pedocs
Open Access Erziehungswissenschaften

DIPF

Neff, Sascha

Transfer digitaler Innovationen in die Schulpraxis. Eine explorative Untersuchung zur Förderung der Implementation

Berlin : Logos Verlag 2023, 384 S. - (Studien zum Physik- und Chemielernen; 365) - (Dissertation, Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, 2023)

Quellenangabe/ Reference:
Neff, Sascha: Transfer digitaler Innovationen in die Schulpraxis. Eine explorative Untersuchung zur Förderung der Implementation. Berlin : Logos Verlag 2023, 384 S. - (Studien zum Physik- und Chemielernen; 365) - (Dissertation, Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, 2023) - URN: urn:nbn:de:0111-pedocs-334579 - DOI: 10.25656/01:33457; 10.30819/5687

https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0111-pedocs-334579
https://doi.org/10.25656/01:33457

in Kooperation mit / in cooperation with:

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.]

365

Sascha Neff

Transfer digitaler Innovationen in die Schulpraxis

Eine explorative Untersuchung zur Förderung der Implementation

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 365

Sascha Neff

Transfer digitaler Innovationen in die Schulpraxis

Eine explorative Untersuchung
zur Förderung der Implementation

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 Attribution 4.0 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 2023

ISBN 978-3-8325-5687-7
DOI 10.30819/5687
ISSN 1614-8967

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

Transfer digitaler Innovationen in die Schulpraxis

Eine explorative Untersuchung zur Förderung der Implementation

von

Sascha Neff

geboren in Karlsruhe

Angenommene Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften

Fachbereich Natur- und Umweltwissenschaften

Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau

Berichterstatter:
Prof. Dr. Björn Risch, RPTU Kaiserslautern-Landau
Prof. Dr. Alexander Kauertz, RPTU Kaiserslautern-Landau

Tag der Disputation: 25.07.2023

Zusammenfassung

Der Transfer digitaler Innovationen in die Schulpraxis stellt eine der zentralen Herausforderungen im Bestreben nach einer Digitalisierung im Schulsystem dar. Insbesondere für eine nachhaltige Implementation müssen die Anforderungen und Gegebenheiten der Praxis berücksichtigt werden. Symbiotische Transferstrategien setzen an diesem Punkt an. Neben systemischen Bedingungsfaktoren der Schule können auch Persönlichkeitsfaktoren und Eigenschaften der Innovation selbst als mögliche Transferhindernisse in Erscheinung treten. Als Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit wird ein Modell der Transferbarrieren unter Einbezug bereits bekannter transferhinderlicher Faktoren postuliert. Lehrpersonen als Handelnde im Zentrum des Modells bringen dabei potenziell transferhinderliche Persönlichkeitsmerkmale mit. Die schulische Situation, in welcher die Lehrpersonen agieren, kann möglicherweise ebenso den Transfer behindern wie die zu transferierenden Materialien und deren Auswirkungen auf die Lernenden. Diese Bedingungsfaktoren werden ausführlich theoretisch hergeleitet. Aufbauend auf Gestaltungskriterien zur Förderung der zielgerichteten Nutzung kognitiver Kapazitäten beim Lernen mit digitalen Medien und unter Berücksichtigung der möglichen Auswirkungen auf die Ausprägungen kognitiver und affektiver Merkmale auf der Seite der Lernenden wurden digitale Lernumgebungen (virtuelle Labore) zur Gewässeranalytik gestaltet und in das curricular verortete didaktische Konzept eingebettet. Das didaktische Konzept umfasst die digitale Vorbereitung auf eine experimentelle Arbeitsphase im Freiland, deren Durchführung sowie deren digitale Nachbereitung.

Zur Evaluation des Transferansatzes wurden zwei Studien durchgeführt. Die erste Studie nimmt den Transfer in der Zielgruppe der Lehrpersonen in den Blick. Im Rahmen einer Fragebogenerhebung sowie validierender Interviews werden Transferhindernisse identifiziert und konkrete Kriterien zu deren Überwindung herausgearbeitet, wobei didaktische Konzepte im Sinne eines Transfervehikels betrachtet werden. Die zweite Studie fokussiert die Lernenden und deren Interaktion mit den Materialien. Im Rahmen einer Fragebogenstudie mit drei Testzeitpunkten sowie einer zusätzlichen, auf die Bedienbarkeit der virtuellen Labore ausgerichteten Erhebung wird der Frage nachgegangen, wie die Nutzung der virtuellen Labore in der Vor- und Nachbereitung einer Experimentiereinheit im Freiland die Genese kognitiver Kenngrößen und affektiver Leistungsprädiktoren beeinflusst.

Die Ergebnisse lassen auf Basis qualitativer und quantitativer Daten Rückschlüsse auf Barrieren des Transfers und deren Ausprägung im vorliegenden Fall zu. Darüber hinaus konnten Kriterien zur Förderung des Transfers durch didaktische Konzepte herausgearbeitet werden. Auf der Seite der Lernenden konnten in der Nutzung der digitalen Lernumgebungen potenziell lernförderliche Ausprägungen von *Cognitive Load*, aktueller Motivation und *Flow*-Erleben explorativ-deskriptiv nachgewiesen werden. Darüber hinaus wird ein Ansatz zur Aufklärung von Lernprozessen innerhalb der virtuellen Labore unter Nutzung von *Logdaten* der Lernenden vorgestellt. Zusammenfassend

konnten Ansätze zur Förderung des Transfers aufgezeigt und eine grundsätzliche Eignung des didaktischen Konzepts zur Implementation einer digitalen Innovation bestätigt werden. Relevante Beiträge der vorliegenden Arbeit für Schulpraxis und Forschung ergeben sich so gleichermaßen durch die theoriegestützte Konzeption wie auch für die Transferforschung.

Abstract

The transfer of digital innovations into school practice is one of the central challenges in the quest for digitalisation in the school system. Especially for a sustainable implementation, the requirements and conditions of practice must be taken into account. Symbiotic transfer strategies start at this point. In addition to systemic condition factors of the school, personality traits and characteristics of the innovation itself can also come into picture as possible barriers to transfer. As a starting point for the present work, a model of transfer barriers is postulated, taking into account already known transfer-impeding factors. Teachers as agents at the centre of the model bring along potentially transfer-hindering personality traits. The school situation in which the teachers act can possibly hinder transfer, as can the materials to be transferred and their effects on the learners. These condition factors are derived theoretically in detail.

Based on design criteria for promoting the targeted use of cognitive capacities in learning with digital media and taking into account the possible effects on the manifestation of cognitive and affective traits on the part of the learners, digital learning environments (virtual laboratories) for water analyses were designed and embedded in the curricular didactic concept. The didactic concept comprises digital pre- and post-work to an experimental work phase in the field as well as the experimental part itself.

Two studies were conducted to evaluate the transfer approach. The first study focuses on transfer in the target group of teachers. As part of a questionnaire survey and validating interviews, obstacles to transfer are identified and tangible criteria for overcoming these obstacles are carved out, whereby didactic concepts are considered in terms of a transfer vehicle. The second study focuses on the learners and their interaction with the materials. Within the framework of a repeated measures questionnaire study with three tests as well as an additional survey focusing on the usability of the virtual laboratories, the question of how the use of the virtual laboratories in the pre- and post-work of an experimental learning unit in the field influences the emergence of cognitive parameters and affective performance predictors is addressed.

Based on qualitative and quantitative data, the results allow conclusions to be drawn about barriers to transfer in general as well as their characteristics in this case. Furthermore, criteria for promoting transfer through didactic concepts could be worked out. On the part of the learners, potentially learning-promoting characteristics of cognitive load, current motivation and flow experience could be substantiated exploratively-descriptively in the use of the digital learning environments. Furthermore, an approach to elucidate learning processes within the virtual labs using learners' log data is presented. In summary, approaches for the promotion of transfer could be shown and a fundamental suitability of the didactic concept for the implementation of a digital innovation could be confirmed. Relevant contributions of the present work to school practice and research

result equally from the theory-based conception as well as from the transfer research conducted in this study.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Ausgangslage 1

2 Theoretische Rahmung 7
2.1 Transferprozesse digitaler Innovationen in Schulen 7
2.2 Schulische Situation: Concerns-Based Adoption Model 19
2.3 Persönlichkeit: Lehrpersonen 38
2.4 Material: Kriterien für digitales Lernen 55
2.5 Lernende: Kognitive und motivationale Aspekte 68
2.6 Ableitung der Forschungsfragen 86

3 Virtuelle Labore als Lernumgebung 95
3.1 Aufbau der virtuellen Labore 95
3.2 Konzeption der Lerneinheit 107
3.3 Parameter der Gewässeranalytik 128

4 Methodisches Vorgehen 149
4.1 Studie 1: Evaluation des Transfers in der Zielgruppe der Lehrenden 150
4.2 Studie 2: Auswirkung der Lernmaterialien auf die Lernenden 167

5 Ergebnisse 185
5.1 Erhebung unter Lehrenden 186
5.2 Erhebung unter Lernenden 217

6 Diskussion 279
6.1 Methodenkritik 279
6.2 Bewertung der Lernumgebung 286
6.3 Bewertung der Ergebnisse der Lehrenden 289
6.4 Bewertung der Ergebnisse der Lernenden 305
6.5 Rückführung auf das Transfermodell 315
6.6 Relevanz der Arbeit für das Forschungsfeld 327
6.7 Relevanz der Arbeit für die Schulpraxis 328
6.8 Fazit 331
6.9 Ausblick 331

7 Literaturverzeichnis 335

8 Abbildungsverzeichnis 377

9 Tabellenverzeichnis 383

Anhang I
A) Beschreibung der evaluierten virtuellen Labore I
B) Druckvorlagen Arbeitsmaterialien XXXV
C) Fragebogen Erhebung Lehrpersonen L
D) Interview-Leitfaden Lehrpersonen LVIII
E) Fragebogen Erhebung Lernende TZP Vorbereitung LXII
F) Fragebogen Erhebung Lernende TZP Ende Vorbereitung LXVII
G) Digitale Anlagen LXX
H) Lebenslauf LXXI

1 Einleitung und Ausgangslage

Unterricht in Deutschland „braucht ein Update“ (Joost, 2021). Rückstände im Bereich des digitalen Lernens wurden durch die Corona-Pandemielage und den damit verbundenen Fernunterricht bundesweit aufgedeckt. Aus Schulschließungen und mäßig funktionierendem Fernunterricht resultiert ein nicht geringer Nachholbedarf, um die den Schüler:innen entstandenen Nachteile auszugleichen (Ständige wissenschaftliche Kommission der KMK, 2021). Gleichzeitig bietet sich jedoch auch die Chance, eben nicht in alte Muster zurückzukehren und die Digitalisierung an den Schulen voranzutreiben (Joost, 2021).

Bereits vor Beginn der Pandemiephase lieferte dieses Bestreben der Digitalisierungsförderung den Ansatz für die vorliegende Arbeit. Dabei steht die Frage nach einem erfolgreichen Transfer digitaler Lernmaterialien in die Schule im Fokus der Betrachtung. Entlang von drei ausformulierten Forschungsfragen werden dabei 1) Barrieren des Transfers einer digitalen Innovation in die Schule identifiziert, 2) Anforderungen an didaktische Konzepte zur Überwindung dieser Barrieren herausgearbeitet und 3) potenziell lernförderliche Ausprägungen kognitiv-affektiver Persönlichkeitsmerkmale der Lernenden im Verlauf der Bearbeitung des *Blended-Learning*-Konzepts untersucht.

Das übergeordnete Ziel der nachhaltigen Implementation einer digitalen Innovation des naturwissenschaftlichen Unterrichts in Schulen wird in diesem Zusammenhang auf mehreren Ebenen verfolgt. Einerseits werden persönlichkeitsbezogene Faktoren Lehrender, welche möglicherweise transferhinderlich wirken könnten, theoretisch abgeleitet, unter Lehrpersonen erhoben und abschließend hinsichtlich ihres transferhinderlichen Potenzials beurteilt. Andererseits werden Einflussfaktoren des Systems Schule auf einen gelingenden Transfer betrachtet und ein didaktisches Konzept ausgearbeitet, welches mögliche Hürden der Implementation der Innovation an Schulen gezielt reduzieren soll. Ebenfalls werden so die Anforderungen an didaktische Konzepte expliziert. Im Mittelpunkt dieses didaktischen Konzepts steht ein *Blended-Learning*-Ansatz, welcher sowohl experimentelle, außerschulische Erfahrungen im Freiland als auch digitale Lernumgebungen umfasst. Besonderes Augenmerk der konzeptionellen Arbeit liegt hierbei auf einer kriteriengeleiteten und damit lerntheoretisch fundierten Gestaltung der Lernmaterialien – im analogen, besonders aber auch im digitalen Raum. Nicht zuletzt soll eine Erhebung in der Zielgruppe der Lernenden Aufschluss über die tatsächliche kognitiv-affektive Auseinandersetzung mit den Lernmaterialien liefern.

Die im Zuge der vorliegenden Arbeit durchgeführten Studien zeichnen sich dabei durch ihre Multiperspektivität und ihre Prozessorientierung aus. Insbesondere auf der Seite der Lernenden wurde ein formativ-prozessorientiertes Vorgehen gewählt. Rückschlüsse auf das didaktische Konzept und die eingesetzten Lernumgebungen sollen so abgeleitet werden. Damit soll einer reinen *Output*-Orientierung im Sinne des Lernerfolges

bewusst begegnet werden. Die Studie unter Lernenden leistet damit einen Beitrag zur Aufklärung der Voraussetzungen erfolgreichen Lernens mit digitalen Medien. Nachstehend wird zunächst die Ausgangslage für die weiteren Betrachtungen skizziert.

Technologische Innovationen initiieren Veränderungen im Bildungssektor (OECD, 2021). Die Potenziale digitaler Lerngelegenheiten zeigten sich eindrucksvoll in der Hochphase der Corona-Pandemie. Trotz der Schließung von Schulen war so ein Unterrichten möglich. Pandemiebedingte *ad-hoc*-Maßnahmen stellten einen Quantensprung für die Digitalisierungsbemühungen der Schullandschaft dar. Allerdings greifen diese Maßnahmen zu kurz (OECD, 2022). Die Forderung nach einer „Innovationskultur im Bildungsbereich" (OECD, 2022, S. 11) umfasst eine Transformation des institutionellen *status quo* ebenso wie die Förderung der Kompetenzen der Lehrenden zur bildungsförderlichen Nutzung digitaler Medien.

Bereits vor über zehn Jahren stellte die Kultusministerkonferenz fest, dass „Lehrkräfte […] für die Vermittlung von Medienbildung sowohl eigene Medienkompetenz als auch medienpädagogische Kompetenzen [benötigten]" (Kultusministerkonferenz, 2012, S. 7). Im gleichen Jahr warf Voogt (2012) die Frage auf, ob Lehrende für das Unterrichten in der Informationsgesellschaft gewappnet seien. Die tatsächliche Nutzung von Computern im Unterricht war zum damaligen Zeitpunkt in Deutschland gering ausgeprägt. Nur gut ein Drittel der befragten Lehrpersonen berichtete im Rahmen der internationalen Studie zur Computer- und Informationstechnikkompetenz (ICILS) von einer regelmäßigen, mindestens wöchentlichen Nutzung, womit die deutschen Lehrpersonen Computer signifikant seltener einsetzten als Lehrende der übrigen 18 Teilnehmerländer (Eickelmann et al., 2014). In anderen Ländern (z. B. Australien, Kanada, Niederlande) zählte der Computer schon damals für den überwiegenden Anteil der Lehrenden als täglich genutztes Lehr-Lern-Medium (Eickelmann et al., 2014). In den Jahren bis 2017 konnte eine deutliche Steigerung der Mediennutzung durch Lehrpersonen im bundesdeutschen Durchschnitt erreicht werden, jedoch zeigten sich hier deutliche Disparitäten zwischen den einzelnen Bundesländern (Lorenz, Endberg & Eickelmann, 2017). Dieser Trend konnte auch in der ICILS 2018 nachgewiesen werden. Dennoch liegen auch hier – trotz einer regelmäßigen wöchentlichen Nutzung digitaler Endgeräte durch rund 60% der Lehrpersonen – die deutschen Lehrenden noch deutlich hinter dem internationalen und dem EU-weiten Vergleichswert zurück (Drossel et al., 2019). Der positive Trend einer verstärkten Nutzung digitaler Medien im Unterricht setzte sich fort, sodass der Länderindikator 2021 die regelmäßige wöchentliche Nutzung für knapp drei Viertel der befragten Lehrpersonen feststellt (Lorenz et al., 2021; Lorenz & Eickelmann, 2022). Dabei bleibt fraglich, ob sich die zunehmende Nutzung digitaler Endgeräte durch verbesserte Rahmenbedingungen, gesteigerte Verfügbarkeiten und konkretere Vorgaben (Kultusministerkonferenz, 2017) begründet. Wenngleich diese Faktoren sicherlich ihren Einfluss ausübten, so ist keinesfalls zu vernachlässigen, welchem Veränderungsdruck die Gestaltung von Lehren und Lernen an den Schulen durch die Corona-

Pandemie ab dem Jahr 2020 ausgesetzt war (Huber, 2022). Umso erstaunlicher mutet es an, dass selbst in 2021 noch ein kleiner Anteil (1,8%) an Lehrpersonen die digitale Ausrichtung von Unterricht gänzlich zu verweigern scheint (Lorenz & Eickelmann, 2022).

Lorenz und Eickelmann (2022) betonen, dass die alleinige Nutzungshäufigkeit nur als ein Kriterium für eine qualitativ hochwertige, lernförderliche Gestaltung von Lernprozessen mit digitalen Medien angesehen werden könne. Darüber hinaus bedarf es einer entsprechenden Ausstattung der Schulen in Hinblick auf ihre Infrastruktur, deren Instandhaltung und Support. Die Lehrenden müssen zudem über entsprechende Kompetenzen im Umgang mit digitalen Unterrichtsmedien verfügen, um die computer- und informationsbezogenen Kompetenzen der Lernenden fördern zu können. (vgl. theoretisches Rahmenmodell und Qualitätsdimensionen; Lorenz et al., 2022; Lorenz & Bos, 2017).

Hinsichtlich der Ausstattung der Schulen mit digitalen Endgeräten und zugehöriger Infrastruktur konnten in den letzten Jahren nur mäßige Verbesserungen erreicht werden. Berichteten Gerick et al. (2014) von einem durch die KMK ermittelten Verhältnis von zehn Schülern pro Computer im Schuljahr 2007/2008, konnten die Autoren in ihrer eigenen Untersuchung lediglich ein Verhältnis von 11,5 : 1 feststellen. Die turnusgemäße ICILS-Folgestudie deckte fünf Jahre später ein Verhältnis von 9,7 : 1 auf (Eickelmann, Gerick et al., 2019). Angesichts dieser zahlenmäßigen Vergleiche kann wohl kaum von einer ausstattungsbezogenen systemischen Veränderung in diesem Zeitraum ausgegangen werden. Würde man nach aktuellen Standards die Forderung einer Ausstattung im Verhältnis 1 : 1 für vermessen halten, so sei angemerkt, dass dieser Schritt in anderen Ländern durchaus realisiert wurde (USA im Jahr 2018: Verhältnis 1,6 : 1, Eickelmann, Gerick et al., 2019). Auch die PISA-Studie 2018 wies eine eher geringe Ausstattung mit digitalen Endgeräten nach. Hier zeigt sich zwar ein deutlich verbessertes Verhältnis von 0,61 Computern pro Schüler:in, dem aktuellen Stand der Technik und der Forderung nach flexiblen Standorten der Computer, sprich mobilen Endgeräten, wie sie auch Eickelmann, Gerick et al. (2019) als notwendige Bedingung anführen, kann jedoch mit einem Verhältnis von 0,17 tragbaren Computern pro Schüler:in nicht nachgekommen werden (Hofer et al., 2019). Der Bedarf einer deutlich besseren Ausstattung der Schulen war darüber hinaus bereits Jahre vor den angeführten Erhebungen bekannt. So schlugen bereits 2003 Wiggenhorn und Vorndran ein Verhältnis von 6 : 1 für eine sinnvolle Nutzung der didaktischen Potenziale digitaler Medien vor (vgl. auch Zentgraf & Lampe, 2012). Es lässt sich also trotz methodischer Unterschiede in den Untersuchungen und möglichen Unsicherheiten in der Datenlage konstatieren, dass einer Forderung der Wissenschaft aus dem Jahre 2003 rund 15 Jahre später Genüge getan wurde. In einem Feld, für das das Moore'sche Gesetz gilt, wonach sich die Komplexität integrierter Schaltkreise alle 12-24 Monaten verdoppelt, ist diese Umsetzungsgeschwindigkeit unzureichend. Zur Verdeutlichung dieser Zeitspanne im Kontext der Digitalisierung: 2014

wurde der Support von Microsoft Windows XP 12 Jahre nach der Veröffentlichung dieses Betriebssystems eingestellt (Microsoft, 2014).

In der Betrachtung der digitalen Kompetenzen der Lehrenden zeigt sich auf Stichprobenebene eine im Zeitverlauf signifikante Zunahme der selbst eingeschätzten Kompetenzen (Endberg & Lorenz, 2017, 2022). Die absoluten Werte offenbaren jedoch auch hier noch deutliches Steigerungspotenzial. Diese Erkenntnis gilt es ebenfalls vor dem Hintergrund bestehender Forschungsarbeiten und Kompetenzmodelle zu bewerten (z. B. TPACK-Modell: Koehler & Mishra, 2009; Mishra & Koehler, 2006 oder DigCompEdu(MINT): Ghomi et al., 2020; Ghomi & Redecker, 2019). Gerade die durch diese Konzepte klar formulierten Zielkompetenzen sollten Lehrende in einer der drei Phasen der Lehrer:innenbildung erwerben können. Inzwischen stehen beispielsweise dedizierte Frameworks zur Vermittlung digitaler Basiskompetenzen in den Lehramtsstudiengängen für die naturwissenschaftlichen Fächer zur Verfügung (Becker et al., 2020). Dabei wird eine integrative Vermittlung dieser Kompetenzen angestrebt (Becker et al., 2020; Kultusministerkonferenz, 2017). Der Umgang mit digitalen Medien ist nicht als zusätzliche Belastung zu sehen, vielmehr eröffnen digitale Medien Gestaltungsoptionen. In der Praxis gelingt die Umsetzung dieses integrativen Ansatzes weder in der Wahrnehmung der Lehrenden noch in deren Fortbildung vollständig (GEW, 2020; Köller et al., 2022; Schmid et al., 2017). So bemängelten 53 % der 542 Lehrpersonen, die Im Rahmen der Bertelsmann-Studie *Monitor Digitale Bildung* befragt wurden, fehlende Regelungen für die Anrechnung des erhöhten Aufwands beim Einsatz digitaler Medien (Schmid et al., 2017). Interessanterweise können digitale Medien auch als Zeitersparnis wahrgenommen werden, insbesondere dann, wenn ihnen ein hoher Nutzen zugeschrieben wird; der gegenteilige Effekt konnte jedoch ebenfalls beobachtet werden (GEW, 2020). Vor diesen Hintergründen wird verständlich, dass der massive Veränderungszwang, welchen die Corona-Pandemielage mit sich gebracht hat, die Schulen vor große Herausforderungen gestellt hat und ein Teil der Lehrenden diesen Herausforderungen nicht gerecht werden konnte (z. B. Steinberg & Schmid, 2020). Gerade informations- und kommunikationstechnisch wenig kompetente Lehrende konnten in der von Distanzunterricht geprägten Phase der Pandemie den sozialen Kontakt zu ihren Lernenden teilweise nicht halten (König et al., 2020). Für eben diesen Zeitraum nachweisbare negative Auswirkungen auf die Schulleistungen der Lernenden dürften durch zahlreiche weitere Einflüsse bedingt oder moderiert sein. Die Bedeutung der Lehrperson für das unterrichtliche Geschehen allgemein wurde jedoch spätestens durch Hattie (2009) eindeutig dargelegt; ein Einfluss der Lehrperson auch auf das digitale Lernen ist daher zumindest naheliegend.

Ohne einen solchen externen Zwang zur Veränderung zeigen sich Bemühungen um den Transfer häufig wenig erfolgreich (Gräsel, 2010). Gerade in der Ausgestaltung dieses Transfers finden sich zahlreiche Herausforderungen. Einerseits bedingen die vorbezeichneten suboptimalen Gegebenheiten des Settings Schule im Kontext digitaler

Medien den Transfererfolg. Andererseits zeigt das System Schule generell eine hohe Resilienz, wenn es mit Veränderungen konfrontiert wird (Gräsel, Jäger & Willke, 2006; Luhmann & Bednarz, 2005). Die Chancen für die erfolgreiche Übernahme einer Neuerung steigen, wenn diese im Zielsystem auf breite, in zahlreiche Aspekte gliederbare, Akzeptanz stößt (Goldenbaum, 2012; Holtappels, 2019; Jäger, 2004; E. M. Rogers, 2003). Hierzu bedarf es geeigneter Konzepte, welche die Bedürfnisse der Lehrenden und der Lernenden berücksichtigen (Blumenfeld et al., 2000; Fullan, 2004). Eine Kluft zwischen Entwicklungs- und Anwendungsebene führt nicht zu langfristiger Übernahme einer Innovation (Gräsel & Parchmann, 2004; Snyder et al., 1992).

An diesem Punkt setzt die Fachdidaktik in ihrem Selbstverständnis als interdisziplinäre Vernetzungswissenschaft an (Bernholt & Parchmann, 2020). Als solche ist es unter anderem eine Aufgabe der Fachdidaktik, Erkenntnisse der Forschung in die aktive Gestaltung von Lernen einzubringen. Dabei ist es der fachdidaktischen Forschung möglich, praxisnahe Ansätze im Anwendungsfeld mit von kontrollierten Studien abweichenden Qualitätsstandards zu evaluieren (Bernholt & Parchmann, 2020).

Anhand dieser beschriebenen Gemengelage ergeben sich bis hierhin drei Kernaussagen:

1) Die Ausstattung der Schulen ist in Bezug auf (mobile) digitale Endgeräte und zugehörige Infra- sowie Supportstruktur optimierbar.
2) Die digitalen Kompetenzen Lehrender haben sich in den letzten Jahren verbessert, können aber noch weiter vorangebracht werden.
3) Innovative Lehr-Lern-Konzepte brauchen für eine erfolgreiche Übernahme durch die Lehrenden deren Akzeptanz, unter anderem in Bezug auf eine potenzielle Lern- und Motivationsförderlichkeit.

Ausstattung der Schulen (Punkt 1) kann durch fachdidaktische Forschung nur insofern unterstützt werden, dass der Bedarf empirisch belegt und damit explizit und sichtbar gemacht wird. Auf Förderungen mit großem Potenzial (z. B. Digitalpakt Schule) sei dabei verwiesen.

Die unter Punkt 2 angeführte Kompetenzsteigerung der Lehrpersonen könnte und sollte durch eine adaptierte Lehrer:innenbildung von der ersten bis zur dritten Phase erfolgen. Ein solcher systemischer Wandel kann durch fachdidaktische Forschung nur schwerlich initiiert werden. Darüber hinaus ist dieses Anliegen in seinem Grundsatz bereits im bildungspolitischen Bewusstsein (Kultusministerkonferenz, 2017) sowie in den Bildungseinrichtungen (Becker et al., 2020) angekommen. Dennoch scheinen die politischen Vorgaben noch nicht zum gewünschten Erfolg geführt zu haben; das exemplarisch letztgenannte Framework mag für messbare Veränderungseffekte noch nicht lange genug in Gebrauch sein.

Zahlreiche groß angelegte Studien untersuchten bereits die affektiven Voraussetzungen der Lehrpersonen für den Umgang mit digitalen Medien sowie deren Bereitschaft zur Weiterbildung. Diese Untersuchungen sind jedoch allzu häufig populärwissenschaftlicher Natur und können klassischen Gütekriterien nur selten gerecht werden (Waffner, 2020). Weiterhin macht der rasche Wandel im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik eine Adaption bestehender Testinstrumente dringend erforderlich. Aus diesen Gründen bedarf es einer Erfassung nach theoretischer Ableitung kompetenzprädiktiver affektiver Personenmerkmale von Lehrpersonen, auf deren Basis auch entsprechende Vorbehalte der Lehrenden gegebenenfalls gezielt adressiert werden können.

Hinsichtlich der Voraussetzungen für einen erfolgreichen Transfer digitaler Innovationen in die Schule (Punkt 3) ist der Wunsch nach leicht aufzufindenden, geeigneten und guten Materialien, welche auch noch kostenfrei, geprüft und bestenfalls geordnet sein sollen, durch die Lehrenden klar formuliert (Schmid et al., 2017). Besonders leicht auffindbar wären Materialien, wenn diese aktiv an die Lehrpersonen herangetragen würden. Eine Eignung der Materialien für die breite Masse ergibt sich am ehesten aus der Kombination der Orientierung an bildungspolitischen Vorgaben (Lehrpläne, Bildungsstandards) und Spezifika der Zielgruppe, also deren Lernvoraussetzungen. Die Bereitstellung von Materialien in kostenfreier und inhaltlich geprüfter Version sollte ohnehin dem Zeitgeist der fachdidaktischen Entwicklungsforschung entsprechen. Folglich gilt es, Materialien zu entwickeln, welche auf einer fundierteren Basis als der subjektiven Einschätzung einer einzelnen Lehrperson als „gut“ beurteilt werden. Am ehesten kann diesem Qualitätsanspruch dann Genüge getan werden, wenn sich die Materialien in der Interaktion mit den Lernenden bewähren. Im Gegensatz zur reinen Leistungsmessung ermöglicht eine Erhebung affektiv-kognitiver latenter Konstrukte gegebenenfalls eine gezielte Einflussnahme auf in Summe lernförderliche Voraussetzungen. Beispielsweise könnte bei einer zu geringen Ausprägung des Interesses der Lernenden der genutzte Kontext überdacht werden. Darüber hinaus ermöglicht die Messung solcher latenter Variablen auch eine Betrachtung des Lernens mit digitalen Medien auf der Prozessebene; ein bisher unzulänglich untersuchter Bereich.

Ausgehend von den vorstehend bezeichneten Herausforderungen verfolgt die vorliegende Arbeit mehrere Ziele: a) Identifikation möglicher Transferhindernisse aufseiten der Lehrenden und der Lernenden sowie der schulischen Situation; hierzu bedarf es der b) Konzeption einer „guten“ digital-gestützten Lerneinheit auf Basis bestehender Kriterien und letztlich einer c) Evaluation dieser Lerneinheit hinsichtlich Nutzbarkeit und Auswirkung auf die Lernenden sowie Akzeptanz durch die Lehrende

2 Theoretische Rahmung

Im Folgenden werden die relevanten theoretischen Erkenntnisse der Transferforschung sowie der Stand der Forschung in Hinblick auf den Transfer digitaler Innovationen als Grundlage für das vorliegende Forschungsvorhaben dargestellt. Darüber hinaus erfolgen theoretische Betrachtungen der im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit verwendeten Operationalisierungen und Einordnungen in den Stand der Bildungsforschung der jeweiligen Teilaspekte. Im Verlauf des Kapitels werden insbesondere die schulische Situation in Hinblick auf Transferprozesse, Persönlichkeitsfaktoren von Lehrpersonen, kognitive und motivationale Aspekte der Lernenden sowie materialbedingte Voraussetzungen für erfolgreichen Transfer betrachtet.

Die (Teil-)Kapitel dieser Arbeit werden jeweils durch eine stichpunktartige Kurzzusammenfassung der Kapitelinhalte beziehungsweise der zentralen Erkenntnisse des jeweiligen Kapitels eingeleitet.

2.1 Transferprozesse digitaler Innovationen in Schulen

Transferprozesse digitaler Innovationen in Schulen

Transferprozesse im Bildungssystem

- Transfer als Verbreitung wissenschaftlich fundierter Innovationen
- Verbreitung kann ungesteuert (Diffusion) oder gesteuert (Dissemination) erfolgen
- Gelingensbedingungen für Transfer
  - Akzeptanz der beteiligten Personen
  - Eigenschaften der Innovation selbst
  - Ausgestaltung des Implementationsprozesses
- Erfolgreichem Transfer wirkt die Tendenz eines Systems zu dessen Selbsterhalt entgegen.
- Operative Geschlossenheit und Rekursivität des Systems Schule können transferhemmend wirken.
- Anknüpfung an das Wellenmodell des Transfers nach Jäger
- *Top-Down*-Transfer ist häufig nicht nachhaltig erfolgreich, da Bedürfnisse der Praxis nicht ausreichend berücksichtigt werden.
- Reiner *Bottom-Up*-Transfer ohne Einbindung der administrativen Ebene ist wenig aussichtsreich.
- Eine symbiotische Transferstrategie mit aktivem gestalterischem Einbezug der Anwendungsebene erscheint zielführend.

Postuliertes Modell der Barrieren des Transfers

- Lehrpersonen stehen als *Change Agents* im Fokus des Modells.
- Merkmale der Einzelschule werden nicht betrachtet.
- Lehrpersonen handeln innerhalb des sozialen Systems Schule; dessen Strukturen und Voraussetzungen können transferhemmend wirken.
- Einstellungen, Selbstkonzepte und Werthaltungen von Lehrenden können als affektive Einflussfaktoren den Transfererfolg mitbestimmen.
- Interaktion zwischen Lernenden und Materialien (Innovation) ist als Einflussfaktor zu sehen.

Transferprozesse im Bildungssystem

Ein Transfer praxisrelevanten Wissens aus der Forschung in den Schulalltag hinein findet häufig nur bedingt statt (Gräsel, 2010). Die Gründe hierfür sind vielschichtig. Nicht zuletzt bringen die etablierten Strukturen des Schulsystems und die damit einher-

gehenden Erwartungshaltungen an die Akteure im Bildungssystem eine wenig transferfreundliche Ausgangslage mit sich (vgl. Gräsel, Jäger & Willke, 2006). Nachfolgend wird daher zunächst ein Überblick über die relevanten Begrifflichkeiten und Gelingensbedingungen für Transfer in schulischen Kontexten dargelegt, einschlägige Transfermodelle und ausgewählte Erkenntnisse der empirischen Bildungsforschung leiten sodann in die dieser Arbeit zugrunde liegende Transferstrategie über.

Operationalisierung des Transferbegriffs

Gräsel, Jäger und Willke (2006) legen eine ausführliche etymologische Betrachtung des Transferbegriffs dar, wobei die Perspektiven von Transfer als Wechsel, Übertragung oder Verbreitung Eingang finden.

Nach E. M. Rogers et al. (2019) ist eine Innovation eine von Individuen oder Gruppen auf der Rezeptionsebene als neu angesehene Idee, Praxis oder ein Objekt. Der Übertrag einer Innovation in die Zieldomäne erfolgt durch den Prozess der Diffusion, welcher charakterisiert ist durch die Kommunikation zwischen den Angehörigen eines sozialen Systems über diverse Kanäle im Laufe der Zeit (E. M. Rogers, 1983). Nach Euler (2004) ist ein Transfer nicht zwingend dem Übertrag in eine andere Institution im Sinne eines externen Transfers gleichzusetzen, sondern kann als interner Transfer auch durchaus innerhalb einer Institution stattfinden.

Während Rogers explizit die gesteuerte wie auch die ungeplante Verbreitung einer Neuerung mit dem Begriff Diffusion bezeichnet, differenziert Jäger (2004) die Begrifflichkeiten für den deutschsprachigen Raum weiter aus. Mit dem Begriff Dissemination wird eine das Gesamtsystem betreffende, geplante und gesteuerte Maßnahme zur Verbreitung einer Innovation beschrieben, wohingegen die Diffusion einer Innovation nicht zwingend einen geplanten und gesteuerten Charakter zeigt, sondern eher als eigeninitiative Streuung betrachtet wird (Jäger, 2004). Rabin und Brownson (2018) stellen überdies den evidenzbasierten Charakter einer Dissemination im Gegensatz zur Diffusion als abgrenzendes Merkmal heraus.

Transfer wiederum zeichnet sich durch den Fokus auf die einzelnen Elemente eines Systems aus, wodurch eine Betrachtung der Vorgänge auf Prozessebene unter Berücksichtigung der Bedingungsfaktoren eines Systems möglich wird (Jäger, 2004). Euler liefert eine vereinfachte Arbeitsdefinition für den Transferbegriff, indem er Transfer „[…] als die Anwendung von erprobten Problemlösungen, die in einem spezifischen institutionellen und personellen Kontext entwickelt wurden, auf Problemlagen in ähnlich strukturierten Bereichen […]“ (Euler, 2005, S. 44) definiert. Noch weiter vereinfacht bezeichnet Gräsel den Transfer von Innovationen in der Bildungsforschung als „die Verbreitung wissenschaftlich fundierter Innovationen im Bildungssystem“ (Gräsel, 2010, S. 7)

Gelingensbedingungen des Transfers

Nach E. M. Rogers (2003) stellt sich der Innovations-Entscheidungsprozess stufenweise dar. Zunächst müssen Einzelpersonen oder Gruppierungen Wissen über die Innovation erlangen (*Knowledge*), auf dessen Grundlage sie im zweiten Schritt eine positive oder negative Haltung gegenüber der Innovation entwickeln (*Persuasion*). Auf dieser Basis wiederum wird im dritten Schritt die Entscheidung für oder wider die Übernahme der Innovation gefällt (*Decision*). Schritt vier stellt die eigentliche Implementation dar (*Implementation*), gefolgt von der Bestätigungsphase, in welcher Personen positive Rückmeldung über die Innovation erwarten (*Confirmation*). In dieser letzten Phase kann die Entscheidung für die Innovation allerdings immer noch revidiert werden (E. M. Rogers, 2003).

Dabei spielt auch die Akzeptanz der betroffenen Personen gegenüber der Innovation eine Rolle. Angelehnt an eine Normalverteilung ergeben sich einerseits überschaubare prozentuale Anteile von Innovativen und Vorreitern, welche von einem gleich großen Anteil Nachzüglern auf der anderen Seite der Verteilung kontrastiert werden. Das Hauptfeld teilt sich auf in ein frühes und ein spätes Hauptfeld, wovon beide jeweils etwa ein Drittel der Gesamtverteilung einnehmen (Gräsel, Jäger & Willke, 2006; E. M. Rogers, 2003).

Darüber hinaus stellen auch Eigenschaften der Innovation selbst bedeutende Faktoren des Transferprozesses dar. Die Innovation selbst, Kommunikationskanäle, Zeit und ein soziales System stellen die vier Kernelemente dar, welche den Diffusionsprozess prägen (E. M. Rogers, 2003).

Auf inhaltlicher Ebene können dabei nach E. M. Rogers (2003) fünf Inhaltsvariablen von Transferprozessen identifiziert werden (siehe auch Holtappels, 2019; Jäger, 2004):

1. Relativer Vorteil: Der wahrgenommene Vorteil einer neuen Praxis gegenüber der vorherigen wird häufig auf ökonomische Vorzüge, soziales Prestige und dergleichen bezogen und bestimmt den Transfererfolg maßgeblich.
2. Kompatibilität: Übereinstimmung mit soziokulturellen Werten und Vorstellungen, Vorerfahrungen und Bedarfen der Zieldomäne erhöht die Wahrscheinlichkeit erfolgreichen Transfers.
3. Komplexität: Die wahrgenommene Komplexität korreliert – generalisiert ausgedrückt – negativ mit der Übernahmewahrscheinlichkeit einer Innovation.
4. Möglichkeit der Erprobung: Können Innovationen vor deren Einführung in begrenztem Umfang erprobt werden, erhöht dies die Wahrscheinlichkeit der Übernahme.

5. Beobachtbarkeit: Sichtbarkeit der Innovationserfolge und eine eingängige Beobachtung durch andere beziehungsweise Beschreibbarkeit gegenüber anderen wirkt sich positiv auf den Transfererfolg aus.

Gräsel, Jäger und Willke (2006) sehen die soziologischen Definitionsansätze für Transfer als nicht ausreichend für eine eingehende Beschreibung der Zusammenhänge im besonderen sozialen System Schule an. Eine klare Abgrenzung der Definitionen von Transfer als Wechsel, als Übertragung von einem Kontext in einen anderen oder als Verbreitung von Neuerungen (Gräsel, Jäger & Willke, 2006) scheint der Komplexität des Transfers im Bildungsbereich nicht gerecht zu werden. Erfolgreichem Transfer steht generell die Tendenz eines Systems zu dessen Selbsterhalt entgegen (Luhmann & Bednarz, 2005). Eine besondere Ausprägung dieser Tendenz ergibt sich im Bildungsbereich aus der starken Selbstreferentialität des Systems und damit einhergehender operativer Geschlossenheit des Systems Schule.

Die primär für die Stabilisierung eines Systems erforderliche Rekursivität auf dessen internale Normen und Referenzen verursacht dabei gleichzeitig eine Abgeschlossenheit gegenüber neuen, externen Anregungen. In der Folge werden sowohl der ideelle (Selbstreferentialität) als auch der in Form praktischer Handlungen manifestierte Austausch (operative Geschlossenheit) zwischen sozialen Systemen nicht ohne guten Grund stattfinden (Gräsel, Jäger & Willke, 2006). Als Kernelement für einen Transfer, welcher diese Abgeschlossenheit eines sozialen Systems zu durchdringen vermag, ist demnach ein „Anschluss an die Eigenkomplexität des Zielsystems“ (Gräsel, Jäger & Willke, 2006, S. 457) anzusehen.

Während die beschriebene operative Schließung eines Systems einerseits eine positiv zu bewertende Filterfunktion gegenüber allzu beliebigen Umwelteinflüssen darstellen mag, kann das Erlernen situativ angepassten Verhaltens dadurch ebenso erschwert oder völlig verhindert werden. Systemisch motivierte Widerstände gegenüber gezieltem Lernen begründen sich in der potenziell wesensverändernden Wirkung des Lernprozesses (Gräsel, Jäger & Willke, 2006). Denn erst durch reflexive Prozesse und Erwerb neuen Wissens kann ein kommunizierendes System potenziell an den Punkt der Erkenntnis gebracht werden, an welchem es zu einem Verwerfen bestehender Normen und Handlungsweisen kommt.

Weiterhin gilt es dabei, ein Bewusstsein dafür zu schaffen, dass jede Form des steuernden Eingriffs in ein komplexes System, welches aus Gründen der Praktikabilität meist trivialisiert dargestellt wird, gleichzeitig nicht-intendierte Auswirkungen mit sich bringt (Gräsel, Jäger & Willke, 2006). Letztlich formulieren Gräsel, Jäger und Willke (2006) die Fähigkeit sowohl auf Organisations- als auch auf persönlicher Ebene zu lernen als notwendige Bedingung für gelingenden Transfer, da insbesondere die Personalisierung institutioneller Transferhindernisse dazu führt, dass effektives Lernen verhindert wird.

Unter Bezugnahme auf zahlreiche Einzelstudien legen Schrader et al. (2020) eine umfassende Modellheuristik vor, in welcher transferförderliche wie auch -hemmende Faktoren verortet werden können. Dabei werden neben überwiegend als stabil zu betrachtenden Voraussetzungen des Transfers auf Lehrenden- und Lernendenseite sowie Eigenschaften der Innovation als Lernangebot auch Merkmale des Implementationsgegenstandes und des Implementationsangebots, also der Ausgestaltung der Implementation, berücksichtigt. Weiterhin finden sich in der vorbezeichneten Heuristik auch explizit Wahrnehmungen der Lernenden und Wirkungen auf diese sowie deren Nutzung der Innovation im Sinne von Lernaktivitäten (Schrader et al., 2020). Diese Schnittstelle zwischen Lernenden und Lernangebot stellt eine bedeutsame Komponente des dieser Arbeit zugrunde gelegten postulierten Modells dar.

Fußangel et al. (2008) beschreiben mit der symbiotischen Transferstrategie einen Ansatz für erfolgreichen Transfer im Kontext Schule. Die zentrale innovierende Komponente stellten dabei Lerngemeinschaften zwischen Lehrpersonen und Fachdidaktiker:innen dar, wodurch die Bedürfnisse der Anwendungsebene bereits in der Ausarbeitung der Innovation ausführlich Berücksichtigung fanden.

Ausgehend von diesem Konzept wurde im vorliegenden Forschungsvorhaben gleichfalls ein Transfer unter Einbeziehung der Bedürfnisse der Zieldomäne Schule gestaltet. Hierzu wurden bereits in der Entwicklungs- und Adaptionsphase der Lernmaterialien Rückmeldungen ausgewählter Lehrpersonen eingeholt und diese in die Gestaltung der Materialien sowie die rahmenden didaktischen Konzepte integriert. Anknüpfend an die Definition der Implementation als „Umsetzung von wissenschaftlichen Erkenntnissen in die gesellschaftliche Praxis“ (Euler & Sloane, 1998, S. 312) liegt das Ziel der Implementation hierbei auf der Übernahme einer inhaltlich-technischen Neuerung. Didaktische Rahmenkonzepte sollen die Übernahme dadurch vereinfachen, dass eine vollständig ausgeplante Konzeption in den Unterrichtsverlauf integriert werden kann. Gleichwohl wird vorliegend keine Innovation auf administrativer Ebene angestrebt; vielmehr steht der didaktische Zugewinn für Lehrende und Lernende im Fokus. Durch diese Eingrenzung des anvisierten Zielzustandes in Kombination mit der Wahl einer *bottom-up*-Transferstrategie ergibt sich ein Implementationsansatz, welcher ohne autoritär induzierten „Veränderungsdruck“ (Reinmann-Rothmeier & Mandl, 1998, S. 309) auskommt.

Transfermodelle

Zum Transfer handlungsnahen Wissens, wie es für die Schule unstrittig erforderlich ist, sieht Pätzold (2003) den Bedarf der Anbindung an Kontexte und Personen. Jäger (2004) greift diese beiden Einflussfaktoren auf, erweitert sie um die Bedingungsfaktoren Inhalt und Struktur und gestaltet diese zum Wellenmodell des Transfers aus (Abbildung 1).

Die kritischen Gelingensbedingungen für erfolgreichen Transfer sieht er dabei an den Schnittstellen Person-Struktur, Struktur-Inhalt und Person-Inhalt, wobei der Autor in einer späteren Publikation den weit gefassten Begriff der Struktur zum sozialen System konkretisiert (Gräsel, Jäger & Willke, 2006). Eine Erweiterung erfährt diese theoretische Rahmung durch die Ergänzung der Merkmale der Einzelschule als weiteren Einflussfaktor auf Transfer im Bildungsbereich (Gräsel, 2010).[1]

Besondere Bedeutung kommt im vorliegenden Transfervorhaben der im Wellenmodell identifizierten Schnittstelle zwischen Person und Inhalt zu, deren Effektivität insbesondere an den Faktoren Motivation und Kompetenz der partizipierenden Lehrpersonen festgemacht wird (Jäger, 2004).[2]

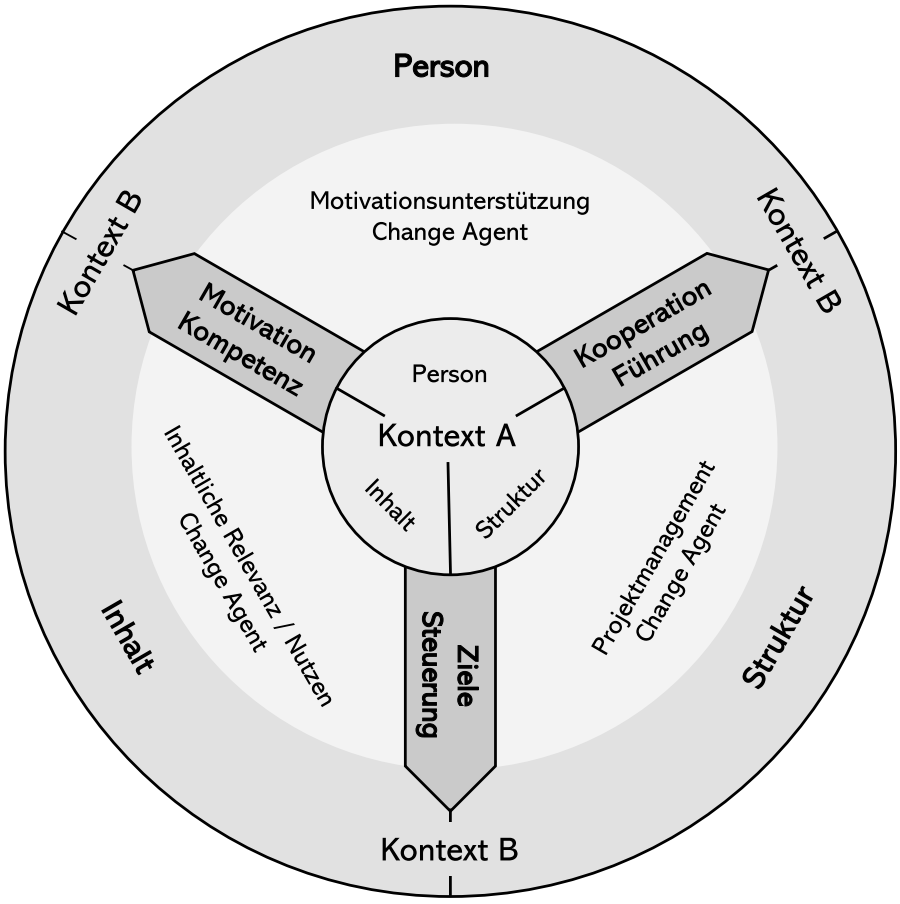


Abbildung 1: Wellenmodell des Transfers nach Jäger (2004). Eigene Darstellung.

[1] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 78), modifiziert
[2] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 78), modifiziert

Mit der vorliegenden Studie wird der motivationale Aspekt auf die beteiligten Schüler:innen erweitert. Ausgehend von der Erkenntnis, dass der Rückgang der nachhaltigen Lernmotivation selbst mit einer groß angelegten Längsschnittstudie mit umfassender Innovation auf allen beteiligten Ebenen nicht gänzlich abgefangen werden konnte (Fußangel et al., 2008), liegt das Augenmerk dabei auf der Genese der aktuellen Motivation (Rheinberg et al., 2001) als zeitlich klar operationalisiertem Konstrukt.

Transferforschung

Als Resümee des SINUS-Modellprogramms ziehen die Autoren unter anderem das Fazit, dass ein Großteil der Schulen in Deutschland nicht "bereit und in der Lage [sei]" (Bund-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung, 2004, S. 17), eine weitere Implementation gezielt anzugehen. Hinsichtlich des Transfererfolgs scheint die administrative Vernetzung und Einbindung aller Stakeholder jedoch einen deutlichen Effekt auf Transferbemühungen zu zeigen. Deutliche Vorteile durch aktiven Einbezug der Schuladministration werden beispielsweise aus dem BLK-Programm SINUS-Transfer für den mathematisch-naturwissenschaftlichen Fächerverbund berichtet (Ostermeier & Stadler, 2004).

Auch Hennen (2021) fordert zur Ausgestaltung erfolgreichen Transfers die aktive Einbindung der administrativen Komponente. Wenngleich diese Forderung vor dem dargestellten Projekthintergrund (Projekt "Ganz In") sinnvoll erscheint, wird an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt, auf welches operative Verständnis von Transfer und welches Rollenverständnis der Schuladministration hier abgezielt wird.

Als bedeutsames Ergebnis der Transferforschung ist festzuhalten, dass Transferbemühungen in Form von Machtstrategien, bei denen Innovationen in *top-down*-Prozessen an die Schulen herangetragen werden, sich meist als wenig erfolgreich und nicht nachhaltig erweisen (Gräsel & Parchmann, 2004; Holtappels, 2019; Snyder et al., 1992). Die Gründe hierfür liegen primär in der geringen Passung zu affektiv-motivationalen Faktoren der pädagogisch Handelnden, und deren resultierender Ablehnung gegenüber der Innovation (Blumenfeld et al., 2000; Fullan, 2004; Holtappels, 2019).

Holtappels (2019) beschreibt rational-empirische Strategien des Transfers, welche auf die objektive Darlegung der Wirksamkeit einer Innovation setzen, vor diesem Hintergrund als wirksamer als *top-down*-Strategien. Dieser Auffassung widersprechen jedoch Breuer et al. (2022). Sie konnten am Beispiel einer konkreten Innovation (Gerjets et al., 2004) nachweisen, dass selbst der empirische Nachweis der Wirksamkeit einer Innovation keine Relevanz für die Beurteilung durch die Lehrenden nach sich zog (Breuer et al., 2022). Trempler et al. (2013) beschreiben viel eher das Interesse einer

Lehrperson an einem Innovationsgegenstand als bedeutsamen Faktor für das Zustandekommen einer positiven Transfermotivation.

Letztlich kann erfolgreicher Transfer nur dann stattfinden, wenn Organisationen oder Institutionen lernen. Die hierzu erforderliche Organisationsentwicklung (z. B. Schulentwicklung) ist dabei eng verwoben mit persönlichem Lernen der beteiligten Individuen (Holtappels, 2019). Transfer im Sinne von Veränderung des stabilen Zustandes eines Systems erfolgt daher durch Individuen, stellt ein sehr persönliches Erlebnis dar und schließt dabei persönliches Wachstum wie auch Organisationsentwicklung mit ein (Hord et al., 1987).

H.-J. Roth et al. (2021) weisen darauf hin, dass Implementation einer balancierten Steuerung bedarf, welche zwischen *top-down* und *bottom-up*-Prozessen abwägt. Die Autoren konstatieren daher: "Adaptive Implementation ist der Normalfall" (H.-J. Roth et al., 2021, S. 803). Dabei zeichnet sich die Wirksamkeit von Transferprojekten insbesondere dann ab, wenn diese Administration, Beratung und Unterstützung sowie Netzwerkbildung aktiv als Teil der Transferbemühungen mit einbinden (Nickolaus et al., 2010).

Aufseiten der Lernenden identifizierten Petsch et al. (2012) Schulform und Geschlecht der Lernenden als relevante Variablen hinsichtlich des Effekts einer Innovationsimplementation mit Fokus auf pädagogische Handlungsprogramme. Offen bleibt dabei jedoch, ob sich die Relevanz dieser Faktoren aus der spezifischen Innovation, in diesem Fall einer Bildung für nachhaltige Entwicklung, oder aus der Anlage der Transferprozesse ergibt.

Weiterhin legt Breuer (2021) insbesondere in der Oberstufe eine gesteigerte Bedeutung der curricularen Vorgabe für den Transfer einer Innovation nahe.

Auf übergeordneter Ebene formulieren Otto et al. (2019) das Desiderat einer stärker am Transferprozess selbst orientierten Forschung, welche längerfristig angelegt ist. Dieser Forderung wurde in einigen Projekten bereits Rechnung getragen (z. B. SINUS-Transfer, Transfer-21). Auch in der vorliegenden Arbeit stellt die Betrachtung des Transferprozesses eine explizite Zielsetzung dar.

Die Modellierung des Innovationstransfers unter Nutzung einer didaktischen Konzeption (Breuer, 2021; Gregoire, 2003) wird zur konkreten Einordnung der Ergebnisse im Diskussionsteil dieser Arbeit herangezogen.

Postuliertes Modell der Barrieren des Transfers

Das im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens postulierte Modell des Transfers einer digitalen Innovation in die Schule greift die von Jäger sowie Jäger und Gräsel beschriebenen Einflussfaktoren auf und führt sie in einem integrativen Modellansatz zusammen (siehe Abbildung 2). Eine dedizierte Untersuchung des zuvor beschriebenen Einflussfaktors „Merkmale der Einzelschule“ (Gräsel, 2010, S. 12) ist hierbei nicht intendiert. Dies ergibt sich einerseits aus dem Anspruch, diverse Schulen querschnittlich zu betrachten, sowie andererseits aus der Anlage der Transferbemühungen, wobei die Innovation dezentral an Lehrpersonen herangetragen wurde, was eine zentralisierte Steuerung durch die Schulleitungen und Kollegien für die Implementationsphase obsolet macht. Des Weiteren stellen Schellenbach-Zell et al. (2008) fest, dass die Bedeutung der Einflüsse auf Schulsystemebene diejenigen auf der Ebene der Einzelschule bei weitem übersteigen, wodurch die hier gewählte Betrachtungsweise ebenfalls legitimiert wird, wenngleich sich die Generalisierbarkeit der Aussagen auf den Mesokosmos der ausgewählten Schulen beschränkt.[3]

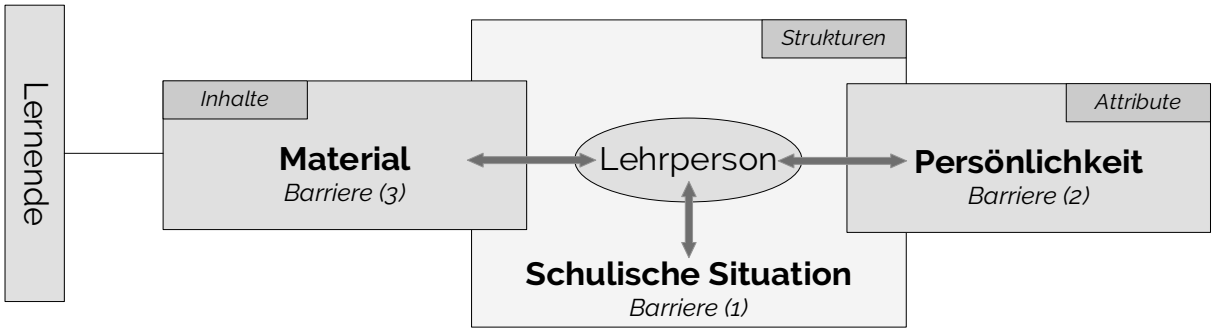


Abbildung 2: Angenommenes Modell der Transferbarrieren. Eigene Darstellung.

Das induktive Modell der möglichen Transferbarrieren umfasst drei möglicherweise transferhinderliche Bereiche: 1) *Person,* 2) *schulische Strukturen* und 3) *Materialien.* Diese werden wie nachfolgend beschrieben angenommen. Dabei steht die Lehrperson in zentraler, vermittelnder Rolle im Fokus des Modells.

Lehrpersonen agieren innerhalb schulischer Strukturen (Barriere 1). Dabei limitiert die schulische Situation, sei es organisatorisch, personell oder materiell, ihre Gelegenheiten zur Übernahme einer digitalen Innovation. Ein transferförderliches oder -hinderliches Arbeitsklima, fehlende digitale Infrastruktur oder fehlende personelle Ressourcen können hier als mögliche Einflussfaktoren konkretisiert werden.

[3] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 79), modifiziert

Lehrpersonen bringen bestimmte Persönlichkeitsmerkmale (Barriere 2) mit. Persönliche Einstellungen, Selbstkonzepte und Werthaltungen können die Bereitschaft und das Engagement zur Übernahme einer digitalen Innovation mitbestimmen.

Selbst bei einer transferförderlichen Ausprägung der beiden erstgenannten Barrieren bedarf es noch einer hohen Qualität und Eignung der Materialien (Barriere 3). Eignen sich die Materialien für die Zielgruppe der Lernenden nicht, wird die Lehrperson deren Übernahme nicht aktiv befürworten und daher die digitale Innovation nicht implementieren.

Transferförderliche Kriterien der Schulen

Der Einfluss des sozialen Systems Schule auf den Implementationsprozess wird durch das *Concerns Based Adoption Model* (CBAM) konkretisiert. Ein Kernelement dieses theoretischen Frameworks (Hall & Hord, 2020) stellt der Grad der Betroffenheit (*Stages of Concern*) dar, welcher den Transferprozess als eine Abfolge von veränderbaren Vorbehalten (*Concerns*) der Lehrpersonen, welche im System Schule agieren, gegenüber der Implementation beschreiben (Anderson, 1997). In diesem Kontext wird dem Konstrukt der *Concerns* bewusst keine negativ konnotierte Bedeutung zugesprochen, vielmehr werden die mentalen Prozesse des Hinterfragens, der Analyse, der Abwägung von Aktionen und Reaktionen sowie der Antizipation von Konsequenzen als „*Concerns"* beschrieben (Hall & Hord, 2006, S. 138, zitiert nach Pant et al., 2008, S. 831).[4]

Sieve (2015) stellt bei der Übertragung des C*oncern*-Begriffs ins Deutsche die affektiv-kognitive Auseinandersetzung in den Mittelpunkt:

> *Das Wort concern darf nach dieser Definition nicht in verkürzter Weise nur negativ konnotiert mit Sorgen, Bedenken oder Befürchtungen im Sinne von* worries *übersetzt werden. Vielmehr ist mit dem Begriff die affektiv-kognitive Auseinandersetzung bzw. Beschäftigung mit der Innovation gemeint, also die jeweiligen Interessenkategorien, die eine Person zu einem bestimmten Zeitpunkt im Implementationsprozess aufweist.*
> (Sieve, 2015, S. 100)

Im Zentrum des Modells steht die graduelle Entwicklung der Vorbehalte der betroffenen Lehrpersonen unter Berücksichtigung ihrer aktuellen schulischen Situation. Bedenken oder Vorbehalte, welche die an der Innovation beteiligten Personen betreffen, entwickeln sich im Laufe des Innovationstransfers. Diese können als *Stages of Concern* den drei Phasen "*Self*", "*Task*" und "*Impact*" zugeordnet werden (Hall et al., 1973,

[4] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 79), modifiziert

S. 13–15). Die Entwicklung der Vorbehalte vollzieht sich ausgehend von einer persönlichen über eine aufgabenbezogene bis hin zur auswirkungsorientierten Betrachtungsweise der Innovation (Loucks & Hall, 1977; Mitchell, 1988). Darüber hinaus sieht das Modell als weitere Indikatoren eines erfolgreichen Transfers die Nutzung der Innovation (*Levels of Use)* sowie die Modifikation der Innovation (*Innovation Configuration*) an (Anderson, 1997). Dabei stehen das *Level of Use* der Innovation und die empfundenen *Concerns* in linearem Zusammenhang, woraus eine Abschätzung akzeptabler Kombinationen von Nutzung und Vorbehalten prognostiziert wurde (Hall, 1974).[5]

Lehrerpersönlichkeit

Die Lehrperson nimmt in dem in Abbildung 2 gezeigten Modell die zentrale Position ein. Als Wissensvermittler:in, Unterrichtsgestalter:in und „*Change Agent"* (Prasse, 2012, S. 12) agiert sie innerhalb des normativen Referenzrahmens der schulischen Situation. Dabei lassen sich in den von Havelock (1973) definierten Aufgaben eines *Change Agents* durchaus für den Lehrberuf ohnehin typische Tätigkeitsbereiche und Handlungsabläufe wiedererkennen (Havelock, 1973). Als relevante Gelingensbedingungen in Bezug auf einen erfolgreichen Transfer sind die Persönlichkeit der Lehrperson sowie deren „*Beliefs"* (Fußangel et al., 2008, S. 51) heranzuziehen. Einstellungen, Überzeugungen und weitere Attribute können die Übernahme der Innovation fördern oder behindern (Gräsel, Jäger & Willke, 2006). Gegenüber anderen Berufsfeldern tritt dieser Effekt in Schulen besonders stark zutage, da der Lehrberuf durch einen hohen Grad an Autonomie und Individualität bei gleichzeitig geringer externer Kontrolle geprägt ist (Gräsel, Fußangel & Pröbstel, 2006). Hieran anknüpfend liegt der Fokus der Erhebung zu dieser potenziellen Barriere des Transfers der konzipierten technischen und didaktischen Innovation überwiegend auf den von Gräsel (2010) als relevant identifizierten Konstrukten ‚Einstellung gegenüber digitalen Medien' (Tigges, 2008), ‚Selbstkonzept im Umgang mit digitalen Endgeräten' (Dickhäuser, 2001) sowie dem ‚digitalen Endgeräten beigemessenen Wert' (Tigges, 2008; vgl. Neff et al., 2020b). Der motivationale Aspekt bezüglich des Materials wird nun auf die beteiligten Schüler:innen erweitert, da eine gesteigerte Motivation der Schüler:innen positive Auswirkungen auf die schulischen Leistungen nach sich ziehen (Schöne et al., 2002) und so letztlich auch förderlich auf die Implementationsbereitschaft der Lehrpersonen wirken kann (Gräsel, 2010).[6]

[5] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 79), modifiziert
[6] Abschnitt erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 80), modifiziert

Interaktion der Lernenden mit der Innovation

Eine weitere Determinante besteht in der Innovation selbst – im vorliegenden Fall in den Inhalten der virtuellen Labore und deren Einbettung in den Unterricht. Eignen sich die Materialien nicht für eine Umsetzung mit der beabsichtigten Zielgruppe der Lernenden, so ist eine Übernahme der Innovation selbst bei guten strukturellen und persönlichen Bedingungen der Lehrpersonen unwahrscheinlich. Hieraus resultiert die Schlüsselstellung der Lernenden im postulierten Modell. Während die Bedeutung der Integration von Lehrpersonen als aktiv agierende *Change Agents* in Implementationsprozessen weitgehend unbestritten ist (z. B. Havelock, 1973; Gräsel, 2010; Stralla, 2019; Schellenbach-Zell et al., 2008; Jäger, 2004), finden Schüler:innen bisher wenig Beachtung im Rahmen von Transferprozessen im Setting Schule. Unter Berücksichtigung des Umstandes, dass alles schulische Handeln *ex lege* letztlich dazu dient, es Schüler:innen zu ermöglichen, „in der Schule ihr Recht auf Bildung und Erziehung wahr[zunehmen]“ (SchulG RLP, 2004/26.06.2020, §3, (1)) erscheint dies geradezu paradox. Sofern die Auswirkungen einer Innovation auf Schüler:innen untersucht wurden (z. B. bei Chemie im Kontext), zeigt sich bei gelungener Zielerreichung hinsichtlich der Lehrpersonen kein inhaltlich zufriedenstellender Effekt in Bezug auf die Schüler:innen (Fußangel et al., 2008). Nicht zuletzt aus diesem Beweggrund wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch der Umgang der Schüler:innen mit der unterrichtlichen Innovation untersucht. Der Fokus liegt dabei auf den Konstrukten *Flow* (Rheinberg et al., 2003), aktuelle Motivation (Rheinberg et al., 2001), *Cognitive Load* (Leppink et al., 2013) sowie *System Usability* (Brooke, 1996; Brooke, 2013).[7]

[7] Abschnitt erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 80–81), modifiziert

2.2 Schulische Situation: Concerns-Based Adoption Model

Schulische Situation: *Concerns-Based Adoption Model* (CBAM)

- Transfer ist ein Prozess.
- Transfer wird durch Individuen erzielt und ist eine hoch individuelle Erfahrung mit Potenzial für persönliche Weiterentwicklung.
- *Change Agents* vermitteln zwischen Quellsystem (Universität) und Zielsystem (Schule).
- Lehrpersonen zeigen im Verlauf eines Transferprozesses verschiedene Vorbehalte (*Concerns*).
- *Concerns* können erfasst und als *Unrelated Concerns*, *Self-*, *Task-Related* und *Impact Concerns* kategorisiert werden.
- Durch Erhebung der sieben *Stages of Concern* (*SoC*) können Bedürfnisse identifiziert und Interventionen gezielt adressiert werden.
- Darüber hinaus können mit dem CBAM die tatsächliche Nutzung einer Innovation (*Levels of Use*) und deren Modifikation für die Zieldomäne (*Innovation Configuration*) erfasst werden.
- Das CBAM wurde in zahlreichen Untersuchungen, vorrangig zur formativen Evaluation und Gestaltung, erfolgreich eingesetzt.
- Lehrpersonen können kooperationsbereite oder potenziell in Bezug auf die Implementation problematische *SoC*-Personenprofile zeigen.

Der Prozess der Übernahme einer Innovation, etwa einer Lehrinnovation in Schulen, kann mit Hilfe des *Concerns-Based Adoption Model* (CBAM) tiefgreifend beschrieben werden. Dabei stehen formative Assessments im Fokus der Implikationen für die Praxis. Ausgehend von diesem Modell können sowohl Evaluationen angestrebt als auch Gelingensbedingungen des Transfers einer Innovation identifiziert und beschrieben werden. Im vorliegenden Kapitel erfolgt daher zunächst eine ausführliche Betrachtung der theoretischen Hintergründe und Operationalisierungen innerhalb des Modells. Anschließend wird der Stand der Forschung mit Blick auf praxisnahe Implikationen dargestellt.

Concerns-Based Adoption Model – Operationalisierung

E. M. Rogers beschreibt den englischen Begriff „*Adoption*“ im Zusammenhang mit der Umsetzung einer Innovation als die bewusste Entscheidung, eine Innovation zu nutzen und diese zu implementieren (E. M. Rogers, 1983, S. 172). Dabei kann die Entscheidung für oder wider eine Innovation aktiv gesteuert oder passiv erfolgen. Aktive Ablehnung wird in diesem Zusammenhang als die bewusste, für den Entscheider begründete Wahl, eine Innovation nicht zu übernehmen, angesehen, wohingegen bei der passiven Ablehnung die Übernahme der Innovation nie wirklich in Betracht gezogen wurde (E. M. Rogers, 1983). Diese Betrachtungsweise des Transfers als bewusste Wahl wurde bereits vor Rogers durch die Darstellung als Prozess (z. B. Havelock, 1973) kontrastiert und gilt als überholt (Loucks & Hall, 1979).

Hall et al. (1973) erweitern den Begriff der A*doption* auf sämtliche Bemühungen zur erfolgreichen Umsetzung einer Innovation. Im gleichen Zuge stellen die Autoren dar, dass Fullers Auffassung des „*Concern*“-Begriffes (Fuller, 1969) auf den Prozess der

Übernahme einer Innovation generalisiert werden kann. Hierzu sei zunächst auf die Definition des Begriffes nach Hall (1979) als Ausgangspunkt für die weiteren Betrachtungen im Rahmen des CBAM verwiesen:

> *The term "concerns" is used to represent a composite description of the various motivations, perceptions, attitudes, feelings, and mental gyrations experienced by a person in relation to an innovation.*
> *(Hall, 1979, S. 203)*

In diesem Kontext wird dem Konstrukt der C*oncerns* bewusst keine negativ konnotierte Bedeutung zugesprochen, vielmehr werden die mentalen Prozesse des Hinterfragens, der Analyse, der Abwägung von Aktionen und Reaktionen sowie der Antizipation von Konsequenzen als *Concerns* beschrieben (Hall & Hord, 2020). Hall et al. (1991) beschreiben den Zustand entsprechend wie folgt: „To be concerned means to be in a mentally aroused state about something“ (Hall et al., 1991, S. 5). Als vorteilhaft ist die dem Konzept der C*oncerns* immanente Resilienz gegenüber direkter Manipulation zu sehen. So ist es nicht möglich, die Vorbehalte einer Person unmittelbar zu beeinflussen, vielmehr stellt sich eine Variation der C*oncerns* als Folge veränderter Transferbedingungen ein (Hall, 1979). Ausgehend von der evidenzbasierten Zuordnung tätigkeitsbezogener Probleme zu Phasen der eigenen professionellen Entwicklung von Lehrpersonen (Fuller, 1969), untersuchten Hall et al. (1973) die Fragestellung ob und wie Phasen der Persönlichkeitsentwicklung von Lehrpersonen durchlaufen werden können. Die Unterscheidung der Dimensionen der Concerns von Lehrpersonen in *„Self-related“*, *„Task-related“* und *„Impact-related“* (Hall et al., 1973, S. 6) erlaubte dabei eine effektive Kategorisierung bereits bekannter sowie neu erfasster *Concerns* Lehrender.

Fullers Studien zeigten bereits Muster in den *Concerns* von (angehenden) Lehrpersonen in Abhängigkeit von der Berufserfahrung auf: Vor Beginn der Lehrtätigkeit zeigten Proband:innen kaum bis keine relevanten *Concerns*, in der Berufseinstiegsphase traten hauptsächlich *Concerns* in Bezug auf die eigenen Fähigkeiten auf, wohingegen erfahrene Lehrende eher mit den Auswirkungen auf die Schüler:innen beschäftigt waren (Fuller, 1969). Hall und Hord (1987) konkretisierten darauf aufbauend vier Stufen:

1) Unrelated Concerns: Angehende Lehrpersonen in der Studienphase zeigen eher *Concerns* in Bezug auf ihr Studium, private Gegebenheiten oder Freizeitgestaltung.
2) Self Concerns: Angehende Lehrpersonen mit ersten Erfahrungen mit Lernenden machen sich Gedanken um ihre Lehrtätigkeit, dies jedoch eher von einem egozentrischen Standpunkt aus. Eigene Unsicherheit und Selbstzweifel können hier prägende Merkmale sein.

3) Task Concerns: Angehende Lehrpersonen mit zunehmender Erfahrung sind eher mit dem Job als solches beschäftigt. *Concerns* in Bezug auf Materialvorbereitung, Koordination und Zeitmanagement sind typische Indizien hierfür.
4) Impact Concerns: Lehrpersonen beschäftigen sich verstärkt mit der Wirkung ihrer Lehre auf die Lernenden und wie sie selbst ihre Lehre optimieren können.

Conway und Clark (2003) stützen diese graduelle Entwicklung der *Concerns* von Lehrpersonen, stellten jedoch gleichzeitig eine zunehmende Selbstreflexion angehender Lehrpersonen fest, wodurch der Fokus auf anderer Ebene zunehmend verstärkt auf die Persönlichkeitsentwicklung als Lehrperson gelegt wird.

Hord und Loucks (1980) stellen fest, dass im Zuge der Forschung zum CBAM eine Analogie der *Concerns* von Lehrpersonen in den verschiedenen Phasen der Lehrer:innenbildung mit Lehrpersonen, welche mit einer Innovation konfrontiert werden, gezogen werden konnte (diese Hypothese wurde bereits von Hall et al., 1973 formuliert). Diese klar identifizierbaren und sich entwickelnden *Concerns* dienen als Grundlage für die sieben *Stages of Concern* des CBAM (Hord & Loucks, 1980).

Auf der Grundlage der beschriebenen Vorarbeiten wurde das *Concerns-Based Adoption Model* (CBAM) formuliert (Hall et al., 1973). Dieses zeichnet sich durch insgesamt drei Systeme aus (Abbildung 3). Das Quell-System verfügt über die zur Innovationsübernahme notwendigen Kenntnisse und Erfahrungen auf Sach- und Prozessebene. Das Nutzersystem kennt dagegen die institutionellen Voraussetzungen, kann diese mit Hilfe des Quell-Systems in Hinblick auf die Innovation zielgerichtet analysieren und die Bereitschaft zur Übernahme einer Innovation in der Zieldomäne steigern. Die Interaktionen von Nutzer- und Quell-System finden dabei in einem temporären, kollaborativen Übernahmesystem (*Linkage System*, Hall, 1974, S. 13) statt. Letztlich liefert das Quell-System somit die Expertise zur Innovation selbst wie auch zu deren Umsetzung im konkreten Fall des Nutzer-Systems, wobei das Quell-System nicht ohne die Informationen und die aktive Mithilfe des Nutzer-Systems gewinnbringend auf die Übernahme der Innovation einwirken kann. *Change Agents* nehmen in diesem Prozess eine katalytische Funktion ein (Havelock, 1973), indem sie sowohl die Informations- als auch die Handlungskomponente aktiv betreuen, etwa dadurch, dass sie konkrete Bedürfnisse und Potenziale identifizieren oder Interventionen und Beratungsstrategien planen sowie die Nutzer:innen in der Auflösung ihrer Bedenken unterstützen. War die Übernahme erfolgreich, so wird das temporäre, kollaborative System aufgelöst, da das Nutzer-System die Innovation so weit übernommen hat, dass die eigenständige Nutzung und die Betreuung der Innovation sichergestellt sind. Das Quell-System bildet zusammen mit einem neuen Nutzer-System ein neues, nicht-identisches kollaboratives System aus (Hall et al., 1973).

Hord et al. (1987) bezeichnen die mit der Umsetzung einer Innovation betraute Person vorzugsweise als *Change Facilitator* und weisen dabei auf den persönlichen, fürsorglichen Charakter hin, mit welchem eben jene Personen zur Umsetzung der Innovation ermutigen, antreiben und überzeugen sollen (Hord et al., 1987). Aufgrund der Deckung dieser Begrifflichkeit mit neuerer deutschsprachiger Literatur (z. B. Gräsel, 2010; Stralla, 2019) wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit der Begriff des *Change Agent* synonym zum Begriff des *Change Facilitators* für entsprechend prozessbegleitend Tätige im Transferbereich verwendet. Hord et al. (1987) stehen der Bezeichnung *Change Agent* ebenfalls nicht kategorisch ablehnend gegenüber.

In diesem Zusammenhang ist zu konstatieren, dass bei der Nutzung des CBAM stets die personenbezogene Komponente des Transfers im Fokus steht.

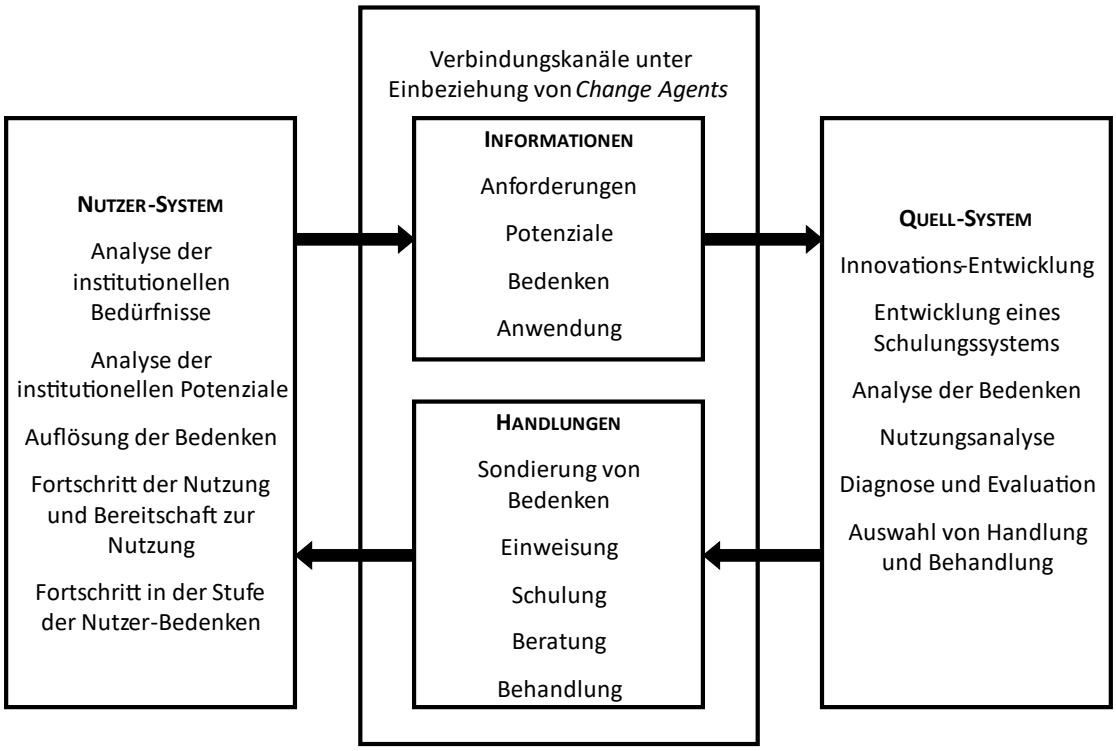


Abbildung 3: Die Interaktion von Quell- und Nutzersystem über das temporäre kollaborative System im CBAM-Modell. Eigene Grafik, adaptiert nach Hall et al. (1973).

Hieraus leitet sich die Definition des Innovationsbegriffs wie folgt ab: „Innovation is our generic term for any program, process or practice – new or not – that is new to a person." (Hord et al., 1987, S. 3). Folglich zählt hier der Wissensstand der jeweiligen Person als Ausgangspunkt der Betrachtung, nicht etwa der Stand der Forschung oder Vorgaben der Führungsebene. Diese personenzentrierte Sichtweise findet ihre Fortsetzung in sechs Grundannahmen (in Erweiterung der vier Grundannahmen in Hord & Loucks, 1980), welche die Basis dieses Modells bilden (Tabelle 1). Hall und Hord

(1987) sehen dabei die Personen als Agierende in ihrem jeweiligen schulischen Kontext, ohne jedoch diesem Kontext (beispielsweise durch die hierarchische Position) hilflos ausgeliefert zu sein. Der Kontext der Handelnden wird damit nicht als ausschlaggebend für Erfolg oder Misserfolg einer Implementation angesehen, vielmehr wird die Fähigkeit der *Change Facilitators,* aus ihrem gegebenen Kontext heraus Chancen zu identifizieren, als maßgeblich angesehen (Hall & Hord, 1987). Anderson (1997) merkt hierzu kritisch an, dass der Kontext des Nutzersystems, also die schulische Realität, in der CBAM Theorie nicht ausreichend beachtet werde.

Tabelle 1: Grundannahmen des Concerns-Based Adoption Model nach Hord et al. (1987, S. 5–7), eigene Übersetzung und Paraphrase.

Change is a process, not an event.
Veränderung geschieht mit der Zeit. Die reine Übergabe einer Neuentwicklung stellt ein einmaliges Ereignis dar, sie begründet noch keine Veränderung.
Change is accomplished by individuals.
Veränderung wirkt sich auf Individuen aus. Sie ist nicht losgelöst von Personen. Erst wenn (fast) alle Personen mit der Neuerung vertraut gemacht werden konnten und sie diese übernommen haben, tritt Veränderung auf Schulebene ein.
Change is a highly personal experience.
Jeder Mensch ist einzigartig. Jede Person reagiert anders auf Veränderung. Veränderung kann am ehesten dann erreicht werden, wenn auf die ermittelten Bedürfnisse des jeweiligen Nutzenden eingegangen wird.
Change involves developmental growth.
Gefühle und Fähigkeiten von Individuen entwickeln sich weiter. Diese Entwicklung in Bezug auf die Neuerung tritt mit zunehmender Erfahrung mit selbiger ein.
Change is best understood in operational terms.
Lehrende beziehen Veränderungen auf sich und die Auswirkungen auf ihre Lehre. Veränderungen in Hinblick auf die Auswirkungen auf die Werte, Ansichten und das Verhalten der Lehrenden und Lernenden konkret zu adressieren, kann die Relevanz der Kommunikation steigern.
The focus of facilitation should be on individuals, innovations, and the context.
Materialien und Ausstattung machen noch keine Veränderung – Veränderung geschieht, wenn Menschen ihr Verhalten ändern. Effektive Begleitung einer Veränderung bedarf eines adaptiven und systemischen Ansatzes. Interventionen müssen auf die Bedürfnisse der Individuen angepasst sein und dabei auch die Auswirkungen einzelner Veränderungen auf das System Schule berücksichtigen. Auf dem Weg zur Veränderung einer Praxis muss gegebenenfalls auch die Intervention selbst angepasst werden.

Die weiteren Ausführungen nehmen die drei diagnostischen Komponenten des CBAM in den Blick. *Stages of Concern, Levels of Use* und *Innovation Configuration* stellen jeweils theoretisch fundierte Teilkonstrukte des CBAM dar. Diese Konstrukte können im Zuge der Evaluation eines Implementationsprozesses eingesetzt werden. Dabei dienen sie der Informationsgewinnung für Prozessbegleitende (*Change Facilitators*), auf deren Basis Interventionen gestaltet werden können, durch welche das Quellsystem durch den vermittelnden Prozessbegleiter auf das Zielsystem einwirken kann (vgl. Abbildung 4).

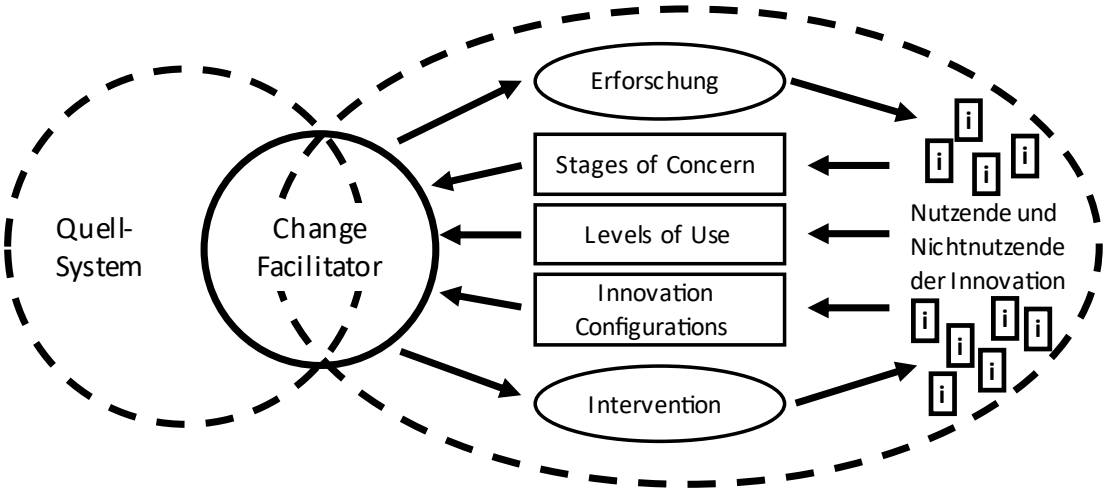


Abbildung 4: Die Konstrukte und Systeme des Concerns-Based Adoption Model in der Übersicht. Der Change Facilitator wirkt vermittelnd zwischen Quell- und Zielsystem und bedient sich zur Moderation unter anderem der drei diagnostischen Dimensionen. Abbildung verändert nach George et al. (2013, S. 1).

Mit Hilfe der drei Bestandteile des CBAM – *Stages of Concern*, *Levels of Use* und *Innovation Configuration* – kann ein Gesamtbild des Implementationsprozesses erfasst und als Grundlage für weitere Interventionen genutzt werden (Abbildung 5). Diese drei diagnostischen Dimensionen des CBAM werden im weiteren Verlauf näher betrachtet.

