedergeben?

Vorgabe: Das Gesamtfeld trägt Energie. Es kann Energie aufnehmen oder abgeben. Wenn sich das Feld gemäß seinem Willen verändert [ODER: entsprechend der Kraft/Wechselwirkung/bei Abstoßung auseinanderdrückt oder bei Anziehung zusammenzieht], dann gibt es Energie ab. Im umgekehrten Fall nimmt es Energie auf. (Das erkennt man auch daran, dass sich eine Bewegung verändert, z.B. etwas schneller oder langsamer wird ODER dass sich der Abstand der Quellen verändert.)

A1.3a	Luftballons ☐ Wenn wir uns nochmal die beiden Luftballons ansehen; woran erkennt man hier, dass das Feld Energie abgibt? **Lösung:** Da sich die Luftballons abstoßen, drückt sich das Feld auseinander. Bei dieser Veränderung (gemäß seinem Willen) gibt es Energie ab; diese geht in die Bewegung des Luftballons. [Er wird schneller und der Abstand der Ballons ändert sich.]
A1.3b	Satellitenbewegung ☐ Wenn wir uns nochmal die Bewegung des Satelliten ansehen; woran erkennt man hier, dass das Feld Energie abgibt? **Lösung:** Da sich Erde und Satellit anziehen, zieht sich das Feld zusammen. Bei dieser Veränderung (gemäß dem Willen des Feldes) gibt es Energie ab; diese geht in die Bewegung des Satelliten. [Er wird schneller und der Abstand der Ballons ändert sich.]
A1.3c	Fallender Ball ☐ Stell dir vor du lässt einen Ball fallen. Von oben nach unten erhält er Bewegungsenergie. Wo kommt die her? **Lösung:** Das (Gesamt-)feld (von Ball und Erde) will sich zusammenziehen. Dabei gibt es Energie an die Bewegung des Balles ab. (Dabei wird der Ball schneller und nähert sich der Erde; der Abstand von Erde und Ball wird geringer.)

Hauptidee 2: Es gibt nur Feld- und Bewegungsenergie. Dies gilt immer und überall (makro- & mikroskopisch sowie fächerübergreifend).

2.1 Überall: Mikrokosmos und andere Fächer

P2.1	☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal wiedergeben? **Vorgabe:** Energie kann auch in mikroskopischen Feldern [Feldern von/zwischen Atomen] gespeichert sein.
A2.1a	Automotor ☐ Stell dir vor du sitzt im Auto und fährst los. Dabei wird Energie in die Bewegung des Autos übertragen. Aber wo kommt die hier? Wir wissen, dass das Auto durch die Verbrennung von Treibstoff angetrieben wird. Kannst du erklären, woher dabei die Energie kommt? **Lösung: (**Die Energie für die Bewegung kommt aus dem Motor, genauer aus dem Treibstoff dadurch, dass er verbrannt wird.) Im Treibstoff wird (durch die Verbrennung) das Feld der Atome verändert, sodass Energie frei wird. Die Energie aus dem Feld der Atome wird in die Bewegung des Autos übertragen.
A2.1b	Explosion ☐ Stellt dir vor du beobachtest eine Explosion. Dabei fliegen die Einzelteile des Materials weg; woher kommt ihre Bewegungsenergie? **Lösung:** Bei der Explosion wird die Energie (durch chemische Prozesse/Umwandlungen) aus dem Feld der Atome frei und führt zur Bewegung der Teilchen. 

2.2 Immer: Thermische Energie und Elektromagnetische Strahlung

P2.2.1

☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal zusammenfassen?

Vorgabe: Thermische Energie [Wärme] ist Bewegungsenergie (und Feldenergie). Sie steckt in der Bewegung (und den Feldern) von Atomen/Molekülen.

A2.2.1a

Kugelbahn [Video]

☐ Hier siehst du eine Kugel, die auf einer Metallbahn hin und her rollt. Nach einer Weile bleibt sie unten stehen. Wo ist die Energie hin, die sie am Anfang noch in ihrer Bewegung hatte?

Lösung: Die Energie aus der Bewegung der Kugel wird in die (mikroskopische) Bewegung der Atome in Luft/Bahn/Kugel übertragen und ist dann als Wärme nachweisbar/spürbar.

A2.2.1b

Erwärmung in der Mikrowelle

☐ Stell dir vor du erwärmst Nahrung in einer Mikrowelle. Ungeachtet des Prozesses wie die Mikrowelle funktioniert. Was passiert in der Nahrung, wenn sie warm wird; wie beschreibt man das mit Energie?

Lösung: Die thermische Energie/Wärme ist die Bewegung der Atome des Essens. Die Energie steckt also in der Bewegung (und dem Feld) der Atome des Essens.

2.2.2 Elektromagnetische Strahlung

P2.2.2

☐ Kannst du das, was wir gerade gelernt haben nochmal zusammenfassen?

Vorgabe: Elektromagnetische Strahlung [ein elektromagnetisches Feld] hat (nicht Bewegungsenergie, sondern) Feldenergie.

A2.2.2a

Laser [Bild]



☐ Betrachten wir einmal diesen Laser hier, er verformt das Metall darunter und zerschneidet es dabei. Kannst du erklären, von wo nach wo hier Energie übertragen wird?

Lösung: Der Laser hat als elektromagnetische Strahlung Feldenergie. Diese wird in das (Schneiden des) Material(s) übertragen. Dabei wird die Energie in Feldenergie [ODER: Bewegungsenergie] durch die Verformung [ODER: Erwärmung] des Materials übertragen.

A2.2.2b

Solarzelle [Bild]



☐ Kannst du erklären, welche Energieübertragung beim Betrieb einer Solarzelle stattfindet?

Lösung: Die (elektromagnetische) Sonnenstrahlung hat Feldenergie. Diese wird in die Energie im elektrischen Feld unseres Haushalts [ODER: Feld der Steckdose; ODER: Bewegungsenergie der Ladungen (in den Leitungen)] übertragen.

Hauptidee 3: Unsere Welt besteht nur aus Feldern und Bewegungen. Bei der Änderung von Masse wird Energie zwischen Feld und Bewegung übertragen.

3.1 Quarkfeld

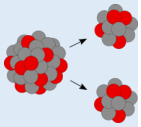
P3.1

☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal zusammenfassen?

Vorgabe: Das Quarkfeld trägt Energie. Diese bemerken wir als [ODER einfach: ist] Masse. (Unsere Masse kommt zu 90 % [zum Großteil] aus dem Quarkfeld.)

A3.1a

Kernspaltung [Bild]

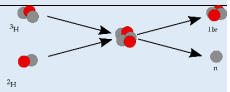


☐ Wenn ein Kern gespalten wird, dann zerfällt er in zwei kleinere Kerne. Diese sind in der Summe leichter als der Mutterkern. Woher kommt die Massendifferenz (Massendefekt) und von wo nach wo wird hier Energie übertragen?

Lösung: Die Bewegungsenergie des Alpha-Teilchens entspricht der Massendifferenz der Kerne. Diese Masse entspricht der Energie, die das Quarkfeld (des Ursprungskerns) abgibt.

A3.2b

Kernfusion [Bild]



☐ Bei der Fusion werden zwei Kernen zu einem gemeinsamen Kern verschmolzen. Dabei ist der entstehende Kern leichter als die beiden einzelnen zusammen. Wie erklärt man hier die Massendifferenz und die Energieübertragung?

Lösung: Die Bewegungsenergie (und die Energie des Neutrons) entspricht der Massendifferenz. Das entspricht der Energie, die das Quarkfeld (durch die Umordnung des Kerns) abgibt. (Ein Teil wird auch in die Sonnenstrahlung übertragen.)

3.2 Higgs-Feld

P3.2

☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal zusammenfassen?

Vorgabe: Die Energie/Masse der Elementarteilen [Elektronen und Quarks] kommt durch (die Wechselwirkung mit dem) das Higgsfeld.

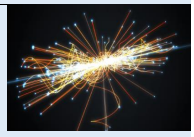
A3.2a

Annihilation PET [Bild]

Lösung: Wenn sich Elektron und Positron vernichten, dann wir die Energie/Masse durch das [ODER: aus dem] Higgsfeld in Feldenergie (der elektromagnetischen Strahlung) übertragen.

A3.2b

CERN-Experiment [Bild]



☐ Im LHC am CERN werden Protonen mit hoher Geschwindigkeit aufeinander geschossen. Dabei treffen sie als Teilchen mit besonders großer Bewegungsenergie aufeinander.

Frage: Welche Energie haben wir insgesamt im Treffmoment, wenn wir diese Situation mit Bewegungs- und Feldenergie beschreiben wollen?

☐ Die konzentrierte Feld- und Bewegungsenergie im Treffmoment kann nun zur Entstehung neuer Elementarteilchen führen, die sich wiederum auch zu größeren Teilchen zusammensetzen können. Beobachten kann man das dann mit Detektoren, welche die einzelnen Teilchen nachweisen.

Frage: Kannst du erklären, wo die Energie der neuen Teilchen herkommt bzw. von wo nach wo hier Energie übertragen wird?

Lösung: Die Protonen haben zu Beginn Bewegungsenergie und Feldenergie (im Quarkfeld und durch das Higgsfeld). Diese wird im Treffmoment in Bewegungsenergie und Energie durch das Higgsfeld der neuen Teilchen übertragen. (Wenn sich dann z.B. Quarks zu größeren Teilchen zusammenschließen, wird auch Energie in das Quarkfeld übertragen.)

Kodierleitfaden für die Interviews zu Version 3 des EFA

Legende: Text, Instruktion, Konzeptideen

Kodierung der einzelnen Modi:

Kodierung für Bewertungen:

> **Kodierung:** Kodierung gemäß Ja (vollständig verständlich), teilweise (Ja, mit Einschränkungen) oder nein (nicht verständlich, auch nicht mit Erläuterung)

Kodierung für Paraphrasen:

> **Kodierung:** Ja (vollständig), wenn alle Aspekte genannt werden; Teilweise, wenn einer fehlt oder nicht korrekt verwendet wird; Nein (falsch), wenn mehr als ein Aspekt fehlt oder falsch wiedergegeben wird.

Kodierung für Aufgaben:

> **Kodierung:** Ja (vollständig), wenn alles richtig ist (Nachfragen, weil wegen Klarheit ausgelassen sind in Ordnung, wenn der Aspekt auf Nachfrage genannt wird); Teilweise, wenn ein Fehler passiert, der aber auf Nachfrage korrigiert wird und der*die Proband*in letztlich auf die richtige Antwort kommt; Nein (falsch), wenn mehrere Fehler passieren oder auch auf Nachfrage nicht auf die vorgestellten Erklärungen zurückgegriffen wird.

Hinweise zu den Lösungen:

Insgesamt gilt, dass Inhalt sinngemäß erklärt werden sollen. Sprachliche Abweichungen, welche die inhaltliche Aussage gleichwertig bzw. synonym beschreiben, sind zulässig und werden auch als richtig/vollständig kodiert.

[]: zulässige alternative Antworten oder Anmerkung

(): optionale Antworten, die nicht explizit ausgesprochen werden müssen und sich teilweise indirekt aus dem Inhalt ergeben. Es darf aber nichts geäußert werden, was in einem fachlichen oder konzeptionellen Widerspruch mit diesem Inhalt steht.

Anmerkungen:

1. Wenn (abgesehen von Bereich 1.1) „Feld“ statt „Gesamtfeld“ gesagt wird, aber aus dem Kontext hervorgeht, dass das Gesamtfeld gemeint ist, dann ist das in Ordnung.
2. Wenn Aspekte ausgelassen werden, weil sie als trivial erscheinen, aber aus dem Kontext hervorgeht, dass sie berücksichtigt wurden, dann ist dies in Ordnung.

Hauptidee 1: Ein (Gesamt-)Feld trägt Energie. Energie kann in ein Feld oder aus einem Feld übertragen werden.

1.1 Quelle und Gesamtfeld

P1.1

☐ Kannst du mir das, was du gerade gehört hast, nochmal zusammenfassen?

Vorgabe: (Zwei) Quellen haben Felder, die sich zu einem Gesamtfeld überlagern [ergeben/ergänzen]. (Dieses Gesamtfeld zieht sich zusammen oder dehnt sich aus; je nachdem, ob es eine anziehende oder abstoßende Wechselwirkung/Kraft ist).

A1.1a

Quelle und Gesamtfeld zweier abstoßender Ladungen [Skizze]

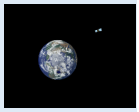


☐ Schauen wir uns zwei positive Ladungen an. Kannst du mir beschreiben, wie sich hier das Feld aus den Quellen ergibt?

Lösung: Die Ladungen haben (jeweils) ein Feld, das sich zu einem Gesamtfeld [gesamten Feld] überlagert [ergibt, o. ä.].

A1.1b

Quelle und Gesamtfeld bei Satellit und Erde [Skizze]



☐ Hier haben wir einen Satelliten, der sich in einer bestimmten Entfernung von der Erde befindet. Schauen wir uns nun das Gravitationsfeld der beiden an. Wir wissen, dass in einem Gravitationsfeld eine anziehende Kraft wirkt und das Feld ergibt sich analog zu dem Feld von Magneten und Ladungen.
Kannst du mir beschreiben, wie sich hier das Feld aus den Quellen ergibt?

Lösung: Erde und Satellit haben (eine Masse und jeweils) ein Feld, die sich zu einem Gesamtfeld [gesamten Feld] überlagern [ergibt, o. ä.].

1.2 Energie im Gesamtfeld und Energieübertragung

P1.2

☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal wiedergeben?

Vorgabe: Das Gesamtfeld trägt Energie. Diese kann in die Bewegung übertragen werden, d. h. das Gesamtfeld kann Energie aufnehmen oder abgeben.

A1.2a

Luftballons stoßen sich ab [Video]

☐ Hier haben wir wieder die beiden Luftballons. Wenn ich den einen näher an den anderen bringe, dann bewegt sich dieser weg; er erhält also Bewegungsenergie. Aber wo kommt die her?

Lösung: (Die Luftballons haben jeweils ein elektrisches Feld. Diese überlagern sich zu einem Gesamtfeld.) Wenn sich der Luftballon wegbewegt, dann gibt das Feld Energie an seine Bewegung ab.

A1.2b

Satellitenbewegung um die Erde [Simulation]

☐ Wir sehen hier den Satelliten von eben, wie er sich um die Erde bewegt. Da er sich auf einer Ellipse bewegt, gibt es einen Punkt wo er der Erde am nächsten ist und einen, an dem er am weitesten weg ist. Vom entfernten Punkt zum nächsten Punkt wird er dabei schneller. Woher erhält er die zusätzliche Bewegungsenergie?

Hinweis: Denk daran, dass wir hier am Anfang (ähnlich zu den Magneten und Luftballons) auch ein Gesamtfeld haben. Wie ergibt sich dieses Gesamtfeld aus den Quellen und was passiert mit der Energie?

Lösung: (Satellit und Erde haben jeweils ein Gravitationsfeld. Diese überlagern sich zu einem Gesamtfeld.) Wenn sich der Satellit der Erde nähert (und schneller wird), dann gibt das Gesamtfeld Energie an dessen Bewegung ab [ODER: Wenn sich der Satellit entfernt/schneller wird, dann gibt er Energie an das Feld ab/dann nimmt das Feld Energie auf].

1.3 Indikatoren für Feldveränderung und Energieübertragung

P1.3	☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal wiedergeben? **Vorgabe:** Das (Gesamt)feld trägt Energie. Es kann Energie aufnehmen oder abgeben. Wenn sich das Feld entsprechend seiner Tendenz verändert [ODER: in Richtung/entsprechend der Wechselwirkung/Kraft verändert ODER entsprechend der Kraft/Wechselwirkung/bei Abstoßung ausdehnt oder bei Anziehung zusammenzieht], dann gibt es Energie ab. Im umgekehrten Fall nimmt es Energie auf. (Das erkennt man auch daran, dass sich eine Bewegung verändert, z.B. etwas schneller oder langsamer wird ODER dass sich der Abstand der Quellen verändert.)
A1.3a	Luftballons ☐ Wenn wir uns nochmal die beiden Luftballons ansehen; woran erkennt man hier, dass das Feld Energie abgibt? **Lösung:** (Da sich die Luftballons abstoßen, drückt sich das Feld auseinander.) Bei dieser Veränderung (in Richtung der Wechselwirkung) gibt das Feld Energie ab; diese geht in die Bewegung des Luftballons. [Er wird schneller und der Abstand der Ballons ändert sich.]
A1.3b	Satellitenbewegung ☐ Wenn wir uns nochmal die Bewegung des Satelliten ansehen; woran erkennt man hier, dass das Feld Energie abgibt? **Lösung:** Da sich Erde und Satellit anziehen, zieht sich das Feld zusammen. Bei dieser Veränderung (in Richtung der Wechselwirkung/Kraft) gibt es Energie ab; diese geht in die Bewegung des Satelliten. [Er wird schneller und der Abstand zur Erde ändert sich.]