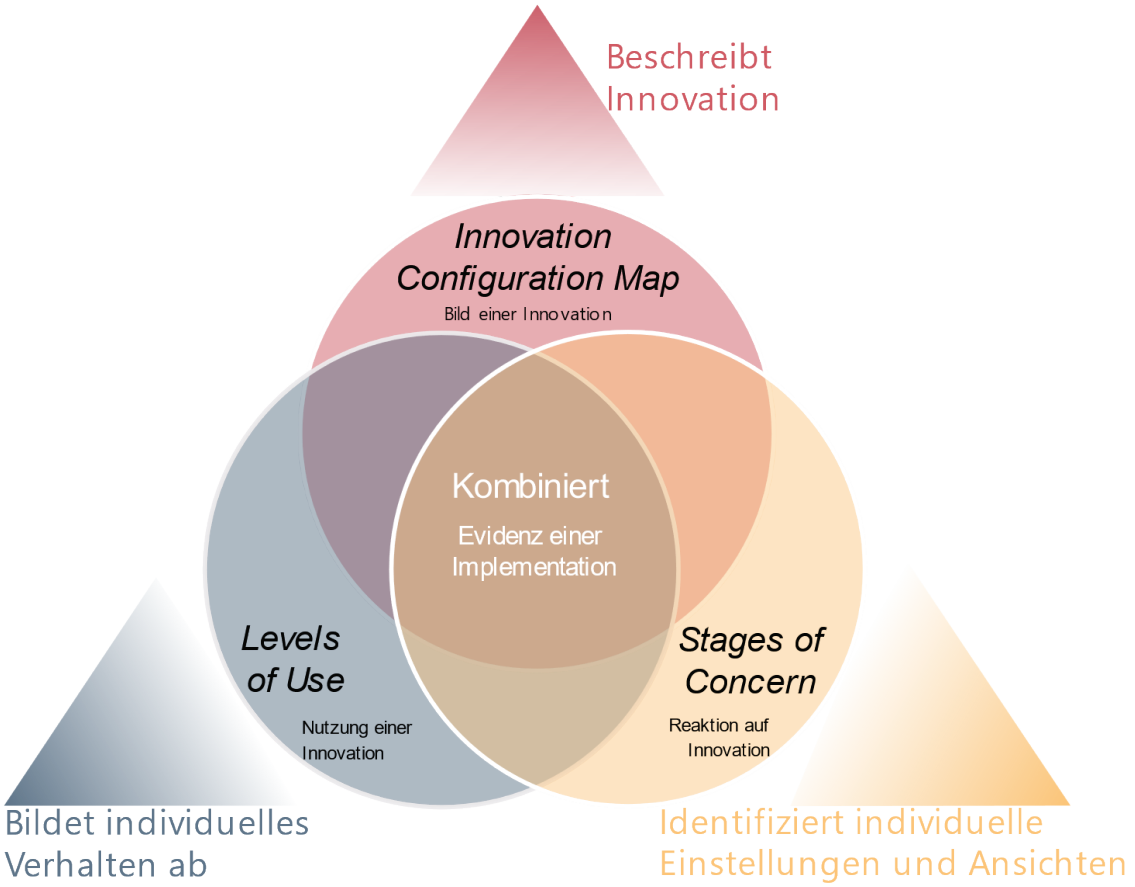


Abbildung 5: Die drei Konstrukte des Concerns-Based Adoption Model. Stages of Concern, Levels of Use und Innovation Configuration können gemeinsam ein holistisches Abbild des Implementationsprozesses darstellen. Abbildung verändert und übersetzt nach (Southwest Educational Development Laboratory, 2021).

Stages of Concern

Im Laufe der Auseinandersetzung mit einer Innovation entwickeln Einzelpersonen Fragestellungen, Probleme und Anliegen („*Concerns*“). Diese *Concerns* sind veränderlich. Dabei hängt deren Ausprägung vom jeweiligen Individuum, dessen Kenntnissen und Fähigkeiten sowie von der Phase der Implementation ab, in welcher sich das jeweilige Individuum befindet (Hord et al., 1987; Hord & Loucks, 1980). Weiterhin ist neben den Vorerfahrungen des Individuums in Bezug auf die anstehende Neuerung ebenfalls der Grad der Betroffenheit des Individuums ausschlaggebend (Hall et al., 1991). Eine Lehrperson zeigt tendenziell umso stärker ausgeprägte *Concerns* je direkter sie von einer Innovation betroffen ist. Dabei ist für das Maß der Ausprägung der *Concerns* nicht die reale Situation, sondern vielmehr die persönliche Wahrnehmung der Lehrperson entscheidend (Hall et al., 1991).

Die Art der *Concerns* wird als variabel im zeitlichen Verlauf des Innovationsprozesses betrachtet und daher als „*Stages of Concern“* bezeichnet (Hall et al., 1973, S. 13–15). Insgesamt wurden sieben *Stages of Concern* postuliert, deren Validität sowohl auf Proband:innen- als auch auf Gruppenebene empirisch belegt werden konnte (Hall et al., 1991). Eine mit einer Innovation konfrontierte Lehrperson wird nicht nur *Concerns* auf einer der sieben Stufen aufweisen, vielmehr lässt sich durch eine Erhebung der *Stages of Concern* ein Profil generieren, welches die Ausprägung der *Concerns* für jede Stufe zu einem bestimmten Zeitpunkt erfasst. Während zu Beginn einer Implementation personenbezogene *Self-related Concerns* überwiegen, werden im weiteren Verlauf zunächst die *Task-related Concerns* und letztlich mit fortschreitender Implementation *Impact-related Concerns* tendenziell stärker ausgeprägt sein (Hall & Loucks, 1978b). Somit ergibt sich nach Hall und Loucks über den zeitlichen Verlauf der Implementation betrachtet ein wellenförmiges Muster der *Stages of Concern*.

Eine Beschreibung der sieben *Stages of Concern* sowie typische Aussagen von Lehrpersonen mit maximaler Ausprägung in den jeweiligen *Stages* ist Tabelle 2 zu entnehmen. Die einzelnen *Stages of Concern* können den drei vorbezeichneten Kategorien zugeordnet werden: Die Stages 0 – *Awareness/Unconcerned*, 1 – *Informational* und 2 – *Personal* sind Bestandteil der Kategorie *Self-related concerns*; Stage 3 – *Management* stellt die *Task-related concerns* dar; die Stages 4 – *Consequence*, 5 – *Collaboration* und 6 – *Refocusing* repräsentieren *Impact-related concerns* (George et al., 2013; Hall et al., 1973).

Lehrpersonen im Implementationsprozess durchlaufen diese *Stages of Concern* in der Regel aufeinander aufbauend. Zunächst müssen hohe Ausprägungen der *Concerns* in den grundlegenden Stufen aufgelöst werden, bevor sich *Concerns* höherer Stufen ausbilden können (George et al., 2013). Die Intensität der jeweiligen Stufen ist dabei vom betreffenden Individuum abhängig und kann nicht als binär betrachtet werden. Aus diesem Grund ist eine Erfassung der *Stages of Concern* als Indikator zur Konzeption und

Steuerung geeigneter Interventionen eine Möglichkeit, den Implementationsprozess zu unterstützen. Die *Stages of Concern* können damit als diagnostisches Werkzeug herangezogen werden (George et al., 2013; Hall et al., 1973).

Zur Ausgestaltung der Interventionen in Abhängigkeit von den jeweils stärksten *Concerns* unterbreitet Hall (1979) konkrete Vorschläge (siehe hierzu auch Evans & Chauvin, 1993). Grundlegend steht dabei die zielgerichtete Kommunikation unter Berücksichtigung der zuvor identifizierten Bedürfnisse der betroffenen Lehrpersonen im Fokus. Eine ausführliche Darstellung und Diskussion der möglichen Interventionen erfolgt an dieser Stelle nicht, da für das Ziel der hier dargestellten Studie primär die Nutzung der *Stages of Concern* zur formativen Evaluation betrachtet wird. Eine zusammenfassende Darstellung von Interventionsmöglichkeiten findet sich bei Sieve (2015).

Im Verlauf der Forschung zum CBAM wurden mehrere Vorgehensweisen zur Erhebung der *Stages of Concern* erprobt. Die einfachste und empathischste Art ist das Führen einer informellen Konversation. Durch Einbindung von Leitfragen hinsichtlich der Nutzung der Innovation kann der *Change Facilitator* ein weniger förmliches als vielmehr an den Bedürfnissen der institutionellen Realität orientiertes Setting schaffen, in welchem die Befragten ihre Anliegen frei formulieren können (Hall & Loucks, 1978b). Letztlich entspricht diese Methode der Datenerhebung annähernd einem leitfadengestützten Interview, wobei der Fokus auf einem freien Redefluss liegt und die Leitfragen weniger prominent sein müssen. Hall und Loucks (1978b) weisen darauf hin, dass diese Methode weniger wissenschaftliche Stringenz aufweist als eine standardisierte Befragung, aber insbesondere für erfahrene Prozessbegleitende, die eng mit dem Implementationsprozess verbunden bleiben wollen, gut geeignet sein kann.

Tabelle 2: Beschreibung und Abgrenzung der sieben Stages of Concern (George et al., 2013; Hall et al., 1973; Hall, 1979; Hall et al., 1991; Hall & Loucks, 1978b). Eigene Übersetzung und Paraphrase. Zur besseren Einordnung der Stages ist jeweils ein mögliches Zitat einer Person in der entsprechenden Stage mit angegeben (vgl. hierzu Hall, 1979).

Stage 0 – Awareness / Unconcerned

Der künftige Nutzer zeigt wenig bis keine Beschäftigung mit der Innovation. Interesse an ähnlichen Innovationen oder gar kein Interesse in diesem Bereich können vorliegen. Ggf. ist sich der Nutzer der Existenz der Innovation gar nicht oder kaum bewusst.

- *„Ich weiß nichts über die Innovation und es kümmert mich nicht."*

Stage 1 – Informational

Allgemeines Interesse an der Innovation wird ohne Bezug zur eigenen Person bekundet. Dabei stehen die Eigenschaften der Innovation selbst im Fokus, etwa deren Voraussetzungen und Effekte.

- *„Ich bin an ähnlichen Dingen interessiert, aber ich weiß noch nicht genug darüber, um mir ein Urteil bilden zu können."*

Stage 2 – Personal

Die Innovation wird als Bedrohung wahrgenommen. Hohe Arbeits- oder private Belastung steigert die Ausprägung dieser Stufe. Fehlendes Selbstvertrauen oder bestehende Selbstzweifel bedingen eine hohe Ausprägung ebenfalls. Auswirkungen auf bestehende Strukturen der Organisation, Status und finanzielle Situation finden Eingang in die Betrachtung.

- *„Wie wird sich die Nutzung der Innovation auf mich auswirken?"*

Stage 3 – Management

Nutzende sind mit der Koordinierung, dem Zeitaufwand und der Logistik der Innovationsnutzung befasst. Diese Überlegungen treten meist nach der ersten Nutzung der Innovation ein.

- *„Es kommt mir vor, als würde ich meine ganze Zeit darauf verwenden, Materialien vorzubereiten."*

Stage 4 – Consequence

Direkte Auswirkungen der Innovation auf die Lernenden beschäftigen die Lehrpersonen. Die Relevanz der Innovation für die Lernenden, Evaluation und Optimierung der Ergebnisse der Lernenden stehen im Fokus.

- *„Wie beeinflusst meine Nutzung der Innovation meine Schüler:innen?"*

Stage 5 – Collaboration

Überlegungen zu Kooperationen mit anderen Lehrenden in Hinblick auf die Innovation stehen im Vordergrund. Diese Überlegungen werden hauptsächlich von Teamleitern angestellt.

- *„Ich würde meine Bemühungen gerne mit anderen abstimmen, um den Effekt der Innovation zu maximieren."*

Stage 6 – Refocusing

Alternativen zur bestehenden Innovation oder klare Ideen zu deren Anpassung bestehen. Die Lehrperson hat eine deutliche und klar formulierte Meinung zur Innovation.

- *„Ich habe Ideen, das auf eine andere Art zu machen, die noch besser funktionieren wird als die aktuelle Innovation."*

Eine etwas formellere Methode der Datenerhebung, die den Proband:innen dennoch Raum für eigene Ausführungen bietet, stellen offene schriftliche Ausführungen dar. Hierzu werden von den Befragten schriftliche Antworten auf die Frage „When you think about [the innovation], what are you concerned about?“ (Newlove & Hall, 1976, S. 1) eingeholt. Diese Freitextantworten werden anschließend durch den Abgleich mit der Beschreibung der sieben *Stages of Concern* diesen zugeordnet. Diese Methode bietet keine ausreichende wissenschaftliche Belastbarkeit für eine psychometrische Evaluation, bietet jedoch Einblicke in die Gedanken der Beteiligten und lässt eine schnelle Beurteilung des Nutzens einer Innovation zu (Newlove & Hall, 1976).

Als Standard zur Erhebung im Rahmen einer Evaluation hat sich der *Stages of Concern Questionnaire* etabliert. Nach ersten Entwicklungen (Hall et al., 1977) wurde dieses Instrument stetig weiterentwickelt und auf seine psychometrischen Kenndaten hin überprüft und optimiert. George et al. (2013) stellen einen historischen Abriss der Fragebogenentwicklung und dessen Validierung dar. Schlussendlich hat sich ein aus 35 Items bestehender Fragebogen mit siebenstufiger Likert-Skala sowie einer Option für nichtzutreffende Aussagen verstetigt (George et al., 2013). Eine validierte deutsche Version des Messinstruments ist Sachse et al. (2012) zu entnehmen. Zur Auswertung des *Stages of Concern* Fragebogeninstruments wird zunächst aus den fünf Items pro Stage ein Summenscore der Antwortoptionen (Skala 0-7) gebildet, welcher anschließend durch tabellierte Perzentilen ersetzt wird (George et al., 2013). Diese Perzentilen können dann personen- oder gruppenbezogen über die sieben *Stages* aufgetragen werden, woraus sich Profile ergeben, welche literaturbasiert mit bekannten Profilverläufen abgeglichen werden können (George et al., 2013). George et al. (2013) stellen eine idealtypische Entwicklung des Verlaufs der *Stages-of-Concern*-Profile eines Nutzers im zeitlichen Verlauf des Implementationsprozesses dar (Abbildung 6). Dabei überwiegen bei einem Nichtnutzer, also zu Beginn der Implementation die *Concerns* im Bereich der *Stages* 0 und 1 deutlich, über die übrigen *Stages* zeigt sich ein stetig sinkender Verlauf. Mit Fortschreiten des Implementationsprozesses rücken wellenartig andere Stages in den Vordergrund. So weisen unerfahrene Nutzende besonders hohe aufgabenbezogene *Concerns* (Stage 3) auf, welche sich mit zunehmender Erfahrung weiter in den Bereich der *Impact-related Concerns* (Stages 4-6) verschieben. Ein solcher hypothetischer Verlauf der Ausprägung der *Concerns* Nutzender ist lediglich prototypisch. In der konkreten Anwendungssituation müssen die real ermittelten Profile personen- oder gruppenbezogen analysiert und interpretiert werden. Hierzu können unter anderem Anzahl sowie relative und absolute Ausprägung der Peaks bezogen auf die einzelnen *Stages* näher betrachtet werden (George et al., 2013). Eine ausführliche Analyse am Beispiel der Profile der hier vorgestellten Studie erfolgt an späterer Stelle dieser Arbeit.

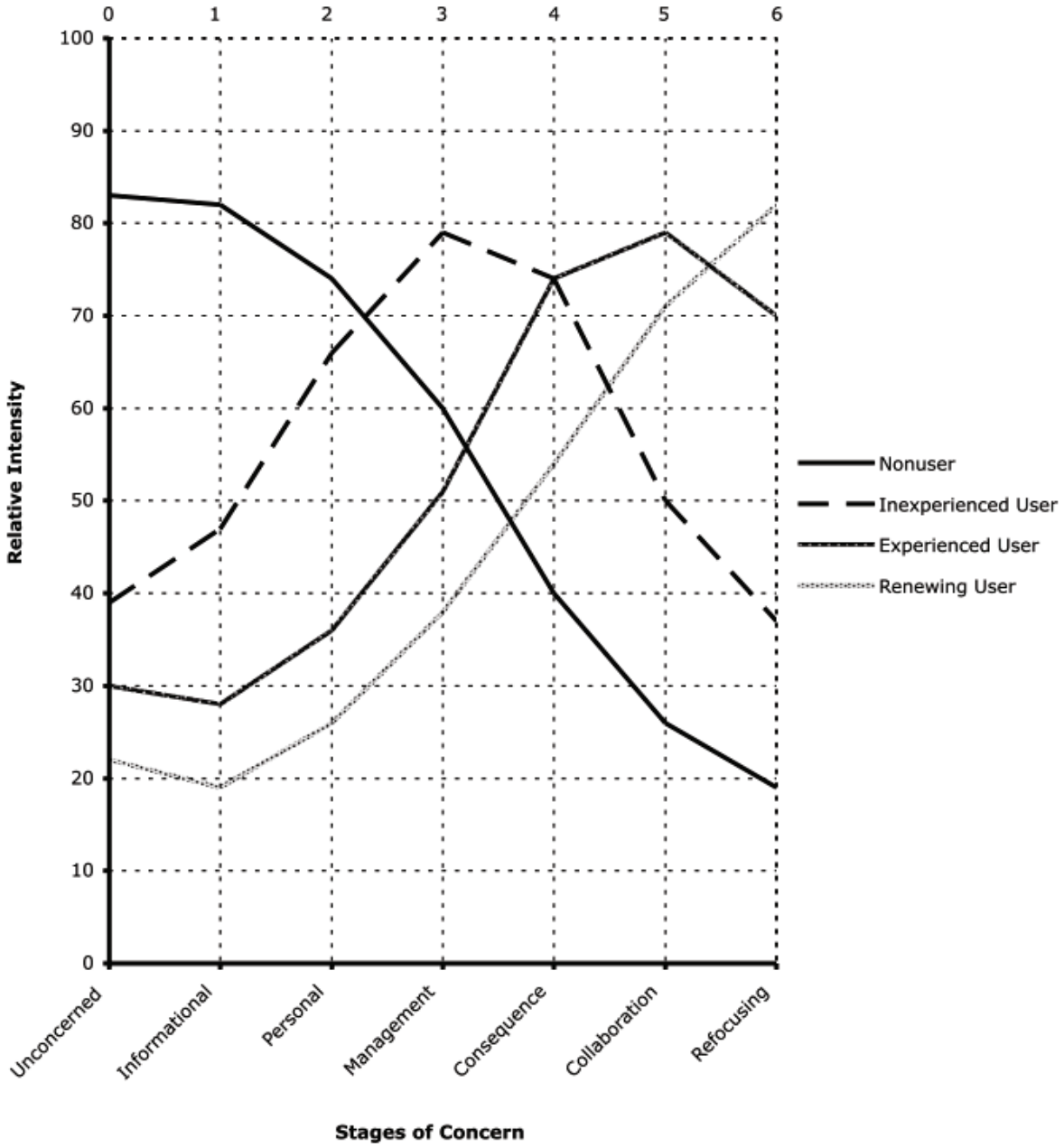


Abbildung 6: Verlauf der Stages of Concern Profile im zeitlichen Zusammenhang mit dem Implementationsprozess. Mit zunehmender Erfahrung der Nutzenden überwiegen concerns in den fortgeschritteneren Stages. Abbildung entnommen aus George et al. (2013, S. 36).

Levels of Use

Akteure zeigen unterschiedliche Nutzungsverhalten im Laufe des Implementationsprozesses, welche im CBAM als „*Levels of Use*“ erfasst werden. Sechs *Levels of Use* sowie ein Level, das die Nichtnutzung abbildet, werden unterschieden. Dabei werden für jedes Level die zwei Konzepte Wissen und Handlung erfasst (Hall et al., 1973). Eine Erweiterung dieser Dimension des CBAM unterscheidet, neben der Aufteilung des Levels 4 in zwei Unterlevel, einzelne Kategorien des Verhaltens. Dabei ermöglichen die sieben Kategorien (*Knowledge, Acquiring Information, Sharing, Assessing, Planning, Status Reporting* und *Performing*) innerhalb der nunmehr acht Levels of Use einen erhöhten Detailgrad der personenbezogenen Erfassung der Nutzung einer Innovation (Hall et al., 1975, S. 54–55). Sogenannte "*Extensity Profiles*" geben weiterhin einen Einblick in die gesamtinstitutionelle Nutzung einer Innovation. Gegenüber den personenbezogenen *Levels of Use* lassen sich so interpersonelle Unterschiede in der Nutzung und Übernahme der Innovation erfassen (Hall et al., 1973). *Stages of Concern* und *Levels of Use* gelten dabei als zwei verschiedene Aspekte desselben Innovationsprozesses. Anhand der Passung der beiden Konstrukte zueinander kann somit ein Bezug zu einem optimalen Innovationsprozess, in dessen Verlauf je eine Stufe der beiden Konstrukte einander zugeordnet sind, hergestellt werden (Hall et al., 1973). Aufgrund der selten optimalen Bedingungen institutioneller Realität wird eine gewisse Abweichung vom direkten Zusammenhang antizipiert. Üblicherweise sollen dabei die *Levels of Use* aufgrund ihrer Natur als Nutzungsindikator den *Stages of Concern* als Vorbehaltskomponente im Planungsprozess nacheilen (Hall et al., 1973). Nach Hall et al. (1973) soll der Transferprozess durch einen internen sowie einen externen *Adoption Agent* angeleitet und aktiv gestaltet werden. Dabei kommen dem externen (nicht der Institution zugehörigen) *Adoption Agent* die Rollen des Diagnostikers, Beraters, Planers, Datenerfassers sowie zahlreiche weitere zu. Der interne Adoption Agent unterstützt in diesen Bemühungen, verifiziert externe Diagnostik und lernt dabei sowohl die Innovation als auch deren Transferprozess fortlaufend besser kennen.

Die Frage, ab wann eine Innovation als implementiert gilt, wurde lange Zeit an eine entsprechende Aussage der Nutzergruppe oder der die Innovation bereitstellenden Personen gekoppelt (Hall & Loucks, 1981). Die Aussage zur Nutzung einer Innovation durch die Beteiligten ist jedoch nicht zwingend valide. Zur Klärung der tatsächlichen Umsetzung einer Innovation werden zwei Fragen als essenziell betrachtet: "Wird die Innovation genutzt? [Is it, the innovation, being used?]" und "Was ist die Innovation? [What is 'it'?]" (Hall & Loucks, 1981, S. 5). Die Frage danach, ob eine Innovation genutzt wird, verweist direkt auf die bereits erwähnten *Levels of Use*. Diese ermöglichen eine detaillierte Erfassung des Nutzungsgrades einer Innovation (Hall & Loucks, 1981).

Innovation Configuration

Die Frage, was denn genau unter der Innovation zu verstehen sei, bringt die konkrete Umsetzung der Innovation im spezifischen Setting in den Fokus. Diverse Auffassungen über die Innovation selbst, aber auch variierende institutionelle Rahmenbedingungen führen im Zuge der Implementation zu einer Anpassung der Innovation auf die spezifischen Anforderungen und Gegebenheiten (Hall & Loucks, 1981).

Um valide Aussagen über die tatsächliche Nutzung der Innovation treffen zu können, müssen die operationalen Formen der Innovation identifiziert und beschrieben werden (Hall & Loucks, 1981). Zur Erfassung dieser *Innovation Configuration* wird ein fünfschrittiges Vorgehen vorgestellt (Hall & Loucks, 1978a). Zunächst werden Entwickler einer Innovation und *Change Facilitators* nach den charakteristischen Bestandteilen der Innovation befragt. Anschließend wird eine kleine heterogene Stichprobe aus der Nutzergruppe hinsichtlich ihrer Nutzung der Innovation befragt und beobachtet. Es folgt die Erstellung von Interviewfragen auf Basis der Ergebnisse der ersten beiden Schritte. Dabei werden sowohl die als charakteristisch beschriebenen Eigenschaften, welche die Entwickler der Innovation zuschreiben, als auch die adaptierten Versionen auf Nutzendenseite berücksichtigt. Weiterhin wird der nicht-repräsentativen Stichprobe insofern Rechnung getragen, dass ein offenes Frageformat die Erfassung weiterer, bis hierhin nicht berücksichtigter Anpassungen der Innovation an die institutionelle Realität der Befragten, zulässt. Die Auswertung der Interviews erfolgt in reduzierter Form, indem eine Checkliste aus den Interviewfragen abgeleitet und für jede interviewte Person ausgefüllt wird (Hall & Loucks, 1978a). Letztlich lassen sich so dominante Muster der *Innovation Configuration* erfassen und darstellen.

In der Beschreibung einer Innovation kann zwischen ausschlaggebenden (*Critical Components*) und verbundenen (*Related Components*) Komponenten einer Innovation unterschieden werden. Dabei müssen die *Critical Components* zwingend vorhanden sein, um die Innovation in ihrem Kern abzubilden, während die *Related Components* von nachgeordneter Bedeutung für die Natur der Innovation sind (Hall & Loucks, 1978a). Im Zuge der Implementation einer Innovation erfährt nicht nur die Innovation eine Anpassung an die Zieldomäne, weiterhin kommt es auch zur Anpassung des Verhaltens der Nutzergruppe (Hall & Loucks, 1978a). Ausmaß und Kombination dieser beiden Variablen können diverse Formen annehmen. Dabei sind nicht alle Formen gleich nützlich für eine Implementation. Eine grafische Darstellung der Komponenten und deren Modifikationsgrad ermöglicht eine praktikable Übersicht über die tatsächlich angewandte Konfiguration der Innovation. Beispiele und eine Handreichung für die Erstellung einer solchen *Innovation Configuration Map* liefern Hall und George (2000).

Hall und Loucks (1978a) beschreiben den Prozess der Innovation als potenziell "traumatisch" (*Trauma of Innovation*). Dies kann nach Ansicht der Autoren reduziert werden, indem die Implementation schrittweise erfolgt. Allerdings ist hierzu möglicher-

weise eine weniger anspruchsvolle Konfiguration der ursprünglichen Innovation erforderlich, wodurch die eigentliche Innovation im Sinne des Entwicklers aufgeweicht werden könnte (Hall & Loucks, 1978a). Klar ersichtlich wird hier bereits die Forderung nach einer Begleitung und Betreuung des Implementationsprozesses.

Stand der Forschung zu *Stages of Concern* in Lehr-Lern-Settings

Mit Blick auf den Prozesscharakter einer Innovation und damit einhergehend die graduelle Veränderung der *Stages of Concern* existieren teils kontroverse Befunde aus der empirischen Praxis. Einige Beispiele seien hier kurz umrissen.

Shwartz et al. (2017) untersuchten die Entwicklung von Vorbehalten (*Concerns*) Lehrender gegenüber einer digitalen Innovation im Chemieunterricht im Zuge der Einführung einer technologiegestützten Lernumgebung. Hierzu wurden Lehrende im Mittel- und Oberschulbereich im Abstand von zehn Jahren sowohl mit Hilfe des *Stages of Concern Questionnaire* als auch mittels Interviews evaluiert (Shwartz et al., 2017). Eine Veränderung in den Profilen der *Stages of Concern* konnte dabei nachgewiesen werden. Insbesondere die Ausprägungen der einzelnen Stufen variierte im Vergleich über die beiden Testzeitpunkte. Die höchste Ausprägung zeigten bei Beginn der Implementation die Kollaborations-*Concerns* auf. Ebenfalls aufgedeckte hohe persönliche und Management-*Concerns* erscheinen gemäß der Theorie deutlich erwartungskonformer. Nach zehn Jahren der Implementation war die *Refocusing*-Domäne am stärksten ausgeprägt, jedoch waren auch hier noch – wenig theoriekonform – sehr hohe Ausprägungen der Stufen 0 und 1 erkennbar (Shwartz et al., 2017). Mit Blick auf die teils nicht theoriekonformen Ergebnisse dieser Studie ist festzuhalten, dass hier eine als sehr homogen beschriebene (C*onvenience*-) Stichprobe gezogen wurde, welche außerdem aus lediglich acht Lehrenden an höheren Schulen bestand. Darüber hinaus wurde keine kontinuierliche Befragung über den Implementationszeitraum vorgenommen, sodass die beiden Testzeitpunkte im Abstand von zehn Jahren lediglich die Aussagekraft einer Momentaufnahme haben (Shwartz et al., 2017). Jedoch konnten im Rahmen qualitativer Interviews Management-*Concerns*, insbesondere der Zeitaufwand zum Einsatz des neuen Konzeptes als vorrangiger Hinderungsgrund für dessen Nutzung und hauptsächlichen Vorbehalt der Lehrenden, ausgemacht werden (Shwartz et al., 2017). Folglich wurden auch vor dem theoretischen Hintergrund des CBAM meist anekdotisch wahrgenommene Vorbehalte Lehrender qualitativ empirisch belegt.

Die Entwicklung der *Concerns* im zeitlichen Verlauf konnte auch M. R. Malone (1984) in einer Studie mit 85 Lehramtsstudierenden nachweisen. Allerdings gelang es nicht, signifikant bessere Auswirkungen eines nach dem CBAM gestalteten Methodenkurses gegenüber einem herkömmlichen Kurs aufzuzeigen. Ausgehend von der Annahme, dass solche Kurse häufig die *Concerns* angehender Lehrpersonen nicht ausreichend

berücksichtigen, ist dies ein nicht erwartungskonformes Ergebnis, welches der Autor jedoch vorwiegend auf die kurze Dauer der Intervention von nur einem Semester zurückführt (M. R. Malone, 1984).

Ebenfalls konnte Newhouse (2001) nach der Einführung portabler Computer in einer ausgewählten Schule über einen Zeitraum von vier Jahren eine Verschiebung der zentralen *Concerns* der Lehrenden aufzeigen. Waren bei Abschluss der Einführung zunächst die *Concerns* in der *Awareness*-Stufe am stärksten ausgeprägt, so zeigten sich vier Jahre nach Abschluss der Implementation vorrangig persönliche und *Management-Concerns*. Dennoch blieb das ursprüngliche querschnittliche Profil der Lehrpersonen über diesen Zeitraum weitgehend erhalten. Trotz eines Stichprobenumfangs von 51 Lehrpersonen ist hier methodisch anzumerken, dass die Erhebung an lediglich einer Schule, welche darüber hinaus als reine Mädchenschule konzipiert ist, durchgeführt wurde. Folglich ist das Ergebnis hier nur bedingt generalisierbar (Newhouse, 2001).

Schneider & Bolte konnten im Rahmen einer Erhebung unter angehenden Lehrpersonen ebenfalls deren Vorbehalte mittels *Stages-of-Concern*-Fragebögen erheben. Wenngleich der inhaltliche Fokus hierbei auf forschendem Lernen als Unterrichtsmethode lag, so konnten dennoch sowohl das Profil des Kooperierers in Anlehnung an Bitan-Friedlander et al. (2004) als auch eine graduelle Entwicklung der Vorbehalte über mehrere Testzeitpunkte ermittelt werden (V. Schneider & Bolte, 2014).

Im Zuge einer Erhebung zur Implementation der Bildungsstandards konnten Pant et al. (2008) ausgehend vom zunächst deutlich abgrenzbaren Gruppenprofil des Kooperierers, welches durch den Einsatz des *Stages of Concern Questionnaire* ermittelt wurde, weitere Teilprofile empirisch mittels Clusteranalysen identifizieren. So beschreiben die Autoren die Clusterprofile der selbstorientierten Kooperierer, selbstorientierten Einzelkämpfer, informationssuchenden Kooperierer ohne Aufgabenfokus sowie die Minoritätenprofile der Nichtengagierten und der Alarmierten. Zu dieser Studie ist allerdings festzustellen, dass die Darstellung und Clusterung der Profile, insbesondere deren grafische Auftragung, nicht die Manual-konforme Darstellungsweise unter Verwendung der Perzentilen nutzt. Folglich wäre die Aussagekraft in Bezug auf die ursprüngliche Vorgehensweise nach George et al. (2013) und die daraus abgeleiteten typischen Profile kritisch zu prüfen (Pant et al., 2008).

Hollingshead konnte in einer groß angelegten Studie, welche sich inhaltlich mit der Charaktererziehung von Lernenden befasst, neben Personenprofilen auch *Stages-of-Concern*-Profile auf Schulebene auswerten und so gezielt Interventionen für die einzelnen Schulen ableiten (Hollingshead, 2009). So ergeben sich neben der empirischen Validierung des theoretischen Rahmens auch praktische Anwendungen desselben.

Dem entgegen stehen Untersuchungsergebnisse, welche keine oder nur geringfügige Veränderungen in der kognitiv-affektiven Auseinandersetzung der Lehrpersonen mit

einer Innovation darlegen. So begleiteten etwa Kelly und Staver (2005) die Implementation eines Programms für den naturwissenschaftlichen Unterricht an Primarschulen im mittleren Westen der USA. Bei 26 Lehrpersonen, welche zu drei Testzeitpunkten im Abstand von jeweils einem Jahr befragt wurden, konnte keine klare Veränderung im Profil der *Stages of Concern* identifiziert werden. Das anfänglich erhobene *Nonuser*-Profil blieb in seinen Grundzügen über den gesamten Erhebungszeitraum vorhanden, wenngleich die Ausprägungen der einzelnen Stufen leicht variierten (Kelly & Staver, 2005).

Im Rahmen einer Fallstudie mit fünf Lehramtsanwärter:innen konnten Eutsler und Long (2021) trotz einer fünfwöchigen Intervention mit dem Ziel des Einsatzes von *Virtual Reality* in der Unterrichtsplanung und -durchführung lediglich bei einer angehenden Lehrperson eine Verschiebung der Vorbehalte von persönlichen zu Management-*Concerns* feststellen (Eutsler & Long, 2021).

Faktorielle Struktur des Konstruktes und Dissonanzen

Mögliche Erklärungsansätze für diese Dissonanzen ergeben sich neben den teils angeführten methodischen Schwächen einiger Studien insbesondere aus den individuellen Persönlichkeitsmerkmalen und Attributen der Proband:innen. Allgemein sind darüber hinaus auch die inzwischen zahlreich verbreiteten Modifikationen und Übertragungen des *Stages of Concern Questionnaire* in diverse Sprachen und Kontexte als eine mögliche Hürde kongruenter Forschungsbefunde zu nennen. Weiterhin herrscht kein vollständiger Konsens über die faktorielle Struktur des *Concerns*-Konzepts.

Hinsichtlich der Faktoren, welche eine Ausprägung der einzelnen *Stages of Concern* beeinflussen, stellten Christou et al. (2004) im Rahmen einer Erhebung unter 655 Grundschullehrpersonen fest, dass die Dauer der Einbindung in die Implementation einer Innovation (*Years of Implementation*) nicht ausschlaggebend zu sein scheint. Demgegenüber konnten jedoch Auswirkungen der Lehrerfahrung auf die Profile der *Stages of Concern* festgestellt werden. Demnach zeigen vor allem sehr erfahrene Lehrpersonen (> 20 Jahre Lehrerfahrung) eine deutlich höhere Ausprägung der *Self-Concerns* als Berufseinsteiger:innen. Gerade Lehrpersonen mit geringem Erfahrungsschatz zeigten jedoch eine stärkere Fokussierung auf *Task-related Concerns*. Es ist anzumerken, dass diese Studie im fachlichen Kontext der Mathematik durchgeführt und dabei eine stark modifizierte Version des *Stages of Concern Questionnaire* eingesetzt wurde. Ebenso sind kulturelle und schulsystemische Einflüsse des Erhebungslandes (Zypern) nicht auszuschließen (Christou et al., 2004).

Laut Cheung et al. (2001) zeigt sich, dass die *Stages of Concern* auch als fünfstufiges Konstrukt konzeptualisiert werden können. Möglichen kultur- und innovationsspezifischen Eigenschaften der *Stages of Concern* sollte stets durch eine Betrachtung der

psychometrischen Kenndaten in der jeweiligen Studie Rechnung getragen werden (Cheung et al., 2001). Eine eher geringe Passung der modifizierten Variante des SoCQ nach Cheung et al. (2001) stellten dementgegen C. Fischer et al. (2019) in einer groß angelegten Studie zu einer Curriculumsreform fest. Aufgrund der Stichprobengröße und der immensen Tragweite des von ihnen betrachteten Innovationsprozesses stellten die Autoren die Eignung des modifizierten Fragebogens für solch groß angelegte Implementationsansätze jedoch selbst in Frage. Stattdessen verweisen die Autoren auf eine möglicherweise bessere Eignung und Validierung im kulturellen Kontext, welche das Original-Instrument nach George et al. (2013) aufweist. Eine solche Validierung ist für die Hong Kong Version des *Stages of Concern Questionnaire* (Cheung et al., 2001) nicht bekannt (C. Fischer et al., 2019).

Letztlich ist zu konstatieren, dass die einzelnen Subskalen des *Stages-of-Concern*-Fragebogens in diversen Studien mit mittlerem bis großem Stichprobenumfang akzeptable bis gute Reliabilitäten aufweisen, welche auch in verschiedenen Ländern geprüft wurden. Pant et al. (2008) bieten eine Übersicht über etliche dieser Studien sowie detaillierte statistische Kenndaten. Damit bleibt festzustellen, dass der *Stages-of-Concern*-Fragebogen weithin ein respektables und nahezu konkurrenzloses Instrument zur realitätsnahen Erhebung eines Implementationsfortschrittes darstellt. Gleichwohl bedarf es einer Betrachtung der statistischen Kenngrößen im jeweiligen Einzelfall, um die jeweiligen Auswertungen abzusichern.

2.3 Persönlichkeit: Lehrpersonen

Persönlichkeit: Lehrpersonen

Einstellung gegenüber digitalen Medien

- Einstellung wird operationalisiert als Einstellung gegenüber einem Verhalten, nicht gegenüber Personen / Gegenständen.
- Einstellung ist ein Prädiktor für Mediennutzung im Unterricht.
- Einstellung gegenüber Mediennutzung im Unterricht ist mäßig ausgeprägt.
- Einstellung ist ein stabiles Konstrukt.
- Einstellung kann durch gezieltes Training gefördert werden.

Selbstkonzept im Umgang mit digitalen Medien

- Selbstkonzept ist ein mentales Modell einer Person über ihre Fähigkeiten und Eigenschaften.
- Selbstkonzept wird vorrangig aus rückbezüglichen Kompetenzerfahrungen generiert.
- Selbstkonzept liefert eine generelle Einschätzung der Fähigkeiten und ist daher nicht situativ.
- Selbstkonzept ist stark vom sozialen Referenzrahmen abhängig (Fischteich-Effekt).
- Zu Selbstkonzept im Bereich digitale Medien und Unterricht sind wenige Untersuchungen bekannt.

Wertzuschreibung gegenüber digitalen Endgeräten

- Wertzuschreibung bildet sich unter anderem aus Erwartungen an sich selbst aus.
- Wertzuschreibung liegt ein Erwartungs-Wert-Modell zugrunde.
- Wertzuschreibung beeinflusst die Wahl von Optionen.
- Die Wertzuschreibung an digitale Endgeräte durch Lehrpersonen ist eher gering.
- Der Wert digitaler Endgeräte wird häufig lediglich als „Werkzeug“ erfasst.

„Eine Entwicklungsmaßnahme ist dann attraktiv, wenn sie

- Einen relativen Vorteil gegenüber der bisherigen Situation bietet,
- Mit eigenen Werten kompatibel ist,
- eine beherrschbare Komplexität aufweist
- […]“

(Jäger, 2004, S. 120)

Ausgehend von dieser Prämisse werden im nachstehenden Kapitel die Persönlichkeitsfaktoren Einstellung gegenüber digitalen Medien, Selbstkonzept im Umgang mit digitalen Medien sowie die Wertzuschreibung gegenüber digitalen Endgeräten mit Bezug zu Lehrpersonen näher betrachtet.

Einstellung gegenüber digitalen Medien

Unstrittig stellt die Einstellung von Lehrpersonen gegenüber dem Einsatz digitaler Medien im Unterricht eine bedeutsame Prädiktorvariable dar (Drossel et al., 2019). Die Dynamik des SARS-CoV-2-Pandemiegeschehens machte im Jahr 2020 an Schulen im gesamten Bundesgebiet eine *ad-hoc*-Digitalisierung des Unterrichtsgeschehens erforderlich. Zwei Jahre zuvor konnten gerade einmal 34,7% der befragten Lehrpersonen eine positive Einstellung gegenüber dem lernförderlichen Einsatz digitaler Medien im Unterricht aufweisen (Eickelmann, Bos et al., 2019). Selbst nach dem über Monate hinweg erzwungenen Lehren im digitalen Raum, weisen nur 46,4% der befragten Lehrpersonen laut Länderindikator 2021 eine positive Einstellung gegenüber digitalen Medien als lernförderlichen Werkzeugen auf (Lorenz et al., 2021). Im Vergleich zum Länderindikator 2017 (53,6%; Lorenz, Bos et al., 2017) stellt dies eine signifikante Verschlechterung der Einstellung gegenüber digitalen Medien dar. Im Folgenden werden die theoretischen Hintergründe sowie die aktuelle Studienlage zur Einordnung dieser Aussagen näher erläutert.

Operationalisierung der Einstellung

Ajzen (1987) beschreibt in der Theorie des geplanten Verhaltens die Intention einer Person, ein bestimmtes Verhalten zu zeigen als den zentralen determinierenden Faktor des tatsächlichen Verhaltens. Intentionen stellen dabei noch kein reales Verhalten dar, sondern bilden lediglich die Disposition eines geplanten Verhaltens ab. Ergibt sich die Gelegenheit zur Umsetzung einer solchen Verhaltensintention, wird diese sehr wahrscheinlich in beobachtbares Verhalten umgesetzt (Ajzen, 1987). Erwähnenswert ist, dass im Sinne dieser Theorie allgemeine Einstellungen und Persönlichkeitsmerkmale keine direkte Auswirkung auf die Intentionen und damit das geplante Verhalten zeigen. Als unmittelbare Verhaltensprädiktoren sind diese nach Ajzen (1987) zu allgemein, um tatsächlich wirksam zu werden. Vielmehr werden diese als Einflussfaktoren auf die drei Konstrukte der Theorie verstanden, welche letztlich die Performanz des gezeigten Verhaltens beeinflussen können. Als Prädiktoren der Intention werden drei Konstrukte beschrieben: 1) *Attitude*, 2) *Subjective Norm* und 3) *Perceived Behavioral Control* (Ajzen, 1987).

Die Einstellung (*Attitude*) wird dabei als Einstellung gegenüber einem bestimmten Verhalten, nicht als Einstellung gegenüber Personen, Objekten oder Institutionen verstanden (Ajzen, 1985). Ajzen beschreibt das Konstrukt der Einstellung gegenüber dem Verhalten daher als „[…] degree to which the person has a favorable or unfavorable evaluation of the behavior in question“ (Ajzen, 1987, S. 44). Wenngleich die explizite Unterscheidung zwischen Einstellungen gegenüber Verhaltensweisen und Einstellungen gegenüber Personen oder Objekten betont wird, so bezieht sich diese Definition dennoch auf eine ursprünglich der Einstellung gegenüber Objekten zugeordneten

Beschreibung des „*Attitude*"-Begriffs: „ attitude may be conceptualized as the amount of affect for or against some object" (Fishbein & Ajzen, 1975, S. 11). Mit verstärktem Fokus auf die Persönlichkeit kann Einstellung damit wie folgt definiert werden: Einstellung ist das Maß an Emotion für oder wider ein Verhalten.

Einstellungen resultieren aus der Evaluation der möglichen Ergebnisse des Verhaltens (S*alient Beliefs*). Sowohl der erfolgreiche als auch der erfolglose Versuch, ein bestimmtes Verhalten zu zeigen, werden hierzu anhand ihrer möglichen Konsequenzen bewertet. Eine Gewichtung der beiden möglichen Ergebnisse erfolgt über deren erwartete Eintrittswahrscheinlichkeit (Ajzen, 1985). Nachfolgend werden die drei Kategorien der *Beliefs* näher beschrieben.

Die Reaktion von Bezugspersonen auf einen möglichen (Miss-)Erfolg beeinflusst die Einstellung eines Individuums hinsichtlich des Verhaltens, was ein Beispiel für *Behavioral Beliefs* darstellt, welche der Einstellung zugrunde liegen (Ajzen, 1987). Die *Behavioral Beliefs* verbinden somit das Verhalten mit möglichen Ergebnissen oder Aufwendungen, die dieses Verhalten mit sich bringt oder erfordert (Ajzen, 1987).

Erwarteter Erfolg oder Misserfolg eines Verhaltens nimmt in der Betrachtung der normativen *Beliefs* einer Person eine untergeordnete Rolle ein (Ajzen, 1985). Resultierend aus den normativen *Beliefs* wird in der *Subjective Norm* die Befürwortung der Verhaltensausübung durch Bezugspersonen und damit auch die soziale Erwünschtheit beziehungsweise der soziale Druck, das jeweilige Verhalten zu zeigen, abgebildet (Ajzen, 1987, 1991). Ausschlaggebend für die Befürwortung der Verhaltensausübung durch Bezugspersonen ist hier die Befürwortung des jeweiligen Verhaltens sowie die durch die Bezugspersonen eingeschätzte Aussicht auf einen Erfolg in der Verhaltensausübung (Ajzen, 1985).

Perceived Behavioral Control baut auf *Control Beliefs* hinsichtlich vorhandener und erforderlicher Ressourcen und Möglichkeiten auf (Ajzen, 1987). Je weniger Hindernisse einer Verhaltensausübung eine Person wahrnimmt, und je mehr Ressourcen ihr dafür zur Verfügung stehen, umso größer wird die *Perceived Behavioral Control*. In diese Einschätzung der Schwierigkeit, ein bestimmtes Verhalten zu zeigen, fließen sowohl eigene Vorerfahrungen der Person in Bezug auf das betreffende Verhalten als auch Erfahrungen von Bezugspersonen und weitere Informationen über das Verhalten mit ein (Ajzen, 1987). Weiterhin beeinflussen auch das Vertrauen in die eigene Einschätzung der Schwierigkeit, eine detaillierte Planung des auszuübenden Verhaltens und das allgemeine Wissen über sich selbst die wahrgenommene Kontrolle über das entsprechende Verhalten (Ajzen, 1985). Ajzen (1991) legt die direkte Verbindung der Komponente *Perceived Behavioral Control* zum tatsächlich gezeigten Verhalten im Modell dar: Zum einen ist bei konstanter Intention einer Verhaltensausübung die eingebrachte Anstrengung hierfür ausschlaggebend. Zum zweiten kann das Maß der wahrgenommenen Kontrolle über ein bestimmtes Verhalten (*Perceived Behavioral Control*) der

tatsächlichen Kontrolle über das Verhalten (*Actual Control*) entsprechen. Dieser Bezug wird lediglich dann geschmälert, wenn sehr wenige Informationen über das betreffende Verhalten vorliegen, oder wenn sich die Bedingungen, Gegebenheiten und Umstände geändert haben (Ajzen, 1991).

Intention und Verhalten werden somit letztlich als Funktion von *Behavioral*, *Normative* und *Control Beliefs* verstanden, wobei nicht alle Überzeugungen (*Beliefs*) einer Person als relevant für das Verhalten angesehen werden, sondern lediglich diejenigen, welcher sich eine Person in einem bestimmten Moment tatsächlich annehmen kann (Ajzen, 1991). Dieser Teil der Gesamtheit der Überzeugungen hinsichtlich eines bestimmten Verhaltens wird von Ajzen (1991) als *Salient Beliefs* (hervorstechende Überzeugungen) bezeichnet. Beeinflusst werden die *Beliefs* einer Person unter anderem durch Feedback-Effekte. Die tatsächliche Ausübung eines Verhaltens durch die Person selbst oder die Beobachtung der Verhaltensausübung von Bezugspersonen formt damit die eigene Attribution des Verhaltens, was zu rekursiven Effekten führt (Ajzen, 2020).

Godin et al. (1993) konnten den Habitus, also die Gewohnheiten einer Person, insbesondere in Bezug auf körperliche Ertüchtigung als den bedeutendsten Prädiktor des Verhaltens identifizieren und in das Modell des geplanten Verhaltens integrieren. Kommer und Biermann (2012) übertragen dies auf den Einsatz digitaler Medien und betrachten in diesem Zusammenhang die Gewohnheiten und die Sozialisierung, in ihren Worten den Habitus im Sinne Bourdieus, als ausschlaggebend für die Mediennutzung. Ajzen (2011) sieht in der Gewohnheit den Ausdruck einer zeitlichen Stabilität der Verhaltensintentionen des Individuums. Weiterhin postuliert er auch, dass nicht die reine Gewohnheit *per se*, sondern vielmehr die aus vorherigen Verhaltensausübungen resultierenden Erfahrungen ausschlaggebend seien. So könnten Erfolge in der Vergangenheit etwa zu einer positiv wahrgenommenen Verhaltenskontrolle geführt haben, welche die erneute Ausübung dieses Verhaltens positiv beeinflussen kann.

Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit wird das hier dargelegte Verständnis des Konstruktes der Einstellung gegenüber einem Verhalten auf das spezifische Verhalten der Nutzung digitaler Endgeräte angewandt. Ausgangspunkt für die weiteren theoretischen Überlegungen stellt jeweils das Modell geplanten Verhaltens dar.

Einstellungen gegenüber Technologie im Unterricht

Einstellung gegenüber Technologie ist einer der wichtigsten Prädiktoren für die Einstellung zu unterrichtlicher Nutzung von Computern (Celik & Yesilyurt, 2013; Petko, 2012). Die Einstellung gegenüber digitalen Medien spiegelt sich auch im beobachtbaren Verhalten wider. So zeigen sich aktive Nutzende dem Computer gegenüber als offener, wohingegen Meidende eine eher zurückhaltende Einstellung erkennen lassen. Mit Bezug zum Modell des geplanten Verhaltens ist festzuhalten, dass der Zusammenhang von

Einstellung und gezeigtem Verhalten für diese Domäne auch statistisch abgesichert werden konnte, jedoch ohne die expliziten Pfade und Zwischenstufen zu berücksichtigen (Pietzner, 2009).

Die Einstellungen von Lehrpersonen gegenüber Computern beziehungsweise digitalen Medien im Unterricht im Allgemeinen lassen sich empirisch klar von den Einstellungen zur Nutzung von Computern beziehungsweise digitalen Medien im Chemieunterricht abgrenzen (Krause & Eilks, 2015). Folglich muss hinsichtlich der Einstellung gegenüber digitalen Medien zwischen der fachspezifischen Nutzung im didaktischen Kontext und der allgemeinen Einstellung gegenüber diesen Werkzeugen differenziert werden. Die Einstellung von Lehrpersonen gegenüber dem unterrichtlichen Einsatz digitaler Medien gilt als eine maßgebliche Voraussetzung für deren tatsächliche schulische Nutzung (Drossel et al., 2019). Dabei sind die allgemeinen Einstellungen Lehramtsstudierender gegenüber Informations- und Kommunikationstechnologien im Verlauf des Studiums stabil. Mit Blick auf die fachspezifischen Einstellungen gegenüber der unterrichtlichen Nutzung dieser Technologien ist diese Stabilität jedoch nicht gegeben. Hier zeigt sich im Verlauf des Studiums eine positive Entwicklung der Einstellungskomponente (Krause et al., 2017). Krause et al. (2014) konnten diese Beobachtung auch für die zweite Phase der Lehrer:innenbildung absichern.

Implikationen für die Schule

Diese Befunde und die resultierenden Schlussfolgerungen decken sich teilweise mit der Feststellung von Shashaani (1997), wonach gezieltes Training die Einstellung gegenüber Computern verbessern kann. Erfolgt während der Lehrer:innenbildung dieses Training vorrangig mit klarem Bezug zum unterrichtlichen Setting, so ist anzunehmen, dass hier insbesondere der didaktische Einsatz der digitalen Medien fokussiert und damit die Einstellung in diesem Bereich adressiert wird. Weiterhin lässt diese Feststellung den Schluss zu, dass bei ausbleibender Veränderung der allgemeinen Einstellung eine gezielte Intervention ursächlich für die Steigerung der Einstellung im fachlichen Kontext sein muss. Diese Intervention ist logisch gefolgert in der Lehrer:innenbildung selbst zu vermuten.

So kamen Krause et al. (2014) in einer Studie mit 239 Proband:innen zu dem Ergebnis, dass fachdidaktische Seminare zum Einsatz von Computern und digitalen Medien die Einstellung entsprechend positiv für eine spätere Nutzung dieser Medien im eigenen Chemieunterricht der angehenden Lehrpersonen prägen können. In einer Prä-post-Studie konnten Dori und Barnea (1994) ebenfalls eine positive Veränderung der Einstellung von Lehrpersonen gegenüber dem Einsatz von Computern im Chemieunterricht feststellen. Dabei scheint die jeweilige Konzeption der Interventionen im Detail maßgeblich für die Auswirkungen auf allgemeine und fachspezifische Einstellung zu sein.

So konnten in Studien auch Auswirkungen sowohl auf die allgemeine Einstellung gegenüber digitalen Medien im Unterricht als auch die fachspezifischen Einstellungen gegenüber digitalen Medien im Chemieunterricht mittels einer gezielten Intervention durch ein entsprechendes Seminar statistisch signifikant positiv beeinflusst werden (Krause & Eilks, 2015, 2018).

Als praxisrelevante Essenz bleibt für die (Lehrer:innen-)Bildung festzustellen, dass allgemeine und fachdidaktische Seminare zum Medieneinsatz im Unterricht die Entwicklung einer positiven Einstellung gegenüber digitalen Medien im (Fach-) Unterricht unterstützen (Krause et al., 2017). Ausgehend von Ergebnissen einer Erhebung unter Physiklehrenden lassen sich zur Planung zielgerichteter Interventionsmaßnahmen in der dritten Phase der Lehrer:innenbildung Cluster nach Ausprägung der Einstellung gegenüber dem Einsatz von Computern im Fachunterricht heranziehen (Wenzel & Wilhelm, 2016).

Erfahrung im Umgang mit Computern und die Einstellung gegenüber der Technologie wurden als bedeutendste Prädiktoren des Einsatzes von Computern im Unterricht identifiziert (Mueller et al., 2008). Dieses Ergebnis ist in Bezug auf die Vorerfahrungen der Lehrenden aus theoretischer Sicht wenig verwunderlich. Gemäß der Theorie des geplanten Verhaltens fließen Vorerfahrungen als rekursive Effekte mit in die Ausbildung einer Einstellung ein, sodass die beiden Prädiktoren auf Konstruktebene eng miteinander verwoben sind. Zusammen mit der Zugänglichkeit der Technologie und der IT-Kompetenz von Lehrpersonen erklären Einstellungen der Lehrperson dabei über 90% der Varianz des Computereinsatzes im Unterricht (Eickelmann, 2011). Lehramtsstudierende der Naturwissenschaften weisen hier generell eine hohe positive Einstellung gegenüber dem Lernen mit digitalen Medien auf (Vogelsang et al., 2019).

Selbstkonzept im Umgang mit digitalen Medien

Neben der Einstellung stellt das Selbstkonzept von Lehrpersonen im Umgang mit digitalen Medien eine bedeutende Gelingensbedingung für digitale Lehre dar. Die hierzu erforderliche Operationalisierung sowie aktuelle Erkenntnisse hinsichtlich des Selbstkonzeptes im Kontext Bildungsforschung und Digitalisierung werden nachfolgend näher ausgeführt.

Operationalisierung des Selbstkonzepts

Der Begriff des *Self-Concept* findet bereits bei C. R. Rogers (1959) Anwendung auf die Sichtweise einer Person auf sich selbst. Die eigene Wahrnehmung eines Individuums grenzt sich damit sowohl zum realen Selbst (*Self*) als auch zur Wahrnehmung des Selbsts eines Individuums ausgehend von einem externen Referenzrahmen (*Self-*

Structure) ab. Erfahrungswerte (*Self-Experience*) stellen dabei die Grundlage dar, ausgehend von welcher das Selbstkonzept einer Person geformt wird. Das *Self-Ideal* repräsentiert den Wunschzustand, also das Selbstkonzept, welchem ein Individuum den höchsten Wert beimisst oder das Selbstkonzept, welches es am ehesten selbst besitzen möchte (C. R. Rogers, 1959).

Die mit fortschreitender Forschung überarbeitete und präzisierte Definition des Selbstkonzepts unterscheidet sich von den frühen Definitionen nur geringfügig. Unter »Selbstkonzept« (engl. *Self-Concept*) versteht man das mentale Modell einer Person über ihre Fähigkeiten und Eigenschaften (Moschner & Dickhäuser, 2018). Möller & Trautwein konkretisieren diese Definition und stellen dabei die Unterscheidung zwischen Performanz und latenter Leistungsfähigkeit heraus. Während der Begriff des Fähigkeitsselbstkonzeptes den Fokus auf den eigenen wahrgenommenen Leistungsstand (Performanz) legt, betont die Bezeichnung des Selbstkonzepts der Begabung stärker die latenten Veranlagungen einer Person und berücksichtigt damit auch potenzielle Leistungen (Möller & Trautwein, 2015). Die Begrifflichkeiten des Fähigkeitsselbstkonzeptes und des Selbstkonzeptes eigener Begabung sind empirisch und inhaltlich stark überlappend und kaum trennscharf zu betrachten (Möller & Trautwein, 2015). Das Selbstkonzept wird als veränderliche, konfigurative Gestalt beschrieben, welche bereits durch geringfügige Veränderungen einzelner Bestandteile gänzlich variieren kann (C. R. Rogers, 1959). In der vorliegenden Arbeit findet für die weiteren Betrachtungen das spezifische Selbstkonzept eigener Begabung in Bezug auf digitale Medien nach Dickhäuser (2001) Anwendung. Dieses ist definiert als die Beurteilung einer Person hinsichtlich ihrer eigenen Fähigkeiten in Bezug auf digitale Medien.

Nach Shavelson et al. (1976) wird das Konstrukt des Selbstkonzepts anhand von sieben Merkmalen konzeptualisiert. Demnach ist das Selbstkonzept strukturiert, facettenreich, hierarchisch, stabil, entwicklungsorientiert, evaluativ und differenzierbar. Diese Facetten werden im weiteren Verlauf zusammenfassend beleuchtet.

1) Selbstkonzept ist strukturiert
Erfahrungen stellen die Datengrundlage für die eigene Wahrnehmung eines Individuums dar. Zur Reduzierung der Komplexität der Vielzahl an Erfahrungen bildet das Individuum Kategorien, welchen Erfahrungen zugeordnet werden (Shavelson et al., 1976).

2) Selbstkonzept ist facettenreich
Die durch ein Individuum gebildeten Kategorien (z. B. Schule, Sozialleben, physische Attraktivität etc.) stellen die Grundlage für die Strukturiertheit des Selbstkonzepts dar. Kategorien können ebenso innerhalb einer Gruppe übereinstimmend wahrgenommen und geteilt werden (Shavelson et al., 1976).

3) Selbstkonzept ist hierarchisch

Ausgehend von individuellen Erfahrungen in spezifischen Situationen kann eine Hierarchie bis hin zum allgemeinen Selbstkonzept ausdifferenziert werden. Indem einzelne Erfahrungen zu Kategorien gebündelt und diese wiederum als Subfacetten des allgemeinen Selbstkonzeptes betrachtet werden, bildet sich so eine mehrstufige Hierarchie aus. Üblicherweise wird zunächst nach akademischem und nicht-akademischem Selbstkonzept unterschieden. Das akademische Selbstkonzept kann dann etwa anhand der Schulfächer und auf der nächsten Ebene durch Teilbereiche der einzelnen Fächer weiter aufgetrennt werden. Das nicht-akademische Selbstkonzept lässt sich in soziales und physisches Selbstkonzept und ausgehend von diesen beiden Facetten weiter in Teilbereiche einordnen. Die Übereinstimmung der Einschätzung des Selbstkonzepts einer Person durch einen externen Beobachter mit der Selbsteinschätzung nimmt von der Basis hin zur Spitze der Hierarchie stetig ab. Je feiner die Untergliederung, also je situativer die jeweilige Erfahrung und Wahrnehmung des Individuums sind, desto geringer fallen die Diskrepanzen zwischen Selbst- und Fremdwahrnehmung des Selbstkonzeptes aus (Shavelson et al., 1976).

4) Selbstkonzept ist stabil

Die Stabilität des Konstruktes Selbstkonzept nimmt von der Spitze der Hierarchie hin zur Basis ab. Während das allgemeine Selbstkonzept stabil ist, werden die eigenen Wahrnehmungen mit absteigender Hierarchiestufe stetig situativer. Entsprechend kann das Selbstkonzept eines Individuums in einzelnen Situationen stark variieren. Konzeptualisierungen auf höherer Hierarchieebene wirken dämpfend, sodass trotz stark situationsspezifischer Wahrnehmung der eigenen Fähigkeiten und Begabungen nicht stets das allgemeine Selbstkonzept erschüttert wird. Um eine Veränderung des allgemeinen Selbstkonzepts zu bewirken, wären daher zahlreiche spezifische Erfahrungen notwendig, welche nicht mit dem allgemeinen Selbstkonzept in Einklang gebracht werden können. Erst dann könnte die Dämpfung der Subfacetten des allgemeinen Selbstkonzeptes überwunden und dieses nachhaltig verändert werden (Shavelson et al., 1976). In einer späteren Veröffentlichung konnte die hierarchisch zunehmende Stabilität des Selbstkonzeptes nicht nachgewiesen werden. Die Autoren führen dies auf eine fehlende Erfassung der niedrigsten Hierarchiestufen oder eine zu geringe Beobachtungsdauer zurück (Shavelson & Bolus, 1982). Auch in den Subfacetten konnte eine hierarchische Stabilitätsveränderung nicht belegt werden; vielmehr zeigte sich eine ähnliche Stabilität des allgemeinen akademischen Selbstkonzeptes im Vergleich mit dem fächerspezifischen Selbstkonzept (Shavelson & Bolus, 1982).

5) Selbstkonzept entwickelt sich

Im Laufe der kindlichen Entwicklung verändert sich die Sicht auf die Welt. Erst mit zunehmender konzeptioneller Abgrenzung des Individuums von seiner Umwelt im Laufe der Entwicklung, sowie mit zunehmendem Erfahrungsschatz und Alter bildet

sich ein strukturiertes, facettenreiches Selbstkonzept aus. Unterstützt wird dieser Prozess durch die zunehmende Fähigkeit der verbalen Bezeichnung von Konzepten (Shavelson et al., 1976).

6) Selbstkonzept ist evaluativ
Ein Individuum entwickelt einerseits eine Beschreibung seines Selbst in einer spezifischen Situation. Andererseits ergänzt das Individuum darüber hinaus eine Evaluation seines Selbst in der spezifischen Situation. Diese Evaluation kann relativ, also beispielsweise gegenüber Bezugspersonen, oder absolut, also gegenüber einem Idealbild als Bezugsnorm, erfolgen. Personen- und situationsabhängig kann die Bedeutung der jeweiligen Evaluation für das jeweilige Individuum variieren. Die Gewichtung ergibt sich dabei am ehesten aus dem soziokulturellen Erfahrungsschatz der jeweiligen Person (Shavelson et al., 1976).

7) Selbstkonzept ist differenzierbar
Auf Konstruktebene zeigt das Selbstkonzept Bezüge zu anderen Konstrukten. Allerdings ist es ebenso klar von diesen abgrenzbar. Je enger das Selbstkonzept mit spezifischen Situationen verwoben ist, umso stärker ist die Verbindung zwischen Selbstkonzept und Verhalten in der spezifischen Situation. Dies ergibt sich aus der situativen Abhängigkeit des Selbstkonzepts und legt dessen Differenzierbarkeit gegenüber anderen Konstrukten dar (Shavelson et al., 1976).

Die Bedeutung des Selbstkonzepts ergibt sich aus dessen Wirksamkeit. Bewertet ein Individuum seine eigene Leistungsfähigkeit positiv, so kann sich dies auch positiv auf die tatsächlich gezeigte Leistung auswirken (Marsh & Craven, 2006; Wild & Möller, 2015). Insofern ist zu konstatieren, dass das Selbstkonzept gleichermaßen ein Resultat wie auch eine Mediatorvariable für weitere Konstrukte darstellt (Marsh & Hattie, 1996). Neben der kausalen Reziprozität von Selbstkonzept und (schulischer) Leistung zeigte sich, dass das fächerspezifische Selbstkonzept als stärkster Prädiktor für die Leistung anzusehen ist. Generelles und allgemeines akademisches Selbstkonzept weisen eine geringere Korrelation mit der schulischen Leistung auf (Shavelson & Bolus, 1982). Dieses Ergebnis ist sowohl theoriekonform als auch einleuchtend. Folglich wirkt sich ein höheres Selbstkonzept beispielsweise im Fach Chemie stärker auf die tatsächliche Leistung aus als das allgemeine akademische oder generelle Selbstkonzept einer Person. Die Selbstwahrnehmung "Ich bin gut in Chemie" ist somit eher ursächlich mit der Leistung verknüpft als die Selbstwahrnehmung "Ich bin gut in der Schule" oder ein allgemein positives Selbstbild. Gleichermaßen wirken sich real erbrachte Leistungen sodann wiederum auf das fächerspezifische Selbstkonzept aus und können eine – vorzugsweise positive – selbstverstärkende Kausalkette initiieren. Dabei ergeben sich trotz gegenseit-

iger Abhängigkeiten der Konstrukte klare Hinweise auf eine „[...] causal predominance of self-concept over achievement“ (Shavelson & Bolus, 1982, S. 16).

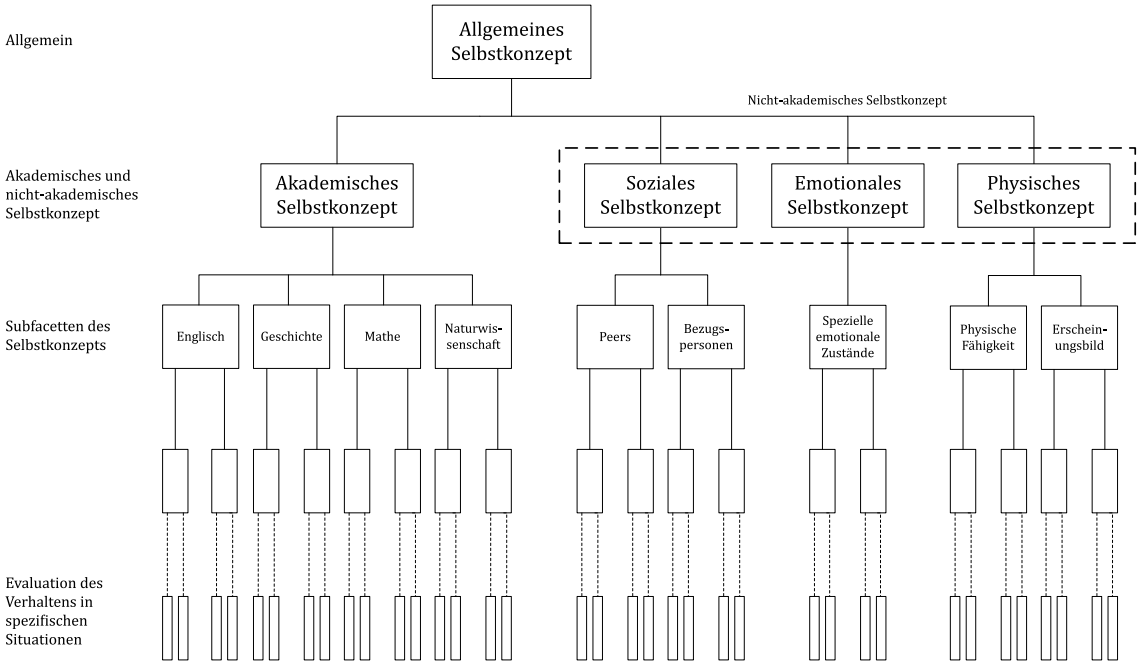


Abbildung 7: Modell des Selbstkonzepts nach Shavelson et al. (1976, S. 413), eigene Übersetzung und Darstellung.

Die ursprünglich lediglich als eine von vielen möglichen Repräsentationen gedachte Darstellung der Definition des Selbstkonzepts (Abbildung 7) nach Shavelson et al. (1976) wurde überwiegend als die definitive Repräsentation aufgegriffen (Marsh & Hattie, 1996). Gewahr dieser ursprünglich nicht durch die Autoren intendierten prototypischen Qualität des Modells darf es auch hier als theoretischer Unterbau der Betrachtung des Konstruktes in dieser Arbeit verstanden werden. In diesem Kontext wird der Begriff des Selbstkonzeptes der Begabung verwendet, da insbesondere in Bezug auf den Umgang mit digitalen Endgeräten und Medien stets auch noch nicht explizit definierte Anwendungen und Umsetzungsformen mit einbezogen werden müssen. Folglich können diese Formen der Anwendung nicht ausreichend beschrieben werden, um spezifische Fähigkeiten der jeweiligen Personen anzusprechen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass latente Begabungen eher auf den konkreten Anwendungsfall angepasst werden können als die enger umrissenen Fähigkeitsselbstkonzepte. Basierend auf den theoretischen Ausführungen darf angenommen werden, dass ein höheres Selbstkonzept im Umgang mit digitalen Endgeräten auch positive Auswirkungen auf die tatsächliche Nutzung digitaler Endgeräte verursachen kann. Das Selbstkonzept im Umgang mit digitalen Endgeräten wird dabei als Subfacette des akademischen Selbstkonzepts betrachtet,

welche nicht den untersten situativen Hierarchiestufen zuzuordnen ist, sondern vielmehr auf der darüberliegenden Ebene den fächerspezifischen Selbstkonzepten beigeordnet werden kann.

Selbstkonzept lässt sich insbesondere durch seine theoretische Herleitung vom Konstrukt der Selbstwirksamkeitserwartung (z. B. Bandura, 1977, 1982) abgrenzen. Unter anderem spielen die jeweiligen Referenzrahmen und der zeitliche Bezug hier eine bedeutende Rolle. Neben einer ausführlichen Distinktion stellen Bong und Skaalvik (2003) auch eingängige praxisnahe Beispiele vor. Während das Selbstkonzept vorrangig Rückbezug auf vergangene Erfolge nimmt und die daraus abgeleitete Kompetenzerfahrung darstellt, ist die Selbstwirksamkeitserwartung eher situativ zukunftsorientiert zu verstehen. Während das Selbstkonzept sowohl affektive als auch kognitive Selbstwahrnehmungen einer Person beinhaltet, bezieht sich die Selbstwirksamkeitserwartung ausschließlich auf kognitive Komponenten dieser Wahrnehmungen (Bong & Clark, 1999). Selbstkonzept ist darüber hinaus auf Konstruktebene stabiler als die Selbstwirksamkeitserwartung (Möller et al., 2009). In der konkreten Anwendung bedeutet dies folglich, dass das Selbstkonzept der Lehrenden in Bezug auf digitale Medien eine Einschätzung ihrer generellen Fähigkeiten im Umgang mit diesen medialen Werkzeugen darstellt. Die Selbstwirksamkeitserwartung wäre beispielsweise relevant, wenn die Lehrenden eine Selbsteinschätzung ihrer Fähigkeit im Umgang mit einem bestimmten Medium in der konkreten Unterrichtssituation antizipieren sollten.

Das Konstrukt des Selbstkonzepts hängt stark von sozialen Referenzrahmen und Vergleichen innerhalb des sozialen Systems ab (Bong & Clark, 1999). Dies zeigt sich insbesondere im sogenannten *Big Fish Little Pond Effect* (BFLPE), zu Deutsch: Fischteich-Effekt, und wurde erstmals 1984 von Marsh und Parker zur Diskussion gestellt. Dieser beschreibt das Phänomen, dass objektiv gleich leistungsstarke Schüler:innen an einer Schule mit hohem Leistungsniveau der übrigen Schüler:innen ein geringeres akademisches Selbstkonzept aufweisen, als sie dies in einem Umfeld niedrigerer Leistungsfähigkeit der sozialen Referenzgruppe tun (Marsh et al., 2008). Marsh (1987) konnte nachweisen, dass der BFLPE etwa ein Viertel der Varianz des Einflusses von akademischem Selbstkonzept auf nachfolgende schulische Leistungen aufklärt. Unter Rückgriff auf die zuvor beschriebene Konzeptualisierung des Konstruktes Selbstkonzept ist hier nochmals festzuhalten, dass dieses multidimensional ist. Demzufolge ist Selbstkonzept eine domänenspezifische Variable. Es bedarf somit jeweils auf die Domänen angepasster Instrumente zur Erfassung des Selbstkonzepts sowie zur Klärung möglicher Einflüsse auf die tatsächliche Leistung in diesem Bereich (Möller et al., 2009; Moschner & Dickhäuser, 2018).

Selbstkonzept im Umgang mit digitalen Medien und Endgeräten

In Bezug auf moderne Lern- und Arbeitsumgebungen liegt nahe, dass Selbstkonzept des Umgangs mit Informations- und Kommunikationstechnologien nicht gerätespezifisch, sondern domänenspezifisch zu betrachten ist. Dies ergibt sich aus der Erkenntnis, dass zeitgemäße Vorgänge im digitalen Raum entweder geräteunabhängig sind oder sogar die simultane Nutzung mehrerer digitaler Endgeräte erfordern. Folglich liefern gerätespezifische Erhebungen eine andere Aussage als aufgabenspezifische Untersuchungen des spezifischen Selbstkonzepts (Schauffel et al., 2021). Trotz großen Forschungsinteresses in den Bereichen Selbstkonzept und digitale Medien zeigt sich eine nur sehr spärliche Betrachtung des Selbstkonzepts in der Nutzung digitaler Medien. Ausgehend von den verwendeten Messinstrumenten stellen Schauffel et al. (2021) fest, dass alle bestehenden Instrumente eines oder mehrere der folgenden Kriterien aufweisen: 1) Die Skalen sind gerätespezifisch, 2) bestehende Skalen legen kein multidimensionales Selbstkonzept zugrunde, 3) bestehende Skalen enthalten Ansätze anderer Konstrukte wie etwa Selbstwirksamkeit oder Interesse, 4) die Instrumente sind auf eine spezielle Zielgruppe ausgerichtet.

Schulz-Zander (2002) zeigt auf, dass in diversen Studien Schüler ein höheres Selbstkonzept in Bezug auf digitale Medien aufweisen als ihre weiblichen Mitschülerinnen. Allerdings erfolgt hier auch im Rahmen der zusammenfassenden Bewertung keine klare Abgrenzung des Selbstkonzepts auf Konstruktebene; vielmehr werden zahlreiche Ansätze der Selbst- und Fremdeinschätzung sowie der Kompetenzeinschätzung unter dem Begriff Selbstkonzept subsummiert (siehe auch Schulz-Zander & Eickelmann, 2007). Snoeyink und Ertmer (2001) sehen die selbst teils als gering wahrgenommenen Fähigkeiten von Lehrpersonen in der gewinnbringenden unterrichtlichen Anwendung als Hinderungsgrund für den Einsatz digitaler Medien im Unterricht. Auch hier ist anzumerken, dass diese Art der Selbsteinschätzung von Kompetenzen nicht zwingend identisch zum Selbstkonzept konzeptualisiert sein muss. Rubach und Lazarides (2019) konnten in einer Erhebung unter 149 Lehramtsstudierenden deren selbsteingeschätzte digitale Kompetenzen erfassen und die Erkenntnisse der Zielgruppe Schüler:innen so auf die angehenden Lehrenden ausweiten. Es zeigten sich deskriptiv tendenziell hohe Ausprägungen der digitalen Kompetenzen in allen konzeptualisierten Bereichen.

Derzeit liegen somit nur wenige Forschungsergebnisse mit konkretem Bezug zum domänenspezifischen Selbstkonzept in Bezug auf Informations- und Kommunikationstechnologien, insbesondere von Lehrpersonen, vor (Schauffel et al., 2021). Dennoch ist aufgrund der zuvor beschriebenen Konzeptualisierung des Konstruktes anzunehmen, dass das Selbstkonzept in Bezug zur Nutzung digitaler Medien im Unterricht als relevante Determinante des tatsächlichen Einsatzes dieser Medien durch Lehrende anzusehen ist (vgl. Niesyto, 2012; Schulz-Zander & Eickelmann, 2007).

Wertzuschreibung gegenüber digitalen Endgeräten

Befragt nach der Wahrnehmung der Potenziale des Einsatzes digitaler Medien im Unterricht vertritt gerade einmal gut ein Drittel der Lehrpersonen in einer repräsentativen Studie die Ansicht, dass diese Medien schulische Leistungen der Lernenden verbessern können. Deutlich besser fällt die Einschätzung der Potenziale digitaler Medien hinsichtlich der Kollaboration von Lernenden (ca. 50% Zustimmung), der Differenzierung (knapp 70% Zustimmung), der Interessensbildung (gut 80% Zustimmung) sowie dem Zugang zu besseren Informationsquellen (knapp 88% Zustimmung) aus (Eickelmann, Bos et al., 2019). Weniger als ein Viertel der Lehrpersonen gab im Rahmen der ICILS Studie 2018 an, digitale Medien bereits voll in den Unterricht integriert zu haben und diese täglich zu nutzen, rund 40% der Lehrpersonen nutzen digitale Medien sporadisch (mindestens einmal im Monat) bis nie (Eickelmann, Bos et al., 2019). Angesichts dieses Forschungsstandes bleibt zu klären, inwiefern die Zuschreibung von Potenzialen und Werten an digitale Medien deren Einsatz in der Schulpraxis bedingen kann. Hierfür wird zunächst ausgehend von einem Erwartung-Wert-Modell die Wertperzeption (Wertzuschreibung) als Prädiktor für eine tatsächliche Handlung (hier Nutzung der digitalen Medien) betrachtet. Anschließend werden die so dargelegten Zusammenhänge in den Kontext der vorliegenden Studie eingebettet.

Operationalisierung der Wertzuschreibung

Im Zuge von Wigfields und Eccles theoretischen Ausführungen und empirischen Untersuchungen zur *Expectancy-Value*-Theorie wurde der Wert, den Rezipienten einer Aufgabe zuschreiben, im pädagogischen Kontext erläutert. Eccles et al. (1983) beschreiben den Wert einer Aufgabe als aus drei Komponenten bestehend: 1) *Attainment Value* / Zielerreichungswert, 2) *Intrinsic Value* / intrinsischer Wert und 3) *Utility Value* / Nützlichkeit (Übersetzung der Komponenten nach Dickhäuser, 2001, S. 41).

Der Zielerreichungswert bemisst sich nach Eccles unter anderem aus der Wahrnehmung des Individuums, inwiefern die Aufgabe sichtbare und als bedeutend wahrgenommene Merkmale des Individuums bestätigen kann (Eccles et al., 1983; Eccles, 1984). Die wahrgenommenen Eigenschaften der Aufgabe stehen damit in Interaktion mit den Bedürfnissen und der Selbstwahrnehmung des Individuums und definieren so den Wert der Aufgabe. Im vorliegenden Fall des Einsatzes digitaler Medien (virtueller Labore) im Unterricht könnte sich die Wertzuschreibung durch eine Lehrperson wie folgt ergeben (Beispiel adaptiert nach Eccles et al., 1983; Eccles, 1984): Eine Lehrperson sieht sich selbst als „moderne“ und gute Lehrperson an. Weiterhin sieht sie die Nutzung digitaler Medien im Fachunterricht als Herausforderung und *den* Standard der Unterrichtsentwicklung an. In der Folge sollte die Wertzuschreibung der Lehrperson gegenüber dem Einsatz digitaler Medien im Unterricht hoch sein, da sie durch eine erfolgreiche Absolvierung der Aufgabe eine entscheidende Komponente ihres Selbstkonzepts

bestätigen kann. Als ausschlaggebend für den Zielerreichungswert ist somit die subjektiv wahrgenommene Bedeutung von Erfolg im Rahmen der Aufgabe mit Wirkung auf die Selbstwahrnehmung der Person zu sehen (Dickhäuser, 2001). Eccles et al. (1983, S. 89) beschreiben den Zielerreichungswert knapp definiert als „the importance of doing well on the task."

Der intrinsische Wert einer Aufgabe ergibt sich aus dem positiven Erleben, welches sich aus dem Tätigkeitsvollzug selbst für eine Person ergibt (Eccles, 1984). Einer als erfreulich oder reizvoll erscheinenden Aufgabe wird so ein höherer Wert beigemessen. Damit einhergehend werden eine hohe intrinsische Motivation für die Aufgabe und Beharrlichkeit in der Bearbeitung erwartet (Wigfield & Cambria, 2010). Der intrinsische Wert ist somit in Anlehnung an die in der Selbstbestimmungstheorie der Motivation definierte intrinsische Motivation eher interessensbestimmt (Deci & Ryan, 1993). Der intrinsische Wert wurde teils auch von der zuvor beschriebenen Definition abweichend als Anreiz-Wert (*Incentive Value*) konzeptualisiert. In dieser Auffassung fließt neben der intrinsischen auch eine extrinsische Komponente in die Wertbetrachtung dieser Teilkomponente mit ein, welche sich vorrangig aus dem Zuteilwerden von Privilegien oder Lob durch die Ausübung einer Tätigkeit ergibt (Eccles, 1987).

Dem intrinsischen Wert gegenüber steht die Nützlichkeit einer Aufgabe. Ähnlich der Unterscheidung intrinsischer und extrinsischer Motivation anhand des Vorliegens „externer oder intrapsychischer Anstöße" (Deci & Ryan, 1993, S. 225) lässt sich diese Wertkomponente ebenfalls als instrumentelle Absicht verstehen (Deci & Ryan, 1993; Eccles et al., 1983; Eccles, 1984). Ausschlaggebend für diesen Teil der Wertzuschreibung ist die Bedeutung der Aufgabe für künftige Ziele, auch wenn diese nicht auf den ersten Blick mit der Aufgabe in Verbindung zu bringen sind (Eccles et al., 1983). Die Nützlichkeit einer Aufgabe ist im Sinne der Wertzuschreibung somit als Mittel zum Zweck zu verstehen (Wigfield & Cambria, 2010). Am Beispiel der vorliegenden Konzeption kann die Nützlichkeit der Verwendung digitaler Medien für Lehrpersonen aus den Digitalisierungsbestrebungen der Schulen und den damit einhergehenden regulatorischen Vorgaben zur Medienbildung und -nutzung entstehen. Auch wenn eine Lehrperson nicht intrinsisch motiviert ist, mit digitalen Lernumgebungen zu arbeiten (*Intrinsic Value*) und auch keine Bestätigung ihrer Rolle als Lehrperson darin sieht, einen guten digitalisierten Unterricht anzubieten (*Attainment Value*), so können dennoch externe Vorgaben eine gewisse Wertzuschreibung (*Utility Value*) hervorrufen.

Als zusätzliche Komponente, welche bei der Wahl einer Aufgabe Berücksichtigung finden kann, gilt der Aufwand (*Cost*). Dabei wird die Entscheidung für eine Aufgabe mit der Einschränkung der freien Ressourcen für andere Tätigkeiten, dem erforderlichen Aufwand und dem emotionalen Aufwand in Verbindung gebracht (Wigfield & Eccles, 2000). Entsprechend ist das Treffen einer Wahl immer auch gleichzeitig die Entscheidung gegen eine andere Wahlmöglichkeit. Dickhäuser (2001) plädiert daher für die

Berücksichtigung eines *Cost*-Faktors, ohne diesen jedoch näher zu bezeichnen. Unter Bezug auf die empirischen Befunde von Part et al. (2020), welche in ihrer Studie diverse Modelle überprüft haben, kommen Eccles und Wigfield (2020) zu dem Schluss, dass der *Cost*-Faktor mit dem ursprünglichen Erwartung-Wert-Modell (Eccles et al., 1983) vollständig erfasst werden kann. Wigfield und Eccles (2020) kommen nach ausführlicher Betrachtung der Forschungslage zum *Cost*-Faktor ebenfalls zu dem Schluss, dass dieser zu berücksichtigen, jedoch weiterhin im Sinne eines Einflussfaktors innerhalb der Wertzuschreibung formal nicht eindeutig zu separieren sei.

Eccles (1994) beschreibt den einer Aufgabe zugeschriebenen subjektiven Wert als wesentlichen Prädiktor für die Wahl der zur Verfügung stehenden Optionen. Demnach bilden Wertzuschreibung und Erfolgserwartung die direkten Einflussfaktoren auf eine leistungsbezogene Entscheidung (Eccles et al., 1983; Eccles, 1994). Die dem Modell nach Eccles et al. (1983) immanente Komplexität und dessen multifaktorieller Aufbau berücksichtigen sowohl kulturelle als auch soziale Faktoren sowie persönliche Erfahrungen als Grundlagen der Entscheidung für oder wider eine Aufgabe. Diesem Modell folgend ist der Einfluss der Sozialisierung auf die Erwartungshaltungen und Einstellungen, welche ein Individuum wahrnimmt, ebenso gegeben wie der Einfluss der Sozialisierung auf die Zuschreibungen zu vorangegangenen Erfahrungen mit dem zur Disposition stehenden Gegenstand. Daraus ergeben sich im weiteren Verlauf, direkt mediiert durch Selbstwahrnehmungen, nahe und ferne Ziele sowie Zuschreibungen der Aufgabenschwierigkeit und das Fähigkeitsselbstkonzept die individuellen Wertzuschreibungen. Fähigkeitsselbstkonzept und wahrgenommene Aufgabenschwierigkeit beeinflussen darüber hinaus ebenfalls die Erwartungen an eine Aufgabe, sowohl in der Gegenwart als auch in der Zukunft. Erwartung und Wert führen so letztlich zum aktiv gezeigten Leistungsverhalten einer Person (Eccles et al., 1983, 1985). Im weiteren Verlauf wurde das Modell hauptsächlich durch theoretische Arbeiten weiter ausdifferenziert (Wigfield, 1994; Wigfield & Cambria, 2010; Wigfield & Eccles, 2020). Zu bemerken ist dabei, dass die Beharrlichkeit in der Ausführung einer Aufgabe ausgehend vom ursprünglichen Modell, in welchem diese explizit angeführt wurde, hin zum aktuellen Modell (Abbildung 8) augenscheinlich an Bedeutung verloren hat (Eccles et al., 1983; Wigfield & Eccles, 2020). Leistungsbezogene Auswahl und Erfolg stehen nunmehr im Fokus der betrachteten Auswirkungen.

Wenngleich Eccles und Kollegen in ihren empirischen Arbeiten vornehmlich die Kurswahl von Lernenden unterschiedlicher Altersstufen in den Fokus rückten und dabei allem voran die Beweggründe zur (Nicht-)Wahl von Mathematikkursen und deren geschlechterspezifische Varianz untersuchten, gilt das vorgestellte Erwartung-Wert-Modell dennoch als theoretische Fundierung in stärker generalisierten Kontexten (Dickhäuser, 2001; Tigges, 2008). Dickhäuser (2001) baut auf dem Erwartung-Wert-Modell nach Eccles auf und kann in empirischen Studien anhand von Pfadanalysen einen positiven korrelativen Zusammenhang der Wertzuschreibung mit der Wahl des Computers

als Werkzeug belegen (Dickhäuser, 2001). Es ist somit anzunehmen, dass eine höhere Wertzuschreibung an digitale Endgeräte eine verstärkte Nutzung derselben und damit einhergehend eine höhere Persistenz und bessere Erfolge in der Nutzung mit sich bringen.

Für die vorliegende Arbeit wird die Wertzuschreibung auf Basis der Arbeiten von Eccles und Kollegen als Konstrukt mit den Teilkomponenten Zielerreichungswert, intrinsischer Wert, Nützlichkeit und Kosten angenommen (Eccles et al., 1983; Wigfield & Eccles, 1992).

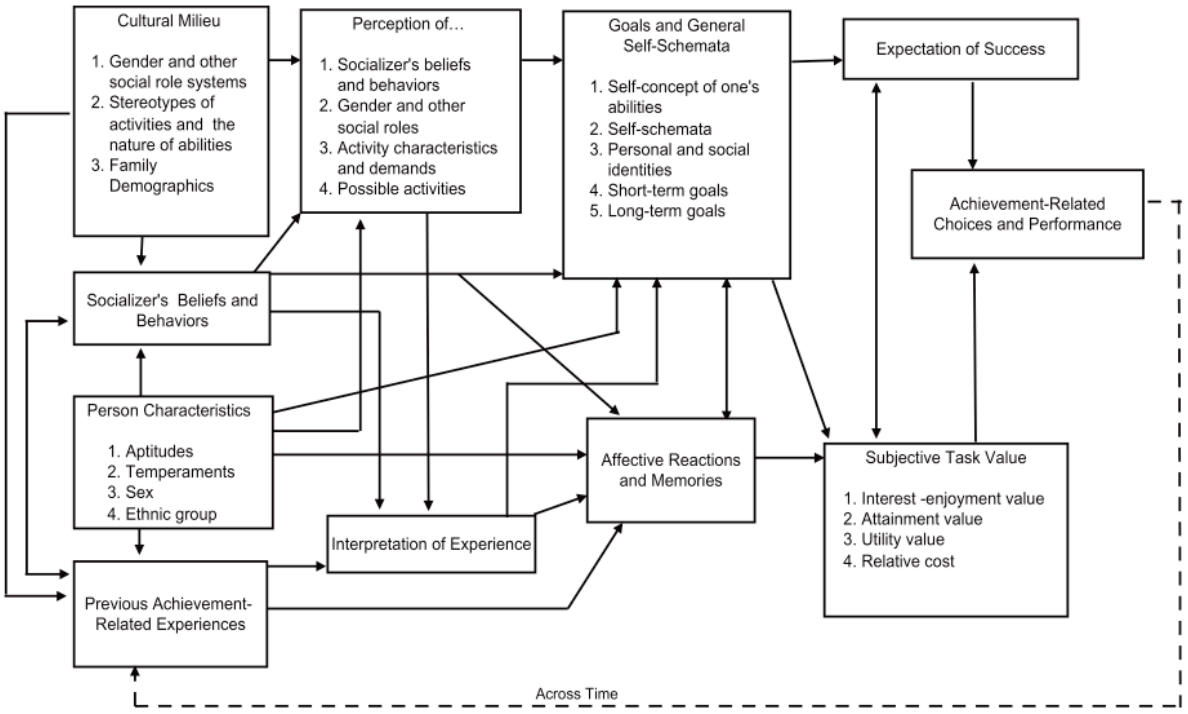


Abbildung 8: Das Erwartung-Wert-Modell der leistungsbezogenen Auswahl und des Erfolgs. Abbildung entnommen aus Wigfield und Eccles (2020, S. 165).

Wertzuschreibung an digitale Medien und Endgeräte

Steinberg und Schmid (2020) ziehen anhand einer qualitativen Erhebung unter ausgewählten Lehrpersonen den Schluss, dass insbesondere vor der Zeit der Corona-Pandemie und den damit einhergehenden Schulschließungen digitale Endgeräte häufig nur als Arbeitsmittel aufgefasst worden seien, welche eine fragliche technische Zuverlässigkeit mit sich brächten und aus diesem Grund nur bedingt im Unterricht genutzt worden seien. Digitale Werkzeuge seien hier eher zur sozialen Kontrolle, wie etwa für ein effizientes *Classroom Management*, eingesetzt worden. Durch die Auswirkungen der Pandemie wurden die digitalen Arbeitsmittel laut den Autoren sehr schnell zu Hilfsmitteln zur Vermittlung von Lerninhalten im *Distance Learning / Homeschooling*. Dement-

sprechend kommt den digitalen Medien und Endgeräten eine veränderte Wertzuschreibung zu, welche in diesem Fall durch den Zwang zur Veränderung initiiert wurde.

In Anlehnung an die *Unified Theory of Acceptance and Use of Technology* (UTAUT, Venkatesh et al., 2003) untersuchten Gerthofer und Schneider (2021) Fallkonstellationen personenbezogener Attribute, welche für eine mangelnde Nutzung digitaler Medien ursächlich sein können. Während in der theoretischen Betrachtung durch die Autoren die Hinderungsgründe in einer vermeintlich geringen Lernwirksamkeit und vergleichsweise hohem (Zusatz-)Aufwand verortet sind, skizzieren die Ergebnisse dieser Studie ein recht positives Bild der Befragten hinsichtlich erwartetem Mehrwert und geschätztem Aufwand. Folglich ist von einer eher positiven Wertzuschreibung an digitale Endgeräte und Medien auszugehen.

Auffallend ist bei der Betrachtung des Wert-Faktors die häufig an digitale Medien gerichtet Forderung des Mehrwerts für den Unterricht oder die Wissensvermittlung (z. B. C. Fischer, 2017). Dies betont die Betrachtung digitaler Medien als reine Werkzeuge, welche für die Wissensvermittlung genutzt werden sollen, können und müssen. Dementgegen finden Sichtweisen, welche eine Wertzuschreibung gegenüber digitalen Medien und Endgeräten in den Fokus nehmen, scheinbar wenig Beachtung. Teilweise wird der Mehrwert digitaler Endgeräte zu weiten Teilen an deren *per se* motivierendem Potenzial festgemacht (z. B. Junge, 2021), was einer Bildung mit und über Medien im Sinne eines umfassenden technologischen Wissens (vgl. TPACK auf Lehrendenseite, Koehler & Mishra, 2009) nicht gerecht werden kann. Walter (2018) ordnet insbesondere solche Publikationen als auf das Medium als solches fokussierend ein, die diesen technologischen Neuerungen euphorisch gegenüberstehen.

2.4 Material: Kriterien für digitales Lernen

Material: Kriterien für digitales Lernen

Cognitive Flexibility Theory (CFT)

- CFT ist anwendbar auf komplexe, variable (*ill-structured*) Inhaltsdomänen.
- Kognitive Flexibilität ist Teil der exekutiven Funktionen.
- Unflexibler Wissenserwerb führt zu unflexiblem Anwendungswissen.
- Vorbereitung der Lernenden auf noch unbekannte komplexe Problemstellungen steht im Fokus.

Random Access Instruction

- Anregung mehrerer rezeptiver Kanäle fördert den Erwerb von flexibel anwendbarem Transferwissen.
- Ausgearbeitete Fälle stellen eine Instruktionsvariante dar (*Worked Examples*).
- *Criss-Crossing* der thematischen Landschaft ermöglicht multiperspektivische Zugänge.
- Komplexe, facettenreiche *Crossroads Cases* können genutzt werden.
- Digitale Lernumgebungen eignen sich gut zum Erwerb flexibel anwendbaren Wissens.
- Digitale Lernumgebungen sollten nicht-linear und nicht strikt strukturiert sein.

Cognitive Theory of Multimedia Learning (CTML)

- Informationsaufnahme erfolgt über Augen (Bilder und Text) und Ohren (Sprache).
- Selektion und Integration mit Vorwissen erfolgen im Arbeitsgedächtnis.
- Die begrenzte Kapazität des Arbeitsgedächtnis erfordert Entlastung.
- Entlastung kann durch empirisch geprüfte Gestaltungskriterien erreicht werden.
- Multimedia-, Kontiguitäts-, Modalitäts-, Redundanz-, Kohärenz-, Personalisierungs- sowie Segmentierungs- und Vorentlastungsprinzip als konkrete Gestaltungskriterien.

Usability

- Gebrauchstauglichkeit eines computerisierten Systems
- *System Usability* vs. *Content Usability*
- *System Usability* als „Bedienbarkeit" einer Lernumgebung steht im Fokus.
- Gute *Usability* reduziert *Extraneous Cognitive Load* und kann damit lernförderlich wirken.

Im Sinne der Förderung kognitiv flexibler Zugänge zu Lernmaterialien und Inhalten liegt der Fokus auf einer gezielten Anregung mehrerer rezeptiver Kanäle bei den Lernenden. Auf der Seite der Lernenden gilt eine hohe kognitive Flexibilität als Prädiktor erfolgreichen Lernens mit multiplen multimedialen Repräsentationen (Spiro, Vispoel, Schmitz, Samarapungavan, Boerger et al., 1987). Unter Berücksichtigung dieser Prämissen zeigen sich auf digitalen Endgeräten basierte Lernumgebungen als gut geeignetes Medium zur Vermittlung von Transferwissen über komplexe, variable Inhaltsdomänen (Spiro et al., 1992). In besonderem Maße gewinnbringend kann die Nutzung digitaler Lernumgebungen dann sein, wenn deren Konzeption bereits kriteriengeleitet erfolgt und so eine Wissenskonstruktion aktiv fördert (Clark & Mayer, 2008). Im Folgenden werden daher sowohl Aspekte der kognitiven Flexibilität als auch Gestaltungskriterien für multimediale Lernumgebungen dargelegt.

Cognitive Flexibility Theory und Random Access Instruction

Kognitive Grundannahmen

Unter dem Begriff exekutive Funktionen werden in der Psychologie „Kontroll- und Regulationsmechanismen zusammengefasst, die ein zielorientiertes und situationsangepasstes Handeln ermöglichen“ (Drechsler, 2007, S. 233). Eine Subkomponente der exekutiven Funktionen, welche im Bereich der basalen Regulation zu verorten ist, stellt die kognitive Flexibilität dar. Die kognitive Flexibilität ermöglicht es dem Menschen, adäquat auf wechselnde Anforderungen zu reagieren, wodurch eine Anpassung an immer neue Umgebungsbedingungen innerhalb komplexer Entscheidungsfelder ermöglicht wird (Drechsler, 2007).

Ionescu (2012) beschreibt kognitive Flexibilität als eine Eigenschaft des kognitiven Systems und somit explizit nicht als in sich geschlossene strukturelle Einheit. Kognitive Flexibilität wird in diesem Zusammenhang zum einen durch die Interaktion kognitiver Mechanismen und zum anderen durch die Interaktion sensomotorischer Mechanismen, Kognitionen und Kontexte evident. Nach Krems (1996) herrscht Unklarheit darüber, ob es sich bei kognitiver Flexibilität um eine aufgabenunabhängige Eigenschaft des kognitiven Systems handelt oder ob diese als Merkmal durch bereichsspezifisches Wissen oder bereichsunabhängig aber aufgabenspezifisch ausgeprägt wird. Bekanntermaßen ist eine aufgabenspezifische Variation der kognitiven Flexibilität über alle Altersstufen hinweg gegeben; in der Folge sollten Testungen zur Erfassung der kognitiven Flexibilität nicht nur eine Aufgabenstellung enthalten (Deák & Wiseheart, 2015). Krems (2014) konstatiert in einer neueren Publikation, dass zumindest die flexible Variation von Annahmen als Teilaspekt der kognitiven Flexibilität nicht domänenspezifisch ist.

Als exemplarische Situationen, in welchen eine kognitive Flexibilität von Lernenden erwartet wird, nennt Chieu (2007a) die Begegnung mit neuen Problemstellungen und neuen Konzepten oder auch den Perspektivwechsel, der zum Verständnis anderer Positionen in einer Diskussion erforderlich ist. Hier kommen auch Aspekte der Expertise zum Tragen. Experten scheinen in solchen Situationen besser in der Lage zu sein, von einer bestehenden Hypothese zu einer anderen plausibleren Alternative und von einer eingeschlagenen Problemlösestrategie zu einer besser geeigneten Methode zu wechseln als Fortgeschrittene oder Anfänger. In Hinblick auf die Verwaltung von Information im Arbeitsgedächtnis scheint diese Fähigkeit daran geknüpft zu sein, sowohl relevante Wissensteile aus dem Langzeitgedächtnis verfügbar zu machen als auch im Arbeitsgedächtnis bereits vorhandene, aber irrelevante oder suboptimale Verfahren inhibieren zu können (Krems, 1996). Dagegen sieht Krems (2014) Expertise innerhalb einer Inhaltsdomäne nicht als hinderlich gegenüber adaptiven Problemlösestrategien an und schlussfolgert daraus eine positive Korrelation zwischen Expertise und kognitiver Flexibilität.

Wird Wissen in Form klar definierter Vorgehensweisen und Schemata erworben, steigt die Wahrscheinlichkeit für eine kognitive Inflexibilität insbesondere bei Expert:innen. Durch die Festigung des Erlernten sowie die regelmäßige Nutzung klar strukturierten Wissens gehen im Zuge der Verstetigung des Wissens wechselnde Begebenheiten, welche eine flexible Verknüpfung und verschiedene Herangehensweisen erfordern würden, tendenziell verloren (Feltovich et al., 1997).

Ill-Structuredness

Im Kontext von Lehr-Lern-Settings kann zwischen Wissen in *well-structured Domains* (WSD, gut strukturierte Bereiche) und *ill-structured Domains* (ISD, wenig strukturierte Bereiche) differenziert werden (Spiro et al., 1988; Spiro, Vispoel, Schmitz, Samarapungavan & Boerger, 1987). Komplexe, fallabhängige Anwendungsbereiche erfordern nach Ansicht der Autoren nicht nur eine Reproduktion von Vorwissen, sondern vielmehr die Konstruktion und Neuausrichtung vorhandener Schemata zu Wissen, welches, aufbauend auf Vorwissen, flexibel an die jeweilige Situation angepasst wird. Diese Art der Wissensanwendung steht der automatisierbaren Reproduktion reinen Faktenwissens in Teilen dichotom entgegen.

Eine *Ill-Structuredness* liegt immer dann vor, wenn zur Wissensanwendung eine Mehrzahl an Konzepten gleichzeitig berücksichtigt werden muss und jedes dieser Konzepte eine eigene immanente Komplexität aufweist. Spiro et al. (1992) bezeichnen dies als Konzept- und Fallkomplexität. Als weiteres definierendes Merkmal tritt die Unregelmäßigkeit über verschiedene Fälle hinweg in den Vordergrund. Fallüberschreitende Unregelmäßigkeit oder Unbeständigkeit ergibt sich aus der variablen Vernetzung der den Fall ausmachenden Bedingungen und situativen Gegebenheiten.

Beispielhaft sei hier die Medizin als komplexe Disziplin angeführt. Aufgrund einer Vielzahl möglicher persönlicher, erkrankungsspezifischer und umweltbedingter Einflussfaktoren sowie deren Kombinationsmöglichkeiten können starre Lehrbeispiele für angehende Mediziner der Komplexität des Faches nur bedingt gerecht werden. In der Konsequenz könnte eine nicht auf kognitive Flexibilität ausgerichtete Instruktion im späteren Berufsleben zu einer übergeneralisierenden und möglicherweise zu statischen Herangehensweise führen, wodurch der Blick für neue oder unbekannte Kombinationen der Einflussfaktoren nicht gegeben wäre. Eine an zahlreichen und diversen Fallbeispielen orientierte Ausbildung könnte dem unter Umständen vorbeugen (Driscoll, 2014).

Problemstellungen mit *Ill-Structuredness*-Charakter zeichnen sich nach Jonassen (1997) aus durch:

- Undefinierte Erscheinung
- Vage definierte oder unklare Ziele und unbenannte Hindernisse
- Multiple Lösungen und Lösungswege
- Verschiedene Kriterien zur Bewertung einer Lösung
- Weniger veränderbare Parameter
- Interagierende und kontextabhängige Fallelemente
- Fallabhängige Beziehungen zwischen Konzepten, Regeln und Prinzipien
- Keine allgemeingültigen Regeln zur Beschreibung oder Vorhersage
- Keine eindeutigen Mittel zur Vorhersage angemessener Handlungen
- erfordern persönliche Vorstellungen, Meinungen und Urteile der Lernenden

Eine *Ill-Structuredness* des im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Inhaltsbereichs ergibt sich beispielsweise aus der nachfolgenden Konstellation:

Zur Anwendung des Wissens über Nährstoffeinträge in Gewässer (z. B. Ammonium- und Nitratstickstoff) ist nicht nur das in sich komplexe Wissen über die verschiedenen Stickstofflieferanten und möglicher Umwandlungsprozesse erforderlich. Auch Einflussfaktoren des Stickstoffkreislaufs wie Speicherkapazitäten, Maß der Umwandlung und anthropogene Einträge beeinflussen letztlich den Eintrag in Gewässer. Eine hohe Konzept- und Fallkomplexität erscheint damit als gegeben. Darüber hinaus besteht eine Unregelmäßigkeit über verschiedene Fälle, da in jeder Fallbetrachtung zur Beurteilung der Einflussfaktoren des Stickstoffgehaltes auch messstellenspezifische Parameter wie etwa pH-Wert oder Temperatur (u.v.m.) berücksichtigt werden müssen. Nur unter Einbezug all dieser komplexitätserzeugender Faktoren kann eine fundierte Einschätzung der Belastungen des Gewässers auf der Bewertungsebene getätigt werden.

Dies stimmt mit der Einschätzung von Spiro et al. (1992) überein, wonach alle Bereiche, welche die Anwendung von Wissen in unabhängigen, natürlich auftretenden Situationen erfordern, potenziell als *ill-structured* betrachtet werden können.

In Bezug auf Lehr-Lern-Settings ergeben sich aus der kognitiven Flexibilität der Lernenden einige Implikationen. So stellen Spiro, Vispoel, Schmitz, Samarapungavan und Boerger (1987) heraus, dass die Kontrolle eines Lernenden über ein bestimmtes Wissen entscheidend für den Erfolg der Anwendung von Vorwissen in einer neuen Situation ist.

Lernende mit hoher kognitiver Flexibilität erfassen und organisieren Informationen anders als solche mit niedriger kognitiver Flexibilität. Davon ausgehend kann die als

Persönlichkeitsmerkmal der Lernenden gegebene, interpersonell unterschiedliche kognitive Flexibilität auch einen Prädiktor für die erfolgreiche Wissenskonstruktion innerhalb eines gegebenen Lernsettings darstellen (Darabi et al., 2010).

Hierauf aufbauend schlagen Braem und Egner (2018) eine Abkehr von der Wahrnehmung kognitiver Flexibilität als überwachender Kontrollfunktion vor. Stattdessen wird ein Ansatz der integrativen Kontrolle verfolgt, in welchem die kognitive Flexibilität mit der Verknüpfung von *Stimulus* und *Response* eng verwoben ist.

Random Access Instruction

Letztlich führen diese Überlegungen zu der Frage, wie Wissen erworben werden soll, um für eine möglichst flexible situationale Anwendung nutzbar zu sein (Spiro, Vispoel, Schmitz, Samarapungavan & Boerger, 1987). Durch die geforderte Flexibilität während des Wissenserwerbs kann eine ebenso flexible Anwendung des Wissens auf unbekannte Situationen im Sinne aktiv nutzbaren Transferwissens gefördert werden (Ainsworth, 2006; Jacobson & Spiro, 1993).

Nach Spiro et al. (1992) stellen die Eigenschaften sogenannter *ill-structured Knowledge Domains* insbesondere in Bezug auf den Erwerb von fortgeschrittenem Wissen und Anwendungswissen die Lernenden vor große Herausforderungen. Gerade die Anwendung des Erlernten auf neue Situationen mit veränderten Bedingungen und Zusammenhängen erfordert eine von der klassischen Instruktion abweichende Vorgehensweise. Hierzu empfehlen die Autoren eine Abkehr von der reinen Instruktion vordefinierten Wissens und einen stärker adaptiv ausgerichteten Lehr-Lernprozess. So sollen Lernende dazu befähigt werden, bestehendes Wissen neu zu strukturieren und situativ angepasst zu rekombinieren.

Stehen komplexe und wenig strukturierte Wissensbereiche zur Vermittlung, so bieten sich nach der *Cognitive Flexibility Theory* vielfältige, variable und miteinander verbundene Zugänge zum Lernstoff an. Spiro et al. (1992) stellen hierzu einen Ansatz für Lehren und Lernen in komplexen Inhaltsdomänen vor, welche sie auf einer konstruktivistischen Auffassung des Lernens begründen. Die kriteriengeleitete Nutzung der flexiblen Einsetzbarkeit computerisierter nichtlinearer Lernumgebungen bezeichnen sie als *Random Access Instruction*.

Spiro und Jehng (1990) verstehen unter *Hypertext* in diesem Zusammenhang die computerbasierte, nichtlineare Darbietung verschiedener Texte und Materialien, welche unter anderem auch Audio und Video mit einbeziehen. So können die gleichen inhaltlichen Materialien auf verschiedenen Wegen erschlossen werden und damit multiple Texte zum gleichen Thema darstellen.

Nach der *Cognitive Flexibility Theory* ausgerichtete *Hypertext*-Lernumgebungen können Lernende besser auf die Anwendung fallspezifischen, abstrakten Wissens vorbereiten als dies beispielsweise mit Drill-artigen Lernstrategien möglich wäre. Die kognitive Flexibilität fördernde Lernumgebungen setzen dabei auf ein "*Thematic Criss-Crossing*" (Jacobson & Spiro, 1993, S. 16), es werden also verschiedene Zugänge zum gleichen Lerninhalt ermöglicht. Steht dagegen der Erwerb reinen Faktenwissens im Vordergrund, können auch einfach strukturierte Übungsaufgaben ohne multiple Zugänge zum Lerninhalt effektiv sein. In Transferaufgaben, also beim Erwerb fortgeschrittenen Wissens, geht dabei jedoch die Fähigkeit zur Anwendung des erworbenen Wissens auf neue Kontexte tendenziell eher verloren (Jacobson & Spiro, 1993).

Spiro et al. (1988) definieren die Phase des fortgeschrittenen Lernens als die der Einführung nachgeschaltete Phase, in der allerdings noch keine Expertise auf Lernendenseite vorliegt. An die Lernenden werden dabei entsprechende Anforderungen gerichtet: "The learner must attain a deeper understanding of content material, reason with it, and apply it flexibly in diverse contexts″ (Spiro, 1988, S. 2).

Multiple Modellarten, Metaphern, Analogien und Interpretationen derselben Informationen (multiple Modi) tragen in dieser Phase des Wissenserwerbs ebenso zu einem flexiblen Anwendungswissen bei wie der Zugang aus verschiedenen Perspektiven, welche die Lernenden einnehmen können (Driscoll, 2014).

Während einleitende Lernsettings häufig eine klare Struktur verfolgen können, ist diese Strukturiertheit in der Anwendung meist nicht gegeben. Entsprechend wird von Experten auf einem Gebiet erwartet, dass diese in der Lage sind, auch komplexe und vernetzte Wissensbereiche zu durchdringen. Ein Fehler im Umgang mit solch komplexen Wissensbereichen liegt in der allzu starken Vereinfachung der Lerninhalte und Querbezüge, etwa indem stets nur Teilaspekte betrachtet werden (*Compartmentalization*). Eine solche starke Vereinfachung trotz real vorliegender Komplexität bezeichnen Spiro et al. (1992) als *Reductive Bias*.

Zum Umgang mit *Ill-Structuredness* empfiehlt Spiro (1987) die Fallarbeit. Dabei ist die Dekomposition jedes Falls in die zugrunde liegenden Teilaspekte und die Neuverknüpfung dieser Teilaspekte für ein umfassendes Bild der Problemstellung und zur Gewinnung von Lösungsansätzen erforderlich. Diese Rekonstruktion von Wissen ermöglicht eine flexiblere Wissensanwendung in nachfolgenden Fällen mit eigenen Komplexitäten und Abweichungen von den zur Instruktion genutzten Fällen. Paas und van Merriënboer (1994b) konnten auch aus der Perspektive der *Cognitive-Load*-Forschung eine Verbesserung des Transferwissens und eine reduzierte kognitive Beanspruchung bei der Nutzung sogenannter *Worked Examples* feststellen. Sie weisen jedoch darauf hin, dass eine Variation in den Problemstellungen während des Lernprozesses nur dann positive Auswirkungen auf die Schemabildung mit sich bringe,

wenn der *Extraneous Cognitive Load* reduziert würde (Paas & van Merriënboer, 1994b).

Werden die Fälle darüber hinaus noch nichtlinear und multidimensional durchlaufen, bieten sich unterschiedliche thematische Zugänge und Perspektiven auf den Lerninhalt, welche zum Erwerb kognitiv flexiblen Anwendungswissens beitragen können. Dieses Vorgehen bezeichnet Spiro (1987) wie bereits erwähnt als "*Criss-Crossing*" der thematischen Landschaft. In einer späteren Publikation bezeichnen Spiro et al. (2008) reichhaltige oder lehrreiche Fallbeispiele als *Crossroads Cases* und knüpfen damit an die geographische Metaphorik an.

Spiro et al. (1988) formulierten sieben Kriterien zur Förderung der kognitiven Flexibilität Lernender:

- Vermeidung von zu starker Vereinfachung und Übergeneralisierung
- Multiple Repräsentationen
- Zentralität von Fällen
- Konzeptwissen als Wissen in Anwendung
- Anordnung von Schemata von rigide hin zu flexibel
- Multiple Vernetzung (Vermeidung der Bereichsbildung von Konzepten und Fällen)
- Aktive Partizipation, Anleitung und Unterstützung im Umgang mit Komplexität
  (Spiro et al., 1988)

Dabei stellt insbesondere das letztgenannte Kriterium nicht-traditionelle Anforderungen an die didaktische Vorgehensweise. Die Autoren argumentieren, dass eine Kodierung oder Aufbereitung des zu vermittelnden Wissens *a priori* zu einer Fehlrepräsentation führt, da somit versucht würde, die Komplexität des Wissens vorab zu modifizieren. Stattdessen empfehlen sie die Unterstützung durch Experten, um die Lernenden im Umgang mit dem komplexen Wissensinhalt zu unterstützen. Eine reale Betreuung durch solche Tutoren ist dabei nicht zwangsläufig erforderlich, sondern kann auch in eine *Hypertext*-Lernumgebung integriert werden (Spiro et al., 1988).

Wenngleich die in Abrede gestellte Aufbereitung der Materialien aus didaktischer Sicht kontraintuitiv erscheint, so findet sich hier doch der frühe Ansatz digitaler Lernhilfen und virtueller Coaches wieder.

Als großen Vorzug digitaler Lernmedien beschreiben Spiro et al. (2008) die Möglichkeit der nichtlinearen Nebeneinanderstellung von Fällen und Inhalten, wodurch ein Aufbrechen antizipierter Gedankengänge und damit Flexibilität gefördert wird. *Hypermedia* kann einerseits zur Gestaltung erforderlicher Perspektivwechsel als effektives Werkzeug herangezogen werden. Andererseits ermöglichen multimediale Lernumgebungen auch einen multimodalen Zugang zu den Inhalten, indem auditive

und visuelle Repräsentationsmodi überlagert werden (Driscoll, 2014). Dabei ist zu berücksichtigen, dass *Cognitive Flexibility Hypertexts* keine fertigen Lernprodukte bieten, sondern vielmehr die Bausteine zur Zusammenstellung flexiblen situativen Wissens bereitstellen (Spiro et al., 1991).

Für eine die kognitive Flexibilität fördernde Gestaltung von Lernumgebungen empfehlen Spiro et al. (2003) konkret den Verzicht auf immer wiederkehrende inhaltliche Strukturen wie etwa einheitliche Inhaltsverzeichnisse. Eine solch klare Strukturierung ist in der Anwendungsebene ebenfalls nicht zu erwarten und sollte daher auch nicht zur linearen Strukturierung von Wissen herangezogen werden.

Ausführliche Beispiele für neuere digitale Werkzeuge zur Ausrichtung von Lerninhalten auf der Basis einer kriteriengeleiteten Förderung von kognitiver Flexibilität stellt Chieu (2005, 2006, 2007b, 2007a) vor.

Evaluation der kognitiven Flexibilität

Als Instrumente zur Testung der kognitiven Flexibilität Lernender stehen neben Selbsteinschätzungsskalen auch psychometrische Tests wie der *Trailmaking*-Test (Crowe, 1998) und sogenannte *Card-Sorting-Tests* (z. B. *Wisconsin Card-Sorting Test*, WCST) oder *Dimensional Change Card Sort Tests* (Ramscar et al., 2013) zur Verfügung (Kortte et al., 2002).

Des Weiteren sind auch Selbsteinschätzungsskalen (Dennis & Vander Wal, 2010) zur Erfassung der kognitiven Flexibilität verfügbar, welche ausführlich validiert wurden (Martin et al., 1998; Martin & Anderson, 1998; Martin & Rubin, 1995).

Johnco et al. (2014) weisen in einer Untersuchung zum Vergleich zweier Selbsteinschätzungsskalen zur kognitiven Flexibilität (*CF Scale* und *CF Inventory*) mit neuropsychologischen Testungen darauf hin, dass bei hoher konvergenter Validität zwischen den beiden Selbsteinschätzungsinstrumenten beide Skalen eine schwache Übereinstimmung mit den neuropsychologischen Messungen zeigten. Die Autoren schlussfolgern, dass die unterschiedlichen Arten der Testungen verschiedene Aspekte der kognitiven Flexibilität erfassen.

Darüber hinaus liegen Kriterien zur Überprüfung einer Ausrichtung von Lernumgebungen auf kognitive Flexibilität vor. Dabei werden in den vier Domänen Lerninhalte, Methoden, Interaktion und Beurteilung jeweils die Facetten multiple Modi und multiple Perspektiven berücksichtigt (Chieu, 2007a).

Cognitive Theory of Multimedia Learning

Nach Mayer (2009) basiert die Konzeption multimedialer Lernsettings auf der Grundannahme einer bestimmten Vorstellung von Lernprozessen mit digitalen Materialien. Ausgehend von diesen Vorstellungen wird im Folgenden die theoretische Fundierung der virtuellen Labore zur Gewässeranalytik erörtert, bevor im Anschluss die inhaltliche und didaktische Ausgestaltung näher beschrieben wird.

Frühe Theorien des multimedialen Lernens maßen dem menschlichen Gedächtnis unbegrenzte Kapazität zu. Gleichzeitig wurde die Aufnahme von Informationen als passiver, auf einen Rezeptionskanal beschränkter Prozess betrachtet. Lernende würden demnach Informationen unabhängig von der medialen Aufbereitung aufnehmen und diese ihrem Gedächtnis hinzufügen (Dretske, 2003). Dieser eher philosophisch orientierte Ansatz, welcher als *Information-Delivery Theory* bekannt wurde, wurde durch die empirische Bildungsforschung, insbesondere mit Aufkommen der *Cognitive Load Theory* (u.a. Chandler & Sweller, 1991; van Merriënboer & Sweller, 2005) ausführlich widerlegt (z. B. Sweller, 1994; Sweller et al., 1998; Paas, Renkl & Sweller, 2003; Sweller et al., 2011). Die Grundannahme einer begrenzten kognitiven Kapazität zog die Frage nach sich, wie diese begrenzten Ressourcen bestmöglich ausgeschöpft werden können.[8]

Mayer (2009) entwickelte Experimente, in deren Verlauf Proband:innen isoliert diskrete Merkmale einer multimedialen Repräsentation angeboten wurden. Ausgehend von den Ergebnissen angegliederter Transferwissenstests leitete der Autor Designprinzipien ab. Nach Clark und Mayer (2008) sind folgende Punkte im Rahmen multimedialen Lernens lernförderlich: [9]

- Nutzung von Worten und Grafiken in Kombination (Multimedia-Prinzip)
- Zusammenhang von geschriebenen oder gesprochenen Worten mit korrespondierenden Grafiken (Kontiguitäts-Prinzip)
- Darbietung von Text in Audioform anstelle von geschriebenen Bildschirmtexten (Modalitäts-Prinzip)
- Erläuterung von Grafiken durch Text oder Audio, keine Kombination von Audio und Text (Redundanz-Prinzip)
- Auslassung interessanter, nicht relevanter Materialien (Kohärenz-Prinzip)
- Nutzung umgangssprachlichen, informellen Stils und virtueller Coaches (Personalisierungs-Prinzip)

[8] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2020a, S. 449–450), modifiziert
[9] Absatz und Aufzählung erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2020a, S. 449–450), modifiziert

- Segmentierung und Vorentlastung von Lerneinheiten (Segmentierungs- und Vorbildungs- Prinzipien)

Eine ausführliche Darstellung dieser Prinzipien einschließlich konkreter Umsetzungsbeispiele ist *Kapitel 3.1: Umsetzung der Kriterien für Lernen mit Multimedia in den virtuellen Laboren* zu entnehmen.

Große Zustimmung erhält darüber hinaus das von Mayer (2009) vorgeschlagene Modell zum Prozess des Lernens mit Multimedia. Im Gegensatz zur *Information Delivery Theory* stellt er die Informationsaufnahme über mehrere Kanäle und Modalitäten in den Vordergrund (vgl. Abbildung 9). Während bildliche Darstellungsformen das sensorische Gedächtnis über die Augen erreichen, können Worte einerseits in Textform visuell, andererseits als gesprochenes Wort über das Gehör rezipiert werden. Nach der Selektion der eingehenden Informationen werden diese im Arbeitsgedächtnis miteinander in Beziehung gesetzt und verknüpft. Anschließend werden die selektierten und organisierten Informationen als verbales oder visuelles Modell mit Vorwissen aus dem Langzeitgedächtnis verknüpft. Durch diese Verknüpfung und die anschließende Speicherung der neu gebildeten Zusammenhänge und Schemata findet letztlich ein Lernprozess statt.[10]

Moreno und Mayer (2007) stellen daran anknüpfend ein kognitiv-affektives Modell des Lernens mit Medien auf und leiten Designprinzipien für interaktive digitale Lernumgebungen ab, welche effektives Lernen durch kognitive Entlastung der Lernenden fördern sollen.

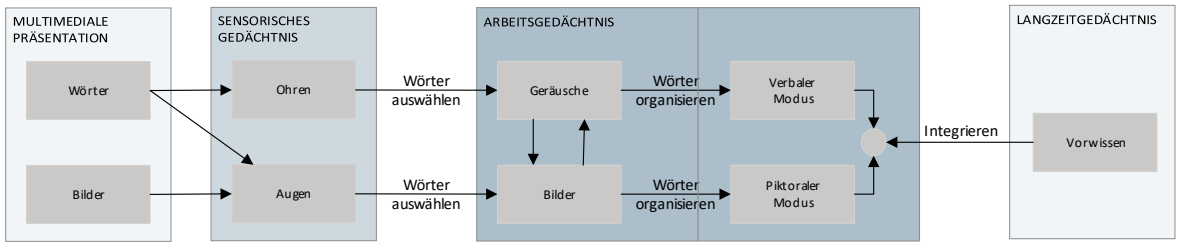


Abbildung 9: Modell des Lernens mit Multimedia (eigene Darstellung nach Mayer, 2008, zuerst veröffentlicht in Neff et al., 2020a).

Mayers Theorie wurde allerdings hinsichtlich der fehlenden Berücksichtigung motivationaler und emotionaler Faktoren des Lernens kritisiert (Astleitner, 2004; Astleitner et al., 2006). Mayer modifizierte daraufhin seine Theorie unter Berücksichtigung der Kritik: Er integrierte die Arbeiten von T. Malone und Lepper (1987) zum *Instructional Design* sowie den Ansatz für multimediales Lernen von Hede (2002). Ebenfalls fanden

[10] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2020a, S. 449–450), modifiziert

in diesem Kontext die Arbeiten zum *ARCS*-Modell *(Attention – Relevance – Confidence – Satisfaction)* Beachtung. In diesem wurden vier Kategorien identifiziert, welche in Kombination und Beziehung untereinander eine motivierende Gestaltung von Lernumgebungen ermöglichen sollen. Dabei gilt es, die Aufmerksamkeit der Lernenden zu wecken (*Attention*) und die persönliche Relevanz der Inhalte hervorzuheben (*Relevance*). Sind diese Punkte erreicht, muss das Selbstvertrauen und die Zuversicht der Lernenden auf ein lernförderlich adäquates Niveau gebracht werden, da zu wenig – aber auch zu viel – Zuversicht, Ängste oder Selbstüberschätzung ein effektives Lernen gefährden können (*Confidence*). Als letzter Faktor im Modell soll ein Erfolgserlebnis die Motivation aufrechterhalten und den Erfolg des Lernprozesses honorieren (*Satisfaction*). Dies kann extrinsisch über Noten, Zertifikate oder ähnliche Anerkennungen von Leistungen geschehen oder auf der intrinsischen Ebene durch positive Interaktionen, gesteigertes Selbstwertgefühl oder Kompetenzerleben stattfinden (Keller, 2010).

Simultan zu den vorgestellten Theorien multimedialen Lernens wurden die Potenziale multimedialer Lernmedien und deren Nutzung hinterfragt. Insbesondere für inhaltlich komplexe und stark verzweigte Themengebiete (vgl. „*ill-structured Domains*“ der *Cognitive Flexibility Theory* nach Spiro et al., 1988) gilt die Nutzung multipler Repräsentationen als förderlich für den Erwerb von Transferwissen (Jacobson & Spiro, 1993; Ainsworth, 2006). Dabei liegt der Fokus auf einer gezielten Anregung mehrerer rezeptiver Kanäle bei den Lernenden.[11]

Werden die genannten Theorien bei der Konzeption von Lernumgebungen berücksichtigt, erweisen sich digitale Endgeräte als geeignetes Medium zur Vermittlung von Transferwissen über komplexe, variable Inhaltsdomänen (Spiro et al., 1992). Bezogen auf die virtuellen Labore zur Gewässeranalytik sind die beschriebenen Erwartungen einer „*Ill-Structuredness*“ an eine komplexe Inhaltsdomäne erfüllt (Spiro et al., 1992): Die Komplexität der im Ökosystem (Fließ-)Gewässer interdependenten Bedingungsfaktoren sowie fallabhängig wechselnde Problemstellungen und Lösungen spiegeln gleichermaßen die Komplexität des realen Lerngegenstandes wie auch der zu vermittelnden Inhaltsdomäne wider. Somit erscheint eine Einbindung sinnstiftender multipler Repräsentationen zielführend. Während die *DeFT*-Theorie *(Design, Functions, Tasks)* nach Ainsworth (2006) allgemeine Anhaltspunkte und grundsätzliche Überlegungen fokussiert, stellt die aus der *Cognitive Flexibility Theory* abgeleitete *Random Access Instruction* (Spiro & Jehng, 1990; Spiro et al., 1992) deutlich präzisere Forderungen und Gestaltungskriterien auf. Die Entscheidung für eine theoretisch fundierte Gestaltung der virtuellen Labore zur Gewässeranalytik fiel unter Berücksichtigung der oben angeführten Theorien auf eine Kombination der *Cognitive Flexibility Theory* und der von Mayer (2009) beschriebenen Multimedia-Prinzipien. Die Kombination erscheint möglich, da

[11] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2023, S. 18), modifiziert

die Theorien keine sich gegenseitig ausschließenden Kriterien aufweisen. Entscheidendes Auswahlkriterium waren jedoch die überwiegend gute Rezeption der Theorien in der Literatur sowie die Passung auf die vorgesehene Inhaltsdomäne, da die Wirksamkeit einer Ausgestaltung von Lernumgebungen auf Grundlage der genannten Theorien jeweils durch Transferwissenstests erhoben wurde. Dies deckt sich mit den an die virtuellen Labore gestellten Anforderungen, da reines Faktenwissen zur Probenahme, Messwerterfassung und Beurteilung in einem komplexen naturnahen Ökosystem den Anforderungen der realen Welt nicht gerecht werden kann. Neben der mediendidaktischen Fundierung soll auch die Nutzbarkeit der Lernumgebungen im weiteren Verlauf näher betrachtet werden.[12;13]

Usability der virtuellen Labore

Die Gebrauchstauglichkeit (*„Usability"*) dient der Beurteilung von Mensch-Computer-Interaktionen mit dem Ziel einer Bewertung der effektiven, effizienten und zufriedenstellenden Nutzung eines Systems. Dieses ursprünglich auf klassische Bürotätigkeiten angewandte Konstrukt gewinnt in der Gestaltung digitaler Lernsettings an Bedeutung.

Die empirisch erfasste *Usability* in einer spezifischen Situation (bestimmte Nutzer:innen möchten bestimmte Ziele in bestimmten Kontexten erreichen; Deutsches Institut für Normung, 2016) sind gleichermaßen auf beliebige Datensysteme und auf digitale Lernumgebungen anwendbar (Karapanos et al., 2018). Die Norm legt Grundsätze und Empfehlungen zur Gestaltung computerisierter Produkte und Systeme fest. Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Erwartungskonformität, Lernförderlichkeit, Steuerbarkeit, Fehlertoleranz und Individualisierbarkeit werden als Subkategorien der Empfehlung zur Gestaltung entsprechender Systeme angeführt (W. Schneider, 2008). Die Einhaltung der weiter ausdifferenzierten Empfehlungen soll eine gewinnbringende Computer-Mensch-Interaktion sichern. Die *Usability* gliedert sich in zwei Hauptteile: *System Usability* (Gebrauchstauglichkeit des Systems) und *Content Usability* (Gebrauchstauglichkeit der Inhalte). Der didaktische Mehrwert einer Erhebung der Gebrauchstauglichkeit einer Lernumgebung ergibt sich aus der *Cognitive Load Theory*: Kann Verarbeitungskapazität durch Reduzierung des *Extraneous Cognitive Load* freigegeben und als *Germane Cognitive Load* auf die Schemabildung und Wissensvernetzung übertragen werden, folgt daraus eine lernförderliche Wirksamkeit der optimierten *Usability* (Chandler & Sweller, 1991).

Im Rahmen einer quantitativ ausgelegten Studie evaluierten Karapanos et al. (2018) exemplarisch die *System Usability* eines virtuellen Labors. Basierend auf einem forschungspragmatischen, validierten Erhebungsinstrument nach Brooke (1996) gelangten

[12] Abschnitt ab Modell erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2020a, S. 450–451), modifiziert
[13] Abschnitt in Auszügen ebenfalls veröffentlicht in Neff et al. (2023, S. 18), modifiziert

die Autor:innen zu dem Ergebnis, dass die *System Usability* des getesteten virtuellen Labors zum Themengebiet „Zellbiologie“ mit rund 67 erreichten von 100 maximal möglichen Punkten der eingesetzten Skala eine befriedigende Gebrauchstauglichkeit aufweist (Karapanos et al., 2018). Des Weiteren konnten in derselben Studie Hinweise auf einen positiven Zusammenhang zwischen *System Usability* und Lernerfolg aufgezeigt werden. Aufgrund des wiederkehrenden und durch einen Styleguide sowie mehrstufige interne Qualitätssicherungsverfahren standardisierten Aufbaus und der ebenso normierten Gestaltungs- und Bedienkonzepte ist die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf weitere virtuelle Labore zu erwarten.[14]

[14] Unterkapitel "Usability der virtuellen Labore" erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2020a, S. 451–452), modifiziert

2.5 Lernende: Kognitive und motivationale Aspekte

Lernende: Kognitive und motivationale Aspekte

Cognitive Load Theory (CLT)

- Die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses ist begrenzt.
- Die Kapazität des Langzeitgedächtnisses ist nahezu unbegrenzt.
- Kognitive Beanspruchung besteht aus drei relevanten Subfacetten:
  1. *Intrinsic Cognitive Load* (ICL) ist themenspezifisch immanent.
  2. *Extraneous Cognitive Load* (ECL) ist durch Lernmaterialien & Strukturierung bedingt.
  3. *Germane Cognitive Load* (GCL) wird zum aktiven Lernen (Schemabildung & -automatisierung) genutzt.
- Die Subfacetten des *Cognitive Load* sind additiv.
- Darüber hinaus kann freie ungenutzte Kapazität existieren.
- Gezielte Reduktion des ICL ist kaum möglich, aber ein Management kann durch Vorentlastung und Segmentierung erfolgen.
- ECL kann durch Optimierung der Strukturierung und Materialgestaltung reduziert werden.
- GCL kann durch Achtsamkeit und Metakognitionsansätze gefördert werden.
- Integrative digitale Lernumgebungen eignen sich sehr gut zur Anwendung der CLT.

Flow

- *Flow*-Erleben beschreibt den Zustand reflexionsfreien Aufgehens in einer Tätigkeit.
- *Flow* ist ein Anreiz des Tätigkeitsvollzugs.
- *Flow*-Erleben erfordert ein gewisses Anspruchsniveau.
- Zwischen Langeweile und Überforderung existiert ein schmaler *Flow-Channel*.
- *Flow*-Erleben stellt eine leistungsrelevante Variable dar.

Motivation

- Der Fokus der Arbeit liegt auf der aktuellen Motivation.
- Motivation hängt von der leistungsthematischen Strukturierung einer Situation ab.
- Person- und situationsspezifische Faktoren bedingen die Motivation.
- Interesse kann als Teilaspekt der Motivation operationalisiert werden.
- Anforderungsniveau und wahrgenommene Herausforderung fließen in die aktuelle Motivation mit ein.
- Versagenswahrscheinlichkeit und Befürchtungen bedingen die Motivation ebenfalls.
- Digitale Lernumgebungen eignen sich gut zur Motivationsförderung.
- In der Literatur werden häufig Neuheitseffekte mit berichtet.

„Wenn Personen eine Innovation in einer Schule akzeptieren und anwenden sollen, dann müssen sie sowohl dazu fähig als auch motiviert sein“ (Jäger, 2004, S. 123). Angesichts dieser von Jäger formulierten Grundvoraussetzung für die Übernahme einer Innovation in Schulen erscheint es zwingend erforderlich, die motivationalen und kognitiven Aspekte der zu implementierenden Innovation näher zu betrachten. Im folgenden Kapitel werden hierzu die der Studie zugrundeliegenden theoretischen Aspekte des *Cognitive Load*, des *Flow*-Erlebens sowie der aktuellen Motivation auf der Seite der Lernenden eingehend thematisiert.

Cognitive Load

Die Grundannahmen der *Cognitive Load Theory* stellen sowohl in der Konzeption der Lernumgebungen für die vorliegende Arbeit als auch im Zuge der Evaluation eine der wichtigsten theoretischen Fundierungen dar. Die Bedeutung dieser Theorie resultiert dabei nicht zuletzt aus der übergeordneten Betrachtungsebene kognitiver Architektur des Menschen. In diesem Teilkapitel werden daher sowohl die theoretischen Grundlagen der Theorie als auch die relevanten Implikationen für diese Arbeit vorgestellt.

Operationalisierung

Nach Paas und van Merriënboer (1994a) ergeben sich mögliche Ursachen für kognitive Beanspruchungen in drei Bereichen: Die Aufgabe selbst oder das Umfeld der Aufgabenbearbeitung, Persönlichkeitsfaktoren des mit der Aufgabe betrauten Subjekts und die Interaktion zwischen Aufgabe und Subjekt. Chandler und Sweller (1991) stellen die Zielsetzung der *Cognitive Load Theory* wie folgt dar:

> *Cognitive load theory suggests that effective instructional material facilitates learning by directing cognitive resources toward activities that are relevant to learning rather than toward preliminaries to learning.*
> (Chandler & Sweller, 1991, S. 293)

Die *Cognitive Load Theory* befasst sich mit den verschiedenen kognitiven Beanspruchungen, welche insbesondere komplexe Lerninhalte mit sich bringen und wie die vorhandenen kognitiven Ressourcen möglichst effektiv strukturiert werden können. Eine begrenzte kognitive Kapazität des Arbeitsgedächtnisses stellt dabei die wichtigste Grundannahme der *Cognitive Load Theory* dar (Sweller, 2010).

Schemabildung und Automatisierung gelten als die hauptsächlichen Mechanismen des Lernens als intellektuelle Aktivität (Sweller, 1994). Lernprozesse zielen folglich immer auf die Neubildung und Verinnerlichung von Schemata ab. Folglich liegt der Theorie eine konstruktivistische Sichtweise auf das Lernen zugrunde.

Nach gegenwärtiger Konzeption des *Cognitive Load* Konstrukts kann die Gesamtkapazität des Arbeitsgedächtnisses durch vier Aspekte kognitiver Beanspruchung zu variablen Anteilen eingenommen werden: *Intrinsic Load*, *Extraneous Load*, *Germane Load* und *Free Capacity* (Moreno & Park, 2010). Dabei werden die drei *Load*-Komponenten additiv betrachtet und in ihrer Summe als Cognitive Load bezeichnet; die freie Kapazität fließt nicht in die Aufsummierung mit ein (Moreno & Park, 2010).

Sweller (2003) unterscheidet zwischen dem Lernen von Material mit geringer Elementinteraktivität und dem Verstehen von Material mit hoher Elementinteraktivität. Als wenig komplex werden dabei Lernprozesse angesehen, welche das gleichzeitige

Verarbeiten von mehreren Elementen nicht erforderlich machen. So wäre beispielsweise das Auswendiglernen chemischer Trivialnamen eine wenig komplexe Lerntätigkeit, da die jeweiligen Paare aus Nomenklatur und Strukturformel ohne die Betrachtung anderer Paare gelernt werden können. Das Lernen des Kohlenstoffkreislaufs hingegen erfordert ein Verstehen und Integrieren der ablaufenden Prozesse. Dementsprechend ist hier eine hohe Interaktivität der den Kreislauf konstituierenden Elemente gegeben – diese Lernaufgabe gilt damit als komplex (vgl. Sweller, 2003).

Müssen zum Verständnis eines Lerninhaltes zahlreiche Elemente simultan betrachtet werden, da diese isoliert voneinander nicht die beabsichtigte Sinnhaftigkeit ergeben, so kann daraus eine hohe kognitive Beanspruchung resultieren. Diese inhaltsspezifisch variierende Komplexität beruht folglich auf der Interaktivität der einzelnen die Inhaltsdomäne konstituierenden Elemente. Die daraus resultierende kognitive Beanspruchung wird als *Intrinsic Cognitive Load* bezeichnet (Sweller, 1993; Sweller & Chandler, 1994). Beispielsweise ergibt sich die Komplexität des Kohlenstoffkreislaufs in der Umwelt nicht aus der reinen Kenntnis der verschiedenen Verbindungen, in welchen Kohlenstoff vorliegen kann. Die Komplexität des Lerninhaltes ergibt sich vielmehr daraus, dass es nicht ausreicht, die Verbindungen benennen und unterscheiden zu können, sondern dass zahlreiche Verbindungen, ihre Umwandlungs- und Abbauprodukte sowie Faktoren, die entsprechende Prozesse beeinflussen, simultan betrachtet werden müssen. Nur durch die Querbeziehungen und wechselseitigen Einflüsse dieses multiparametrischen Systems wird die volle Komplexität erfahrbar.

Intrinsic Cognitive Load wurde zunächst als unveränderlich betrachtet, da die Elementinteraktivität eines Lerninhaltes nicht direkt beeinflusst werden kann (Sweller, 1994). Inzwischen ist auch die Kontrolle beziehungsweise ein Management des *Intrinsic Cognitive Load* verstärkt in den Fokus des Diskurses gerückt. Durch entsprechende Strukturierung, insbesondere durch Sequenzierung und Vorentlastung von Lerninhalten kann eine künstliche Reduktion der immanenten kognitiven Beanspruchung erfolgen (van Merriënboer & Ayres, 2005).

Extraneous Cognitive Load stellt eine kognitive Beanspruchung dar, die nicht durch das primäre Ziel des Lernens selbst zustande kommt, sondern sich aus der kognitiven Verarbeitung der Materialien ergibt. Die zur Strukturierung der Lernmaterialien und Inhalte erforderlichen kognitiven Kapazitäten stehen dabei nicht zum eigentlichen Lernen zur Verfügung (Sweller et al., 1990). Wird der ohnehin schon komplexe Lerninhalt des genannten Beispiels nun auch noch in einer äußeren Form präsentiert, welche eine intensive kognitive Auseinandersetzung des Lernenden mit diesen Materialien erforderlich macht, so kann es zum *Cognitive Overload* (van Merriënboer et al., 2003) kommen – das Lernen wäre dann beeinträchtigt.

Germane Cognitive Load ist als die Subfacette des *Cognitive Load* Konstruktes, welche den eigentlichen Lernprozess durch Schemabildung und -automatisierung innerhalb der

begrenzten Kapazitäten des Arbeitsgedächtnis erfasst, zu verstehen. Dabei kann auch der *Germane Cognitive Load* nach Sweller et al. (1998) bedingt gefördert werden. Als Möglichkeit hierzu nennen die Autoren die gezielte Steuerung der Aufmerksamkeit der Lernenden auf den Lernprozess, also die Konstruktion und die achtsame Abstraktion von Schemata (Sweller et al., 1998).

Die Art der Instruktion kann vorhandene kognitive Kapazitäten unterschiedlich beanspruchen. Dabei wird nach Brünken et al. (2010) eine materialbezogene kognitive Beanspruchung (*Extraneous Cognitive Load*) als verschwenderisch beschrieben, wohingegen eine lernbezogene kognitive Beanspruchung (*Germane Cognitive Load*) als nützlich verstanden werden kann.

Bei personenspezifisch konstantem angenommenen Limit der kognitiven Kapazität kann dennoch nicht angenommen werden, dass die zur Verfügung stehende Kapazität vollumfänglich in die Auseinandersetzung mit einer Aufgabe einfließt. Der verbleibende Anteil an kognitiver Kapazität wird daher als freie Kapazität angenommen, welche zusätzlich zu den drei Subfacetten des *Cognitive Load* auftritt (Paas, Tuovinen et al., 2003).

Nach Chandler und Sweller (1991) können sogenannte *Worked Examples*, also fertig ausgearbeitete Anschauungsbeispiele, lernförderlich wirken und sollten verstärkt Eingang in Lernsettings finden, vorzugsweise in Kombination mit klassischen Problem- oder Aufgabenstellungen.

Hier ergibt sich eine Überschneidung mit der aus der *Cognitive Flexibility Theory* abgeleiteten *Random Access Instruction*, in welcher *Worked Examples* ebenfalls als gut geeignet angesehen werden, um komplexe Themenbereiche aus verschiedenen Perspektiven zu ergründen. Dies ergibt sich nicht zuletzt aus der Erkenntnis, dass Schemabildung durch *Worked Examples* vereinfacht werden kann (Cooper & Sweller, 1987). Paas und van Merriënboer (1994b) stellen allerdings fest, dass eine Variation in den Problemstellungen während des Lernprozesses nur dann positive Auswirkungen auf die Schemabildung mit sich bringt, wenn der *Extraneous Cognitive Load* reduziert wird.

Das Konstrukt des *Cognitive Load* weist darüber hinaus Querbezüge zum Konstrukt des Workloads auf, da die durch einen Lernenden wahrgenommenen Anforderungen einer Aufgabe betrachtet werden. Dabei werden jedoch die Überzeugungen (*Beliefs*), Erwartungen und Ziele der Lernenden in der *Cognitive Load Theory* nicht mit berücksichtigt (Moreno & Park, 2010).

Die Limitationen der Theorie ergeben sich direkt aus ihrer fokussierten Betrachtung der kognitiven Strukturen des Menschen und deren Nutzung: Als einzige relevante Eigenschaft einer Person wird in der *Cognitive Load Theory* das Vorwissen betrachtet. Folglich werden andere Lernvoraussetzungen auf persönlicher Ebene, wie etwa kognitive

Fähigkeiten oder motivationale und affektive Charakteristika nicht mit einbezogen (Moreno & Park, 2010).

Cognitive Load und Lernprozesse

Die Funktion des Lernens ist gemäß der *Cognitive Load Theory* in der Bildung automatisierter Schemata zu sehen, welche in der nahezu unbegrenzten Kapazität des Langzeitgedächtnisses abgelegt werden können, wodurch wiederum das Arbeitsgedächtnis entlastet wird und die kognitiven Prozesse in diesem Teil des Gedächtnisses auf die Problemlösung fokussiert werden können (Moreno & Park, 2010).

So kann das vergleichsweise anspruchsvolle und langsame Verarbeiten von Informationen im Arbeitsgedächtnis mit zunehmender Expertise reduziert werden, wobei jedoch besondere Effekte im Zusammenhang mit der Expertise der Lernenden berücksichtigt werden müssen – diese werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels erläutert, insbesondere sei hierbei auf den *Expertise Reversal Effect* verwiesen (Moreno & Park, 2010).

Allem voran können durch eine Fehlleitung der Aufmerksamkeit der Lernenden Lernmaterialien eine kognitive Beanspruchung auslösen, welche Kapazitäten in Anspruch nimmt (Sweller et al., 1990). Darüber hinaus können auch Materialien, die durch die Lernenden verknüpft und integriert werden müssen, eine hohe materialbezogene kognitive Beanspruchung mit sich bringen (Sweller et al., 1990).

Weist ein Lerninhalt eine hohe Elementinteraktivität auf und beansprucht damit bereits viel kognitive Kapazität, kann zusätzlicher *Extraneous Cognitive Load*, welcher durch die mangelhafte Strukturierung der Lerninhalte zustande kommt, effektives Lernen behindern (Sweller, 1994).

Pollock et al. (2002) untersuchten die Wirksamkeit eines Ansatzes, in welchem Informationselemente eines komplexen Themengebietes zunächst isoliert dargeboten wurden, bevor in der zweiten Phase erst die volle Komplexität und Interaktivität der Elemente in den Lernprozess einbezogen wurden. Eine Sequenzierung der Lerninhalte zur Reduzierung der Komplexität war im Bereich der *Cognitive-Load*-Forschung lange Zeit wenig beachtet, wenngleich Sequenzierung und taxonomische Strukturierung in anderen Bereichen der Lehr-Lern-Forschung bereits etabliert waren (Bannert, 2002).

Weder die Ansätze der Sequenzierung im Sinne des Unterteilens komplexer Aufgaben in kleinere Abschnitte mit reduzierter Elementinteraktivität und damit geringerer Komplexität noch das Sequenzieren durch die Ausgestaltung eines vereinfachten Falls widersprechen der *Cognitive Load Theory* im Grundsatz. Da für eine Erschließung der vollständigen Komplexität des Inhaltes letztlich immer auf den vollständigen, komplexen Fall mit hoher Elementinteraktivität hin gearbeitet werden muss, sehen van

Merriënboer und Sweller (2005) diese Ansätze als gut vereinbar mit der ursprünglichen Theorie an.

Neben *Scaffolding* und einer Strukturierung der Inhalte vom Einfachen zum Komplexen hin, empfehlen van Merriënboer et al. (2003) die Bereitstellung komplexerer unterstützender Informationen vor der eigentlichen Aufgabenbearbeitung, wohingegen weniger komplexe prozedurale Informationen auch simultan zur Aufgabenbearbeitung, also *just in time*, angeboten werden können.

Fortgeschrittene Lernende können auf eine Vielzahl bekannter Schemata zurückgreifen. Diese werden nach der ursprünglichen Schemabildung im nahezu unbegrenzten Langzeitgedächtnis abgespeichert und können aus diesem abgerufen werden. Aufgrund der Automatisierung eines Schemas muss eine Problemstellung, auf welche das entsprechende Schema anwendbar ist, nicht aktiv im begrenzten Arbeitsgedächtnis behandelt werden. In der Folge wird Kapazität im Arbeitsgedächtnis durch das Vorhandensein automatisierter Schemata frei (Sweller et al., 1998).

Tiettmeyer et al. (2017) konnten die Abhängigkeit des erlebten *Cognitive Load* vom Vorwissensstand der Lernenden im Fach Chemie am Beispiel der Erstellung von Lewis-Strukturen belegen. Mit zunehmender Expertise der Lernenden konnten hier rückläufige kognitive Beanspruchungen bei gleichbleibender Variation der Anforderungen nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse können am ehesten durch das Vorhandensein automatisierter Schemata erklärt werden, welche Lernenden mit höherer Expertise ein einfacheres Verständnis ermöglichen.

In der Bewusstmachung und Achtsamkeit in Bezug auf die Schemabildung zur Förderung des *Germane Cognitive Load* könnte der Ansatz einer metakognitiven Herangehensweise erkannt werden. Aktive Bewusstmachung des Lernprozesses kann jedoch nur dann funktionieren, wenn die Kapazitätsgrenzen des Arbeitsgedächtnisses dabei nicht überschritten werden (Sweller et al., 1998).

Moreno und Park (2010) sehen eine ungesteuerte Herangehensweise an neue Lernmaterialien für Novizen sogar als so anspruchsvoll an, dass sie eine Lernförderlichkeit mangels gut ausgeprägter Schemata – auf welche Experten zurückgreifen können – ausschließen.

Cognitive Load Theory in der Gestaltung digitaler Lernumgebungen

Cognitive Load ist ein bedeutender Faktor für die Gestaltung von Lernumgebungen (Chandler & Sweller, 1996). Die *Cognitive Load Theory* stellt die kognitive Basis für Prinzipien des *Instructional Design* dar und vereint dadurch zahlreiche praxisorientierte Ansätze auf einer gemeinsamen theoretischen Grundlage (Jong, 2010).

Nyachwaya und Gillaspie (2016) stellten in einer Untersuchung englischsprachiger Lehrbücher zur allgemeinen Chemie fest, dass aus Sicht der *Cognitive Load Theory* sowie unter Gesichtspunkten der Gestaltung multimedialer Lernmaterialien die Integration von Abbildungen und Elementen teilweise zu wünschen übrig ließen. Daran anknüpfend bleibt zu mutmaßen, dass eine digitale Lösung im Gegensatz zu einem klassischen Lehrbuch durch Verlinkungen und interaktive Querverweise flexibler und zielführender strukturiert werden kann.

Als integrative Lernformate stellen daher insbesondere multimediale (digitale) Lernumgebungen ein bedeutsames Anwendungsgebiet für die *Cognitive Load Theory* dar. Solche integrativen Lernformate, welche zwei oder mehr Informationsquellen sinnvoll vereinen, sind nach Chandler und Sweller (1991) immer dann zuträglich für effizientes Lernen, wenn die Integration eine notwendige Vorbedingung für das Lernen darstellt. Liegen Informationen jedoch in verschiedenen Repräsentationsformen oder Quellen redundant vor, so ist eine Integration weder erforderlich noch gewinnbringend (Chandler & Sweller, 1991). In solchen Fällen sind die isolierte Darstellung und eine Elimination redundanter Informationen aus Sicht der Instruktion zu bevorzugen, sofern die Informationen selbsterklärend sind (Chandler & Sweller, 1991).

Einige konkrete Hinweise zur Gestaltung digitaler Lernumgebungen lassen sich direkt aus der Theorie und der zugehörigen Forschung ableiten. So können beispielsweise animierte Grafiken das Verständnis von Bewegungsabläufen oder zeitlichen Verläufen unterstützen, während Animationen in statisch ausreichend repräsentierten Sachverhalten zu einer Erhöhung des *Cognitive Load* führen könnten (Bétrancourt & Tversky, 2000).

Müssen Lernende zeitlich oder räumlich versetzt dargebotene Lerninhalte vor dem eigentlichen Lernprozess zunächst integrieren, so ist dies für den Lernprozess hinderlich (Kalyuga et al., 1999). Ein solcher lernhinderlicher Effekt wird als *Split-Attention Effect* bezeichnet: Die ohnehin begrenzten kognitiven Ressourcen müssen zumindest teilweise für Informationssuche und Integration aufgewendet werden (Kalyuga et al., 1999). Gerade diese Anforderungen an die räumliche und zeitliche Darbietung der Lerninhalte können in digitalen Umgebungen zielgerichtet umgesetzt werden.

Stehen verschiedene Informationsquellen zur Verfügung, welche in sich selbst bereits umfänglich und verständlich sind, so kann eine kognitive Überlastung durch Redundanz die Folge sein. Werden auf diese Weise Informationen auf mehreren Kanälen simultan dargeboten, wird dies als *Redundancy Effect* bezeichnet (Kalyuga et al., 1999). Zur Vermeidung dieser Redundanzen ist eine sorgfältige Gestaltung von Lernumgebungen unerlässlich.

Bei beiden potenziell lernhinderlichen Effekten ist die Expertise der Lernenden mit zu berücksichtigen. Während weniger erfahrene Lernende beispielsweise zusätzlich zur Darstellung in Diagrammform eine Erläuterung in Textform benötigen, kann diese für Fortgeschrittene bereits eine lernhinderliche Informationsredundanz nach dem *Redundancy Effect* darstellen (Kalyuga et al., 1998). Dieses Phänomen wurde als *Expertise Reversal Effect* beschrieben (Kalyuga et al., 2003; Kalyuga & Sweller, 2004). Auch für den Bereich neuerer digitaler Medien konnte dieser Effekt bestätigt werden (Richter et al., 2018).

Einen Lösungsansatz für dieses Problem untersuchten Kalyuga und Sweller (2005). Insbesondere im Bereich des *E-Learning* schlagen sie adaptive Lernumgebungen vor, welche auf Basis dynamischer Assessments innerhalb der Lernumgebung die nächsten Aufgaben auf den Lernenden anpassen (Kalyuga & Sweller, 2005).

Eine solche Adaption der Lernumgebung selbst erscheint aus didaktischer Perspektive sinnvoll, stellt jedoch deutliche Herausforderungen an die technische Umsetzung wie auch an das forschungspraktische Vorgehen. Limitationen durch die Lernplattform selbst wie auch die Vielzahl möglicher resultierender Lernpfade, welche ein appliziertes Forschungsdesign deutlich erschwert hätten, führten in der vorliegenden Arbeit dazu, dass diese Überlegung nicht weiter verfolgt wurde. Als abgemilderte Alternative fanden stattdessen interaktive Elemente und gestufte Lernhilfen Eingang in die Konzeption.

Es gilt zu berücksichtigen, dass nicht jede Art von Hilfe jedem Lernenden gleich nützlich ist, wobei insbesondere der Stand des Vorwissens ein begrenztes Fenster vorgibt, in welchem Lernende durch Hilfestellungen erfolgreich gefördert werden können (Seufert et al., 2007; Seufert & Brünken, 2006).

Messung und Beurteilung von Cognitive Load

Zur Erfassung des *Cognitive Load* können sowohl subjektive als auch objektive Messgrößen herangezogen werden. Als objektive Ansätze zur Bestimmung der kognitiven Beanspruchung können beispielsweise Lernergebnisse, Aufgabenschwierigkeit oder auch *Time on Task* herangezogen werden, da diese Parameter direkt oder indirekt auf den *Cognitive Load* rückschließen lassen (Brünken et al., 2010). Darüber hinaus kann die kognitive Beanspruchung auch sehr objektiv durch physiologische Messverfahren erfasst werden, indem etwa Gehirnaktivitäten, Augenbewegungen oder Variationen der Herzfrequenz erfasst werden. Allerdings bringen diese Verfahren teils erhebliche Anforderungen an klinische Settings mit sich und können darüber hinaus teilweise nur bedingt als konstruktvalide betrachtet werden (Brünken et al., 2010; Klepsch et al., 2017).

Subjektive Selbsteinschätzungsskalen zum *Cognitive Load* können insbesondere bei wenig engmaschiger Testung nur sehr bedingte Rückschlüsse darauf zulassen, welche

Teilaufgaben für die Genese welchen Typs von kognitiver Beanspruchung verantwortlich zu machen sind (Brünken et al., 2010).

Erfolgt die Erhebung des *Cognitive Load* unter Zuhilfenahme einer Selbsteinschätzungsskala, so ist zu berücksichtigen, dass diese Ratings meist nachträglich erfolgen und nicht direkt mit einzelnen Lernsituationen in Zusammenhang gebracht werden können. Brünken et al. (2010) stellen wiederholte Messungen im zeitlichen Verlauf einer Arbeitsphase als möglichen Lösungsansatz zu dieser Problemstellung vor.

Historisch wurde zunächst nicht direkt der *Cognitive Load* in seinen Subfacetten betrachtet, sondern vielmehr Bezug auf die *Instructional Efficiency* genommen (Paas & van Merriënboer, 1993). Hierzu kann aus der Erhebung von Performanz und mentaler Anstrengung der Lernenden ein Score gebildet werden, der die Effizienz des Instruktionssettings darstellt, und damit ebenfalls indirekt auf den *Cognitive Load* schließen lässt (Paas, Tuovinen et al., 2003).

Aufgrund der erforderlichen Erfassung mehrerer Faktoren bei der Erhebung des *Cognitive Load* und angesichts der geforderten zeitlich wiederholten Messung eignen sich kurze Ratingskalen auch unter praktischen Gesichtspunkten gut für die Evaluation unter Lernenden.

Wenngleich mittels Faktorenanalyse eines entsprechenden Fragebogens sichergestellt werden kann, dass die verschiedenen Typen kognitiver Beanspruchung im Testinstrument abgebildet werden, bleibt es nach Brünken et al. (2010) dennoch fraglich, ob die Proband:innen überhaupt in der Lage sind, die Ursachen für variierende kognitive Beanspruchungen zu differenzieren und damit auch korrekt einzuschätzen.

Eine Übersicht und Einordnung von Verfahren zur Ermittlung des *Cognitive Load* kann Klepsch et al. (2017) entnommen werden.

Ausgewählte Forschungsergebnisse zur Cognitive Load Theory

Ein Beispiel für empirisch belegte Reduktion des *Intrinsic Cognitive Load* liefern Gerjets et al. (2004) mit einer Vorgehensweise, welche *Worked Examples* modularisiert aufbaut (siehe auch Gerjets et al., 2006). Dabei entspricht das Vorgehen am ehesten einer Segmentierung und Vorentlastung, wie sie auch in den Multimedia-Prinzipien nach Mayer zu finden ist und Eingang in die Konzeption der im Rahmen der vorliegenden Studien genutzten Lernmaterialien fand.

Hessel (2008) untersuchte die kognitive Belastung, welche Lernende bei der Arbeit mit digitalen Lernumgebungen zusätzlich erleben, da sie neben der inhaltlichen Aufgabe gleichzeitig auch Navigations- und Zugriffsaktivitäten mit digitalen Tools leisten müssen. Wenngleich dieser Grundgedanke nicht von der Hand zu weisen ist, so ist aus Sicht des Verfassers dieser Arbeit ein integrativer Ansatz, welcher die Bedienung der

Lernumgebung nicht als mögliche zusätzliche Belastung ansieht, sondern diese Aktivität als essenziellen Bestandteil des Lernens mit digitalen Medien auffasst, zu präferieren. Gleichwohl entbindet diese Herangehensweise nicht von der Forderung nach bestmöglicher lernförderlicher Konzeption einer digitalen Lernumgebung, wobei auch anknüpfend an die Arbeit von Hessel (2008) die *Usability* der Lernplattform eine bedeutende Rolle einnimmt.

In einer Untersuchung unter serbischen Schüler:innen konnten Milenković et al. (2014) eine Steigerung der Leistung feststellen, welche die Autoren auf eine Instruktion unter Beachtung der makroskopischen, submikroskopischen und symbolischen Ebene chemischer Sachverhalte zurückführten. Gleichzeitig wurde in dieser Studie durch die implizierte Instruktionsvariante eine Reduzierung des *Cognitive Load* erreicht. Ebensolche die verschiedenen Betrachtungsebenen chemischer Vorgänge berücksichtigende Darstellungen wurden auch in der Konzeption der Lernumgebungen zur vorliegenden Studie eingesetzt (Abbildung 10).

Ebenso konnten Behmke und Atwood (2013) in einer Vergleichsgruppenstudie nachweisen, dass sich eine Aufgabengestaltung unter Berücksichtigung der Implikationen der *Cognitive Load Theory* positiv auf den Wissenszuwachs bei Lernenden auswirkt. Dabei wurden die Fragestellungen in eine digitale Lernumgebung eingebunden dargeboten.

Agustian und Seery (2017) unterstreichen die Bedeutung unterstützender Informationen, welche zum Verständnis der bevorstehenden Labortätigkeit erforderlich sind, und empfehlen, diese im Vorfeld der praktischen Arbeit darzubieten. Dieser Ansatz stellt ebenfalls einen Leitgedanken der Konzeption der virtuellen Labore in dieser Arbeit dar.

Oxoniumion

Wird eine Säure in Wasser geben, findet eine exotherme Reaktion statt, die **Protolyse** genannt wird. Dabei werden nach Brønsted und Lowry ein oder mehrere **Proton(en) H^+** von der Säure abgegeben. Man spricht von einer Deprotonierung (Protonenabgabe). Jeweils ein Proton wird an ein Wassermolekül gebunden, dabei entsteht das sogenannte **Oxoniumion H_3O^+** (auch Hydroxonium oder Hydronium genannt).

Beispiel: Protolysereaktion von Salzsäure und Wasser

Versuchsdurchführung:

Eine Salzsäurelösung wird zu Wasser hinzugegeben und anschließend der pH-Wert mit einem pH-Sensor gemessen.

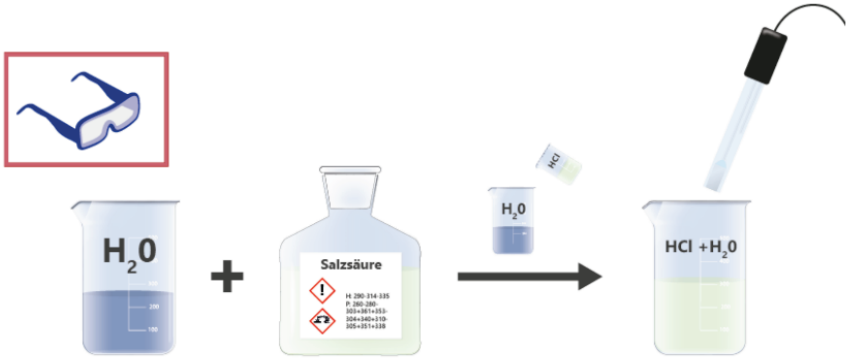
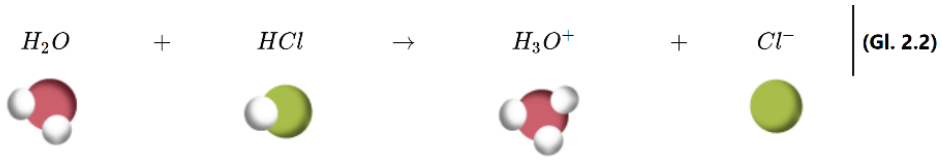
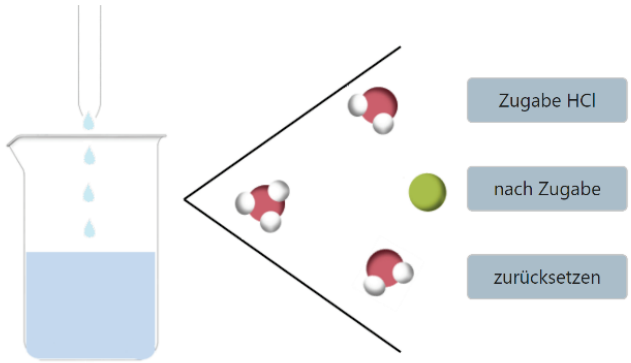


Abbildung 2.4: Salzsäure und Wasser





Interaktive Abbildung mit GIF 2.1: Protolyse von HCl in Wasser

Abbildung 10: Ebenen chemischer Prozesse. makroskopische, submikroskopische und symbolische Darstellungen sind als stoffliche Ebene, Teilchenebene und Symbolschreibweise integriert (Screenshot virtuelles Labor pH-Wert, Projekt Open MINT Labs).

Flow-Erleben

Als Anreiz des Tätigkeitsvollzugs stellt *Flow*-Erleben eine bedeutende Variable der affektiv-motivationalen Zustände einer Person dar. Diese sind nicht zuletzt für die Lernmotivation mit ausschlaggebend. Nachfolgend wird das Konstrukt *Flow* operationalisiert; weiterhin werden dessen Auswirkungen auf Lernende und die Implikationen für die vorliegende Arbeit dargelegt.

Operationalisierung des *Flow*-Erlebens

Rheinberg identifiziert *Flow*-Erleben als ein Beispiel für tätigkeitsübergeifend auftretende Tätigkeitsanreize. Er definiert diesen kurzgefasst als das "reflexionsfreie, gänzliche Aufgehen in einer glatt laufenden Tätigkeit, die man trotz hoher Beanspruchung noch unter Kontrolle hat. Dieser Zustand wird meist als angenehm erlebt und Personen zeigen Beeinträchtigungen, wenn sie in Entzugsexperimenten daran gehindert werden, ihre *Flow*-vermittelnden Tätigkeiten auszuführen.“ (Rheinberg et al., 2003, S. 263)

Der Autor sieht in *Flow*-Erleben ein Erreichen unerträumter Bewusstseinszustände, welche er als Transformation des Selbst durch steigende Komplexität bezeichnet. *Flow* findet dabei in einem schmalen "*Flow Channel*" zwischen Langeweile und Ängstlichkeit statt, welche sich aus dem Zusammenspiel von vorhandenen Fähigkeiten und Herausforderungen ergeben (Csikszentmihalyi, 2008, S. 74). *Flow*-Erleben tritt nach Csikszentmihalyi (2014) allerdings nicht in Situationen auf, in denen Fähigkeiten und Anforderungen sehr niedrig sind. Selbst bei guter Passung der Fähigkeiten zu sehr geringer Herausforderung tritt zunächst eine Apathie ein. Erst mit mittlerer Herausforderung und adäquater Fähigkeit kann sich *Flow* einstellen.

Motiviertes Verhalten einer Person kann sowohl aus den Ereignisfolgen einer Tätigkeit als auch aus einem Anreiz des Tätigkeitsvollzugs resultieren (Rheinberg et al., 2003). Rheinberg (1989) unterscheidet in der Überarbeitung des erweiterten Motivationsmodells nach H. Heckhausen (1977) zwischen zweckzentrierten Anreizen und tätigkeitszentrierten Anreizen. Diese können eine Handlungsepisode der Episodenstruktur Situation - Handlung - Ergebnis - Folgen an unterschiedlichen Punkten beeinflussen. Als "Anreize künftiger Umwelt- und Binnenzustände" (Rheinberg, 1989, S. 104) stehen die zweckzentrierten Anreize in direktem Wirkbezug mit den Folgen einer Handlungsepisode. Die "Tätigkeitsspezifischen Vollzugsanreize" (Rheinberg, 1989, S. 104) hingegen spiegeln sich in der Handlung selbst wider.

Rheinberg et al. (2003) grenzen die Begrifflichkeit der zweck- oder tätigkeitszentrierten Anreize bewusst vom Begriffspaar der extrinsischen und intrinsischen Motivation (z. B. Deci & Ryan, 1993) ab, da die Autoren in diesen Definitionen sowohl eine Ambiguität als auch eine latente Wertzuschreibung erkennen.

Die unterschiedliche Zentrierung der Anreize bringt verschiedene motivationale Aspekte zum Ausdruck. Beispielsweise kann eine Person Arbeit als reines Mittel zum Zweck des durch die Arbeit erwirtschafteten Einkommens betrachten und somit allein durch den zweckzentrierten Anreiz motiviert werden. Dem gegenüber kann dieselbe Person beispielsweise in ihrer Freizeit durch tätigkeitszentrierte Anreize motiviert werden, welche kein erkennbares Ergebnis zeigen. Als Beispiel hierfür sei das Wandern als Hobby genannt, dessen Selbstzweck sich meist nicht oder nur sehr bedingt aus dem Zurücklegen einer Strecke beziehungsweise dem Erreichen eines Zieles ergibt, sondern vielmehr aus der Tätigkeit selbst. Ein solcher Tätigkeitsanreiz lässt die Person dann eine Wanderung planen, vorbereiten und durchführen, obwohl der beobachtbare Zweck, etwa das Erreichen eines Aussichtspunktes, ebenso gut mit weniger anstrengenden Verkehrsmitteln erreichbar wäre. Diese exemplarische Ausführung ist hierbei situativ. Es handelt sich somit nicht um Persönlichkeitsmerkmale, welche eine klare Zuordnung zu tätigkeits- oder zweckzentriertem Anreiztyp erlauben würden, sondern es muss jeweils die gesamte Handlungsepisode betrachtet werden. *Flow* ist dabei jedoch nicht mit Glücksgefühlen zu verwechseln. Während Glücksgefühle oder Zufriedenheit aus dem Fokus auf den inneren Zustand einer Person resultieren, entsteht *Flow* unter externalem Fokus auf die bearbeitete Aufgabenstellung oder Tätigkeit. Allerdings kann der erfolgreiche Abschluss einer *Flow*-vermittelnden Tätigkeit retrospektiv zufriedenstellend wirken (Csikszentmihalyi, 1997).

Weiterhin lässt sich konstatieren, dass die beiden Anreiztypen nicht dichotom zu betrachten sind. Vielmehr können diese in verschachtelter Form auftreten (Rheinberg, 1989). Im beschriebenen Beispiel könnte eine Person etwa nicht ausschließlich durch monetäre (zweckzentrierte) Anreize zur Arbeit motiviert werden, sondern zumindest zu geringen Anteilen durch den Kontakt mit Kollegen oder Teilaspekte ihrer Tätigkeit. Im umgekehrten Fall kann auch der tätigkeitszentrierte Aspekt des Wanderns durch einen in Teilen zweckzentrierten Anteil erweitert werden, weil etwa nur fußläufig der höchste Aussichtspunkt erklommen werden kann.

Flow-Erleben im Bildungskontext

Eine motivationale Wirksamkeit des Tätigkeitsvollzugs konnte unter anderem in Leistungs- und Prüfungssituationen im pädagogischen Kontext nachgewiesen werden (Engeser & Rheinberg, 2008; Rheinberg, 1989). Auch in universitären Lernsettings konnte *Flow* als "leistungsrelevante Variable des Funktionszustandes beim Lernen" (Engeser et al., 2005, S. 160) identifiziert werden. Gunderson (2003) wies darüber hinaus den Zusammenhang von effektiver Lehre und *Flow*-Erleben nach. Engeser & Rheinberg (2008) konnten in diesem Zusammenhang in einer Reihe von Untersuchungen die wahrgenommene Bedeutsamkeit einer Aufgabe und das Leistungsmotiv von Versuchspersonen als Moderatorvariablen der Abhängigkeit des

Flow-Erlebens von der Passung zwischen Fähigkeit und Herausforderung ausmachen (Engeser & Rheinberg, 2008).

Im Falle der Bearbeitung einer Lernumgebung könnten Lernende zunächst mit geringer Kompetenz einsteigen, was *per se* noch keinen *Flow* ausschließt, sofern die Anforderungen an die Kompetenz angepasst wurden. Erwerben Lernende nun im Zuge der Bearbeitung zunehmend Wissen und Kompetenzen, können ihnen erste, leichte Aufgaben ab einem gewissen Punkt zu langweilig werden. Dann überwiegen die Kompetenzen die Anforderungen. Steigt das Anforderungsniveau sodann erneut, können die Lernenden unter Umständen wieder in den *Flow Channel* zurückfinden und einen glatten Ablauf der Tätigkeit erfahren. Manche Lernende können von der gestiegenen Komplexität jedoch überfordert sein, woraus eine Ängstlichkeit mit einhergehendem Verlust des *Flow*-Erlebens folgt.

Diese Überlegungen der Passung von Fähigkeiten und Anforderungen zeigen sich analog in der Bildungslandschaft, beispielsweise in Kompetenzstufenmodellen, Lernziel-Taxonomien und Anforderungsbereichen. Werden diese Instrumente zielführend auf die tatsächlichen Kompetenzen der Lernenden ausgerichtet, kann folglich auch ein *Flow*-Erleben gefördert werden. Zieltransparenz, zeitnahes Feedback und eine wahrgenommene Kontrolle stellen weitere Bedingungen dar, welche zur Autotelie einer Tätigkeit führen und somit *Flow*-Erleben bedingen (Csikszentmihalyi, 2014). Nach Shernoff et al. (2003) findet Lernen dann mit besonderem Einsatz der Lernenden statt, wenn Aufgaben bearbeitet werden, welche einen Anspruch aufweisen, der leicht über das Niveau der aktuell vorhandenen Fähigkeiten hinausgeht. Die so zu erreichende Einbindung der Lernenden kann sich als förderlich für das Entstehen eines *Flow*-Erlebens erweisen. Darüber hinaus ist dieses Ergebnis kongruent mit den Erkenntnissen zur Zone der proximalen Entwicklung (Rogoff, 1990).