A1.3c	Fallender Ball ☐ Stell dir vor du lässt einen Ball fallen. Von oben nach unten erhält er Bewegungsenergie. Wo war die vorher? **Hinweis**: Denk daran, dass wir hier (ähnlich zu den Magneten und Luftballons) auch ein Gesamtfeld haben, aus dem die Energie kommt. Überleg dazu, warum der Ball nach unten fällt und was die beiden Quellen sind. Woran erkennt man hier, dass das Feld Energie abgibt? **Lösung:** Das (Gesamt)feld (von Ball und Erde) (zieht sich zusammen und) gibt Energie an die Bewegung des Balles ab. Dabei wird der Ball schneller [bzw. nähert sich der Erde (der Abstand von Erde und Ball wird geringer).]

Hauptidee 2: Es gibt nur Feld- und Bewegungsenergie (makro- & mikroskopisch sowie fächerübergreifend).

2.1 Überall: Mikrokosmos und andere Fächer

P2.1a

☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal wiedergeben?

Vorgabe: Energie kann auch in mikroskopischen Feldern [Feldern von/zwischen Atomen] gespeichert sein.

P2.1b

☐ Warum gibt es gebundene Zustände, also warum fällt z. B. unsere Schleuder nicht auseinander?

Vorgabe: Festkörper/Atome sind gebunden, weil das Feld die minimale Energie hat [ODER: weil man Energie in das Feld stecken muss, um es zu verändern].

A2.1a

Automotor

☐ Stell dir vor du sitzt im Auto und fährst los. Dabei wird Energie in die Bewegung des Autos übertragen. Aber wo kommt die hier? Wir wissen, dass das Auto durch die Verbrennung von Treibstoff angetrieben wird. Kannst du erklären, woher dabei die Energie kommt?

Lösung: Im Treibstoff verändert sich das Feld der Atome, sodass Energie frei wird. Die Energie aus dem Feld der Atome wird in die Bewegung (des Autos) übertragen.

A2.1b

Explosion



☐ Stell dir vor du beobachtest eine Explosion. Dabei fliegen die Einzelteile des Materials weg; woher kommt ihre Bewegungsenergie?

Lösung: Bei der Explosion wird die Energie (durch chemische Prozesse/Umwandlungen) aus dem Feld der Atome frei und führt zur Bewegung der Teilchen.

2.2 Immer: Thermische Energie und Elektromagnetische Strahlung

P2.2.1

☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal zusammenfassen?

Vorgabe: Thermische Energie ist (mikroskopische) Bewegungsenergie [ODER: Erklärung der Abbremsung der Pendelbewegung durch Abgabe der Energie an die Bewegung der Atome]. Sie steckt in der Bewegung [Schwingung] von Atomen/Molekülen.

(Anmerkung: Wenn hier **zusätzlich** auf das Feld der Atome eingegangen wird ist das in Ordnung, Bewegung muss aber genannt werden.)

A2.2.1a

Kugelbahn [Video]

☐ Hier siehst du eine Kugel, die auf einer Metallbahn hin und her rollt. Nach einer Weile bleibt sie unten stehen. Wo ist die Energie hin, die sie am Anfang noch in ihrer Bewegung hatte?

Lösung: Die Energie aus der Bewegung der Kugel wird in die (mikroskopische) Bewegung [Schwingung] der Atome in Luft [ODER Bahn bzw. Kugel] übertragen und ist dann als Erwärmung nachweisbar/spürbar.

(Anmerkung: Wenn hier **zusätzlich** auf das Feld der Atome eingegangen wird ist das in Ordnung, Bewegung muss aber genannt werden.)

A2.2.1b

Erwärmung von Nahrung

☐ Stell dir vor du erwärmst Nahrung in einer Mikrowelle. Ungeachtet des Prozesses wie die Mikrowelle funktioniert. Was passiert in der Nahrung, wenn sie warm wird; wie beschreibt man das mit Energie?

Lösung: Die thermische Energie/Erwärmung ist die Bewegung der Atome des Essens [Die Atome des Essens bewegen sich/schwingen].

(Anmerkung: Wenn hier **zusätzlich** auf das Feld der Atome eingegangen wird ist das in Ordnung, Bewegung muss aber genannt werden.)

2.2.2 Elektromagnetische Strahlung

P2.2.2

☐ Kannst du das, was wir gerade gelernt haben nochmal zusammenfassen?

Vorgabe: Elektromagnetische Strahlung [ein elektromagnetisches Feld] hat (nicht Bewegungsenergie, sondern) Feldenergie.

A2.2.2a

Laser [Bild]



☐ Betrachten wir einmal diesen Laser hier, er verformt das Metall darunter und zerschneidet es dabei. Kannst du erklären, von wo nach wo hier Energie übertragen wird?

Lösung: Der Laser trägt/hat als elektromagnetische Strahlung Feldenergie. Diese wird in das (Schneiden des) Material(s) übertragen. Dabei wird die Energie in Feldenergie [ODER: Bewegungsenergie] durch die Verformung [ODER: Erwärmung] des Materials übertragen.

A2.2.2b

Solarzelle [Bild]



☐ Kannst du erklären, welche Energieübertragung beim Betrieb einer Solarzelle stattfindet?

Lösung: Die (elektromagnetische) Sonnenstrahlung hat Feldenergie. Diese wird in die Energie im elektrischen Feld unseres Haushalts [ODER: Feld der Steckdose; ODER: Bewegungsenergie der Ladungen (in den Leitungen); ODER: Bewegungsenergie der Atome bei Erwärmung] übertragen.

Hauptidee 3: Unsere Welt besteht nur aus Feldern und Bewegungen. Bei der Änderung von Masse wird Energie zwischen Feld und Bewegung übertragen.

3.1 Quarkfeld

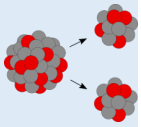
P3.1

☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal zusammenfassen?

Vorgabe: Das Quarkfeld trägt Energie. Diese bemerken wir [äußert sich] als [ODER einfach: ist] Masse. (Unsere Masse setzt sich zu 90 % [zum Großteil] aus der Energie in Quarkfeldern zusammen.)

A3.1a

Kernspaltung [Bild]

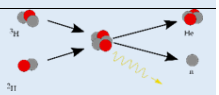


☐ Wenn ein Kern gespalten wird, dann zerfällt er in zwei kleinere Kerne. Diese sind in der Summe leichter als der Mutterkern. Woher kommt die Massendifferenz (Massendefekt) und von wo nach wo wird hier Energie übertragen?

Lösung: Die Bewegungsenergie des Alpha-Teilchens entspricht der Massendifferenz der Kerne. Diese Masse entspricht der Energie, die das Quarkfeld (des Ursprungskerns) abgibt. ODER: Die Energie des Quarkfeldes des Anfangskerns teilt sich auf die zwei Quarkfelder [die Masse] der kleineren Kerne und die Bewegungsenergie des Alpha-Teilchens auf.

A3.2b

Kernfusion [Bild]



☐ Bei der Fusion werden zwei Kernen zu einem gemeinsamen Kern verschmolzen. Dabei ist der entstehende Kern leichter als die beiden einzelnen zusammen. Wie erklärt man hier die Massendifferenz und die Energieübertragung?

Lösung: Die Bewegungsenergie und die Feldenergie der Strahlung (sowie die Energie des Neutrons) entspricht der Massendifferenz. Das ist die Energie, die das Quarkfeld abgibt. [ODER: Die Energie des Quarkfeldes (des fusionierten Kerns) teilt sich auf das Quarkfeld [die Masse] des Heliumkerns und des Neutrons sowie auf die Feldenergie der Strahlung auf.

3.2 Higgs-Feld

P3.2

☐ Kannst du mir das, was ich dir gerade erklärt habe nochmal zusammenfassen?

Vorgabe: Die Energie/Masse der Elementarteilen [Elektronen und Quarks] kommt durch (die Wechselwirkung mit dem) das Higgsfeld.

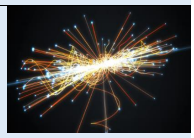
A3.2a

Annihilation PET [Bild]

Lösung: Wenn sich Elektron und Positron vernichten, wird die Energie/Masse in Feldenergie (der elektromagnetischen Strahlung) übertragen. Die Masse der Teilchen kommt durch das (bzw. die Wechselwirkung mit dem) Higgsfeld.

A3.2b

CERN-Experiment [Bild]



☐ Im LHC am CERN werden Protonen mit hoher Geschwindigkeit aufeinander geschossen. Dabei treffen sie als Teilchen mit besonders großer Bewegungsenergie aufeinander.

Frage: Welche Energie haben wir insgesamt im Treffmoment, wenn wir diese Situation mit Bewegungs- und Feldenergie beschreiben wollen?

☐ Die Feldenergie und Bewegungsenergie im Treffmoment kann nun zur Entstehung neuer Elementarteilchen führen, die sich wiederum auch zu größeren Teilchen zusammensetzen können. Beobachten kann man das dann mit Detektoren, welche die einzelnen Teilchen nachweisen.

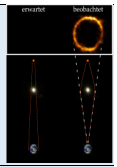
Frage: Kannst du erklären, wo die Energie der neuen Teilchen herkommt bzw. von wo nach wo hier Energie übertragen wird?

Lösung: Die Protonen haben zu Beginn (Bewegungsenergie,) Feldenergie im Quarkfeld ODER Feldenergie durch das Higgsfeld. Diese wird im Treffmoment in (Bewegungsenergie und) Energie durch das Higgsfeld der neuen Teilchen übertragen. (Wenn sich dann z. B. Quarks zu größeren Teilchen zusammenschließen, wird auch Energie in das Quarkfeld übertragen.)

3.3 Zusatz

A3.3a

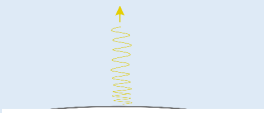
Gravitationslinse [Bild]



☐ Da die elektromagnetische Strahlung Feldenergie besitzt (und Energie sich wie Masse verhält), wirkt die Gravitation auch auf die Strahlung (und sie wird ablegelnkt/angezogen). [Eine Formulierung mit Gesamtfeld von Strahlung und schwarzem Loch ist hier auch akzeptabel.]

A3.3b

Gravitative Rotverschiebung [Bild]



☐ Die Energie der elektromagnetischen Strahlung wird in das Gravitationsfeld übertragen. [Das Gravitationsfeld nimmt die (Feld-) Energie der Strahlung auf.]

ANHANG F

Handreichung

Handreichung

für das Unterrichtskonzept zum

Energie-Feld-Ansatz

von Manuel Becker, M. Sc.

für Lehrpersonen

zur Anwendung in Klassen der Jgst. 10 bis 12 (Oberstufe) in allgemeinbildenden höheren Schulen.

Ansprechpartner: Manuel Becker, M. Sc.; Universität Wien, Zentrum für Lehrer*innenbildung

Übersicht

1. Basisinformationen zur Handreichung 2
2. Einführung: Phänomenologie 5
3. Energie in Feldern 6
3.1 Grundbegriff des Feldes 6
3.2 Das Gesamtfeld 7
3.3 Tendenz des Gesamtfeldes 9
3.4 Energie im Gesamtfeld 10
4. Energieübertragung 13
5. Arten von Feldern und Bewegungen 18
5.1 Atomare Felder 18
5.2 Elektromagnetische Strahlung 21
5.3 Thermische Energie als mikroskopische Bewegungsenergie 23
6. Moderne Physik 25
Einleitung 25
6.1 Quarkfelder 25
6.1 Higgsfeld 28
7. Zusatz (falls Zeit übrig ist) 31
7.1 Beispiel Gravitationslinse 31
7.2 Beispiel: Gravitationsbedingte Rotverschiebung 32

1. Basisinformationen zur Handreichung

Sehr geehrte Lehrperson,

vielen Dank, dass Sie sich bereit erklären, das Konzept zum Energie-Feld-Ansatz in Ihrem Unterricht zu erproben! Um Ihnen die Planung der Unterrichtssequenz zu erleichtern und dieser eine Struktur vorzugeben, soll Sie die vorliegende Handreichung unterstützen. Im Folgenden werden dazu einige Hinweise als Basisinformationen gegeben.

Zur Handreichung

Die hier beschriebene Umsetzung des Konzeptes ist für vier Einzelstunden als Lehr-Lern-Einheit (LLE) konzipiert. Davor und danach soll noch jeweils eine Unterrichtsstunde für den zwecks Evaluation begleitenden Prä- bzw. Posttest zur Verfügung stehen. In dieser Handreichung geht es nicht um die fachliche Klärung oder Darstellung von Argumentationen für die didaktische Rekonstruktion, sondern um die reine Darstellung der LLE. Die Handreichung umfasst also die Darstellung der ausgearbeiteten Inhalte, insbesondere die Konzeptideen, und Kontexte (Beispiele, Erklärungen und Aufgaben) der LLE, welche zu Vermittlung der Konzeptideen herangezogen werden, sowie Anforderungen und nützliche Hinweise zur Implementation im Unterricht. Dabei stellen die Konzeptideen das Grundgerüst des Konzeptes dar und sind also die Inhalte, welche die Schüler*innen am Ende der Unterrichtssequenz verstanden haben sollten. Dies soll mit Hilfe der Testinstrumente überprüft werden.

Hinweis zu Materialien:

Ihnen wird neben dieser Handreichung eine Zusammenstellung an Versuchsmaterialien bereitgestellt, welche Ihnen bei der Durchführung der Experimente helfen sollen. Darüber hinaus erhalten Sie Präsentationsfolien mit Abbildungen bzw. Kurzvideos zur visuellen Unterstützung ihres Unterrichts. Außerdem gibt es Arbeitsblätter für die Schüler*innen. Für die Lehrperson gibt es ein entsprechendes Lösungsblatt (Hinweis: Die Musterlösungen sind sauber ausformuliert; bei der Bearbeitung reichen auch Stichpunkte von den Schüler*innen; die Lösungen könnten mündlich gesammelt und verglichen werden). Die Testinstrumente (Prä- und Posttest) werden Ihnen natürlich auch bereitgestellt.

Zu Anpassungen und Spielraum der Lehrperson:

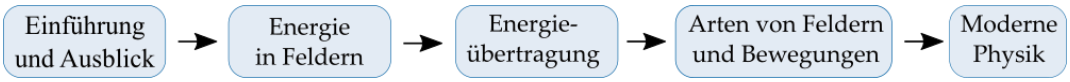
Die in der Handreichung angegebenen Erklärungen sind exemplarisch und dürfen sinngemäß geringfügig abgeändert werden, solange die fachlichen Aussagen sowie die Konzeptideen erhalten bleiben. Dabei sind auch Begrifflichkeiten von Bedeutung und nur zu ändern, wenn explizit Synonyme oder Alternativen angegeben sind. Ansonsten sollten die inhaltlichen Aussagen so weit wie möglich beibehalten werden. Abgesehen von den Konzeptideen und wesentlichen Begriffen sind sprachliche Anpassungen möglich und im Stil der Lehrperson adaptierbar. So wird z. B. die methodische Gestaltung des Unterrichts der Lehrperson überlassen, damit der Unterricht möglichst seine Originaldynamik zwischen Lehrperson und Schüler*innen behält und authentisch wirkt. Die Terminologie wesentlicher Begriffe (z. B. Gesamtfeld, Tendenz, Minimierung) und Logik (roter Faden und Aufbau) der Erklärungen sowie die Verwendung der Kontexte sollen dabei möglichst beibehalten werden. Das heißt, bei der Umsetzung bleibt den Lehrpersonen insofern ein Spielraum, als dass diese Aspekte in ihrer Sinnhaftigkeit bestmöglich beibehalten und vermittelt werden.

Zum Farbschema:

Das Farbschema soll Sie als Lehrperson dabei unterstützen, die Handreichung im Unterricht zu implementieren. **Hellblaue Kästen** beinhalten die Konzeptideen, auf welche in dem jeweiligen Abschnitt eingegangen wird. Sie stellen den Inhalt also in komprimierter Form als Überblick dar und verdeutlichen damit, welche Inhalte vermittelt werden sollen und worauf der Fokus liegt. Die einzelnen Konzeptideen bzw. die wesentlichen Begriffe sind für eine bessere Übersicht im Text **blau** dargestellt. Weitere Punkte, die wesentlich erscheinen sind fett geschrieben. In **hellgrauen Kästen** befinden sich erläuternde bzw. zusammenfassende Hinweise zum Inhalt sowie zur Umsetzung des Konzeptes im Unterricht. **Rote Kästen** geben Informationen zu potenziellen Schwierigkeiten beim Lernen der Konzeptideen und Hinweise darauf, worauf die Lehrperson achten sollte.

Bei Aufgaben sollen die Schüler*innen zunächst selbst mit Hilfe der Arbeitsblätter überlegen (z. B. kurze Arbeits-/Gruppenphase). Anschließend sollen die Ergebnisse besprochen und zu einer im Rahmen des Konzeptes angemessenen Erklärung geführt werden.