In Hinblick auf die Erzeugung eines *Flow*-Erlebens gereicht es den mathematisch-naturwissenschaftlichen Fächern im Gegensatz zu den musisch-künstlerischen Fächern eher zum Nachteil, dass sie eine Vielzahl immanenter Herausforderungen mit sich bringen. Durch diese Herausforderungen stellt sich *Flow* insbesondere im Einstiegsunterricht eher schwer ein (Csikszentmihalyi, 2014). Sobald jedoch eine Passung von Fähigkeiten und Anforderungen erreicht werden konnte, eignet sich der naturwissenschaftliche Fächerverbund sehr gut zur Bewahrung eines *Flow*-Erlebens. Die Gründe hierfür liegen in der Eindeutigkeit der Ziele, der Regeln und des Feedbacks (Csikszentmihalyi, 2014).

Erfassung des *Flow*-Erlebens

Zur Erfassung des *Flow*-Erlebens kann die sogenannte *Experience Sampling Method* (ESM) eingesetzt werden. Im Zuge der Erhebung werden die Versuchspersonen bei

dieser Methode durch ein Signal, welches meist durch einen Pager vermittelt wird, schlagartig aus ihrer aktuellen Tätigkeit herausgerissen und auf die Bearbeitung von Testinstrumenten übergeleitet (Csikszentmihalyi, 1997, 2008, 2014). Rheinberg et al. (2003) sehen diese Vorgehensweise zwar generell als gegenstandsangemessen an, kritisieren jedoch die Art der so erhobenen Daten. Diese bilden ihrer Auffassung nach nur zu einem geringen Teil tatsächlich das Konstrukt *Flow*-Erleben ab. In der Konsequenz schlagen die Autoren ein neu entwickeltes Selbsteinschätzungsinstrument zur Erfassung des *Flow*-Erlebens vor, die *Flow*-Kurzskala (FKS, Rheinberg et al., 2003).

Flow-Erleben in der fachdidaktischen Forschung

Engeser und Schiepe-Tiska (2012) nennen als neu aufkommende Anwendungsgebiete der *Flow*-Forschung unter anderem Mensch-Computer-Interaktionen, Mediennutzung und *Game-Based Learning* Settings. Den Bildungsbereich allgemein sehen die Autoren als bereits etablierte Domäne, in welcher der Erfassung des *Flow*-Erlebens eine deutliche Relevanz zukommt. An diese Feststellungen anknüpfend soll in der vorliegenden Studie das *Flow*-Erleben von Lernenden im Kontext virtueller Lernumgebungen erfasst und somit eine Schnittmenge bereits etablierter Forschungsfelder mit entsprechenden implizit formulierten Desideraten, beleuchtet werden.

Aktuelle Motivation

Lernende zu motivieren stellt Lehrpersonen stets vor neue Herausforderungen. Dabei reichen Ursachen, Wirkungen und mögliche lernförderliche Potenziale motivationaler Aspekte weit über eine anekdotische Motivation hinaus. Das nachstehende Teilkapitel bietet einen Einblick in die als relevant identifizierten Teilbereiche der Motivationspsychologie. Der Fokus liegt hierbei auf der aktuellen Motivation.

Operationalisierung der aktuellen Motivation

Nach Rheinberg (2000) entsteht die aktuelle Motivation einer Person im Zusammenspiel von personspezifischen Motiven und potenziellen situationalen Anreizen. Erst die so entstandene aktuelle Motivation beeinflusst direkt das Verhalten und Erleben der Person. Ein direkter Einfluss personen- oder situationsspezifischer Merkmale auf das Verhalten ist nach dem Grundmodell der klassischen Motivationspsychologie nicht gegeben.

Dabei hängt das Erleben von Erfolg vom Anspruchsniveau ab, welches die Person für sich selbst definiert hat. Dieses entspricht dem, was sich die Person "zu schaffen vornimmt" (Rheinberg, 2000, S. 71). Das individuelle Anspruchsniveau definieren

Personen in leistungsthematischen Kontexten anhand der Faktoren Erfolgswahrscheinlichkeit und Erfolgsanreiz. Eine sehr leichte Aufgabe weit unterhalb der eigenen Leistungsfähigkeit bringt automatisch eine hohe Erfolgswahrscheinlichkeit mit sich. Sehr schwere Aufgabenstellungen hingegen weisen tendenziell einen hohen Erfolgsanreiz auf, übersteigen jedoch die eigenen Kompetenzen so weit, dass die Erfolgswahrscheinlichkeit gegen Null geht (Rheinberg, 2000).

In der Definition des Anspruchsniveaus wägen Personen diese beiden Faktoren daher gegeneinander ab und agieren damit nach Atkinson (1957) im Sinne eines Erwartungsmal-Wert-Modells. Motiviertes Verhalten einer Person stellt sich daher am ehesten bei einer realistischen Zielsetzung ein, also dann, wenn die Anforderungen mittelschwer sind und somit sowohl Erfolg als auch Misserfolg möglich werden. Diese Anforderungen kann eine Person mit Anstrengung gerade noch bewältigen (Rheinberg, 2000).

Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die Schwierigkeit oder das Anforderungsniveau einer Aufgabe subjektiv zu verstehen ist. Somit hängt diese mit den eigenen Fähigkeiten der jeweiligen Person zusammen (Rheinberg, 2000).

Darüber hinaus beeinflussen die Motive einer Person, ob und wenn ja wie diese eine situative Anforderung leistungsthematisch strukturiert (Rheinberg, 2000). Eher sozial orientierte Motive werden die Wahl der Aufgabenschwierigkeit anders beeinflussen als etwa machtorientierte Motive, welche die Sicherung des eigenen Prestiges in den Fokus rücken (Rheinberg, 2000).

Grundlegend lassen sich Personen anhand ihrer Motive im Sinne der affektiven Handlungs- und Ergebnisfolgen einer Tätigkeit unterscheiden. Dabei wirken die Faktoren Hoffnung auf Erfolg und Furcht vor Misserfolg zusammen (Rheinberg, 2000). Entsprechende Attributionsmuster zur Erklärung von Erfolg und Misserfolg bilden sich dabei bereits in der Kindheit aus und legen eine positive oder deprimierende Grundhaltung dar (J. Heckhausen & Heckhausen, 2010).

Es besteht definitorische Uneinigkeit darüber, welche Operationalisierung des Konstruktes Interesse im Kontext der Motivationsforschung genau heranzuziehen ist und inwiefern die jeweilige Operationalisierung Interesse als intrinsisch oder extrinsisch klassifiziert (Rheinberg, 2010). Einigkeit herrscht jedoch darüber, dass Interesse als tätigkeitsbezogene Motivation einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zum Gesamtkonstrukt Motivation leistet (Rheinberg, 2010). Dem Konstrukt Interesse als einer „stabilen Person-Gegenstands-Relation“ (Brandt, 2005, S. 18) kann neben der Konstruktstabilität *per se* in schulischen Kontexten nur deshalb eine eingeschränkte Beachtung zukommen, da diese durch leistungsthematische Handlungszwänge geprägt sind und somit eine freie Auseinandersetzung mit einer Thematik nicht ohne weiteres gestatten (Brandt, 2005). Vor diesem Hintergrund wird Interesse im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Subfacette der Motivation betrachtet. Motivationale Aspekte können

im schulischen Setting und in kurzen bis einmaligen Interventionen eher beeinflusst werden (Brandt, 2005).

Bei Betrachtung einer Aufgabenstellung und Setzung des individuellen situativen Anspruchsniveaus berücksichtigt eine Person demnach sowohl die subjektive Schwierigkeit der Aufgabe als auch die eigene Leistungsfähigkeit und setzt diese in Zusammenhang. Zeigt die Aufgabe dabei eine ausreichende Schwierigkeit, um als noch bewältigbare Herausforderung wahrgenommen zu werden, stellt sich ein Anreiz ein. Als weitere Voraussetzung für eine motivierte Bearbeitung der Aufgabe ist außerdem eine geringe Furcht vor Misserfolg vonnöten, welche sich insbesondere aus ausbleibenden sozialen oder leistungsthematischen Nachteilen ergibt. Im schulischen Kontext wären hier neben der Leistungsbeurteilung auch Reaktionen anderer Lernender sowie der Lehrperson zu berücksichtigen. Zeigt die Person darüber hinaus noch Interesse an der zur Disposition stehenden Tätigkeit, so sind die Grundvoraussetzungen für eine motivierte Aufgabenbearbeitung geschaffen.

Bezüge der Motivation zu weiteren theoretischen Konstrukten

Nach Tokan und Imakulata (2019b) wirkt sich intrinsische Motivation direkt auf die Leistung aus. Intrinsische Motivation, extrinsische Motivation und Lernverhalten beeinflussen gemeinsam die Lernleistung (siehe auch Tokan & Imakulata, 2019a). Auch in größer angelegten Studien konnten Belege für die positiven Effekte motivationaler Aspekte auf die Lernleistung von Schülerinnen und Schülern gefunden werden (Cavas, 2011; Patrick et al., 2007). Jedoch mutet das methodische Vorgehen dieser Untersuchungen durch direkte Instruktion der Proband:innen teils eher unorthodox an (Patrick et al., 2007). Im deutschsprachigen Raum konnten Steinmayr und Spinath (2009) Motivation als Prädiktor für schulische Leistung identifizieren. Es ist folglich zu konstatieren, dass Motivation einen signifikanten Prädiktor der Leistung in Lernsettings darstellt (Liu et al., 2012).

Neben Anknüpfungen an das Erwartung-Wert-Modell der Leistungsmotivation nach Wigfield und Eccles (2000) im Bereich der Erfolgserwartungen ergeben sich auch Querbezüge zur Selbstbestimmungstheorie nach Deci und Ryan (1993), hier insbesondere in Hinblick auf das eigene Kompetenzerleben, welches sich am ehesten in den Anreizmustern wiederfindet. Insbesondere das Autonomie-Erleben als Teilaspekt der Selbstbestimmungstheorie lässt sich in digitalen Lernumgebungen leicht darstellen (z. B. Scharpf & Gabes, 2022).

Ausgewählte Forschungsergebnisse zur Motivation in Lehr-Lern-Kontexten

Krapp et al. (1993) konnten in einer groß angelegten Metaanalyse mit insgesamt 127 unabhängigen Stichproben eine durchschnittliche Korrelation von Interesse und Leistung von .30 feststellen. Unter der Prämisse, dass Interesse als Teilkonstrukt der aktuellen Motivation betrachtet werden kann (Rheinberg et al., 2021), wird damit eine naheliegende Erkenntnis empirisch untermauert.

Hillmayr et al. (2017) übertragen diese theoretischen Ableitungen auf digitale Lernumgebungen und stellen in einer Metastudie die Überlegenheit digitaler Lernformate gegenüber traditionellen Lernformaten im Bezug auf die Genese positiver Einstellungsattributionen der Lernenden fest, was sie auch als motivationale Wirksamkeit interpretieren (siehe auch Hillmayr et al., 2020). Die Autoren weisen jedoch explizit auf mögliche Verzerrungen durch den Neuheitseffekt hin.

In Anlehnung an die Selbstbestimmungstheorie (Deci & Ryan, 1993) legen Hillmayr et al. (2020) nahe, dass positive Auswirkungen der Nutzung digitaler Lernumgebungen auf die Motivation von Lernenden insbesondere auf das damit verbundene Autonomie-Erleben zurückzuführen sein können. Allerdings verweisen auch diese Autoren auf einen möglichen Neuheitseffekt, welcher zunächst die Verwendung der digitalen Lösungen dergestalt in den Vordergrund rückt, dass diese Lernumgebungen, Endgeräte und Methoden den Lernenden noch nicht vertraut sind und somit Interesse und Motivation unweigerlich anregen (Hillmayr et al., 2020).

Im internationalen Raum konnten Jeno et al. (2017) im direkten Vergleich zwischen digitalen und analogen Bestimmungswerkzeugen in Bachelorstudiengängen zur Biologie relevante Effekte der digitalen Variante auf die intrinsische Motivation der Studierenden nachweisen. Dabei ziehen die Forschenden nach der Selbstbestimmungstheorie insbesondere die Autonomie durch Auswahlmöglichkeiten und das Kompetenzerleben aufgrund von Feedbackmöglichkeiten in der digitalen Umgebung heran. In einer kleinen Fallstudie konnte Ciampa (2014) ebenfalls Hinweise auf die motivierenden Eigenschaften digitaler Lernumgebungen finden. S. Schneider et al. (2018) erklären aufgefundene positive Effekte von Schein-Wahlmöglichkeiten innerhalb einer digitalen Lernumgebung auf die Motivation Lernender durch ein gesteigertes Autonomie-Erleben der Lernenden.

Scharpf und Gabes (2022) stellen basierend auf Ergebnissen der vorgenannten Studien und unter Bezugnahme zur Selbstbestimmungstheorie die gute Eignung digitaler Medien zur Erreichung eines motivationsförderlichen Lernerlebnisses im Sachunterricht der Grundschule fest. Dabei beziehen sie sich vorwiegend auf Untersuchungen in anderen Zielgruppen oder Fächern, wodurch eine grundlegende Adaptierbarkeit der Erkenntnisse zur Motivationsförderung auch auf andere Bereiche nahegelegt wird.

Genz und Bresges (2017) sehen Motivationstests im Kontext der Tabletnutzung im Unterricht als wünschenswert an. Anknüpfend an dieses Desiderat erfolgt auch in der Studie zur vorliegenden Arbeit eine Erfassung der motivationalen Zustände auf der Seite der Lernenden.

2.6 Ableitung der Forschungsfragen

Ableitung der Forschungsfragen

FF1: Barrieren des Transfers

- Fokus auf drei postulierte Barrieren
  - Schulische Situation – strukturelle und ressourcenbezogene Hindernisse
  - Persönlichkeit – Attribute der Lehrenden auf Personenebene
  - Lernmaterialien – Interaktion zwischen Lernenden und Materialien

FF2: Didaktische Konzepte zur Implementationsförderung

- Anlehnung an Ansätze der partizipativen Aktionsforschung
- Lehrende als Co-Designer der Innovation
- Einholen insbesondere qualitativer Rückmeldungen zur ausgearbeiteten Konzeption
- Virtuelle Labore als essenzieller Bestandteil der rahmenden Konzeption

FF3: Genese lernförderlicher Zustände

- Untersuchung potenziell lernförderlicher kognitiver und motivationaler Attributionen der Lernenden
- Erhebung in der Interaktion der Lernenden mit den Materialien
- Erfassung von *Flow*-Erleben, aktueller Motivation und *Cognitive Load*

Im folgenden Kapitel werden die Forschungsfragen vorgestellt und aus den theoretischen Grundlagen abgeleitet. Neben den übergeordneten Forschungsfragen wird das forschungsmethodische Vorgehen durch Hypothesen gegliedert. Letztlich erfolgt so eine explorative Untersuchung der drei zentralen Forschungsfragen.

Bortz und Döring (2016) definieren wissenschaftliche Hypothesen anhand von vier Kriterien: 1) empirischer Gehalt, 2) Allgemeingültigkeit, 3) (implizite) Formalstruktur eines Konditionalsatzes und 4) Falsifizierbarkeit. Kurz gefasst definieren die Autoren wissenschaftliche Hypothesen daher entsprechend:

> *Wissenschaftliche Hypothesen sind Annahmen über reale Sachverhalte (empirischer Gehalt, empirische Untersuchbarkeit) in Form von Konditionalsätzen. Sie weisen über den Einzelfall hinaus (Generalisierbarkeit, Allgemeinheitsgrad) und sind durch Erfahrungsdaten widerlegbar (Falsifizierbarkeit).*
> (Bortz & Döring, 2016, S. 4)

Tausendpfund (2018) nimmt weiterhin eine ausführliche Abgrenzung gegenüber Alltagshypothesen oder Vermutungen vor. Dabei stehen für den Autor Zusammenhänge zwischen mindestens zwei Merkmalen im Fokus der Formulierung von Forschungshypothesen. Darüber hinaus sind Forschungshypothesen klar von statistischen

Hypothesenpaaren zu differenzieren (Nullhypothese und Alternativhypothese; Bortz & Döring, 2016; Bortz & Lienert, 2008; Döring & Bortz, 2016).

Die im vorliegenden Kapitel vorgestellten Forschungshypothesen zeichnen sich nach den vorbezeichneten Kriterien durch ihren empirischen Gehalt aus. Deren Allgemeingültigkeit ist insofern gegeben, als keine Limitierung auf statistisch unzulängliche Einzelfallbetrachtungen erfolgt. Ebenfalls sind die vorgestellten Hypothesen falsifizierbar – deren Prüfung erfolgt im Diskussionsteil anhand der vorliegenden Ergebnisse. Die konditionale Formalstruktur ist den nachfolgend angeführten Hypothesen nach den Ausführungen von Bortz und Döring (2016) nur implizit immanent. Die Konditionalität der Hypothesen ergibt sich damit aus der Ausformulierung der Bedingung als Einfluss der Intervention („Wenn Lehrpersonen mit digitalen Medien konfrontiert werden, dann …“ respektive „Wenn Schüler:innen mit virtuellen Laboren arbeiten, dann …“).

Aufgrund des explorativen Charakters der Studie werden keine Hypothesen im streng zusammenhangsprüfenden Kontext („Je …, desto …“) formuliert. Eine tiefergreifende wissenschaftstheoretische Disambiguierung des Hypothesenbegriffs legen Bauberger (2016) und Meidl (2009) dar.

Forschungsfrage 1: Barrieren des Transfers

Forschungsfrage 1 nimmt die deskriptive Bestätigung der Barrieren des Modells in den Blick. Aufbauend auf den theoretischen Erkenntnissen zu den einzelnen Teilaspekten sollen im Rahmen der Studie Anhaltspunkte für eine Bestätigung dieser Gelingensbedingungen des Transfers herausgearbeitet werden.

> FF 1: Welche der postulierten Barrieren der Implementation einer digitalen Innovation in Schulen können deskriptiv bestätigt werden?

Barriere 1: Lernmaterialien

Da die Lernenden im Verlauf der Lerneinheit weitestgehend eigenständig unter Zuhilfenahme der in der Konzeption vorgestellten Materialien arbeiten, stellen diese Materialien den Haupteinflussfaktor auf die affektiv-kognitiven Zustände der Lernenden dar. Gleichwohl auf Basis der theoriegeleiteten Entwicklung der Lernmaterialien deren Zuträglichkeit zum Lernprozess zu erwarten ist, gilt es diese Annahme empirisch zu prüfen. Eine ausführliche Darstellung der zu erwartenden Effekte ist der Herleitung von *Forschungsfrage 3: Genese lernförderlicher Zustände* zu entnehmen. Darüber hinaus wird als direkt den Materialien zuordenbare Größe deren Gebrauchstauglichkeit

(*System Usability*) erhoben. Ausgehend von der theoriebasierten Konzeption und der standardisierten, ebenfalls an theoretischen Grundlagen orientierten Gestaltung sowie der damit einhergehenden Einheitlichkeit der Materialien ist eine akzeptable bis gute Gebrauchstauglichkeit anzunehmen.

Barriere 2: Schulische Situation

Ausgehend von den theoretischen Annahmen des *Concerns-Based Adoption Model* wäre zu erwarten, dass mit einer Innovation konfrontierte Lehrpersonen zunächst die höchsten Ausprägungen auf den niedrigeren Stufen der *Concerns* aufweisen und diese sich im weiteren Verlauf der Implementation wellenartig in Richtung der höheren Stufen verlagern (Hall & Hord, 2006; Pant et al., 2008). Eine solch strikt theoriekonforme Abbildung der *Stages of Concern* erscheint jedoch empirisch wenig erwartbar (Hall & Hord, 2006). Bitan-Friedlander et al. (2004) konnten empirisch jedoch wiederkehrende Muster in den Erhebungen der *Stages of Concern* aufdecken, welche durch Pant et al. (2008) noch weiter ausgeschärft wurden. Grundlegend zeigten sich dabei verschiedene Subtypen innerhalb der Kooperationsbereiten und der Innovationsgegner. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen diese grundsätzlichen Typen unter den mit der Innovation in Kontakt kommenden Lehrpersonen identifiziert werden. Dabei werden die *Stages of Concern* als Abbild des „Prozess[es] der affektiv-kognitiven Auseinandersetzung mit einer Innovation“ (Pant et al., 2008, S. 828) verstanden. Da affektive und kognitive Anteile gleichermaßen in die Bewertung durch die Lehrpersonen mit einfließen, ist hier ein diffuses Bild zu erwarten, welches sich im Gegensatz zu den Persönlichkeitsattributen *a priori* nur sehr bedingt aus der Theorie ableiten lässt.

> H 1.1: Die befragten Lehrpersonen zeigen in der affektiv-kognitiven Auseinandersetzung mit der digitalen Innovation virtueller Labore diverse Ausprägungen der *Stages of Concern*, welche als Persönlichkeitsprofile identifiziert werden können.

Darüber hinaus sind vertiefend besondere Belange der Lehrpersonen zu erwarten, welchen Raum zur Explikation eingeräumt werden soll. Nur durch eine inhaltliche Aufklärung dieser Vorbehalte kann eine zielführende Intervention gestaltet werden.

> H 1.2: Vorbehalte von Lehrpersonen gegenüber einer digitalen Innovation in Bezug auf die schulische Situation sind diffus. Ihnen muss Raum zur Ausführung gewährt werden.

Barriere 3: Persönlichkeit

Die ernüchternden Ergebnisse der Länderindikatoren hinsichtlich der Einstellung von Lehrpersonen gegenüber digitalen Medien und deren Einsatz im Unterricht rückt das Konstrukt Einstellung in den Fokus. Wenn Erfahrungen mit digitalen Endgeräten und die Einstellung gegenüber diesen Technologien als wichtigste Prädiktoren für deren unterrichtliche Nutzung gelten (Drossel et al., 2019; Mueller et al., 2008) und gleichzeitig den Forderungen der Digitalisierungsstrategie (Kultusministerkonferenz, 2017) nachzukommen ist, so muss die Einstellung zwangsläufig modifiziert werden. Trotz der bekannten Konstruktstabilität der Einstellung (Brandt, 2005) kann die Einstellung mit wiederholten Interventionen, welche positive Erfahrungen mit digitalen Endgeräten und Medien bieten, positiv beeinflusst werden. Entsprechende Trainings stellen eine solche Möglichkeit dar (Shashaani, 1997). Die im Rahmen der vorliegenden Konzeption durchgeführten Fortbildungen von Lehrpersonen können als eine Ausprägung solcher Trainings verstanden werden. Darüber hinaus wurden den Lehrpersonen durch entsprechend angeleitete digitale Lerneinheiten für Schülerinnen und Schüler Gelegenheiten geboten, digitale – oder genauer hybride – Lehre *live* mitzuverfolgen. Da die Lehrpersonen nicht selbst für die Gestaltung der Lehre verantwortlich waren, könnte dies nach dem Ansatz des Lernens vom Modell auch denjenigen Lehrenden den Zugang zur digitalen Lehre erleichtert haben, die primär nicht die besten Vorerfahrungen mit eigener digitaler Lehre hatten. Daraus ergibt sich die Forschungshypothese H 1.3.

> H 1.3: Die Einstellung gegenüber digitalen Medien und Endgeräten der Lehrpersonen, welche Bereitschaft zur Mitwirkung an der Studie zeigten, liegt im mittleren Bereich. Lehrpersonen mit sehr positiver Einstellung gegenüber digitalen Medien würden deren Einsatz im Unterricht eigenständig gestalten, solche mit stark negativer Einstellung würden sich vollständig davon abkehren.

Wenngleich die Bedeutung des Selbstkonzepts von Lehrenden in Hinblick auf deren tatsächliche Nutzung digitaler Medien und Endgeräte bislang wenig untersucht ist, so ist dieses doch als mögliche Determinante der tatsächlichen Nutzung anzunehmen (vgl. Niesyto, 2012; Schulz-Zander & Eickelmann, 2007). Angesichts der Operationalisierung des Selbstkonzeptes als kognitiv und affektiv sowie als reflexiv, also sich aus vergangenen Erfahrungen aufbauend (Bong & Clark, 1999; Bong & Skaalvik, 2003), ist auch unter der von Mueller et al. (2008) als Prädiktor der Mediennutzung beschriebenen Erfahrung mit solchen Medien ein Bezug zum Selbstkonzept erwartbar. Im Zuge der vorliegenden Arbeit soll daher zunächst eine deskriptiv-exploratorische Erfassung des Selbstkonzepts von Lehrpersonen im Zusammenhang mit digitalen Medien für den Unterricht erfolgen. Dabei ist aus vorgenannten Gründen anzunehmen, dass die Ausprägungen des Selbstkonzepts in Zusammenhang mit der Einstellung stehen.

> H 1.4: Das Selbstkonzept von Lehrpersonen im Umgang mit digitalen Medien und Endgeräten knüpft an deren Einstellung hierzu an und ist damit im mittleren Bereich zu verorten.

Mäßige Wertzuschreibungen an digitale Endgeräte und Medien (Eickelmann, Bos et al., 2019) und die Betrachtungsweise digitaler Endgeräte als reine Werkzeuge (C. Fischer, 2017) können den Anforderungen an eine Bildung für die digitale Welt nicht gerecht werden. In der vorliegenden Arbeit sollen daher zunächst die Wertzuschreibungen der Versuchspersonen auf der Seite der Lehrenden als möglicher Hinderungsgrund erfasst werden, welcher einem verstärkten Einsatz digitaler Medien entgegenstehen könnte. Ausgehend vom Stand der Forschung in diesem Feld ist dabei eine eher geringe Wertzuschreibung anzunehmen (Drossel et al., 2019; Eickelmann, Bos et al., 2019).

> H 1.5: Die Wertzuschreibung gegenüber digitalen Endgeräten durch Lehrpersonen stellt sich als eher gering ausgeprägt dar.

In den theoretischen Betrachtungen wurde dargelegt, dass die drei vorstehend genannten Konstrukte (Einstellung, Selbstkonzept, Wertzuschreibung) durch ihre Operationalisierung klar voneinander abgegrenzt werden können. Bereits bei destruktiver Ausprägung eines dieser Konstrukte ist ein negativer Einfluss auf die Bereitschaft zur Implementation einer digitalen Innovation auf der Seite der Lehrenden anzunehmen. Eine positive

Ausprägung der drei Konstrukte legt innerhalb der für diese Studie definierten Grenzen eine generelle Bereitschaft zur Implementation der digitalen Innovation nahe. Die drei Konstrukte werden innerhalb des postulierten Modells als Attribute der Persönlichkeit der Lehrpersonen zusammengeführt.

Forschungsfrage 2: Didaktische Konzepte zur Implementationsförderung

Fachdidaktische Arbeiten sollen einen starken Praxisbezug aufweisen, ohne dabei reine Anwendungsforschung darzustellen (Bernholt & Parchmann, 2020). Vor dem Hintergrund dieses Spannungsfeldes aus Praxisnähe und Forschungsperspektive merken Eilks und Ralle (2002) an, dass insbesondere an der Schnittstelle von Chemiedidaktik und Chemieunterricht theoretische Erkenntnisse der empirischen Bildungsforschung häufig nur unzureichend berücksichtigt wurden. Weiterhin führen sie aus, dass Konzeptionen regelmäßig keine ausreichende und nachhaltige Dissemination erfahren haben und darüber hinaus der praktische Nutzen konzeptioneller Neuentwicklungen selten überprüft wurde (Eilks & Ralle, 2002).

Zur Lösung dieser Dilemmata schlagen die Autoren eine stärkere Verknüpfung von Fachdidaktik und Schulpraxis vor, in welcher unter anderem die Erfahrung der Lehrenden gewinnbringend in die Konzeption von Unterricht eingebunden werden solle (Eilks & Ralle, 2002). Ihren Ansatz einer praxisorientierten Forschung, in welcher die Fragestellungen der Forschenden handlungsleitend sind, bezeichnen die Autoren als Partizipative Fachdidaktische Aktionsforschung.

In Anlehnung an dieses forschungspraktische Vorgehen fand im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine enge Zusammenarbeit der Forschenden mit Lehrpersonen statt, welche eine gemeinsame Konzeption und Evaluation unter den Gesichtspunkten der handlungsleitenden Forschungsvorhaben beabsichtigte. Hierzu wurden Lehrende intensiv in die Konzeption mit eingebunden und Rückmeldungen aus der Praxis mit eingearbeitet. Als Evaluation hierzu wurden informelle Beobachtungen vorgenommen. Diese wurden durch die an die erste Forschungsfrage anknüpfenden Fragebogenerhebungen und Interviews mit Lehrenden ergänzt. Dabei wurden die sieben Kriterien zur Evaluation eines Ansatzes der partizipativen fachdidaktischen Aktionsforschung nach Ralle und Di Fuccia (2014) mit berücksichtigt: Intersubjektive Nachvollziehbarkeit, Indikation als Forschungsprozess, Empirische Verankerung, Limitation, Kohärenz, Relevanz und reflektierte Subjektivität.

Der gewählte Ansatz entspricht nach Eilks und Markic (2011) dem Verständnis einer interaktiven Aktionsforschung, da Lehrpersonen als Co-Designer in den Prozess der Entwicklung von Lernmaterialien und Konzepten eingebunden waren und somit die Innovation aktiv mit gestalten konnten.

Insbesondere mit Blick auf die Dissemination der Erkenntnisse und Konzeptionen wurden bereits sehr früh didaktische Konzepte angestrebt. Deren Erarbeitung verfolgte das Ziel einer niederschwelligen und schultauglichen Ausgestaltung der Innovation, sodass diese nicht als reine Sammlung von Materialien, sondern als eigenständiges, curricular orientiertes Lernkonzept mit angeboten werden konnte. Als prototypisch ist hierbei die Konzeption der Vor- und Nachbereitung im digitalen Raum, rahmend zur experimentellen Arbeit im Freiland, zu nennen. Die handlungsleitende Forschungsfrage zielt auf eben jene didaktischen Konzepte ab.

> FF 2: Welche Anforderungen müssen didaktische Konzepte aus Sicht der Lehrpersonen erfüllen, um die Implementation einer digitalen Innovation in Schulen zu fördern?

Forschungsfrage 3: Genese lernförderlicher Zustände

Die dritte Forschungsfrage nimmt die affektiven und kognitiven Zustände der Lernenden während der Bearbeitungsphasen der konzipierten Lerneinheit in den Blick.

> FF 3: Wie können virtuelle Labore bei Schüler:innen die Genese von aktueller Motivation, *Flow*-Erleben und *Cognitive Load* in der Vor- und Nachbereitung eines experimentellen Settings am außerschulischen Lernort im Freiland fördern?

Durch eine gezielte Förderung des Interesses der Lernenden, etwa über die Lernmaterialien selbst, können positive Effekte auf Motivation und Leistung erreicht werden (Krapp et al., 1993; Rheinberg, 2000). Insbesondere digitale Lernumgebungen scheinen zur Motivationsförderung gut geeignet (Hillmayr et al., 2017; Hillmayr et al., 2020).

H 3.1: Die Schülerinnen und Schüler zeigen im Verlauf der Lerneinheit tendenziell lernförderliche Ausprägungen der Subfacetten der aktuellen Motivation.

Jedoch darf bei aller Fokussierung auf die Motivation keine kognitive Überlastung der Lernenden eintreten, welche den Wissenserwerb massiv beeinträchtigen könnte (van Merriënboer et al., 2003). Der Balanceakt auf dem schmalen Grat zwischen unzureichender Motivation, welche unter anderem durch zu geringen Anspruch begründet sein kann, und *Cognitive Overload* kann durch Anstreben des *Flow*-Zustandes gelingen (Engeser et al., 2005). Ganz nebenbei kann so bei Erreichen des *Flow*-Zustandes auch eine effektive Lehre erreicht werden (Gunderson, 2003). Da die naturwissenschaftlichen Fächer nach Csikszentmihalyi (2014) eine sehr gute Basis für *Flow*-Erleben darstellen und darüber hinaus bis dato nur wenige Untersuchungen dieses Konstruktes im expliziten Zusammenhang mit digitaler Lehre vorliegen (Engeser & Schiepe-Tiska, 2012), erscheint dies zielführend.

H 3.2: Die Schülerinnen und Schüler erfahren im Verlauf der Lerneinheit ein *Flow*-Erleben.

Aufgrund der theoriegeleiteten Entwicklung der eingesetzten Materialien darf angenommen werden, dass diese bei thematisch bedingt immanent hohem *Intrinsic Cognitive Load* und konzeptionsbedingt geringem *Extraneous Cognitive Load* eine Genese des lernförderlichen *Germane Cognitive Load* ermöglichen.

H 3.3: Die Schülerinnen und Schülern zeigen in der Interaktion mit den Lernmaterialien einen mittleren bis hohen *Intrinsic Cognitive Load*.

H 3.4: Die Schülerinnen und Schülern zeigen in der Interaktion mit den Lernmaterialien einen geringen *Extraneous Cognitive Load*.

H 3.5: Die Schülerinnen und Schülern zeigen in der Interaktion mit den Lernmaterialien einen eher hohen *Germane Cognitive Load*.

Für alle zu erhebenden Konstrukte ist eine Variation über die verschiedenen Messzeitpunkte absehbar. Dies ergibt sich bereits aus den veränderten Settings. Während in Vor- und Nachbereitung digital und in Tandems gearbeitet wird, treffen die Lernenden in der Durchführung der experimentellen Einheit im Freiland sowohl eine andere Lernumgebung als auch eine andere Sozialform, hier die Arbeit in Kleingruppen, an. Entsprechend ergibt sich hieraus die ungerichtete Veränderungshypothese H 3.6 (Döring & Bortz, 2016).

H 3.6: Die erhobenen Konstrukte zeigen signifikante Unterschiede im Verlauf der Lerneinheit.

3 Virtuelle Labore als Lernumgebung

Im folgenden Kapitel wird zunächst der grundlegende Aufbau virtueller Labore dargestellt. Dabei werden die fachdidaktischen Theorien zu Lernen mit Multimedia und kognitiver Flexibilität als relevante Kriterien exemplarisch auf konkretes Lernmaterial angewendet. Anschließend werden die fachwissenschaftlichen Hintergründe der ausgewählten physikalisch-chemischen, biologischen und hydromorphologischen Parameter der Gewässergüte erläutert. Hierbei wird der Fokus auf die Bedeutung für das Ökosystem Fließgewässer sowie auf das zu Grunde liegende messtechnische Verfahren des Instruments gelegt. Eine vollumfängliche fachliche Ausarbeitung der einzelnen Parameter wird an dieser Stelle nicht angestrebt, vielmehr werden Hintergrundinformationen angeführt, welche die didaktischen Entscheidungen beeinflusst haben und für Lehrpersonen relevant sind. Im weiteren Verlauf wird die Konzeption der Lerneinheit anhand unterrichtspraktischer Kriterien wie Lehrplanbezug, Zielgruppe etc. vorgestellt.

3.1 Aufbau der virtuellen Labore

Aufbau der virtuellen Labore

Aufbau der virtuellen Labore

- Strukturierung der Lernumgebungen
- Wiederkehrende (Bedien-)Elemente

Umsetzung der Kriterien für Lernen mit Multimedia

- Exemplifizierte Darstellung der Umsetzung der Multimedia-Kriterien
  - Multimedia-Prinzip: gezielte Kombination von Worten und Bildern / grafischen Medien
  - Kontiguität: räumlicher Zusammenhang von Bild und erklärendem Text
  - Modalität: Einbindung erklärender Texte auf der Tonspur (z. B. Video)
  - Redundanz: Vermeidung von Redundanz zwischen Bildschirmtext und Tonspur
  - Kohärenz: Vermeidung unnötiger *Seductive Details*
  - Personalisierung: informeller Stil, wechselnde Perspektiven und virtuelle Coaches zur direkten Ansprache der Lernenden
  - Segmentierung: Strukturierung der Lernumgebung und schrittweise Darbietung von Inhalten
- Berücksichtigung der Anforderungen der *Cognitive Flexibility* (*Random Access Instruction*)
  - Verschiedene mediale Zugänge für ein und denselben Inhalt anbieten
  - Ausgearbeitete Beispiele anbieten

Im Zuge der Konzeption der schulischen Lerneinheit wurden virtuelle Labore basierend auf der Grundstruktur der ursprünglich für die Hochschullehre entwickelten virtuellen Labore erstellt.

Diese gliedern sich in fünf Bausteine: (1) *Orientierung* informiert über Lernziele, Bedienelemente, Aufbau des Kurses und Lernvoraussetzungen (Abbildung 11), (2) *Grundlagen* gibt die auf den Laborversuch zugeschnittenen theoretischen Fachinhalte an, (3) *Experiment* ermöglicht den Studierenden eine virtuelle Auseinandersetzung mit

dem Versuch durch authentisch situierte Lehrvideos (Koumi, 2015; Loviscach, 2019) und Simulationen sowie Animationen, (4) *Anwendung* gewährt einen authentischen und motivationalen Einblick in die Berufspraxis oder Lebenswelt und (5) *Reflexion* dient der Ergebnissicherung und gibt einen Ausblick auf themenverwandte Aspekte. Die virtuellen Labore erweitern somit die realen Laborversuche um eine virtuelle Lernumgebung (Maciuszek & Martens, 2009). Die technische Basis der virtuellen Labore bildet das webbasierte Lernmanagementsystem OpenOLAT. Durch die browserbasierte Oberfläche wird ein geräteunabhängiger Einsatz der virtuellen Labore ermöglicht. Die technische Grundlage hierfür bilden die Technologien HTML5, CSS und JavaScript (T. Roth et al., 2015). [15]

Die so sichergestellte endgeräteunabhängige Nutzbarkeit der virtuellen Labore gestattet einen flexiblen unterrichtlichen Einsatz für die Schüler:innen und Lehrpersonen. Zugleich können diverse multimedial aufbereitete Inhalte wie etwa Videos oder Animationen aber auch externe Lerninhalte mit vergleichsweise geringem Arbeitsaufwand eingebunden werden. Stringente Vorgaben zum *Corporate Design* bieten neben der konsistenten Struktur einen hohen Wiedererkennungswert und sollen die Navigation erleichtern.

Darstellung, Nutzung und Interpretation von Messwerten sind grundlegende naturwissenschaftliche Kompetenzen. So ergibt sich beispielsweise aus dem Lehrplan für die Naturwissenschaftlichen Fächer in Rheinland-Pfalz die Bedeutung dieser Kompetenzen für den gesamten Fächerverbund (Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur, 2014). Konkret werden diese Kompetenzen in den Bildungsstandards für das Fach Chemie gefordert (Kultusministerkonferenz, 2005). Als Teil der digitalen Basiskompetenzen fordern beispielsweise Becker et al. (2020) neben weiteren Digitalkompetenzen eine Integration digitaler Messwerterfassung und Datenverarbeitung in der Lehrer:innenbildung. In letzter Konsequenz muss eine Hinführung dementsprechend bereits berufsvorbereitend in der Schule erfolgen.

Im Zuge des *Blended-Learning* Konzeptes nutzen die Lernenden daher digitale Technologien zur Problemlösung sowie zum Aufbau von Wissen sowohl durch Aufgabenstellungen als auch durch die Auswertung und Analyse von Daten in der virtuellen Lernumgebung. *Blended-Learning* wird in diesem Kontext als Überbegriff für Settings, welche digitale Lehranteile und Präsenzlehre verbinden, definiert (Eckert et al., 2021).

Im Fokus steht dabei neben den fachlichen Inhalten das Ziel der kompetenten und zielgerichteten Nutzung digitaler Werkzeuge und Technologien (Kultusministerkonferenz, 2017; Redecker, 2017). Diese Fertigkeiten werden verstärkt von Lehrenden eingefordert. Folglich ist einerseits eine Förderung des Kompetenzzuwachses auf der Seite der

[15] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 81), modifiziert

Lehrenden als auch andererseits ein Beitrag zur Befähigung an der gesamtgesellschaftlichen Teilhabe im digitalen Raum für die Lernenden ein Ziel dieser Lerneinheit (Becker et al., 2020; Ghomi et al., 2020; Koehler & Mishra, 2009).[16]

Die naturwissenschaftlichen Fächer können hier im Sinne des Strategiepapiers zur Bildung in der digitalen Welt einen besonderen Beitrag leisten (Kurth et al., 2019).

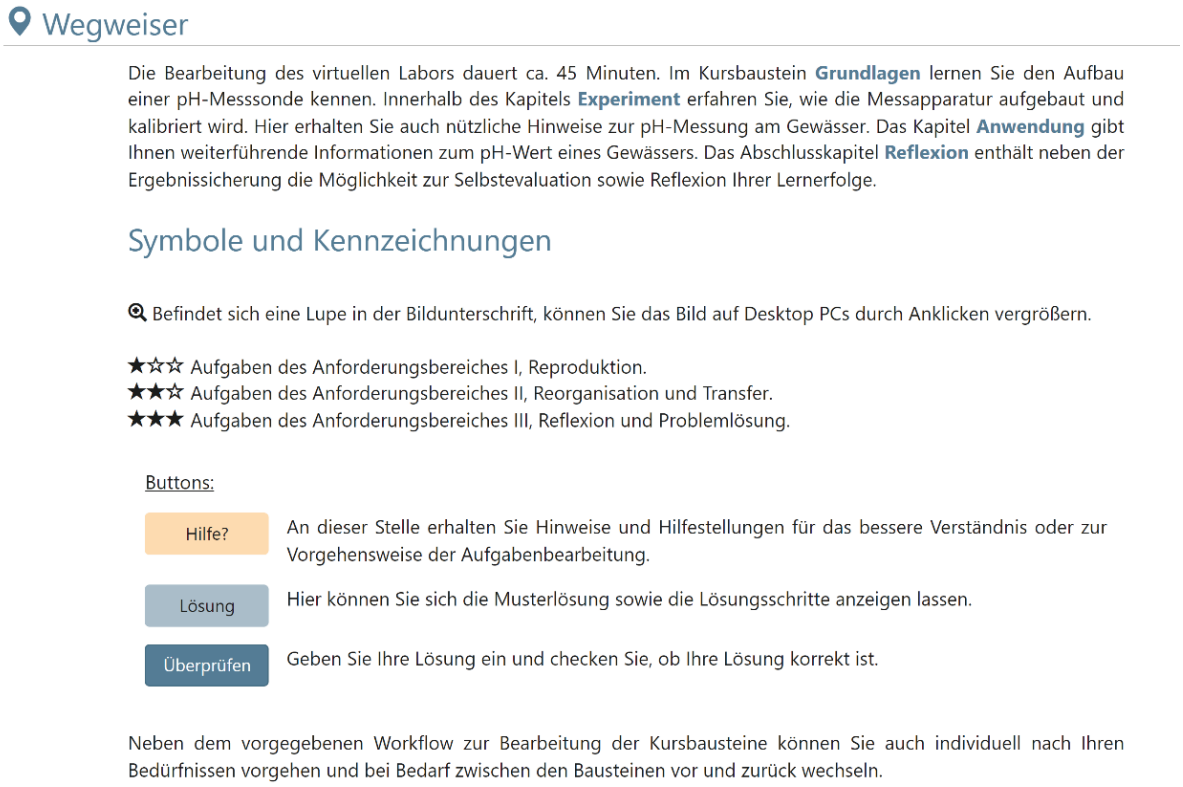


Abbildung 11: Wegweiser zur Nutzung der virtuellen Labore. Hier werden Bedienelemente und Struktur vorgestellt (Screenshot virtuelles Labor, Projekt Open MINT Labs).

[16] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2023, S. 18), modifiziert

Umsetzung der Kriterien für Lernen mit Multimedia in den virtuellen Laboren

Konzeption und Ausgestaltung der virtuellen Lernumgebungen orientieren sich vorrangig an den in Kapitel 2 beschriebenen Kriterien zum Lernen mit Multimedia nach Clark und Mayer (2008) sowie an den Erkenntnissen der *Random Access Instruction* (Spiro et al., 2012), die im Folgenden exemplarisch angewendet werden.

Multimedia-Prinzip

Nach *Clark und Mayer (2011)* unterstützen gezielte Kombinationen aus Worten und Grafiken das Lernen. Durch die erforderliche Verknüpfung und Integration von Bild- und Textbausteinen werden Lernende zu aktivem Lernen angeregt. Dabei ist die Funktion der jeweils ausgewählten Grafik zu berücksichtigen, wobei zwischen dekorativen, gegenständlichen, relationalen, organisatorischen, transformativen und interpretativen Grafiken unterschieden werden kann *(eigene Übersetzung, nach Clark & Mayer, 2011)*. Abbildung 12 stellt eine gegenständliche Grafik aus den virtuellen Laboren einer organisatorischen Grafik gegenüber. Dabei zeigt sich deutlich der Unterschied im intendierten Charakter der beiden Grafiken. Während die obere Grafik lediglich einen für die Lernenden neuen Sachverhalt wiedergibt und den Bezug zum gegenständlichen Bild durch die Unterschrift erläutert, zeigt die untere Grafik durch die Kombination von Text und Bild kausale Zusammenhänge auf. Die Integration von Bild und Text kann insbesondere Lernende mit geringem Vorwissen im Lernprozess unterstützen (Clark & Mayer, 2011).

Abbildung 2.4: Insbesondere große Abraumhalden wie der Monte Kali bei Heringen im Landkreis Hersfeld-Rotenburg verursachen stark salzhaltige Sickerwässer, welche in die Flüsse ablaufen.

Auswertung

Jetzt sind Sie dran...

Interpretieren Sie den zeitlichen und räumlichen Verlauf der Messwerte entlang der Werra. Berücksichtigen Sie dazu die in Abbildung 3.7 dargestellten räumlichen Zusammenhänge entlang des Flusslaufes. ★★★

Abbildung 3.7: Verlauf der Werra

Abbildung 12: Gegenständliche versus organisatorische Grafiken. Gegenständliche Grafik oben: Die Unterschrift erläutert einen Sachverhalt, welcher zur besseren Vorstellung, hier einem Begriff der Dimensionen, illustriert wird. Organisatorische Grafik unten: Bild und Text wurden zur Deutung kausaler Zusammenhänge zielführend integriert (Originalfoto Monte Kali: Photo by CEphoto, Uwe Aranas / CC-BY-SA-3.0; Screenshot virtuelles Labor, Projekt Open MINT Labs).

Kontiguitäts-Prinzip

Nach dem Kontiguitäts-Prinzip (Clark & Mayer, 2011) sollen Grafik und korrespondierender Text in engem räumlichem Zusammenhang stehen und bestenfalls bei konkreten Bezügen durch optische Hilfslinien verbunden sein. Dies ergibt sich aus dem kognitiven Suchprozess, welcher bei Text-Bild-Bezügen erforderlich ist. Kann dieser Suchprozess verkürzt werden, wird laut Clark und Mayer das Lernen im multimedialen Setting erleichtert.

Weiterhin betonen die Autoren, dass insbesondere die Trennung von Text und Bild auf digitalen Seiten dazu führen kann, dass beim Scrollen die inhaltlich zusammenhängenden Texte und Bilder nicht mehr auf einer Seite erscheinen, weshalb hier dem Kontiguitäts-Prinzip eine besonders große Bedeutung beigemessen wird. Dies trifft insbesondere auf die Trennung von Aufgabenstellung und zu bearbeitenden Daten in einer Lernumgebung zu. Dieses Prinzip gilt auch für die gleichzeitige Präsentation gesprochener Worte mit fortlaufenden Bildern und bezieht sich somit auf eingesprochene Präsentationen oder Videos. Abbildung 13 verdeutlicht den räumlichen Zusammenhang von Text und Bild und dessen Bedeutung insbesondere bei der Illustration von Reaktionsgleichungen. Abbildung 14 zeigt die Umsetzung der Aufgabenstellung bei gleichzeitig auf der identischen Seite sichtbaren Daten in einem virtuellen Labor auf.

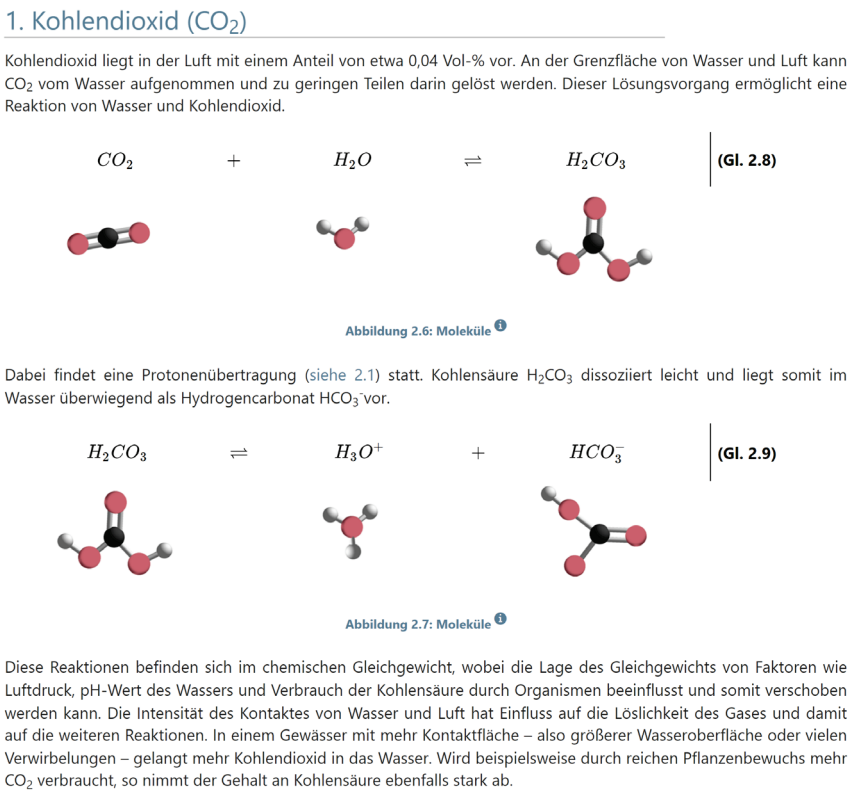


Abbildung 13: Kontiguitäts-Prinzip in der Anwendung auf Ebenen chemischer Prozesse. Die textliche Beschreibung ist direkt gefolgt durch die jeweilige bildliche Darstellung der Reaktion, wodurch die Kriterien des Kontiguitäts-Prinzips erfüllt sind (Screenshot virtuelles Labor, Projekt Open MINT Labs).

Beobachtungen (Beispiel)

Sie haben eine Messreihe zum Thema pH-Wert, über einen längeren Zeitraum, durchgeführt und jeweils 1 Probe an 2 unterschiedlichen Stellen des Gewässers entnommen. In der Tabelle sind sowohl die Werte für den Sauerstoffgehalt als auch für die Sauerstoffsättigung notiert.

Datum	ESG		Renaturiert	
22.09.2017	5,65 mg/l	67,42 %	6,36 mg/l	60,9 %
04.10.2017	6,75 mg/l	86,6 %	6,08 mg/l	74,14 %
13.03.2018	7,02 mg/l	63 %	8,26 mg/l	74,14 %
04.05.2018	5,7 mg/l	60 %	5,9 mg/l	62,1 %
03.09.2018	6 mg/l	62,7 %	6,4 mg/l	66,1 %

Tabelle 3.1: Sauerstoffmessungen

Auswertung

Jetzt sind Sie dran ...

Auswertung der Beispielmesswerte

a) *Stellen Sie die angegebenen Werte grafisch dar.* ★★☆

Lösung anzeigen/verbergen

b) *Vergleichen Sie die Werte der beiden Probenahmestellen und erörtern Sie die Zusammenhänge. Nehmen Sie dabei auf beobachtete Tendenzen Bezug.* ★★★

***Beachten** Sie dabei, dass die Messstelle „ESG" einen Zugang zum stark gefassten und begradigten Gewässer ermöglicht. Die Messstelle „Renaturiert" liegt in einem seit Kurzem renaturierten Bereich einige hundert Meter stromabwärts.*

Lösungsvorschlag einblenden

Abbildung 14: Kontiguitäts-Prinzip in der Gestaltung der Aufgaben. Aufgabenstellung, Freitextfeld zur Beantwortung der Aufgabe und auszuwertende Daten werden innerhalb einer auf dem Endgerät darstellbaren Seite angezeigt und erleichtern so die Bearbeitung gemäß dem Kontiguitäts-Prinzip (Screenshot virtuelles Labor, Projekt Open MINT Labs).

Modalitäts-Prinzip

Bildschirmtexte zur Erklärung bewegter Bilder können zu einer kognitiven Überlastung des bildhaften Kanals führen, wodurch Lernen erschwert wird (Clark & Mayer, 2011). Als Ausweg bietet sich die Präsentation von Erklärungen als gesprochener Text parallel zu bildlichen Darstellungen an. Wenngleich diese Erkenntnis als bedeutende Voraussetzung für erfolgreiches multimediales Lernen angesehen wird, sind auch Einschränkungen der Umsetzbarkeit dieses Prinzips gegeben.

Am Beispiel der Lerneinheit ergibt sich die Problemstellung neben dem allgemeinen Lautstärkepegel einer Schulklasse durch das Abspielen der Videos in der Lernumgebung über Lautsprecher. Dem wurde einerseits durch die Nutzung von (schülereigenen) Kopfhörern, andererseits auch durch die redundante Bereitstellung einer schriftlichen Versuchsanleitung begegnet. Weiterhin wurden die eingesetzten Lehrvideos mit einer erklärenden Tonspur anstelle von Bildschirmtext versehen (Abbildung 15).

Abbildung 15: Modalitäts-Prinzip im Kontext der Lernvideos. Entsprechend dem Modalitäts-Prinzip wurde in den Lehrvideos, insbesondere bei anspruchsvollen Darstellungen auf Bildschirmtext verzichtet und stattdessen die Erläuterung auf der Tonspur eingespielt (Screenshot virtuelles Labor, Projekt Open MINT Labs).

Redundanz-Prinzip

Die simultane Darbietung von Erklärungen als gesprochenes Audio wie auch als Bildschirmtext oder Untertitel kann den visuellen Kanal kognitiv insofern überlasten, als die eigentlich zu erklärenden Grafiken nicht mehr ausreichend wahrgenommen werden (Clark & Mayer, 2011). Die reine zusätzliche Nutzung von Bildschirmtext als dritte

Form der Darbietung von Inhalten neben der bildlichen und der Audiospur führt dabei nicht zu einer verbesserten Informationsaufnahme und kann im Fall einer möglichen Überlastung Lernen sogar behindern (Clark & Mayer, 2011).

Entsprechende Ausnahmen für bestimmte Situationen wurden definiert, sind jedoch auf die hier vorgestellte Lernumgebung nicht anwendbar. Aus diesem Grund wurde, wie im vorherigen Abschnitt zum Modalitäts-Prinzip bereits dargestellt, auf Bildschirmtext verzichtet.

Kohärenz-Prinzip

Interessante aber irrelevante Sounds, Texte oder Abbildungen, welche dazu dienen sollen, multimediale Lernumgebungen ansprechender zu gestalten, können als sogenannte *Seductive Details* zu einer Überlastung des Arbeitsgedächtnisses führen und Lernprozesse damit beeinträchtigen (Clark & Mayer, 2011). Insbesondere für grafische Darstellungen gilt außerdem: Einfache Grafiken erleichtern das Lernen eher als dekorative aber komplexe Grafiken. Ebenso stellen die Autoren heraus, dass Texte nur so ausführlich wie nötig sein und keine unnötigen Worte mit dem Ziel der Interessensgenerierung, Ausführung oder Vertiefung enthalten sollten.

In den virtuellen Laboren wurde auf unnötige dekorative Elemente oder Sounds vollständig verzichtet. Abbildungen wurden nur so detailreich wie nötig, ohne Ornamente oder *Seductive Details* umgesetzt (Abbildung 16). Hierzu wurden zahlreiche in den virtuellen Laboren genutzte Grafiken eigens zu diesem Zweck erstellt.

Abbildung 16: Kohärenz-Prinzip. Gemäß dem Kohärenz-Prinzip wurden möglichst einfache Darstellungen gestaltet, da diese zum Aufzeigen des jeweiligen Effektes genügen und somit keine zusätzliche kognitive Kapazität beanspruchen (Screenshot virtuelles Labor, Originalzeichnungen: Jasmin Hirtl, Projekt Open MINT Labs).

Personalisierungs-Prinzip

Informeller Stil, wechselnde Perspektive und virtuelle Coaches können den Lernprozess insbesondere für wenig fortgeschrittene Lernende unterstützen (Clark & Mayer, 2011). Ebenso kann es von Vorteil für den Lernprozess sein, den Autor der Lernumgebung greifbar oder sichtbar zu machen, etwa über Interview-Settings. Während ein tendenziell eher informeller Stil in den virtuellen Laboren teilweise umgesetzt werden konnte (Abbildung 17), deckten sich weitergehende Anpassungen wie ein virtueller Coach oder eine deutlich informellere Sprachgestaltung nicht mit dem Konzept des zugrunde liegenden Vorhabens und den externen Vorgaben.

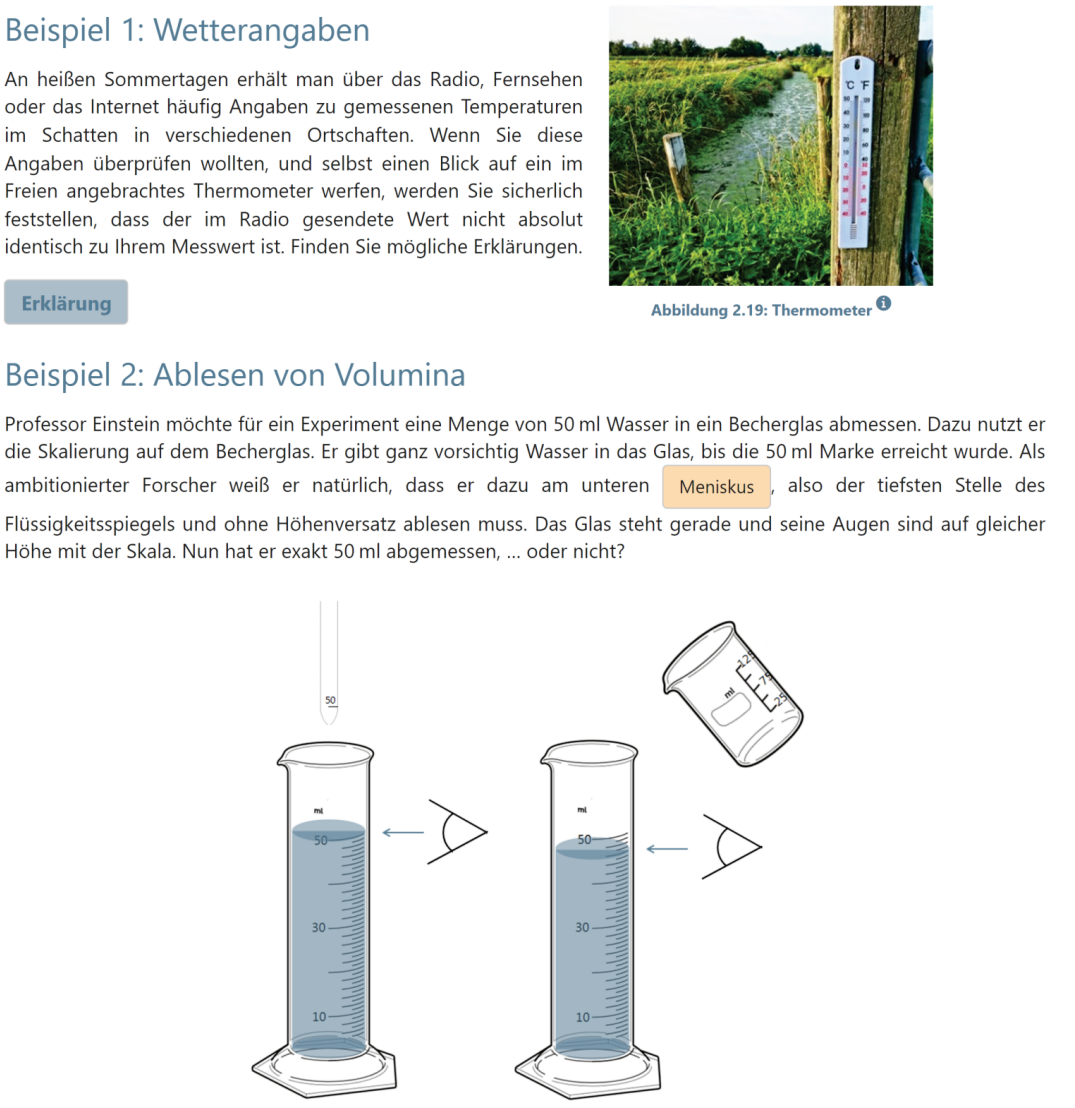


Abbildung 17: Personalisierungs-Prinzip. Eine eher informell beschriebene alltägliche Situation und der Bezug auf eine fiktive Person stellen hier nach dem Personalisierungsprinzip ein lernförderliches Kriterium in digitalen Settings dar (Screenshot virtuelles Labor, Projekt Open MINT Labs, Originalfoto „Thermometer“: Photo by MabelAmber, veröffentlicht unter Pixabay-Lizenz).

Segmentierungs- und Vorentlastungs-Prinzip

Komplexe Lernumgebungen können Lernende kognitiv überfordern. Durch geeignete Segmentierung in sinnvolle und bearbeitbare Abschnitte sowie durch eine entsprechende Vorentlastung kann dieser Überforderung entgegengewirkt werden (Clark & Mayer, 2011).

Eine entsprechende Segmentierung ist in den virtuellen Laboren durch die Organisation und Aufteilung der Unterkapitel realisiert. Hierzu wurden die Fachinhalte segmentiert und nacheinander dargeboten (Abbildung 18), wodurch eine Reduzierung der materialbezogenen kognitiven Belastung erreicht werden kann (Kalyuga, 2009). Eine gezielte Vorentlastung der Inhalte ist aufgrund der Abgeschlossenheit des Lernangebots nicht umsetzbar. Diese könnte jedoch im Unterrichtsgang durch die Lehrpersonen erfolgen.

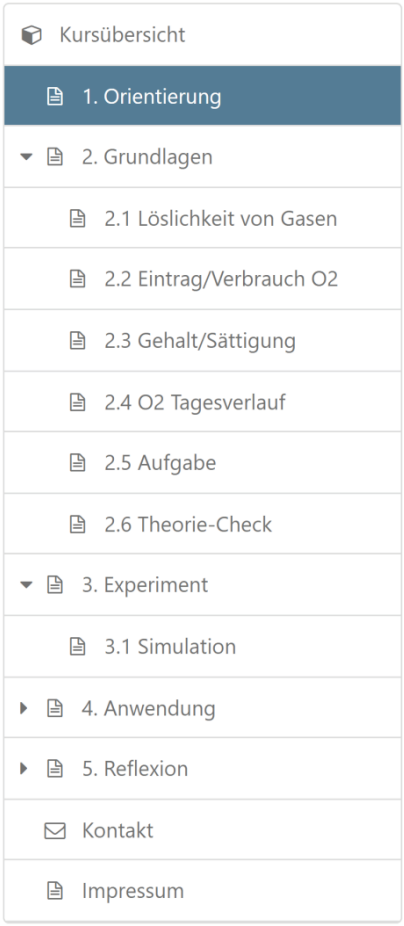


Abbildung 18: Segmentierungs-Prinzip. Die Segmentierung der theoretischen Grundlagen in Kapitel 2 durch Unterkapitel soll der Reduzierung der kognitiven Belastung dienen (Screenshot virtuelles Labor, Projekt Open MINT Labs).

Umsetzung der Cognitive Flexibility Theory in den virtuellen Laboren

Weiterhin fand die *Cognitive Flexibility Theory* als Grundlage für das Lernen in komplexen Inhaltsdomänen Eingang in die Gestaltung der virtuellen Labore (Spiro et al., 1988). Zur Vermittlung solcher Inhalte in multimedialen Lernumgebungen eignen sich multiple Repräsentationen (vgl. Kapitel 2; Ainsworth, 2006; Jacobson & Spiro, 1993). Die verschiedenen Darbietungsformen lassen dabei eine kognitiv flexible Nutzung entsprechend der bevorzugten Vorgehensweise der Lernenden zu. Weiterhin wird durch die multiplen Repräsentationen der Aufbau flexibel anwendbaren Transferwissens gefördert.

Exemplarisch sei hier auf die multiplen Repräsentationsformen der Versuchsanleitungen – teilweise als HTML-Dokument in der Lernumgebung selbst, als druckbare Anleitung im PDF-Format und als Lernvideo – verwiesen (Abbildung 19).

Abbildung 19: Förderung der kognitiven Flexibilität. Verschiedene Repräsentationen der Versuchsdurchführung sollen multiple Zugänge zum Lerninhalt ermöglichen (Screenshot virtuelles Labor, Projekt Open MINT Labs).

3.2 Konzeption der Lerneinheit

Konzeption der Lerneinheit

Lehrplanbezüge

- Orientierung an den Lehrplänen für das Fach Chemie für die Mittel- und Oberstufe in Rheinland-Pfalz
- Verortung innerhalb der Kompetenzbereiche und Basiskonzepte
- Anknüpfungspunkte für einen fächerübergreifenden bzw. fächerverbindenden Unterricht (MINT-Fächerverbund einschließlich Erdkunde)
- Berücksichtigung der Bildungsstandards für das Fach Chemie
- Exemplarische Darstellung der angesprochenen Teilkompetenzen gemäß der Bildungsstandards für den mittleren Schulabschluss und die allgemeine Hochschulreife

Zielgruppe und Sozialform

- Darstellung der ausführlichen Stundenverlaufspläne für Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung
- Klassenstufe 10 – 13
- Partnerarbeit in Lerntandems während Vor- und Nachbereitung möglich
- Kleingruppenarbeit in der Experimentierphase

Lernvoraussetzungen

- Explizit angesprochene Kompetenzen nach dem Kompetenzmodell des Strategiepapiers digitale Bildung der KMK
- Abhängigkeit der Lernvoraussetzungen von der fachinhaltlichen Thematik des virtuellen Labors
- Didaktische Reduktion der Inhalte in den virtuellen Laboren

Nachfolgend werden Bezüge der Lerneinheit zu den Lehrplänen der naturwissenschaftlichen Fächer – einschließlich Erdkunde – in Rheinland-Pfalz dargelegt. Der Fokus liegt hier aufgrund der Verortung dieser Arbeit auf den Lehrplänen für das Fach Chemie. Weiterhin wird der Aufbau der Lerneinheit ausgehend von Zielgruppe und Lernvoraussetzungen hin zur gesamtheitlichen Konzeption betrachtet.

Lehrplanbezüge

Die Lehrpläne für die naturwissenschaftlichen Fächer der Sekundarstufe I in Rheinland-Pfalz sind neben der Unterteilung in Themenfelder vor allem durch den kompetenzorientierten und auf Basiskonzepte zurückzuführenden Aufbau charakterisiert. Hierbei werden die vier Kompetenzbereiche Umgang mit Fachwissen, Erkenntnisgewinnung, Kommunikation und Bewertung unterschieden. Das Fachwissen wird weiterhin durch Themenfeld-übergreifende Basiskonzepte strukturiert, welche sich fachspezifisch konsequent durch den Lehrplan ziehen. Für das Fach Chemie sind hier die Basiskonzepte Energie, Teilchen-Materie/Stoff, Struktur-Eigenschaft-Funktion und chemische Reaktion als das Fachwissen strukturierende Konzepte zu nennen (Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur, 2014). Gemäß der Vorgaben der Bildungsstandards im Fach Chemie für den mittleren Schulabschluss werden die Schwierigkeits-

grade im Sinne der Merkmale von Aufgaben innerhalb einer Kompetenz in drei Anforderungsbereiche (Abbildung 20) unterteilt (Kultusministerkonferenz, 2005).

		Anforderungsbereich		
		I	II	III
Kompetenzbereich	Fachwissen	Kenntnisse und Konzepte zielgerichtet wiedergeben	Kenntnisse und Konzepte auswählen und anwenden	komplexere Fragestellungen auf der Grundlage von Kenntnissen und Konzepten planmäßig und konstruktiv bearbeiten
	Erkenntnisgewinnung	bekannte Untersuchungsmethoden und Modelle beschreiben, Untersuchungen nach Anleitung durchführen	geeignete Untersuchungsmethoden und Modelle zur Bearbeitung überschaubarer Sachverhalte auswählen und anwenden	geeignete Untersuchungsmethoden und Modelle zur Bearbeitung komplexer Sachverhalte begründet auswählen und anpassen
	Kommunikation	bekannte Informationen in verschiedenen fachlich relevanten Darstellungsformen erfassen und wiedergeben	Informationen erfassen und in geeigneten Darstellungsformen situations- und adressatengerecht veranschaulichen	Informationen auswerten, reflektieren und für eigene Argumentationen nutzen
	Bewertung	vorgegebene Argumente zur Bewertung eines Sachverhaltes erkennen und wiedergeben	geeignete Argumente zur Bewertung eines Sachverhaltes auswählen und nutzen	Argumente zur Bewertung eines Sachverhaltes aus verschiedenen Perspektiven abwägen und Entscheidungsprozesse reflektieren

Abbildung 20: Kompetenz- und Anforderungsbereiche der Bildungsstandards für das Fach Chemie. Quelle: Kultusministerkonferenz, 2005, S. 14

Diese Struktur findet ihre Fortführung im Kompetenzmodell für die Oberstufe. Hier wird ebenfalls in Sach-, Erkenntnisgewinnungs-, Kommunikations- und Bewertungskompetenz untergliedert. Eine Besonderheit ergibt sich durch die Unterscheidung der Anforderungsniveaus für die Oberstufe, wobei für das Grundfach „Unterricht auf

grundlegendem Anforderungsniveau […] das Lernniveau der gymnasialen Oberstufe unter dem Aspekt einer wissenschaftspropädeutischen Bildung [repräsentiert]“ (Kultusministerkonferenz, 2020, S. 13). Dem erhöhten Anforderungsniveau (Leistungsfach) ist zusätzlich zur vorgenannten Definition die exemplarische Vertiefung immanent. Weiterhin ist anzumerken, dass in den Bildungsstandards für die Oberstufe im Fach Chemie lediglich drei Basiskonzepte wiederzufinden sind, welche jedoch an die Basiskonzepte aus der Sekundarstufe I anknüpfen: Konzept vom Aufbau und von den Eigenschaften der Stoffe und ihrer Teilchen, das Konzept der chemischen Reaktion und das Energiekonzept (Kultusministerkonferenz, 2020). Die Anforderungsbereiche bestehen in der Sekundarstufe II analog der in Abbildung 20 dargestellten Beschreibungen fort (Kultusministerkonferenz, 2020).

Im Zuge der Lerneinheit können die in diesem Abschnitt beschriebenen Inhalte des *Themenfelds 9: Den Stoffen auf der Spur* des Lehrplans für das Fach Chemie in der Sekundarstufe I in Rheinland-Pfalz sowie weiterer Themenfelder des naturwissenschaftlichen Fächerverbunds erarbeitet oder vertieft werden (Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur, 2014). Im Sinne einer Erarbeitung dieser Lehrplaninhalte wird konkret auf die im Lehrplan geforderten Kompetenzen aus dem Bereich der Wasseranalytik Bezug genommen, wobei die Lernenden hier vorrangig quantitative Bestimmungsverfahren kennenlernen. Weiterhin erarbeiten sich die Schüler:innen im Verlauf der virtuellen Labore diverse Messverfahren. Die Messgenauigkeiten der angewandten Verfahren werden im Labor „Aufbau, Bedienung und Auswertung“ explizit und ausführlich adressiert, sodass eine Bewertung und Einordnung der erhobenen Messdaten erfolgen kann. Im Zuge der Auswertung und Diskussion der Messdaten werden sowohl Tabellen als auch Diagramme zur Visualisierung genutzt, wodurch der Bezug zur Visualisierungskompetenz („Schülerinnen und Schüler wechseln Darstellungsformen bei Verwendung von Messwerten, Diagrammen, Tabellen“; Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur, 2014, S. 82) hergestellt werden kann.

Letztlich zeigen die Kontexte im Anwendungskapitel der virtuellen Labore stets auch realistische Problemstellungen auf, welche eine Nutzung der Daten der Wasseranalytik ebenfalls im Sinne der Lehrplankompetenzen abbilden. In Summe können so alle in diesem Themenfeld geforderten Kompetenzen des Lehrplans adressiert werden. Darüber hinaus schaffen die Kontexte anknüpfungsfähiges Wissen mit Relevanz für Alltag und Berufswelt und bilden so auch die Intentionen des Lehrplans für das Fach Chemie mit ab (Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur, 2014)[17]. In besonderem Maße wird der Forderung des Lehrplans nachgekommen, wonach „in

[17] Aussage erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2023, S. 20), modifiziert

einem zeitgemäßen Chemie-Unterricht […] auch die moderne Analytik Eingang [findet]“ (Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur, 2014, S. 82).

Auch über das Themenfeld 9 hinaus ist eine Orientierung an den Lehrplaninhalten für das Fach Chemie in der Sekundarstufe I, wie nachfolgend dargestellt, deutlich (Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur, 2014). So ergeben sich Bezüge zu *Themenfeld 2: Von der Saline zum Kochsalz* durch die verbindlich geforderten Fachbegriffe der Ionenbindung und Leitfähigkeit gelöster Salze, welche im virtuellen Labor zur Leitfähigkeitsmessung ausgiebig thematisiert werden. Hier deckt sich der Kontextvorschlag des Lehrplans „Abraumsalze in Flüssen“ mit dem problematisierenden Einstieg und fortgeführten Kontext des virtuellen Labors.

Themenfeld 5: sauber und schön bezieht unter anderem Tenside als fachlichen Inhalt mit ein, im Bereich der Kontexte wird die Verbindung zu den virtuellen Laboren im Kontextbereich Umwelt und Verantwortung durch die Themen „Öl im Abwasser“ und „Abbaubarkeit“ allgemein erkennbar. Wenngleich diese Aspekte in den virtuellen Laboren nicht explizit behandelt werden, so können hier doch naheliegende Anbindungen für den Unterricht geschaffen werden.

In *Themenfeld 6: Säuren und Laugen* wird die Kompetenz des Diskutierens möglicher Folgen eines Eintrages von Säuren und Laugen in die Umwelt gefordert. Das virtuelle Labor zur pH-Wert-Messung kann hierzu auch angesichts des vorgeschlagenen Kontexts „Abwasser aus Industrie und Labor“ einen essenziellen Beitrag leisten.

Weitere Bezüge können durch *Themenfeld 10: gefährliche Stoffe* am Beispiel der Fischgiftigkeit von Ammoniak oder der Vertiefung zum „Blue-Baby-Syndrom“ im virtuellen Labor zu Stickstoffverbindungen über das Basiskonzept Struktur-Eigenschaft-Funktion geschaffen werden.

Ebenso bietet sich *Themenfeld 11: Stoffe im Fokus von Umwelt und Klima* für eine Betrachtung des Stickstoffkreislaufs an, welcher als ein Beispiel der in diesem Themenfeld geforderten Vermittlung des Kreislaufgedankens dienen kann.

Dem vorbezeichneten Aufbau der Bildungsstandards entsprechend werden im Verlauf der Lerneinheit Standards der vier Kompetenzbereiche angesprochen. Diese sind in Tabelle 3 dargelegt.

Tabelle 3: Teilkompetenzen der Bildungsstandards für den mittleren Schulabschluss im Fach Chemie, welche in der Lerneinheit adressiert werden. F = Fachwissen, E = Erkenntnisgewinnungskompetenz, K = Kommunikationskompetenz, B = Beurteilungskompetenz (Kultusministerkonferenz, 2005).

Teilkompetenz (Basiskonzept) [Schülerinnen und Schüler…]	**Bezug zur Lerneinheit**
F 1.2 (Stoff-Teilchen-Beziehungen) … beschreiben modellhaft den submikroskopischen Bau ausgewählter Stoffe.	Erklärung Kohlensäuregleichgewicht anhand der Strukturformeln.
F 3.5 (chemische Reaktion) … beschreiben die Umkehrbarkeit chemischer Reaktionen.	Ammonium-Ammoniak-Gleichgewicht, Kohlensäure-Gleichgewicht, Stickstoffkreislauf
F 3.6 (chemische Reaktion) … beschreiben Beispiele für Stoffkreisläufe in Natur und Technik als Systeme chemischer Reaktionen.	Stickstoffkreislauf in der Natur und im Gewässer
F 3.7 (chemische Reaktion) … beschreiben Möglichkeiten der Steuerung chemischer Reaktionen durch Variation von Reaktionsbedingungen.	pH-Abhängigkeit des Ammonium-Ammoniak-Gleichgewichts, Temperaturabhängigkeit von Reaktionen
E 3 … führen qualitative und einfache quantitative experimentelle und andere Untersuchungen durch und protokollieren diese.	Untersuchung der Gewässerparameter mit Hilfe quantitativer, instrumenteller Analytik, Protokollieren der Daten.
E 5 … erheben bei Untersuchungen, insbesondere in chemischen Experimenten, relevante Daten oder recherchieren sie.	Eigene Datenerhebung am Gewässer, Recherche ergänzender Daten im virtuellen Labor, z. B. Wetterparameter.
E 6 … finden in erhobenen oder recherchierten Daten, Trends, Strukturen und Beziehungen, erklären diese und ziehen geeignete Schlussfolgerungen.	Tag-/ Nachtzyklus der Sauerstoffsättigung im Gewässer, Jahresgang von Parametern, zunehmender Chloridgehalt in der Werra durch Einleitungen.
K 7 … dokumentieren und präsentieren den Verlauf und die Ergebnisse ihrer Arbeit situationsgerecht und adressatenbezogen.	Dokumentation der Messwerte, Vorstellung der Messwerte und deren Einordnung im Unterrichtsgespräch.
K 8 … argumentieren fachlich korrekt und folgerichtig.	Begründungen innerhalb der Aufgaben der virtuellen Labore.
B 2 … erkennen Fragestellungen, die einen engen Bezug zu anderen Unterrichtsfächern aufweisen und zeigen diese Bezüge auf.	Fächerübergreifende Betrachtungen, v.a. Biologie, Erdkunde. Z. B. Gewässerstrukturgüte, anthropogene Einflüsse.
B 3 … nutzen fachtypische und vernetzte Kenntnisse und Fertigkeiten, um lebenspraktisch bedeutsame Zusammenhänge zu erschließen.	Einfluss des Menschen auf die Fließgewässer, z. B. Eutrophierung.

Für das Fach Biologie zeigt sich eine ebenfalls deutliche Relevanz der Konzeption (Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur, 2014). Primär ist hier das *Themenfeld 4: Pflanze, Pflanzenorgane, Pflanzenzellen* zu nennen. In diesem Themenfeld steht unter anderem die Photosynthese im Fokus der fachlichen Betrachtung, eine Anknüpfung an das virtuelle Labor zur Sauerstoffsättigung mit den dort dargestellten Erläuterungen und Aufgaben zum Tag-/ Nachtzyklus der Pflanzen ist gegeben. Außerdem bietet sich der Kontextvorschlag „Von der Gründüngung zur Düngerfabrik“ in Bezug auf das virtuelle Labor zu Stickstoffeinträgen an, in welchem die Gründüngung als Variante zur nachhaltigen Bewirtschaftung diskutiert wird.

Themenfeld 5: Ökosysteme im Wandel legt den Fokus auf Wechselwirkungen und anthropogene Einflüsse in komplexen Ökosystemen (Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur, 2014). Sowohl die menschlichen Einwirkungen und deren teils unumkehrbare Einflüsse im Sinne des Basiskonzepts Entwicklung als auch die immanente Komplexität der wechselwirkenden biotischen und abiotischen Faktoren eines solchen Systems (Basiskonzept System) werden in den virtuellen Laboren an mehreren Stellen thematisiert. Biodiversität als Resilienzfaktor und Selbstreinigungsvermögen von Fließgewässern (vergleiche Kapitel Hydromorphologische Parameter) können hier vertiefend bearbeitet werden.

Die vorgenannten Inhalte werden in *Themenfeld 12: biologische Anthropologie* um Einflüsse der kulturellen Evolution und deren Auswirkungen auf Mensch und Biosphäre erweitert, sodass hier ebenfalls die Auswirkungen menschlichen Handelns auf die Biosphäre (Basiskonzept System) diskutiert werden können (Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur, 2014). Ansatzpunkte hierzu bieten etwa die virtuellen Labore zu Stickstoffeinträgen und Chloridgehalt.

Auch zum Fach Physik lassen sich Querbezüge herstellen, welche in diesem Absatz benannt werden (Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur, 2014). So lassen sich Erkenntnisse des *Themenfelds 9: Gesetzmäßigkeiten im elektrischen Stromkreis* mit dem virtuellen Labor zur Leitfähigkeit verknüpfen. *Themenfeld 11: Sensoren im Alltag* verweist als möglichen Kontext explizit auf die Umweltanalytik. Auch ließe sich die generelle Funktionsweise der in der Lerneinheit genutzten Sensoren im Zuge dieses Themenfeldes recherchieren und klären und die Signalwandlung beschreiben, sodass letztlich mit konkretem Bezug zu den Sensoren der Gewässeranalytik die Kompetenzen dieses Themenfeldes adressiert werden können. Ebenso weist der Umweltanalytik-Kontext Relevanz für *Themenfeld 12: Praxis und Forschung* auf. Lernende sollen hier eigene Hypothesen formulieren und passende physikalische Experimente unter Nutzung ihrer Fachkenntnisse planen, dokumentieren und auswerten. Dies könnte insbesondere als Vertiefung der eher physikalisch ausgerichteten Sensorik (Leitfähigkeit, Fließgeschwindigkeit) genutzt werden.

Abseits der naturwissenschaftlichen Fächer ergeben sich Anknüpfungspunkte zur Erdkunde in *Lernfeld II.3 – Exogene Naturkräfte verändern Räume* (Ministerium für Bildung, 2021). In diesem Lernfeld geforderte Kompetenzen fokussieren die formende Kraft des Wassers und Nutzungsmöglichkeiten und Eingriffe des Menschen in aquatische Ökosysteme und sind daher insbesondere mit den virtuellen Laboren zur Fließgeschwindigkeit und weiteren Betrachtungen der Gewässerstrukturgüte gut vereinbar. Weiterführend könnte insbesondere die Strukturgüte auch in *Lernfeld II.4 – Grenzen der Raumnutzung* einen Teilinhalt darstellen (Ministerium für Bildung, 2021).

Unter Rückbezug auf den der Mittelstufe vorangegangenen fächerverbindenden Unterricht kann an Inhalte des Fachs Naturwissenschaften angeknüpft werden. Konkret sind hierbei in *Themenfeld 1: von den Sinnen zum Messen* sowohl der Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung zum Thema Messgenauigkeit von Messgeräten als auch der Kompetenzbereich Kommunikation mit Blick auf das Erstellen von Diagrammen und Tabellen zur Auswertung von Messergebnissen zu nennen (Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Jugend und Kultur, 2010). Beide Kompetenzbereiche spiegeln sich im virtuellen Labor „Aufbau, Bedienung und Auswertung“ wider. *Themenfeld 4: Pflanzen – Tiere – Lebensräume* schließt auf fachinhaltlicher Ebene sowohl Ökosysteme als auch Biodiversität, Angepasstheit von Lebewesen und Maßnahmen zum Klimaschutz mit ein (Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Jugend und Kultur, 2010). Bezüge hierzu finden sich in allen parameterbezogenen virtuellen Laboren in mehr oder minder starkem Maße wieder. *Themenfeld 5: Sonne – Wetter – Jahreszeiten* im Lehrplan Naturwissenschaften enthält unter anderem Inhalte zur Photosynthese und Angepasstheit von Pflanzen und kann daher eine Verbindung zum virtuellen Labor Sauerstoffsättigung schaffen (Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Jugend und Kultur, 2010).

Anknüpfungspunkte für den Chemieunterricht in der Oberstufe bieten sich im Baustein „Analytik in Anwendungen“ (Grundfach) durch fachübergreifende Gewässeruntersuchungen in Verbindung mit dem Fach Biologie zur Maßanalyse an (Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung Rheinland-Pfalz, 1998b).[18] Für die Diskussion von Nachweisgrenzen und die Problematik von Grenzwerten kann Bezug auf die Inhalte des virtuellen Labors „Aufbau, Bedienung und Auswertung“ genommen werden, in welchem diese Inhalte ausführlich thematisiert werden. Waldsterben und Umweltschutz im Zusammenhang mit fossilen Brennstoffen (Baustein „Erdöl – Rohstoff und Energieträger“) stellen die Kontextualisierung im virtuellen Labor zum pH-Wert dar. Im Zuge des Bausteins „Säuren und Basen“ wird die Verwendung von Salzen betrachtet, wobei unter anderem die Inhalte Nitrat-Nitrit-Problematik und Düngung sowie Eutrophierung besprochen werden können. Diese sind im virtuellen Labor zu Stickstoffeinträgen dargestellt. Auch im Baustein „Seifen – Waschmittel – Tenside“ kann über

[18] Aussage erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2023, S. 19), modifiziert

die Abbaubarkeit von Tensiden, Eutrophierung durch Phosphate und Remobilisierung von Schwermetallen sowie die Fällungsstufen in Kläranlagen ein Bezug zur Gewässeranalytik hergestellt werden (Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung Rheinland-Pfalz, 1998b). Ferner kann im Baustein „Chemisches Gleichgewicht und Massenwirkungsgesetz“ das Ammonium-Ammoniak-Gleichgewicht als exemplarische Anbindung an den Umweltkontext dienen. Angesichts der spezifischen Inhalte der virtuellen Labore eher indirekte Bezüge lassen sich zum Baustein „Atmosphärenchemie“ über die Einordnung von CO_2 als Treibhausgas, über Gefahrstoffe oder die Komplexchemie herstellen. Tabelle 4 bietet eine Übersicht der Bausteine, welche als relevante Bezüge zu den virtuellen Laboren identifiziert wurden, untergliedert in Grund- und Leistungsfach sowie mit entsprechend gekennzeichneten Bezügen.