Grundstruktur des Unterrichtskonzeptes und Umsetzung für den Unterricht



Die Unterrichtssequenz gliedert sich in fünf Teile: Zunächst wird eine kurze phänomenologische Einordnung des Themas und ein Ausblick auf das zu Erwartende gegeben. Anschließend beginnt das Konzept mit der Klärung des Grundbegriffs „Feld“ sowie der Einführung des Gesamtfeldes als Energieträger. Darauf aufbauend wird die Energieübertragung mit der Feldveränderung verknüpft. Es folgt die Einordnung von atomarem und elektromagnetischem Feld sowie der thermischen Energie in das Konzept. Abschließend werden Quarkfelder und das Higgsfeld eingeführt, um den Zusammenhang von Feldenergie und Masse zu erläutern.

Es bietet sich an, die vier Teile auf jeweils eine Unterrichtsstunde aufzuteilen; Abweichungen sind natürlich möglich, die Reihenfolge sollte aber beibehalten werden.

Limitationen

Natürlich deckt der Energie-Feld-Ansatz nicht alle Fragen zum Themas Energie ab. Er bietet eine Grundlage für die Beschreibung von Phänomenen mit Feldern. Das vorliegende Konzept und seine beschriebene Implementation sind ein Ausgangpunkt, der vielen – aber nicht alles – abdeckt. Beispielsweise wird auf die folgenden Fragen nicht direkt eingegangen. Dennoch sollen hier kurze Antworten für den Fall vorgeschlagen werden, dass diese Fragen im Unterrichte aufkommen:

1) Kann Energie auch zwischen Feldern oder Bewegungen übertragen werden?
   Ja, das ist auch eine Möglichkeit, z. B. wenn zwei sich bewegende Objekte kollidieren und dabei ihr Tempo ändern; oder wenn zwei Felder involviert sind.
2) Was ist mit einem Feld, das sich bewegt?
   Dieser Fall kann kompliziert sein. Im Fall von elektromagnetischer Strahlung wird nur über Feldenergie gesprochen, da es sich hier um ein masseloses Feld handelt.

Der kompliziertere Fall eines sich bewegenden Gesamtfeldes mit Masse (z. B. ein Sternsystem mit Translationsbewegung), käme es zu einer Kombination aus Feldenergie des Gravitationsfeldes und Bewegungsenergie der beteiligten Quellen. Solche Beispiele sollten aber zu Beginn nicht behandelt werden, zumal es möglichweise andere Konzepte gibt, die sich in komplizierten Fällen besser eigenen, um Bewegungen zu beschreiben.

3) Was ist mit dem Photon; ist das Welle oder Teilchen? (siehe auch unten)
   Das Photon wird hier wegen seiner fehlenden Masse zur elektromagnetischen Strahlung eingeordnet; und zwar als Feld-„Paket“, das Feldenergie trägt.
4) Was ist mit dem Higgsfeld; das hat im Gegensatz zu den anderen Feldern keine Quelle?
   Das stimmt, das Higgsfeld ist omnipräsent und braucht keine Quelle. Es wird im Kontrast zu den anderen Feldern auch als solches ausgezeichnet. Da dieses spezielle Feld erst am Ende des Konzeptes erscheint, sollte es möglich sein, Schüler*innen hier den besonderen Charakter zu verdeutlichen. Außerdem ist die Physik des Higgsfeldes komplizierter und so soll hier nur der Zusammenhang mit der Masse von Elementarteilchen besprochen werden. Kernaussage ist hier, dass auch diese Masse als Energie den Ursprung in einem Feld findet.

Infos und Anweisungen zu Prä- und Posttest

Es gibt einen Prätest und einen Posttest. Beide werden Ihnen übergeben und bedürfen ca. einer Schulstunde Erhebungszeit. Der Prätest soll vor Beginn der Unterrichtssequenz und der Posttest danach bearbeitet werden.

Auf der ersten Seite des Tests sollen die Schüler*innen drei kurze Angaben machen, aus denen dann ein anonymisierter Code erstellt wird, sodass ihre Testbögen anonymisiert sind, aber dennoch für den Vergleich der Ergebnisse von Prä- und Posttest zugeordnet werden können. Die Angaben sind die folgenden:

1. Erster und zweiter Buchstabe des Vornamens der Mutter oder Erziehungsberechtigten
2. Erster und zweiter Buchstabe der Stadt, in der man wohnt
3. Monat, in dem man geboren wurde

Für die Einordnung der Leistung wird am Ende des Prätests noch nach der letzten Zeugnisnote in Physik und dem allgemeinen Interesse an physikalischen Themen gefragt.

Letzte Anmerkung:

Ziel des Energie-Feld-Ansatzes ist es, die traditionellen Energieformen auf Energie in Bewegungen und Feldern zurückzuführen. Das bedeutet, dass man im Verlauf über traditionelle Energieformen (elektrische, mechanische, potenzielle, chemische, Kernenergie, etc.) sprechen kann, diese allerdings in jedem Fall in das Konzept einbetten sollte. Nur so kann einheitlich deutlich werden, dass die Beschreibung mit Feldern einen bedeutenden Mehrwert für die Beschreibung von Phänomenen besitzt; nämlich dass die „Begriffshülsen“ der traditionellen Energieformen inhaltlich angereichert werden.

2. Einführung: Phänomenologie

Dieser Teil dient der Einordnung und Motivation des Themas für die Schüler*innen. Es sollen die folgenden zwei Grundgedanken aufgegriffen und ins Bewusstsein gerufen werden:

- Die Gesamtenergie unserer Welt ist erhalten.
- Die Betrachtung der Energie für die Beschreibung eines Phänomens nützlich.

(Folie 2 der Präsentation)

Vorschlag für die Einführung:



Energie kennt ihr (die Schüler*innen) bereits aus dem bisherigen Schulunterricht. Dabei habt ihr (vermutlich) verschiedene **Formen von Energie** kennengelernt, wie z. B. elektrische, kinetische, potenzielle, Wärme, Solar- oder auch Strahlungsenergie. Grundsatz war dabei immer, dass Energieformen ineinander umgewandelt bzw. übertragen werden können, die **Gesamtenergie** (eines Systems) aber **immer konstant** bleibt; das bezeichnet man als Energieerhaltung. Für uns ist dieses Prinzip im Folgenden auch **von Bedeutung**, **insbesondere, um Prozesse in Phänomenen zu beschreiben**. Dabei kann man bei Kenntnis der übertragenen Energie nicht nur beschreiben, was passiert, sondern auch in welchem Ausmaß. Zum Beispiel, wenn man das Tempo eines Wagens auf einer Achterbahn bestimmen möchte oder herausfinden will, wie viel Energie bei einem bestimmten Prozess in Kernkraftwerken frei wird. Auch wenn man die Erzeugung von neuen, vielleicht sogar noch unbekannten Teilchen untersucht (so wie man das beispielsweise am LHC des CERN macht), muss man wissen, wie viel Energie dafür notwendig ist.

Für das Verständnis von Phänomenen spielt die Betrachtung und das Wissen über die Energie also eine bedeutende Rolle.

Überblick: Was erwartet uns in den nächsten Stunden?

An dieser Stelle bekommen die Schüler*innen einen Überblick über die nächsten Stunden. Dieser Teil soll sie kognitiv auf den Konzeptwechsel einstimmen und ihr Interesse wecken.

Wir lernen in den nächsten Unterrichtsstunden ein Konzept kennen, dass die **bisherigen Energieformen zusammenfasst und nurmehr zwischen Bewegungsenergie und Feldenergie unterscheidet**. Dabei werden wir verschiedene Felder kennenlernen, wie z. B. elektrische, magnetische oder auch Kernfelder und wir werden sehen, dass damit die Beschreibung von Prozessen übersichtlicher wird und wir dazu folglich nur nach Bewegungen bzw. **Feldern suchen** müssen. Wir werden sehen, wie man die Energieübertragung zwischen Feldern und Bewegungen bei fast allen Phänomenen betrachten kann und dass die **Beschreibung einfacher** wird, wenn man zuerst alle involvierten Felder identifiziert. Was wir lernen, wie man mit dem Konzept **auch modernste Phänomene** beschreiben kann, wie z. B. die Bewegung eines Satelliten um die Erde, die Spaltung und Fusion von Kernen sowie die Vernichtung und Entstehung von vielleicht sogar noch unbekannten Teilchen.

3. Energie in Feldern

In diesem Teil wird der Grundstein für das Konzept über den Zusammenhang von Energie und Feldern gelegt. Implizit wird dabei auch die folgende für den Energie-Feld-Ansatz zentrale Konzeptidee vorbereitet:

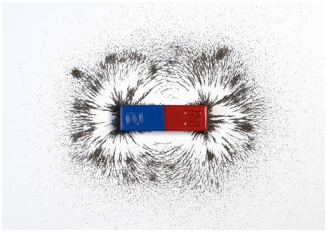
> Es gibt nur Bewegungsenergie und Feldenergie, d. h. Energie in der Bewegung von Objekten und Energie in Feldern.

3.1 Grundbegriff des Feldes

Konzeptideen:

- Jede Quelle hat ein Feld. (Bewegte) Ladungen, Magnete, Massen und Quarks sind Quellen eines Feldes.
- Felder kann man weder direkt sehen noch anfassen. Sie sind (sofern möglich) von ihrer Quelle unendlich weit ausgebreitet.

(Folien 3 und 4 der Präsentation)



Felder kennt ihr schon aus verschiedenen Bereichen, z. B. das Magnetfeld eines Stabmagneten, das man mit Eisenspänen auch sichtbar machen kann.[1] Wir wissen auch, dass auch Ladungen ein Feld: ein elektrisches Feld. Ebenso gibt es Gravitationsfelder. Wie die einzelnen Felder aussehen, ist uns gar nicht so wichtig; wichtig ist nur, dass es diese gibt. Sie sind also real, auch wenn man sie weder sehen noch anfassen kann. Allen Feldern gemeinsam ist, dass es stets eine Quelle gibt. Beispielsweise ist eine Ladungen immer Quelle eines elektrisches Feldes[2], ein Magnet ist Quellen eines Magnetfeldes und eine Masse ist Quelle eines Gravitationsfeldes.

3.2 Das Gesamtfeld

Konzeptideen:

- Zwei (oder mehr) Quellen wechselwirken miteinander über ihre Felder. Die Felder überlagern sich dabei zu seinem Gesamtfeld als Konstellation aus Quellen und der Wechselwirkung zwischen ihnen.
- Jedes Gesamtfeld trägt Energie. Für die Betrachtung der Energie spielen die Einzelfelder keine Rolle mehr, sondern nur noch deren Überlagerung: das Gesamtfeld.

(Folien 5 bis 10 der Präsentation)

Zur Zeichnung und Erläuterung des Gesamtfeldes:

Zuerst stellt man die Quellen dar (Magnete, Ladungen oder Massen). Dann wird je ein Kreis um die Quellen gezeichnet, welche sich in der Mitte überlappen. Die Größe ist dabei nicht wichtig, nur das Prinzip. Anschließend wird ein Gesamtfeld außen herum gezeichnet **und** die Einzelfelder durchgestrichen. Dabei sollte man erläutern, dass die nurmehr das Gesamtfeld relevant ist, da dieses später die Energie trägt.

Gibt es zwei Quellen gleicher Art[3], so wechselwirken sie über ihre Felder miteinander. Dabei bildet sich ein sogenanntes Gesamtfeld[4] als Überlagerung der einzelnen Felder. **Wichtig** dabei ist nun, dass wir uns im Folgenden nur für das Gesamtfeld interessieren, denn sobald sich zwei einzelne Felder überlagern, spielen diese für uns keine Rolle mehr. Man kann sich das auch graphisch darstellen.

[1] Falls das nicht der Fall ist, kann auch eine passende Alternative angedeutet werden. Hier geht es darum, dass die Schüler*innen daran anknüpfen können, was sie bereits kennen und dass sie wissen, was wir hier unter einem Feld verstehen.
[2] auf Nachfrage von Schüler*innen: eine bewegte Ladung sind auch Quelle eines Magnetfeldes
[3] man kann auch sinngemäß „gleiche Quellen“ oder „Quellen gleicher Eigenschaft“ sagen
[4] Wenn Schüler*innen im Unterricht sinngemäß „gesamtes Feld“ oder „gemeinsames Feld“ sagen, ist das auch in Ordnung.

Beispiel: *Darstellung des Gesamtfeldes bei zwei Magneten*

Bei zwei Magneten zeichnet man um jeden Magneten einen Kreis; dieser stellt das Magnetfeld dar. Natürlich ist das Feld eigentlich unendlich groß, sofern das möglich ist, aber da wir das nicht zeichnen können, stellen wir uns das vor. Darstellen können wir das durch die einzelnen Kreise. Da die Felder unendlich weit ausgedehnt sind, überlagern sie sich auch überall, das skizzieren wir dadurch, dass sie sich hier überlappen[5]. Insgesamt ergibt sich dann ein Gesamtfeld, das wir durch eine Ellipse um beide Magnete herum darstellen. Diese Visualisierung ist zwar sehr limitiert, sie hilft uns aber dabei, sich die Situation besser vorstellen zu können. Folglich kann man dieses Prinzip auch auf andere Felder wie elektrische Felder bei Ladungen oder auf Gravitationsfelder bei Massen übertragen.

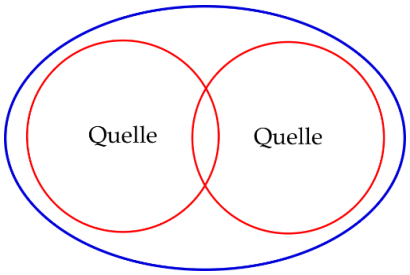


Abbildung 1. Gesamtfeld zweier Quellen (allgemein).

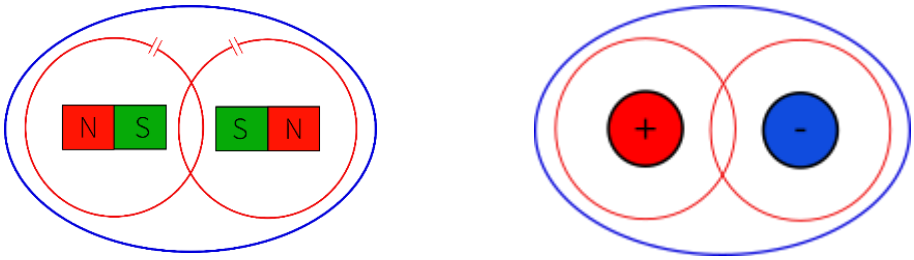


Abbildung 2. Gesamtfeld zweier Magnete (links) und zweier Ladungen (rechts). Zur Veranschaulichung, dass nurmehr das Gesamtfeld relevant ist, kann man die beiden Einzelfelder auch durchstreichen (s. links)

Achtung!

Eine Fehlvorstellung von Schüler*innen ist, dass sich die Einzelfelder nur dann überlagern, wenn sich die Quellen nahe sind. Das sollte mit dem Argument der (wenn möglich) unendlichen Ausdehnung verhindert werden; dennoch sollte darauf geachtet werden, dass dieser Punkt deutlich wird.

Es sollte außerdem darauf verzichtet werden, Feldlinienbilder zu zeigen, da diese den Fokus von der Konzeptidee des Gesamtfeldes nehmen. Es ist sinnvoll, das Gesamtfeld auf die angegebene Weise darzustellen, um die Feldvorstellung einfach zu halten und auf die wesentlichen Aspekte (Quellen, Einzelfelder, Überlagerung zum Gesamtfeld) zu fokussieren.

[5] Wenn die Schüler*innen im Folgenden „überlappen“ statt „überlagern“ sagen, ist das in Ordnung. Des Weiteren ist es für die Erklärung sinnvoll, die Einzelfelder bei der Konstruktion durchzustreichen und damit zu verdeutlichen, dass im Folgenden nur das Gesamtfeld eine Rolle spielt. Wenn die Schüler*innen diese allerdings nicht durchstreichen, die Aussage aber erkennen, ist das in auch in Ordnung. Das Durchstreichen dient also eher der Veranschaulichung.

Aufgaben (zeichnen und beschreiben; Arbeitsblatt 1, Aufgabe Teil 1)**:**

1) *Luftballons*: Wie ergibt sich das Gesamtfeld bei zwei elektrostatisch aufgeladenen Luftballons? [6]
   Lösung: Die elektrischen Einzelfelder der Luftballons (je ein Kreis um die Luftballons) überlagern sich und bilden ein Gesamtfeld (Ellipse um die Konstellation). Zeichnung siehe Lösung Arbeitsblatt.
2) *Satellit und Erde*: Wie ergibt sich das Gesamtfeld bei einem Satelliten, der sich in einer beliebigen Entfernung zur Erde befindet?
   Lösung: Das Gravitationsfeld des Satelliten und das Gravitationsfeld der Erde (je ein Kreis um beide) überlagern sich zu einem Gesamtfeld (Ellipse um die Konstellation). Zeichnung siehe Lösung Arbeitsblatt.



Abbildung 3. Zwei elektrostatisch aufgeladene Luftballons (links) und die Konstellation Satellit & Erde (Globus von pixaby.com).

3.3 Tendenz des Gesamtfeldes

Konzeptidee:

Das Gesamtfeld ergibt sich aus der Wechselwirkung der Quellen bzw. Einzelfelder. Deshalb tendiert es entsprechend dieser Wechselwirkung dazu, sich zusammenzuziehen oder auseinanderzudrücken.

(Folien 12 bis 16 der Präsentation)

Die Tendenz des Feldes kennen wir bisher auch als Kraft.[7] Wir wissen nun, dass sich das Gesamtfeld aus zwei (oder mehr) sich überlagernden Einzelfeldern ergibt. Dieses Gesamtfeld besitzt dann die Tendenz, sich entsprechend seiner Wechselwirkung zusammenzuziehen oder auseinanderzudrücken. Das bedeutet: Wenn sich das Feld durch zwei sich anziehende Quellen (z. B. Massen oder zwei ungleichnamige Ladungen) ergibt, dann tendiert es dazu sich in Richtung der Wechselwirkung (wir kennen das auch als **Kraft**) zu verändern. Bei sich anziehenden Ladungen gibt es also ein Gesamtfeld, das dazu tendiert, sich zusammenzuziehen.[8] Umgekehrt tendiert das Gesamtfeld zweier sich abstoßender Ladungen dazu, sich auseinanderzudrücken.[9]

[6] Hier kann man darauf hinweisen, dass dies passiert, wenn man z. B. einen Luftballon an einem Katzenfell reibt.
[7] Es wäre wünschenswert, wenn die Schüler*innen dennoch über die Tendenz des Feldes und die Energieübertragung anstelle der Kraft argumentieren würden.
[8] sinngemäßes wie „kontrahieren“, „schrumpfen“ oder „verkleinern“ ist auch angemessen
[9] sinngemäßes wie „expandieren“, „wachsen“ oder „vergrößern“ ist auch angemessen

Sofern es für das Feld die Möglichkeit gibt, also keine äußeren Einflüsse, die dagegensprechen, wird das Feld sich entsprechend dieser Tendenz verändern. Aus diesem Grund nähern sich anziehende Quellen an und abstoßende entfernen sich ohne äußeren Einfluss.

3.4 Energie im Gesamtfeld

Konzeptideen:

- Das Gesamtfeld trägt Energie, nicht die Einzelfelder.
- Ein Gesamtfeld kann Energie aufnehmen oder abgeben.
- Energie kann also zwischen Feldern und Bewegungen übertragen werden.

Beispiel: *Magnetwägen*

An dieser Stelle wird das Experiment der beiden Magnetwägen gezeigt. Dabei wird die folgende Beschreibung geboten bzw. die Schüler*innen gebeten, diese zu formulieren.

Das Experiment funktioniert wie folgt: Zwei Stabmagnete liegen auf je einem Experimentierwagen in sich abstoßender Konstellation. Die beiden Magnetwägen werden aneinandergedrückt, mit einer Hand festgehalten und den Schüler*innen nach Beschreibung des Aufbaus die **Frage** gestellt, was wohl passieren wird, wenn man die beiden Wägen loslässt. Hier sollten die Schüler*innen kurz die Gelegenheit haben, zu antworten. Dann lässt man los; die beiden Wägen fahren auseinander. (Folie 12 der Präsentation)

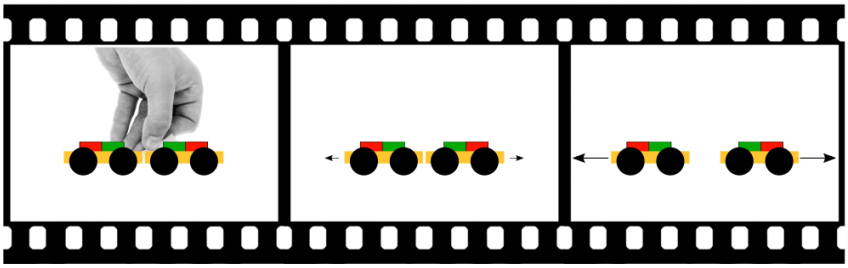


Abbildung 4. Abstoßende Magnetwägen; die beiden sich abstoßenden Magnetwägen werden zusammengehalten und dann losgelassen.

Schauen wir uns ein Beispiel für ein sich veränderndes Feld an:

Wir haben hier zwei Magneten auf Wägen in abstoßender Konstellation. Sie werden gerade noch zusammengehalten. Was passiert wohl, wenn ich sie loslasse?

Sie fahren auseinander. Die Frage ist nun: Woher war vorher die Bewegungsenergie, die sie am Ende haben, wenn sie sich voneinander entfernen (rhetorische Frage)? Ein Magnet ist Quelle eines Magnetfeldes. Die beiden Magnetfelder überlagern sich zu einem Gesamtfeld. Hier stoßen sich die beiden Magnete ab, das heißt wir haben eine abstoßende Wechselwirkung, also ein Gesamtfeld, das sich ausdehnt. Und jetzt kommt der für unser neues Konzept entscheidende Punkt: Dieses Gesamtfeld trägt Energie. Wichtig dabei ist zu wissen, dass die Energie immer NUR im Gesamtfeld mit der Wechselwirkung steckt, also in der Überlagerung. NICHT die Einzelfelder der Quellen tragen Energie, sondern erst die Konstellation als Überlagerung, also das Gesamtfeld. Das Gesamtfeld trägt also Energie und diese kann aus dem Feld in Bewegungsenergie übertragen werden. Wenn man die beiden Magnetwägen also loslässt, dann gibt das Feld Energie an die Bewegung der beiden Magnetwägen ab.

Beispiel: *Übertragung auf die umkehrenden Magnetwägen*

An dieser Stelle wird das Experiment der beiden Magnetwägen in leicht abgeänderter Form beschrieben: Die Wägen werden aus einem Abstand angestoßen, sodass sie aufeinander zu fahren, in der Mitte aufgrund der magnetischen Abstoßung umkehren und sich wieder entfernen (**Achtung**: sie sollten sich in der Mitte nicht treffen, damit Schüler*innen nicht von einem elastischen Stoß ausgehen; es sollte also im Umkehrpunkt ein Abstand zu sehen sein) . Die Erklärung ist analog zu oben und soll nach Möglichkeit von den Schüler*innen formuliert werden. Hier kann man selbst erklären oder die Schüler*innen erklären lassen. (Folie 13 der Präsentation)

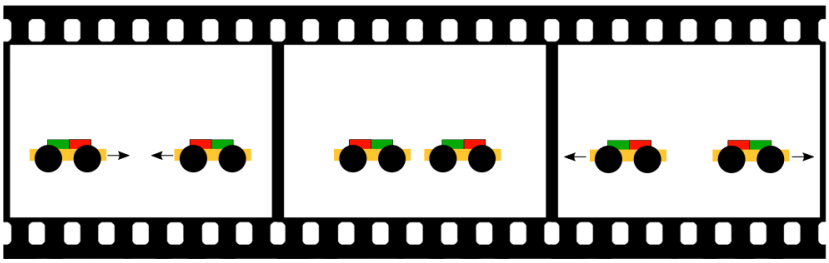


Abbildung 5. Umkehrende Magnetwägen; die Abbildung zeigt die Startsituation des „Aufeinanderzufahrens“.

Schauen wir uns dazu noch an, was passiert, wenn die Magnetwägen aufeinander zufahren:

Hier fahren jetzt die beiden Magnetwägen von gerade aufeinander zu, weil sie angestoßen wurden. Sie haben also Bewegungsenergie. Jeder Magnet hat als Quelle ein Magnetfeld und die beiden Felder überlagern sich (weil die Felder den gesamten Raum durchdringen) zu einem Gesamtfeld; das trägt grundsätzlich Energie. Wenn die beiden Wägen nun aufeinander zu fahren, wird Energie aus der Bewegung der Magnete in das Feld übertragen, bis sie in der Mitte keine Bewegungsenergie mehr besitzen. Da hat dann das Gesamtfeld die gesamte Energie aufgenommen. Da das Feld nach wie vor aufgrund der abstoßenden Wechselwirkung dazu tendiert, sich auseinanderzudrücken, überträgt es (sobald es die gesamte Energie hat) die Energie zurück in die Bewegung der Magnetwägen; sie werden wieder schneller. Genauso funktioniert das mit allen Feldern: Ein Gesamtfeld kann Energie aufnehmen oder abgeben. Dabei nimmt das Feld Energie aus einer Bewegung auf oder gibt Energie in die Bewegung ab.

Aufgaben (mündliche Fragestellung und Diskussion der Aufgabe Teil 2 von Arbeitsblatt 1)**:**

Die Aufgaben richten sich nach den bereits bekannten Beispielen und Abbildungen. Hier soll auf die Frage eingegangen werden, woher die Energie in die Bewegung übertragen wird bzw. wo sich diese zu Beginn befindet. Dazu sollen zwei Veranschaulichungen gezeigt werden:

1) *Luftballons*: Zwei Luftballons werden mit Luft befüllt und an einem Fell (oder Stoff) gerieben, sodass sie sich beide elektrostatisch aufladen. Dann wird ein Ballon auf dem Tisch platziert und der andere langsam an diesen herangeführt. Man sieht, dass sich der freie Ballon wegbewegt. (Folie 14 der Präsentation)
2) *Satellit und Erde*: Man zeigt die angegebene Simulation („Schwerpunkt und Umlaufbahnen“. Dabei wählt man „Modell“ und die Konstellation Erde und Satellit aus. Dann bereitet man die Bewegung des Satelliten so vor, dass sich dieser auf einer Ellipse um die Erde bewegt. Dabei sollte deutlich erkennbar sein, dass er ein einem Punkt besonders nah und an einem anderen weit entfernt ist. Es ist von Vorteil, den „Pfad“ ein und die „Geschwindigkeit“ aus zu stellen. https://phet.colorado.edu/sims/html/gravity-and-orbits/latest/gravity-and-orbits_de.html (Folie 15 der Präsentation)

1) *Luftballons*: Woher kommt die Energie, welche der Luftballon am Ende in seiner Bewegung besitzt?
Lösung: aus dem Gesamtfeld der elektrischen Einzelfelder der Luftballons.

2) *Satellit und Erde*: Wenn sich der Satellit der Erde nähert, wird er schneller. Woher kommt die Energie für diese schnellere Bewegung?
Lösung: aus dem Gesamtfeld der beiden einzelnen Gravitationsfelder von Erde und Satellit.

4. Energieübertragung

Hier wird erläutert, wie die Übertragung von Energie mit der Veränderung von Feldern zusammenhängt und woran man das erkennt. Insbesondere die Richtung der Energieübertragung (in ein Feld oder aus einem Feld) soll dabei verdeutlich werden.

Konzeptideen:

- Wenn Energie in ein oder aus einem Feld übertragen wird, dann verändert sich das Feld. Das merkt man das daran, dass…
  - … sich eine Bewegung verändert.
  - … sich ein Feld zusammenzieht oder auseinanderdrückt.
  - … der Abstand der Quellen sich ändert.
- Ein Feld gibt dabei immer Energie ab, wenn es sich entsprechend seiner Tendenz (Wechselwirkung) verändert. Umgekehrt nimmt es Energie auf (Richtung der Energieübertragung).
- Die Tendenz eines Feldes führt dazu, dass es sich zu einem Zustand minimaler Energie verändert, sofern es die Möglichkeit dazu hat.

Indikatoren

Wir schauen uns nun an, woran man erkennt, wann und in welche Richtung Energie übertragen wird. Zunächst aber noch eine Anmerkung: Wenn wir bei der Betrachtung der Energie im Folgenden über Felder sprechen, dann **meinen wir damit stets das Gesamtfeld**, da nur dieses Energie trägt.

Grundsätzlich gibt es drei Indikatoren, an denen man das erkennt:

1. Eine Bewegung verändert sich, d. h. etwas wird schneller oder langsamer.
2. Der Abstand von Quellen ändert sich, d. h. ein Feld dehnt sich aus oder zieht sich zusammen.
3. Immer dann, wenn ein Feld sich in Richtung der Wechselwirkung (Kraft) verändert, gibt es Energie ab. Wenn es sich entgegen der Wechselwirkung verändert, nimmt es Energie auf (Richtung der Energieübertragung).

Beispiel: *Umkehrende Magnetwägen*

Achtung!

Schüler*innen könnten die „Stärke des Feldes“ als Indikator für die Richtung der Energieübertragung verwenden, z. B. die Formulierung „wenn das Feld schwächer/stärker wird“. Dies geschieht meist, wenn sich der Abstand der Quellen ändert, z. B. bei Erde und Satellit. Darauf sollte allerdings verzichtet werden, da sich zwar in einigen Fällen die Kraft ändert, dies aber nicht unmittelbar mit der Richtung der Energieübertragung zusammenhängt. Auch dass die Kraft geringer wird, wenn Energie abgegeben wird, stimmt nicht in allen Fällen (z. B. Vergleich von anziehenden Massen mit abstoßenden Ladungen). Hier sollte also darauf geachtet werden, dass die **Veränderung des Feldes/Abstands entsprechend/in Richtung der Tendenz** zu einer **Energieabgabe** führt. Argumentationen über die Stärke des Feldes oder die simple Kraft sind dabei nicht zielführen.

Hier wird nun ein Beispiel erläutert, das die Schüler*innen bereits kennen, um den Fokus auf die Beobachtung anhand der drei Indikatoren zu richten. Da dieser Teil intuitiv ist, kann er nach Möglichkeit schnell behandelt werden. Die Schüler*innen sollten nur in jedem Fall verstehen, dass man die Veränderung eines Feldes und demnach auch die Energieübertragung anhand dieser drei Indikatoren beschreiben kann. **Wichtig** ist, dass man die Richtung der Energieübertragung (in ein Feld oder aus einem Feld) richtig mit der Veränderung des Feldes entsprechend seiner Tendenz verknüpft.

Der Fokus sollte dabei immer auf der Beantwortung der folgenden Fragen liegen:

1. Woran erkennt man, dass Energie übertragen wird?
2. Woran erkennt man, wohin bzw. in welche Richtung die Energie übertragen wird?
   (Als Grund dafür gilt die Überlegung zur Tendenz als Indikator für die Richtung der Energieübertragung.)

Schauen wir uns dazu nochmal das Beispiel mit den umkehrenden Magnetwägen an: Wenn die Magnete aufeinander zu fahren, werden sie durch die abstoßende Wechselwirkung langsamer und geben deshalb Energie an das Feld ab. Das Feld nimmt also Energie aus ihrer Bewegung auf. Dabei sieht man: Das Feld dehnt sich aus; der Abstand der beiden Magnete (Quellen) vergrößert sich entsprechend der Wechselwirkung. Wenn es aber durch die Bewegung der Magnete entgegen der Wechselwirkung zusammengedrückt wird, nimmt es Energie auf. Das geschieht, bis die Magnetwägen in der Mitte all ihre Energie aus der Bewegung an das Feld abgegeben haben. Dann hat das Feld die gesamte Energie aufgenommen. Da es aufgrund der abstoßenden Wechselwirkung nach wie vor die Tendenz hat, sich auseinanderzudrücken, kehren die Magnetwägen wieder um und werden schneller. Dabei erhält ihre Bewegung Energie aus dem Feld. Das Feld gibt also Energie ab, wenn es die Möglichkeit dazu hat. Wir lernen dabei, dass ein Feld (egal welches) bei Veränderungen in Richtung der Wechselwirkung immer Energie abgibt; also, wenn sich ein abstoßendes Feld ausdehnt oder ein anziehendes Feld zusammenzieht. Wenn es sich andererseits entgegen der Wechselwirkung verändert, dann nimmt es Energie auf. Folglich tendiert ein Feld also immer zum Zustand minimaler Energie. Um es von außen zu verändern, muss man ihm also in der Regel Energie zuführen.

Erweiterung: *Schwingende Magnetringe*

Falls es zeitlich knapp wird, kann dieses Beispiel auch übersprungen werden. Es ist allerdings spannend, da hier zwei Felder und Bewegungsenergie verknüpft werden. (Folie 16 der Präsentation)

Bei einem etwas komplizierteren Beispiel spielen magnetisches Feld, Bewegungsenergie und Gravitationsfeld eine Rolle: die schwingenden Magnetringe. Zunächst werden die zwei Ringe in abstoßender Konstellation zusammengehalten; hier trägt das Magnetfeld Energie und tendiert dazu, sich auseinanderzudrücken. Wenn man loslässt, bekommt es die Möglichkeit dazu und der obere Magnetring fliegt nach oben; Energie wird in die Bewegung übertragen. Gleichzeitig wird aber auch Energie in das Gravitationsfeld von Magnetring und Erde übertragen, während der Ring sich nach oben bewegt. Dieser wird dann wieder langsamer, bis die gesamte Bewegungsenergie ins Gravitationsfeld übertragen wurde. Dann nähern sich Ring und Erde aufgrund der Tendenz des Gravitationsfeldes wieder. Unten angelangt steckt dann die Energie wieder im Magnetfeld der Ringe und der obere Ring schwingt wieder nach oben. So wiederholt sich der Prozess.