Tabelle 4: Anknüpfungsfähige Bausteine im Grund- und Leistungsfach Chemie in der Oberstufe im Sinne der Inhalte der konzipierten Lerneinheit. Eine konkrete Zuordnung zu den virtuellen Laboren ist aufgrund der Vielschichtigkeit der Lehrplaninhalte und der virtuellen Labore nicht vorgesehen (Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung Rheinland-Pfalz, 1998b). Die Bausteine sind jeweils dem Wahl- (W), Pflicht- (P) oder dem Wahlpflichtbereich (WP) zugeordnet.

Grundfach	**Leistungsfach**	**Bezug zum Baustein**
10 P: Analytik in Anwendungen	62 WP: Analytik I – klassische Verfahren & 63: Analytik II – Chromatographie und Photometrie	Gewässeruntersuchung zur Maßanalyse, Nachweisgrenzen, Grenzwerte
16 P: Chemisches Gleichgewicht und Massenwirkungsgesetz	76 P: Chemisches Gleichgewicht und Massenwirkungsgesetz	Düngemittel, Gleichgewichtsvorgänge in der Atmosphäre, Löslichkeitsprodukt
21 W: Erdöl – Rohstoff und Energieträger	82 W: Erdöl – Rohstoff und Energieträger	Waldsterben, Rauchgasentschwefelung, saurer Regen
43 P: Säuren und Basen	109 P: Säuren und Basen I – pH- und pK-Werte & 110 P: Säuren und Basen II - Anwendungen	pH-Werte im Gewässer, Pufferkapazität und Puffersysteme im Gewässer
44 W: Seifen – Waschmittel – Tenside	111 W: Seifen – Waschmittel – Tenside	Wasserhärte & Enthärtung, Abbaubarkeit, Eutrophierung, Remobilisierung von Schwermetallen, Fällungsstufen in Kläranlagen
	67 W: Atmosphärenchemie	CO_2 als Treibhausgas
	86 P: Gefahrstoffe	Grenzwerte und Nachweisgrenzen, Wirkung eines Stoffes auf die Umwelt
	91 W: Komplexchemie II – Strukturen und Anwendungen	Wasserhärte & Enthärtung, komplexometrische Titration

Mit Blick auf die Bildungsstandards für die Sekundarstufe II kann im Rahmen der hier vorgestellten Lerneinheit vorrangig das *Basiskonzept vom Aufbau und von den Eigenschaften der Stoffe und ihrer Teilchen* bedient werden, in welchem analytische Verfahren sowohl qualitativer als auch quantitativer Natur explizit gefordert werden (Kultusministerkonferenz, 2020). Darüber hinaus finden sich in den virtuellen Laboren zahlreiche Gleichgewichtsreaktionen, beispielsweise das Ammonium-Ammoniak-Gleichgewicht oder das Kohlensäure-Gleichgewicht, welche sich in das *Basiskonzept der chemischen Reaktion* einfügen. Tabelle 5 stellt ausgewählte Teilkompetenzen der vier vorbezeichneten Kompetenzbereiche dar, welche in der Lerneinheit gezielt adressiert werden.

Tabelle 5: Teilkompetenzen der Bildungsstandards für die allgemeine Hochschulreife im Fach Chemie, welche in der Lerneinheit adressiert werden. S = Sachkompetenz, E = Erkenntnisgewinnungskompetenz, K = Kommunikationskompetenz, B = Beurteilungskompetenz (Kultusministerkonferenz, 2020).

Teilkompetenz [Schülerinnen und Schüler…]	**Bezug zur Lerneinheit**
S 5 … beschreiben Stoffkreisläufe in Natur oder Technik als Systeme chemischer Reaktionen.	Erklärung und Herleitung Stickstoffkreislauf.
S 6 … unterscheiden konsequent zwischen Stoff- und Teilchenebene.	Konsequente Unterscheidung in Darstellungen oder Erklärungen.
E 5 … führen qualitative und quantitative experimentelle Untersuchungen – den chemischen Arbeitsweisen und Sicherheitsregeln entsprechend – durch, protokollieren sie und werten diese aus.	Durchführung, Protokollierung und Auswertung der Versuche zur Gehalts- und Konzentrationsbestimmung in der Gewässeranalytik.
E 6 … nutzen digitale Werkzeuge und Medien zum Aufnehmen, Darstellen und Auswerten von Messwerten, für Berechnungen, Modellierungen und Simulationen.	Digitale Erfassung der Messdaten mittels Tablets, Darstellung und Auswertung am PC, teilweise innerhalb der virtuellen Labore.
E 11 … stellen bei der Interpretation von Untersuchungsbefunden fachübergreifende Bezüge her.	Herausstellen der Bedeutung der Wasserparameter für das Ökosystem in allen virtuellen Laboren.
K 8 … strukturieren und interpretieren ausgewählte Informationen und leiten Schlussfolgerungen ab.	Interpretation der Messwerte und Rückschlüsse auf Ursachen/ Auswirkungen.
K 11 … präsentieren chemische Sachverhalte sowie Lern- und Arbeitsergebnisse sach-, adressaten- und situationsgerecht unter Einsatz geeigneter analoger und digitaler Medien.	Grafische und schriftliche Darstellung der auszuwertenden eigenen Messdaten zur Vorstellung im Klassenverband.
B 6 … beurteilen Chancen und Risiken ausgewählter Technologien, Produkte und Verhaltensweisen fachlich und bewerten diese.	Beurteilen für und wider des Kali-Abbaus im virtuellen Labor „Chloridgehalt“.
B 10 … bewerten die gesellschaftliche Relevanz und ökologische Bedeutung der angewandten Chemie.	Gründüngung als Alternative zu künstlichen Düngemitteln im virtuellen Labor „Stickstoffeinträge“.
B 13 … beurteilen und bewerten Auswirkungen chemischer Produkte, Methoden, Verfahren und Erkenntnisse sowie des eigenen Handelns im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung aus ökologischer, ökonomischer und sozialer Perspektive.	Beurteilung der anthropogenen Einflüsse unter Einbezug der verschiedenen Perspektiven, z. B. zum Thema Gewässerstruktur. Dies kann als Anschluss an die Lerneinheit ausgebaut werden.

Anknüpfungspunkte für die Fächer Biologie und Physik in der Oberstufe seien hier nur exemplarisch dargestellt. Im Fach Biologie bietet *Leitthema 3: Umwelt & Innenwelt lebender Systeme* die Gelegenheit zur Erkundung eines Ökosystems in Zusammenhang mit dessen Dynamik, anthropogenen Einwirkungen und Umweltschutzmaßnahmen (Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung Rheinland-Pfalz, 1998a). Somit könnte dieses gesamte Leitthema in Bezug zu aquatischen Ökosystemen gesetzt werden. Weiterhin sind die Pflichtbausteine zur Photosynthese in Theorie und Praxis geeignet, die Assimilation und Tag-/ Nachtzyklen von Wasserpflanzen und damit die Sauerstoffsättigung eines Gewässers näher zu betrachten (Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung Rheinland-Pfalz, 1998a).

Für das Fach Physik könnte eine tiefergehende Betrachtung der strömungsdynamischen Prozesse, aufbauend auf dem virtuellen Labor zur Fließgeschwindigkeit im Baustein „Strömungsphysik“ sowie im Leistungsfach außerdem eine allgemeine Bezugnahme im Baustein „Physik der Atmosphäre/ Geophysik“ erfolgen (Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung Rheinland-Pfalz, 1998c).

Zielgruppe und Sozialform

Nachfolgend werden die Unterrichtsverlaufspläne der Lerneinheit, unterteilt in die vorgesehenen drei Doppelstunden, vorgestellt. Anschließend werden Zielgruppe und Sozialform eingehender betrachtet.

Unterrichtsverlaufsplan

Thema der Stunde: Digitale Vorbereitung zur Erhebung von Parametern der chemischen Gewässergüte
Thema der Unterrichtseinheit: Inhaltliche Erarbeitung, Erhebung und Auswertung sowie Einordnung der chemischen Güte eines Fließgewässers
Lernziele der Stunde: Die SuS können Eintragswege und Abbauprozesse typischer anthropogener Immissionen bzw. Einflussgrößen auf spezifische Parameter in Gewässern wiedergeben. Die suS können einfache Wechselwirkungen zwischen Parametern der chemischen Gewässergüte erklären (z.B. Temperatur – Sauerstoffsättigung). Die SuS können das vorgestellte Messsystem zur Erfassung der Gewässergüteparameter mit Hilfe der Anleitung eigenständig aufbauen. Die SuS können die Grenzen der zu nutzenden Messgeräte (Messbereiche, Nachweisgrenzen) einordnen und deren Eignung für die anstehende Analyse einschätzen. Die SuS können einfache tabellarische Datensätze in geeigneter Diagrammform darstellen und den Verlauf der Daten beschreiben.

Zeit	U-Schritt	Funktion	U-Form	U-Mittel
10	**Bereitstellende Wiederholung:** Rückblick virtuelles Labor „Aufbau, Bedienung und Auswertung“ (als Hausaufgabe oder kurz zuvor erfolgt)	Beantworten etwaiger Rückfragen und inhaltliche Klärung	Unterrichtsgespräch	Virtuelles Labor „Aufbau, Bedienung und Auswertung“, Laptop/ PC/ Tablet
5	**Einstieg:** Hinführung Gewässergüte, Relevanz und Bedeutung für den Menschen **Problemstellung:** Abnehmende Gewässergüte bringt Ökosysteme ins Wanken	Herausstellen der Bedeutung des Themas; Betonung des systemischen Charakters und der Bedeutung der Fließgewässer	Unterrichtsgespräch	-
65	**Erarbeitung:** Bearbeitung der virtuellen Labore bis einschließlich Kapitel 3, Punkt „Versuchsdurchführung“. Umsetzung in 6 inhaltlich unterteilten Kleingruppen (s. U-Mittel).	Erarbeitung der fachlichen Grundlagen der Parameter zur chemischen Gewässergüte; Vorstellung des Versuchs	Arbeitsteilige Schülerselbsttätigkeit, ggf. Partnerarbeit	Virtuelle Labore - Chloridgehalt - Fließgeschwindigkeit - Leitfähigkeit - pH-Wert - Sauerstoffsättigung - Stickstofflieferanten Laptop/ PC/ Tablet; Kopfhörer
10	**Sicherung:** Erfolgt innerhalb des virtuellen Labors digital **Zusammenfassung:** Klärung inhaltlicher Rückfragen **Hausaufgabe:** Keine	Sicherung der Lerninhalte	Unterrichtsgespräch/ Einzelbetreuung der Teams bei Bedarf	Virtuelle Labore - Chloridgehalt - Fließgeschwindigkeit - Leitfähigkeit - pH-Wert - Sauerstoffsättigung - Stickstofflieferanten Laptop/ PC/ Tablet; Kopfhörer

Abbildung 21: Unterrichtsverlaufsplan der ersten Doppelstunde - Vorbereitung mit den virtuellen Laboren.

Unterrichtsverlaufsplan

Thema der Stunde: Erhebung von Parametern der chemischen Gewässergüte
Thema der Unterrichtseinheit: Inhaltliche Erarbeitung, Erhebung und Auswertung sowie Einordnung der chemischen Güte eines Fließgewässers
Lernziele der Stunde: Die SuS können die Parameter Chloridgehalt, Nitratgehalt, Ammoniumgehalt, Sauerstoffgehalt &-sättigung, pH-Wert, Leitfähigkeit und Fließgeschwindigkeit eines Fließgewässers mithilfe des Einstein Messsystems eigenständig bestimmen. Die SuS können die Plausibilität der Messdaten einschätzen. Die SuS können die digitalen Messwerte im Zusammenhang mit ihrer jeweiligen Messstelle (digital) dokumentieren und exportieren. Die SuS können zwischen verschiedenen Darstellungsformen der Messreihen wechseln und diese im Messbereich verorten. (simulierter analoger Zeiger, Datentabelle, dynamisches Balkendiagramm, Zahlenwert)

Zeit	U-Schritt	Funktion	U-Form	U-Mittel
5	**Bereitstellende Wiederholung:** Rückbezug zu den virtuellen Laboren der vorangegangenen Stunde.	Klärung des Zweckes der Datenerfassung.	Unterrichtsgespräch	
5	**Einstieg:** Formulieren und Klären der Arbeitsaufträge und Gruppenzuteilungen **Problemstellung:** Bestimmung der Parameter durch in-line-Datenerhebung im Fließgewässer	Überleitung von der Theorie in die Praxis	Unterrichtsgespräch	Versuchsanleitungen in gedruckter Form/ digital auf Tablet
70	**Erarbeitung:** Durchführung der Messreihen zur Bestimmung der Parameter der chemischen Gewässergüte (Sauerstoff, Chlorid, Nitrat, Ammonium, pH-Wert, Leitfähigkeit, Fließgeschwindigkeit).	Messwerterhebung und Versuch	Arbeitsteilige Kleingruppenarbeit	Messsystem Einstein mit Elektroden für - Chloridgehalt - Fließgeschwindigkeit - Leitfähigkeit - pH-Wert - Sauerstoffsättigung - Nitrat- und Ammoniumgehalt Tablet mit App MiLab Dest. H_2O, Spritzen, Kalibrierstandards, Bechergläser
10	**Sicherung:** Digitale Dokumentation der Messdaten. **Zusammenfassung:** Zusammentragen und dokumentieren der gemittelten Messwerte. **Hausaufgabe:** Keine	Sicherung der Datenerhebung.	Unterrichtsgespräch	Flipchart/ Whiteboard, Tablets

Abbildung 22: Unterrichtsverlaufsplan der zweiten Doppelstunde - Datenerhebung im Freiland.

Unterrichtsverlaufsplan

Thema der Stunde: Nachbereitung der Erhebung von Parametern der chemischen Gewässergüte und deren Einordnung
Thema der Unterrichtseinheit: Inhaltliche Erarbeitung, Erhebung und Auswertung sowie Einordnung der chemischen Güte eines Fließgewässers
Lernziele der Stunde: Die SuS können den Einfluss der erhobenen Parameter zur chemischen Gewässergüte auf das Ökosystem Fließgewässer abschätzen. Die SuS können mögliche Auswirkungen einer Einflussnahme auf die Parameter zur Gewässergüte erklären. Die SuS können Messdaten digital in Form von Diagrammen auswerten. Die SuS können ausgewertete Messdaten interpretieren und Rückschlüsse auf deren Bedeutung für das Ökosystem ziehen.

Zeit	U-Schritt	Funktion	U-Form	U-Mittel
5	**Bereitstellende Wiederholung:** Rückbezug zu den durchgeführten Messungen und virtuellen Laboren.	Notwendigkeit der Auswertung und Einordnung der Daten herausstellen	Unterrichtsgespräch	Keine
2	**Einstieg:** Arbeitsauftrag Bearbeitung der virtuellen Labore ab Punkt 3 „Beobachtung“ ausgeben **Problemstellung:** Bedeutung der gemessenen Daten muss geklärt werden	Überleitung zur Datenauswertung und -einordnung	Unterrichtsgespräch	Virtuelle Labore
58	**Erarbeitung:** Bearbeiten der virtuellen Labore ab Punkt 3 „Beobachtung“	Auswertung und Interpretation der Daten sowie klären deren Bedeutung für das Gewässer	Schülerselbsttätigkeit/ Partnerarbeit	Virtuelle Labore - Chloridgehalt - Fließgeschwindigkeit - Leitfähigkeit - pH-Wert - Sauerstoffsättigung - Stickstofflieferanten Laptop/ PC/ Tablet
25	**Sicherung:** Präsentation und Diskussion der ausgewerteten Messdaten **Zusammenfassung:** Einordnung und Klären der Plausibilität der Messdaten **Hausaufgabe:** Keine	Herausstellen der Bedeutung der chemischen Parameter für das Ökosystem, plausibilisieren der Messdaten	Unterrichtsgespräch/ Schüler*innen-präsentation	Beamer/ Whiteboard

Abbildung 23: Unterrichtsverlaufsplan der dritten Doppelstunde - Nachbereitung mit den virtuellen Laboren.

Die konzipierte Lerneinheit adressiert Schüler:innen zum Ende der Sekundarstufe I, sowie der Sekundarstufe II (Klassenstufe 10 - 13). Sie kann generell an allen weiterführenden Schularten eingesetzt werden, nimmt jedoch auch im Sinne eines spiralcurricularen Aufbaus bereits weiterführende Themen der Sekundarstufe II mit in den Fokus. Zur Unterstützung der Lernenden bei möglicherweise auftretenden Problemen in der praktischen Versuchsdurchführung empfiehlt sich insbesondere bei voller Klassenstärke (25 - 30 Schüler:innen) der teilnehmenden Lerngruppen ein fächerverbindender Unterricht, sodass gleichermaßen fachlich wie auch personell eine adäquate Betreuung sichergestellt werden kann. Generell kann die Konzeption, bedingt durch die arbeitsteilige Gruppenarbeit, mit 8 - 24 Personen optimal durchgeführt werden. Ansätze einer Binnendifferenzierung wurden in den virtuellen Laboren in Form gestufter, bedarfsgerecht abrufbarer Hilfestellungen und Erklärungen realisiert (Frölich, 2012).

Bedingt durch die häufig begrenzte Anzahl an verfügbaren Endgeräten beziehungsweise die Leistungsfähigkeit der Schulnetzwerke findet die Erarbeitung der Inhalte der virtuellen Labore üblicherweise in Partnerarbeit statt. Hierzu werden die Lernpartner:innen thematisch den jeweiligen Parametern zugeordnet. Jedes Team erarbeitet sich übergreifend zunächst die Inhalte des virtuellen Labors „Aufbau, Bedienung und Auswertung“ als Grundlage, sofern dies nicht bereits als vorbereitende Hausaufgabe bearbeitet wurde, bevor anschließend jedes Team das jeweils thematisch zugeteilte virtuelle Labor bearbeitet. In Abhängigkeit von der Größe der Lerngruppe können die Teams aus der Vorbereitungsphase während der Arbeitsphase im Freiland mit weiteren inhaltlich identisch ausgerichteten Teams kombiniert werden, bevor im Anschluss die Auswertung und Ergebnissicherung im virtuellen Labor wieder in Partnerarbeit erfolgt. Sowohl als Einstieg in die Lerneinheit zum Darlegen des Themas und organisatorischen Ablaufs als auch zum Abschluss und der gemeinsamen Diskussion der Erkenntnisse aus der Lerneinheit wird jeweils das Unterrichtsgespräch als Sozialform gewählt.

Lernvoraussetzungen

Im Jahr 2017 formulierte die Kultusministerkonferenz eine Strategie zur Bildung in der digitalen Welt, welche in der Schule neben den Bildungsstandards ebenfalls umzusetzen ist. Neben offen formulierten Vorgaben, nach welchen die schulische Bildung auch angesichts der zunehmenden Digitalisierung auf eine gesamtgesellschaftliche Teilhabe im digitalen Zeitalter vorbereiten solle, wurden hier erstmalig explizite, verbindlich zu adressierende Kompetenzen definiert (Kultusministerkonferenz, 2017). Im Verlauf der Lerneinheit können einige der dort definierten Kompetenzen mit angesprochen werden, insbesondere durch die grundsätzliche Nutzung der digitalen Lernumgebung *per se* sowie durch das Erfassen, Verarbeiten und Auswerten der Daten (Tabelle 6).

Tabelle 6: Im Rahmen der Lerneinheit angesprochene Kompetenzen nach dem Kompetenzmodell des Strategiepapiers digitale Bildung (Kultusministerkonferenz, 2017, S. 16–19).

Kompetenzbereich [Teilkompetenz]	**Kompetenz**
1. Suchen, Verarbeiten und Aufbewahren [1.2 Auswerten und Bewerten]	1.2.1 Informationen und Daten analysieren, interpretieren und kritisch bewerten
1. Suchen, Verarbeiten und Aufbewahren [1.3 Speichern und Abrufen]	1.2.2 [sic!] Informationen und Daten sicher speichern, wiederfinden und von verschiedenen Orten abrufen
3. Produzieren und Präsentieren [3.1 Entwickeln und Produzieren]	3.1.1 Mehrere technische Bearbeitungswerkzeuge kennen und anwenden
5. Problemlösen und Handeln [5.4 Digitale Werkzeuge und Medien zum Lernen, Arbeiten und Problemlösen nutzen]	5.4.1 Effektive digitale Lernmöglichkeiten finden, bewerten und nutzen

Neben den verbindlichen Vorgaben der Lehrpläne und Bildungsstandards ergibt sich somit eine weitere administrative Zielsetzung, welche die Bildungsrelevanz der Inhalte und Kompetenzziele der vorliegenden Lerneinheit legitimiert. Auf der Ebene der Lernenden ergibt sich die Relevanz vorrangig aus dem Lebensweltbezug und der Realbegegnung mit Fließgewässern.

Ausgehend von der vorgesehenen Zielgruppe orientieren sich die Lernvoraussetzungen für die vorliegende Lerneinheit an den Kompetenzen und Fachinhalten der im Lehrplan dem Themenfeld 9 vorangegangenen Themenfelder. Im Verlauf der Lerneinheit wird sowohl auf grundlegende Arbeitstechniken des Chemieunterrichts als auch fächerübergreifend auf Grundlagenwissen aus zahlreichen Bereichen und Themenfeldern zurückgegriffen (vgl. Lehrplanbezüge). Unbekannte Inhalte oder vertiefende sowie wiederholende Informationen werden – soweit antizipierbar – in den virtuellen Laboren entsprechend erläutert. Durch Rückgriffe auf bereits bekannte Sachinhalte und Kompetenzen sowie durch den Aufbau anschlussfähigen Handlungswissens ergibt sich mit Blick auf die Lehrplaninhalte eine spiralcurriculare Ausrichtung der virtuellen Labore und deren inhaltlichen Aspekte. Letztlich können die Inhalte und Kompetenzen somit an mehreren Stationen des Bildungsweges aufgegriffen und adressatengerecht didaktisch reduziert oder weiter ausgebaut werden, wie dies auch im Rahmen der Lehrplananalyse herausgestellt wurde.

Die didaktische Reduktion erfolgt in den virtuellen Laboren situativ auf verschiedene Weisen. Eine Variante der didaktischen Reduktion ist die Vernachlässigung, bei welcher Störgrößen zunächst unerwähnt bleiben, um das Wesentliche herauszuarbeiten (S.

Streller et al., 2019). Im Beispiel (Abbildung 24) geschieht dies durch die Betrachtung des Tagesverlaufs der Sauerstoffsättigung eines Gewässers im Laborversuch, wodurch natürliche Störeffekte zunächst nicht mit in die Betrachtung einbezogen werden. Erst in einer nachfolgenden Aufgabe werden mit zunehmender Komplexierung des Lerninhaltes Werte einer realen Messung im Freiland hinzugezogen.

Anhand eines weiteren Beispiels (Abbildung 25) zur didaktischen Reduktion findet die Überführung des Inhaltes in eine bildhaft-symbolische Darstellung Anwendung. Konkret wird hier der Stickstoffkreislauf anhand einer stilisierten Abbildung veranschaulicht, wodurch der komplexe Lerninhalt auf das Wesentliche reduziert und übersichtlicher wird (S. Streller et al., 2019). Im Zentrum der Überlegungen zur didaktischen Reduktion standen während der Konzeption stets die Grundsätze der Angemessenheit, fachlichen Richtigkeit und Entwicklungsfähigkeit der didaktisch reduziert angebotenen Inhalte (S. Streller et al., 2019).

Jetzt sind Sie dran ...

Schauen Sie sich Abbildung 2.10 an, beschreiben Sie den Verlauf der Messwerte und geben Sie mögliche Gründe für diesen Verlauf an. ★★☆

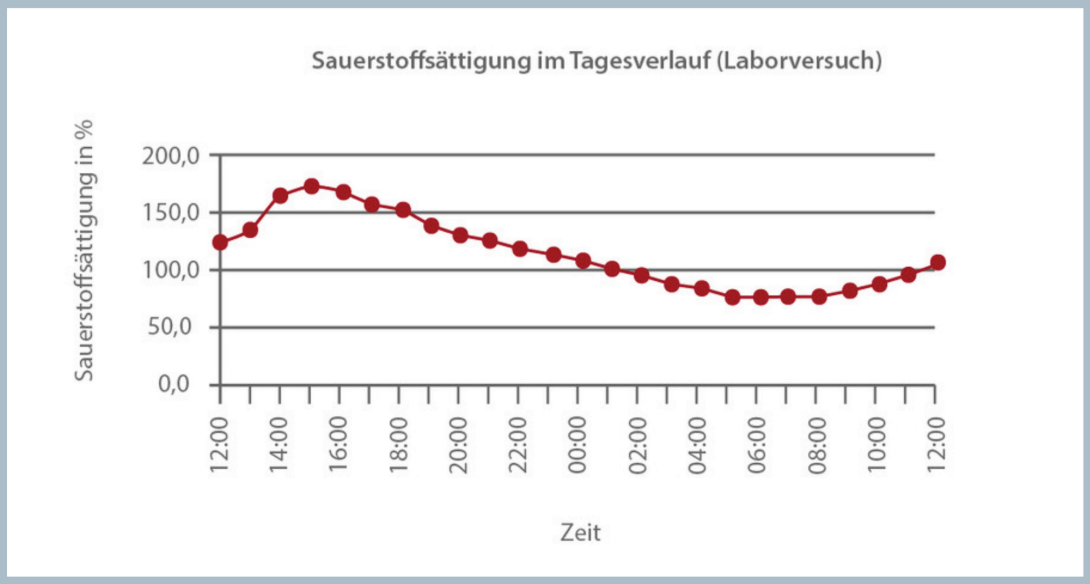


Abbildung 2.10: Sauerstoffsättigung eines Gewässers im Tagesverlauf unter Laborbedingungen

Jetzt sind Sie dran ...

Schauen Sie sich Abbildung 2.11 an und vergleichen Sie die Messwerte mit denen aus Abbildung 2.10. Erläutern Sie Ihre Beobachtungen. ★★★

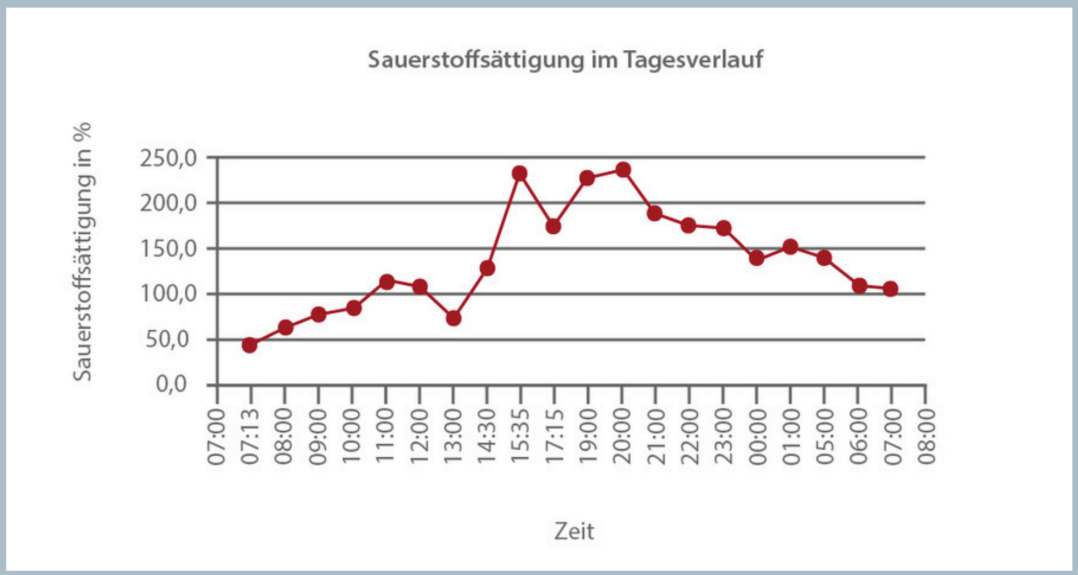
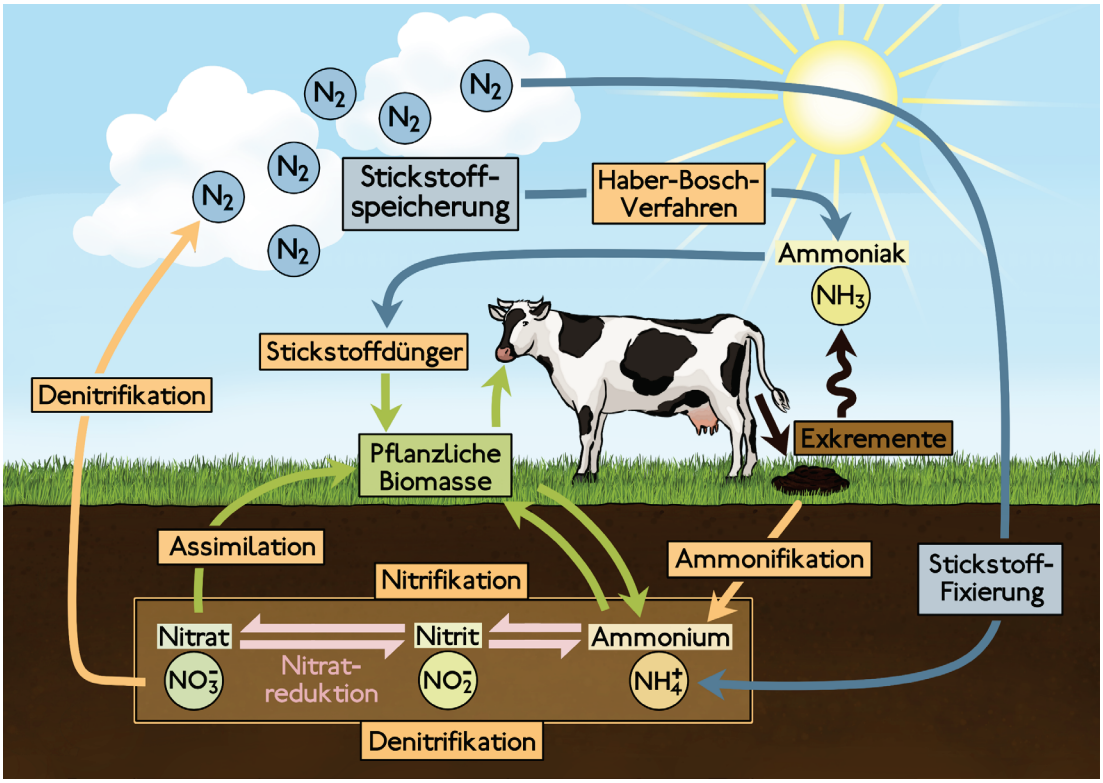


Abbildung 2.11: Sauerstoffsättigung des Gewässers im Tagesverlauf

Abbildung 24: Tagesverlauf der Sauerstoffsättigung. Im Sinne der didaktischen Reduktion wird zunächst der Laborversuch (Bild oben) betrachtet, bevor in einer späteren Aufgabe (Bild unten) natürliche Einflussfaktoren mit in die Aufgabenstellung einfließen (Screenshot virtuelles Labor, Projekt Open MINT Labs).



Stickstofffixierung: Atmosphärischer Stickstoff (N_2) wird in biologisch nutzbare Formen umgewandelt. Dies geschieht durch

- Bakterien, die enzymatisch N_2 in Nitrat (NO_3^-) und Ammonium (NH_4^+) umwandeln
- Starke Energieeinwirkung, etwa durch Verbrennungen (z. B. Waldbrände, Vulkanausbrüche) oder Blitzschlag, wodurch N_2 in Stickoxide umgewandelt wird. Diese können durch Niederschläge als salpetrige Säure (HNO_2) oder Salpetersäure (HNO_3) in den Boden und in Gewässer gelangen.

Nitrifikation: Bakterien wandeln Ammoniak (NH_3), welcher z. B. aus Gülle, Mist und dergleichen ausdünstet, zunächst in Nitrit (NO_2^-) und dann weiter in Nitrat (NO_3^-) um.

Stickstoffassimilation: Pflanzen nehmen Ammonium (NH_4^+) und Nitrat (NO_3^-) aus dem Boden auf und bauen damit Stickstoff in ihre Biomasse ein.

Ammonifikation: Abgestorbene Biomasse und Exkremente enthalten Stickstoffverbindungen. Pilze und Bakterien zersetzen diese Verbindungen zu Ammoniak (NH_3) und Ammonium (NH_4^+). Diese Zersetzungsprodukte können von Pflanzen erneut aufgenommen und genutzt werden.

Nitratreduktion: Bestimmte Bakterien können Nitrat (NO_3^-) zu Nitrit (NO_2^-) reduzieren, und dabei Energie gewinnen.

Denitrifikation: Einige Bakterienarten gewinnen Energie, indem sie Nitrat (NO_3^-) oder Nitrit (NO_2^-) über mehrere Zwischenstufen in molekularen Stickstoff (N_2) umwandeln. Dieser geht dann überwiegend in die Atmosphäre über.

Stickstoffspeicherung: Die Atmosphäre dient als riesiger Stickstoffspeicher für molekularen Stickstoff (N_2).

Abbildung 25: Didaktisch reduzierte Darbietung des Stickstoffkreislaufs. Die komplexen Erklärungen wurden durch Integration in eine bildhaft-symbolische Darstellung übersichtlicher zugänglich gemacht (Originalzeichnung: Jasmin Hirtl, Projekt Open MINT Labs; Screenshot virtuelles Labor, Projekt Open MINT Labs).

Für die praktische Durchführung der Lerneinheit ist die Verfügbarkeit digitaler Endgeräte, vorzugsweise Tablets oder Laptops mit leistungsfähiger und stabiler Internetverbindung, unabdingbar. Weiterhin werden die entsprechenden Messinstrumente, Kalibrierlösungen sowie Tablets zur Datenerfassung im Freiland benötigt.

Als räumliche Voraussetzung wird ein Klassensaal oder Computerraum für die Vor- und Nachbereitungsphase benötigt. Darüber hinaus ist der Zugang zu einem nahegelegenen Fließgewässer von großem Vorteil. Steht dies nicht zur Verfügung, kann auf vorbereitete Wasserproben zurückgegriffen werden. Hierbei ist jedoch die Variation einiger Parameter in Abhängigkeit von der Art und Stelle der Probennahme sowie der Dauer der Aufbewahrung zu berücksichtigen. Dies betrifft vorwiegend die Parameter Sauerstoffgehalt und Temperatur. Eine Bestimmung der Fließgeschwindigkeit ist ohne direkten Zugang zu einem Gewässer folgerichtig nicht möglich.

3.3 Parameter der Gewässeranalytik

Parameter der Gewässeranalytik

Messsystem Einstein Lab

- Aufbau des Sensor-Messsystems
- Messgenauigkeit der Sensoren

Physikalisch-chemische Parameter

- Sauerstoffgehalt
  - Physikalische & biogene Einträge
  - Biologische und chemische Sauerstoffzehrung
  - Gehalt vs. Sättigung
  - Funktionsweise *Mackereth*-Elektrode
- Chlorid-Gehalt
  - Geologische & anthropogene Einträge
  - Beständigkeit der Einträge in Gewässern
  - Funktionsweise der ionenselektiven Elektroden
  - Standardlösungen für die ionenselektiven Elektroden
- Nitrat- und Ammoniumgehalt
  - Umwandlung von Stickstoffspezies und Toxizität
  - Oberflächengewässerverordnung
  - Auswirkung von Stoßbelastungen auf die Vorfluter
  - „Kippen“ von Gewässern durch erhöhte Sauerstoffzehrung bei hohem Nährstoffangebot
  - Nitrit-Vergiftungen von Säuglingen
- pH-Wert
  - Referenzwerte
  - Degenerationen durch pH-Verschiebung
  - Mobilisierung und Fällung von Schadstoffen
  - Einflussfaktoren (Hydrogeologie, Pufferkapazität, Einleitungen)
  - Indirekte Auswirkungen von pH-Verschiebungen (z. B. Gleichgewichte)
  - Funktionsweise und Kalibrierung der pH-Elektrode
- Leitfähigkeit
  - Einträge aus Industrie und Privathaushalten
  - Verfahren zur Entsalzung von Abwässern
  - Funktionsweise der Leitfähigkeits-Elektroden

Biologische Parameter (keine nähere Betrachtung)

- Indikatororganismen
- Saprobienindex

Hydromorphologische Parameter

- Fließgeschwindigkeit
  - Assimilative Kapazität und ökologische Qualität
  - Strömungsdiversität und indirekte Auswirkungen der Strömung
  - Erosion und Sedimentation / Mäandrieren
  - Funktionsweise des Sensors mit Reed-Schalter
- Gewässerstrukturgüte
  - Zustand von Gewässerbett und -umfeld
  - Auswirkungen anthropogener Eingriffe
  - Ermittlung anhand kriteriengeleiteter Bewertungsmaterialien
- Kurzbeurteilung
  - Sensorische Beurteilung (Farbe, Trübung, Geruch, Steinoberseiten und -unterseiten bzw. Gewässerbett)

In diesem Kapitel erfolgt eine kurze fachliche Betrachtung der relevanten Parameter der (chemischen) Gewässergüte mit Fokus auf deren Bedeutung für das Ökosystem Gewässer. Entscheidend für die Auswahl der als relevant angesehenen Parameter der Gewässergüte waren hierbei die unterrichtliche Umsetzbarkeit sowie die Nutzung für eine Bestimmung des chemischen Index nach Bach (1980). Abbildung 26 bietet hierzu einen Überblick der Parameter, zu welchen virtuelle Labore konzipiert wurden. Weiterhin liegt der Fokus aufgrund der Verortung dieser Arbeit im chemiedidaktischen Bereich, weshalb den physikalisch-chemischen Parametern vorrangige Bedeutung zukommt. Anschließend werden in diesem Teilkapitel die jeweils verwendeten Sensoren zur Erfassung der gewässeranalytischen Parameter sowie deren Funktionsweise vorgestellt. Weiterhin werden die Elektrodenvorgänge der einzelnen Sensoren auf Teilchenebene erläutert.

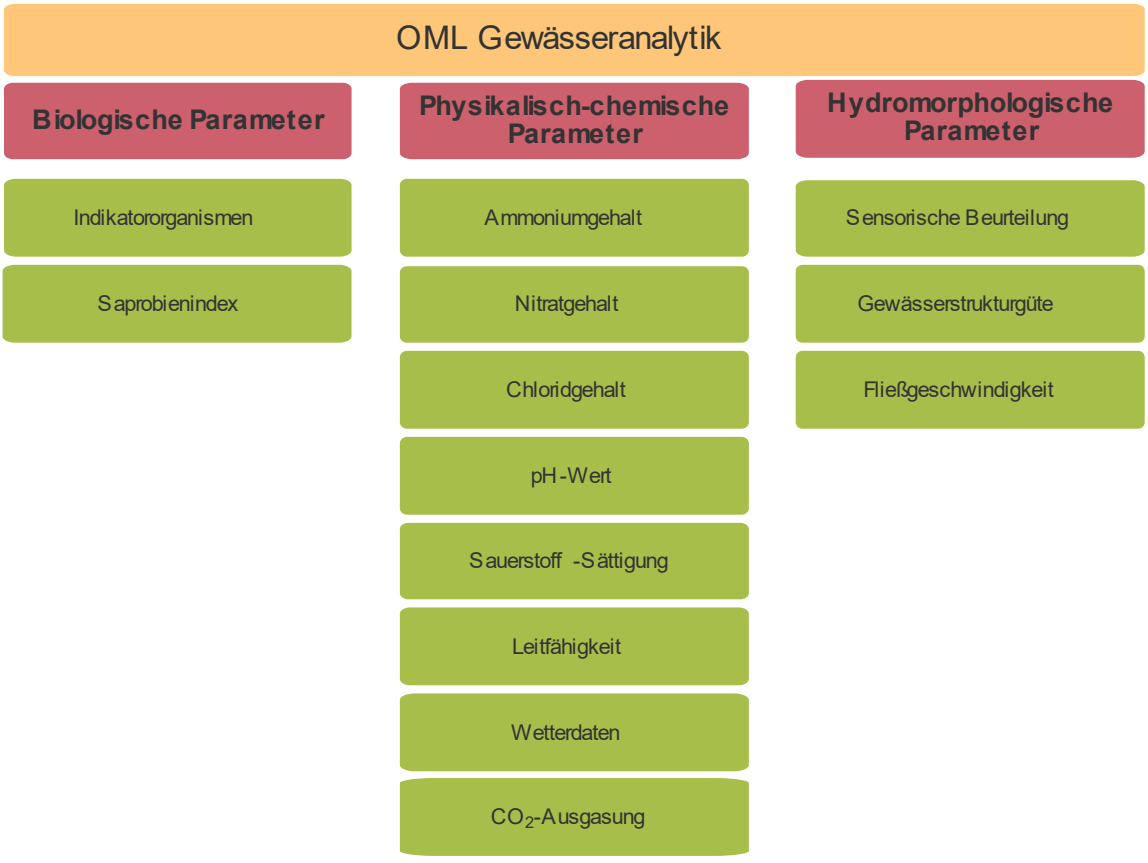


Abbildung 26: Übersicht über die fertiggestellten virtuellen Labore. Die grün eingefärbten Labore sind bereits vollumfänglich nutzbar. Das übergeordnete Labor „Aufbau, Bedienung und Auswertung“ ist hier nicht separat dargestellt (eigene Darstellung).

Messsystem Einstein Lab

Das Messsystem Einstein des Herstellers Fourier Education stellt die Basis für die praktischen Messungen im Freiland dar. Dabei besteht das System grundlegend aus einem Datenlogger, welcher bereits über fest verbaute Sensoren verfügt (Puls, Luftfeuchtigkeit, Beleuchtungsstärke, UV, Luftdruck, Umgebungstemperatur). Eine Erweiterung dieser Sensorik ist durch zahlreiche kompatible Messsonden darstellbar. Diese werden in der Regel mittels eines kabelgebundenen Adapters beziehungsweise Konverters mit dem Gerät verbunden. Die Datenabfrage und -darstellung erfolgt über ein via Bluetooth verbundenes Endgerät. Aufgrund der technischen Voraussetzungen ist dabei die Auswertung nur mittels Tablets oder PC (Laptop) möglich, eine Anbindung an Smartphones wurde in dieser Konfiguration noch nicht unterstützt – ein Umstand, welchen der Hersteller mit dem Nachfolgeprodukt ausräumte. In der hier vorgestellten Studie nutzten die Lernenden zur Datenauswertung Tablets. Die verwendeten Sensoren sowie deren Kenndaten sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7: Verwendete Sensoren des Einstein-Messsystems und deren Kenndaten nach Herstellerangaben.

Sensor	Messbereich	Messwertabweichung
Leitfähigkeit	0,5 - 80 mS/cm	±8%
pH-Wert	pH 0 - 14	±2%
Temperatur	-40°C bis +140°C	±2%
Fließgeschwindigkeit	0 - 4 m/s	±1%
Sauerstoff (gelöst)	0 - 12,5 mg/L	±7%
Nitrat	0,1 - 14.000 ppm	±4%
Ammonium	0,014 - 14.000 ppm	±4%
Chlorid	1,8 - 35.500 ppm	±4%

Der prinzipielle Aufbau der Sensoren entspricht dem in der Labortechnik üblicher Sensoren. Die gelösten Ionen Nitrat, Ammonium und Chlorid werden mittels einer ionenselektiven Elektrode erfasst. Die Bestimmung des Sauerstoffgehalts der Wasserproben erfolgt durch eine galvanische Messzelle.

Physikalisch-chemische Parameter

Aufgrund der Verortung der Lerneinheit im Fachunterricht Chemie liegt der Fokus der Datenerhebung auf den Parametern zur Bestimmung der chemischen Güte eines Gewässers. Hierzu werden weitestgehend die zur Berechnung des chemischen Index nach Bach (1980) erforderlichen Aspekte erfasst. Auf die Bestimmung der Werte für Phosphat und biochemischen Sauerstoffbedarf wurde in der Konzeption bewusst verzichtet, da diese mit dem verwendeten Messsystem nicht ohne Weiteres bestimmt werden konnten. Für eine dennoch plausible und vollständige Datenlage kann zur Bestimmung des Phosphatgehaltes eine kolorimetrische Schnellbestimmung mittels Taschenphotometer durchgeführt werden (Hanna Instruments Deutschland GmbH, 2021). Die Ermittlung des biochemischen Sauerstoffbedarfs (BSB_5) bedürfte einer Bebrütung über fünf Tage, weshalb dieses Verfahren nicht für eine abgeschlossene Unterrichtseinheit geeignet ist (BG BAU - GISBAU, o. J.). In der praktischen Durchführung wurde daher für den BSB_5 auf vorliegende amtliche Messwerte zurückgegriffen (vgl. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität Rheinland-Pfalz).

Sauerstoffgehalt

Sauerstoff ist eine der bedeutendsten Lebensgrundlagen in aquatischen Ökosystemen. Für die Löslichkeit von Sauerstoff in Wasser gelten die Zusammenhänge nach dem Gesetz von Henry.[19] Demnach hängt die Löslichkeit eines bestimmten Gases in einem definierten Lösungsmittel vom Partialdruck des Gases über der Flüssigkeit sowie von der Temperatur ab (Brown et al., 2011). Der so gelöst vorliegende Sauerstoff dient Lebewesen im Ökosystem Wasser als Grundlage für Stoffwechsel- und Atmungsprozesse.

Sauerstoffeinträge in Gewässern können sowohl physikalischer als auch biogener Natur sein. Dabei liegt die Ursache für physikalische Einträge im intensiven Kontakt mit dem Luftsauerstoff, insbesondere bei starker Durchmischung, Verwirbelung und höheren Fließgeschwindigkeiten des Wasserkörpers (Caspers & Karbe, 1967; Pohling, 2015). Bereiche im Wasserkörper, die etwa durch Wind, Wellen oder ein unebenes Flussbett besonders belebt sind, begünstigen dabei aufgrund der erhöhten Kontaktfläche mit der Luft die Diffusion von Sauerstoff in das Wasser. Biogene Einträge entstehen durch die Photosyntheseprozesse von Pflanzen im Wasser. Durch die Abgabe von Sauerstoff in das Gewässer im Zuge ihrer Assimilation tragen Wasserpflanzen somit maßgeblich zur Sauerstoffsättigung bei (Caspers & Karbe, 1967; Pohling, 2015).[20]

Bakterielle Atmung und der Abbau sedimentierter organischer Materie verbrauchen Sauerstoff in Gewässern auf biologischem Wege. Der biologische Sauerstoffbedarf gilt

[19] Aussage erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2023, S. 20), modifiziert
[20] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2023, S. 20), modifiziert

daher auch als Gradmesser für die biologische Aktivität eines Gewässers (Hütter, 1994). Insbesondere eutrophe Wasserkörper sind daher aufgrund des erhöhten Gehaltes an verstärkt absterbender organischer Materie von hohem biologischem Sauerstoffbedarf betroffen. Darüber hinaus benötigen auch chemische Abbauprozesse Sauerstoff in Oxidationsprozessen. Fehlt dieser Sauerstoff, kann das so vorliegende reduzierende Milieu zur Freisetzung weiterer Nähr- und Schadstoffe und damit zu einer weiteren Beeinträchtigung des Gewässers führen (Smol, 2008). Ferner verbrauchen auch eigentlich sauerstoffproduzierende Wasserpflanzen im Zuge ihres Tag-Nacht-Zykluses bei Dunkelheit einen Teil des Sauerstoffs (Pohling, 2015).[21]

Zur Beurteilung eines Gewässers sind sowohl der absolute Sauerstoffgehalt als auch die prozentuale Sauerstoffsättigung relevant. Während die Sättigung als prozentualer Anteil des bei gegebener Wassertemperatur maximal möglichen Sauerstoffgehalts Aufschluss über die Güte eines Gewässers geben kann, können die meisten Fische beispielsweise temperaturunabhängig Sauerstoffgehalte unter 4 mg/L nicht tolerieren (Smol, 2008).[22]

Die Messung des Sauerstoffgehalts erfolgt mittels einer galvanischen Elektrode. Hierbei handelt es sich laut der impliziten Beschreibung des Herstellers (Fourier Systems Ltd., 2021d) um einen *Mackereth*-Sensor. Dies ist ein amperometrischer Sensor mit Blei-Anode und Silber-Kathode (Abbildung 27), welche in Kaliumhydroxid als Elektrolyt eingebettet und zu dem zu messenden Medium hin mittels einer permeablen Membran abgeschlossen sind (Kreysa et al., 2014; Mackereth, 1964, 1967; Nei & Merike, 2009). Das Blei der Anode wird oxidiert und geht als Pb^{2+} in elektrolytische Lösung (Abbildung 28). Die Übertragung der freigewordenen Elektronen an die Kathode ermöglicht eine Reduktion des durch die Membran eindringenden Sauerstoffs zu Hydroxydionen. Formal entsteht so Blei(II)-hydroxid (Mackereth, 1964). Möglich wird diese Reaktion durch die geringe Löslichkeit von festem Blei in Natronlauge (Schütze, 1887). Das als galvanische Fülllösung in der Elektrode eingesetzte Gemisch aus 65 % Ethylenglycol und 35 % Natronlauge (0,5 M) stellt somit gleichermaßen das Wasser für die Kathodenreaktion bereit als auch ein elektrolytisches Medium für das galvanische Blei-/ Silber-Element.[23]

[21] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2023, S. 20–21), modifiziert
[22] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2023, S. 22), modifiziert
[23] Absatz und Formel in Teilen erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2023, S. 22–23), modifiziert

Kathodenreaktion:	$O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$	*Formel 1*
Anodenreaktion:	$Pb \rightarrow Pb^{2+} + 2\,e^-$	*Formel 2*
Redoxreaktion:	$Pb + O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- + Pb^{2+}$	*Formel 3*
Gesamtreaktion:	$Pb + O_2 + H_2O \rightarrow Pb(OH)_2$	*Formel 4*

Bauweise und Funktion des Sensortyps erlauben eine deutlich höhere Stabilität und Lebensdauer als das Prinzip des bekannteren *Clark*-Sensors (Nei, 2007). Ein weiterer bedeutender Vorteil liegt darin, dass Sensoren dieser Bauform generell auch zur Gasanalyse geeignet sind (Oehme, 1994). Nachteilig sind jedoch ein vergleichsweise großer Probenbedarf sowie eine stark messbereichsabhängige Messungenauigkeit des *Mackereth*-Sensors zu nennen (Nei, 2007; Nei & Merike, 2009).

Die Kalibrierung des Sensors erfolgt als Zweipunkt-Kalibrierung. Dabei wird ein Referenzpunkt durch eine Natriumsulfit-Lösung als Nullstandard (1g Na_2SO_3 + 1mg $CoCl_2$ x 6 H_2O gelöst in 1 Liter Wasser) und ein zweiter Referenzpunkt durch eine luftgesättigte Wasserprobe (in Anlehnung an DIN EN 25814) vorgegeben (Fourier Systems Ltd., 2021d). Wenngleich der Sauerstoffsensor temperaturkompensierte Messwerte liefert, so muss zur Umrechnung in einen prozentualen Sättigungswert mit Bezug zur vollständigen Sättigung bei gegebener Temperatur dennoch zeitgleich zur Messung eine Temperaturmessung erfolgen. Ebenso muss die Temperatur der zur Kalibrierung zu verwendenden luftgesättigten Wasserprobe ebenfalls im Vorfeld der Kalibrierung bestimmt werden, da nur so ein Abgleich mit den Tabellenwerten zur vollständigen Sättigung erfolgen kann (Fourier Systems Ltd., 2021d).

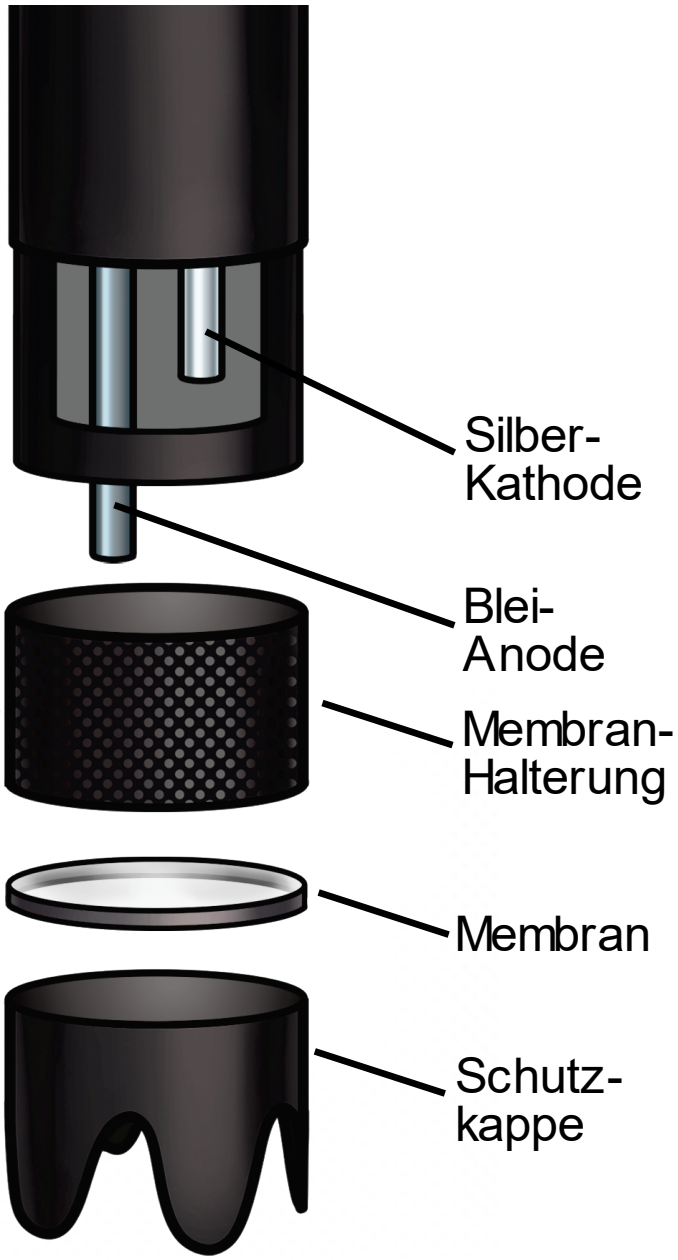


Abbildung 27: Schematischer Aufbau des Sensors für gelösten Sauerstoff (Originalzeichnung Jasmin Hirtl, Projekt Open MINT Labs, modifiziert).

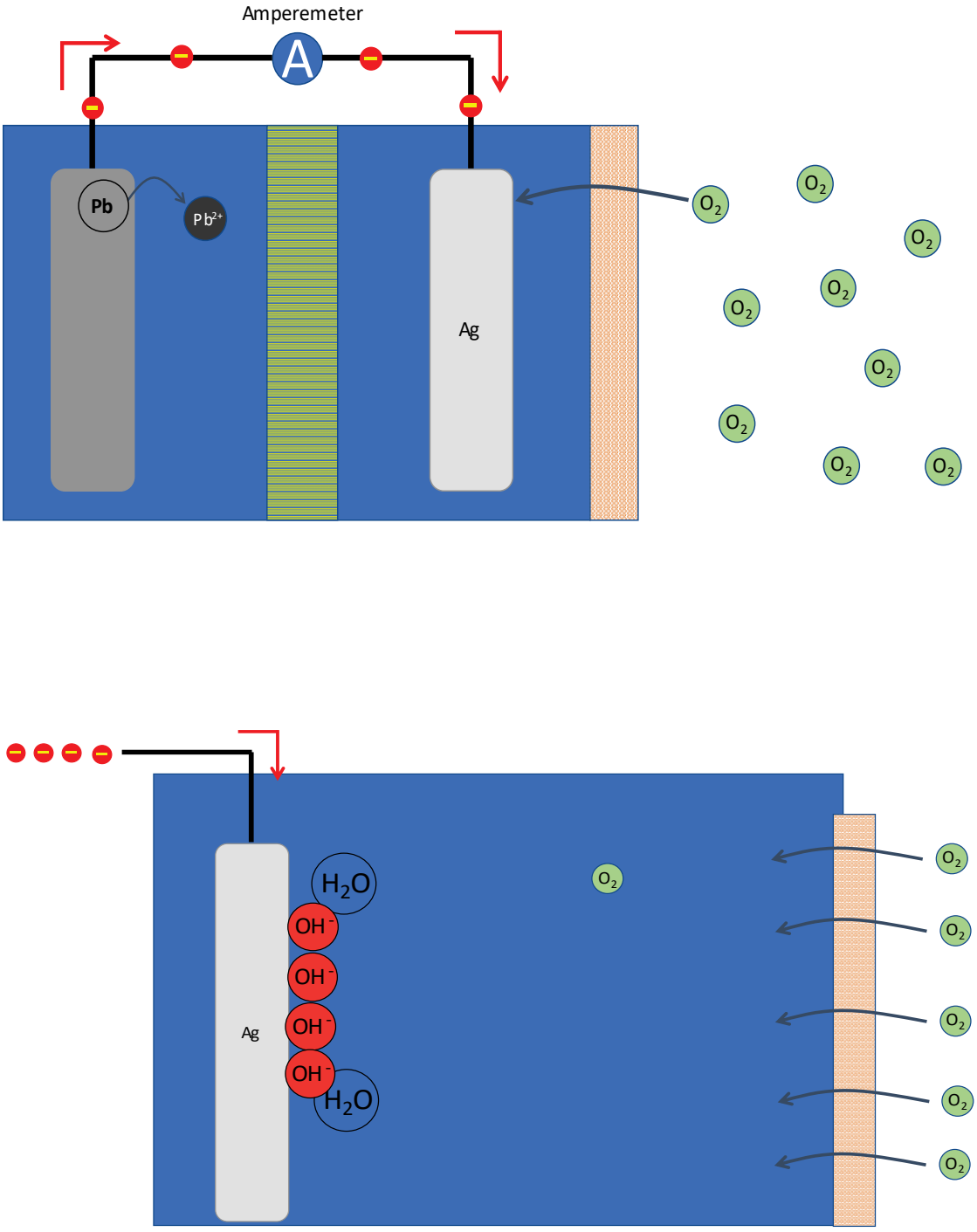


Abbildung 28: Illustration der Elektrodenvorgänge im Mackereth-Sensor (Skizze: Maximilian Klaus, Projekt Open MINT Labs).

Chlorid-Gehalt

In Oberflächengewässern nachweisbares Chlorid kann sowohl geologischen als auch anthropologischen Ursprungs sein (Hütter, 1994). Sofern die geologischen Formationen oder die Nähe zu salzhaltigen Küstengewässern nicht ausschlaggebend für eine erhöhte Chloridbelastung sind, so kann von einer Abwassereinleitung ausgegangen werden (Hütter, 1994; Pohling, 2015). Für die Chloridbelastung der Abwässer sind unter anderem menschliche Ausscheidungen verantwortlich, da das mit der Nahrung aufgenommene Chlorid zu weiten Teilen nicht vom Organismus absorbiert wird (Pohling, 2015). Weiterhin stellen industrielle Abwässer einen relevanten Eintrag von Chlorid in die Gewässer dar. Als bedeutende Emittenten seien hier Kalisalzbergbau und Salinen, Wasserenthärtung, Papierfabriken, Öl- und galvanische Industrie sowie Landwirtschaft und Winterdienste genannt (Hütter, 1994; Nagy & Nagy, 2007). Chlorid kann nicht durch biologische oder chemische Prozesse im Sinne der Selbstreinigung eines Gewässers oder der üblichen Abwasserbehandlung abgebaut werden (Nagy & Nagy, 2007). In Fließgewässern wirkt der Verdünnungseffekt einem hohen Chloridgehalt entgegen; dennoch gilt Chlorid aufgrund seiner Persistenz als langlebiger Indikator für Verschmutzungen (Hütter, 1994). Aufgrund seiner nicht giftigen Wirkung auf den Menschen wird Chlorid in der Trinkwasserbereitstellung als wenig problematisch angesehen, solange die Geschmacksschwelle nicht überschritten und damit die Genießbarkeit beeinträchtigt wird (Nagy & Nagy, 2007). Dennoch stellen gerade in der Industrie erhöhte Chloridgehalte ein Problem dar, da stark chloridhaltige Wässer nicht für jede Anwendung nutzbar sind und darüber hinaus zur verstärkten Korrosion von Rohrleitungsnetzen und Armaturen führen (Nagy & Nagy, 2007; Pohling, 2015). Eine Aufreinigung zur Reduzierung des Chloridgehaltes ist mit entsprechend hohem technischem Aufwand möglich (vgl. hierzu Pohling, 2015).

Insbesondere als zivilisatorische Gewässerbelastung mit hoher Beständigkeit kann die Einleitung von Chloriden in Oberflächengewässer die Süßwasserbiologie bis hin zum Absterben derselben gefährden (Pohling, 2015). Daraus ergibt sich die Bedeutung dieses Parameters für den ökologischen Zustand eines Gewässers. Die so für die Lernenden kontextualisierte Bedeutung wird durch den Bezug zu realen Emittenten des Kalibergbaus betont. Aufgrund der sozialen, ökonomischen und ökologischen Brisanz der Kaligewinnung kann die Problemstellung in diesem virtuellen Labor deutlich herausgearbeitet werden. Lösungsansätze sind hingegen angesichts des einzubindenden übergreifenden Kontextes nur in geringem Ausmaß möglich.

Zur Bestimmung des Gehalts an Chloridionen kommen im vorliegenden Konzept ionensensitive Elektroden zur Anwendung. Aufgrund der weitestgehend identischen Funktionsweise werden diese hier gesammelt beschrieben. Die verwendeten ionensensitiven Elektroden zeigen eine kompakte Festkörper-Membran (*Solid Membrane*). Am Beispiel der Chlorid-Elektrode enthält die Membran Silberchlorid (AgCl) und Silbersulfid (Ag_2S), wobei sich ihre Sensibilität für Chlorid vorrangig durch das Silber-

chlorid ergibt. Die Beigabe von Silbersulfid erhöht unter anderem die Leitfähigkeit der Festkörpermembran und reduziert damit den Messfehler gegenüber einer reinen Silberchlorid-Membran (Skoog & Leary, 1996). Im Gegensatz zur Glaselektrode kommt das messbare Potenzial bei typischen ionenselektiven Elektroden durch eine spezifische Reaktion des Membranmaterials mit den Ziel-Ionen an der Membranoberfläche zustande (Skoog & Leary, 1996). Materialien, die das Ziel-Ion selektiv binden, verursachen eine Ladungstrennung an der Grenzfläche Membran-Probelösung. Das so üblicherweise mit einer Silber-/Silberchlorid-Elektrode erfasste Potenzial kann gegen eine Referenzelektrode gemessen werden (Atkins et al., 2013; Czaban, 1985). Abhängig vom Design der jeweiligen Elektrode kann auch die Membran selbst bereits im weitesten Sinne als Elektrode fungieren. Mit schwer löslichen Silbersalzen dotierte Silbersulfid-Membranen führen durch die Löslichkeit des Silbersalzes der Ziel-Ionensorte zu einer geringfügigen Ag^+-Konzentration, auf welche die Silbersulfid-Membran mit der Ausbildung eines Membranpotenzials reagiert (Gründler, 2007). Trotz der hohen ionenspezifischen Sensitivität der Festkörpermembranen sind Interferenzen mit anderen Ionensorten möglich, sodass eine ionensensitive Elektrode nie völlig störungsfrei und komplett selektiv arbeitet (Atkins et al., 2013; Gründler, 2007). Für spezielle Anwendungen stehen unter anderem ionenselektive Elektroden mit permselektiven oder flüssigen Membranen zur Verfügung (Gründler, 2007; Tierney, 1996). Letztlich beruht das Messprinzip damit auf einer ähnlichen Funktionsweise wie das der Glaselektrode. Entscheidend für die ionenspezifische Sensitivität sind hier jedoch Bauform und Material der Membran. Ausgehend von der Herstellerbeschreibung ist im Fall der vorliegenden ionensensitiven Elektroden des Herstellers Fourier am ehesten eine Festkörpermembran-Elektrode des Silbersulfid-Typs anzunehmen (Fourier Systems Ltd., 2021a, 2021b, 2021g; Gründler, 2007).

Die Kalibration der ionenselektiven Elektroden erfolgt im Zweipunktverfahren unter Verwendung je eines Standards mit 10 ppm und eines Standards mit 1000 ppm Gehalt (Tabelle 8). Sowohl bei der Kalibration als auch bei der eigentlichen Messung wird die Probe zur Regulierung der Ionenstärke mit einer konzentrierten Salzlösung (ISA-Lösung, *Ionic Strength Adjustment*) versetzt, welche das zu messende Ion nicht enthält (Fourier Systems Ltd., 2021a, 2021b, 2021g). Durch Ionenstärkeanpassung wird die Ionenaktivität in der zu messenden Lösung auf ein nahezu konstantes Maß gebracht, sodass die Ionenaktivitäten innerhalb und außerhalb der Membran annähernd identisch werden, wodurch Asymmetriespannungen reduziert werden.

Tabelle 8: Einwaagen der Standardlösungen zur Kalibration der ISE. Die Einwaagen sind bedarfsgerecht auf die benötigten Mengen an Lösung anpassbar.

Standard	Einwaage
NH_4^+ 1000 ppm	3,819 g NH_4Cl in 1000 mL H_2O
NH_4^+ 10 ppm	Verdünnung 1:100 aus Standard 1000 ppm
ISA-Lösung für NH_4^+ 1M NaCl	58,443 g NaCl in 1000 mL H_2O
NO_3^- 1000 ppm	6,0682 g $NaNO_3$ in 1000 mL H_2O
NO_3^- 10 ppm	Verdünnung 1:100 aus Standard 1000 ppm
ISA-Lösung für NO_3^- 2M $(NH_4)_2SO_4$	246,26 g $(NH_4)_2SO_4$ in 1000 mL H_2O
Cl^- 1000 ppm	1,6485 g NaCl in 1000 mL H_2O
Cl^- 10 ppm	Verdünnung 1:100 aus Standard 1000 ppm
ISA-Lösung für Cl^- 5M $NaNO_3$	424,98 g $NaNO_3$ in 1000 mL H_2O

Nitrat- und Ammonium-Gehalt

Einträge von Stickstoffverbindungen in Wasserkörper können aufgrund ihrer Wirkung als Pflanzennährstoffe das ökologische Gleichgewicht beeinflussen. Darüber hinaus können durch (bio-)chemische Umsetzungen Stickstoffspezies mit insbesondere für die Fauna von Fließgewässern toxischem Charakter auftreten. Dies gilt etwa für die Verschiebung des Ammonium-Ammoniak-Gleichgewichts durch Schwankungen des pH-Werts. Während Ammonium Pflanzen als Nährstoff dienen kann und keine spezielle Reizantwort bei Fischen bewirkt, zeigen bereits geringe Konzentrationen von Ammoniak toxische Wirkung auf Fische (Wuhrmann & Woker, 1949; Danecker, 1964).

Zur Überwachung und Regulation der Qualität der Gewässer, wurden durch die Oberflächengewässerverordnung im Zuge der Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG, 2000/22.12.2000) in nationales Recht Umweltqualitätsnormen für Ammonium-Stickstoff (NH_4-N), Ammoniak-Stickstoff (NH_3-N) und Nitrit-Stickstoff (NO_2-N) definiert. Die Zahlenwerte der Normen sind dabei vom Typus des jeweils betrachteten Gewässers abhängig (Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer, 2016/20.06.2016). Berücksichtigt werden zur Beurteilung der Wasserkörper vorwiegend Jahresmittelwerte, bei einigen Stoffbelastungen mit toxischer Wirkung werden darüber hinaus Höchstwerte definiert. Ein Hauptgrund für die nicht gelingende Zielerreichung hinsichtlich der zu verbessernden Qualität der Wasserkörper sind die massiven Nährstoffeinträge aus Landwirtschaft und Abwasserreinigung. So sind etwa knapp 74 % der als schlecht beurteilten Grundwasserkörper auf eine zu hohe Nitratbelastung zurückzuführen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit,

2017). Dabei weist bereits der Eintrag von Nitrat, welches vorwiegend mit Düngemitteln ausgebracht wird, in das Grundwasser darauf hin, dass die Nährstoffe gar nicht durch die gedüngten Kulturen aufgenommen werden konnten und vielmehr durch Auswaschung der Böden in das Grundwasser gelangen. Aus diesem Grund werden insbesondere die Emissionen und Immissionen von Nitratdüngemitteln überwacht und maximal tolerable Stickstoff-Frachten definiert (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, 2013).

Weiterhin stellen Stoßbelastungen industrieller Abwässer mit erhöhten Stickstoff-Frachten relevante Einträge dar, da diese trotz entsprechender Verdünnungseffekte unter Umständen eine Inhibition der Nitrifikationsstufe der biologischen Reinigung in Kläranlagen verursachen können, wodurch vermehrt Stickstoffverbindungen in die Vorfluter gelangen (Baumeister et al., 2001). Wenngleich in den 2000er-Jahren insbesondere die Güteklassifikation der deutschen Gewässer anhand von Ammonium-Stickstoff verbessert wurde, stagnieren die Werte in den letzten Jahren und besonders mit Blick auf die Nitratgehalte jedoch (Umweltbundesamt, 2017).

Die Auswirkungen erhöhter Stickstoffgehalte in Gewässern wirken sich sowohl direkt als auch indirekt auf Mensch und Umwelt aus. Neben der unmittelbaren Fischgiftigkeit von Ammoniak und der mittelbaren, ebenfalls pH-abhängigen Fischgiftigkeit von Nitrit als salpetrige Säure (Baur & Rapp, 2003) ist hier der mikrobielle Abbau reduzierter Stickstoffverbindungen unter Sauerstoffzehrung zu nennen (Baumeister et al., 2001). Dies kann in Kombination mit dem generellen Nährstoffeintrag und damit gesteigertem Wachstum schnellwachsender Algen- und Pflanzenarten zu einer Überlastung und letztlich zu einem „Kippen“ des Gewässers führen.

Neben dieser indirekten Betroffenheit des Menschen durch das Gesamtökosystem sei an dieser Stelle auch auf mögliche Nitritvergiftungen von Säuglingen verwiesen, welche sich teilweise auf Nitratbelastungen der Trinkwasserquellen zurückführen lassen. Säuglinge verfügen noch nicht über gewisse Enzyme, welche eine physiologische Inaktivierung des Hämoglobins zum Methämoglobin revidieren können. In der Folge führt das im Verdauungstrakt zu Nitrit reduzierte Nitrat zu einer Vergiftungssymptomatik, da mangels physiologisch wirksamen Hämoglobins kein ausreichender Sauerstofftransport mehr möglich ist. Dieser Effekt wurde aufgrund der zyanotischen Symptomatik als *Blue Baby Syndrome* bekannt (Knobeloch et al., 2000; Madjumdar, 2003). Die erforderlichen Vorbedingungen sowie die letztlich im Sinne der Pathogenese physiologisch reaktiven Stickstoffspezies sind noch nicht vollständig geklärt (Addiscott, 2005, S. 160–163; Powlson et al., 2008). Am wahrscheinlichsten erscheint die Kombination aus einer bakteriellen, durch mit Fäkalien verunreinigtes Trinkwasser verursachten Entzündungsreaktion (Gastritis), in deren Folge das Nitrat in die für den Organismus schädlichen Verbindungen umgewandelt wird (Powlson et al., 2008).

Vor diesen Hintergründen ist die hohe Relevanz für Leben und Alltag der Lernenden als gegeben zu betrachten. Während einerseits industrielle Düngemittel für immer weiter fortschreitende Erträge in der Landwirtschaft sorgen, sind diese sowie weitere Stickstoffeinträge doch durchaus kritisch zu beleuchten. Im virtuellen Labor Stickstofflieferanten wurden daher nicht nur einige der angeführten Problemfragen als Kontexte mit eingearbeitet, vielmehr werden darüber hinaus mit der Gründüngung auch Lösungsansätze insbesondere im landwirtschaftlichen Bereich vorgestellt.

Zur Messung des Nitrat- und Ammoniumgehalts findet eine ionensensitive Elektrode Anwendung, welche nach dem im Abschnitt Chlorid-Gehalt beschriebenen Prinzip arbeitet. Das spezifische Ansprechverhalten der Elektroden ist auf die Zusammensetzung der Membran zurückzuführen.

pH-Wert

Der für alle Wassernutzungen gültige, als gut angesehene pH-Bereich liegt bei pH 6,5-8,5 (Alam et al., 2007). Insbesondere schlecht gepufferte Gewässer können Schwankungen des pH-Wertes aufgrund anthropogener Einleitungen kaum kompensieren. Sinkende pH-Werte können direkte negative Auswirkungen auf die Flora und Fauna eines Gewässers mit sich bringen, wobei vor allem Makrolebewesen deutliche Degenerationen aufweisen können (Schindler et al., 1985; Smol, 2008). Bei einem pH-Wert kleiner als 5,5 kommen alle bakteriellen Prozesse zum Erliegen (Pohling, 2015). Darüber hinaus werden bei niedrigen pH-Werten im Sediment gebundene Toxine und Schwermetalle mobilisiert (Calmano et al., 1992; Schindler et al., 1980). Hier sei auch erwähnt, dass ein zu hoher pH-Wert ebenfalls das Ökosystem beeinträchtigen kann, etwa indem aus chemischer Sicht Stoffe, vorwiegend gelöste Metalle, als ihre Hydroxide ausfallen können (Pohling, 2015).

Als pH-beeinflussende anthropogene Einleitungen kommen neben den klassischen Säuren und Basen auch gelöste Salze in Betracht (Pohling, 2015). Natürliche Einflüsse auf den pH-Wert ergeben sich überwiegend durch die Hydrogeologie eines Gewässers, etwa kalkhaltige Böden, sowie die Löslichkeit von CO_2 in Wasser.

Neben den direkten Auswirkungen eines pH-Wertes außerhalb des Normbereichs sind die indirekten Effekte ebenfalls für das Ökosystem Gewässer von großer Relevanz. So kann beispielsweise die pH-Verschiebung in den sauren Bereich das Ammonium-Ammoniak-Gleichgewicht verschieben, wodurch das weniger problematische Ammonium verstärkt als hoch fischgiftiges Ammoniak vorliegt. Ähnliche Effekte ergeben sich für zahlreiche Gleichgewichtsreaktionen im komplexen System der Gewässer.

Zur pH-Messung wird eine flache pH-Elektrode verwendet. Diese ist nach dem Prinzip der Einstabmesskette mit Glaselektrode aufgebaut, wobei jedoch die Glasmembran im Boden des Sensors von der Referenzelektrode umgeben ist. Durch die flache Bauform

wird so eine pH-Messung auch bei sehr geringen Probemengen ermöglicht, da lediglich die Kontaktfläche der Elektrode benetzt sein muss.

Die üblicherweise als Silber-/Silberchlorid-Elektrode in Kaliumchlorid-Elektrolyt ausgeführte Referenzelektrode ist durch ein Diaphragma mit der Probelösung verbunden (Mortimer & Müller, 2003). Im vorliegenden Fall der hier beschriebenen Elektrode ist das Diaphragma erkennbar als poröse Keramik umgesetzt. Das Diaphragma ermöglicht eine Wanderung von Ionen zwischen Referenzelektrolyt und Probelösung, wodurch ein konstantes Referenzpotenzial erzeugt und die galvanisch leitende Verbindung des Referenzelementes mit der Probelösung sichergestellt wird (Mettler-Toledo AG Analytical, 2007).

Die eigentliche pH-empfindliche Glaselektrode zeichnet sich durch eine sehr dünne Glasmembran (ca. 50 µm) aus (Atkins et al., 2013). Diese reagiert mit einer Potenzialausbildung auf umgebende nicht-neutrale Probelösungen. Der Grund hierfür liegt in der Zusammensetzung und Quellfähigkeit der Glasmembran. Eine „gelartige Silikatquellschicht“ (Atkins et al., 2013, S. 251) kann durch Einwirkung von Wasserstoffionen auf die äußere Quellschicht in Abhängigkeit von deren Aktivität in der Probelösung modifiziert werden (Atkins et al., 2013; Janata, 2009). Dies führt zu einer Potenzialausbildung auf der Außenseite der Membran. Die Wasserstoffionen selbst können die Membran nicht durchdringen, übertragen jedoch das so erzeugte Potenzial über die in der Membran vorhandenen Natrium- und Lithiumionen auf die Innenseite der Glasmembran, wo sich folglich ein abhängiges Potenzial einstellt (Atkins et al., 2013; Mettler-Toledo AG Analytical, 2007). Dieses Potenzial auf der Innenseite der Membran wird durch das gepufferte Elektrolyt in diesem Teil der Elektrode nicht durch Wasserstoffionen ausgeglichen, vielmehr wird das Potenzial über Elektrolyt und Silber/ Silberchlorid-Elektrode an das Messgerät abgeleitet, dort mit dem Referenzpotenzial in Bezug gesetzt und so letztlich der pH-Wert als eine von der Aktivität der Wasserstoffionen in der Probelösung abhängige Potenzialdifferenz erfasst (Mettler-Toledo AG Analytical, 2007; Mortimer & Müller, 2003).

Die Kalibrierung der pH-Sensoren erfolgt mit laborüblichen primären pH-Puffern entsprechend den zu erwartenden Messbereichen, wobei je ein Wert unter- und oberhalb des erwarteten Messwertes als Referenz in der Zweipunkt-Kalibration genutzt werden (Fourier Systems Ltd., 2021e). Für die Messung üblicher Oberflächenwasserproben hat sich aufgrund der zu erwartenden Messwerte die Kalibration mit pH 7 und pH 12 als zielführend erwiesen. Die verwendeten Puffer sind dabei weitestgehend abgeleitet von den Empfehlungen der IUPAC mit Bezug zu den NIST-Standards (Buck et al., 2002). Konkret stehen Pufferlösungen nach Clark und Lubs im pH-Bereich pH 3 bis pH 12 zur Verfügung (R. G. Bates, 1973; R. G. Bates & Bower, 1956; Bower & Bates, 1955).

Leitfähigkeit

Gelöste Salze bestimmen maßgeblich die Leitfähigkeit eines Gewässers. Dabei kann anhand des Parameters der Leitfähigkeit primär keine Aussage über die Art des Salzeintrages getroffen werden, jedoch dient der damit verbundene Ionengehalt insbesondere in Verbindung mit weiteren einfach zu bestimmenden Parametern wie der Alkalinität oder der Gesamthärte als Verschmutzungsindikator für einen Wasserkörper (Thompson et al., 2012).

Salzeinträge in Gewässer sind überwiegend anthropogener Herkunft und entstehen durch natürliche Stoffwechselprozesse von Mensch und (Nutz-)Tier, welche Salze über den Harn ausscheiden, wodurch insbesondere in urbanen Gegenden der Salzeintrag in Abwässer und damit häufig auch weiter in die Vorfluter erhöht ist (Smol, 2008). Bergbau und industrielle Prozesse (z. B. Öl-Industrie, Papierherstellung, Galvanik, Wasserenthärtung, Salzgewinnung) setzen ebenfalls stark salzhaltige Abwässer frei, welche häufig unzureichend bis gar nicht aufbereitet in Flüsse eingeleitet werden. Auch natürliche Salzeinträge, welche sich aus der Hydrogeologie des Gewässers oder der Küstennähe ergeben, sind zu berücksichtigen. Überwiegend handelt es sich bei den in Gewässer eingetragenen Salzen um Chloride (siehe Abschnitt Chloridgehalt).

Verfahren zur Entsalzung von Abwässern sind technisch umsetzbar (z. B. Likhachev & Li, 2013; Manchanda & Kumar, 2018; Sadrzadeh & Mohammadi, 2008), weisen jedoch eine zu geringe ökonomische Effizienz auf (Karagiannis & Soldatos, 2008), um angesichts der geltenden Rechtslage unmoderiert eingesetzt zu werden. Liegen Salzeinleitungen erst einmal im Gewässer vor, so bleibt zur Minderung des Salzgehaltes nur noch die Verdünnung durch das Gesamtvolumen des Wasserkörpers um die Auswirkungen einer zunehmenden Versalzung auf Flora und Fauna zu mindern (vgl. Chang et al., 1997).

Zur Messung der Leitfähigkeit kommen Leitfähigkeits-Sensoren des Herstellers Fourier zur Anwendung. Diese basieren auf einer Anordnung von zwei Kohlenstoff-Elektroden, zwischen welchen durch Anlegen einer Spannung ein von der Leitfähigkeit der Probelösung abhängiger Stromfluss gemessen werden kann (Fourier Systems Ltd., 2021c). Die verbauten Elektroden weisen dabei eine Zellkonstante von $k = 1\ \mathrm{cm}^{-1}$ auf (Fourier Systems Ltd., 2021c). Die Leitfähigkeit der Probelösung ergibt sich aus der spezifischen Leitfähigkeit der Lösung und der Zellkonstante, welche sich aus dem Verhältnis von Fläche zu Abstand der Elektroden zueinander errechnet (Atkins et al., 2013).

Da die Leitfähigkeit einer Lösung direkt von der Temperatur abhängt (Barron & Ashton, 2005), verfügen die eingesetzten Sensoren über eine interne Temperaturkompensation, wobei die Messwerte für die Temperatur jedoch nicht explizit über die Auswerteelektronik abrufbar sind (E. Kalmanzon, Persönliche Mitteilung, 17. November 2018).

Biologische Parameter

Zur Bewertung der biologischen Güte eines Fließgewässers werden Indikatororganismen sowie der Saprobienindex herangezogen. Darüber hinaus werden die Saprobie sowie auch Sauerstoffgehalt und bakterielle Aktivität berücksichtigt (Umweltbundesamt, 2022).

Eine nähere Beschreibung und Ausarbeitung dieser Verfahren erfolgen im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht. Bei entsprechender Aufbereitung kann eine Bestimmung der ökologischen Gewässergüte für eine holistische Betrachtung der Gewässergüte mit einbezogen werden. Zur Ergänzung der physikalisch-chemischen und hydromorphologischen Parameter um die biologische Komponente wurden Inhalte hierzu im Rahmen zweier Abschlussarbeiten konzipiert und im Zuge der Dissemination der virtuellen Labore für Lehrpersonen zugänglich gemacht.

Hydromorphologische Parameter

Die hydromorphologische Beschaffenheit eines Fließgewässers beeinflusst dessen ökologisches Potenzial ebenso wie seine Bedeutung und Nutzbarkeit für Umwelt und Gesellschaft (Richtlinie 2000/60/EG, 2000/22.12.2000). Vor diesem Hintergrund ziehen die anthropogenen Einwirkungen auf ein Fließgewässer direkt beeinflussbare Konsequenzen für dessen ökologischen Zustand nach sich. Neben der Fließgeschwindigkeit als direkt messbare, objektive Größe können im Rahmen der Lerneinheit eine Erfassung der Gewässerstrukturgüte sowie eine sensorische Kurzbeurteilung des hydromorphologischen Zustandes herangezogen werden.

Fließgeschwindigkeit

Die Fließgeschwindigkeit eines Flusses kann dessen assimilative Kapazität, also das für ein Ökosystem verkraftbare Maß an Verschmutzungen, beeinflussen und ist damit ein maßgeblicher Faktor für dessen ökologische Qualität (Forio et al., 2015; Hashemi Monfared et al., 2017). Verdünnungseffekte, Transportprozesse, Habitate und die Sauerstoffsättigung sind die relevanten Parameter, auf welche die Fließgeschwindigkeit direkten Einfluss nimmt (Whitehead et al., 2009). Insbesondere die Durchgängigkeit eines Fließgewässers im Längsprofil kann sich so beispielsweise auf das Wanderungsverhalten der Fische und damit auf die Habitate auswirken (Umweltbundesamt, 2017). Zur Erreichung einer sehr guten Zustandsbewertung müssen Gewässer darüber hinaus eine nahezu unveränderte natürliche Hydromorphologie aufweisen, wobei unter anderem die Strömungsdiversität als Kriterium mit aufgenommen wird (Umweltbundesamt, 2017). Weitere Kriterien wie etwa Breitenerosion und Struktur der Gewässersohle können durch eine Messung der Fließgeschwindigkeit zumindest abgeschätzt werden. So

kann sich die Fließgeschwindigkeit im Ufer- und Sohlenbereich gegenüber dem Freiwasser durch die jeweils vorliegende Oberflächenstruktur deutlich verändern, bis hin zu nahezu strömungsfreien Bereichen im Gewässerbett (Patt et al., 2009). Der Grund hierfür liegt in den Fließwiderständen, welche den Abfluss bremsen (Binder et al., 2016).

Diese Erkenntnisse können gezielt zur Verbesserung der Gewässergüte genutzt werden, etwa indem der Abfluss in anthropogen veränderten Flüssen zur Vermeidung eines übermäßigen Algenwachstums auf hohem Niveau gehalten wird (J. Wang et al., 2019). Außerdem lassen sich in naturnahen Gewässern mit unbefestigten Ufern durch die auftretende Strömung initiierte Transport- und Ablagerungsprozesse nachvollziehen. Dabei führt die höhere Fließgeschwindigkeit am Prallufer eines Gewässers zu lokaler Verkolkung und Erosion, wohingegen am Gleitufer bei geringerer Strömungsgeschwindigkeit Sedimentation und Verlandung auftreten (Patt et al., 2013). Letztlich kann so das mäandrierende Verhalten eines natürlichen Flusslaufes insbesondere im flachen Unterlauf anhand der Fließgeschwindigkeit erklärt werden (vgl. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, 2013).