Aufgaben (mündliches Besprechen/Diskutieren auf Grundlage von Arbeitsblatt 2)**:**

Bei diesen Aufgaben sollen die bereits bekannten Kontexte mit besonderer Hinsicht auf die folgenden zwei Fragen erneut besprochen werden:

1. Woran erkennt man, dass Energie übertragen wird?
2. Woran erkennt man, in welche Richtung (wohin; z. B. in ein Feld oder aus einem Feld) die Energie übertragen wird?
3. Wie hängt das mit der Tendenz des Feldes zusammen?

1. *Luftballons*
   Lösung: Man erkennt es daran, dass sich die Luftballons entfernen (Abstand ändert sich) und der eine Ballon schneller wird (Tempo der Bewegung ändert sich). Das Gesamtfeld der abstoßenden Ballons tendiert dazu, sich auseinanderzudrücken (auch: vergrößern). Die Veränderung entsprechend dieser Tendenz führt zur Energieabgabe des Feldes an die Bewegung.
2. *Satellit und Erde*
   Lösung: Man erkennt es daran, dass sich Satellit und Erde entfernen bzw. annähern (Abstand ändert sich) und der Satellit langsamer bzw. schneller wird (Tempo der Bewegung ändert sich). Für den Fall, dass sich der Satellit nähert: Das Gesamtfeld tendiert dazu, sich zusammenzuziehen (auch: verkleinern). Die Veränderung entsprechend dieser Tendenz führt zur Energieabgabe des Feldes an die Bewegung; der Satellit nähert sich und wird schneller.

3. *Fallender Ball*:[10] Hier soll diskutiert werden, wie sich die Energieübertragung

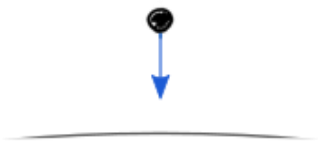


Abbildung 6. Fallender Ball.

[10] Als Hinweis kann man den Schüler*innen bewusst machen, dass es hier um das Gesamtfeld geht.

beschreiben lässt, wenn ein Ball aus der ruhenden Hand fallengelassen wird.[11] (Folie 17 der Präsentation)
Lösung: Man erkennt es daran, dass sich der Ball der Erde nähert (Abstand ändert sich) und dabei schneller wird (Tempo der Bewegung ändert sich). Das Gesamtfeld tendiert dazu, sich zusammenzuziehen (auch: verkleinern). Die Veränderung entsprechend dieser Tendenz führt zur Energieabgabe des Feldes an die Bewegung; der Ball wird schneller und nähert sich der Erde.

Achtung!

Bei der Energieübertragung bei Satellit und Erde nehmen manche Schüler*innen an, dass der Satellit am entferntesten Punkt Energie bekomme, um „Schwung“ zu holen oder auch, dass er beim Entfernen von der Erde Energie bekäme. Diese Beschreibung entspricht nicht der angemessenen Beschreibung durch das Konzept, weswegen bereits hier darauf geachtet werden sollte, dass die Schüler*innen die Richtung der Energieübertragung nicht verwechseln. Außerdem sollte Fachsprache verwendet werden; in jedem Fall zumindest klar sein, was die Schüler*innen meinen, wenn sie den „Schwung“ beschreiben.

Auch das Beispiel des fallenden Balles ist erfahrungsgemäß schwierig für Schüler*innen, da sie meist nicht daran denken, dass sowohl Ball als auch Erde Quellen eines Gravitationsfeldes sind. Erst das Gesamtfeld als Überlagerung der beiden trägt Energie und kann diese dann an die Bewegung des Balles (also den Ball) abgeben, wenn dieser nach unten beschleunigt. Hier sollte also darauf geachtet werden, dass die Bedeutung des Gesamtfeldes bewusst ist.

[11] Falls die Frage gestellt wird, warum sich nur der Ball bewegt: Der Ball wird nicht „stärker angezogen“, sondern die Wechselwirkung zwischen Ball und Erde ist gleich groß. Aufgrund seiner geringeren Masse wird der Ball allerdings stärker beschleunigt. Das gleiche Prinzip gilt für Erde und Satellit.

Überleitung

Hier wird an die Eingangsinformation angeknüpft, um beispielhaft zu motivieren, dass man klassische Phänomene auch mit Hilfe des Konzeptes über Felder beschreiben kann. (Folie 18 der Präsentation)

Konzeptidee:

> Es gibt nur Bewegungsenergie und Feldenergie, d. h. Energie in der Bewegung von Objekten und Energie in Feldern.

Wie wir bisher gesehen haben, gibt es also Energie in Feldern und Energie in Bewegungen. Aber wie hängt das jetzt mit den Energieformen zusammen, die wir aus der Schule kennen?

Die Antwort darauf ist einfach und zentral für den Ansatz: **Es gibt in Wirklichkeit keine anderen Energieformen, sondern immer nur Feldenergie und Bewegungsenergie**. Das heißt, man kann alle Energieformen, die wir so kennen, auf Felder und Bewegungen zurückführen.

Schauen wir uns dazu die Beispiele vom Anfang an:

a) Bei der **Achterbahn** wird potenzielle Energie in Bewegungsenergie umgewandelt, würde man nach dem traditionellen Ansatz aus der Schule sagen. Die Frage ist aber: Was ist denn eigentlich die **potenzielle Energie?** Wie wir bei den Beispielen von **Satellit und Erde** sowie dem fallenden Ball gesehen haben, ist die Energie, die dabei in Bewegung übertragen wird die Energie, die das **Gravitationsfeld** abgibt. Das ist hier bei der Achterbahn genauso. Also wenn der Wagen von oben herunterfährt, dann gibt das Gravitationsfeld (also die Überlagerung der Felder von Wagen und Erde) einen Teil seiner Energie an die Bewegung ab. Dabei wird der Wagen schneller und **das Feld zieht sich zusammen**; der Wagen nähert sich der Erde.

b) Beim **Kernkraftwerk** funktioniert das ähnlich: Wir erhalten **elektrische Energie**, die vorher in nuklearen Prozessen frei wurde. Die Energie, die wir nutzen, ist elektrische Energie, oder - mit Feldern ausgedrückt – **Energie im elektrischen Feld der Ladungen in unseren Kabeln und Geräten**. Die Energie hat das elektrische Feld aus den nuklearen Prozessen im Kraftwerk aufgenommen, wo entsprechend **Energie von einem anderen Feld abgegeben** wurde. Welches Feld das genau ist, und wie man den Ansatz auch auf der **atomaren und nuklearen Ebene** verstehen kann, wollen wir uns im Folgenden anschauen.

5. Arten von Feldern und Bewegungen

Hier werden die mikroskopischen Felder von Atomen eingeführt sowie die elektromagnetische Strahlung und die thermische Energie in das Konzept eingebettet.

Konzeptideen:

- In jedem Festkörper gibt atomare (elektrische) Felder.
- Die Bindung von Molekülen und Festkörpern entsteht durch die Tendenz des Feldes zur Minimierung der Feldenergie.

5.1 Atomare Felder

Beispiel: *Schleuder*

Bei diesem Beispiel kann man die Abbildung der Schleuder zeigen oder auch ein Gummiband für die Demonstration verwenden. Jedenfalls sollte man die Abbildung mit den atomaren Feldern bei der Erklärung herzeigen. (Folien 19 bis 21 der Präsentation)

Schauen wir uns dazu zunächst ein Alltagsbeispiel an: Eine elastische Schleuder. Wenn man einen Ball in eine Steinschleuder spannt und dann loslässt, so fliegt der Ball davon. Dabei erhält er **Bewegungsenergie. Aber wo kommt die her?**

Sie kommt aus dem Band der Schleuder. Traditionell würde man sagen hier wird **Spannenergie** umgewandelt. Wir wissen aber nach unserem neuen Ansatz, dass es nur Bewegungsenergie und Feldenergie gibt. Also ist die Frage: **Wo finden wir hier eine Bewegung oder ein Feld?**

Wenn wir uns die Schleuder genauer ansehen, dann wissen wir, dass sie aus **Atomen** besteht, welche durch die Überlappung ihrer elektrischen Felder ein elektrisches Gesamtfeld haben. Dieses **Gesamtfeld trägt Energie**. Wenn man nun das Band der Schleuder spannt, dann zieht man das Gesamtfeld der Atome auseinander. Jetzt haben wir aber gelernt, dass ein Feld, immer wenn die Möglichkeit hat, seine **Energie minimiert**. Das ist auch der Grund dafür, dass Atome sich z. B. zu **Festkörper** binden und **nicht einfach auseinanderfallen**. Denn um so einen Festkörper, wie beispielsweise eine Schleuder, zu verändern, muss man zunächst

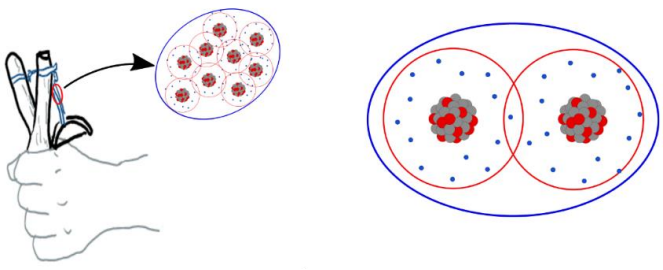


Abbildung 7. Gesamtfeld von zwei Atomen (rechts) bzw. mehreren Atomen des Gummibandes einer Schleuder (links).

Energie in das Feld stecken, damit man es verändern kann. Ohne dem Feld also Energie von außen zuzuführen, wird es sich nicht verändern und damit ist der Festkörper stabil. Das kennen wir als **Bindung** bzw. **Bindungsenergie.**

Also immer, wenn wir die Konstellation von Atomen verändern, müssen wir zunächst Energie in das elektrische Feld stecken, weil wir es entgegen seiner anziehenden

> An dieser Stelle kann ein Festkörpermodell oder z. B. ein Tisch zur Hilfe genommen werden, um zu demonstrieren, dass man Energie in das Gesamtfeld der Atome übertragen muss, um einen stabilen Festkörper zu verändern.

Wechselwirkung verändern. Das machen wir, wenn wir die Schleuder spannen. Wenn man die gespannte Schleuder dann loslässt, zieht sich das Feld wieder zusammen und die Energie wird frei. Das Band gibt diese **Energie dann an die Bewegung des Balls** ab.

Wir sehen also hier **zwei Dinge**: Erstens, dass es **nur Bewegungsenergie und Feldenergie** gibt — in diesem Fall makroskopische Bewegung des Balles und Energie im **mikroskopischen Feld der Atome** — und zweitens, dass die Bindung von Atomen dadurch zu Stande kommt, dass das elektrische Feld der Atome seine Energie minimiert. Um einen Festkörper zu verändern muss man also zunächst Energie hineinstecken, quasi als **Auslöser**.

Wir haben also die uns bekannten Energieformen **Spannenergie bzw. Verformungsenergie** und **Bindungsenergie** auf Feldenergie eines mikroskopischen elektrischen Gesamtfeldes der Atome zurückgeführt.

Beispiel: *Muskelkontraktion*

> Hier bietet es sich an, eine Abbildung zu zeigen oder die Analogie zur Schleuder herzustellen. Alternativ kann man auch mit einem eigenen Arm argumentieren; hier ist Spielraum bei der Umsetzung. (Folien 22 und 23 der Präsentation)

Schauen wir uns dazu noch ein Beispiel an, bei dem das ähnlich funktioniert: Die Muskelkontraktion des Menschen. Stellt euch vor, ihr werft einen Ball. Der Ball erhält dabei (genauso wie bei der Schleuder) Bewegungsenergie. Diese **muss aus einer anderen Bewegung oder einem Feld kommen, aber wie?**

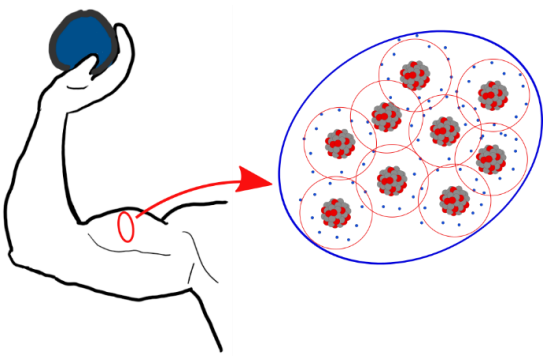


Abbildung 8. Gesamtfeld der Atome im menschlichen Körper (z. B. Muskel).

Dazu kann man sich überlagern, wie eine Muskelkontraktion funktioniert. Dabei laufen **im Körper chemische Reaktionen** ab, bei denen Moleküle, also **Konstellationen von Atomen**, **umgebaut** werden. Dieser Umbau ändert die Konstellation der Atome untereinander und damit ihr **Gesamtfeld**. Die Energie, die das Feld abgibt, wird in die Bewegung des Armes bzw. der Hand und damit an die Bewegung des Balles übertragen. Dazu

braucht es (ähnlich wie beim Loslassen der Schleuder) ein **Auslöser**, hier das Signal unseres Gehirns für das „Wegwerfen“. Mit diesem Auslöser laufen dann die Reaktionen ab, bei denen sich die chemischen Verbindungen und damit die atomaren Strukturen ändern und das Gesamtfeld die **Energie abgeben kann**. Dem Feld wird dann also ermöglicht, seine Energie weiter zu minimieren. Diese Energie wird dann in die makroskopische Bewegung des Armes und damit des Balles übertragen.

Das ist auch der Grund dafür, warum wir unserem Körper **immer wieder Nahrung**, also **neue chemische Verbindungen**, zuführen müssen, damit er seine Körperfunktionen aufrechterhalten kann. Denn ohne die neuen Moleküle kann keine Feldenergie mehr aus der Veränderung von Atom-Konstellationen bei chemischen Prozessen frei werden.

Aufgaben (Besprechung auf Grundlage von Arbeitsblatt 3, Aufgaben 1 und 2)**:**

1. *Automotor:* Beim Losfahren eines Autos wird Energie in die Bewegung des Autos übertragen. Dies geschieht, indem der Motor Treibstoff verbrennt. Aber woher genau kommt die Energie, die dabei frei wird? (Tipp: wo ist diese vorher, wenn das Auto noch steht?)
   Lösung: Im Motor wird Treibstoff verbrannt. Dabei verändert sich die Konstellation der Atome (Moleküle reagieren und verändern sich und ihre Abstände). Die Verbrennung gibt dabei dem Gesamtfeld der Atome die Möglichkeit, sich zu verändern; dabei gibt es Energie ab, welche über weitere Prozesse zur Bewegung der Zylinder und damit der Räder führt.

2. *Feuerwerk*: Bei der Explosion eines Feuerwerks wird Energie in die Bewegung der auseinanderfliegenden Partikel sowie in das Licht übertragen. Woher kommt diese her bzw. wo ist sie, kurz bevor der Feuerwerkskörper explodiert?[12] (Folie 25 der Präsentation)
   Lösung: Das (elektrische) Feld der Atome/Partikel der Rakete gibt die Energie an die Bewegung der Teilchen und das Licht (elektromagnetisches Feld) ab. Das Anzünden zu Beginn ist dabei der Auslöser für die Veränderung des Feldes entsprechend seiner Tendenz.



Abbildung 9. Feuerwerk (von pixabay.com).

[12] Falls hier als Antwort kommt, dass die Energie in der Bewegung der Rakete steckt, kann argumentiert werden, dass das zwar stimmt, aber nicht ausreicht: Woher kommt der Großteil der Energie?

5.2 Elektromagnetische Strahlung

Konzeptidee:

> Elektromagnetische Strahlung ist Feldenergie. Ein Lichtstrahl (als räumlich gebündeltes Feld) trägt Feldenergie.
>
> (Nur auf Nachfrage: Ebenso trägt ein Photon als Feld-Paket (räumlich konzentriertes Feld) auch Feldenergie.)

Die Zuordnung von elektromagnetischer Strahlung als Feldenergie wird über das Atom und dessen Abstrahlung motiviert. Dabei kann man z. B. die nebenstehende Abbildung verwenden. Wichtig ist hier, dass man die Strahlung als Feldenergie von der Bewegungsenergie abgrenzt. (Folien 26 und 27 der Präsentation)

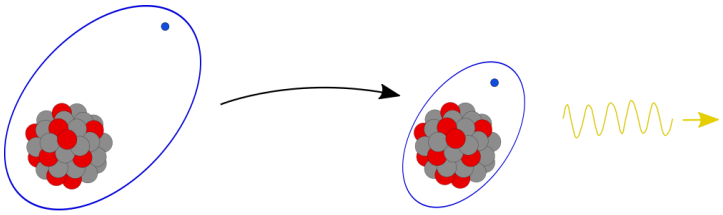


Abbildung 10. Elektromagnetische Strahlung als Feldenergie: Wenn ein Elektron in einen niedrigeren Energiezustand übergeht, wird vom Atom Strahlung abgegeben. Die freiwerdende Energie trägt das elektromagnetische Feld, also diese Strahlung wie z. B. Licht.

Wir wollen uns noch eine weitere Energieform anschauen, die man mit diesem Ansatz einbetten kann: die Strahlungsenergie der elektromagnetischen Strahlung.

Dazu stellen wir uns vor**, wie denn eigentlich elektromagnetische Strahlung (also z.B. Licht) entsteht:** Wenn man ein Atom betrachtet, dann haben wir dort den Kern und die Elektronen, die sich um diesen bewegen. Da sowohl der Kern als auch die Elektronen **elektrisch geladen** sind, haben sie ein elektrisches **Gesamtfeld, das Energie trägt**. Wegen der Bewegung der Elektronen haben wir gleichzeitig auch ein magnetisches Feld. Wenn sich dann die **Konstellation** eines Elektrons und dem Kern **verändert**, dann verändern sich auch die Felder. Dabei zieht sich das Feld in Richtung der Wechselwirkung zusammen und gibt Energie ab. Diese Energie muss irgendwo hin und – in der Tat – wir beobachten, dass das Atom elektromagnetische Strahlung, z.B. als Licht, abstrahlt. Diese Strahlung trägt also die abgegebene Energie. Nun ist die Frage**: Ist dies Feldenergie oder Bewegungsenergie?**

Auf den ersten Blick könnte man ja meinen, dass es sich um Bewegungsenergie handelt, da sich das Licht bewegt. Allerdings ist das **Licht** im **Gegensatz zu bewegenden Objekten kein Teilchen,** denn es besitzt **keine Masse.** Es ist vielmehr eine **Überlagerung des abgestrahlten elektrischen und magnetischen Feldes**. Das bedeutet, dass die elektromagnetische Strahlung, so wie der Name sagt, ein elektromagnetisches Feld ist und dementsprechend **Feldenergie** trägt.

Auch wenn elektromagnetische Strahlung in **gebündelter** Form, z. B. einem **Lichtstrahl oder Laserstrahl**, vorkommt, so ist es immer noch **Feldenergie**, nur eben **gebündelt**.

Beispiel: *Mikrowelle*

Das Beispiel *Mikrowelle* kann mündlich behandelt werden.

Falls Schüler*innen fragen, wie dies mit dem Photon zusammenhängt, kann folgendes geantwortet werden:

Das Gleiche gilt für das Photon, denn dieses ist nichts anderes als die kleineste Einheit Feldenergie. Im Gegensatz zu Objekten mit Bewegungsenergie hat dieses aber — genau wie der Lichtstrahl — keine Masse, also auch keine Bewegungsenergie, sondern nur Feldenergie.

Achtung!

Manche Schüler*innen schreiben der elektromagnetischen Strahlung eher Bewegungsenergie zu, da für sie intuitiver ist, dass diese sich „bewegt" bzw. „ausbreitet". Um dieser Vorstellung zu begegnen, sollte man die Strahlung von der Bewegung von Objekten bzw. Teilchen abgrenzen; indem man betont, dass Strahlung wie z. B. Licht keine Masse besitzt und deshalb auch keine Bewegungsenergie. Zusätzlich kann erläutert werden, dass es sich um die Überlagerung eines magnetischen und elektrischen Feldes handelt, welche sich ausbreiten. Die Ausbreitung ist also auf den „unendlichen" Charakter des Feldes zurückzuführen und nicht auf die Bewegung eines quasi-Objektes. Das gleiche gilt im Photonenbild.

Schauen wir uns dazu das Beispiel mit der **Mikrowelle** von eben an. Dabei hat die Bewegung der Atome der Nahrung Energie erhalten. Diese muss irgendwo herkommen: Wenn man die Mikrowelle einschaltet, dann erzeugen wir ein elektromagnetisches Feld (die Mikrowellen), das dann Feldenergie trägt und die Mikrowelle und damit auch die **Nahrung durchsetzt.** Wenn dieses Feld dann mit der Nahrung wechselwirkt, dann werden die Atome der Nahrung zur **Bewegung angeregt** und erhalten dabei ihre Energie. Diese Energie gibt das elektromagnetische Feld der Mikrowelle ab.

Aufgabe: *Metall schneiden mit einem Laser* (Besprechung auf Grundlage von Arbeitsblatt 3, Aufgabe 3)

Von wo nach wo wird Energie übertragen, wenn ein Laser (ähnlich einem starken Lichtstrahl[13]) auf eine Metallplatte trifft und diese schneidet? (Folie 26 der Präsentation)

Lösung: Die Energie des elektromagnetischen Felds des Laserstrahls wird bei der Wechselwirkung mit der Metallplatte



Abbildung 11. Lasercutter (von pixabay.com)

[13] Hier wird bewusst das Wort „elektromagnetisch" bzw. „Feld" vermieden, da die Schüler*innen über den Ausdruck „ähnlich… Licht" selbst auf diese Verbindung schließen sollen. Am Ende kann nach Wunsch auch aufgelöst werden, dass es sich dabei nicht um optische Wellenlängen handeln muss.

in die Rekonfiguration[14] der Atome/Teilchen dieser. Außerdem kommt es zur Erwärmung von Platte und Umgebung (diese Art der Energie, bekannt als thermische Energie, werden wir im Folgenden betrachten).

Achtung!

Manche Schüler*innen assoziieren einen Laserstrahl mit einem Teilchenstrahl. Hier sollte unbedingt klar kommuniziert werden, dass es sich um elektromagnetische Strahlung handelt, sofern Schüler*innen diese Fehlvorstellung äußern.

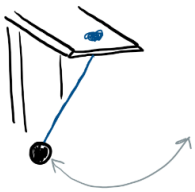
5.3 Thermische Energie als mikroskopische Bewegungsenergie

Die Thermische Energie wird als mikroskopische Bewegungsenergie eingeführt und dies über das Beispiel des schwingenden mathematischen Pendels eingeführt. Dabei liegt der Fokus auf der Betrachtung der Energieübertragung an die Luftatome sowie an die Atome der Halterung.

Um im Experiment auch zu zeigen, dass das Pendel nicht unendlich lange schwingt (was den Schüler*innen aber bewusst sein sollte), sollte hier nach Möglichkeit auch ein vorbereitetes Pendel in einfachster Form demonstriert werden. (Folien 28 bis 31 der Präsentation)

Konzeptidee:

Thermische Energie ist mikroskopische Bewegungsenergie. Wird ein Objekt heißer, bewegen sich dessen Atome schneller.



Wie ist das eigentlich **thermische Energie**? Wie kann man das in unseren Ansatz einordnen?

Dazu schauen wir uns die Bewegung eines Pendels an. Das Pendel schwingt raus und runter. Dabei wird ständig Energie aus dem Gravitationsfeld von Kugel und Erde in die Bewegung der Kugel übertragen und wieder zurück. Aber da der Prozess **nicht ganz reibungsfrei** von statten geht, wird das Pendel mit der Zeit immer weniger hoch kommen bzw. immer langsamer, bis es irgendwann stehen bleibt. Der Grund dafür ist die **Reibung in der Luft sowie an der Aufhängung**. Aber wo genau geht die Energie hin, die dann weder im Gravitationsfeld noch in der Bewegung der Kugel steckt? Nach unserem Ansatz muss sie in einem Feld oder in einer Bewegung sein, die wir **offenbar auf den ersten Blick nicht sehen**. Nun haben wir aber gerade zuvor gelernt, dass es auch mikroskopische Felder und Bewegungen gibt, nämlich die der **Teilchen, aus denen die Materie besteht. Schauen wir da also genauer nach:**

[14] Umstrukturierung oder Änderung der Konstellation ist auch angemessen.

Hier sollte das Argument unbedingt graphisch unterstützt werden, z. B. mit Hilfe des BB-Bags. (Folien 28 und 29 der Präsentation; Video zum BB-Bag)

Zunächst in der Luft. Dort stößt das Pendel ständig mit den Luftatomen und versetzt diese dabei in Bewegung. Ein Teil der Energie von vorher wird also in die **mikroskopische Bewegung** der **Luftatome** übertragen. Wir kennen das auch als thermische Energie.

Die Energieübertragung an der Aufhängung sollte visuell auch mit Hilfe des BB-Bags oder mit der nebenstehenden Abbildung veranschaulicht werden. (Folie 30 der Präsentation)

Der andere Teil der Energie geht durch Reibung in die Aufhängung. Dort reibt die Schnur des Pendels permanent am Material der **Halterung**. Dabei stößt die Schnur ständig mit den Atomen der Halterung, welche dadurch in Bewegung versetzt werden. Die Bewegungsenergie der Atome kennen wir auch als thermische Energie und merken diese durch z. B. Angreifen der Halterung. Wir können dann spüren, dass sie sich an der Stelle, wo die Schnur gerieben hat, leicht erwärmt wurde. Immer wenn etwas warm wird, kann man das dadurch erklären, dass die Atome sich schneller bewegen **(mikroskopische Bewegungsenergie)**.

Aufgaben (Besprechung auf Grundlage von Arbeitsblatt 3, Aufgaben 4 und 5)**:**

1. *Kugelbahn*: Eine Metallkugel wird auf einer U-förmigen Metallbahn losgelassen und rollt hin-und-her. Dabei gelangt sie immer weniger weit hoch, bis sie schließlich unten in der Mitte der Bahn zum Stillstand kommt. Was passiert mit der Energie, welche die Kugel am Anfang noch in ihrer Bewegung hat und am Ende offenbar verschwunden ist? (Folie 31 der Präsentation)
   Lösung: Die Bewegungsenergie der Kugel wird während des Prozesses durch Reibung an die (mikroskopische) Bewegung der Bahnatome bzw. -moleküle sowie die Atome der Kugel selbst übertragen. Diese Bewegung der Atome kann dann als Erwärmung der Bahn sowie der Kugel wahrgenommen werden.[15]

2. *Erwärmung von Nahrung*: Wenn wir unsere Speisen in der Mikrowelle erwärmen, wird ihr Energie zugeführt. Wo finden wir diese Energie am Ende wieder, wenn das Essen erwärmt wurde?[16]
   Lösung: Die Strahlung der Mikrowelle versetzt die Atome/Moleküle des Essens in Bewegung. Diese (mikroskopische) Bewegung nehmen wir als Erwärmung wahr.

[15] Eine Argumentation über die Erwärmung der Luft ist auch passend, stellt aber einen kleineren Beitrag dar.
[16] Es genügt, dieses Beispiel mündlich mit den Schüler*innen zu besprechen.

6. Moderne Physik

In diesem Teil werden die bisherigen Konzeptideen auf die Felder von Quarks und das Higgsfeld erweitert. Dabei soll insbesondere der Zusammenhang von Energie und Masse verdeutlich werden. Für die Veranschaulichung dienen stets Abbildungen. (Folien 32 bis 40 der Präsentation)

Einleitung

Wir haben jetzt einige Energieformen auf Bewegungsenergie und Feldenergie zurückführen können. Unser Ansatz, dass es nur diese beiden Arten von Energie gibt und man damit alle Phänomene erklären kann, scheint also so weit Sinn zu ergeben. Um dies noch weiter zu überprüfen, wollen wir uns nun als letzten Punkt noch den Zusammenhang von Energie und Masse über die Energie-Masse-Äquivalenz ansehen.

Beispiel: *LHC des CERN*



Wir haben eingangs bereits gehört, dass bei **Kollisionsversuchen** im LHC am CERN neue Teilchen entstehen; „quasi aus dem Nichts“. Natürlich geht das nicht so einfach, denn die Teilchen haben eine Energie, die nicht aus dem Nichts entstehen kann. Es entstehen also massive Teilchen. Aber wie geht das? Wie können nur aus Energie Teilchen entstehen? Woher kommt die Masse der Teilchen?

Anscheinend sind Energie und Masse miteinander verknüpft. Ihr habt bestimmt bereits schon einmal über Einsteins berühmte Formel $E = m\,c^2$ gehört. Diese stellt eben diese Verknüpfung her. Um zu verstehen, wie Energie und Masse darüber zusammenhängen, wollen wir uns im Folgenden anschauen, wie man dies in unserem Ansatz mit Feldenergie und Bewegungsenergie verstehen kann. (Folie 32 der Präsentation)

6.1 Quarkfelder

Konzeptidee:

- Quarks (die Bestandteile der Protonen und Neutronen) sind Quellen eines Feldes (das sogenannte Quarkfeld).
- Das Gesamtfeld von Quarkfeldern trägt Energie. Die Energie des gesamten Quarkfeldes der Protonen und Neutronen in einem Kern entspricht der Masse des Kerns.
- Wenn sich das Quarkfeld verändert, ändert sich auch die Energie und also die Masse.

Ein einfaches Beispiel, um sich über die Masse Gedanken zu machen ist die Waage. Wenn wir uns **morgens auf die Waage stellen**, dann erfahren wir unsere Masse. Wie finden wir heraus, ob diese nun auch Energie ist bzw. wenn das so ist; ist sie dann Feldenergie oder Bewegungsenergie?

Hier soll zunächst der Aufbau der Materie erläutert werden, damit alle Schüler*innen ein Verständnis davon erhalten können, dass Quarks die Grundbausteine der Nukleonen, also der Protonen und Neutronen sind. So kann dann der Zusammenhang zu der Masse der Nukleonen geschaffen werden. (Folie 34 der Präsentation)

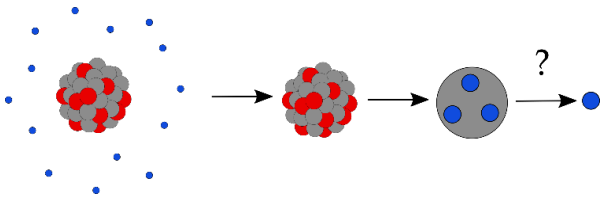


Abbildung 12. Aufbau der Materie (schematisch); vom Atom über den Atomkern und den Nukleonen (Protonen und Neutronen) zu den Quarks als Elementarteilchen.

Um zu verstehen, wo unsere Masse und auch die Masse der am LHC erzeugten Teilchen herkommt schauen wir nun etwas tiefer **in die Materie** hinein. Wir bestehen aus Molekülen, die wiederum aus Atomen bestehen. Die Atome bestehen aus Elektronen und einem Atomkern. Der Atomkern ist im Vergleich zu den Elektronen viel schwerer, das heißt unsere Masse kommt hauptsächlich durch die Masse unserer Atomkerne zu Stande. Die Atomkerne wiederum bestehen aus Nukleonen, den Protonen und Neutronen. Die Masse all dieser Nukleonen macht unsere Masse aus. Aber wenn man nun noch weiter hineinschaut, dann sieht man, dass die **Protonen und Neutronen aus Quarks** bestehen. Diese sind **Elementarteilchen** und (zumindest soweit wir das bis heute wissen) neben den Elektronen die kleinsten unteilbaren Teilchen unserer Welt. Jedes Proton und Neutron besteht aus drei Quarks. Nun würde man also vermuten, dass die **Masse der drei Quarks** zusammen die Masse eines Protons oder Neutron ergibt. Das ist aber nicht so. Die Quarks machen nur maximal 10 Prozent der Masse eines Nukleons aus. **Wo kommen also die restlichen 90 Prozent, also der Hauptanteil der Masse eines Protons oder Neutrons und damit von uns her?**

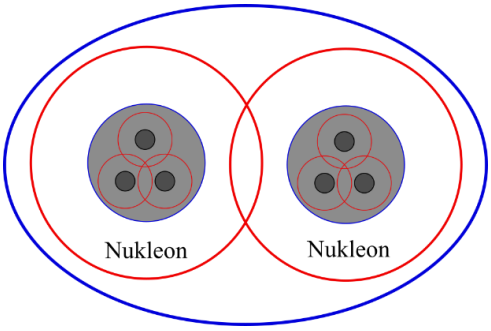


Abbildung 13. Gesamtfeld der Quarks als Einzelfeld der Nukleonen sowie deren Gesamtfeld in einem modellhaften Kern.

Die Antwort ist tatsächlich das, was wir gesucht haben, nämlich **Energie**. Die **Quarks sind nämlich Quellen eines Feldes, das wir noch nicht kennen (das sogenannte Quarkfeld)**. Das funktioniert genauso wie die Felder, die wir schon kennen. Jedes Quark ist also Quelle eines Feldes, die sich dann zu einem Gesamtfeld überlagern. Und in diesem **Gesamtfeld**, dem Quarkfeld, steckt Energie. Nach Einstein ($E = m c^2$), ist **Energie gleich Masse** und die fehlenden 90 Prozent unserer Masse ist in Wirklichkeit Energie, die im Quarkfeld steckt. Das Besondere hier ist also, dass sich die Feldenergie als Masse äußert. (Folie 34 der Präsentation)

Mit Hilfe dieser Energie kann man auch verstehen, warum Kerne nicht auseinanderfallen. Denn die positiven Protonen im Atomkern stoßen sich einander ab. Dadurch, dass sich die Quarkfelder der Nukleonen im Kern aber überlagern und die **Energie des Quarkfeldes minimiert** ist (ähnlich wie wir das auch von der **Bindung** der Atome kennen), fällt der Kern nicht auseinander, sondern ist stabil. Das nennt man auch die **Bindungsenergie** des Kerns.