Zur objektivierten Feststellung des hydromorphologischen Zustandes eines Fließgewässers werden im Rahmen der Lerneinheit Längs-, Quer- und Tiefenprofile der Fließgeschwindigkeit aufgenommen. Im Längsprofil eines Flusses zeigt sich vom Ober- zum Unterlauf meist eine gefällebedingt abnehmende Fließgeschwindigkeit. Wenngleich manche Flüsse auch im Unterlauf durch sinkende Bettrauheiten und zunehmende Abflussmengen große Fließgeschwindigkeiten erreichen können, tritt die Turbulenz im Oberlauf in aller Regel deutlicher hervor, da die Unterläufe strukturärmer und somit selbst bei ähnlicher Fließgeschwindigkeit weniger turbulent und stärker laminar sind (Binder et al., 2016). Im Querprofil wird die Fließgeschwindigkeit vor allem durch die Fließwiderstände der umliegenden Ufer- und Sohlenbereiche bestimmt, wodurch die höchsten Fließgeschwindigkeiten an der Oberfläche über tiefen Stellen eines Fließgewässers auftreten (Binder et al., 2016). Das Tiefenprofil ergibt sich anhand der zuvor beschriebenen bremsenden Effekte der Sohle entsprechend.

Die Konstruktion zur Messung des Sensors zur Fließgeschwindigkeitsmessung stellt hierbei eine Besonderheit dar. Diese basiert auf der Drehbewegung eines Propellers, welcher an einem langen Stab in das Wasser gehalten werden kann (Abbildung 30). Ein auf der gleichen Welle wie der Propeller montierter Stabmagnet betätigt zwei Mal pro Umdrehung einen darüber angebrachten *Reed*-Schalter (Abbildung 31). Die so erzeugten Schaltimpulse werden durch einen Frequenz-Spannungswandler in eine stetige, der Fließgeschwindigkeit proportionale Spannung umgewandelt, welche durch die Messelektronik ausgewertet werden kann (Fourier Systems Ltd., 2021f).

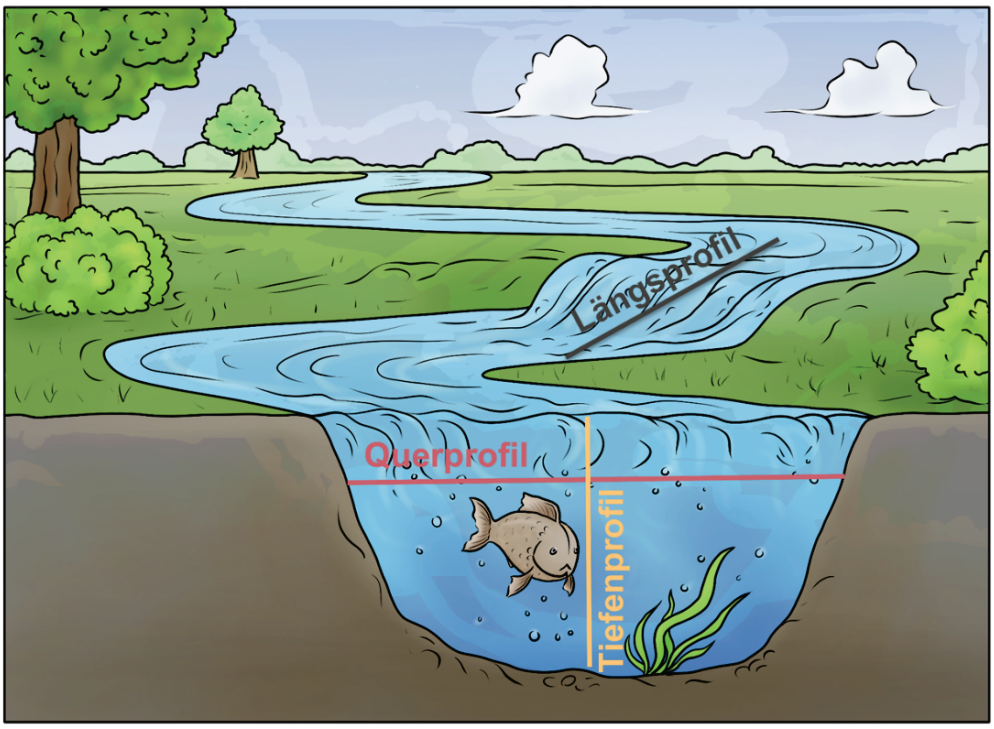


Abbildung 29: Längs-, Quer- und Tiefenprofil eines Fließgewässers können Aufschluss über davon abhängige physikalisch-chemische und biologische Parameter geben und dienen darüber hinaus der Einordnung eines Gewässers (Originalzeichnung: Jasmin Hirtl, Projekt Open MINT Labs).

Abbildung 30: Bauteile des Sensors zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit(Eigene Fotografie).

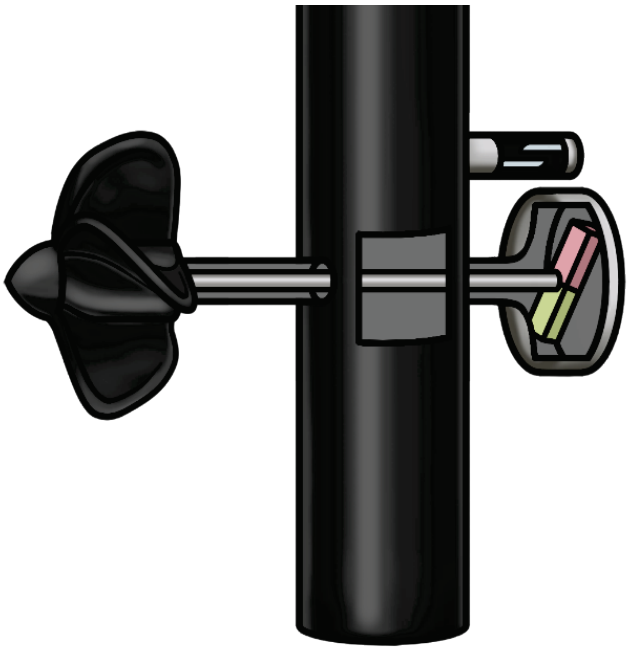


Abbildung 31: Schnittzeichnung durch den Sensor zur Fließgeschwindigkeit, deutlich erkennbar sind Stabmagnet und Reed-Schalter (Jasmin Hirtl, Projekt Open MINT Labs).

Gewässerstrukturgüte

In den Jahren 1997-2000 wurden Fließgewässer in ganz Rheinland-Pfalz auf ihre Strukturgüte hin untersucht und anhand einer siebenstufigen Skala mit 25 Einzelparametern bewertet. Dabei wiesen nur 1,5 % der Gewässer eine sehr gute Gewässerstrukturgüte (Bezeichnung „unverändert“) auf (Linnenweber, 2005). Kumuliert zeigten 71,3 % der Gewässer hingegen eine mindestens deutlich bis vollständig veränderte Gewässerstruktur (Klasse 4 - 7 der siebenstufigen Skala) und damit teils starke Beeinträchtigungen des ökologischen Zustandes (Linnenweber, 2005).

Als Gewässerstruktur wird dabei der Zustand des Gewässerbettes und dessen Umfeldes bezeichnet, soweit dies „hydraulisch, gewässermorphologisch und hydrobiologisch wirksam und für die ökologischen Funktionen des Gewässers und der Aue von Bedeutung“ (Zumbroich & Müller, 1999, S. 9) ist. Dabei können die Einflüsse auf die Gewässerstruktur sowohl natürlichen als auch anthropogenen Ursprungs sein (Zumbroich & Müller, 1999).

Eingriffe in die natürliche Struktur eines Fließgewässers und dessen Auen ergaben sich im Laufe der Geschichte meist durch die Nutzungsbedürfnisse des Menschen. Als Beispiel sei hier die Begradigung und damit Ertüchtigung des Rheins für den Schiffsverkehr genannt. Die negativen Auswirkungen einer schlechten, das heißt vom natürlichen Zustand abweichenden, Gewässerstruktur zeigen sich sowohl im ökologischen Zustand als auch in den Auswirkungen auf den Menschen. Verringerter Erholungswert, geringere Artenvielfalt und sinkende Nutzbarkeit für die Fischerei, Wegfall von Habitaten und deren Vernetzung, verringerte Selbstreinigungsfähigkeit und erhöhter Instandhaltungsaufwand durch den Wegfall natürlicher regulierender Prozesse stellen Auswirkungen massiver Eingriffe in die Gewässerstruktur dar (Hesse, 1999; Neumann, 1979). Die massivsten, direkt wahrnehmbaren Auswirkungen auf den Menschen zeigen sich jedoch bei auftretenden Hochwasserereignissen. Durch fehlende Retentionsflächen, Kanalisierung der Flüsse und stetig zunehmende Bebauung und Nutzung der Auen können Hochwasserereignisse teils massive Schäden anrichten (Hesse, 1999; Zumbroich et al., 1999). Durch fehlende Rückzugsräume für Tiere durch eine verstärkte Nutzung der Aue und Umgestaltung des Gewässerbettes nimmt auch die Resilienz des Ökosystems Fließgewässer gegenüber Schadstoffeinträgen ab (Patt et al., 2009).

Eine Ermittlung der Gewässerstrukturgüte ist im Gegensatz zur Erhebung chemischer Parameter kein Messvorgang sondern vielmehr ein Bewertungsprozess, welcher der subjektiven Überlegung und Einschätzung anhand eines Kriterienkataloges bedarf (Vereinigung Deutscher Gewässerschutz e.V., 2011; Zumbroich & Müller, 1999). Im Rahmen der Durchführung der hier beschriebenen Konzeption wurde die Bestimmung der Gewässerstrukturgüte mit Hilfe entsprechender Materialien zur kriteriengeleiteten Bewertung als ergänzendes Element für eine gesamtheitliche Betrachtung des

Ökosystems Gewässer herangezogen. Aufgrund der fachlichen Ausrichtung dieser Arbeit wird diese Beurteilung jedoch nicht im Mittelpunkt der weiteren Ausführungen stehen.

Kurzbeurteilung

Die ausführliche Datenerhebung, Auswertung und Beurteilung zur Bestimmung der Güte eines Gewässers umfasst umfangreiche Verfahren, welche Fachkenntnis, entsprechende Gerätschaften und Materialien sowie einen nicht geringen Zeitansatz in Anspruch nehmen. Eine erste grobe Erfassung der Gewässergüte ist im Sinne einer vereinfachten Untersuchung auch rein sensorisch möglich (Vereinigung Deutscher Gewässerschutz e.V., 2011). So kann etwa der faulige Geruch eines Gewässers Aufschluss über eine schlechte Wasserqualität in Folge von Schlammablagerungen geben, welche beispielsweise H_2S freisetzen. Starke Trübung oder grünliche Färbung des Wassers deutet auf einen hohen Anteil an fädigen Grünalgen oder freischwebende Algen bzw. Phytoplankton hin, was ebenfalls eine eher geringe Gewässergüte nahelegt. Bei näherer Betrachtung des Gewässerbettes können Steine oder anderes Hartsubstrat ebenfalls Indizien für die Gewässergüte liefern. Dabei deutet ein ausgeprägter Algenrasen auf den Steinoberseiten auf die Eutrophierungsneigung eines Gewässers hin. Grau bis schwarz verfärbte Steinunterseiten, welche nicht nur in Stillwasserzonen sondern auch im Hauptstrom zu finden sind, können ein Indiz für anaerobe Fäulnisprozesse und damit einen Sauerstoffmangel im Gewässerbett liefern (Vereinigung Deutscher Gewässerschutz e.V., 2011). Bei einer solchen vereinfachten Bestimmung ist zu beachten, dass diese Art der Erhebung keine letztgültigen Schlüsse zulässt. Sie dient vielmehr der groben Einordnung und bedarf einer kritischen Diskussion im unterrichtlichen Verlauf hinsichtlich ihrer eingeschränkten Aussagekraft.

Ausgehend von der in diesem Kapitel vorgestellten Konzeption der Lerneinheit wird im nachfolgenden Kapitel das methodische Vorgehen der hierauf aufbauenden Studien dargestellt.

4 Methodisches Vorgehen

Im Rahmen der empirischen Studien zum Transfer der virtuellen Labore in die Schulpraxis wird das Ziel verfolgt, Barrieren des Transfers zu identifizieren sowie Strategien zu deren Minderung zu entwickeln. Ziel ist es, auf der Basis der Erkenntnisse einen erfolgreichen Transferprozess in die Schulpraxis initiieren zu können.[24]

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden digitale Lernumgebungen kriteriengeleitet gestaltet, eingesetzt und evaluiert. Folgende Forschungsfragen stehen im Fokus der Untersuchung:[25]

(1) Welche der postulierten Barrieren der Implementation einer digitalen Innovation in Schulen können deskriptiv bestätigt werden?

(2) Welche Anforderungen müssen didaktische Konzepte aus Sicht der Lehrpersonen erfüllen, um die Implementation einer digitalen Innovation in Schulen zu fördern?

(3) Wie können virtuelle Labore bei Schüler:innen die Genese von aktueller Motivation, *Flow*-Erleben und *Cognitive Load* in der Vor- und Nachbereitung eines experimentellen Settings am außerschulischen Lernort im Freiland fördern?

In der Ausdifferenzierung der schulischen Lernorte nach Guderian (2006) ist der in dieser Studie exemplarisch betrachtete außerschulische Lernort als Schülerlabor im universitären Kontext als didaktisch orientierter Ort des Lernens zu betrachten, an welchem formelles Lernen ermöglicht wird. Der Grad der Formalisierung ist jedoch geringer als im Setting Schule. Durch die Lage des außerschulischen Lernortes im Freiland wird weiterhin die Idee einer Outdoor Education (siehe Engl, 2020 für eine ausführliche Darstellung hierzu) verfolgt. Im Fokus steht dabei die Einbindung dieser außerschulischen Lerngelegenheit durch eine adäquate Vor- und Nachbereitung (z. B. Brandt, 2005; Guderian, 2006; Itzek-Greulich, 2014; Glowinski, 2007; M. Streller, 2015; Pawek, 2009).

Das methodische Vorgehen der empirischen Studie fokussiert zwei Zielgruppen: Lehrer:innen und Schüler:innen.[26] Dabei wird ein exploratives Vorgehen verfolgt. Ein modellprüfendes Vorgehen ist nicht intendiert. Im Folgenden wird die Methodik der

[24] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 84), modifiziert
[25] Forschungsfragen in dieser Form erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 84), modifiziert
[26] Aussage erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 84), modifiziert

Erhebung und Datenauswertung in den Zielgruppen der Lehrenden und der Lernenden beschrieben.

4.1 Studie 1: Evaluation des Transfers in der Zielgruppe der Lehrenden

Methodik Studie 1 – Zielgruppe der Lehrenden

- Methoden der Datenerhebung
  - Fragebogen (*Stages of Concern*; Einstellung, Selbstkonzept und Wertzuschreibung in Bezug auf digitale Medien; Demographie)
  - Leitfadengestützte Interviews (Validierung der Fragebogenerhebung, Beurteilung des didaktischen Konzeptes, Erfahrungen mit den virtuellen Laboren, Transferhindernisse)

- Methoden der Datenauswertung
  - Verteilungsanalysen, Analyse von Item- und Skalenkennwerten
  - Deskriptive Statistik (Maße der zentralen Tendenz, Streuung, Korrelationsanalysen)
  - Qualitative Inhaltsanalyse mit deduktiv-induktiver Kategorienbildung

Auf der Ebene der Lehrpersonen werden – orientiert an der Delphi-Methode (Häder & Häder, 2013) – Barrieren für einen erfolgreichen Transfer in zwei Phasen untersucht. In der ersten Phase konnten Lehrpersonen im Rahmen von Fort- und Weiterbildungsprogrammen die virtuellen Labore intensiv begutachten.[27]

Anschließend nahmen die Lehrpersonen an einer Onlinebefragung teil. Im Rahmen der Befragung wurden die persönlichen Attribute Selbstkonzept und Einstellung zu digitalen Medien sowie der den digitalen Endgeräten zugeschriebene Wert und die schulische Situation bezüglich der technischen Ausstattung erfasst (Neff et al., 2019). Weiterhin wurden die *Stages of Concern* als Indikator für mögliche transferförderliche oder -hinderliche Faktoren erhoben (Neff et al., 2019). Eine ausführliche Erfassung der Nutzung der Innovation (*Levels of Use*) erscheint in dieser frühen Phase der Implementation sowie vor dem Hintergrund der simultanen Anpassung der didaktischen Konzepte unter Berücksichtigung der Anforderungen der Anwendungsebene als wenig adäquat.[28]

Die Befragungen unter Lehrpersonen fanden im Zeitraum von Juni 2018 bis Oktober 2019 im Rahmen diverser Fortbildungsveranstaltungen für Lehrpersonen sowie bei Vorstellungen der digitalen Innovation an weiterführenden Schulen in Rheinland-Pfalz statt. Hierbei wurden teilweise die beschriebenen virtuellen Labore zum Thema Gewässeranalytik eingesetzt. Ergänzend kamen zur Vorstellung der Innovation in diesem Zuge auch bestehende, stärker fachbezogene virtuelle Labore zum Einsatz (siehe Neff et al., 2021). Exemplarisch wurden dabei für das Fach Chemie die Inhalte Massenwir-

[27] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 84), modifiziert
[28] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 84–85), modifiziert

kungsgesetz und chemisches Gleichgewicht, Titration und Analyse von Lipiden angeboten. Lehrpersonen des Fachs Biologie konnten das Wachstum von Zellkulturen bearbeiten. Für das Fach Physik wurden Teilaspekte der Mechanik und Dynamik (Luftkissenbahn, Kreisbewegung) vorgestellt. Allen virtuellen Laboren lagen identische Qualitätskriterien, Gestaltungsprozesse und Strukturen zugrunde.

In der zweiten Phase wurde eine Teilmenge derselben Lehrpersonen in einem leitfadengestützten Interview gezielt zu den Barrieren und Gelingensbedingungen für einen erfolgreichen Einsatz der virtuellen Labore in der Unterrichtspraxis befragt. Das Bereitstellen von didaktischen Konzepten zum Einsatz der virtuellen Labore stellt einen möglichen Ansatz zur Überwindung der Implementationshürden dar und wird ebenfalls im Rahmen der Interviews untersucht.[29]

Die Durchführung der Interviews erfolgte über den Zeitraum der Online-Befragungen hinaus, sobald entsprechende Daten der Lehrpersonen sowie deren Einverständnis für ein Interview vorlagen. Zeitliche Verzögerungen durch schulorganisatorische Einflüsse und die Anfang 2020 einsetzende Pandemielage führten dazu, dass letzte Interviews erst im Sommer 2020 abgeschlossen werden konnten.

Methoden der Datenerhebung

Die Datenerhebung unter Lehrpersonen umfasste sowohl eine Fragebogenstudie als auch leitfadengestützte Interviews. Beide Vorgehensweisen werden nachfolgend beschrieben.

Fragebogen Lehrpersonen

Fragebögen mit Skalen zur Selbsteinschätzung stellen ein bedeutendes Element naturwissenschaftsdidaktischer Forschung als Teildisziplin der empirischen Sozialforschung dar (Döring & Bortz, 2016; Tiemann & Körbs, 2014). Dabei bieten insbesondere zu Skalen aggregierte Items des ratingskalierten Typs, sogenannte Likert-Skalen, die Möglichkeit zur Selbsteinschätzung der Proband:innen hinsichtlich psychometrisch erfassbarer Konstrukte. So können quantitative Forschungsdaten zielgerichtet, systematisch und regelgeleitet erfasst und der Auswertung zugeführt werden (Döring & Bortz, 2016). Dabei zeichnet sich die Methode durch ihren effizienten Einsatz und die gute Eignung zur Erhebung von Eindrücken des subjektiven Erlebens der Proband:innen aus (Döring & Bortz, 2016). Döring und Bortz (2016) stellen als Nachteile der Methode das Erfordernis ausgeprägter Lese- und Schreibkompetenz, die Begrenzung der Antwortmög-

[29] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 85), modifiziert

lichkeiten durch das Format sowie die Erhebung forschungsgenerierter Daten im Sinne einer reaktiven Methode und teils eingeschränkte Transparenz heraus. In den nachfolgend beschriebenen Teilstudien wurde diesen Nachteilen Rechnung getragen. Eine ausgeprägte Lese- und Schreibkompetenz wurde auf Grundlage der Vorbildung der Zielgruppe vorausgesetzt. Begrenzter Gelegenheit zur Rückmeldung der Proband:innen sowie der reaktiven Grundannahme der Methode wurde durch Erweiterung der Erhebungsformate um zusätzliche Aspekte entgegengesteuert. Und letztlich wurden die Fragebögen zur Wahrung der Transparenz stets im Beisein der Forschenden bearbeitet, wodurch Rückfragen die Ziele und Absichten der Erhebung betreffend umgehend beantwortet werden konnten. Dies ermöglichte auch die mündliche Zusicherung einer vollständigen Anonymität der Fragebogendaten und insbesondere die Zusicherung, dass die Fragebogenerhebung keinerlei Auswirkungen auf das Schul- oder Arbeitsumfeld (z. B. keine Rückmeldung an Vorgesetzte) hat. Dieser direkte Kontakt ergänzte die schriftlichen Informationen und Versicherungen zum Datenschutz gemäß Vorgabe der Aufsichtsbehörde. Trotz dieser Bemühungen können allein aufgrund des Hawthorne- sowie des Pygmalion-Effekts nicht alle Verfälschungstendenzen kontrolliert werden (Eid et al., 2017).

Da die eingesetzten Skalen überwiegend keine stark polarisierende Antwort der Befragten zum Ziel hatte, sondern deren Empfinden in den jeweiligen Situationen als reale Selbsteinschätzung widerspiegeln sollte, wurden in Übereinstimmung mit den jeweiligen Manualen der bestehenden Skalen teils ungerade Anzahlen an Ratingstufen eingesetzt (Tiemann & Körbs, 2014).

Ablauf der Testungen

In der Zielgruppe der Lehrpersonen wurden die Befragungen im Rahmen von Fortbildungsveranstaltungen sowie bei Vorstellungen der virtuellen Labore an Schulen eingesetzt. Für die Proband:innen bestand dabei die Möglichkeit der Bearbeitung und Durchsicht der virtuellen Labore, bevor diese anschließend den nachfolgend beschriebenen Fragebogen ausfüllten. Die Bearbeitungszeit, in welcher die Lehrpersonen frei durch die virtuellen Labore navigieren und diese nach eigenem Wunsch bearbeiten konnten, variierte aufgrund der jeweiligen organisatorischen Rahmenbedingungen, betrug jedoch regelmäßig zwischen 20 und 45 Minuten.

Abhängig von der vorhandenen Infrastruktur des jeweiligen Settings und der Verfügbarkeit digitaler Endgeräte wurden die Befragungen online, gestützt durch das Befragungstool *LimeSurvey* oder in schriftlicher Form als *Paper-and-Pen* Fragebogen umgesetzt.

Adaption der Testinstrumente

Das eingesetzte Erhebungsinstrument wurde zunächst aus bestehenden, validierten Skalen erstellt – auf eine eigene Generierung von Items konnte somit verzichtet werden (Döring & Bortz, 2016). In den situativ teils schriftlich, teils online dargebotenen Fragebögen wurden die in Tabelle 9 dargestellten Konstrukte erhoben. Im Anschluss an die erste Pilotierungsphase (n = 34) wurde das Fragebogeninstrument überarbeitet. Dabei wurden redundante Itemsets sowie Items mit unzureichenden Itemkennwerten eliminiert. Für die weiteren Erhebungen wurden die Skalen *Stages of Concern* (Sachse et al., 2012), Einstellung zu digitalen Medien (Tigges, 2008), Wertzuschreibung gegenüber digitalen Endgeräten (Tigges, 2008) und Selbstkonzept in Bezug auf digitale Medien (Dickhäuser, 2001; Tigges, 2008) sowie zwei halboffene Items zur Begründung einer (Nicht-)Nutzung digitaler Medien im Unterricht (Eder, 2008) eingesetzt.

Im Zuge der Adaption der eingesetzten Items an die Zieldomäne wurden die bestehenden und in der Literatur bereits validierten Items durch den Austausch der inhaltlich zutreffenden Begrifflichkeiten angepasst. Sachse et al. (2012) setzten eine deutschsprachige Version des *Stages of Concern Questionnaire* unter dem deutschsprachigen Titel des „Ausmaß der kognitiven Auseinandersetzung mit der Innovation Bildungsstandards“ (Sachse et al., 2012, S. 193) ein. Als Beispielitem sei hier als Ausgangspunkt des in Tabelle 9 dargestellten adaptierten Beispiels die Formulierung „brauche bei der Umsetzung des Unterrichts nach Bildungsstandards zu viel Zeit“ (Sachse et al., 2012, S. 196) genannt. In der vorliegenden Studie wurde die inhaltliche Passung durch Austausch des Begriffs „Bildungsstandards“ gegen „OML (Open MINT Labs; Anmerkung: interne Bezeichnung der virtuellen Labore)“ erreicht. Den teilnehmenden Lehrpersonen war die Bedeutung dieses als interne Bezeichnung eingeführten Begriffes aus dem Kontext der vorangegangenen Einführung in die virtuellen Labore bereits bekannt, sodass hier auf die Langform verzichtet werden konnte. Diese Anpassung beruft sich auf die Aussage der Autoren der englischsprachigen Originalpublikation zu den *Stages of Concern*: „If innovation is not a familiar term to respondents, however, we recommend replacing the words the innovation with a phrase they will recognize, such as the name of the innovation or initiative. Otherwise, do not change the wording of the items“ (George et al., 2013, S. 25).

Die Skala zur Erfassung der Einstellung zum E-Learning nach Tigges (2008) wurde um die kontextspezifischen Items gekürzt. Da die Autorin gezielt Studierende hinsichtlich ihrer Einstellung gegenüber der Multimedianutzung in einer Lehrveranstaltung befragte, waren diese Items auf das vorliegende Lehr-Lern-Konzept schlicht nicht anwendbar. Als Beispiel sei hier die Formulierung „Ich fände es gut, Veranstaltungen online von zu Hause aus besuchen zu können und nicht so oft in die Uni kommen zu müssen.“ (Tigges, 2008, S. 117) angeführt, welche nicht auf das vorliegende Konzept angewendet werden konnte.

Im Fall der Begründungen für oder wider eine Nutzung digitaler Medien im Unterricht wurden die originalen Formulierungen durch den Austausch der Begriffe „Lern- und Übungsprogramme“ und „das Internet“ (Eder, 2008, S. 12) gegen „digitale Lernprogramme“ überarbeitet. Diese bewusst inhaltlich wenig stark begrenzte Formulierung sollte einen übermäßigen Fokus auf die vorgestellten virtuellen Labore vermeiden und so vielmehr die übergeordneten Begründungen der Lehrpersonen, unabhängig vom entsprechenden didaktischen Konzept, erfassen.

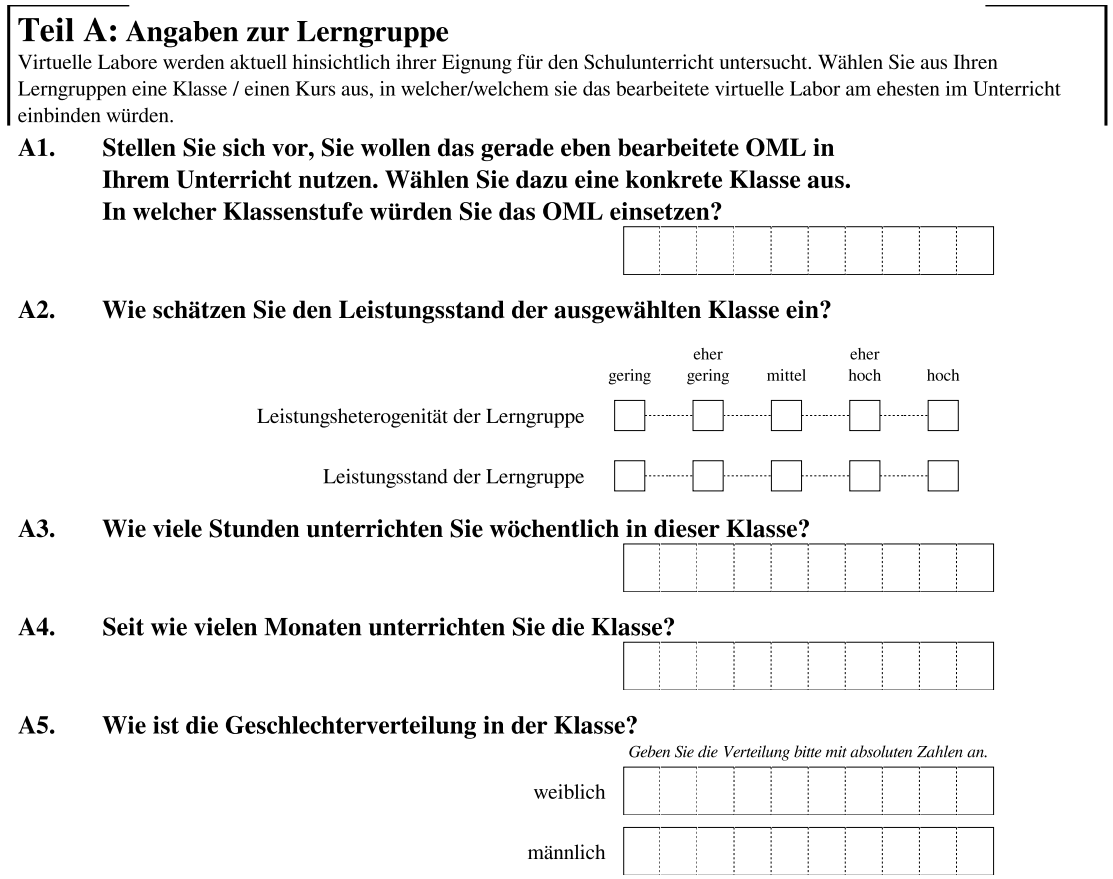
Aufgrund der stark auf die eingesetzte Hardware fokussierten Itemformulierungen der Skala zur Perzeption des Computerwerts, wurden die Items in der überarbeiteten Fassung durch die Nutzung des Begriffs „digitale Endgeräte“ (Tigges, 2008, S. 112) anstelle von „Computer“ lediglich auf die derzeitig vorherrschenden Nutzungsformen und Endgeräte (Smartphones, Tablets, …) erweitert. Weiterhin wurde die Skala um Items gekürzt, welche aufgrund des ursprünglichen Kontexts in der vorliegenden Studie wenig sinnhaft waren. So wurde beispielsweise das Item mit der Formulierung „Ich rede gerne mit meinen FreundInnen und Bekannten über Computer und Technik“ (Tigges, 2008, S. 112) für unzutreffend im Kontext digital gestützter Lehre angesehen.

Die Skala zur Erfassung des Selbstkonzeptes in Bezug auf die Nutzung digitaler Medien wurde unter Berücksichtigung der Itemformulierungen nach Dickhäuser (2001) sowie der Überarbeitung nach Tigges (2008) adaptiert. Dabei wurden einzelne Items bewusst in der Formulierung des ursprünglichen Instruments übernommen, da eine bessere inhaltliche Passung auf die Nutzung im Kontext der virtuellen Labore auszumachen war. So wurde die Formulierung „Häufig denke ich, dass mich das Arbeiten am Computer überfordert“ (Dickhäuser, 2001) beispielsweise als zutreffender als die überarbeitete Version angesehen, in welcher die Bedienung des Computers im Fokus steht. Weiterhin wurde bei dieser Skala, sofern die *peer-group* Teil der Itemformulierung war, die Begrifflichkeit „Kommilitoninnen und Kommilitonen“ durch „Kolleginnen und Kollegen“ ersetzt.

Begleitend wurden Merkmale der anvisierten Zielgruppe Lernender (Abbildung 32), persönliche Ressourcen der jeweiligen Lehrpersonen wie auch die materielle Ausstattung der Schule und demographische Daten der Lehrpersonen erhoben. Darüber hinaus wurden im Fragebogen Rückmeldungen in Form einer Gesamtbewertung der virtuellen Labore mittels Schulnoten als niedrig inferente Form des Feedbacks erfragt. Hier bestand ebenfalls die Möglichkeit zur offenen Rückmeldung in Freitextform durch die Lehrpersonen. Das vollständige Fragebogeninstrument ist dem Anhang zu entnehmen.

Alle angeführten Konstrukte wurden, soweit möglich, in einem geschlossenen Antwortformat vorgelegt, um eine möglichst hohe Standardisierung und Vergleichbarkeit der Antworten zu erzielen. Die Items der in der Theorie dargelegten Konstrukte wurden dabei als Likert-Skalen dargestellt, auf welchen sich die Proband:innen mit diskreten Werten verorten sollten. Die Skala zu den *Stages of Concern* wies dabei als

Besonderheit neben der Skalierung von eins bis sieben (1 = trifft zurzeit gar nicht auf mich zu; 7 = trifft zurzeit völlig auf mich zu) ebenfalls die Antwortoption „zurzeit nicht relevant“ auf. Diese wurde in der Datenauswertung gesondert behandelt und ist dort näher beschrieben. Die Einstellung wurde mit einer fünfstufigen Likert-Skala mit den Ankerpunkten „1 = trifft überhaupt nicht zu“ und „5 = trifft völlig zu“ erfasst. Zur Erhebung der Wertzuschreibung und des Selbstkonzepts wurden jeweils ebenfalls fünfstufige Likert-Skalen gewählt („stimme nicht zu“ – „stimme weniger zu“ – „stimme eher zu“ – „stimme voll zu“), welche zusätzlich die Antwortoption „weiß nicht“ boten.



Teil A: Angaben zur Lerngruppe

Virtuelle Labore werden aktuell hinsichtlich ihrer Eignung für den Schulunterricht untersucht. Wählen Sie aus Ihren Lerngruppen eine Klasse / einen Kurs aus, in welcher/welchem sie das bearbeitete virtuelle Labor am ehesten im Unterricht einbinden würden.

A1. **Stellen Sie sich vor, Sie wollen das gerade eben bearbeitete OML in Ihrem Unterricht nutzen. Wählen Sie dazu eine konkrete Klasse aus. In welcher Klassenstufe würden Sie das OML einsetzen?**

A2. **Wie schätzen Sie den Leistungsstand der ausgewählten Klasse ein?**

	gering	eher gering	mittel	eher hoch	hoch
Leistungsheterogenität der Lerngruppe	☐	☐	☐	☐	☐
Leistungsstand der Lerngruppe	☐	☐	☐	☐	☐

A3. **Wie viele Stunden unterrichten Sie wöchentlich in dieser Klasse?**

A4. **Seit wie vielen Monaten unterrichten Sie die Klasse?**

A5. **Wie ist die Geschlechterverteilung in der Klasse?**

Geben Sie die Verteilung bitte mit absoluten Zahlen an.

weiblich

männlich

Abbildung 32: Auszug aus dem überarbeiteten Fragebogeninstrument, hier dargestellt die Erfassung der Angaben zu einer durch die Lehrperson ausgewählten Zielgruppe Lernender.

Tabelle 9: Messinstrumente zur Erfassung der jeweiligen theoretischen Konstrukte auf Lehrendenseite. Überarbeitungen erfolgten im Zuge der Pilotierung.

Konstrukt	Literatur Items	Überarbeitung	Beispielitem
Stages of Concern	George et al. (2013) in der Übersetzung nach Sachse et al. (2012)	Adaption an die spezifische Innovation gemäß Manual.	Ich brauche bei der Umsetzung des Unterrichts mit OML zu viel Zeit.
Einstellung zu digitalen Medien	Tigges, 2008	Items D, E, G und H wurden aufgrund geringer Augenscheinsvalidität in Hinblick auf die Zielgruppe gestrichen.	Multimedia führt zu einem besseren Verständnis der Inhalte – im Gegensatz zu einem Buch.
Begründung für/ wider Medieneinsatz im Unterricht	Eder, 2008	Adaption an die Zieldomäne.	Ich verwende digitale Lernprogramme im Unterricht, weil…
Wertzuschreibung digitale Endgeräte	Tigges, 2008	Auszugsweise Verwendung der Items A, B und G. Übrige Items mangels Augenscheinsvalidität in Bezug auf die Zielgruppe gestrichen. Adaption an die Zieldomäne.	Ein souveräner Umgang mit digitalen Endgeräten ist eine wichtige Qualifikation für den Beruf.
Selbstkonzept digitale Medien	Dickhäuser, 2001; Tigges, 2008	Items G, J, K, L in der Formulierung nach Dickhäuser (2001) übernommen aufgrund besserer inhaltlicher Passung.	Ich glaube, dass Andere in Sachen digitale Endgeräte noch manches von mir lernen können.

Leitfadengestützte Interviews

Leitfadengestützte Interviews ermöglichen den Forschenden eine Erfassung der Sicht der Proband:innen in einem teilstrukturierten Rahmen. In Abhängigkeit vom Grad der Strukturierung der Gesprächssituation durch einen Leitfaden können auch freie Äußerungen verstärkt repräsentiert werden. Wenngleich die Vergleichbarkeit unter einem verringerten Strukturierungsgrad leidet, bietet sich so die Möglichkeit, Informationen in einem freieren Gespräch mit natürlicherem Charakter zu gewinnen (Eid et al., 2017). Methodisch gilt es zu berücksichtigen, dass die Interpretation von Interviewdaten einen Ansatz des Fremdverstehens darstellt, da die Forschenden die Äußerungen der Proband:innen interpretieren (Niebert & Gropengießer, 2014). In der vorliegenden Studie entspricht die Ausrichtung des methodischen Vorgehens dem systematisierenden Expert:inneninterview, welches die Informationsgewinnung durch Expert:innenwissen anzureichern sucht, um Wissen, welches den Forschenden nicht zugänglich ist, zu ergänzen (Bogner et al., 2002). Maßgeblich für die Anwendung der Interviewmethode als Verfahren zur Berichtslegung subjektiver Erlebnisse war hier die *Live*-Situation, welche es ermöglicht, mehr Informationen in kürzerer Zeit sowie darüber hinaus freiere und durch die Interaktion mit dem Interviewenden tiefergehende, komplexere Daten zu generieren, als dies in einer schriftlichen Befragung der Fall wäre (Döring & Bortz, 2016). Ein höherer Zeitaufwand für Schulung der Interviewenden und für die Durchführung der Interviews sowie eine Aufhebung der Anonymität der Proband:innen (mit deren ausdrücklicher Zustimmung) wurden hierfür ebenso in Kauf genommen wie die hohe Reaktivität der Methode (Döring & Bortz, 2016).

Interviewsituation

Die Interviews mit Lehrpersonen fanden im Zeitraum von Sommer 2019 bis Sommer 2020 statt. Aufgrund der Beschränkungen angesichts der Corona-Pandemielage wurde ein Teil der Interviews via Videokonferenz durchgeführt.

Insgesamt wurden zehn Interviews mit zwölf Lehrpersonen geführt. In zwei Fällen wurden zwei Lehrende gemeinsam interviewt, da an deren Schulen das Konzept des *Team-Teachings* implementiert war. Folglich hatten diese Lehrenden die virtuellen Labore gemeinsam in Augenschein genommen beziehungsweise in ihren Klassen eingesetzt.

Interviewt wurden jene Lehrpersonen, die im Fragebogen ihre Bereitschaft für eine weitere Befragung bekundet hatten. Durch die besonderen Anforderungen an Lehrende in der Corona-Pandemie war eine weitere Erhöhung des Stichprobenumfangs, ausgehend von der dann noch gegebenen Bereitschaft der Lehrenden, nicht möglich.

Von den zwölf befragten Lehrpersonen hatten sieben Lehrende beim Interviewtermin bereits das vorgestellte didaktische Konzept der Gewässeranalytik mit ihren Schüler:innen durchgeführt (7/12). Zwei der zwölf Lehrpersonen hatten selbständig, ohne vorge-

fertigtes didaktisches Konzept, in ihrem Unterricht das virtuelle Labor zur Titration verwendet (2/12). Die verbleibenden drei Lehrpersonen wurden zum virtuellen Labor der kräftefreien Bewegung mit der Luftkissenbahn ohne didaktisches Konzept interviewt, haben dieses allerdings bisher noch nicht mit Lernenden erprobt (3/12). Dadurch konnten einerseits neue und alternative didaktische Konzepte und andererseits Rückmeldungen zum bestehenden didaktischen Konzept der Gewässeranalytik gewonnen werden.[30]

Befragungszeiträume und -orte wurden mit den zum Interview bereit erklärten Lehrpersonen abgestimmt. Alle Interviews fanden unter Ausschluss der (Schul-)Öffentlichkeit statt, sodass trotz der fehlenden Anonymität eine Vertraulichkeit zugesichert werden konnte. Als Interviewende wurde eine im Vorfeld mit dem Interviewfragebogen vertraute und hinsichtlich der Durchführung der Interviews in mehreren Probedurchgängen geschulte wissenschaftliche Mitarbeiterin eingesetzt. Eine Aufzeichnung der Interviewdaten als Tonspuren erfolgte mittels Diktiergeräts oder Smartphone.

Interviewleitfaden

Die Interviews wurden entlang eines Leitfadens durchgeführt, welcher in drei Bereiche untergliedert war. Zunächst erfolgte eine erneute qualitative Einschätzung der Persönlichkeitsmerkmale, welche bereits in der Fragebogenerhebung quantitativ untersucht wurden. Hierzu verorteten sich die Lehrpersonen auf einer fünfstufigen Likertskala mit den Ankerpunkten „1 – stimme gar nicht zu“ bis „5 – stimme voll zu“ anhand je eines zusammenfassenden Items bezogen auf die drei Konstrukte Einstellung gegenüber digitalen Medien, Selbstkonzept im Umgang mit digitalen Medien und digitalen Endgeräten beigemessener Wert. Die entsprechenden Items wurden anhand der zusammenfassenden Aussage der jeweiligen Skala selbst generiert und im Vorfeld von drei Forschenden auf ihre Augenscheinsvalidität hin geprüft. Nach *ad-hoc*-Abgleich mit den Fragebogenauswertungen der jeweiligen Lehrperson erfolgte umgehend eine Rückführung auf die quantitative Datenerhebung im Sinne einer Delphi-Befragung. Hierzu wurden die Lehrpersonen aufgefordert, zu etwaigen Diskrepanzen zwischen qualitativer und quantitativer Selbsteinschätzung Stellung zu beziehen und mögliche Gründe hierfür zu benennen. Zur Verortung innerhalb der *Stages of Concern* wurde den Lehrenden ein Schaubild der nach dem *Concerns Based Adoption Model* prognostizierten Grade der Betroffenheit vorgelegt, auf welchem sich die Proband:innen selbst verorten sollten. Anschließend wurden sowohl das jeweilige Personenprofil als auch das Gruppenprofil aller befragter Lehrpersonen bereitgestellt und auch hier mögliche Abweichungen von der Fragebogenstudie erörtert.

[30] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 85), modifiziert

Im weiteren Verlauf der Interviews wurden die Lehrpersonen hinsichtlich ihrer konkreten Nutzung und Erfahrung mit den virtuellen Laboren befragt. Dabei standen mögliche Hindernisse der schulischen Nutzung ebenso im Fokus wie Anpassungswünsche und Optimierungsbedarfe der virtuellen Labore aus Sicht der Lehrpersonen.

Abschließend wurden die Lehrenden gebeten, anhand eines typischen Unterrichtsverlaufs eines den virtuellen Laboren zugrunde liegenden Themenkomplexes die aus ihrer Sicht geeigneten didaktischen Szenarien zur Anwendung der virtuellen Labore zu skizzieren. Dabei reflektierten die Lehrenden auch ihre eigene Rolle in der Nutzung der virtuellen Labore und skizzierten eine fiktive Unterrichtsstunde unter Einsatz der virtuellen Labore.

Methoden der Datenauswertung

Sowohl die Auswertung der quantitativen Fragebogendaten als auch die Auswertung der qualitativen Interviewdaten folgen einem stringenten methodischen Vorgehen. Beide Vorgehensweisen werden nachfolgend weiter ausgeführt.

Im Falle der Fragebögen der Lehrpersonen wurde ein Zustandekommen fehlender Daten als zufällig (*Missing completely at Random*) angenommen. Diese Annahme leitet sich aus der erhebungsmethodischen Herangehensweise ab, wonach Auslassungen jedes Items freigestellt waren, und stellt darüber hinaus eine ökonomische Vorgehensweise dar. Sofern Lehrpersonen ganze Skalen unbeantwortet ließen und darüber hinaus weitere fehlende Werte aufwiesen (*Missing at Random*), wurden diese Fälle in der Auswertung ausgeschlossen, da ein Zusammenhang der fehlenden Werte nicht auszuschließen und somit kein univariates Muster mehr gegeben ist (Enders, 2010). Schafer und Graham (2002) raten von einer Annahme fehlender Daten als zufällig zustande gekommen ab und schlagen *Maximum Likelihood*-Verfahren oder Verfahren der Multiplen Imputation vor. Nach Allison (2009) kann das Vorliegen einer *Missing at Random* Bedingung jedoch nicht getestet werden. Auf Basis der vorstehenden Begründung für ein zufälliges Auftreten fehlender Werte und unter Betrachtung des Untersuchungsdesigns kann der *Missing Data* Prozess in der vorliegenden Studie nach Allison (2009) als ignorierbar betrachtet werden. Abweichend hiervon erfolgte eine Ersetzung fehlender Werte, sofern dies über das jeweils dem validierten Test zugrunde liegende Manual vorgegeben und damit Teil des validierenden Vorgehens war. In diesen Fällen wird auf das entsprechende Manual verwiesen – konkret betrifft dies das Instrument zur Erfassung der *Stages of Concern*. Sofern keine Ersetzung der Daten vorgesehen war, erfolgte im Rahmen der deskriptiven Auswertung ein paarweiser Ausschluss. Lediglich für die Zusammenhangsanalyse erfolgte ein zeilenweiser Ausschluss um eine Verzerrung der Korrelationen durch unterschiedliche Stichproben auszuschließen. Dieses Vorgehen

ermöglicht eine Reduzierung des Dropouts und ist damit für eine rein explorative Untersuchung ökonomisch.

Fragebogen Lehrpersonen

Im Folgenden wird das Vorgehen zur Auswertung der durch die Fragebögen erhobenen quantitativen Daten dargelegt. Zur Auswertung der Fragebogendaten wurde das Statistikprogramm R (2022.12.0, Build 353; D. Bates et al.) mit den in Tabelle 10 angeführten *Packages* genutzt.

Tabelle 10: Übersicht über die zur Auswertung der quantitativen Daten auf der Seite der Lehrenden genutzten Packages.

Package	Version	Nachweis
dplyr	[R Package *dplyr* version 1.1.0]	Wickham, Francois et al., 2023
psych	[R Package *psych* version 2.2.9]	Revelle, 2022
likert	[R Package *likert* version 1.3.5]	Bryer & Speerschneider, 2023
ggplot	[R Package *ggplot2* version 3.4.1]	Wickham, Chang et al., 2023
writexl	[R Package *writexl* version 1.4.2]	Ooms, 2023
qqplotr	[R Package *qqplotr* version 0.0.69]	Almedeia et al., 2023
rstatix	[R Package *rstatix* version 0.7.2]	Kassambara, 2023b
ggpubr	[R Package *ggpubr* version 0.6.09	Kassambara, 2023a
mice	[R Package *mice* version 3.15.0]	van Buuren & Groothuis-Oudshoorn, 2022
tibble	[R Package *tibble* version 3.1.8]	Müller & Wickham, 2023
ggpattern	[R Package *ggpattern* version 1.0.1]	Mike & Davis, 2022
ggcorrplot	[R Package *ggcorrplot* version 0.1.4]	Kassambara, 2022
ggm	[R Package *ggm* version 2.5]	Marchetti et al., 2022
svglite	[R Package *svglite* version 2.1.1]	Luciani & Decorde, 2012
knitr	[R Package *knitr* version 1.42]	Xie, o. J.; Xie, 2015

Streng nach Manual wurden zur Auswertung der *Stages of Concern* Summenscores (*Raw Scale Scores*) der jeweiligen Subskalen („*Stages*“) gebildet. Hierzu wurden die jeweiligen Antwortwerte (Range 0 - 7) über die fünf Items je Subskala summiert. Dabei indiziert ein hoher Wert eine starke Ausprägung der einzelnen *Concerns*, ein niedriger Wert eine eher geringe Ausprägung. Der Wert „0“ im ursprünglichen Manual wurde als Antwortoption „derzeit nicht relevant“ aufgeführt und in der Auswertung als fehlender Wert behandelt (George et al., 2013; Hall et al., 1977). Anschließend wurden alle fehlenden Werte gemäß des Vorgehens von Hall et al. (1991) durch den Mittelwert der vorhandenen Werte des jeweiligen Items ersetzt und so der Summenscore für die Subskala berechnet. Sofern ganze Subskalen ausgelassen wurden, erfolgte ein paarweiser Ausschluss der Proband:innen für das gesamte Instrument zur Erfassung der *Stages of Concern*. Im weiteren Verlauf werden die Summenscores (Range 0 - 35) anhand einer durch das Manual definierten Umwandlungstabelle in Perzentilen (*Percentile Scores*) umgewandelt. Die so erhaltenen Perzentilwerte können letztlich auf Proband:innenebene als Personenprofil oder auf Stichprobenebene als Gruppenprofil in Form eines Liniendiagramms grafisch dargestellt werden (George et al., 2013).

Fertig aufbereitete Daten können auf verschiedene Weise interpretiert werden. George et al. (2013) schlagen als einfachste Interpretationsform die Betrachtung der am stärksten ausgeprägten *Stage of Concern* oder alternativ der *Stages* mit höchster und zweithöchster Ausprägung vor. Eine detailliertere Option zur Interpretation der *Concerns* sehen die Autoren in der Gesamtbetrachtung der Personen- und Gruppenprofile, da hier nicht nur alle *Stages of Concern* betrachtet werden, sondern auch die Beziehungen zwischen diesen Stages und damit deren relative Ausprägungen Eingang in die Interpretation finden. In der vorliegenden Studie erfolgte eine erste Überblicksbetrachtung anhand der höchsten Perzentilwerte, zur genaueren Betrachtung wurde das Gruppenprofil der Proband:innen näher betrachtet. Die Personenprofile dienten in erster Linie zur Verifikation der Selbsteinschätzung durch die Proband:innen im Rahmen der Interviews. Weiterhin wurden diese Personenprofile zur Ermittlung der Häufigkeit identifizierbarer Typen genutzt. Hierfür wurde qualitativ geprüft, inwiefern die identifizierten Personenprofile mit aus der Literatur bekannten Profilen übereinstimmen.

Ein validierendes Vorgehen, welches die quantitative Erfassung der *Stages of Concern* nicht als alleinige Aussage zur Ableitung einer Schlussfolgerung heranzieht, wird von den Autoren explizit empfohlen (George et al., 2013). Vor diesem Hintergrund erfolgte eine Auswertung der Personenprofile der befragten Lehrpersonen mit auswertbarem Rücklauf. Die Kodierung erfolgte im ersten Schritt deduktiv-theoriegeleitet anhand der aus der Literatur bekannten Personenprofile (Bitan-Friedlander et al., 2004; George et al., 2013). In einem zweiten Durchgang wurden drei induktiv-datengesteuerte Kategorien ergänzt. Konkret handelt es sich hierbei um die identifizierten Personenprofile eines „Nicht-Nutzers mit Ideen“, der „durchgehend hohen Ausprägungen“ sowie der Kategorie „nicht zuordenbare Personenprofile“. Insgesamt wurden so 20 Kategorien auf

die Personenprofile angewandt (Tabelle 11). Zur Sicherung der Reliabilität erfolgte nach vorangegangener Kodiererschulung eine zweite Kodierung durch einen unabhängigen Experten. Der Expertenstatus des hierfür herangezogenen wissenschaftlichen Mitarbeiters ergab sich in diesem Fall durch Vorerfahrungen im Umgang mit der Skala zur Erfassung der *Stages of Concern* sowie einer intensiven Einarbeitung in die Auswertung von Personenprofilen. Die Interrater-Reliabilität wurde anschließend gemäß der Empfehlung für nominalskalierte Daten nach Döring und Bortz (2016) ermittelt (Übereinstimmungen nach Brennan & Prediger, 1981; Cohen, 1960).

Tabelle 11: Theoriegeleitete und datengesteuerte Profile der Stages of Concern. Eine Zuordnung der Personenprofile zu diesen 20 Literaturorientierten Profilen erfolgte durch zwei unabhängige Kodierer.

Profil Nummer	Profile der Stages of Concern
1	Typical Nonuser
2	Inexperienced User
3	Experienced User
4	Renewing User
5	Positive One-Two Split
6	Negative One-Two Split
7	Negative One-Two Split with tailing up at Stage 6
8	Intense Management Concerns
9	Consequence Concerns
10	High Collaboration and Consequence
11	Single High Collaboration Concerns
12	High Refocusing Concerns
13	High Management Concerns with Ideas
14	Impact-Concerned User and Coordinator
15	Unconcerned Innovation User
16	Innovationsgegner
17	Kooperationsbereite
18	Nicht-Nutzer mit Ideen
19	durchgehend hohe Ausprägungen
20	Nicht zuordenbar

Der aus sechs Items bestehende Fragebogen zur Einstellung gegenüber digitalen Medien wurde nach Aufbereitung der Daten auf Stichprobenebene hinsichtlich der Maße der zentralen Tendenz und der Streuung deskriptiv ausgewertet. Die Skalen zu Wertzuschreibung und Selbstkonzept wurden nahezu identisch ausgewertet, jedoch wurde hier die Antwortausprägung „weiß nicht" zunächst als fehlender Wert kodiert. In der Folge wurden diese beiden Skalen vierstufig dargestellt. Bei den Skalen zu Einstellung, Selbstkonzept und Wertzuschreibung erfolgte ein *Missing-Data-Handling* im Sinne eines paarweisen Ausschlusses der Proband:innen. Zur besseren Übersichtlichkeit der Ergebnisse wurden die unterschiedlichen Skalierungen der Skalen Einstellung (fünfstufig), Wertzuschreibung (vierstufig) und Selbstkonzept (vierstufig) final auf eine vierstufige Skala angeglichen, sodass eine übersichtlichere Darstellungs- und Interpretationsweise in der Gesamtschau möglich wurde. Dieses Vorgehen wurde als Harmonisierung der Wertebereiche bezeichnet und wird an den entsprechenden Stellen kenntlich gemacht.

Analyse der Verteilungen und der Itemkennwerte

Zunächst erfolgte eine explorative Analyse der Verteilungen. Hierbei wurden insbesondere Schiefe und Steilheit der Verteilung betrachtet. Als Grenzwerte für das Vorliegen einer Normalverteilung wurden nach Eid et al. (2017) Überschreitungen des Betrags der Schiefe von 2 und des Betrags des Exzesses (Kurtosis) von 7 angenommen. Eine weitere Prüfung der Verteilung erfolgte durch QQ-Plots (Eckstein, 2016) oder im Einzelfall durch Histogramme.

Weiterhin wurden für alle Konstrukte Analysen der Itemkennwerte zur Sicherung der Testgütekriterien durchgeführt. Zur Ermittlung der Skalenhomogenität wurde Cronbachs Alpha-Koeffizient (α; Cronbach, 1951) herangezogen. Zur Interpretation des α-Wertes als Maß der internen Konsistenz betonen Schermelleh-Engel und Werner (2011), dass Persönlichkeitstests häufig nur interne Konsistenzen im Bereich von $\alpha = .70$ liefern und darüber hinaus die Optimierung der internen Konsistenz unter Betrachtung der Gesamtanlage einer Studie abgewogen werden muss. Die Autoren konstatieren: „Sollen Merkmale untersucht werden, für die es keine besser geeigneten Testverfahren gibt, so kann der Einsatz eines niedrig reliablen Messinstruments immer noch aufschlussreicher sein als der gänzliche Verzicht auf den Einsatz von Tests" (Schermelleh-Engel & Werner, 2011, 135 f.). Entsprechend erfolgte kein Ausschluss von Skalen auf Grundlage einer in der vorliegenden Studie ermittelten fraglichen internen Konsistenz.

Im Fall der *Stages of Concern* mit explizit ausgewiesenen Subskalen und damit einer Mehrdimensionalität des Tests wurde die interne Konsistenz nach Döring und Bortz (2016) für alle Subskalen ermittelt. Aufgrund der ausführlichen Validierung dieser Skala (George et al., 2013; Hall et al., 1977; Sachse et al., 2012) wurde auf eine

Dimensionalitätsprüfung verzichtet. Darüber hinaus dient auch die in der Literatur berichtete überwiegend gute interne Konsistenz der Subskalen als Indiz für die Korrektheit der von George et al. (2013) identifizierten Faktorenstruktur (Döring & Bortz, 2016).

Als Maß der Itemschwierigkeit wurde der Schwierigkeitsindex für intervallskalierte Daten nach Dahl herangezogen. Der so bestimmte Wert kann nach Kelava und Moosbrugger (2011) als arithmetischer Mittelwert der Itemantworten der Proband:innen auf der Antwortskala interpretiert werden. Sofern der Wertebereich der jeweiligen Subskala nicht die Bedingung des Startwertes „0“ erfüllte, erfolgte die Korrektur dieser Voraussetzung über eine modifizierte Formel unter Berücksichtigung der minimalen und maximalen Skalenausprägungen (Döring & Bortz, 2016). Ein hoher Wert innerhalb des Wertebereichs 0 - 100 kann folglich so interpretiert werden, dass den Proband:innen eine zustimmende Antwort leichtfiel. Da keine Ausdifferenzierung zwischen extremen Ausprägungen der Konstrukte in der Stichprobe beabsichtigt war, wurde der Referenzbereich für die Itemschwierigkeit in Anlehnung an Kelava und Moosbrugger (2011) mit $20 < p_{Dahl} < 80$ definiert.

Weiterhin wurden im Zuge der Itemanalyse die korrigierten Trennschärfen für alle Items der eingesetzten Skalen ermittelt. Die Trennschärfe ist dabei allgemein als „Korrelation eines einzelnen Items mit dem Gesamtmittelwert aller Items“ (Döring & Bortz, 2016, S. 270) beschrieben. Im Rahmen der vorliegenden Studie erfolgt die Auswertung mittels korrigierter Trennschärfen. Hierzu wird einer Überschätzung der Trennschärfe durch eine *Part-Whole*-Korrektur vorgebeugt, das betreffende Item wird mit den übrigen Items der Skala und nicht mit der gesamten Skala einschließlich des betrachteten Items in Bezug gesetzt (Schermelleh-Engel & Werner, 2011). Als Referenzwert für unzureichende korrigierte Trennschärfen gilt nach Kemper et al. (2015) ein Wert von $r_{it} < .30$.

Aufgrund des Umfangs des *Stages-of-Concern*-Fragebogens war hier ein zunehmender Dropout zu erwarten. Dieser Umstand ist für die deskriptive Auswertung anhand der im Manual beschriebenen Vorgehensweise der Imputation fehlender Werte durch die jeweiligen Mittelwerte der Subskalen zu kompensieren, stellt jedoch für die Itemanalyse eine Herausforderung dar. Diese erfolgte letztlich unter Einbeziehung aller Fälle nach der Imputation fehlender Werte. Die von Riese und Reinhold (2014) geforderte Mindeststichprobengröße von 40 Proband:innen zur Ermittlung von Itemkennwerten kann so auf Basis der Stichprobengröße für alle Items erfüllt werden. Eine Glättung der Itemcharakteristika durch dieses Vorgehen ist vorstellbar, erscheint jedoch in dieser Abwägung als akzeptabel.

Deskriptive Auswertungen

Für die Skalen zu den Konstrukten Einstellung, Selbstkonzept und Wertzuschreibung an digitale Endgeräte erfolgte neben der Verteilungsanalyse auch eine deskriptive Betrachtung, vorrangig unter den Gesichtspunkten der zentralen Tendenz und der Streuung. Darüber hinaus wurde eine Zusammenhangsanalyse zwischen den genannten Konstrukten durchgeführt. Dabei wurden die *Stages of Concern* nicht in die Betrachtung mit einbezogen, da hier aufgrund der imputierten Subskalenmittelwerte mit einer Verzerrung der Varianzen zu rechnen ist.

Qualitative Inhaltsanalyse

Als qualitative Auswertungsmethode dient die Inhaltsanalyse der Informationsgewinnung aus natürlich vorhandenen wie auch aus forschungsgenerierten Dokumenten und Datenquellen (Döring & Bortz, 2016). Als Datenquellen kommen dabei unter anderem Dokumente, Tagebücher, Videografien oder Interviews in Betracht. Standardisierte Vorgehensweisen greifen zur Wahrung einer Intersubjektivität des Vorgehens auf ein Kategoriensystem zurück, welches zur Klassifizierung inhaltlicher Aspekte herangezogen wird (Kuckartz, 2022; Mayring, 2010). Die Kategorien können sowohl theoriebasiert deduktiv als auch induktiv am Material orientiert gebildet und ausgeschärft werden. Das nachfolgend beschriebene Vorgehen orientiert sich an der Vorgehensweise zur strukturierenden Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2022), welche sich von dem Vorgehen nach Mayring (2010) insbesondere durch den geringeren Theoriebezug und eine verstärkte Offenheit im Sinne der Orientierung am Material unterscheidet.

Ausgehend von einem vorab erstellten Kategoriensystem, welches die Ansichten der Interviewten strukturieren soll, wird dieses anhand des vorliegenden Datenmaterials überprüft und bei Bedarf erweitert oder konkretisiert. Ankerbeispiele ermöglichen hierbei einen Abgleich der eher abstrakt formulierten Kategorien mit den authentischen Proband:innenäußerungen in den Materialien. Kuckartz (2022) sieht solche beispielhaften Zitate aus dem Material zur Konkretisierung der Kategorien als illustrierendes und qualitätssicherndes Merkmal der Methode an.

Trotz der vermeintlichen Schwächen der Intercoder-Reliabilität als Maßzahl für die Übereinstimmung mehrerer unabhängiger Kodierer, erscheint diese aufgrund der quantitativ orientierten Auswertetechnik im vorliegenden Fall als probates Mittel der Absicherung klassischer Gütekriterien unter Anwendung der inhaltsanalytischen Methode (Kuckartz, 2022). Das alternativ anwendbare Vorgehen des konsensuellen Kodierens (Kuckartz, 2022) erscheint aufgrund des niedrig inferenten Kategoriensystems und der inhaltlich-semantischen Orientierung der Analyse nicht ökonomisch einsetzbar. Das vorliegende Datenmaterial beläuft sich auf zehn Interviews. Auf der Grundlage der Forschungsfragen und des Interviewleitfadens wurde ein deduktives, niedrig inferentes

Kategoriensystem entwickelt (Tabelle 12), welches als Basis der strukturierenden Inhaltsanalyse (Kuckartz, 2022) der n = 10 Interviews dient.[31]

Tabelle 12: Deduktives Kategoriensystem, eigene Darstellung.[32]

Thema	Kategorien
Einstellung digitale Medien	Vorteile digitaler Medien
	Nachteile digitaler Medien
	Verwendung digitaler Medien
	Selbsteinschätzung Einstellung zu digitalen Medien
	Gelingensbedingungen für den Einsatz digitale Medien
Stellenwert digitaler Endgeräte	Selbsteinschätzung Stellenwert digitaler Endgeräte
Selbstkonzept digitale Medien	Selbsteinschätzung Selbstkonzept digitale Medien
Stages of Concern	Einordnung in Stufendiagramm
	Begründungen der Einordnung
Rückmeldung zu Laboren	Chancen durch den Einsatz des virtuellen Labors
	Hürden durch den Einsatz des virtuellen Labors
	Positives Feedback zu den Inhalten des virtuellen Labors
	Negatives Feedback zu den Inhalten des virtuellen Labors
	Anpassungswünsche zu den Inhalten des virtuellen Labors
Rückmeldung didaktisches Konzept Gewässeranalytik	Positives Feedback zum didaktischen Konzept
	Negatives Feedback zum didaktischen Konzept
	Anpassungsvorschläge des didaktischen Konzepts
Unterrichtseinheit	Beschreibung klassische Unterrichtseinheit ohne virtuelles Labor
	Beschreibung Unterrichtseinheit mit virtuellem Labor
Voraussetzungen gewinnbringender Einsatz	Vorbereitung
	Nachbereitung
Methodische Entscheidungen	Didaktischer Ort
	Lernziele
	Sequenzierung des virtuellen Labors
	Sozialform
	Ort der Durchführung
	Rolle der Lehrperson

[31] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 85), modifiziert
[32] Kategoriensystem erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 86), modifiziert

Die Audioaufzeichnungen der Interviews wurden zunächst mit Hilfe der Transkriptionssoftware *F4* nach den Regeln für semantisch-inhaltliche Transkriptionen (Dresing & Pehl, 2017) verarbeitet. Die weiteren Auswertungen und Kodierungen erfolgten anhand dieser Transkriptionen. Zur Bestimmung der Güte des Kategoriensystems wurden zunächst etwa 20 % des Datenmaterials für eine Kodierer-Schulung herangezogen. Abweichungen der Kodierungen wurden diskutiert und zu einer Einigung geführt. Dabei wurde das Kodiermanual stetig präzisiert (Neff et al., 2021). Nach kleineren Anpassungen der zugrunde liegenden Ankerbeispiele (Tabelle 22) und Ausschärfungen der Kategorien wurde das Datenmaterial mit der Software *MaxQDA* kodiert. Döring und Bortz (2016) empfehlen, 10 – 20 % des Datenmaterials zur Bestimmung der Interrater-Reliabilität zu berücksichtigen. Da diese Empfehlung nicht unabhängig von Stichprobenumfang und der Häufigkeitsverteilung der Kodierungen betrachtet werden kann, wurden in der vorliegenden Studie 30 % des Datenmaterials doppelt kodiert.

4.2 Studie 2: Auswirkung der Lernmaterialien auf die Lernenden

Methodik Studie 2 – Zielgruppe der Lernenden

- Darstellung des Ablaufs der Lerneinheit im didaktischen Konzept
  - Je eine Doppelstunde für Vorbereitung mit virtuellen Laboren, experimentelle Arbeit im Freiland und Nachbereitung mit virtuellen Laboren

- Methoden der Datenerhebung
  - Fragebogen-Erhebung zu drei Testzeitpunkten (TZP): *Pre*-, *While*-, *Post*-Erhebung (*Flow*-Erleben, aktuelle Motivation, *Cognitive Load*)
  - Fragebogen-Erhebung zu einem Testzeitpunkt: *Usability*, Demographie
  - Erfassung von Log-Daten über das Lernmanagementsystem

- Methoden der Datenauswertung
  - Verteilungsanalysen, Analyse von Item- und Skalenkennwerten
  - Deskriptive Statistik (Maße der zentralen Tendenz, Streuung, Korrelationsanalysen der Konstrukte, Normierung)
  - Inferenzstatistische Prüfung der Messwiederholungen auf signifikante Veränderungen
  - Erstellung von Nutzungsübersichten auf Stichprobenebene
  - Erstellung grafischer Lernpfade auf Personenebene

Im Rahmen der Datenerhebung wurde in der Zielgruppe der Schülerinnen und Schüler einerseits eine Fragebogenstudie durchgeführt, welche ausgewählte Konstrukte im Sinne einer psychometrischen Testung zu drei Testzeitpunkten messwiederholt berücksichtigte. Darüber hinaus wurde die Gebrauchstauglichkeit der entwickelten Lernumgebung gesondert mit einem Fragebogeninstrument erhoben. Weiterhin erfolgte eine Betrachtung der Nutzungsmuster der Lernenden anhand einer Auswertung der durch das Lernmanagementsystem generierten Logfiles.

Ablauf der Lerneinheit

Nach Einführung in das Thema und den organisatorischen Ablauf der Lerneinheit erfolgte die Einteilung der Schüler:innen in thematische Kleingruppen (Sauerstoff, Chlorid, Nitrat, Ammonium, pH-Wert, Leitfähigkeit, Fließgeschwindigkeit), welche später in der praktischen Versuchsdurchführung den entsprechenden Parameter erhoben. Die Erarbeitung in der Vorbereitungsphase erfolgte in Schülerselbsttätigkeit beziehungsweise Partnerarbeit mit Hilfe des virtuellen Labors. Gleiches gilt für die abschließende Nachbereitungsphase. Die Lehrperson stand in diesen Phasen sowohl zur Lösung technischer Probleme wie auch als Ansprechperson bei inhaltlichen Rückfragen zur Verfügung. Während der Vorbereitungsphase wurden die virtuellen Labore bis einschließlich der virtuellen Durchführung des Experiments in Form der Anleitung und des Experimentiervideos bearbeitet. Somit wurden hier Kontextualisierung, eine Aktivierung von Vorwissen, Fachwissensaufbau und die theoretische Durchführung des Versuches behandelt. In der praktischen Arbeitsphase erfolgte die Durchführung der Versuche, nach Möglichkeit im Freiland, bevor in der Nachbereitung die Auswertung der Versuche, der Transfer auf den Anwendungskontext sowie die Ergebnissicherung und Reflexion folgten. Dabei waren die drei Teile der Lerneinheit mit jeweils einer Doppelstunde (90 Minuten) veranschlagt (Abbildung 33). Das voranzustellende virtuelle Labor „Aufbau und Bedienung“ wurde in der Regel bereits als Hausaufgabe von den Schüler:innen eigenständig vorbereitet oder in die erste Doppelstunde integriert.

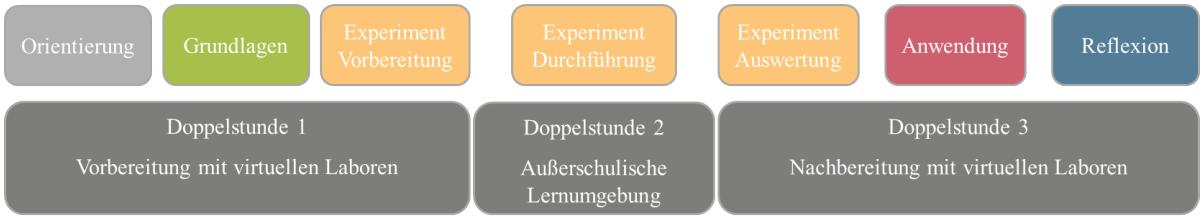


Abbildung 33: Verlauf der Lerneinheit. Dargestellt ist die Zuordnung der Kapitel der virtuellen Labore zu den jeweiligen Doppelstunden der Durchführung (Eigene Darstellung, zuerst veröffentlicht in Neff et al., 2023).

Methoden der Datenerhebung

In Vorbereitung der Datenerhebung wurden bestehende psychometrische Skalen übersetzt und adaptiert. Weiterhin wurde die Erfassung nutzerbezogener Logfiles über das Lernmanagementsystem vorbereitet. Die Vorgehensweisen beider Teilstudien werden im Folgenden dargestellt.

Fragebogen Schülerinnen und Schüler

Die Erhebung der Fragebogendaten unter den Lernenden folgte den bereits im Kapitel zur Befragung der Lehrperson (siehe *4.1 Studie 1: Evaluation des Transfers in der Zielgruppe der Lehrenden*) beschriebenen Grundsätzen, auf welche an dieser Stelle verwiesen sei. Zur Sicherstellung der ebenfalls bereits beschriebenen für den Einsatz von Fragebogeninstrumenten erforderlichen Lese- und Schreibkompetenz wurde die Klassenstufe und damit das erfolgreiche Absolvieren des mittleren Schulabschlusses als Referenz herangezogen, sodass eine entsprechende Kompetenz angenommen werden darf. Hinsichtlich der Anonymität der befragten Schüler:innen wurde neben den datenschutzrechtlichen und forschungsethischen Hinweisen explizit darauf verwiesen, dass keine Rückschlüsse auf Einzelpersonen und damit auch keine Einflüsse auf die Notengebung durch die Befragung ermöglicht werden.

Ablauf der Testungen

Die Schüler:innen schätzten sich zu drei Testzeitpunkten ein: Jeweils eine Befragung fand während der digitalen Vorbereitungsphase, der Durchführung im Freiland sowie der digitalen Nachbereitung statt. Zu allen drei Messzeitpunkten wurden die Konstrukte *Flow* (Rheinberg et al., 2003), aktuelle Motivation (Rheinberg et al., 2001) und *Cognitive Load* (Leppink et al., 2013) mittels Likert-Skalen erhoben. Weiterhin wurden am Ende der Vorbereitungsphase demographische Daten sowie die *System Usability* der Lernumgebung (Brooke, 1996) erfasst.[33]

Der Testzeitpunkt gegen Ende der Vorbereitungsphase wurde zur Erhebung der Usability gewählt, da die Lernenden an dieser Stelle bereits über etwa zwei Schulstunden mit den virtuellen Laboren und deren Bedienung vertraut waren und darüber hinaus vollständigen Zugang zur Lernumgebung während der Bearbeitung des Fragebogens hatten und somit ihre Einschätzungen bei Bedarf anhand der Lernumgebung validieren konnten. Eine Erhebung in der Nachbereitungsphase erschien aufgrund der inhaltlichen Fokussierung auf die Datenauswertung in dieser Phase als zusätzliche kognitive Belastung, welche die Erhebung des *Cognitive Load* hätte verzerren können.

Die Erhebung der Daten in der Vor- und Nachbereitungsphase erfolgte vorwiegend in digitaler Form unter Nutzung des Fragebogentools *LimeSurvey*. Während der Durchführung der Versuche im Freiland wurden die Fragebögen als *Paper-and-Pen*-Version ausgegeben, da die Infrastruktur mangels ausreichender Internetanbindung im Freiland keine Online-Befragung zuließ.

Alle drei Testzeitpunkte wurden frühestens 20 Minuten nach Beginn der jeweiligen Arbeitsphase und ohne Vorankündigung *ad hoc* ausgerufen. Damit wurde das Ziel ver-

[33] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 87), modifiziert

folgt, eine gezielte Disruption in den Arbeitsabläufen zu erzeugen um so einen möglichst realen Messwert für den tatsächlichen *Flow* zu erhalten. Da der Testzeitpunkt zur Erfassung der aktuellen Motivation noch vor Beginn der eigentlichen Tätigkeitsaufnahme aber nach Lesen der Instruktionen liegen sollte, musste hier ein Kompromiss gefunden werden, um die Testökonomie zu wahren und einer Übertestung der Proband:innen durch eine zu hohe Frequenz der Testungen vorzubeugen. Der Zeitraum von 20 Minuten ab Beginn der Bearbeitungsphase wurde durch den Testleiter definiert und bei Bedarf aufgrund gruppendynamischer Effekte (z. B. lange Findungsphase der Lerntandems) oder organisatorischer Belange (klassenorganisatorische Ansprachen der Lehrpersonen aus gegebenen Anlässen) geringfügig variiert, sodass sichergestellt werden konnte, dass zum Testzeitpunkt bereits alle Lernenden die Instruktionen gelesen hatten und zur Bearbeitung der Lernumgebung übergegangen waren. Die zeitlichen Abweichungen lagen hierbei im einstelligen Minutenbereich. Davon abweichend wurde die *Usability* der Lernumgebung in Kombination mit den soziodemographischen Hintergrunddaten (Tiemann & Körbs, 2014) der Proband:innen aus vorbeschriebenen Gründen am Ende der Vorbereitungsphase erhoben. Als Personeninformationen wurden an dieser Stelle neben Alter, Geschlecht, Nutzercode und Zuordnung zum jeweiligen virtuellen Labor auch die letzten Zeugnisnoten in den naturwissenschaftlichen Fächern erfasst.

Adaption der Testinstrumente

Als validierte und publizierte Instrumente kamen die Skalen zur Erfassung des *Flow*-Erlebens (*Flow*-Kurzfragebogen, Rheinberg et al., 2003) sowie zur Erfassung aktueller Motivation (FAM, Rheinberg et al., 2001) unverändert zur Anwendung. Gemäß den Empfehlungen der Autoren des zugehörigen Manuals wurde die siebenstufige, aus insgesamt 18 Items in vier Subfacetten bestehende Skala zur aktuellen Motivation in der Online-Befragung mit einer zufällig vermischten Reihenfolge der Items dargeboten, um insbesondere bei den Messwiederholungen Kreuzungsmustern vorzugreifen. Als Ankerpunkte auf der siebenstufigen Skala dienten die Maximalausprägungen (1 = trifft nicht zu, 7 = trifft zu). Die aus zehn Items bestehende *Flow*-Skala wurde ebenfalls siebenstufig, jedoch mit drei Ankerpunkten (1 = trifft nicht zu, 5 = teils-teils und 7 = trifft zu) eingesetzt. Darüber hinaus wurden drei ergänzende Items als Besorgniskomponente des *Flows* (siebenstufig, Skalierung identisch zur *Flow*-Skala) sowie die in Abbildung 34 ersichtlichen drei Items zur Passung von Fähigkeit und Anforderung genutzt (Rheinberg et al., 2003).

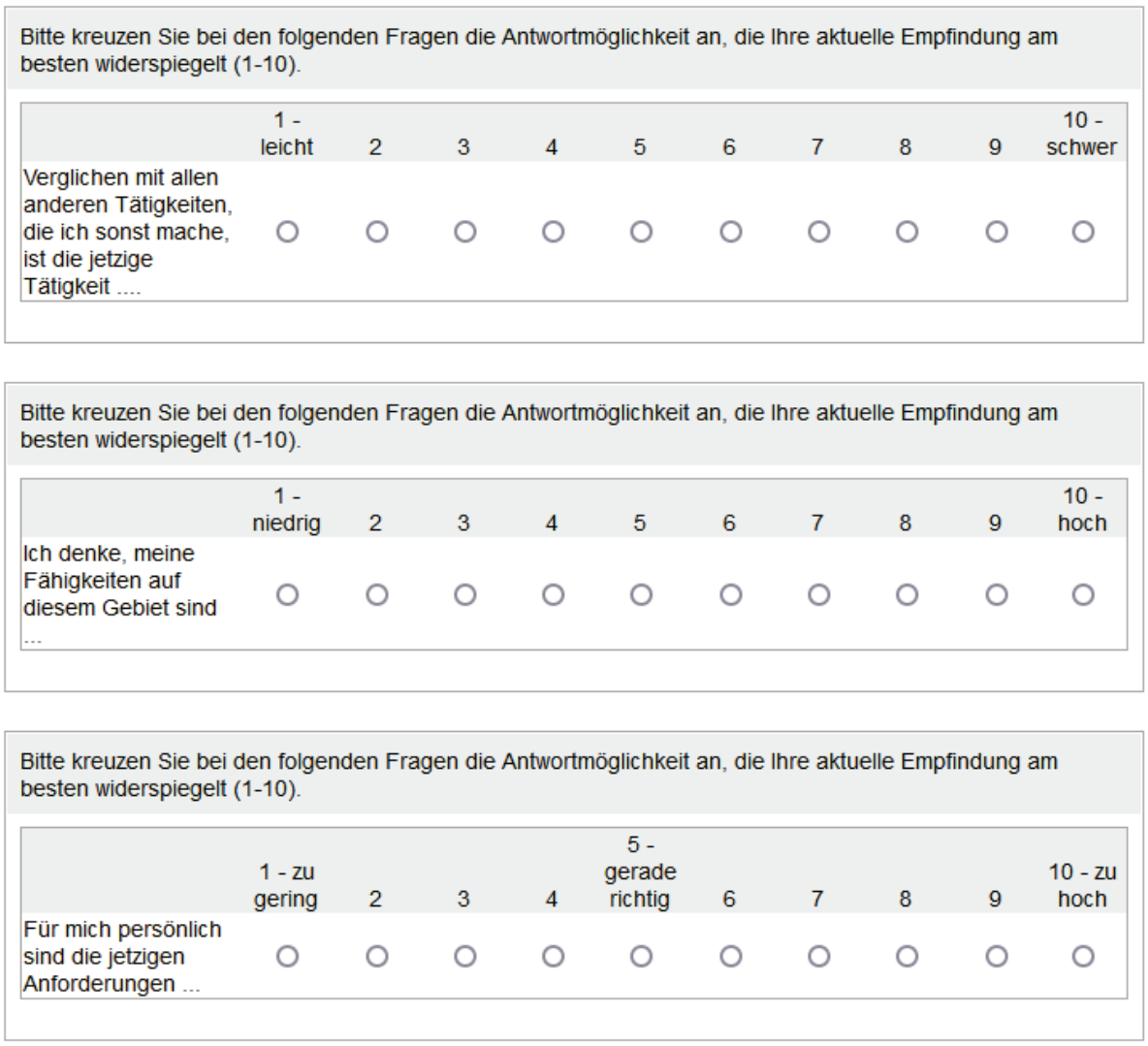


Abbildung 34: Items in Ergänzung zum Flow-Kurzfragebogen zur Erfassung der Passung von Fähigkeit und Anforderung (Rheinberg & Vollmeyer, 2003; Screenshot LimeSurvey, eigene Darstellung).

Die von Leppink et al. (2013) entwickelte, aus zehn Items bestehende Skala zur Erfassung der drei Subfacetten des *Cognitive Load* wurde für die Erhebung zunächst ins Deutsche übersetzt und an die Zieldomäne angepasst. Zur Übersetzung des Testinstruments wurden in Anlehnung an die Leitlinien der ITC insgesamt drei Übersetzungen erstellt (International Test Commission, 2017). Neben dem Autor der vorliegenden Arbeit mit ausgewiesenen Kenntnissen der englischen Sprache (*Master of Education* Anglistik) sowie als mit der Anwendung und dem theoretischen Konstrukt vertrauter Person wurden hierzu zwei unabhängige Übersetzer:innen herangezogen, deren Sprachexpertisen sich aus einem bilingualen und einem professionellen sprachlichen Hintergrund als Übersetzer ergaben. Beide externen Übersetzer:innen waren mit der Vorgehensweise psychometrischer Testungen vertraut und verfügten über eine akademische Vorbildung. Abschließend wurden die vorliegenden Übersetzungen in einem Team aus insgesamt fünf Forschenden im Sinne einer Expertenrunde auf ihre inhaltliche Exaktheit

im Abgleich mit dem Original-Fragebogeninstrument diskutiert und bewertet. In dieser Runde wurden die finalen Itemformulierungen aus allen vorliegenden Übersetzungen vorgenommen. Dabei wurden die Kriterien nach Hambleton und Zenisky (2010) als Orientierung genutzt. Angesichts der Zielgruppe der Befragung stand die Verständlichkeit der Items im Fokus der Übersetzungsbemühungen. In Verbindung mit den bekannten methodischen Limitationen des Vorgehens der Rückübersetzung (z. B. Behr, 2017) wurde auf eine solche *re-translation* (van de Vijver & Hambleton, 1996) bewusst zugunsten einer Konsensfindung innerhalb der Expertenrunde verzichtet. Im Zuge der Übersetzung konnten so auch simultan die Anpassungen an die Zieldomäne vorgenommen werden, welche sich vorrangig darauf beliefen, die in der englischsprachigen Version als „*activity*“ sehr allgemein verfassten Bezüge zum Befragungsgegenstand im Deutschen als „Lernumgebung“ zu präzisieren. In der Selbsteinschätzung verorten sich die Proband:innen auf der elfstufigen Likert-Skala, welche von 0 = „stimmt überhaupt nicht“ bis 10 = „stimmt genau“ reicht.

Zur Übersetzung und Adaption der *System Usability Scale* (Brooke, 1996) wurde das im vorherigen Absatz beschriebene Vorgehen identisch angewandt. Hier wurde der Begriff „*system*“ durch „Lernumgebung“ konkretisiert, um eine möglichst präzise Fragestellung zu erreichen. Ein ähnliches Vorgehen wählten Bangor et al. (2008) indem sie den Begriff des „*system*“ durch „*product*“, also das Softwareprodukt, ersetzten. Die Likert-Skala ist fünfstufig mit den maximalen Ausprägungen 1 = „stimme überhaupt nicht zu“ bis 5 = „stimme vollständig zu“. Ausgehend von den durch Sauro und Lewis (2011) gewonnenen Erkenntnissen wurde darauf verzichtet, die Skala mit vollständig positiver Polarität darzubieten, und stattdessen das Instrument in der ursprünglichen Fassung nach Brooke (1996) mit alternierenden Itempolaritäten eingesetzt, da eine ausreichende Fokussierung und kognitive Fähigkeit zur korrekten Bearbeitung des Fragebogeninstruments in der Probande:innngruppe angenommen wurde und Auswertefehler durch eine weitgehende Automatisierung und Kenntnis der Skala als unwahrscheinlich betrachtet wurden.

Eine Übersicht über alle in der Erhebung unter den Lernenden eingesetzten Skalen und deren Bezugskonstrukte ist Tabelle 13 zu entnehmen. Das vollständige Fragebogeninstrument ist den Anlagen zu entnehmen. Da die Fragebögen zu den Testzeitpunkten Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung inhaltlich vollständig identisch sind, wurde auf die dreifache Darstellung verzichtet, folglich ist lediglich ein Exemplar dieser drei Testzeitpunkte neben dem gesonderten Fragebogen zur Erhebung der Usability dargestellt.

Tabelle 13: Messinstrumente zur Erfassung der jeweiligen theoretischen Konstrukte auf Lernendenseite. Überarbeitungen erfolgten vor Beginn der Datenerhebung.