Wenn sich dann ein Atomkern z. B. durch einen **äußeren Einfluss (einen Auslöser)** verändert und das Feld in einen **Zustand mit noch weniger Energie** übergehen kann, dann ändert sich das **Quarkfeld** und **gibt Energie ab**. Diese Energie wird dann in diesem nuklearen Prozess frei. Man merkt das auch dadurch, dass die Masse geringer wird; man nennt das den **Massendefekt**.

Also immer, wenn sich in einem Prozess die Masse eines Kerns ändert und scheinbar Masse verliert (Massendefekt), dann ändert sich in Wirklichkeit das Quarkfeld und seine Energie. Die Energie, die das Feld abgibt, bemerken wir dann als Abgabe von Masse: Es geht scheinbar Masse verloren.

Beispiel: *Alpha-Zerfall*

Ein Beispiel dafür ist der **Alpha-Zerfall**. Dabei gibt ein Atomkern ein Alpha-Teilchen ab, also zwei Protonen und zwei Neutronen, und wird dadurch zu einem kleineren Kern. Das Alpha-Teilchen hat dabei Bewegungsenergie. Die Frage ist nun, wo kommt die her?

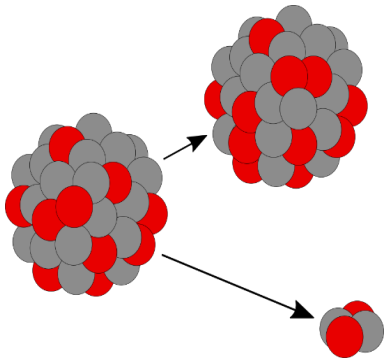


Abbildung 14. Alpha Zerfall (schematisch).

Antwort: Aus dem **Massenunterschied**. Der Kern am Ende und das Alpha-Teilchen zusammen sind leichter als der Kern am Anfang. Das heißt ein Teil der Masse des Kerns am Anfang ist als Energie für die Bewegung des Alpha-Teilchens frei geworden. Diese freiwerdende Energie kommt aus dem **Quarkfeld**. Dadurch, dass sich der **Kern verändert**, ändert sich auch die **Konstellation der Kernbausteine, also der Protonen und Neutronen und damit die Überlagerung der Quarkfelder.** Das Quarkfeld tendiert dazu, seine Energie zu minimieren. Das heißt es gibt Energie ab. Das bemerkt man also als Massenunterschied (wir kennen das auch als Massendefekt) und an der Bewegungsenergie des Alpha-Teilchens. (Folie 35 der Präsentation)

So sieht man, dass das, was wir von früher als **Massendefekt und Bindungsenergie** kennen, letztendlich auch auf Feldenergie im Quarkfeld zurückgeführt werden kann. Wir haben nun also gesehen, dass man Prozesse, bei denen Masse „verloren“ geht, durch die Abgabe von Energie aus dem Quarkfeld beschreiben können. Das geht grundsätzlich bei allen Kernprozessen so.

Aufgabe: *Kernfusion*

Bei der Fusion werden zwei Wasserstoffkerne zu einem gemeinsamen Kern verschmolzen. Dabei ist der entstehende freie Heliumkern (He) leichter als die beiden einzelnen zusammen. Zusätzlich wird ein Neutron (n) freigesetzt und es entsteht Strahlung (z. B. in der Sonne). Warum geht hier scheinbar Masse „verloren“ und woher kommt die Bewegungsenergie und die Energie des Lichtes? (Folie 36 der Präsentation)

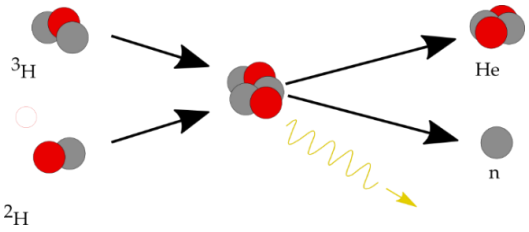


Abbildung 15. Kernfusion (schematisch).

Lösung: Die Bewegungsenergie von Heliumkern und Neutron sowie die Feldenergie der Strahlung entspricht der Massendifferenz. Das ist die Energie, die das Quarkfeld abgibt. [ODER: Die Energie des Quarkfeldes (des fusionierten Kerns) teilt sich auf das Quarkfeld (d. h. die Masse) des Heliumkerns und des Neutrons sowie auf die Feldenergie der Strahlung auf.]

6.1 Higgsfeld

Konzeptidee:

- Die Masse der Elementarteilchen kommt durch das Higgs-Feld.
- Dieses durchsetzt das gesamte Universum.

Der letzte Aspekt, den wir uns ansehen wollen, ist die Frage, **woher denn nun aber die Masse der Elementarteilchen kommt**. Also die Masse der Quarks selbst und die Masse der Elektronen. Wenn wir diese Frage auch mit der Energie von Feldern oder Bewegungen erklären können, dann scheint unser Ansatz **unsere gesamte Welt** (so wie wir sie kennen) **zu beschreiben**. Also: woher kommt die Masse der Elementarteilchen?

Wir haben gelernt, dass **Masse das gleiche wie Energie** ist. Das bedeutet: die Masse von Elektronen und Quarks ist im Grunde nur Energie. Und wie zuvor kommt sie durch ein Feld zu Stande; das **Higgsfeld**. Dies ist ein Feld, das unser **gesamtes Universum durchsetzt** und immer existiert. Durch die **Wechselwirkung der Elektronen und Quarks mit dem Higgsfeld** erhalten diese Teilchen (auch wenn sie sich nicht bewegen) ihre **Ruheenergie.** Diese Energie ist ihre **Masse**. Das Higgsfeld ist also notwendig, damit die Elementarteilchen ihre Masse bekommen. Auf diese Weise kann man die Masse der Elementarteilchen, also deren Energie, auf das fundamentale **Higgsfeld** zurückführen.

Beispiel: *Paarerzeugung*

Die Paarerzeugung ist ein Beispiel zum Einstieg, das verdeutlichen soll, wie Energie und Masse durch das Higgsfeld zusammenhängen. Ausgehend davon sollten Schüler*innen beschreiben können, wie Entstehung und auch Vernichtung von Elementarteilchen mit dem Higgsfeld zusammenhängen. (Folie 38 der Präsentation)

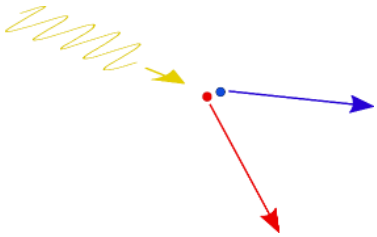


Abbildung 16. Paarerzeugung (schematisch).

Schauen wir und ein Beispiel an, wo das eine Rolle spielt: Zum Beispiel bei der **Entstehung von Elementarteilchen**. Da wir nun wissen, dass Energie gleich Masse ist, kann man **mit ausreichend Energie aus Bewegungen oder Feldern auch Teilchen mit Masse erzeugen**. Wenn man zum Beispiel zwei Lichtbündel, also zwei elektromagnetische Felder, aufeinandertreffen lässt, dann konzentriert sich deren Feldenergie im Treffmoment und wir haben Energie im Gesamtfeld, die theoretisch auch in andere Feldenergie oder Bewegungsenergie übertragen werden kann. So kann sich zum Beispiel **die Energie auch durch das Higgsfeld als Masse manifestieren** und wir erhalten neue Elementarteilchen. Man beobachtet das zum Beispiel bei der sogenannten Paarerzeugung, wo zwei elektromagnetische Felder in zwei Elementarteilchen, ein Elektron und ein Positron, umgewandelt werden. Das **Positron ist das Antiteilchen des Elektrons**. Das entsteht deshalb (und nicht noch ein zweites Elektron), weil neben der Energie auch die Ladung erhalten sein muss. Deshalb entstehen ein negativ geladenes Elektron und ein positives Positron.

Aufgabe: *PET (Annihilation)*

In der Medizin wird die PET verwendet, um Tumore im Körper zu lokalisieren. Dazu wird ein radioaktives Präparat verabreicht, das **Positronen** abgibt. Da sich das Präparat hauptsächlich an der Stelle des Tumors anreichert, werden dort besonders viele Positronen an das Gewebe abgegeben. Diese Positronen sind die **Antiteilchen der Elektronen**. Trifft ein Positron auf ein Elektron, dann vernichten sich die beiden. Die Masse verschwindet und es entsteht Strahlung.[17] Wenn man diese misst, dann kann man ihren Weg zurückverfolgen und den Tumor lokalisieren.
Aber warum geht das? Wo war hier die Energie der Strahlen vorher (als es noch die Teilchen gab) und wo ist sie am Ende? (Folie 38 der Präsentation)

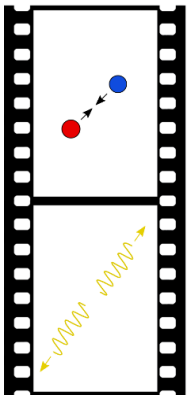


Abbildung 17. Annihilation bei der PET (schematisch).

[17] Dabei befinden sich Elektron und Positron nahezu in Ruhe, weshalb man nicht die Bewegungsenergie betrachten muss.

Lösung: Zu Beginn haben Positron und Elektron eine Masse und also Energie durch das (die Wechselwirkung mit dem) Higgsfeld. Wenn diese sich gegenseitig vernichten, wird die Energie in das elektromagnetische Feld der Strahlung übertragen.

Aufgabe oder Beispiel: *Teilchenerzeugung am LHC* (je nach Zeit als Aufgabe oder Diskussion)

Falls man möchte, kann man hier auch noch andeuten, dass diese Effekte (Erzeugung und Vernichtung von Elementarteilchen) auch bei Kollisionsversuchen am LHC des CERN stattfinden. Um zu verstehen, welche Teilchen dabei entstehen können, muss man die dafür nötige Energie kennen. (Folie 40 der Präsentation)

Im Teilchenbeschleuniger LHC am CERN werden Protonen mit hoher Geschwindigkeit aufeinander geschossen. Dabei treffen sie als Teilchen mit besonders großer Bewegungsenergie aufeinander.



Abbildung 18. Teilchenentstehung am LHC (CERN) (von pixabay.com).

1) Wie verteilt sich die Gesamtenergie vor dem Treffmoment auf Bewegungen und Felder?

Lösung: Zu Beginn gibt es die Bewegungsenergie der Teilchen sowie die Energie im Quarkfeld der Protonen und die Energie durch die Masse der Quarks selbst durch das Higgsfeld.

Die Feldenergie und Bewegungsenergie im Treffmoment kann zur Entstehung neuer Elementarteilchen führen, die sich wiederum auch zu größeren Teilchen zusammensetzen können. Beobachten kann man das dann mit Detektoren, welche die einzelnen Teilchen nachweisen.

2) Wie könnte sich die Energie nach dem Treffmoment verteilen, wenn wir diese Situation mit Bewegungsenergie und Feldenergie beschreiben wollen?

Lösung: Energie verteilt sich auf die Massen und also Energie der neuen Elementarteilchen durch (die Wechselwirkung mit dem) Higgsfeld. Außerdem gibt es deren Bewegungsenergie. Möglicherweise gibt es noch Energie im elektromagnetischen Feld entstehender Strahlung. Ergänzung: weiter: Wenn sich Quarks zu einem neuen Teilchen zusammensetzen, gibt es Energie in deren Quarkfeld.

7. Zusatz (falls Zeit übrig ist)

Falls am Ende noch Zeit übrig bleibt, können zwei Beispiele gezeigt oder diskutiert werden, die sich auf den Zusammenhang von Masse und Energie beziehen:

1. Die Gravitationslinse erläutert das Verhalten von elektromagnetischer Strahlung, die von Masse und damit der Gravitation beeinflusst wird. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass in der ART die Energie nicht nur grundlegend für das Verständnis der Wechselwirkung zwischen Massen ist, sondern auch für die Wechselwirkung zwischen Feldern (und Massen).
2. Die gravitationsbedingte Rotverschiebung thematisiert ein ähnliches Prinzip. Dabei wird die Energie zwischen elektromagnetischem Feld und Gravitationsfeld übertragen, wodurch die Strahlung Energie abgibt.

7.1 Beispiel Gravitationslinse

Wir schauen uns nun noch ein kurzes Phänomen als Ausblick in die Astronomie an — die **Ablenkung** von Licht an einem schwarzen Loch:

Zwischen unserer Erde und einer weit entfernten Galaxie liegt ein Schwarzes Loch, z. B. der Kern unserer Galaxie (der Milchstraße). Normalerweise würde man **erwarten, dass das Licht, das diese Galaxie aussendet, nicht zu uns gelangen kann**, wenn das schwarze Loch den Weg versperrt. Tatsächlich sieht man aber einen Ring (Einsteinring genannt). Dieser Ring liegt genau in der Blickrichtung der Galaxie und entsteht durch das Licht, das von ihm ausgesendet wird. Die Frage ist also: Wie kommt das Licht der Galaxie zu uns, wenn er durch das schwarze Loch verdeckt wird? Die Antwort auf die Frage lieferte uns **Einstein** mit seiner heutzutage **gut bestätigten allgemeinen Relativitätstheorie**. Nach dieser Theorie wird das Licht **durch die Gravitation des schwarzen Loches abgelenkt**. Aber wie geht das? Gravitation wirkt doch nur auf Masse und Licht hat doch keine Masse, oder? Habt ihr eine Idee, wie man das erklären könnte? (Folie 40 der Präsentation)[18]

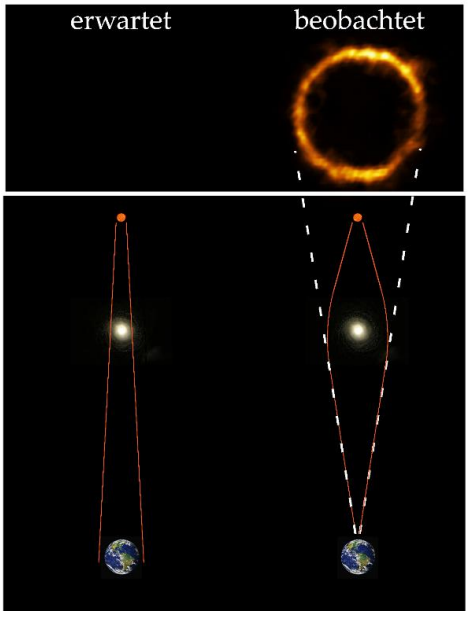


Abbildung 19. Gravitationslinse: Nach klassischer Physik erwartetes (links) und im Rahmen der ART bzw. in der Realität erhaltenes Abbild (rechts) einer Galaxie an einer Gravitationslinse. Bild der Gravitationslinse entnommen von eso.org (ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), Rizzo et al.); Bild der Erde von pixabay.com.

[18] auch interessant: Nobelpreis 2020 an Genzel, Penrose und Ghez für die Forschung zu schwzen Löchern

Lösung: Da die elektromagnetische Strahlung Feldenergie besitzt (und Energie sich wie Masse verhält), wirkt die Gravitation auch auf die Strahlung (und sie wird ablegelnkt/angezogen).[19]

7.2 Beispiel: Gravitationsbedingte Rotverschiebung

Wir betrachtet nun noch ein letztes Phänomen, bei dem Energie übertragen wird: Die sogenannte **gravitationsbedingte Rotverschiebung**. Wenn man Lich bzw. einen Laserstrahl von der Erde aus nach oben richtet, dann kann man feststellen, dass die Frequenz der Strahlung kleiner wird, je weiter sich die Strahlung von der Erde entfernt; das Licht wird röter (daher der Name Rotverschiebung). Wenn man sich die Beziehung $\mathbf{E = h \cdot f}$ zwischen Frequenz und Energie der Strahlung anschaut, dann stellt man fest, dass eine Verringerung der Frequenz auch eine Verringerung der Energie bedeutet. Das Licht gibt also Energie ab. Aber wohin „verschwindet“ die Energie? Könnt ihr hier die Energieübertragung erklären? (Folie 41 der Präsentation)[20]

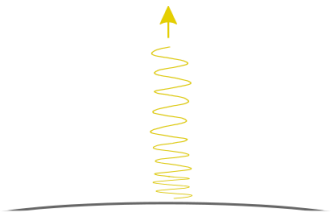


Abbildung 20. Rotverschiebung (schematisch).

Lösung: Die Energie der elektromagnetischen Strahlung wird in das Gravitationsfeld übertragen. Das Gravitationsfeld nimmt dabei einen Teil der (Feld-) Energie der Strahlung auf.

[19] Eine Formulierung mit Gesamtfeld von Strahlung und schwarzem Loch ist hier auch akzeptabel.
[20] auch interessant: Nobelpreis 1961 an Rudolf Mößbauer für die Resonanzabsorption von Gammastrahlung (Mößbauer Effekt)

ANHANG G

Testinstrument: Posttest mit Erwartungshorizont



Liebe*r Schüler*in,

Du hast in den letzten Physikstunden etwas über Energie und Felder gelernt. Im Folgenden findest Du verschiedene Beispiele. Bitte beantworte die Fragen wenn möglich aus der Perspektive von Bewegungen und Feldern.

Bevor du startest, mache bitte zunächst die folgenden kurzen Angaben. Diese werden für die Anonymisierung der Fragebögen benötigt.

Klasse:	_____
Erster und zweiter Buchstabe des Vornamens Deiner Mutter oder Erziehungsberechtigten:	_____
Erster und zweiter Buchstabe der Straße, in der Du wohnst:	_____
Monat, in dem Du geboren wurdest:	_____

Vielen Dank schonmal, dass du an der Erprobung teilgenommen hast!

universität wien
Zentrum für LehrerInnenbildung

AUSTRIAN EDUCATIONAL COMPETENCE CENTRE

Fragebogen

für das Unterrichtskonzept zum

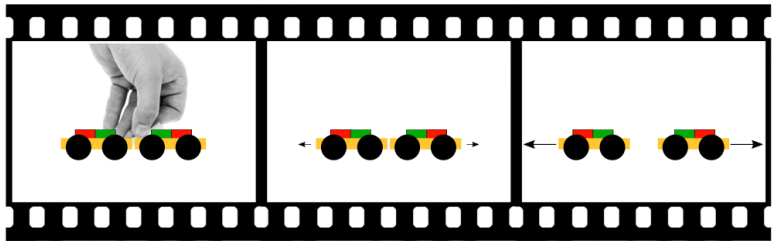
Energie-Feld-Ansatz

von Manuel Becker, M. Sc.

Posttest

4. **Magnetwägen**

Zwei Magnetwägen stoßen sich ab, werden aber noch festgehalten (siehe Abb.). Wenn man sie loslässt, fahren sie auseinander.



a) Beschreibe, woher ihre Bewegungsenergie kommt, die sie am Ende haben.

Die Energie steckt anfangs im Magnetfeld (Gesamtfeld als Überlagerung der beiden einzelnen Magnetfelder der Magnete).

optional: Wenn die beiden Wägen losgelassen werden, wird Energie aus dem Feld in die Bewegung übertragen.

b) Beschreibe mit der Tendenz des Feldes, in welche **Richtung[1] die Energie übertragen** wird!

Die Wägen bewegen sich auseinander, weil das magnetische Gesamtfeld entsprechend seiner Wechselwirkung dazu tendiert, sich auseinanderzudrücken. Wenn es die Möglichkeit dazu hat (beim Loslassen), gibt es Energie an die Bewegung ab (Tendenz des Feldes).

ODER: Das Feld tendiert zu weniger/minimaler Energie, deshalb gibt es diese (nach Möglichkeit) an die Bewegung ab.

[1] Richtung bedeutet, von wo nach wo die Energie übertragen wird.

1. **Formuliere die Kernidee der letzten Physikstunden!**

Es gibt nur Bewegungsenergie und Feldenergie.

2. **Energie**

Beschreibe kurz, was Energie ist!

offene Frage zur Erhebung der Lernendenvorstellungen und zum Abgleich, ob sich ein Unterschied (Vergleich Prä- und Posttest) durch den EFA ergibt.

Wozu spricht man in der Physik über Energie?

Möglichkeiten: Energie eignet sich zur Beschreibung (oder Erklärung) von Phänomenen/Prozessen. Energie ist erhalten. Mit Energie kann man Berechnungen machen.

3. **Felder**

a) Erkläre den Begriff „Gesamtfeld“ und wie es entsteht.

Magnete, Ladungen, Massen und Quarks sind Quellen von Feldern [Hier genügt ein Beispiel]. Die Quellen wechselwirken über ihre Felder miteinander und bilden (als Überlagerung der Einzelfelder) ein Gesamtfeld.

b) Du siehst hier zwei Ladungen. Konstruiere das entstehende Gesamtfeld!



9. **Feuerwerk**



Wenn ein Feuerwerkskörper explodiert, fliegen die einzelnen Partikel mit hohem Tempo auseinander.

Wo befindet sich die Energie für die Bewegung der Partikel, bevor die Rakete explodiert?

Das (elektrische) Feld der Atome/Partikel der Rakete gibt die Energie an die Bewegung der Teilchen und das Licht (elektromagnetisches Feld) ab.

optional: Das atomare Feld der Partikel bekommt die Möglichkeit, sich zu verändern. Verändert es sich dann entsprechend seiner Tendenz/Wechselwirkung, gibt es Energie ab.

10. **Schleuder**



Wenn man das Gummiband einer Steinschleuder spannt und loslässt, wird das darin befindliche Geschoss beschleunigt.

Wo befindet sich die Energie für die Bewegung des Geschosses, wenn die Schleuder noch gespannt ist?

Das (elektrische) Feld der Atome der Schleuder gibt Energie an die Bewegung des Geschosses ab.

optional: Beim Loslassen hat das atomare Feld die Möglichkeit, sich entsprechend seiner Tendenz/Wechselwirkung zu verändern (zusammenzuziehen) und gibt dabei Energie ab.

11. **Erwärmung des Bodens im Sommer**

Wenn Sonnenstrahlung auf die Erde trifft, erwärmt sich der Boden (z. B. der Sand am Strand). Beschreibe den Prozess der Energieübertragung kurz mit Bewegungen und Feldern!

Die Energie (des elektromagnetischen Feldes der Sonnenstrahlung) wird an die (mikroskopische) Bewegung der Atome des Sandes/Bodens übertragen. (Die Atome bewegen sich schneller und der Sand erscheint uns heißer.)

5. **Erde und Satellit**





Ein Satellit nähert sich der Erde und wird dabei schneller. Dabei nimmt die Bewegungsenergie des Satelliten zu.

a) Beschreibe, woher die zusätzliche Energie des Satelliten stammt.

Zu Beginn besitzt das **Gravitationsfeld** (Gesamtfeld als Überlagerung der Einzelfelder von Erde und Satellit) (mehr) Energie, die es dann an die Bewegung des Satelliten abgibt (oder auch: an den Satelliten).

c) Beschreibe mit der Tendenz des Feldes, in welche **Richtung[2] die Energie übertragen** wird!

Der Satellit nähert sich der Erde, weil das Gravitationsfeld/Gesamtfeld entsprechend seiner Wechselwirkung dazu tendiert, sich zusammenzuziehen. Wenn es die Möglichkeit dazu hat (Nähern des Satelliten), gibt es Energie an die Bewegung ab (Tendenz des Feldes).

ODER: Das Feld tendiert zu weniger/minimaler Energie, deshalb gibt es diese (nach Möglichkeit) an die Bewegung ab.

6. **Bindungszustände**

Begründe kurz, warum die Bindung von Atomen zu einem Molekül zu Stande kommt (begründe mit dem Feld)!

Ein Feld tendiert dazu, Energie abzugeben (Zustand minimaler Energie). Um ein solches Feld zu verändern, muss ihm Energie zugeführt werden. So ist es auch bei gebundenen Zuständen von Molekülen. ODER: Bindungen haben minimale Energie aufgrund der Tendenz des Feldes.

7. **Welche Energie trägt elektromagnetische Strahlung? Kreuze an!**

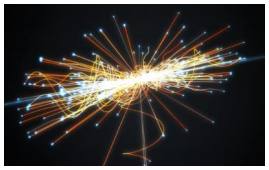
☐ Bewegungsenergie ☐ Feldenergie ☐ weiß nicht

8. **Welche Energie ist thermische Energie? Kreuze an!**

☐ Bewegungsenergie ☐ Feldenergie ☐ weiß nicht

[2] Richtung bedeutet, von wo nach wo die Energie übertragen wird.

14. **LHC des CERN**



Im Teilchenbeschleuniger LHC des CERN werden Protonen (positive Kernbausteine) mit hoher Bewegungsenergie aufeinander geschossen.

a) Beschreibe: Wo überall befindet sich die Energie **vor** der Kollision? (Beschreibe wenn möglich mit Bewegungen und Feldern!)

Zu Beginn gibt es die Bewegungsenergie der Teilchen sowie die Energie im Quarkfeld der Protonen und die Energie durch die Masse der Quarks selbst durch das Higgsfeld.

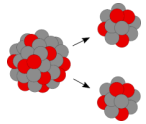
Die Feldenergie und Bewegungsenergie bei der Kollision kann zur Entstehung neuer Elementarteilchen führen.

b) Beschreibe: Wo befindet sich die Energie **nach** der Kollision? (Beschreibe wenn möglich mit Bewegungen und Feldern!)

Energie verteilt sich auf die Masse/Energie der neuen (Elementar)teilchen (durch die Wechselwirkung mit dem Higgsfeld). Außerdem gibt es deren Bewegungsenergie.

optional: Möglicherweise gibt es noch Energie im elektromagnetischen Feld entstehender Strahlung und im Quarkfeld, wenn sich Quarks zusammen binden.

12. **Kernspaltung**



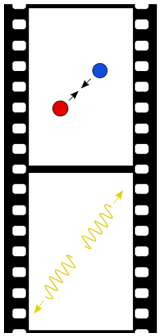
Bei der Kernspaltung teilt sich ein großer Kern in zwei kleinere Kerne. Diese Tochterkerne sind in der Summe leichter als der Anfangskern; es geht also scheinbar Masse verloren. Dafür bewegen sich die Tochterkerne aber.

Warum geht hier scheinbar Masse „verloren“? Woher kommt die Bewegungsenergie?

Bei der Spaltung teilt sich mit dem Kern das Quarkfeld (Gesamtfeld der Quarks) auf die zwei kleineren Kerne auf. Die Energie im Quarkfeld der Kerne ist gleichzeitig deren Masse. Das heißt, das Quarkfeld des Ausgangskerns gibt Energie an die Bewegung der Kerne ab, wodurch weniger Energie für die Quarkfelder der Tochterkerne übrig bleibt und diese weniger Masse besitzen.

optional: Das Quarkfeld tendiert dazu, Energie abzugeben (Bindungsenergie; Massendefekt). Als es bei der Spaltung die Möglichkeit hat, gibt es Energie an die Bewegung der Tochterkerne ab. Die „fehlende“ Energie ist als geringere Masse erkennbar.

13. **Positronen-Emissions-Tomographie (PET)**



Die Positronen-Emissions-Tomographie ist eine medizinische Methode, mit man herausfinden kann, wo im Körper sich ein vermuteter Tumor befindet. Dabei vernichten sich je ein Positron (positives Antiteilchen des Elektrons) und ein Elektron gegenseitig. Dadurch entstehen zwei elektromagnetische Wellen. Hier verschwindet also die Masse der Teilchen und dafür entsteht Strahlung.

Beschreibe kurz: Wo befindet sich die Energie am Anfang und wo am Ende?

Zu Beginn haben Positron und Elektron eine Masse und also Energie durch das (bzw. die Wechselwirkung mit dem) Higgsfeld. Wenn sich beide Teilchen gegenseitig vernichten, wird die Energie in das elektromagnetische Feld der Strahlung übertragen.

15. **Wie haben dir die letzten Physikstunden zu Energie und Feldern gefallen?**

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

sehr gut überhaupt nicht

16. **Was hat dir am meisten gefallen?**

17. **Was könnte man verbessern?**

Vielen Dank, dass Du mitgemacht hast!

Danke!

Mit der Abgabe dieser Abschlussarbeit geht auch ein bereichernder Lebensabschnitt in Wien zu Ende. Ich möchte allen Menschen danken, die mich auf diesem Weg begleitet und unterstützt haben. Ohne euch wäre dies nicht möglich gewesen!

An erster Stelle möchte ich meinem Betreuer Martin danken. Dafür, dass du mir stets mit gutem Rat zur Seite gestanden hast. Dein Vorbild und die Gespräche mir dir haben mein Bild der Fachdidaktik nachhaltig geprägt. Deine Fürsorge sowie deine wertschätzende Betreuung und Begleitung waren maßgebend für diese aufregende Zeit.

Ich danke Prof. Manfred Prenzel für die Chance, mich persönlich und wissenschaftlich bestmöglich entfalten zu können. Sie haben es durch Ihre stete Unterstützungsbereitschaft ermöglicht, das Dissertationsprojekt ins Leben zu rufen. Außerdem danke ich Prof. Lutz Kasper und Prof. Burkhard Priemer dafür, dass sie sich bereit erklärt haben, meine Arbeit zu begutachten.

Danke an alle Schüler*innen und Lehrer*innen, die bei den Erhebungen mitgewirkt haben. Eure Offenheit und Hilfsbereitschaft ist sehr wertvoll für unsere Forschung. Bei meinen Kolleg*innen und Freund*innen des AECC möchte ich mich für die Hilfe und die vielen schönen Stunden bedanken. Ich habe die herzliche Atmosphäre und die tollen Gespräche sehr genossen. Es war jeden Tag ein Vergnügen, ins Büro zu kommen.

Ich danke auch meinen Freunden in Österreich, Deutschland und auf der anderen Seite des Atlantik, die neben der Dissertation stets an meiner Seite standen. Es bedeutet mir viel, dass ihr für mich da seid. Mit euch ist das Leben ein wahres Spektakel. Ein besonderer Dank gilt meiner Familie; meinen Eltern Marion und Michael, meiner Schwerster Linda und meinem Schwager Mike. Neben der Dissertation war auch das Leben manchmal herausfordernd und ihr wart immer für mich da. Ich weiß eure bedingungslose Liebe und Unterstützung sehr zu schätzen und danke euch von tiefstem Herzen!

Von all den Jahren war das letzte sicherlich das aufregendste und glücklichste. Es ist viel passiert, für das ich sehr dankbar bin. Gaby, tu amor es una bendición que me da fuerza de crear todo. Gracias por amarme tanto!

Studien zum Physik- und Chemielernen

Herausgegeben von Martin Hopf und Mathias Ropohl

Die Reihe umfasst inzwischen eine große Zahl von wissenschaftlichen Arbeiten aus vielen Arbeitsgruppen der Physik- und Chemiedidaktik und zeichnet damit ein gültiges Bild der empirischen physik- und chemiedidaktischen Forschung im deutschsprachigen Raum.
Die Herausgeber laden daher Interessenten zu neuen Beiträgen ein und bitten sie, sich im Bedarfsfall an den Logos-Verlag oder an ein Mitglied des Herausgeberteams zu wenden.

Kontaktadressen:

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf
Universität Wien,
Österreichisches Kompetenzzentrum
für Didaktik der Physik,
Porzellangasse 4, Stiege 2,
1090 Wien, Österreich,
Tel. +43-1-4277-60330,
e-mail: martin.hopf@univie.ac.at

Prof. Dr. Mathias Ropohl
Didaktik der Chemie,
Fakultät für Chemie,
Universität Duisburg-Essen,
Schützenbahn 70, 45127 Essen,
Tel. 0201-183 2704,
e-mail: mathias.ropohl@uni-due.de

Ob beim Spannen einer Feder oder Spalten eines Atomkerns – Energie spielt bei der Beschreibung von Phänomenen eine wesentliche Rolle. Besonders vor dem Hintergrund gesellschaftlicher Herausforderungen wie Klimawandel und nachhaltiger Entwicklung benötigen Schüler:innen ein ausreichend entwickeltes Energieverständnis. Die physikdidaktische Forschung zeigt allerdings, dass viele Lernende dieses am Ende ihrer Schulzeit nicht besitzen.

Die vorliegende Dissertation dokumentiert die Entwicklung und Evaluation des Energie-Feld-Ansatzes (EFA). Er führt die Vielzahl von Energieformen auf zwei Formen zurück: Bewegungs- und Feldenergie. Entsprechend dem Modell der didaktischen Rekonstruktion wurden Fachinhalte mit Lernendenvorstellungen in Beziehung gesetzt und daraus eine Lehr-Lern-Umgebung entwickelt. Diese wurde in Akzeptanzbefragungen mit insgesamt $N = 21$ Schüler:innen der Sekundarstufe II qualitativ evaluiert und zyklisch weiterentwickelt. Dabei wurden Erkenntnisse über Schwierigkeiten und Vorteile beim Lernen gewonnen. Das entstandene Unterrichtskonzept wurde anschließend im Klassensetting mit insgesamt $N = 84$ Lernenden und deren Lehrpersonen erprobt und evaluiert.

Die Studie zeigt, dass der EFA ein angemessenes Energieverständnis fördert und typischen inadäquaten Vorstellungen entgegenwirkt. Der EFA unterstützt Lernende dabei, das Energiekonzept und seine Bedeutung für die Physik und ihre Lebenswelt besser zu verstehen. Sowohl Schüler:innen als auch Lehrer:innen erkennen im EFA einen sinnstiftenden Mehrwert für ihr Lehren und Lernen.

Logos Verlag Berlin

ISBN 978-3-8325-6079-9