Konstrukt	Literatur Items	Überarbeitung	Beispielitem
Flow-Erleben	Rheinberg et al., 2003	Keine	Ich bin ganz vertieft in das, was ich gerade mache.
Aktuelle Motivation	Rheinberg et al., 2001	Keine	Ich glaube, der Schwierigkeit dieser Aufgabe gewachsen zu sein.
Cognitive Load	Leppink et al., 2013	Übersetzung aus dem Englischen, Adaption an die Zieldomäne.	Die Lerneinheit enthielt Begriffe und Definitionen, die ich als sehr kompliziert empfunden habe.
Usability	Brooke, 1996	Übersetzung aus dem Englischen, Adaption an die Zieldomäne.	Ich fand die Lernumgebung sehr umständlich zu nutzen.

Log-Daten

Durch computerisierte Systeme automatisch erzeugte Logdaten dienten zunächst primär der technischen Auswertung und Fehlerbehebung. Inzwischen bieten solche automatisiert erstellte Nutzerdaten insbesondere im Bereich Marketing vielfältige Möglichkeiten. Exemplarisch seien hier zielgruppengerechte Werbung im digitalen Raum, adaptive Suchvorschläge in Suchmaschinen oder Kaufvorschläge in Online-Warenhäusern basierend auf dem Kaufverhalten der Nutzenden genannt (z. B. Bensberg, 2001). Dieser Anwendungsbereich hat sich zu einer eigenen Fachdisziplin aufgebaut: Unter den Begriffen „*Data Science*“ und „*Data Mining*“ sind inzwischen entsprechende Angebote im tertiären Bildungssektor verfügbar. Auch im bildungswissenschaftlichen und fachdidaktischen Bereich ist die Nutzung solcher Nutzerdaten nicht neu, wenn auch weitaus weniger verbreitet. Priemer beschrieb bereits 2004 grundlegende Vor- und Nachteile sowie eine Vorgehensweise der Datenauswertung mit Logfiles. Während einige der dort angeführten Nachteile inzwischen durch optimierte technische Möglichkeiten der Datenauswertung abgemildert werden können, bleiben andere Herausforderungen unverändert bestehen. So ist es beispielsweise ohne die Kombination der Logfile-Analysen mit weiteren Methoden nicht möglich, inhaltliche Rückschlüsse zu ziehen oder den Logfiles „zu Grunde liegende kognitive Prozesse“ (Priemer, 2004, S. 5) aufzuklären.

Begleitend zur Bearbeitung der virtuellen Labore durch die Schülerinnen und Schüler erfolgte eine Erfassung der Logdaten. Dabei wurden durch das Lernmanagementsystem OpenOLAT im Hintergrund automatisiert nutzerbezogene Interaktionsdaten aufge-

zeichnet. Diese Daten umfassen sekundengenaue Zeitstempel für die Nutzendeninteraktionen Kursaufruf, Kapitelaufruf und Kursbeendigung. Eine Aufzeichnung erfolgt ab dem Zeitpunkt des Kursaufrufs dauerhaft bis zum Schließen des Kurses durch den Nutzenden. Die persönliche Kennung des Nutzenden wird in diesem Zusammenhang ebenfalls automatisch anonymisiert, sodass eine nutzer- und kursspezifische alphanumerische ID erzeugt wird, welche nicht im Klartext auf den Nutzer oder die Nutzerin rückschließen lässt. Ein Abruf und damit auch eine Auswertung dieser Log-Daten kann durch den Kursadministrator kursbezogen über das Lernmanagementsystem erfolgen. Aufgrund der Anlage der Log-Daten und der Vorgaben zum Persönlichkeitsschutz ist es jedoch nicht möglich, aus den Log-Daten inhaltliche Rückschlüsse zu ziehen. So werden beispielsweise keine Interaktionen mit dem Kursinhalt aufgezeichnet, sondern lediglich Interaktionen mit der Navigation durch die Menüpunkte des Kurses. Folglich ist es nicht möglich, festzustellen, ob und wenn ja wie ein Nutzer im Detail mit den Inhalten interagiert hat. Hierzu wäre eine tiefergreifende Softwarelösung erforderlich, welche etwa die Bewegungen des Mauszeigers oder Texteingaben innerhalb der Lernumgebung aufzeichnet.

Die ursprünglich zur Wartung und Entwicklung des Lernmanagementsystems gedachten Log-Daten, über welche sich beispielsweise auch der Bearbeitungsverlauf durch Administratoren nachvollziehen lässt, wird in der vorliegenden Studie für eine orientierende Bestimmung des Bearbeitungsverlaufs herangezogen.

Methoden der Datenauswertung

Im nachstehenden Kapitel werden sowohl die Auswertung der quantitativen Fragebogendaten der vorliegenden explorativen Studie als auch das Datenmanagement und die Auswertung der Log-Daten zur Betrachtung der Bearbeitungsverläufe der Lernenden näher ausgeführt.

Fragebogen Schülerinnen und Schüler

Zur Auswertung der Fragebogendaten wurde das Statistikprogramm R (2022.12.0, Build 353; D. Bates et al.) mit den in Tabelle 14 aufgeführten *Packages* genutzt. Weiterhin kamen die in Tabelle 14 angeführten *Packages* zur Auswertung der Logfiles zum Einsatz.

Tabelle 14: Übersicht der Packages, welche für die Datenauswertung auf der Seite der Lernenden herangezogen wurden.

Package	Version	Nachweis
dplyr	[R Package *dplyr* version 1.1.0]	Wickham, Francois et al., 2023
psych	[R Package *psych* version 2.2.9]	Revelle, 2022
likert	[R Package *likert* version 1.3.5]	Bryer & Speerschneider, 2023
ggplot	[R Package *ggplot2* version 3.4.1]	Wickham, Chang et al., 2023
writexl	[R Package *writexl* version 1.4.2]	Ooms, 2023
qqplotr	[R Package *qqplotr* version 0.0.69]	Almedeia et al., 2023
rstatix	[R Package *rstatix* version 0.7.2]	Kassambara, 2023b
ggpubr	[R Package *ggpubr* version 0.6.09	Kassambara, 2023a
mice	[R Package *mice* version 3.15.0]	van Buuren & Groothuis-Oudshoorn, 2022
tibble	[R Package *tibble* version 3.1.8]	Müller & Wickham, 2023
ggpattern	[R Package *ggpattern* version 1.0.1]	Mike & Davis, 2022
ggcorrplot	[R Package *ggcorrplot* version 0.1.4]	Kassambara, 2022
ggm	[R Package *ggm* version 2.5]	Marchetti et al., 2022
svglite	[R Package *svglite* version 2.1.1]	Luciani & Decorde, 2012
knitr	[R Package *knitr* version 1.42]	Xie, o. J.; Xie, 2015

Datenmanagement

Ausgehend von der Konzeption und der aus der Literatur bekannten Validierung der *Flow*-Kurzskala wurden die Items dieses Fragebogeninstruments wie folgt aufgegliedert: Items 1 – 10 bilden das *Flow*-Erleben ab, Items 11 – 13 stellen die Besorgniskomponente des *Flows* dar und die zusätzlichen drei Items (Items 14 – 16) erlauben eine Aussage über die Passung von Fähigkeit und Anforderung, welche als Voraussetzung für das Zustandekommen eines *Flow*-Erlebens dient (Rheinberg et al., 2003). Nach Rheinberg et al. (2003) kann die Faktorstruktur des *Flow*-Erlebens sowohl eindimensional mit hoher Reliabilität ($\alpha \approx .90$) als auch unter Berücksichtigung einer zweifaktoriellen Struktur ausgewertet werden (Rheinberg et al., 2019). Die beiden Faktoren interpretieren die Autoren einerseits als glatten, automatisierten Verlauf ($\alpha \approx .92$, 6 Items) und andererseits als Absorbiertheit ($\alpha \approx .80$, 4 Items). Aufgrund der vorliegenden

Kennwerte und der durch die Autoren berichteten faktoriell überlappenden Items wurde im vorliegenden Fall die Betrachtung der einfaktoriellen Struktur der Skala in den weiteren Auswertungen als *Flow*-Gesamtwert (*Flow*-Erleben) vorgenommen. Bei inhaltlicher Betrachtung der beiden Faktoren ergibt sich hier darüber hinaus am ehesten eine erwartbare Aussage für die Tätigkeit der Bearbeitung der Lerneinheit, da sowohl ein glatter Arbeitsablauf als auch ein Aufgehen in der Tätigkeit für die Schülertätigkeit wünschenswert sind. Die drei Bestandteile des Fragebogen-Instruments (*Flow*-Erleben, Besorgniskomponente, Passung) wurden daher jeweils als in sich geschlossene Teilkonstrukte betrachtet und ausgewertet.

Zur Auswertung des Fragebogens zur aktuellen Motivation wurden zunächst die Items 3 („Wahrscheinlich werde ich diese Aufgabe nicht schaffen“) und 14 („Ich glaube, ich schaffe diese Aufgabe nicht“) gemäß Manual umgepolt, um ihre negative Formulierung in Bezug auf die positiv orientierte Ausprägung der Ratingoptionen zu kompensieren (Rheinberg et al., 2001). Anschließend wurden die Items den im Zuge der Entwicklung des Testinstruments durch die Autoren identifizierten Faktoren zugeordnet und deren jeweilige Skalenmittelwerte gebildet. Inhaltlich ergeben sich so die vier Faktoren Herausforderung, Interesse, Erfolgswahrscheinlichkeit und Misserfolgsbefürchtung. Ein Gesamtwert der Skala wird explizit nicht berechnet (Rheinberg et al., 2021). Ausgehend von der theoretischen Konzeption des Konstruktes aktuelle Motivation stellt die Subfacette Interesse einen potenziell motivationsförderlichen Einfluss dar – eine hohe Misserfolgsbefürchtung könnte der Motivation entgegenstehen. Aufgaben mittlerer Schwierigkeit, welche den Probanden in Ungewissheit darüber lassen, ob eine erfolgreiche Bearbeitung gelingt oder nicht, sollten eine mittlere Erfolgswahrscheinlichkeit zeigen und damit gleichzeitig eine hohe Ausprägung der Subfacette Herausforderung mit sich bringen (Rheinberg et al., 2001). Dabei ermittelten die Autoren in der Validierungsphase für das Testinstrument interne Konsistenzen der einzelnen Subfacetten zwischen $\alpha = .66$ und $\alpha = .90$, welche als ausreichend bis gut anzusehen sind.

Leppink et al. (2013) ziehen für die Auswertung des Fragebogens zur Messung des *Cognitive Load* eine statistisch abgesicherte Dreifaktorenstruktur des Testinstrumentes heran, welche sich inhaltlich mit den theoretisch fundierten Subfacetten *Intrinsic*, *Extraneous* und *Germane Cognitive Load* deckt. Dabei weist die aus drei Items bestehende Subskala zur Erfassung des *Intrinsic Load* interne Konsistenzen im Bereich von $\alpha = .86 – .91$ auf, die Komponente *Extraneous Load* (drei Items) zeigt Konsistenzkoeffizienten zwischen $\alpha = .63 – .87$ und die vier Items zum *Germane Load* wurden mit $\alpha = .94 – .97$ angegeben (Leppink et al., 2013). Die in der vorliegenden Arbeit erfolgte Auswertung umfasst daher ebenfalls die Betrachtung der Maße der zentralen Tendenz innerhalb der jeweiligen Subfacetten des *Cognitive Load*.

Fünf der zehn Items der *System Usability Scale* werden im Zuge der Reskalierung des Wertebereichs während der Auswertung gemäß Manual umgepolt (Brooke, 1996). In

der Folge liegen anschließend alle Items mit den Rating-Ausprägungen 0 bis 4 vor. Diese werden wiederum über die gesamte Skala aufsummiert und mit dem Faktor 2,5 multipliziert, um eine auf den Wertebereich 0-100 normierte Gesamtbeurteilung der *Usability* zu erhalten (Brooke, 1996). Bangor et al. (2008) konnten die einfaktorielle Struktur der *System Usability Scale* bestätigen und darüber hinaus eine interne Konsistenz des Testinstruments von $\alpha = .91$ ermitteln. In der Interpretation der zum besseren intuitiven Verständnis so gewählten Skalierung ist zu berücksichtigen, dass es sich hierbei dennoch nicht um prozentuale Werte handelt. Eine Bewertung der *Usability* sieht Werte größer 70 als passabel an, als exzellent wäre ein Softwareprodukt mit einem *Usability*-Wert größer 85 zu bezeichnen, wohingegen Werte kleiner als 70 Anlass zur weiteren Optimierung der Bedienumgebung geben und Werte in der unteren Hälfte der Skala als inakzeptabel zu interpretieren sind (Bangor et al., 2008; Karapanos et al., 2018). Durch die hohe Reliabilität des Testinstruments selbst bei einer sehr kleinen Stichprobengröße von 12 – 14 Proband:innen (Tullis & Stetson, 2004) konnten außerdem bereits frühzeitig in der laufenden Datenerhebung erste formative Assessments der *Usability* erfolgen, um so eine grundlegende Unzulänglichkeit der Gebrauchstauglichkeit der Lernumgebung auszuschließen, welche auch andere Variablen hätte verzerren können.

Umgang mit fehlenden Daten

Die Analysen der fehlenden Daten erfolgten auf Ebene der Gesamtstichprobe. Angesichts des erwarteten zufälligen und damit breit gestreuten Vorkommens fehlender Daten in den Umfragen über alle drei Testzeitpunkte erfolgte eine Zerlegung in Teilstichproben für die einzelnen Konstrukte. Für die deskriptiven Auswertungen erfolgte ein paarweiser Ausschluss der Proband:innen mit fehlenden Werten nach der Zuordnung der Daten zu den einzelnen Konstrukten. Es wurde somit für jedes (Teil-)Konstrukt über alle Testzeitpunkte hinweg eine separate Stichprobe betrachtet. Varianzanalytische Berechnungen wurden ebenfalls nach Ausschluss fehlender Werte über alle drei Testzeitpunkte für jedes Konstrukt vorgenommen. In der Folge können somit identische Stichproben über die Testzeitpunkte deskriptiv und varianzanalytisch nachvollzogen und die zugehörigen Itemkennwerte in Relation gesetzt werden. Der Zusammenhangsanalyse liegt eine vollständig reduzierte Stichprobe zugrunde. Hierzu erfolgte ein zeilenweiser Ausschluss von Versuchspersonen mit fehlenden Werten über alle erfassten Konstrukte und Testzeitpunkte hinweg. Das Vorgehen entspricht somit der von Little und Rubin (1987) beschriebenen *available-case-analysis*.

Itemanalyse

Auch in dieser Teilstudie wurden die Itemkennwerte (korrigierte Trennschärfen, Itemschwierigkeit, interne Konsistenz) der psychometrischen Testinstrumente ermittelt. Das Vorgehen hierzu wurde bereits in Kapitel 4.1 (Fragebogen Lehrpersonen) ausführlich beschrieben und wird daher an dieser Stelle nicht erneut ausgeführt. Zur Berechnung der Kennwerte wurden durch paarweisen Ausschluss fehlender Werte konstruktabhängig variierende Stichprobengrößen gezogen. Die Itemanalyse wurde primär für den Testzeitpunkt der Vorbereitung durchgeführt, sofern mehrere Testzeitpunkte für das gleiche Konstrukt gegeben waren. So können Lerneffekte der Proband:innen ebenso wie auch deren Übertestung als Einflussfaktor auf die Kennwerte der Skalen ausgeschlossen werden. Itemkennwerte der weiteren Testzeitpunkte wurden tabelliert. Eine ausführlichere Beschreibung erfolgt nur sofern sich deutliche Abweichungen zum ersten Testzeitpunkt ergaben.

Deskriptive Auswertungen

Die Berichtlegung erfolgt anhand deskriptiver Kenndaten, insbesondere der Maße der Dispersion und der Maße der zentralen Tendenz. Sofern Normierungen der Testinstrumente vorliegen (zutreffend für FAM und *Flow*-Kurzskala), werden zunächst die Voraussetzungen für Mittelwertsvergleiche durch Einstichproben-t-Tests geprüft. Sind die Daten mindestens intervallskaliert (Eid et al., 2017) und ist deren Normalverteilung auf Grundlage des Stichprobenumfangs gemäß zentralem Grenzwertsatz anzunehmen (Döring & Bortz, 2016), können Einstichproben-t-Tests angewandt werden (Field et al., 2013). Auf Basis neuerer Erkenntnisse, wonach eine Robustheit des t-Tests im Falle der Verletzung der Normalverteilungsannahme bei großen Stichproben ($n > 30$ nach Pagano, 2013) gegeben ist, erfolgt keine ausführliche Prüfung der Verteilung vor der Durchführung der t-Tests (Pagano, 2013; Rasch & Guiard, 2004; Wilcox, 2013). Kennwerte der Verteilungen auf Itemebene sind der Verteilungsanalyse zu entnehmen, Kenndaten auf Stichprobenebene liefern die Prüfungen der Voraussetzungen für die varianzanalytischen Verfahren. Entsprechend erfolgt ein Abgleich der vorgefundenen Lagemaße mit den Normierungen durch Einstichproben-t-Tests (Eid et al., 2017). Als Effektstärkemaß wird im Falle gegebener Signifikanz *Cohens d* berichtet (Cohen, 1988). Die Abstufung der Effekte folgt der klassischen Zuordnung: Effektstärken $0.2 < d < 0.5$ werden als kleine Effekte, $0.5 < d < 0.8$ als mittlere Effekte und Effekte mit $d > 0.8$ als große/starke Effekte beschrieben (Cohen, 1962, 1988, 2013; Eid et al., 2017; Lenhard & Lenhard, 2016). Die zu vergleichenden Normierungsstudien wurden anhand der Passung zu Stichprobe und inhaltlicher Ausrichtung der vorliegenden Studie ausgewählt.

Entsprechend erfolgte die Normierung der Ergebnisse des Fragebogens zur aktuellen Motivation anhand der Stichprobe „Biology-Lab“ ($n = 321$), deren Ziel nach Rheinberg et al. (2021) in der Veränderung eines komplexen Systems durch Dateneingabe und

Outputanalyse lag und welche mit Studierenden sowie Schüler:innen der Sekundarstufe II mit einem durchschnittlichen Alter von 19 Jahren erhoben wurde. Ebenso wird die Erhebung zum „induktiven Denken“ (n = 85) herangezogen, welche unter Schüler:innen des Gymnasiums mit einem Altersschnitt von 17 Jahren durchgeführt wurde und deren Ziel in der Erschließung von Systematiken lag. Beide Stichproben weisen eine annähernd ausgewogene Geschlechterverteilung (m / w) auf (Rheinberg et al., 2021).

Die Ergebnisse der Flow-Kurzskala wurden anhand der mit 123 Studierenden durchgeführten Normierungsstudie „Statistik-Aufgabe“ (vgl. Engeser et al., 2005) sowie gegen ein Computerspiel (n = 18 Studierende; Rheinberg & Vollmeyer, 2003) und zwei messwiederholte Erhebungen während Statistik-Vorlesungen (n = 63; vgl. Engeser et al., 2005; Engeser & Rheinberg, 2008) abgeglichen.

Weiterhin wurden Zusammenhangsanalysen für alle betrachteten Konstrukte durchgeführt. Hierzu wurden signifikante Korrelationen sowie deren Korrelationskoeffizient nach Pearson zwischen den einzelnen erhobenen Subskalen berechnet (Field et al., 2013).

Inferenzstatistische Auswertungen

Zur weiteren Analyse der Daten erfolgte eine einfaktorielle Varianzanalyse für messwiederholte gepaarte Daten. Als Testvoraussetzungen wurden dabei drei Bedingungen geprüft: 1) Die Daten enthalten keine Extremwerte, 2) die Daten sind normalverteilt oder deren Annäherung an eine Normalverteilung ist anzunehmen, 3) die Daten weisen eine sphärische Struktur auf (Eid et al., 2017; Field et al., 2013). In allen Fällen wurde der kritische Unterschied mit $\alpha = .95$ definiert.

Sofern Extremwerte in den Daten festgestellt wurden, welche nicht auf einen Eingabefehler zurückzuführen waren, wurden diese Fälle zeilenweise gelöscht. Als Ausreißer wurden hierbei anhand der Quartile und Interquartilsabstände (IQA) gemäß der Definition nach Tukey (1977) Werte betrachtet, welche um mehr als $Q_1 - 1{,}5 \cdot IQA$ nach unten beziehungsweise um mehr als $Q_3 + 1{,}5 \cdot IQA$ nach oben abweichen. Bei einer Abweichung der Werte um mehr als $Q_1 - 3 \cdot IQA$ nach unten beziehungsweise um mehr als $Q_3 + 3 \cdot IQA$ nach oben wurden die entsprechenden Werte als Extremwerte identifiziert (Eid et al., 2017; Tukey, 1977).

Aufgrund der Stichprobengröße von n > 30 und der Robustheit der ANOVA gegenüber einer Verletzung der Normalverteilungsvoraussetzung (z. B. Blanca et al., 2017; Schmider et al., 2010) fand der zentrale Grenzwertsatz Anwendung in der Überprüfung der Testvoraussetzungen (Döring & Bortz, 2016; Eid et al., 2017). Diese Annahme einer Normalverteilung der Variablen in der Stichprobe wurde darüber hinaus grafisch anhand von QQ-Plots plausibilisiert (Eckstein, 2016). Da eine vollständige *Compound Symmetry* im Falle des F-Tests der einfaktoriellen messwiederholten Varianzanalyse

nicht erforderlich ist, wurde als dritte Testvoraussetzung die Sphärizität der Daten geprüft (Eid et al., 2017; Huynh & Feldt, 1976). Sofern die Abweichung von der Bedingung der Sphärizität ($\varepsilon = 1$) den Grenzwert von $\varepsilon > .75$ nicht unterschritt, erfolgte eine Korrektur der Freiheitsgrade nach Huynh und Feldt (1976). Für stärkere Abweichungen mit $\varepsilon < .75$ wurde die konservativere Greenhouse-Geisser-Korrektur vorgenommen (Eid et al., 2017; Field et al., 2013; Geisser & Greenhouse, 1958; Girden, 2003; Huynh & Feldt, 1976).

Sofern alle erforderlichen Testvoraussetzungen gegeben waren, erfolgte die Varianzanalyse mittels ANOVA, gegebenenfalls unter Einberechnung der angeführten Korrekturen. Die ermittelte Effektstärke wurde jeweils als generalisiertes Eta-Quadrat (η_G^2) berechnet (Bakeman, 2005; Levine & Hullett, 2002; Olejnik & Algina, 2003). Zur Interpretation der vorgefundenen Effektstärken wurden die Richtwerte nach Bakeman (2005) für den Bereich der Verhaltensforschung herangezogen, wonach $\eta_G^2 > .02$ als kleiner Effekt, $\eta_G^2 > .13$ als mittlerer und $\eta_G^2 > .26$ als großer Effekt bezeichnet wird. Im Falle nicht signifikanter Ergebnisse entfällt die Berichterstattung von Effektstärkemaßen.

Sofern die globale Prüfung auf Mittelwertsunterschiede signifikante Ergebnisse lieferte, erfolgte der paarweise Vergleich durch gepaarte t-Tests im Sinne einer *post-hoc*-Prozedur (Field et al., 2013). Bonferroni-Korrekturen zur Vermeidung einer α-Fehler-Kumulation wurden dabei implementiert (Eid et al., 2017; Field et al., 2013). Als Maß für die Effektstärke wird im Zuge der *post-hoc*-Tests *Cohens d* berechnet (Eid et al., 2017). Die Interpretation des Effektstärkemaßes orientiert sich an den Richtwerten nach Cohen (1962, 1988). Effektstärken $0.2 < d < 0.5$ werden als kleine Effekte, $0.5 < d < 0.8$ als mittlere Effekte und Effekte mit $d > 0.8$ als große/starke Effekte beschrieben (Cohen, 1962, 1988, 2013; Eid et al., 2017; Lenhard & Lenhard, 2016).

Nutzungsmuster-Analyse

Bereits frühere Ansätze zur Nutzung von Logdaten digitaler Lernumgebungen nahmen das Navigationsverhalten der Nutzenden in den Blick (z. B. Horney, 1993). Indem man Elemente in der Lernumgebung als Knoten und die Links zwischen diesen als Kanten definiert hat, konnten Auswertungen auf Basis der Graphentheorie vorgenommen und Muster identifiziert werden (Canter et al., 1985). Aufbauend auf diese Vorarbeiten wurden im Zuge der Auswertung Ansätze zur Analyse von Nutzungsmustern der Lernenden innerhalb der digitalen Lernumgebungen eingesetzt.

Die durch das Lernmanagementsystem bereitgestellten Log-Daten können im Microsoft Excel Format abgerufen werden. Dabei sind die Rohdaten lediglich chronologisch sortiert. Abbildung 35 zeigt einen kleinen Ausschnitt aus den so gewonnenen Rohdaten. Für das weiterführende Datenmanagement wurden die Rohdaten in das Statistik-

programm R (2022.12.0, Build 353, D. Bates et al.) eingelesen und unter Nutzung der in Tabelle 15 angeführten *Packages* weiterverarbeitet.

creationDate	userName	actionCrudType	actionVerb	actionObject	parentResName	targetResName
02.10.2019 16:52:38	3895225961e3f641050ca877516cd470	r	launch	course		OML - Schule - Gewässeran
03.10.2019 16:52:38	726c30e442953f9a54b7ab331a1c3b6b	r	launch	course		OML - Schule - Gewässeran
04.10.2019 16:52:38	726c30e442953f9a54b7ab331a1c3b6b	r	launch	node	OML - Schule - Gewässeranalytik: Sauerstoffsättigung	Kursübersicht
05.10.2019 16:52:38	726c30e442953f9a54b7ab331a1c3b6b	r	launch	node	OML - Schule - Gewässeranalytik: Sauerstoffsättigung	2.1 Löslichkeit von Gasen
06.10.2019 16:52:38	726c30e442953f9a54b7ab331a1c3b6b	r	launch	node	OML - Schule - Gewässeranalytik: Sauerstoffsättigung	2.2Eintrag/Verbrauch O2
07.10.2019 16:52:38	726c30e442953f9a54b7ab331a1c3b6b	r	launch	node	OML - Schule - Gewässeranalytik: Sauerstoffsättigung	2.3 Gehalt/Sättigung
08.10.2019 16:52:38	726c30e442953f9a54b7ab331a1c3b6b	r	launch	node	OML - Schule - Gewässeranalytik: Sauerstoffsättigung	2.4 O2 Tagesverlauf
09.10.2019 16:52:38	726c30e442953f9a54b7ab331a1c3b6b	r	launch	node	OML - Schule - Gewässeranalytik: Sauerstoffsättigung	3. Experiment
10.10.2019 16:52:38	726c30e442953f9a54b7ab331a1c3b6b	r	launch	node	OML - Schule - Gewässeranalytik: Sauerstoffsättigung	2.5 Aufgabe
11.10.2019 16:52:38	726c30e442953f9a54b7ab331a1c3b6b	r	launch	node	OML - Schule - Gewässeranalytik: Sauerstoffsättigung	2.6 Theorie-Check
12.10.2019 16:52:38	726c30e442953f9a54b7ab331a1c3b6b	r	launch	node	OML - Schule - Gewässeranalytik: Sauerstoffsättigung	5. Reflexion
13.10.2019 16:52:38	726c30e442953f9a54b7ab331a1c3b6b	e	exit	course	OML - Schule - Gewässeranalytik: Sauerstoffsättigung	2.6 Theorie-Check
14.10.2019 16:52:38	3c34e3d017771cbe487fc311e7e6981e	r	launch	course		OML - Schule - Gewässeran
15.10.2019 16:52:38	3c34e3d017771cbe487fc311e7e6981e	r	launch	node	OML - Schule - Gewässeranalytik: Sauerstoffsättigung	Kursübersicht
16.10.2019 16:52:38	3c34e3d017771cbe487fc311e7e6981e	e	exit	course		OML - Schule - Gewässeran
17.10.2019 16:52:38	3c34e3d017771cbe487fc311e7e6981e	r	launch	course		OML - Schule - Gewässeran
18.10.2019 16:52:38	3c34e3d017771cbe487fc311e7e6981e	r	launch	node	OML - Schule - Gewässeranalytik: Sauerstoffsättigung	Kursübersicht
19.10.2019 16:52:38	3c34e3d017771cbe487fc311e7e6981e	e	exit	course		OML - Schule - Gewässeran
20.10.2019 16:52:38	3895225961e3f641050ca877516cd470	r	launch	node	OML - Schule - Gewässeranalytik: Sauerstoffsättigung	Kursübersicht
21.10.2019 16:52:38	3895225961e3f641050ca877516cd470	r	launch	course		OML - Schule - Gewässeran
22.10.2019 16:52:38	3895225961e3f641050ca877516cd470	r	launch	node	OML - Schule - Gewässeranalytik: Sauerstoffsättigung	Kursübersicht
23.10.2019 16:52:38	3c34e3d017771cbe487fc311e7e6981e	r	launch	course		OML - Schule - Gewässeran

Abbildung 35: Einblick in die durch das Lernmanagementsystem bereitgestellten Log-Daten am Beispiel des virtuellen Labors zur Sauerstoffsättigung. Während die Teilkapitel im Klartext auszumachen sind, können die alphanumerischen Nutzerkennungen nicht rückverfolgt werden (Screenshot, eigene Darstellung).

Tabelle 15: Übersicht der Packages, welche für die Auswertung der Logfiles herangezogen wurden.

Package	Version	Nachweis
readxl	[R Package *readxl* version 1.4.1]	Wickham & Bryan, 2023
lubridate	[R Package *lubridate* version 1.9.2]	Grolemund & Wickham, 2011
svglite	[R Package *svglite* version 2.1.1]	Luciani & Decorde, 2012
knitr	[R Package *knitr* version 1.42]	Xie, o. J.; Xie, 2015

Die komplexen Logfiles wurden zunächst bereinigt, gefiltert und transformiert (vgl. F. H. Wang). Nach Definition einiger Arbeitsparameter (Einleseparameter, Ausgabeordner etc.) wurden die für die darzustellenden Bearbeitungspfade irrelevanten Teilkapitel aus der Betrachtung ausgeschlossen. Dies betrifft die Unterkapitel Impressum, Kontakt, Kursübersicht und Infos, welche allesamt nur organisatorische Inhalte aufweisen, aber keine inhaltliche Aussagekraft hinsichtlich der Bearbeitung haben. Weiterhin wurden die Auswertungs-Parameter definiert. Hier galt es, Kapitelaufrufe, welche einen gewissen Zeithorizont über- oder unterschreiten, sowie die Arbeitsphasen („*Sessions*“, Zeit zwischen erstem Kursaufruf und Schließen des Kurses) zu definieren. Dabei wurden die Kapitel-Parameter anhand der Inhalte der Teilkapitel unter Berücksichtigung des kürzesten sinnvollen Aufrufes, etwa um sich einen Überblick zu verschaffen, und des

längsten sinnhaften Aufrufes, sprich der maximal erwarteten Bearbeitungszeit für das längste Teilkapitel, manuell definiert. Ebenso wurden im gleichen Zuge die Session-Parameter definiert. Als Grundlage hierfür diente einerseits das Maximum als maximaler Zeitansatz der Arbeitsphase (90 Minuten) zuzüglich eines möglichen Überziehens, welches vor allem durch ausbleibenden Logout der Nutzenden entsteht. Als Minimum der Session-Dauer wurde datengesteuert ein Wert im Minutenbereich angenommen. Besonders kurze Sessions wären beispielsweise dann gegeben, wenn ein versehentlicher Logout während der Bearbeitung erfolgte. Die exakten Werte dieser Parameter, welche für die Auswertung angelegt wurden, sind Tabelle 16 zu entnehmen.

Tabelle 16: Kapitel- und Session-Parameter mit entsprechenden Referenzen. Teilweise wurden die Werte datengesteuert ermittelt bzw. verifiziert.

Variable	Wert	Bedeutung	Referenzwert
KapitelcutoffA	5 sec	Mindestaufrufdauer eines Teilkapitels. Kürzere Aufrufe werden nicht als aktive Bearbeitung betrachtet und damit zeilenweise ausgeschlossen.	Geringste geschätzte reine Lesedauer für das kürzeste Teilkapitel (Schätzwert: 30 Sekunden, Kapitel 2.5 „Aufgabe“).
KapitelcutoffB	25 min	Maximale Aufrufdauer eines Kapitels. Längere Aufrufe werden nicht als aktive Bearbeitung betrachtet und damit zeilenweise ausgeschlossen.	Längste geschätzte Bearbeitungsdauer für ein Teilkapitel (Schätzwert: 10 Minuten, Kapitel 2.4 „O_2-Tagesverlauf“)
Sessioncutoff	5 min	Mindestdauer einer Session. Kürzere Sessions werden in der Auswertung nicht berücksichtigt.	Bearbeitungsdauer gemäß Unterrichtsverlaufsplan: 65 Minuten.
Sessionmax	90 min	Maximaldauer einer Session. Länger andauernde Sessions wurden künstlich auf die Maximaldauer eingekürzt, indem das zuletzt aufgerufene Kapitel verkürzt wurde.	Maximal mögliche Bearbeitungsdauer: eine Doppelstunde á 90 Minuten zuzüglich Puffer für ggf. Pause und Überziehung, abzüglich Einführungsdauer und Organisation.
Session-Abstand	60 min	Minimaler Abstand zwischen zwei Logins. Sofern ein zusätzlicher Login erfolgte, wird die gesamte Bearbeitung nicht berücksichtigt	Übliche Arbeitsdauer im Freiland (Experimentierphase), abzüglich Puffer für Nicht-Ausloggen.
Sessionzahl	2	Anzahl an identifizierten Sessions pro Nutzer. Über diesen Parameter kann datengesteuert ermittelt werden, ob zusätzliche Sessions vorliegen, welche ggf. manuell berücksichtigt werden sollten (z. B. durch Angleich der übrigen Session-Parameter)	Üblicherweise liegen gemäß dem didaktischen Konzept 2 Sessions vor: Vor- und Nachbereitungsphase.

Diese spezielle Form der Auswertung zur Ableitung von Lernpfaden aus Log-Daten von Nutzenden stellt im Bereich der empirischen Bildungsforschung bislang kein etabliertes Vorgehen dar. Aus diesem Grund wird das Vorgehen hier ausführlich dargestellt.

Um die Auswertung vorzubereiten, werden die Rohdaten entsprechend manipuliert. Dabei werden folgende Schritte durchlaufen:

- Sortieren der Daten nach Nutzerkennungen und nach Start-Zeitpunkt
- Alphanumerische Nutzerkennung durch eine fortlaufende Zahl ersetzen
- Zusammenführen der „action"-Variablen zu einer einzigen aussagekräftigen Variablen mit den Werten „launch course", „launch node" und „exit course"
- Überführen der Kapitelbezeichnungen in eine Faktorvariable
- Sessionnummern für jeden Nutzer anhand des ersten Aufrufes des Kurses sowie mit Hilfe des Session-Abstandes definieren
- Aus Zeitpunkt nachfolgender Nutzeraktivität Ende und Dauer der vorherigen Aktivität berechnen
- Daten um nicht mehr erforderliche Variablen bereinigen
- Session-max anwenden
- Ggf. letzten Kapitelaufruf, welcher das Session-max überschreitet, finden und auf Session-max einkürzen (z. B. nicht-erfolgter Logout)
- So gekürzte Kapitel durch eine logische Variable markieren, um diese nachverfolgen zu können
- Kapitel-cutoffA und Kapitel-cutoffB anwenden
- Ausschluss nicht berücksichtigter Teilkapitel (z. B. Impressum)
- Session-cutoff anwenden
- Session-Nummern berechnen
- Session-Zahl anwenden
- Daten bereinigen
- Timeline Variablen aus Differenz der gegebenen Zeitpunkte erstellen
- Deskriptive Daten auswerten auf
    - Session-Ebene
    - User-Ebene
    - Kapitel-Ebene
    - Stichproben-Ebene
    - Kalender-Ebene

- Klickpfade auswerten auf
    - User-Ebene
    - Kapitel-Ebene
- Grafische Auswertungen

5 Ergebnisse

Angelehnt an das methodische Vorgehen gliedert sich die Ergebnisdarstellung in die Erhebung unter Lehrenden und die Erhebung auf Lernendenseite. Auf der Seite der Lehrpersonen werden quantitative und qualitative Ergebnisse berichtet. Diese Ergebnisse nehmen Bezug auf die ersten beiden Forschungsfragen; folglich stehen Barrieren des Transfers und didaktische Konzepte zur Überwindung dieser Hürden im Fokus der Ergebnisbetrachtung. Aufseiten der Lernenden werden deskriptive und inferenzstatistische Auswertungen der Fragebogendaten sowie Auswertungen der Logfile-Analysen mit Ansätzen der Mustererkennung vorgestellt. Hiermit fokussiert die Berichtlegung auf die dritte Forschungsfrage und somit auf die Genese lernförderlicher kognitiv-affektiver Zustände bei den Lernenden.

5.1 Erhebung unter Lehrenden

Ergebnisse Studie 1 – Erhebung unter Lehrenden

Stichprobe Fragebogenerhebung:

- 76 Lehrpersonen, Alter: 26 – 58 Jahre. Geschlechterverteilung: weiblich = 34, männlich = 26, divers = 0
- überwiegend an Gymnasien tätig

Stages of Concern:

- Zufriedenstellende Kennwerte der Itemanalysen
- Hohe Diversität der Personenprofile
- Wenige Innovationsgegner-Profile
- Neu aufgedecktes Personen-Profil: „Nicht-Nutzer mit Ideen" – etliche Befragte zeigen bereits in der Frühphase der Implementation Ideen zur Optimierung der Innovation.
- Gruppenprofil stellt sich als Nicht-Nutzer mit Ideen dar.
- Mäßige Interrater-Reliabilität für die Objektivierung der Zuordnung der Personenprofile zu Literaturprofilen, aber: hoch inferentes Verfahren mit großer Anzahl an Kategorien

Einstellung:

- Akzeptable Itemkennwerte
- Mittlere bis hohe deskriptive Ausprägungen der Einstellung gegenüber digitalen Medien

Selbstkonzept:

- Akzeptable bis gute Itemkennwerte
- Tendenziell hohe Ausprägungen des Selbstkonzeptes im Umgang mit digitalen Medien

Wertzuschreibung:

- Fragwürdige Itemkennwerte
- Mittlere bis hohe Ausprägungen der Wertzuschreibung an digitale Endgeräte

Stichprobe leitfadengestützte Interviews:

- 12 Lehrpersonen
- Berufserfahrung 1 – 22 Jahre
- 7 verschiedene Schulen
- Alter 30 – 55 Jahre
- Anteil weiblich: ca. 58 %

Qualitative Inhaltsanalyse:

- Kategoriensystem mit folgenden Oberkategorien:
  - Vorteile digitale Medien
  - Verwendung digitaler Medien
  - Nachteile digitaler Medien
  - Hürden
  - Chancen
- Validierung der Fragebogendaten durch Selbstauskunft über alle Konstrukte
- Beurteilung des didaktischen Konzeptes
- Raum für Anregungen und Optimierungsvorschläge

Nachfolgend werden zunächst die deskriptiven Ergebnisse der Fragebogenerhebung einschließlich zugehöriger Stichprobenbeschreibung und Itemanalysen berichtet. Im weiteren Verlauf dieses Teilkapitels erfolgt die Auswertung der qualitativen Interviewdaten, welche unter inhaltsanalytischen Aspekten untersucht wurden.

Ergebnisse der Fragebogenerhebung

Stichprobe Fragebogenerhebung

Insgesamt nahmen 76 Lehrpersonen (weiblich = 34, männlich = 26, divers = 0) im Alter von 26 bis 58 Jahren (*M* = 40.9, *Mdn.* = 40, *SD* = 9.64) an der Online-Umfrage teil. Die Lehrpersonen wiesen eine Berufserfahrung zwischen 0 und 35 Jahren (*M* = 11.7, *Mdn.* = 10, *SD* = 8.87) auf. Somit nahmen sowohl jüngst in den Vorbereitungsdienst gestartete als auch sehr erfahrene Lehrende an der Studie teil.

38 der befragten Lehrpersonen unterrichten das Fach Biologie, 33 das Fach Chemie, elf Befragte unterrichten Physik und drei Teilnehmende lehren im Fach Technik. Der überwiegende Teil der Befragten (n = 46) ist an Gymnasien tätig.[34]

Die Stichprobenziehung erfolgte aus Gründen der Ökonomie und der inhaltlichen Relevanz für die Lehrenden als nicht-randomisierte Gelegenheits-Stichprobe.

Stages of Concern

Auf Itemebene der Skalen des *Stages of Concern Questionnaire* konnten keine Kreuzungsmuster identifiziert werden. Ebenso zeigt sich ein diffuses Bild fehlender Daten. Der absolute Anteil beantworteter Items lag zwischen 25 und 64, wobei lediglich fünf Items mehr als 25 Missings aufweisen (siehe Abbildung 36). Es fällt auf, dass zwei dieser fünf Items der Subskala „Persönliches“ zuzuordnen sind (Items SoC_P_1: „Ich wüsste gern, zu welchen Veränderungen es für meine Berufsrolle führt.“ Und SoC_P_2: „Ich wüsste gerne, wer dabei die Entscheidungen trifft.“). Trotz dieser Problematik wurden alle Items dieser Subskala beibehalten, da ausgehend von der Konzeption des Gesamtkonstruktes insbesondere in dieser frühen Phase der Implementation persönlichen Aspekten der Betroffenen eine bedeutende Rolle zukommen kann. Darüber hinaus greift an dieser Stelle der Umgang mit fehlenden Daten gemäß Manual (George et al., 2013).

Bei näherer Betrachtung der Antwortverteilungen über alle Items hinweg ist zu bemerken, dass überwiegend hohe bis sehr hohe Ratings vorgenommen wurden (siehe Abbildung 37). Lediglich drei Items weisen überwiegend negative Ratingoptionen auf. Hierbei ist allerdings anzumerken, dass dies nicht mit einer zustimmenden Haltung respektive einem wünschenswerten Ergebnis in Zusammenhang zu setzen ist, da an dieser Stelle die Zustimmung zu Teilaspekten der kognitiv-affektiven Beschäftigung der Lehrenden mit der Innovation erhoben wurde.

[34] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 85), modifiziert

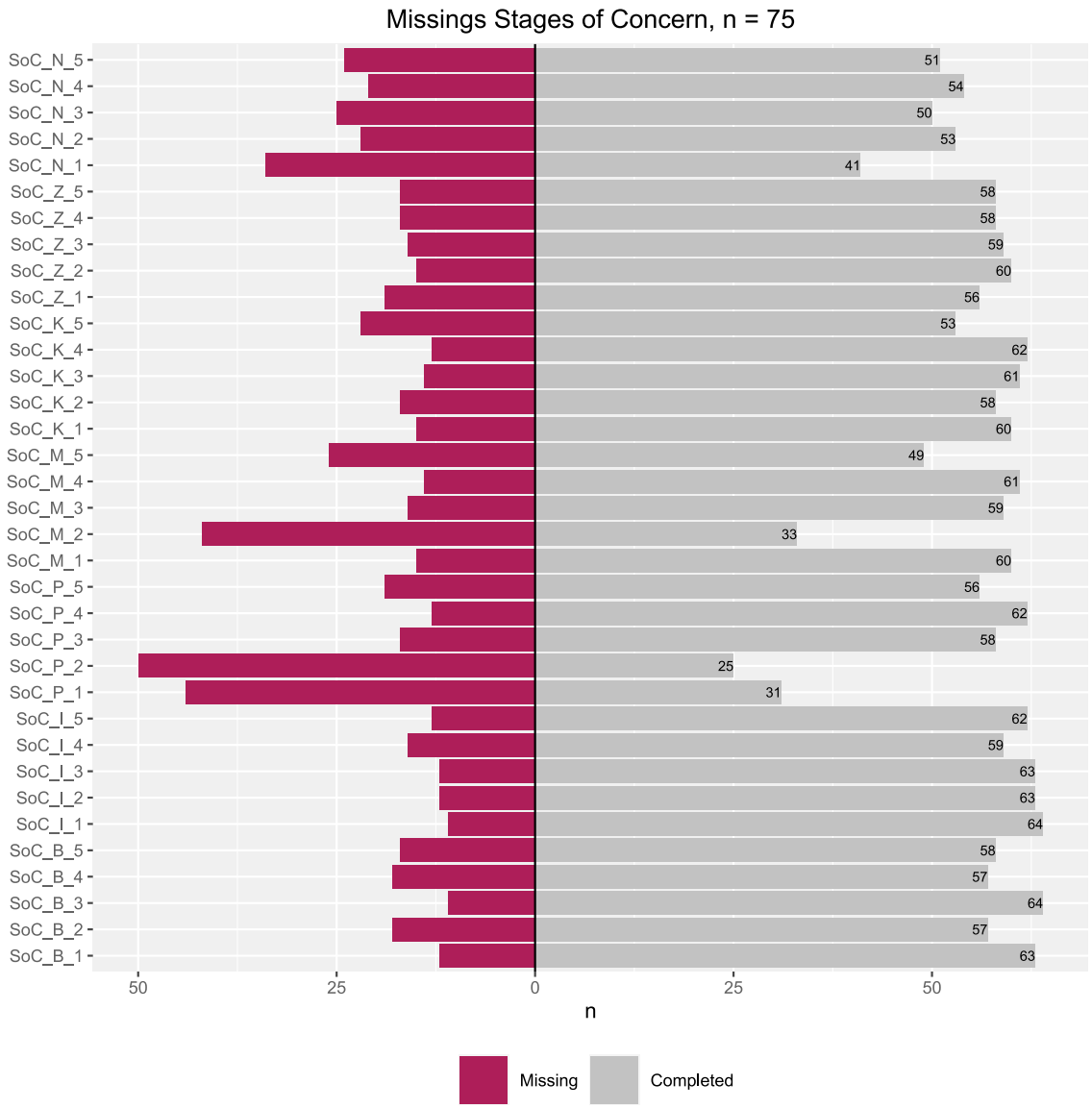


Abbildung 36: Absolute Werte der Antworthäufigkeit auf Itemebene zu den Stages of Concern vor Imputation der Skalenmittelwerte. Lediglich einzelne Items weisen sehr hohe Missingraten auf.

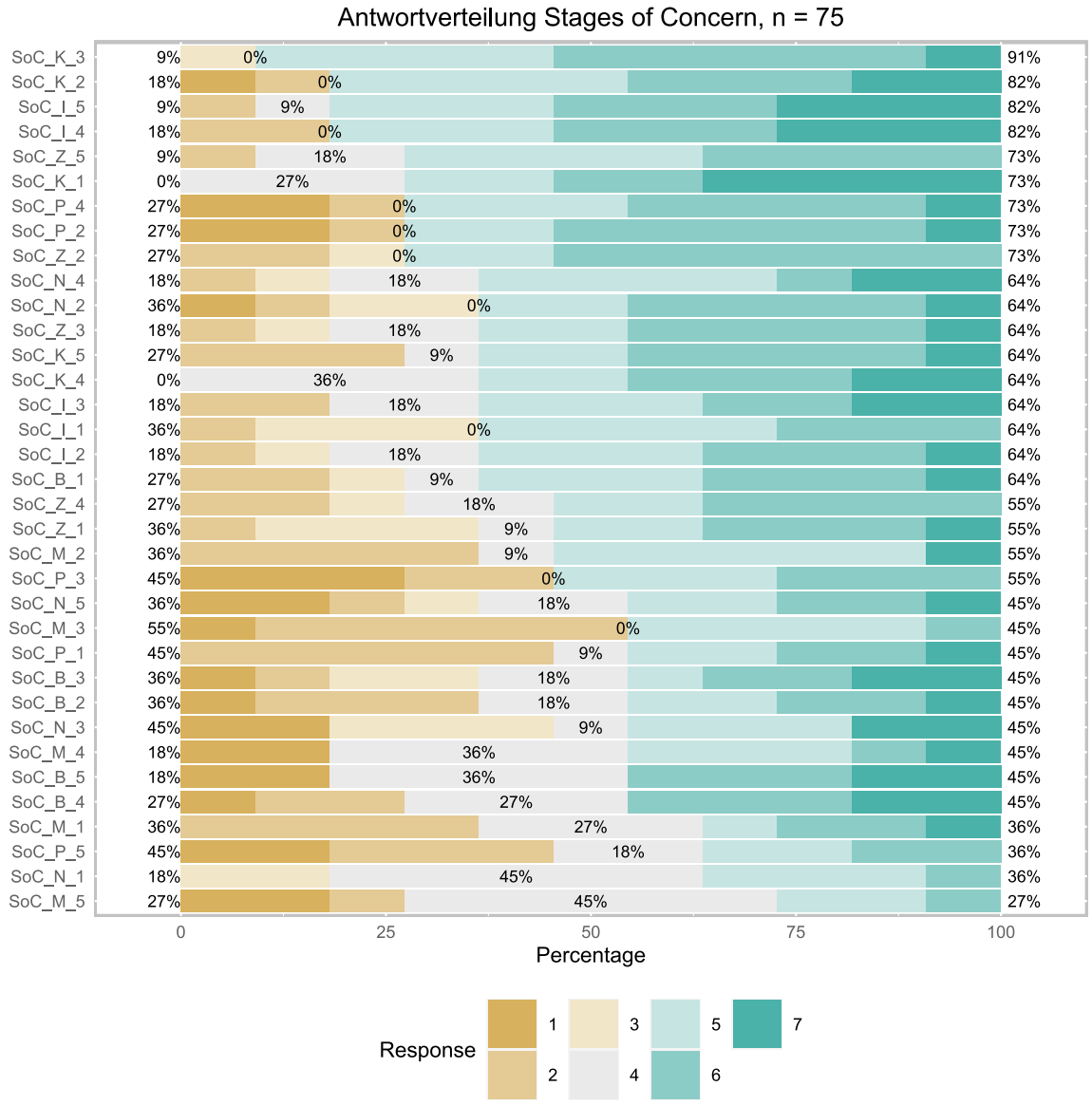


Abbildung 37: Verteilung der Antworthäufigkeiten über alle Items des SoC-Fragebogens. Gelb-braune Skalenbereiche zeigen eine eher negative Antwort an (Ratingoptionen 1 "trifft zurzeit gar nicht auf mich zu" bis 3), graue Skalenbereiche zeigen eine neutrale Antwort (Ratingoption 4), grüne Skalenbereiche verweisen auf eine zustimmende Antwort (Ratingoptionen 5 bis 7 „tritt zurzeit völlig auf mich zu"). Insgesamt zeigt sich eine zustimmende Haltung, die jedoch der Interpretation anhand des Manuals bedarf.

Die Rohdaten zu *Stages of Concern* weisen keine extreme Schiefe oder Kurtosis der Verteilungen auf. Nichtparametrische Kolmogorov-Smirnov-Tests, deren Nullhypothese als Übereinstimmung der jeweiligen Verteilung auf Itemebene mit einer Normalverteilung definiert wurde, zeigen jedoch bei $p < .05$ ausreichende Hinweise zur Ablehnung der Nullhypothese. Somit ist anzunehmen, dass die Rohdaten nicht normalverteilt sind. Fehlende Übereinstimmung mit einer Normalverteilung wurde ebenfalls grafisch durch QQ-Plots verifiziert.

Ausgehend von den Rohdaten wurden für alle weiteren deskriptiven Analysen gemäß Manual durch Mittelwertsimputation vollständige Datensätze herangezogen (George et al., 2013). Trotz Imputation blieben 19 Fälle unvollständig, da diese Versuchspersonen ganze Subskalen nicht bearbeitet hatten. Durch Bereinigung um diese Fälle liegt der Dropout für das Konstrukt der *Stages of Concern* bei 25,33 %. Es bleibt somit eine effektive Stichprobengröße von n = 56 für das Konstrukt der *Stages of Concern* bestehen. Nach erfolgter Bereinigung der fehlenden Daten nähert sich die Verteilung einer Normalverteilung an (siehe Abbildung 38).

Die Subskalen weisen in der Itemanalyse gute korrigierte Trennschärfen im Bereich von .47 – .91 auf. Lediglich ein Item (Item SoC_B_1 „Ich beschäftige mich gerade mit anderen Neuerungen für den Unterricht.“) weist mit einem Wert von .16 eine Trennschärfe im kritischen Bereich ($r_{it} < .30$) auf. Aufgrund der inhaltlichen Relevanz und der hohen Augenscheinvalidität des Items wurde dieses dennoch nicht aus den weiteren Analysen ausgeschlossen. Mit Werten von 35.32 – 78.12 zeigen die Items nach Dahl Schwierigkeitsindizes im guten Bereich ($20 < p_{Dahl} < 80$). Auch in der grafischen Darstellung konnten keine Boden- oder Deckeneffekte aufgedeckt werden. Darüber hinaus weisen alle Subskalen hohe interne Konsistenzen ($\alpha = .68 – .91$) auf.

Auf Subskalenebene zeigen sich in der deskriptiven Auswertung durchgängig Mittelwerte in der oberen Hälfte der Skala mit akzeptablen Standardabweichungen (Tabelle 17). Die Range der Antwortoptionen weist eine relativ breite Streuung auf. Schiefe und Wölbung zeigen keine Auffälligkeiten (Tabelle 17).

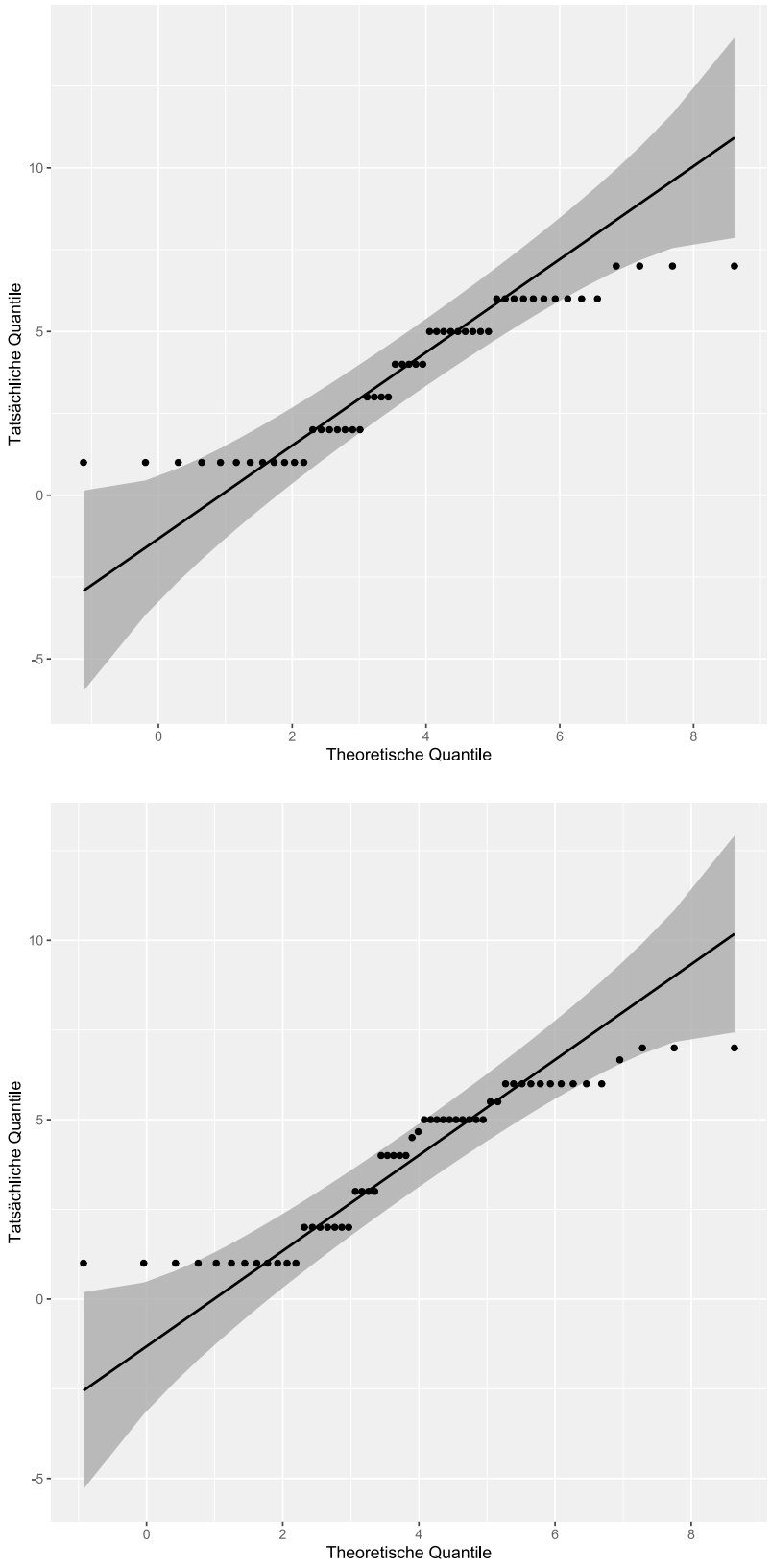


Abbildung 38: QQ-Plot der Verteilung zu Item SoC_N_5: " Ich möchte herausfinden, wie das Konzept ergänzt, weiterentwickelt oder ersetzt werden kann. " Der Plot dient exemplarisch zur Darstellung der Auswirkung der Imputation auf die Verteilungsform. Oben im Bild die Verteilung vor der Imputation, unten nach der Imputation.

Tabelle 17: Deskriptive Kennwerte (n = 56) der Skala zu Stages of Concern. Die Subskalen bilden inhaltlich folgende Teilaspekte der Concerns ab: SoC_B = Bewusstsein, SoC_I = Information, SoC_P = Persönliches, SoC_M = Management, SoC_K = Konsequenz, SoC_Z = Zusammenarbeit, SoC_N = Neuausrichtung.

Subskala	M	SD	Mdn.	Min	Max	Range	Schiefe	Kurtosis
SoC_B	4.43	1.23	4.50	2.20	7.00	4.80	0.04	-0.72
SoC_I	5.12	1.24	5.45	1.40	7.00	5.60	-0.87	0.38
SoC_P	4.50	1.68	4.90	1.00	7.00	6.00	-0.44	-0.80
SoC_M	3.73	1.49	3.71	1.20	7.00	5.80	0.26	-0.86
SoC_K	5.01	1.26	5.20	1.75	7.00	5.25	-0.38	-0.32
SoC_Z	4.88	1.30	4.90	2.20	7.00	4.80	-0.33	-0.91
SoC_N	3.90	1.50	3.90	1.00	6.67	5.67	-0.18	-1.00

In der weiteren Auswertung gemäß Manual (George et al., 2013) wurden die Summenscores der einzelnen Subskalen in Perzentilwerte umgewandelt und grafisch dargestellt. Abbildung 39 zeigt eine überlagerte Darstellung der Personenprofile. Wenngleich diese Darstellung nicht zur Interpretation auf Personenebene geeignet ist, lassen sich durch die Überlagerung Bereiche erhöhter Dichte über die *Stages of Concern* hinweg erkennen.

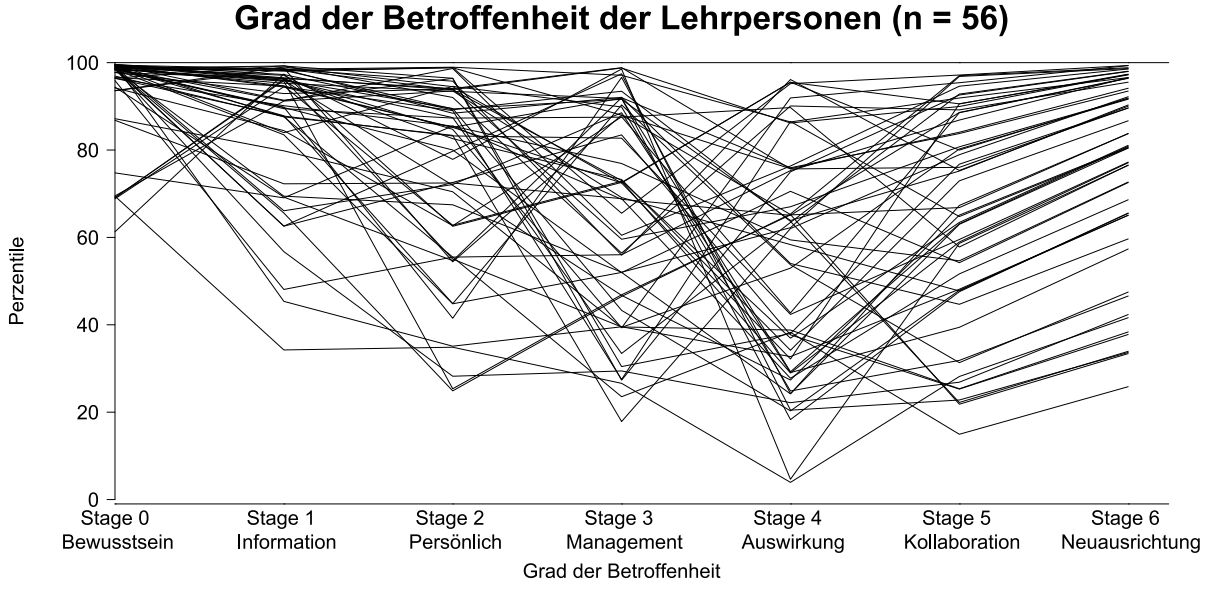


Abbildung 39: Linienplot aller Personenprofile der Stages of Concern. Deutlich erkennbar ist eine durchweg hohe Ausprägung im Bereich der Stages 0 und 1, wohingegen sich die Ausprägungen der höheren Concerns-Stufen deutlich diverser darstellen.

In der Einzelbetrachtung der Personenprofile wird das deskriptiv bereits berichtete sehr diverse Antwortverhalten der Proband:innen erneut offensichtlich (Abbildung 41). Ein

qualitativer Abgleich mit aus der Literatur bekannten Profilen (Bitan-Friedlander et al., 2004; George et al., 2013; Pant et al., 2008) lässt auf zwei Profile des Typs „Negative One-Two Split with Tailing Up at Stage 6“ (George et al., 2013, S. 40) der Lehrpersonen 15 und 16 sowie auf fünf Profile des Typs „Unconcerned Innovation User“ (George et al., 2013, S. 49) der Lehrpersonen 11, 28, 27, 33 und 52 schließen. Lehrperson 55 weist am ehesten ein Profil des Typs „High Refocusing Concerns“ (George et al., 2013, S. 46) auf. Weiterhin konnte eine Lehrperson (Lehrperson 45) einem One-Two-Split Profil zugeordnet werden. Hohe Ausprägungen der Management Concerns weisen die Lehrpersonen 39 und 48 auf. Auffällig ist eine insgesamt hohe Ausprägung auf allen Stages of Concern bei einigen Lehrenden (z. B. Lehrpersonen 17 & 23). Weiterhin fördert die Auswertung hohe Ausprägungen der Management-Concerns bei ebenfalls erhöhter Ausprägung der sechsten Stufe einzelner Lehrpersonen zu Tage (z. B. Lehrpersonen 19 & 44); daraus lässt sich auf einen Ideenreichtum der Proband:innen schließen.

In Summe acht Lehrpersonen konnten am ehesten mit einem Kooperierer-Profil (Bitan-Friedlander et al., 2004) in Einklang gebracht werden. Solche Proband:innen werden aufgrund des Personenprofils als besonders kooperationsbereit identifiziert. Dem gegenüber stehen lediglich zwei als Innovationsgegner (Lehrpersonen 49 & 53) ermittelte Profile, bei denen eine Fokussierung auf potenziell problematische Aspekte der Innovation naheliegt. Die größte Häufigkeit weist ein am klassischen Profil eines Nicht-Nutzers orientiertes Personenprofil auf (Lehrpersonen 3, 9, 13, 14, 21, 24, 29, 37, 38, 47, 54). Die Personenprofile dieser elf Proband:innen weichen jedoch insofern von der bekannten Ausprägung nach George et al. (2013) ab, als diese ebenfalls eine relative erhöhte Ausprägung der Neuausrichtungs-Stufe (Stage 6) vorweisen. In Anlehnung an die übrigen literaturbasierten Profile lassen sich diese Proband:innen daher am ehesten als Nicht-Nutzer mit Ideen charakterisieren (Abbildung 40).

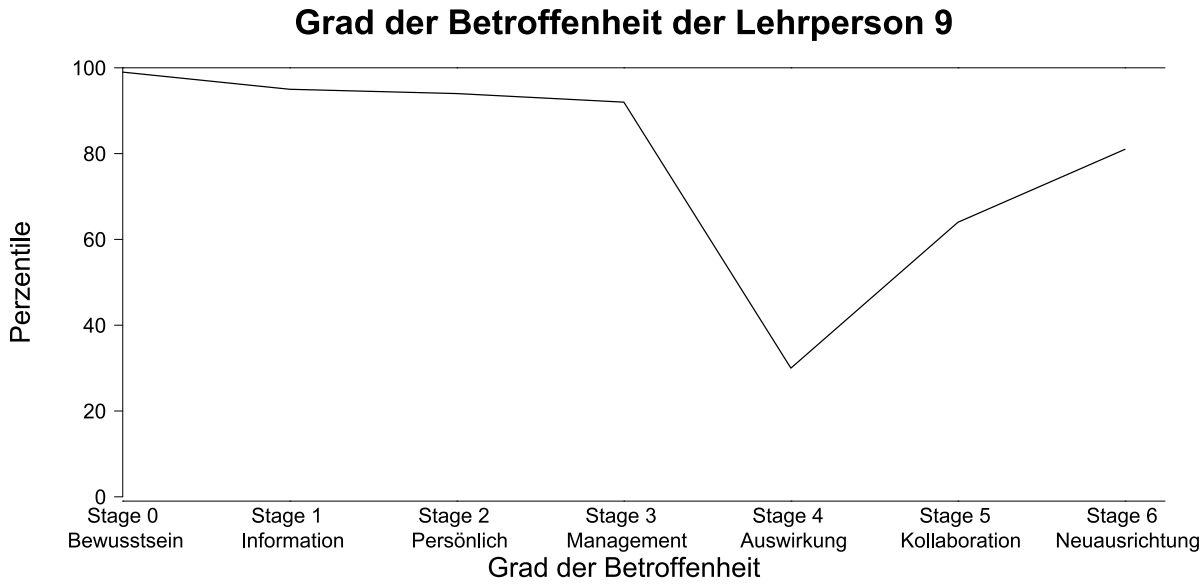


Abbildung 40: Personenprofil einer der als "Nicht-Nutzer mit Ideen" identifizierten Lehrpersonen. Neben der für Nicht-Nutzer typischen hohen Ausprägungen der ersten Stages zeigte sich der massive Abfall des Kurvenverlaufs in Stage 4 – Auswirkung mit anschließendem steilem Anstieg der Stages 5 – Kollaboration und 6 – Neuausrichtung als charakteristisch für diese Proband:innen.

Insgesamt zeigen sich somit erwartbare Konstellationen der Profile; 17 Profile konnten keinem bekannten Typ zugeordnet werden. Die Interrater-Reliabilität für die Zuordnung der Personenprofile zu den zwanzig identifizierten Profilen in Anlehnung an die einschlägige Literatur lieferte mit Cohen's $\kappa = .48$ [95%-CI(.33 – .63)] (Cohen, 1960) eine mittelmäßige Übereinstimmung. Die zufallskorrigierte Übereinstimmung der beiden Kodierer nach Brennan und Prediger (1981) lag bei $\kappa_{\text{Brennan-Prediger}}$ [95%-CI(.371 – .662)] = .516. Abbildung 41 zeigt die aufgedeckten Personenprofile im Überblick zur Identifikation erster Verläufe. Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Profile ist den digitalen Anlagen zu dieser Arbeit zu entnehmen.

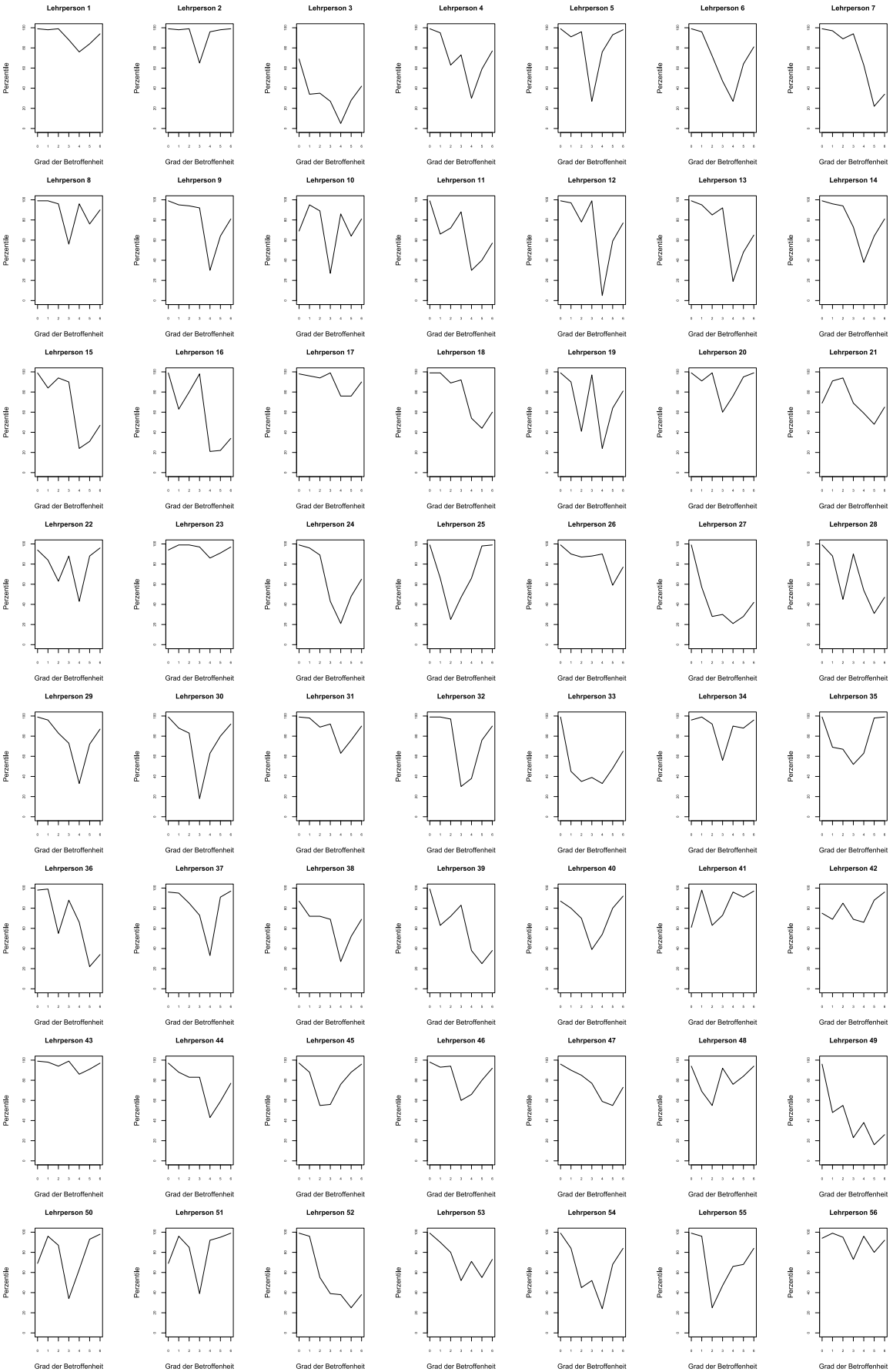


Abbildung 41: Personenprofile der Stages of Concern im Überblick.

Die Auswertung des Grades der Betroffenheit zeigt im Mittel über alle Lehrpersonen hinweg ein „*Nonuser*“-Gruppenprofil, welches sich mit empirischen Ergebnissen zu Anfangsstadien von Implementationsprozessen nach George et al. (2013) deckt (Abbildung 42.[35]

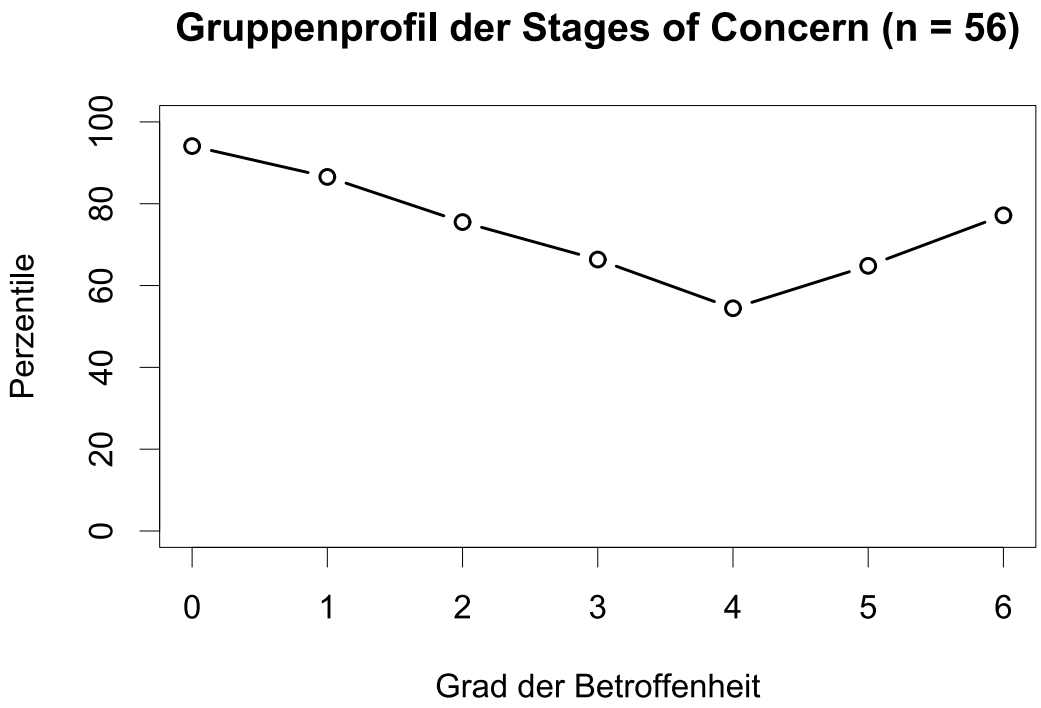


Abbildung 42: Identifiziertes Gruppenprofil der Stages of Concern. Dieses kann als Profil eines Nichtnutzers mit Ideen charakterisiert werden.

Das Profil eines „*Nonusers*“ (George et al., 2013, S. 38) weist innerhalb der ersten Stufen hohe Werte auf und flacht mit geringer Steigung ab. Die Grafik lässt sich wie folgt interpretieren: Eine Person mit diesem Profil hat sich bisher noch nicht mit den virtuellen Laboren auseinandergesetzt und zeigt das Bedürfnis, weitere Informationen zu erhalten. Die betreffende Person hat zu diesem Zeitpunkt nur wenige Vorbehalte hinsichtlich der persönlichen Auswirkungen oder der Konsequenzen für die Schüler:innen sowie der Organisation des konkreten Einsatzes virtueller Labore im Unterricht. Außerdem zeigt sie weniger Interesse, sich mit Kolleg:innen über die Arbeit mit virtuellen Laboren auszutauschen oder zu kooperieren und weist noch nicht das Bedürfnis auf, die virtuellen Labore anzupassen.[36]

[35] Aussage erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 87), modifiziert
[36] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 89), modifiziert

Einstellung gegenüber digitalen Medien

Die Daten zur Einstellung der Lehrpersonen gegenüber digitalen Medien weisen keine erkennbaren Kreuzungsmuster auf. Da die Skala lediglich sechs Items umfasst, wurden vollständige Datensätze zur Auswertung herangezogen. Hierzu wurden zunächst zehn Lehrpersonen ausgeschlossen, davon waren neun als Totalverweigerer zu identifizieren. Der Dropout für dieses Konstrukt liegt somit bei 13,4 % (Abbildung 43).

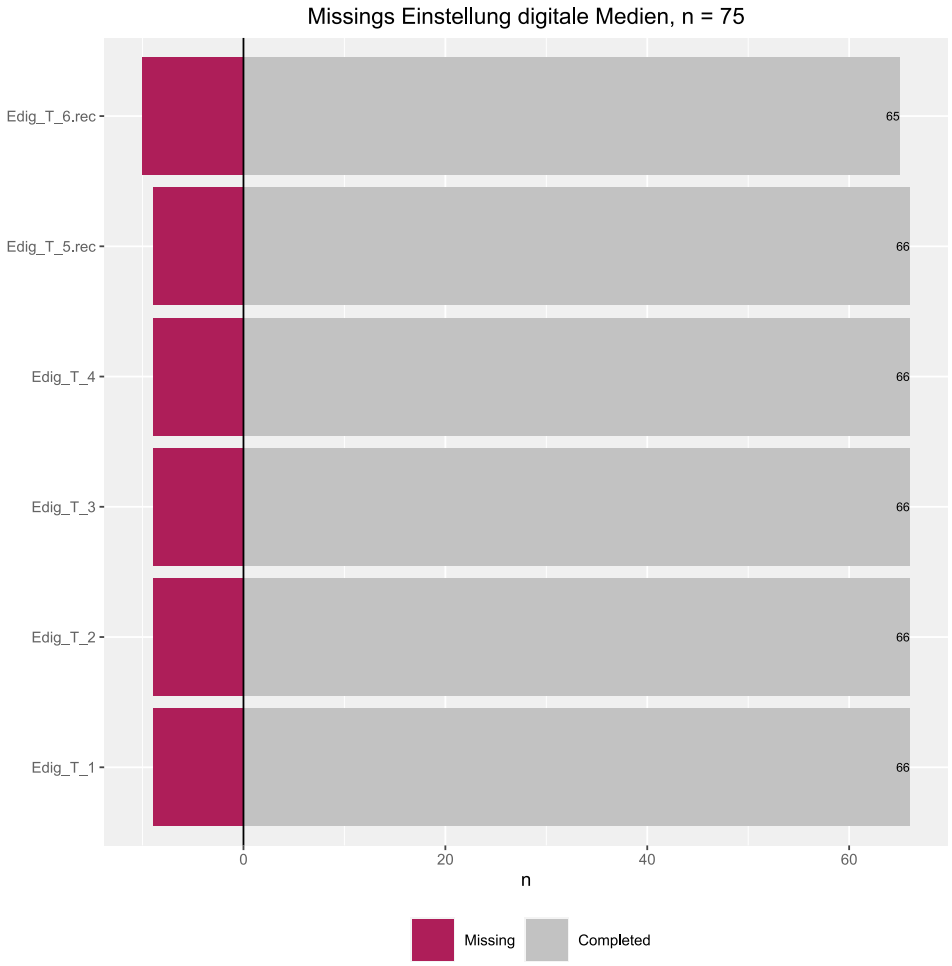


Abbildung 43: Fehlende Werte zur Skala Einstellung gegenüber digitalen Medien. Diese kamen in erster Linie durch Totalverweigerer zustande.

Die Ratings der Proband:innen hinsichtlich der Skala zur Einstellung gegenüber digitalen Medien stellen sich sowohl anhand durchgeführter Kolmogorov-Smirnov-Tests als auch in der grafischen Auswertung als QQ-Plots nicht normalverteilt dar. Die Verteilung weist im reduzierten Datensatz mit Schiefen von -0.54 bis 0.08 und Wölbungen von -0.93 bis 0.11 auf Itemebene keine Besonderheiten auf (Tabelle 18). Alle Items weisen nach paarweisem Ausschluss fehlender Werte in der Stichprobe von 65 Lehrenden zufriedenstellende korrigierte Trennschärfen im Wertebereich von .36 – .72 auf.

Ebenso konnte mit α = .71 eine akzeptable interne Konsistenz der Skala ermittelt werden. Schwierigkeitsindizes nach Dahl im Wertebereich von 40.38 bis 71.15 weisen darauf hin, dass die Items weder Boden- noch Deckeneffekte zeigen, was sich in der Boxplot-Darstellung auch grafisch verifizieren lässt (vgl. Abbildung 44).

Tabelle 18: Deskriptive Kenndaten der Skala zur Erfassung der Einstellung gegenüber digitalen Medien auf Itemebene.

Item	M	SD	Mdn.	Min	Max	Range	Schiefe	Kurtosis
Edigt_T_1	3.86	0.89	4.00	1.00	5.00	4.00	-0.50	0.11
Edig_T_2	3.12	0.89	3.00	1.00	5.00	4.00	0.03	-0.08
Edig_T_3	3.53	0.75	4.00	2.00	5.00	3.00	-0.10	-0.38
Edig_T_4	2.64	1.12	3.00	1.00	5.00	4.00	0.08	-0.79
Edig _T_5.rec	3.64	1.02	4.00	1.00	5.00	4.00	-0.54	-0.24
Edig _T_6.rec	3.28	1.18	3.00	1.00	5.00	4.00	-0.03	-0.93

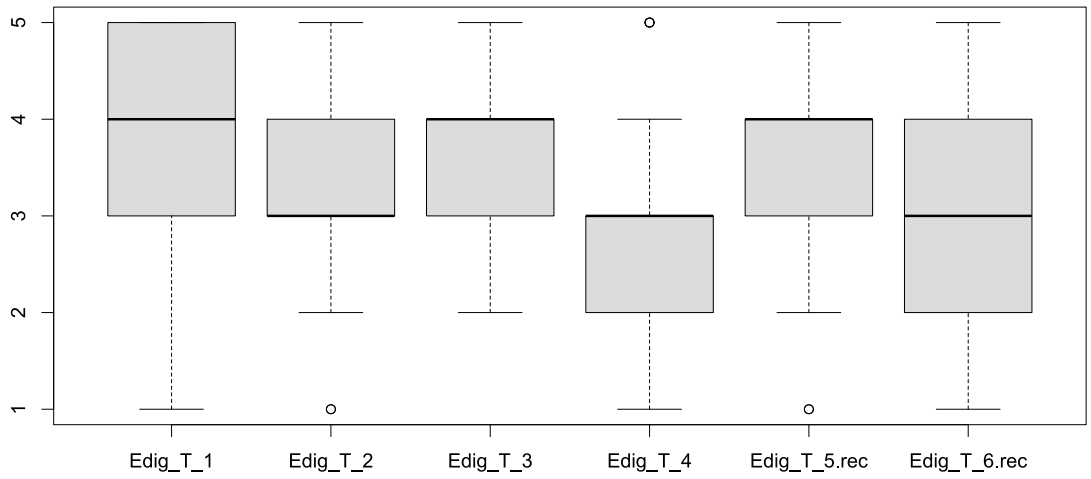


Abbildung 44: Boxplot-Darstellung der Items der Skala zur Einstellung gegenüber digitalen Medien. Es zeigt sich ein eher positives Antwortverhalten der Proband:innen. Boden- oder Deckeneffekte sind nicht feststellbar.

Deskriptiv liegt der Mittelwert der Lehrenden auf der fünfstufigen Skala bei 3.35 (*SD* = 0.63, *Mdn*. = 3.25) und damit in der oberen Hälfte der Ratingskala, was auf eine eher positive Einstellung der Versuchspersonen gegenüber digitalen Medien verweist (vgl. Abbildung 45). Eine Normierung zu diesem Instrument als Vergleichsgröße ist bislang nicht bekannt. Im Heatplot wird eine verstärkte Aggregation auf den Ratingoptionen drei und vier ersichtlich (Abbildung 46).

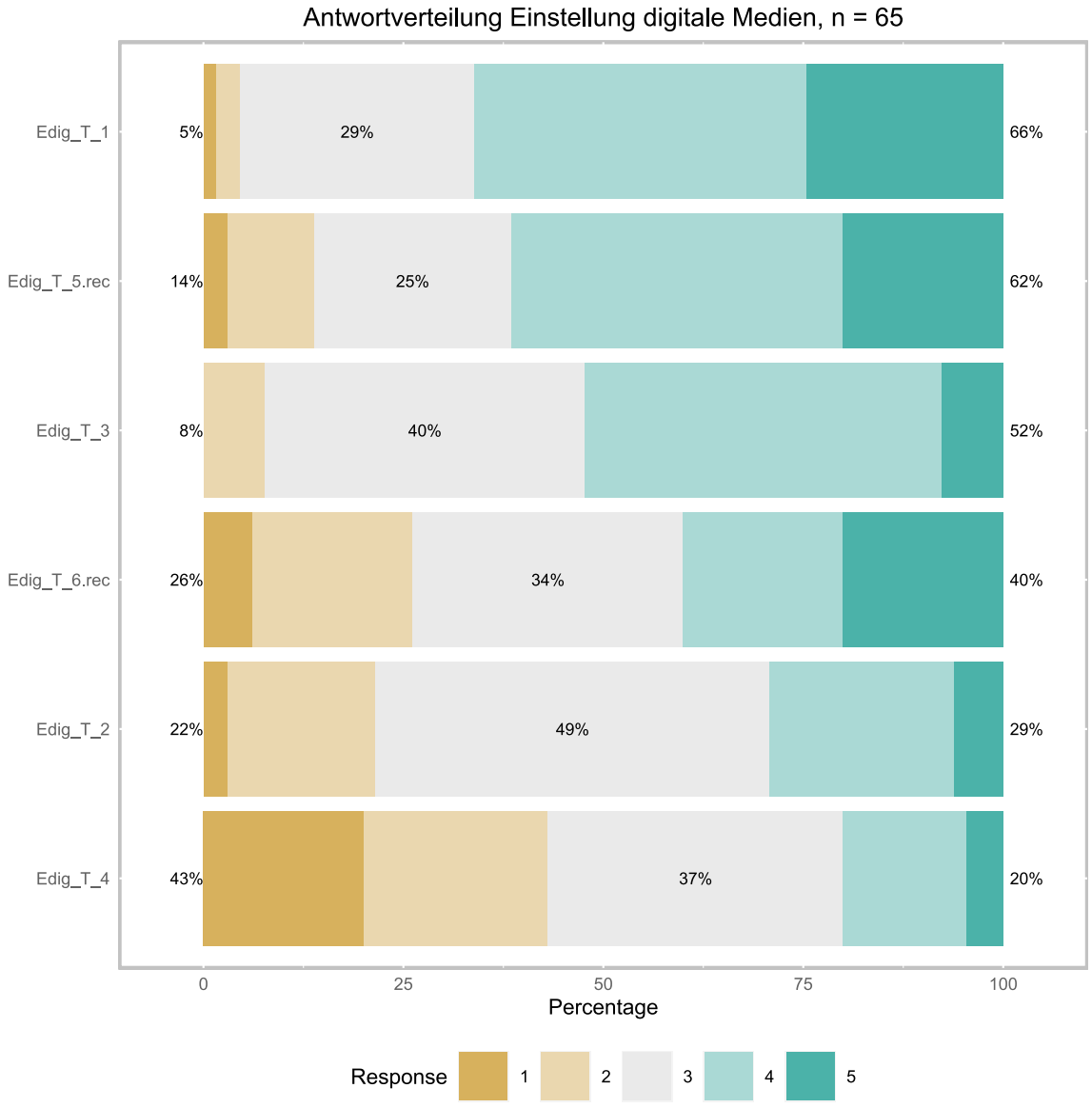


Abbildung 45: Antwortverteilung der Versuchspersonen in Bezug auf die Skala zur Einstellung gegenüber digitalen Medien. Ein tendenziell eher positives Antwortverhalten ist erkennbar.

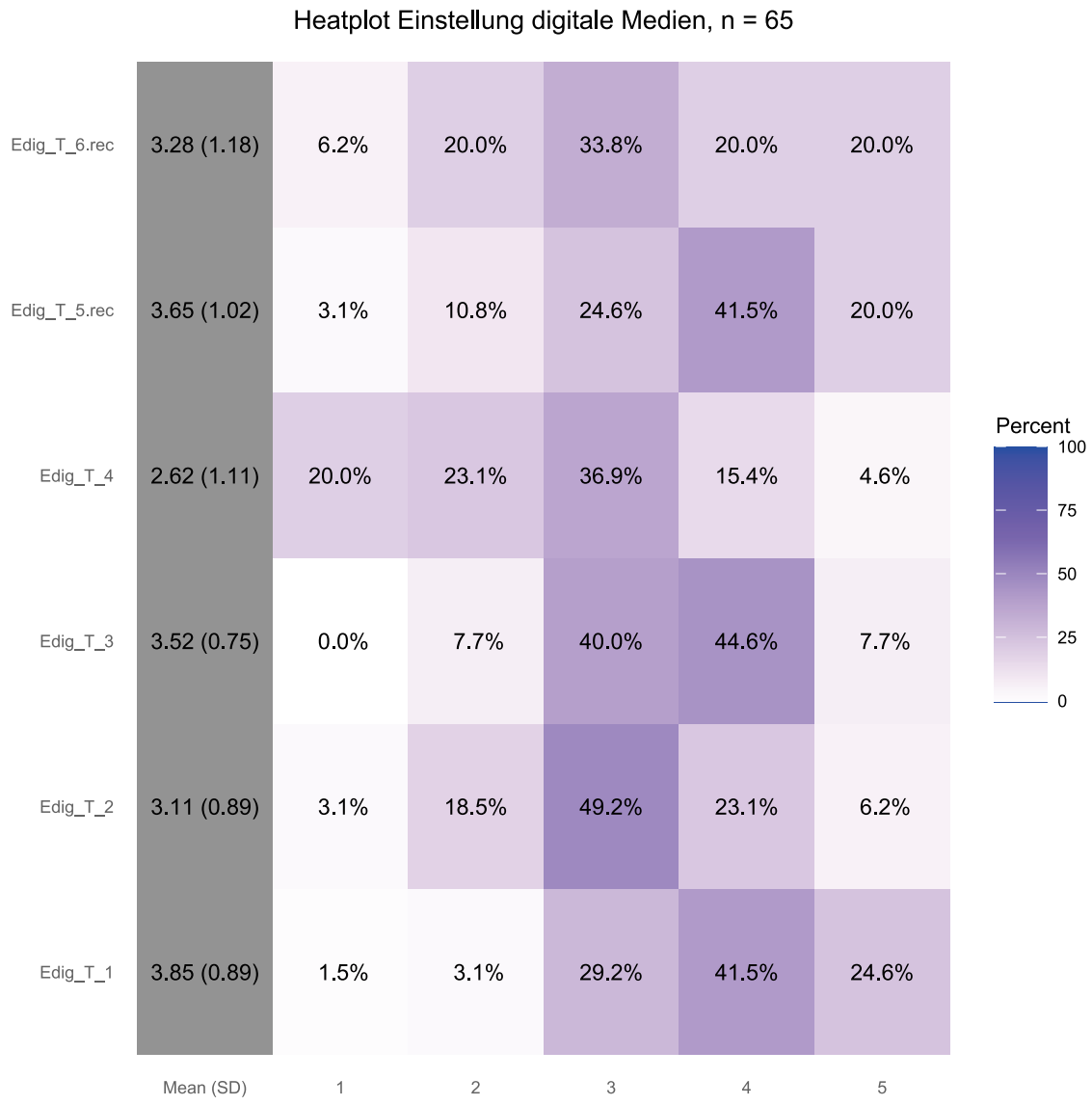


Abbildung 46: Heatplot zur Skala Einstellung gegenüber digitalen Medien. Ratingoptionen drei und vier wurden verstärkt gewählt.

Selbstkonzept digitale Medien

Die Auswertung der Skala zum Selbstkonzept im Umgang mit digitalen Medien lässt keine Kreuzungsmuster erkennen. Nach Ausschluss von acht Fällen aufgrund von Totalverweigerung zeigen sich nur geringfügige Missings (maximal 16 fehlende Werte), welche darüber hinaus eine entsprechende Streuung aufweisen, sodass von einer *Missing completely at random* Bedingung ausgegangen werden kann. Die weitere Auswertung wird nach paarweisem Ausschluss der Proband:innen mit fehlenden Werten innerhalb dieses Konstrukts mit einem Datensatz des Stichprobenumfangs n = 51 durchgeführt. Für die Skala liefern signifikante Kolmogorov-Smirnov-Tests sowie QQ-Plots ausreichende Evidenz zur Ablehnung der Hypothese einer Normalverteilung.

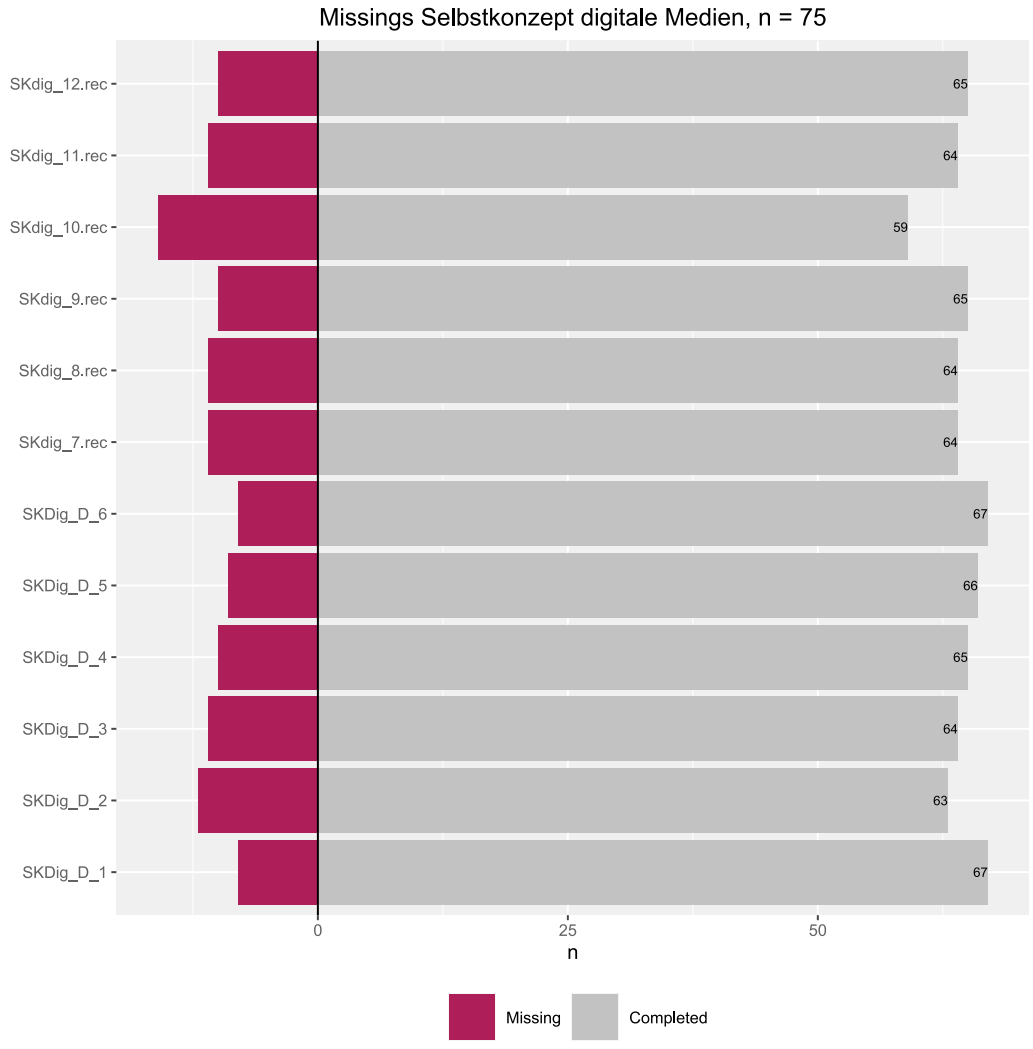


Abbildung 47: Verteilung der fehlenden Daten der Skala zum Selbstkonzept digitale Medien.

Auf Itemebene weist die Skala keine Extremwerte hinsichtlich Schiefe (-0.33 bis 0.39) und Wölbung (-1.75 bis -0.39) auf. Die Items SKDig_D_1 und SK_Dig_D2 weisen unzureichende korrigierte Trennschärfen auf (r_{it} = .18 – .25), die übrigen Items sind

trennscharf (r_{it} = .35 – .81). Die Itemschwierigkeiten liegen bei Werten von p_{Dahl} = 42.48 bis p_{Dahl} = 66.67. Jedoch bleibt zu beachten, dass es sich auf inhaltlicher Ebene beim Selbstkonzept hinsichtlich des Umgangs mit digitalen Medien um ein zeitgenössisch sehr breites Konstrukt handelt, insbesondere da die eingesetzte Skala berufliche und private Nutzung nicht unterscheidet. In Anlehnung an die Empfehlung nach Döring und Bortz (2016) werden diese Items daher trotz knapp nicht erfüllter Kennwerte nach inhaltlicher Prüfung und aufgrund der bestehenden Validierung (Dickhäuser, 2001; Tigges, 2008) nicht gelöscht. Eine akzeptable interne Konsistenz der Skala zum Selbstkonzept konnte ermittelt werden (α = .73). Tabelle 21 stellt die Kennwerte ausführlich dar.

Die aufgetragene Verteilung der Ratingoptionen je Item weist bereits auf eine tendenziell positive Einschätzung durch die Befragten hin (Abbildung 48). Lediglich Item SKDig_D_2 („Ich glaube, dass Andere in Sachen digitale Endgeräte noch manches von mir lernen können.“) zeigt überwiegend eher negatives Antwortverhalten.

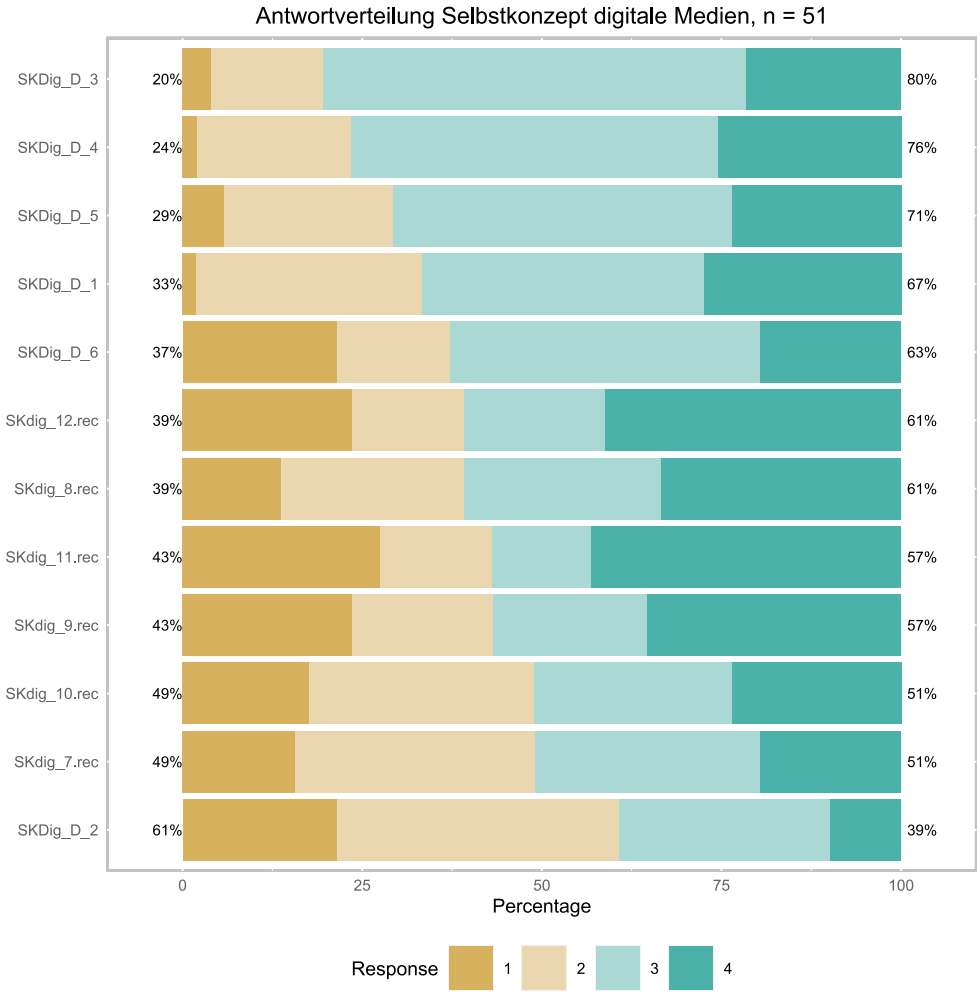


Abbildung 48: Verteilung der Ratingoptionen zur Skala Selbstkonzept digitale Medien.

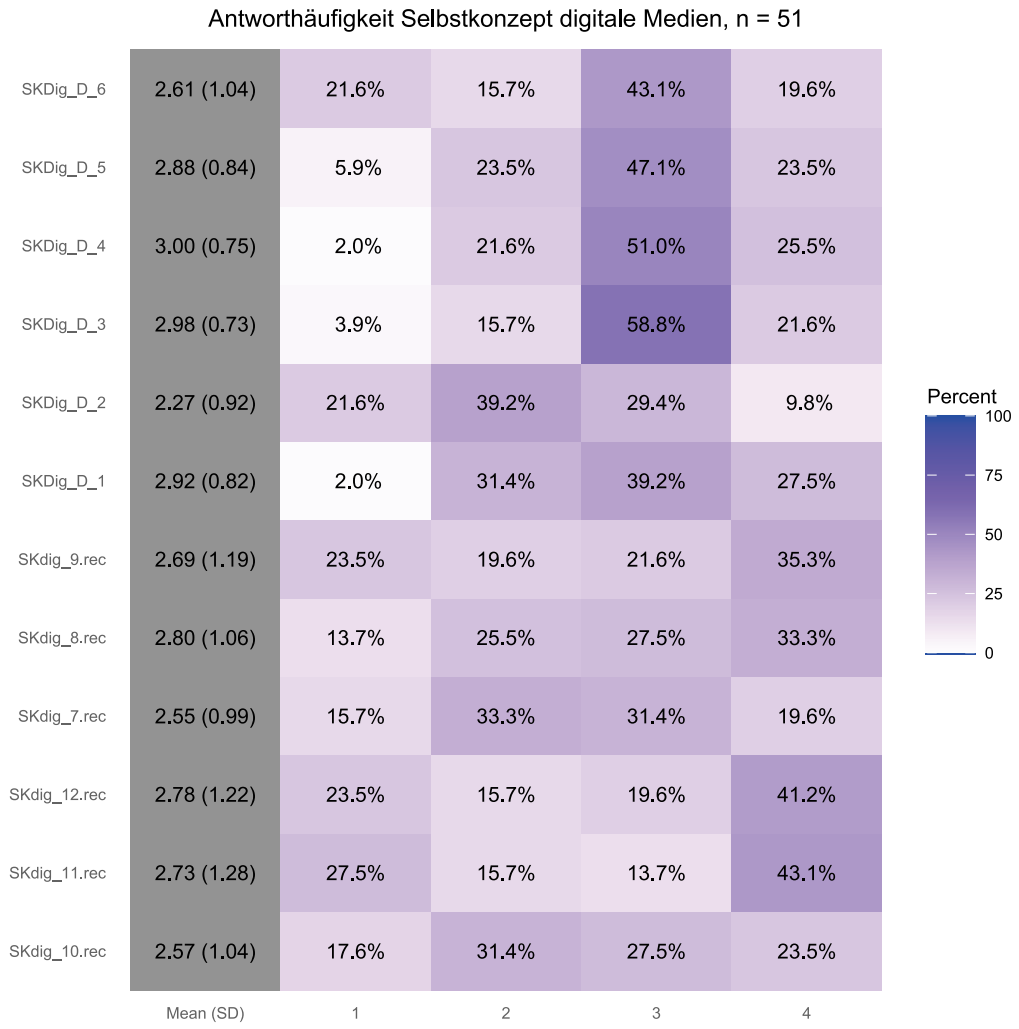


Abbildung 49: Antworthäufigkeiten zum Konstrukt Selbstkonzept im Umgang mit digitalen Medien.

In der deskriptiven Betrachtung liefert die vierstufige Skala zum Selbstkonzept in Bezug auf digitale Medien mittlere bis hohe Werte ($M = 2.73$, $SD = 0.55$, $Mdn. = 2.58$). Die Einschätzung der eigenen Fähigkeiten der befragten Lehrpersonen in diesem Bereich sind somit als gut zu beschreiben. Eine in Relation zu setzende Normierung der eingesetzten Skala ist nicht gegeben.

Tabelle 19: Deskritptive Kennwerte der Skala zum Selbstkonzept im Umgang mit digitalen Medien.

Item	M	SD	Mdn.	Min	Max	Range	Schiefe	Kurtosis
SKDig_D1	2.92	0.82	3.00	1.00	4.00	3.00	-0.07	-1.09
SKDig_D2	2.27	0.92	2.00	1.00	4.00	3.00	0.21	-0.86
SKDig_D3	2.98	0.73	3.00	1.00	4.00	3.00	-0.56	0.37
SKDig_T4	3.00	0.75	3.00	1.00	4.00	3.00	-0.28	-0.50
SKDig_T5	2.88	0.84	3.00	1.00	4.00	3.00	-0.38	-0.49
SKDig_T6	2.61	1.04	3.00	1.00	4.00	3.00	-0.33	-1.12
SKDig_D7.rec	2.55	0.99	3.00	1.00	4.00	3.00	-0.01	-1.08
SKDig_D8.rec	2.80	1.06	3.00	1.00	4.00	3.00	-0.31	-1.21
SKDig_D9.rec	2.69	1.19	3.00	1.00	4.00	3.00	-0.23	-1.51
SKDig_D10.rec	2.57	1.04	3.00	1.00	4.00	3.00	-0.02	-1.23
SKDig_D11.rec	2.73	1.28	3.00	1.00	4.00	3.00	-0.27	-1.66
SKDig_D12.rec	2.78	1.22	3.00	1.00	4.00	3.00	-0.37	-1.50

Wertzuschreibung an digitale Endgeräte

Neben der Prüfung auf Kreuzungsmuster erfolgte ein paarweiser Ausschluss fehlender Daten für das aus drei Items bestehende Konstrukt Wertzuschreibung an digitale Endgeräte (Abbildung 50). Entsprechend wurde nach erfolgter Bereinigung ein vollständiger Datensatz (n = 55) betrachtet. Auch bei dieser Skala muss die Nullhypothese einer Normalverteilung der Daten auf der Grundlage signifikanter Kolmogorov-Smirnov-Tests und grafischer Prüfung der QQ-Plots verworfen werden. Mit Schiefen im Bereich von -1.22 bis 0.13 und Wölbungen von -1.24 bis 0.35 weist die Verteilung keine Extremwerte auf.

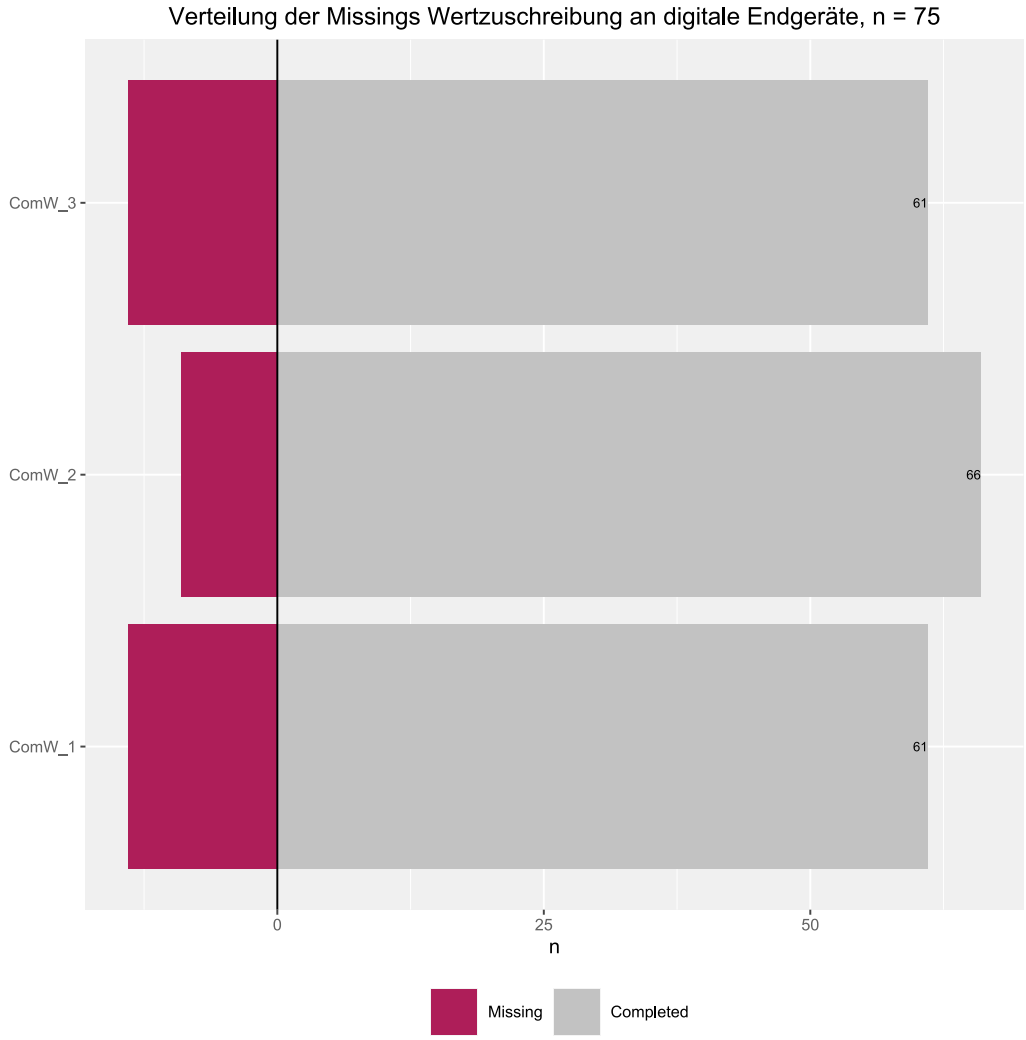


Abbildung 50: Verteilung der fehlenden Daten der Items zur Wertzuschreibung

In der aufgetragenen Antwortverteilung lässt sich deutlich eine überwiegend positive Verortung der Proband:innen bei Item ComW_3 („Ein souveräner Umgang mit digitalen Endgeräten ist eine wichtige Qualifikation für den Beruf.“) erkennen, wohingegen

die beiden anderen Items etwa eine 50/50-Verteilung aufweisen (Abbildung 51). Diese Tendenz kann im Heatplot zur Antworthäufigkeit noch detaillierter nachvollzogen werden (Abbildung 52).

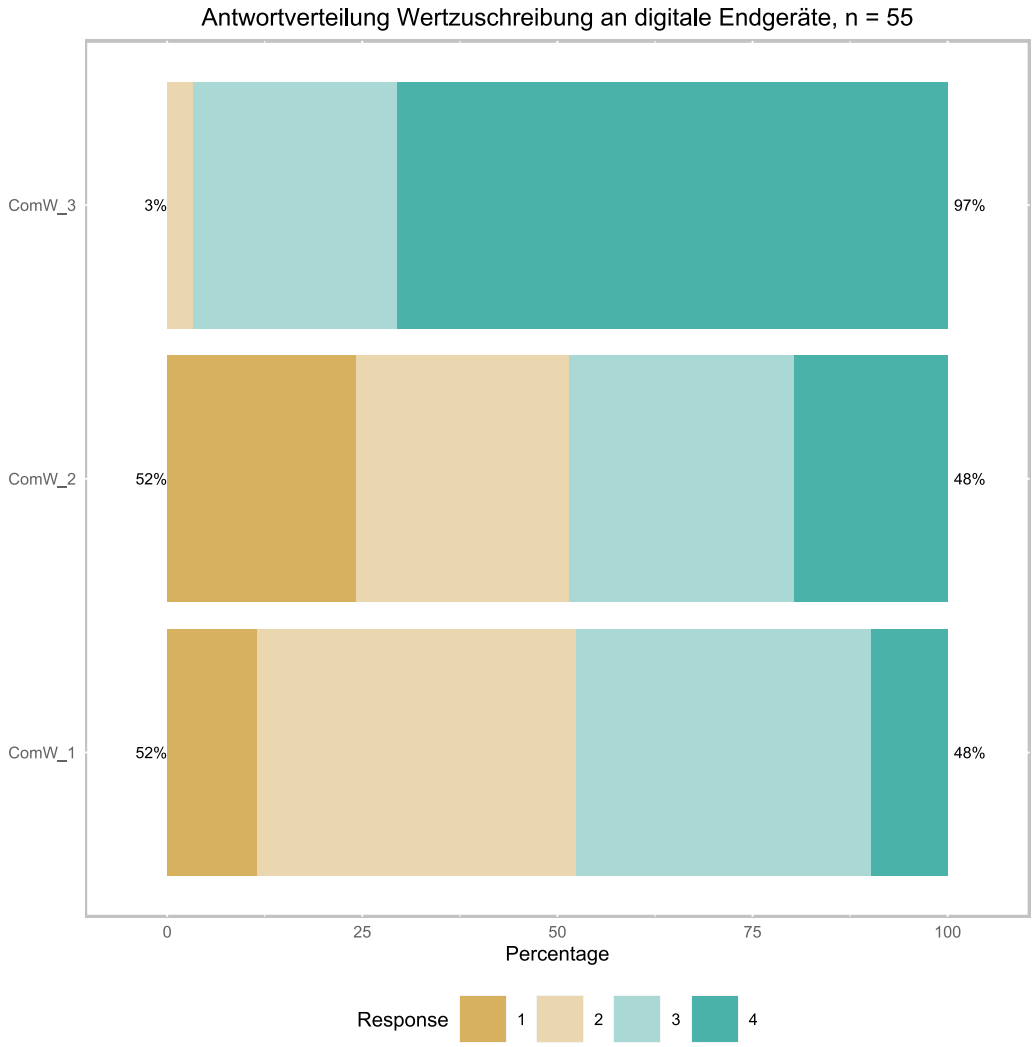


Abbildung 51: Antwortverteilung der Items der Skala zur Wertzuschreibung.

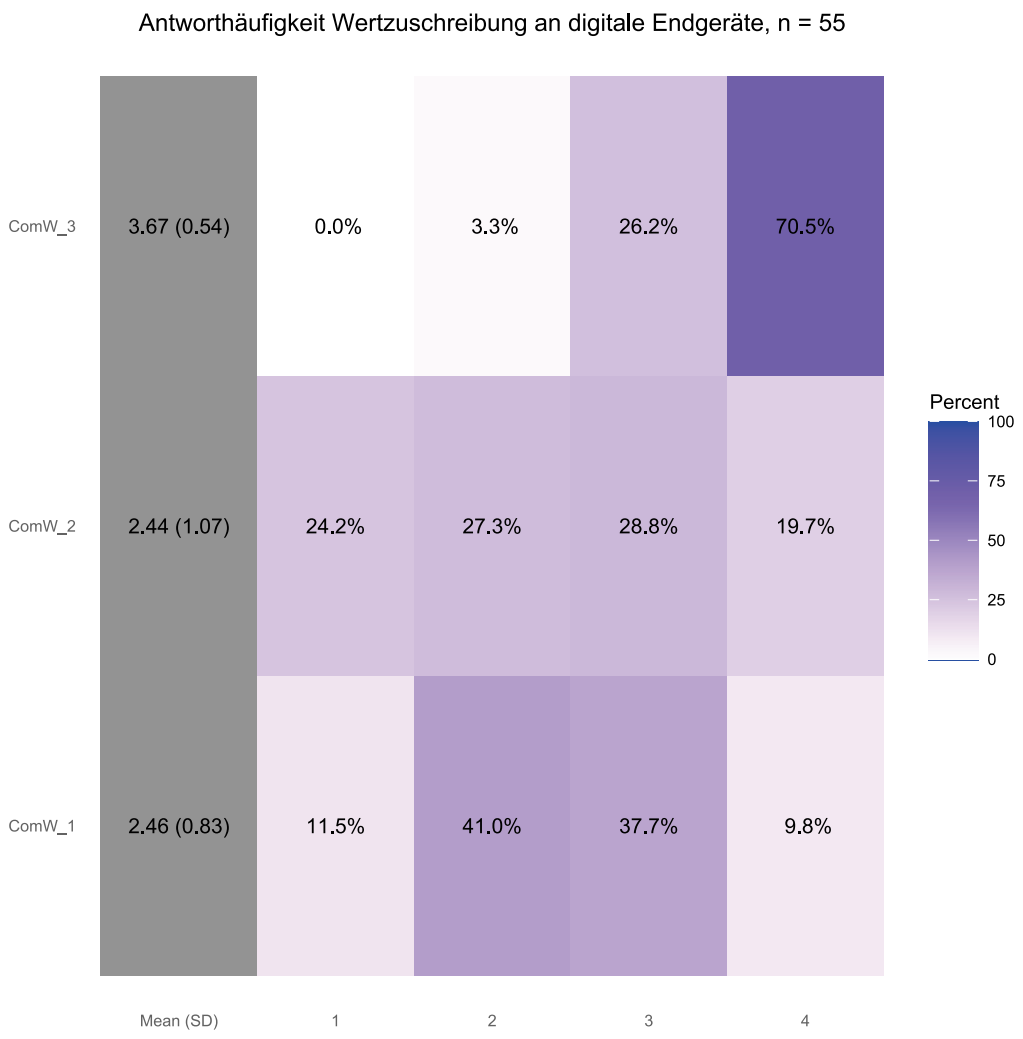


Abbildung 52: Heatplot zur Skala Wertzuschreibung an digitale Endgeräte.

Bei Betrachtung der Itemkennwerte zeigt sich für dieses Item entsprechend ein leichter Deckeneffekt (Schwierigkeitsindizes der Skala $p_{Dahl} = 49.09 – 89.70$, vgl. Abbildung 53). Bei guten korrigierten Trennschärfen ($r_{it} = .40 – .62$) weist die Skala eine schlechte interne Konsistenz ($\alpha = .59$) auf. Die Eignung der Skala in der eingesetzten Form sowie die Aussagekraft ist somit auf inhaltlicher Ebene zu diskutieren. Aufgrund der hohen Augenscheinvalidität der Skala wurde die Auswertung jedoch zunächst weitergeführt.

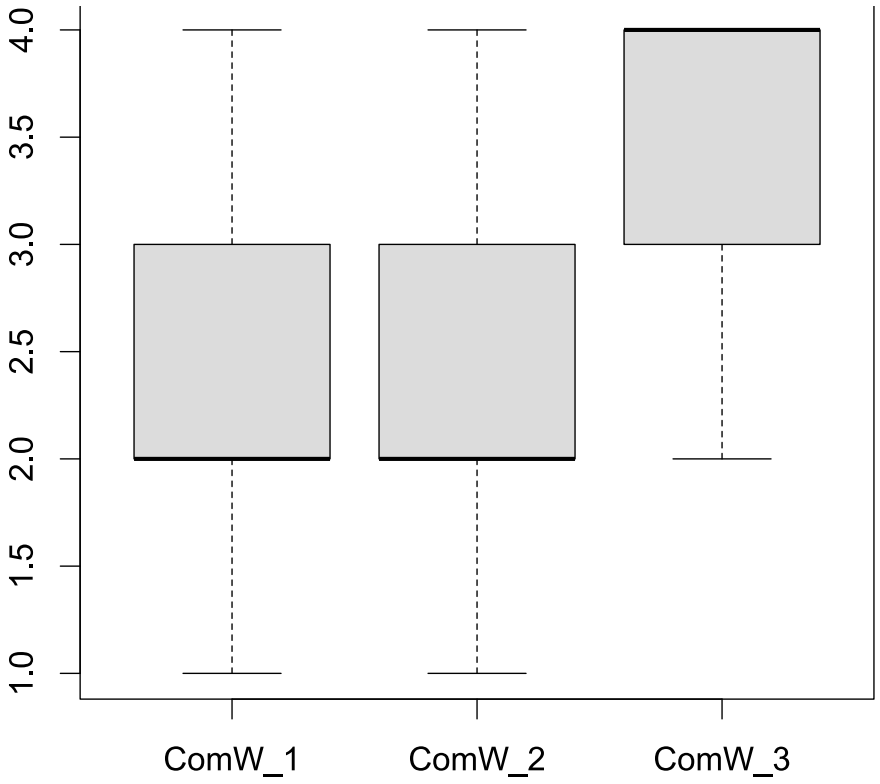


Abbildung 53: Boxplotdarstellung der Skala zur Wertzuschreibung. Erkennbar sind leichte Deckeneffekte des dritten Items.

Tabelle 20: Deskriptive Kennwerte der Skala zur Wertzuschreibung an digitale Endgeräte.

Item	M	SD	Mdn.	Min	Max	Range	Schiefe	Kurtosis
ComW_1	2.49	0.81	2.00	1.00	4.00	3.00	0.13	-0.57
ComW_2	2.47	1.05	2.00	1.00	4.00	3.00	0.02	-1.24
ComW_3	3.69	0.50	4.00	2.00	4.00	2.00	-1.22	0.35

Deskriptiv zeigt die Skala im mittleren bis hohen Bereich verortete Ratings der Proband:innen (M = 2.88, SD = 0.61, $Mdn.$ = 3.00). Normierungsbezüge liegen nicht vor.

Zusammenschau der Ergebnisse der Fragebogenerhebung auf Lehrendenseite

Die erfassten Konstrukte, mit Ausnahme der Wertzuschreibung, zeigen in Bezug auf die Stichprobe anhand der internen Konsistenz eine überwiegend akzeptable Reliabilität. Die eingesetzten Testinstrumente scheinen ausreichend Unterschiede in der Zielgruppe abzubilden und damit auf Grundlage der Itemschwierigkeit *sensu* eines Popularitätsindexes angemessen zu sein. Die Items der eingesetzten Konstrukte zeigen unter Betrachtung der *Item-by-Scale*-Korrelation unter *Part-Whole*-Korrektur überwiegend gute korrigierte Trennschärfen. Lediglich in der Skala zum Selbstkonzept konnten mehrere wenig trennscharfe Items identifiziert werden. Darüber hinaus zeigen die Antwortverteilungen bei Stichprobengrößen zwischen 51 und 65 Proband:innen je Konstrukt keine massiven Abweichungen hinsichtlich der Form der Verteilung der jeweiligen unabhängigen Variablen. Im Zuge der Itemanalyse zeigten sich überwiegend gute Trennschärfen im Wertebereich $r_{it} > .50$. Die Trennschärfen der Items zur Wertzuschreibung zeigten eine überwiegend mittelmäßige Trennschärfe mit Werten $r_{it} > .30$. Zwei Items der Skala zum Selbstkonzept wiesen geringe Trennschärfen auf.

Eine deskriptive Auswertung der Konstrukte Einstellung, Selbstkonzept und Wertzuschreibung zeigt für alle drei Konstrukte Werte im mittleren bis oberen Wertebereich der eingesetzten Skalen. Die Einstellung gegenüber digitalen Medien und Endgeräten zeigt über alle Versuchspersonen hinweg einen mittleren Wert auf der fünfstufigen Likertskala ($M = 3.35$; $Mdn. = 3.25$; $SD = .63$) und ist somit im Mittel deutlich in der oberen Hälfte der Likertskala verortet. Hinsichtlich des Selbstkonzeptes im Umgang mit digitalen Medien zeigen die befragten Lehrpersonen auf Stichprobenebene Werte im mittleren bis oberen Bereich der vierstufigen Likertskala ($M = 2.73$; $Mdn. = 2.58$; $SD = .55$). Den Wert digitaler Endgeräte schätzen die befragten Lehrenden als eher hoch ($M = 2.88$; $Mdn. = 3.00$; $SD = .61$; vierstufige Likertskala) ein. Für eine bessere Übersicht wurde der Wertebereich der Skala zur Einstellung auf die Wertebereiche der Skalen zu Selbstkonzept und Wertzuschreibung angeglichen. Eine so harmonisierte Darstellung unter zeilenweisem Ausschluss fehlender Werte ($n = 40$) zeigt die nahezu identischen Ratings der Konstrukte Wertzuschreibung und Selbstkonzept, wohingegen die Einstellung geringer ausgeprägt erscheint (Abbildung 54). Eine Übersicht über die Itemkennwerte zu den Konstrukten auf der Seite der Lehrenden ist Tabelle 21 zu entnehmen.

Tabelle 21: Itemkennwerte der Instrumente zur Erhebung in der Zielgruppe der Lehrpersonen. Für die Subskalen zu den Stages of Concern werden aufgrund der vorwiegend grafischen Auswertung der Daten gemäß Manual hier keine Maße der zentralen Tendenz angeführt, da diese als wenig aussagekräftig erscheinen.

Konstrukte	**M**	**SD**	**Mdn.**	**r_{it} (>.3)**	**p_{Dahl} (20 < p < 80)**	**α (>.7)**	**n**
Einstellung (6 Items, Skalierung 1-5)	3.35	0.63	3.25	.36 – .72	40.38 – 71.15	.71	65
Selbstkonzept (12 Items, Skalierung 1-4)	2.73	0.55	2.58	.35 – .81*	42.48 – 66.67	.73	51
Wertzuschreibung (3 Items, Skalierung 1-4)	2.88	0.61	3.00	.40 – .62	49.09 – 89.70**	.59	55
Stages of Concern (35 Items, Skalierung 1-7)	Siehe Tabelle 17			.47 – .91***	35.32 – 78.12	.68 – .91	56

* Einstellung: Zwei Items mit r_{it} = .18 & .25
** Wertzuschreibung: Ein Item mit p_{Dahl} = 89.70
*** Stages of Concern: Ein Item mit r_{it} = .16

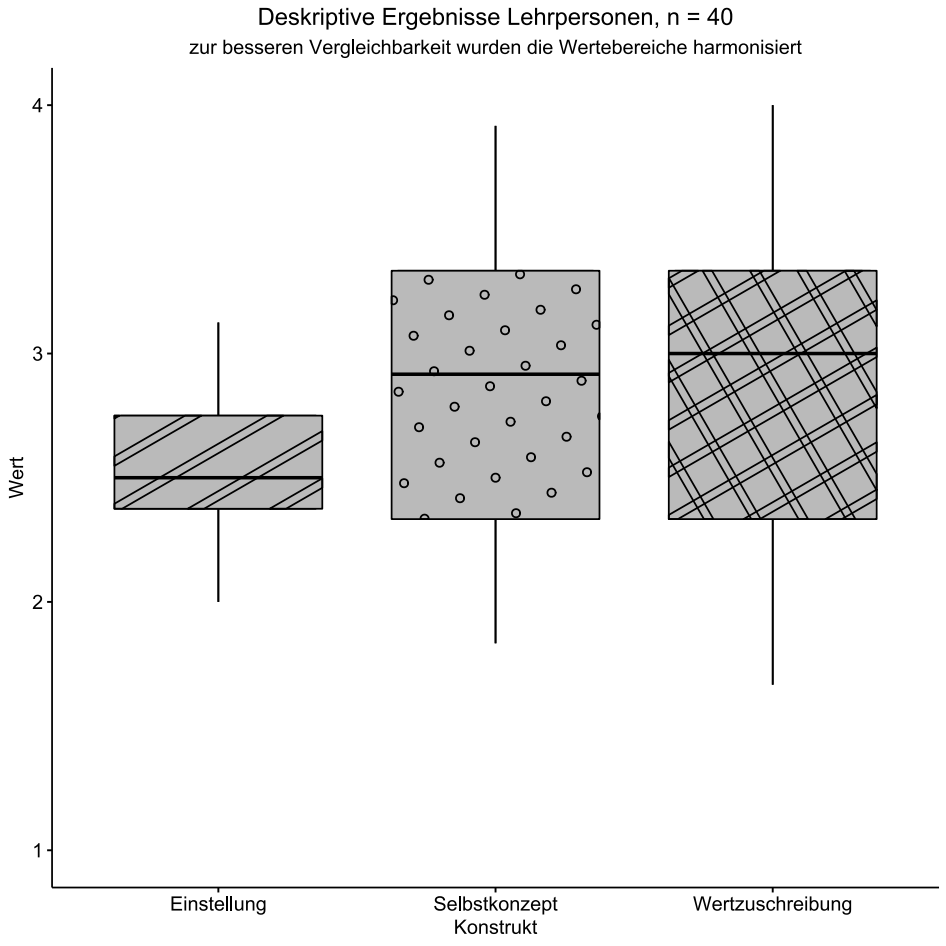


Abbildung 54: Boxplots der Skalenmittelwerte der affektiven Variablen der Lehrpersonen, Skalierung harmonisiert.

Eine Prüfung möglicher Korrelationen zwischen den in der Stichprobe der Lehrenden erhobenen Konstrukten ergab einen signifikanten positiven Zusammenhang zwischen Einstellung und Computerwert ($r = .67$, $p < .001$; Abbildung 55) sowie einen signifikanten positiven Zusammenhang zwischen Einstellung und Selbstkonzept ($r = .31$, $p = .038$).

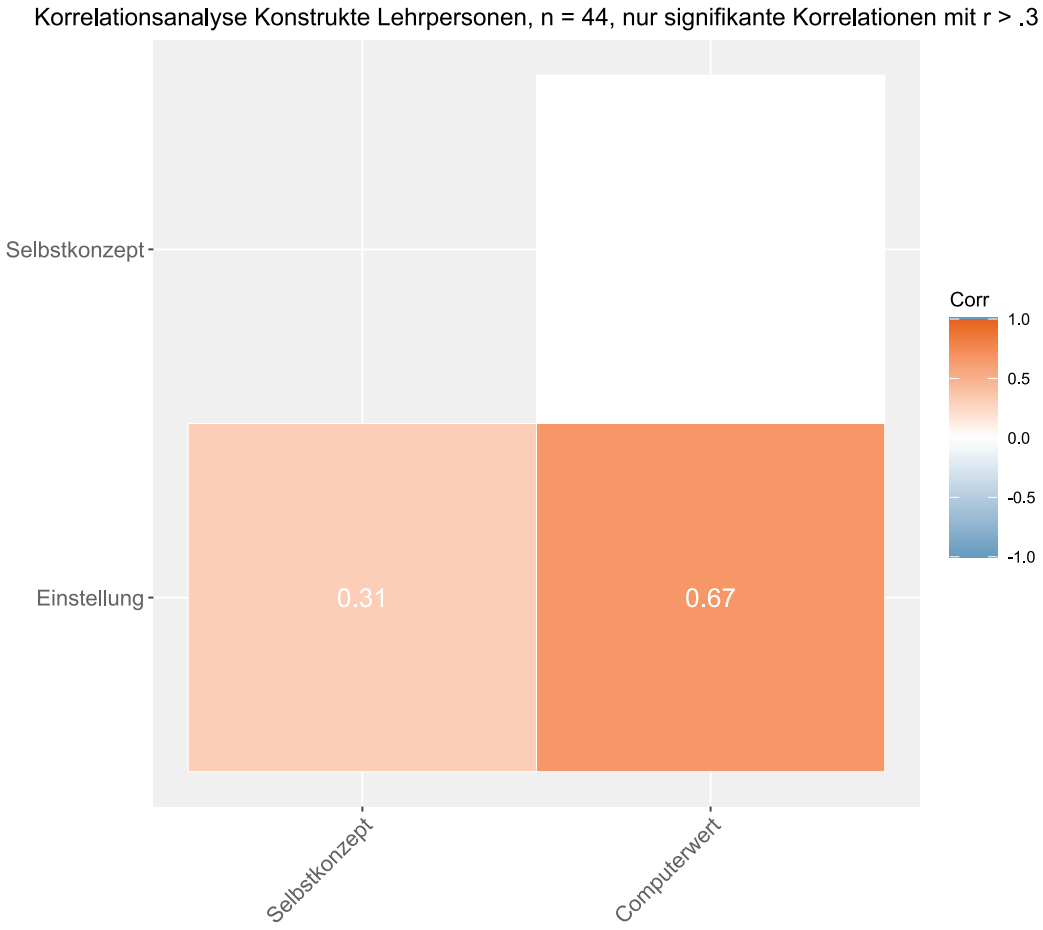


Abbildung 55: Heatplot der Korrelationskoeffizienten der Konstrukte in der Stichprobe der Lehrpersonen. Eine relevante und signifikante Korrelation ergibt sich zwischen den Konstrukten Einstellung und Computerwert.

Auswertung der Interviewdaten

Stichprobe Leitfadengestützte Interviews

Insgesamt wurden n = 12 (♀ = 58,33 %) Lehrpersonen mit einer Berufserfahrung von 1 bis 22 Jahren (*M* = 8.1; *Mdn.* = 4.0; *SD* = 7.31) aus sieben verschiedenen Schulen interviewt. Die Befragten waren zwischen 30 und 55 Jahre alt (*M* = 38.25; *Mdn.* = 32; *SD* = 11.17). Die Stichprobe umfasst sowohl junge Lehrpersonen mit wenig Berufserfahrung wie auch ältere, berufserfahrene Lehrpersonen zu gleichen Anteilen. Zwei Interviews wurden jeweils mit zwei Lehrpersonen simultan geführt, da sie die virtuellen Labore gemeinschaftlich eingesetzt hatten.[37]

Beteiligt an der Interviewstudie waren Lehrpersonen, welche in der schriftlichen Evaluation einer weiteren Befragung zugestimmt hatten. Die hier beschriebene Stichprobe stellt folglich eine nicht-randomisierte Teilstichprobe der Proband:innen der Fragebogenerhebung unter den Lehrpersonen dar. Für die Nutzung der Fragebogendaten als Diskussionsgrundlage im Zuge der Interviews stimmten die Lehrpersonen einer Entanonymisierung vor Durchführung der Interviews zu.

Qualitative Inhaltsanalyse und Kategoriensystem

Anknüpfend an die Erkenntnisse der Befragung der Lehrpersonen aus der ersten Phase werden im Folgenden die Ergebnisse der Interviews aus der zweiten Phase dargestellt. Zur Bestimmung der Güte des Kategoriensystems (Tabelle 22) wurden zunächst etwa 20 % des Datenmaterials für eine Kodierer-Schulung herangezogen. Abweichungen der Kodierungen wurden diskutiert und zu einer Einigung geführt. Dabei wurde das Kodiermanual stetig präzisiert. Döring und Bortz (2016) empfehlen, 10 – 20 % des Datenmaterials zur Bestimmung der Interrater-Reliabilität zu berücksichtigen. Da diese Empfehlung nicht unabhängig von Stichprobenumfang und der Häufigkeitsverteilung der Kodierungen betrachtet werden kann, wurde im vorliegenden Fall 30 % des Datenmaterials doppelt kodiert. Cohens Kappa liefert bei zwei eingesetzten Beurteiler:innen eine gute bis sehr gute Übereinstimmung von $\kappa = .75$ (κ nach Brennan & Prediger, 1981; Wirtz & Caspar, 2002) für die Kodierung des Materials anhand des Kategoriensystems.[38]

[37] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 85), modifiziert
[38] Abschnitt erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 90), modifiziert

Tabelle 22: Kategoriensystem zur Kodierung mit Ankerbeispielen.

Ober-kategorie	Kategorie	Ankerbeispiel
Vorteile Digitale Medien (Allgemein)	Visualisierung komplexer Sachverhalte	Man kann natürlich komplizierte oder komplexe Sachverhalte mit diesen digitalen Medien relativ anschaubar zeigen.
Verwendung Digitale Medien	Präsentations-medium	Also jede Stunde ist bei mir präsentationsgestützt.
	Kein Ersatz für Realexperiment	Ja wobei ich halt finde, man sollte jetzt quasi nicht das Experiment durch digitale Versuche ersetzen.
Nachteile Digitale Medien	Technische Zuverlässigkeit	Ja einmal an der Verlässlichkeit, die immer nicht da ist. Also was heißt nicht immer, aber die häufig/ man kann sich nicht immer voll darauf verlassen.
	Erhöhter Zeitaufwand	Das heißt, ich habe viele Vorbereitungen doppelt. Die habe ich praktisch digital auf einem Stick und ich habe gleichzeitig das noch als Foliensatz dann gedruckt. Und solche Dinge finde ich halt die/ Haben wir doppelte Kosten, wir haben doppelte Zeit und das finde ich halt sehr unbefriedigend.
Hürden	Fehlende Kontrolle über Lernprozesse	Ich habe nur immer, wenn es jetzt irgendwelche Homepages sind, ja denke ich immer, machen die auch das was sie sollen?
	Fehlende Anpassungs-möglichkeiten	Also je umfangreicher und je durchdachter das Konzept und je vollständiger das Konzept von digitalen Medien ist, desto schwieriger ist es leider manchmal, das in den eigenen Unterricht zu implementieren. Weil man dann die Schwierigkeit hat, dass einzelne Bausteine, die man dort herausnehmen will, aus dem Kontext gerissen werden und schlecht zu adaptieren sind.
Chancen	Schülerzentriert es Arbeiten	Weil das eine sehr gute Möglichkeit ist für eine Schülerselbsttätigkeit.
	Vertiefung der Inhalte	[…] zur Vertiefung würde ich es einsetzen auf jeden Fall das wäre eine Möglichkeit […]
	Arbeitserleichter-ung	Ganz klar eine Arbeitserleichterung. Super vorbereitetes Material. Super Layout. Sehr ansprechend. Das heißt, meine Chancen sind: Ich muss wenig investieren, um schönes, ansprechendes Material zu haben, das auch noch detailliert ist. Und fachlich korrekt.

Die Erkenntnisse aus der qualitativen Inhaltsanalyse werden nachstehend gegliedert nach den postulierten Barrieren des Transfers beschrieben. Die Angaben in Klammern bezeichnen dabei den absoluten Anteil der Lehrpersonen, welche mit einer Äußerung in Verbindung gebracht werden konnten, an der Stichprobe.

(1) Schulische Situation und Persönlichkeitsmerkmale: Alle befragten Lehrpersonen sehen sich hinsichtlich ihres Selbstkonzepts im oberen Mittelfeld und zeigen keine Abweichung zu den Angaben im Fragebogen, wohingegen sie ihre Einstellung zu digitalen Medien im Interview geringfügig höher einschätzen als im Fragebogen. In Hinblick auf die inhaltliche Validität zur Einstellung zu digitalen Medien zeichnet sich ab, dass ein mittlerer Wert nicht so zu interpretieren ist, dass die Befragten digitalen Medien neutral gegenüberstehen, sondern sich vielmehr den Grenzen digitaler Medien bewusst sind. Dabei betonen alle Befragten, dass sie positiv gegenüber digitalen Medien eingestellt seien, es jedoch auf den gezielten und dosierten Einsatz der Medien ankomme. Sie merken an, dass digitale Medien, wie andere Medien auch, Vor- und Nachteile mit sich brächten. Einen großen Nachteil digitaler Medien stellen die technische Zuverlässigkeit und das Fehlen der technischen Ausstattung dar, wie acht von zwölf Lehrpersonen anmerken (8/12). Hier wird unter anderem die Inkompatibilität verschiedener Endgeräte und Software genannt. Diese Hürde kann die webbasierte Oberfläche der virtuellen Labore minimieren. Mit digitaler Lehre verbunden ist aus Sicht der Lehrpersonen ein erhöhter Zeitaufwand, da in der Regel eine analoge Alternative für den Unterricht vorbereitet wird, um technischen Schwierigkeiten zu begegnen (5/12). Dies spiegelt sich in einem Selbstkonzept im mittleren Bereich wider (7/12). Häufig wird dies durch fehlende Erfahrung mit neuen Medien begründet (6/12). Als großen Vorteil sehen sie insbesondere den multimedialen Zugang digitaler Medien (10/12), der einen zentralen Kern der virtuellen Labore darstellt. Alle Lehrpersonen nutzen digitale Medien vorwiegend als Präsentationsmedium, um komplexe Sachverhalte zu veranschaulichen. Alle Befragten betonen, dass das virtuelle Labor keinen Ersatz für das Realexperiment darstelle. Eine Lehrperson begründet dies damit, dass das Erlernen der klassischen Methoden und Handfertigkeiten sonst verloren ginge (1/12). Hinsichtlich der Einsatzbereitschaft zeichnen sich jedoch auch materialspezifische Barrieren ab.[39]

(2) Material: Auf der Ebene der schülerbezogenen materialspezifischen Barriere sehen vier Lehrpersonen in der webbasierten Anwendung der virtuellen Labore ein erhöhtes Ablenkungspotential und eine fehlende Möglichkeit zur Kontrolle der Arbeitsprozesse der Schüler:innen (4/12). Vier Befragte sehen bei der Verwendung im Unterricht

[39] Abschnitt erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 90–91), modifiziert

fehlende Anpassungsmöglichkeiten der virtuellen Labore (4/12). Hierzu zählen die Anpassung des Schwierigkeitsgrades der theoretischen Grundlagen und der gewählte Kontext. Eine der Lehrpersonen würde das virtuelle Labor (Luftkissenbahn) aus diesen Gründen nicht einsetzen (1/12).[40]

(3) Didaktische Konzepte: Unabhängig von den begutachteten Laboren, sehen alle Befragten die virtuellen Labore als einen Teil der Unterrichtsreihe zu einem Themenfeld und nicht als eine abgeschlossene Unterrichtseinheit an (12/12). Die in allen virtuellen Laboren vorhandenen theoretischen Grundlagen und das virtuelle Experiment werden vorwiegend als Möglichkeit zur Vorbereitung des realen Experiments gesehen, was vermutlich auf den hohen Stellenwert von Experimenten im Unterricht zurückzuführen ist (Seidel et al., 2006). Die Erarbeitung der theoretischen Grundlagen als Hausaufgabe wird hier als eine Einsatzmöglichkeit genannt (11/12). Die Nutzung als Vertiefung oder Wiederholung zur Nachbereitung des Experiments als Hausaufgabe stellt eine weitere Möglichkeit dar (11/12). Das Arbeiten in Kleingruppen im Klassenverband wird jedoch als Vorteil wahrgenommen, wenn es sich um die Überwindung von Verständnisproblemen und Schwierigkeiten in der manuellen Ausführung handelt. Hier wird das Feedback durch Kommunikation in Kleingruppen oder die Lehrperson in moderierender Funktion als wichtiger Bestandteil des Einsatzes der virtuellen Labore beschrieben (6/12). Eine Lehrperson wünscht sich Hinweise für Gesprächsimpulse zur Gruppenarbeit in Form von Diskussionsfragen (1/12). Alle Befragten sehen in dem Lernarrangement die Möglichkeit schülerzentrierten Arbeitens (12/12). Drei der Befragten merken an, dass das klassische Unterrichtsgespräch einen großen Stellenwert in ihrem Unterricht habe und sie besonderen Wert auf das gemeinsame Entwickeln von Fragestellungen und Hypothesen legten (3/12). Diese Lehrpersonen würden die virtuellen Labore in Teilen einsetzen und weitere Erarbeitungs- und Sicherungsphasen zwischen den Sequenzen einbauen.

Das didaktische Konzept der Gewässeranalytik wurde von den sieben Lehrpersonen, die es eingesetzt haben, als ein praxistaugliches Unterrichtskonzept eingestuft (7/7). Als abgeschlossenes Konzept sehen die Lehrpersonen wenige Anpassungswünsche. Hinsichtlich der Ergebnissicherung sehen die Befragten Anpassungspotential. Hier schlagen sie eine Art Gruppenpuzzle vor, in welchem die Lernenden über die wichtigsten Grundlagen ihres bearbeiteten Parameters sowie ihre Erkenntnisse in der Klassengemeinschaft referieren. Die Lehrpersonen regen an, dass der zeitliche Umfang von sechs Unterrichtsstunden eine mögliche Hürde für die flexible Einbindung in den Unterricht darstellt. Die Lehrpersonen erkennen jedoch die Möglichkeit, einzelne Kurse zu

[40] Abschnitt erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 91), modifiziert

spezifischen Parametern mit einem geringeren Zeitumfang einzusetzen. Hierzu wünschen sich die Befragten Handreichungen mit Empfehlungen exemplarischer Themen für die Unterrichtsreihe mit Bezug zu den Lehrplänen. Als mögliche Empfehlung nennen fünf Lehrpersonen die klassische Durchführung einzelner experimenteller Verfahren, wie zum Beispiel die pH-Wert Messung (5/7).

Insgesamt sehen alle Befragten variable Einsatzmöglichkeiten hinsichtlich des didaktischen Orts und der Sozialform der virtuellen Labore, die über ein *Blended-Learning* Szenario hinausgehen (12/12). Didaktische Handreichungen mit Gesprächsimpulsen und Differenzierungs- und Sequenzierungsvorschlägen können die Anpassung an den individuellen Unterricht vereinfachen. Weitere Erkenntnisse hinsichtlich des Materials können aus den nachfolgenden Befunden der schülerbezogenen Untersuchungen gewonnen werden.[41]

[41] Abschnitt erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 91–92), modifiziert

5.2 Erhebung unter Lernenden

Ergebnisse Studie 2 – Erhebung unter Lernenden

Stichprobe Fragebogenerhebung

- 146 Schüler:innen, Alter 14 – 18 Jahre, Geschlechterverteilung: weiblich = 63, männlich = 48, divers = 5
- Gutes Vorwissen in den naturwissenschaftlichen Fächern

Flow-Erleben

- Akzeptable Itemkennwerte
- Mittleres *Flow*-Erleben zu TZP1 und TZP2, signifikant geringeres *Flow*-Erleben zu TZP3.
- *Flow*-Erleben in der Vorbereitung und Durchführung vergleichbar mit einer Normierungsstudie im Kontext Computerspiele.
- Gering ausgeprägte Besorgniskomponente des *Flows*, nimmt im Verlauf der Lerneinheit deskriptiv weiter ab, zu TZP3 signifikant geringer als zu TZP1.
- Besorgniskomponente in Durchführung und Nachbereitung vergleichbar mit Erhebungssituation eines Computerspiels. In der Vorbereitung höhere Besorgnis.
- Passung von Fähigkeit und Anforderung im mittleren Bereich verortet.
- Anforderung und damit auch Passung zur Fähigkeit zu TZP3 leicht signifikant rückläufig gegenüber TZP2.
- Fähigkeit nimmt im Verlauf der Lerneinheit minimal zu.

Aktuelle Motivation

- Überwiegend akzeptable bis gute Itemkennwerte, Subskala Erfolgswahrscheinlichkeit mit fragwürdiger interner Konsistenz.
- Herausforderung im mittleren Bereich (TZP1), signifikante Rückgänge in den niedrigen Bereich über TZP2 und TZP3. Keine signifikante Abweichung von der Normierungsstudie zum induktiven Denken zu TZP1.
- Interesse mittlerer Ausprägung zu TZP1 und TZP2. Signifikanter Rückgang des Interesses zu TZP3. Keine signifikante Abweichung der TZP1 und TZP2 von der Normierungsstudie zum induktiven Denken.
- Erfolgswahrscheinlichkeit über alle TZP hinweg hoch ausgeprägt. Zu allen TZP nicht signifikant verschieden von Normierungsstudie zum induktiven Denken.
- Misserfolgsbefürchtung gering ausgeprägt (TZP 1), signifikanter weiterer Rückgang zu TZP3. Keine Übereinstimmung mit Normierungsstudien.

Cognitive Load

- Gute Itemkennwerte der drei Subskalen
- Durchgehend gering bis mäßig ausgeprägter *Intrinsic Cognitive Load*
- Sehr niedriger *Extraneous Cognitive Load* zu TZP1, signifikante Zunahme des ECL zu TZP2 und TZP3 gegenüber TZP1, aber nach wie vor deskriptiv gering ausgeprägt.
- Mittlere Ausprägung des *GCL*, keine eindeutig signifikante Veränderung über die drei TZP.

System Usability

- Gute Itemkennwerte
- *System Usability* im oberen Drittel der Skala verortet

Korrelationsanalysen

- Teils signifikante und bedeutsame Korrelationen zwischen den Subskalen (z. B. ECL ~ ICL)

Logfiles

- 217 auswertbare Datensätze mit Log-Daten aus 7 virtuellen Laboren
- Starke Variationen der Bearbeitungsdauern der einzelnen Kapitel.
- Teils chaotische Navigationsstrategie, teils stringente Abarbeitung der vorgegebenen Struktur, teils sehr strukturierte Lernpfade mit Rückgriffen auf vorangegangene Kapitel.
- Ansätze von Mustern in den Daten sind erkennbar.
- Auffällig: Zumeist wurde die vorgesehene Bearbeitungszeit bei weitem nicht ausgeschöpft.

Ergebnisse der Fragebogenerhebung

Stichprobe

Die Evaluation der Lernmaterialien erfasste neben Oberflächenmerkmalen der Lernumgebung in erster Linie die Interaktion der Schüler:innen mit den Materialien. Die Datenerhebung fand begleitend zur Nutzung der virtuellen Labore zum Thema Gewässeranalytik im Schulunterricht statt. Die an der Panelstudie teilnehmenden Lernenden (n = 146, weiblich = 63, männlich = 48, divers = 5) im Alter von 14 bis 18 Jahren (*MW* = 16.73, *Med.* = 17, *SD* = 0.92) zeigten gute Voraussetzungen hinsichtlich des biologischen und chemischen Vorwissens (Biologienote: *MW* = 10.04, *Med.* = 10, *SD* = 3.08, Chemienote: *MW* = 10.53, *Med.* = 11, *SD* = 3.05) und mindestens ausreichende Physikkenntnisse (Physiknote: *MW* = 9.19, *Med.* = 9, *SD* = 2.95). Die Notenstufen wurden anhand der für diese Altersklasse in Rheinland-Pfalz üblichen Bewertungsskala 0 – 15 Punkte erhoben.[42]

Flow-Erleben

Eine Analyse der Skala zum *Flow*-Erleben zeigt über alle Testzeitpunkte hinweg eine akzeptable Anzahl fehlender Werte (Abbildung 56). Der Dropout liegt auf Itemebene bei maximal 15,75 %.

[42] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 87), modifiziert

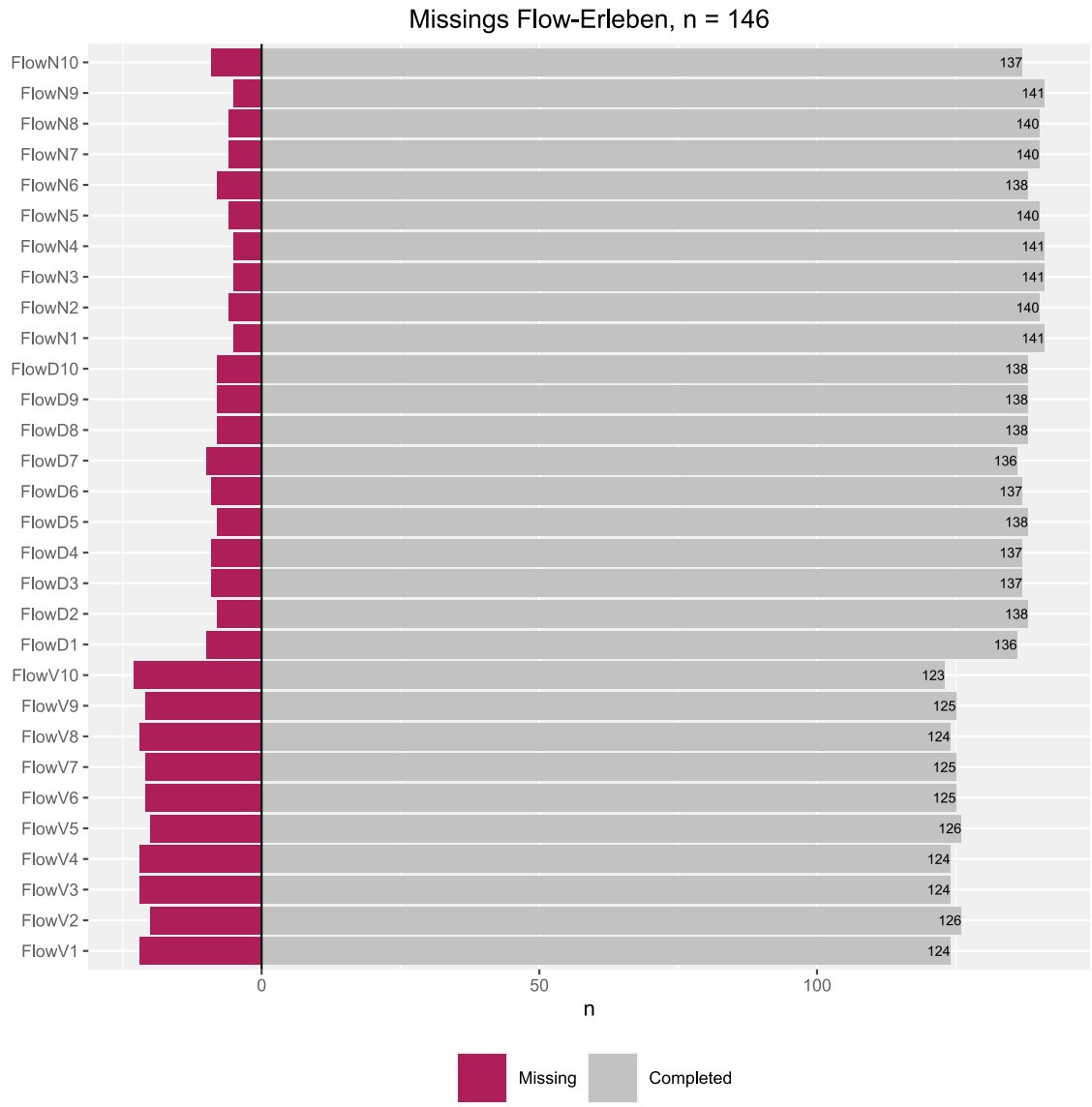


Abbildung 56: Verteilung der fehlenden Daten über die Items der Flow-Skala zum Testzeitpunkt 1.

Bei Betrachtung der Antwortverteilungen nach zeilenweisem Ausschluss fehlender Werte auf Konstruktebene (n = 95 über alle TZP) zeigt sich ein diffuses Bild über alle Items, wobei bereits hier Trends in den Daten über die drei Testzeitpunkte hinweg ersichtlich sind (Abbildung 57).

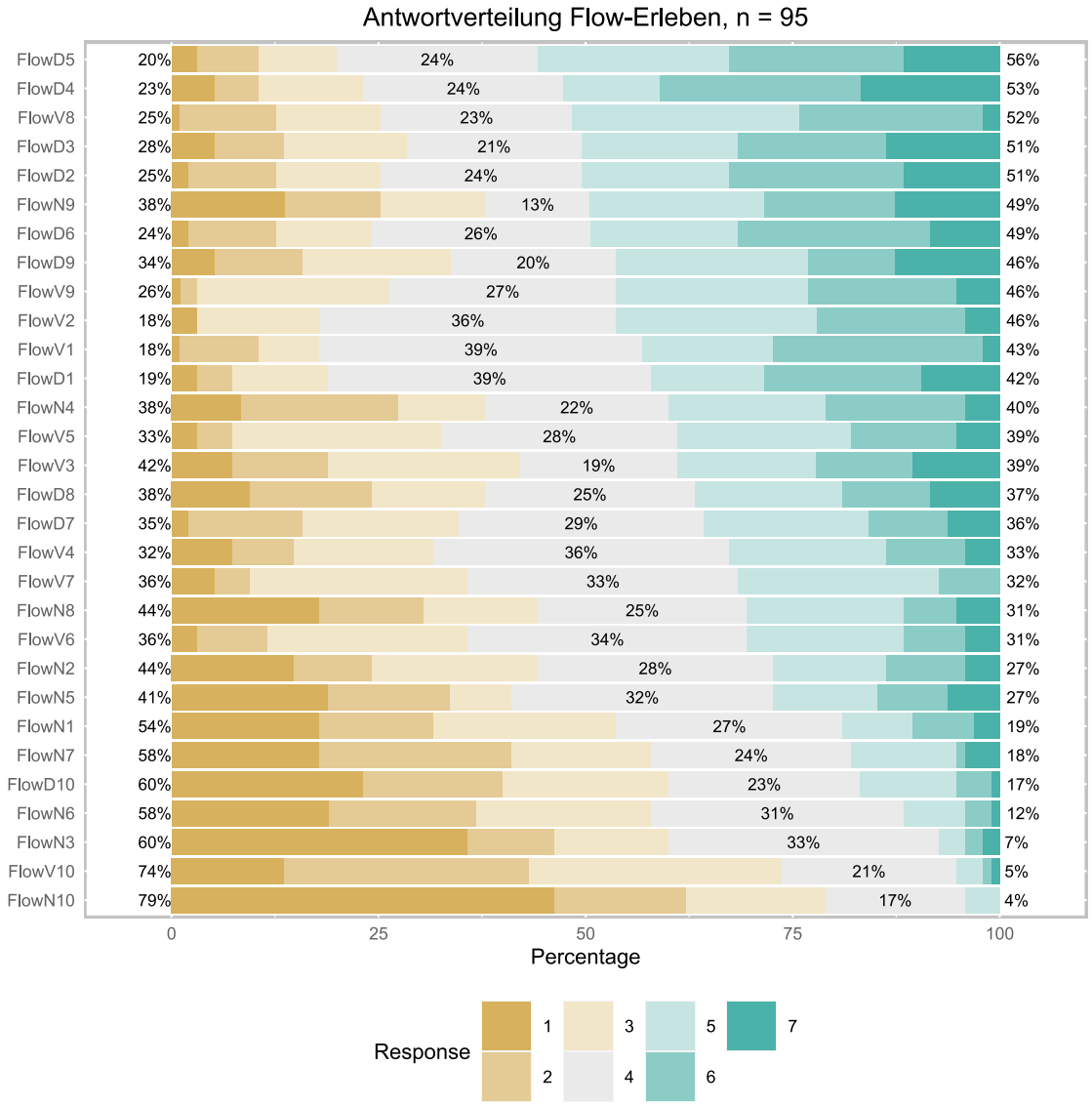


Abbildung 57: Antwortverteilung zur Flow-Skala bei Testzeitpunkt 1.

Die Daten weisen keine erhöhten Schiefen auf, extreme Wölbungen sind nicht erkennbar (Tabelle 24). Dennoch fallen für alle Items durchgeführte Kolmogorov-Smirnov-Tests hoch signifikant aus. Die Hypothese einer Normalverteilung der Daten kann somit nicht angenommen werden. Dieses Ergebnis konnte ebenfalls grafisch durch QQ-Plots verifiziert werden.

Durch paarweisen Ausschluss ergibt sich bei einem Dropout von 34,93 % eine verbleibende Stichprobe von 95 Versuchspersonen. Korrigierte Itemtrennschärfen im mittelmäßigen bis guten Bereich von $r_{it} = .36 – .73$ stellen sich zum ersten Testzeitpunkt als ausreichend gut dar. Ebenfalls liegen die Itemschwierigkeiten mit $29.65 < p_{Dahl} < 58.07$ im wünschenswerten Bereich. Die interne Konsistenz der Skala konnte mit $\alpha = .78$ als akzeptabel bestimmt werden. Zum zweiten und dritten Testzeitpunkt konnten diese Kennwerte gut repliziert werden, es zeigen sich lediglich einzelne geringe

Abweichungen von den wünschenswerten Trennschärfen und Schwierigkeiten im dritten Testzeitpunkt (Tabelle 26). Die interne Konsistenz der Skala nimmt im Verlauf der Lerneinheit zu (TZP2: $\alpha = .85$, TZP3: $\alpha = .89$).

Deskriptiv zeigen sich für den ersten Testzeitpunkt über alle Versuchspersonen mittlere Ausprägungen des *Flow*-Erlebens auf der siebenstufigen Likert-Skala ($M = 4.06$, $Mdn. = 4.10$, $SD = 0.79$, n = 95). Dieser Wert wird auch beim zweiten Testzeitpunkt gut repliziert ($M = 4.27$, $Mdn. = 4.30$, $SD = 1.05$, n = 95), wohingegen der dritte Testzeitpunkt eine deutlich geringere und damit in Bezug auf den Wertebereich der Skala unterdurchschnittliche Ausprägung des *Flow*-Erlebens zeigt ($M = 3.31$, $Mdn. = 3.50$, $SD = 1.17$, n = 95).

Die ermittelten Mittelwerte zeigen deskriptiv am ehesten eine Übereinstimmung mit den Erhebungssituationen eines Computerspieles ($M = 4.18$, $SD = 1.32$) oder dem Ende einer Vorlesung ($M = 4.21$, $SD = 1.12$; Rheinberg et al., 2003).

Da die mittels Likert-Skalen erfassten Daten intervallskaliert sind und darüber hinaus auf Basis des zentralen Grenzwertsatzes bei der gegebenen Stichprobengröße eine Annäherung an die Normalverteilung angenommen werden darf, sind die Voraussetzungen für die Durchführung von Einstichproben-t-Tests erfüllt. Diese werden zum Abgleich der erhobenen Daten mit Normierungsstudien herangezogen.

Einstichproben-t-Tests belegen eine mit mittlerem Effekt signifikant geringere Ausprägung des *Flow*-Erlebens zum Testzeitpunkt Vorbereitung (TZP1) der vorliegenden Studie als in der Normierungsstudie im Rahmen der mit n = 123 Personen erhobenen Bearbeitung einer Statistik-Aufgabe ($t(94) = -6.37$, $p < .001$, $d = -0.65$, n = 95). Folglich ist das *Flow*-Erleben in der normierten Erhebung zur Statistik-Aufgabe signifikant höher als in der Vorbereitung der vorgestellten Lerneinheit (Abbildung 58).

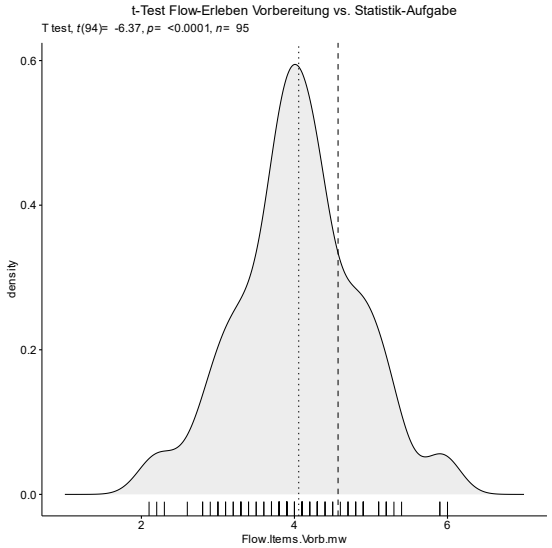


Abbildung 58: Einstichproben-t-Test zum Abgleich des Flow-Erlebens in der Vorbereitung der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Statistik-Aufgabe" (gestrichelte Linie). Das Flow-Erleben in der Lerneinheit ist signifikant geringer.

Im Abgleich mit den Normierungsstudien „Vorlesung Ende“ (n_{Norm} = 63; $t(94) = -1.91$, $p = .059$) und „Computerspiel Roboguard“ (n_{Norm} = 18 á 10 Messungen; $t(94) = -1.54$, $p = .13$)) ergeben sich keine signifikanten Unterschiede zur vorliegenden Erhebung während der Vorbereitung der Lerneinheit (Abbildung 59).

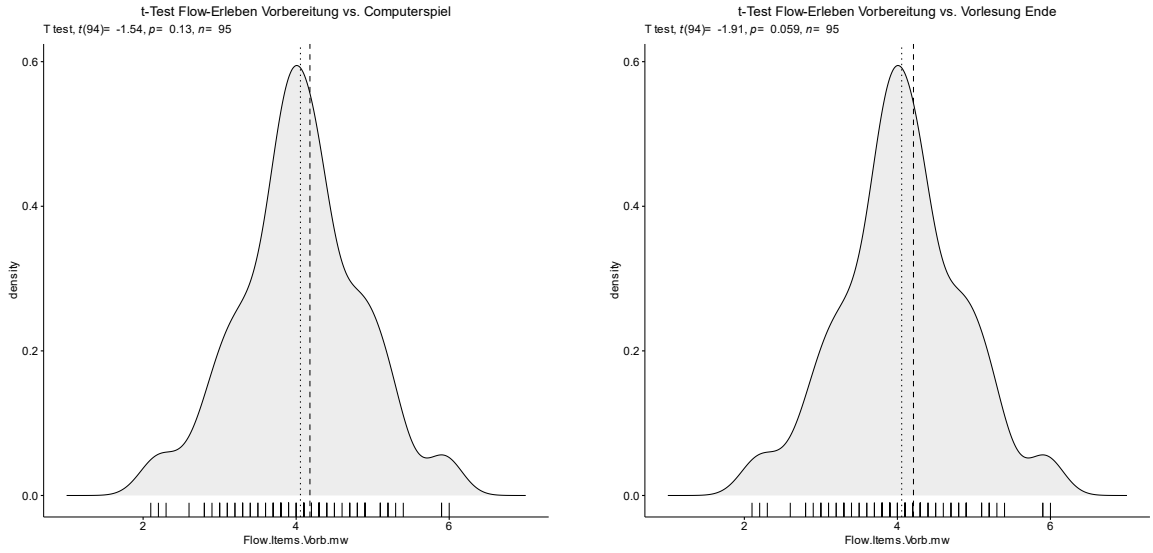


Abbildung 59: Abbildung links: Einstichproben-t-Test zum Abgleich des Flow-Erlebens in der Vorbereitung der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Computerspiel Roboguard " (gestrichelte Linie). Abbildung rechts: Normierung „Vorlesung Ende“ im Abgleich mit dem Flow-Erleben zum TZP1. Ein Effekt konnte nicht nachgewiesen werden.

Ähnlich stellt sich der Abgleich der aufgefundenen Werte für das *Flow*-Erleben mit der Normierung für den Testzeitpunkt Durchführung (n = 95) dar. Auch hier kann keine signifikante Abweichung von den beiden Normierungsstudien „Computerspiel“ ($t(94) = 0.81$, $p = .42$) und „Vorlesung Ende“ ($t(94) = 0.53$, $p = .595$) nachgewiesen werden (Abbildung 60).

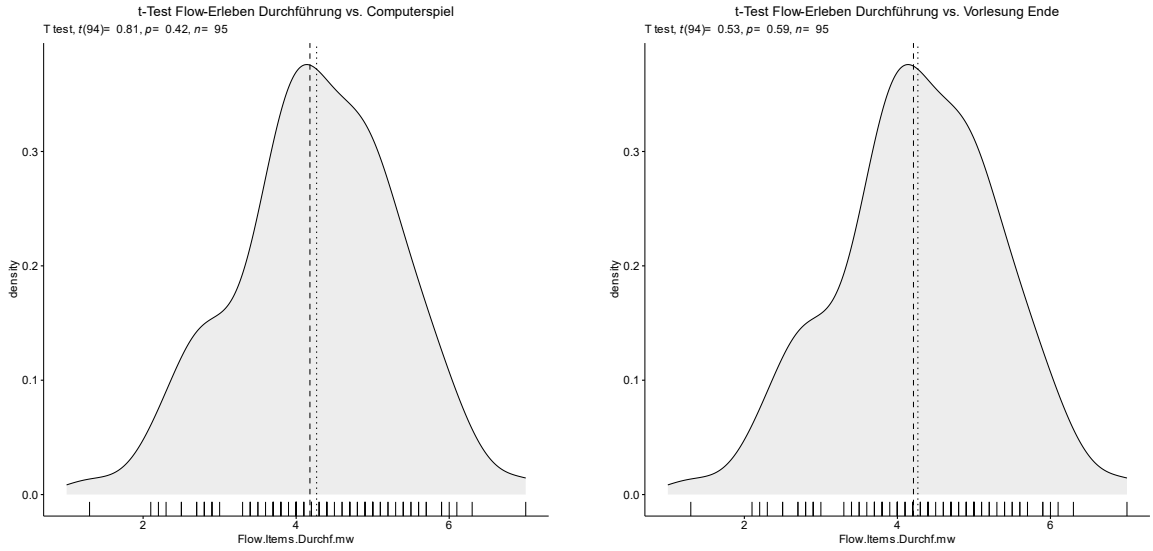


Abbildung 60: Abgleich des Flow-Erlebens in der Durchführungsphase der Lerneinheit mit den Normierungsstudien Computerspiel (links) und Vorlesung Ende (rechts).

Der Testzeitpunkt Nachbereitung (n = 95) weist ein mit mittlerem Effekt signifikant geringeres *Flow*-Erleben auf als die Normierungsstudien „Computerspiel“ ($t(94) = -7.24$, $p < .001$, $d = -0.74$) und Vorlesung Ende ($t(94) = -7.49$, $p < .001$, $d = -0.77$; Abbildung 61).

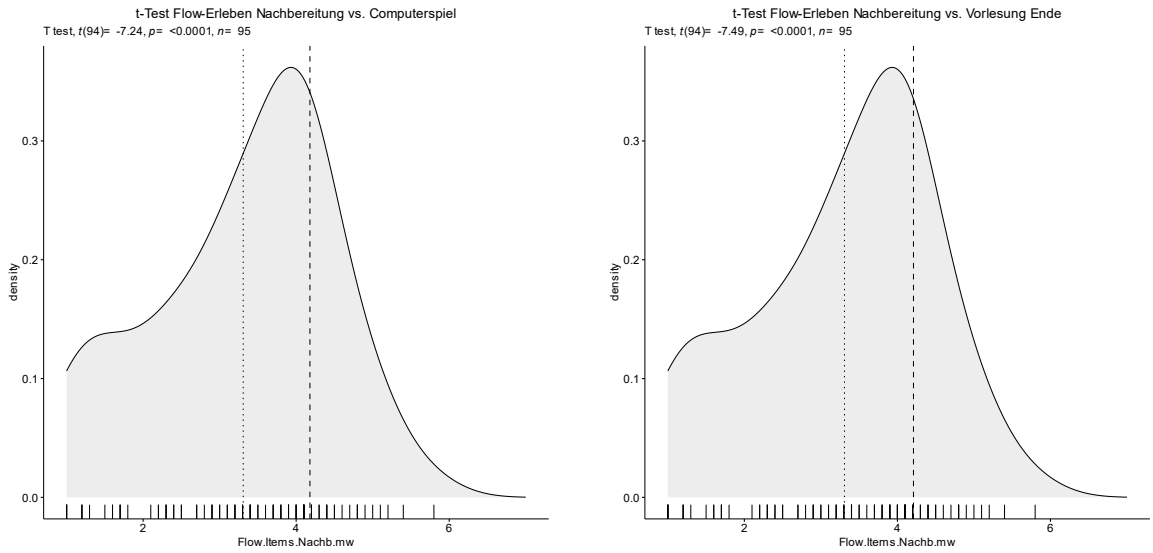


Abbildung 61: Abgleich des Flow-Erlebens in der Nachbereitung der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Computerspiel Roboguard " (gestrichelte Linie). Das Flow-Erleben ist in der Nachbereitung der Lerneinheit mit mittlerem Effekt geringer als in der Normierungsstudie.

Nach Ermittlung der deskriptiven Kennwerte erfolgt die inferenzstatistische Prüfung des durch zeilenweisen Ausschluss erzielten Datensatzes mit n = 95 über alle drei Testzeitpunkte. Insbesondere TZP1 weist Ausreißer im Datensatz auf, welche jedoch in der Definition nach Eid et al. (2017) nicht als Extremwerte identifiziert und in der Folge beibehalten wurden. Aufgrund der Stichprobengröße darf auf Basis des zentralen Grenzwertsatzes von einer Annäherung an die Normalverteilung ausgegangen werden (Eid et al., 2017). Dies kann für die nunmehr verwendete Stichprobe auch grafisch mittels QQ-Plots plausibilisiert werden (Abbildung 62).

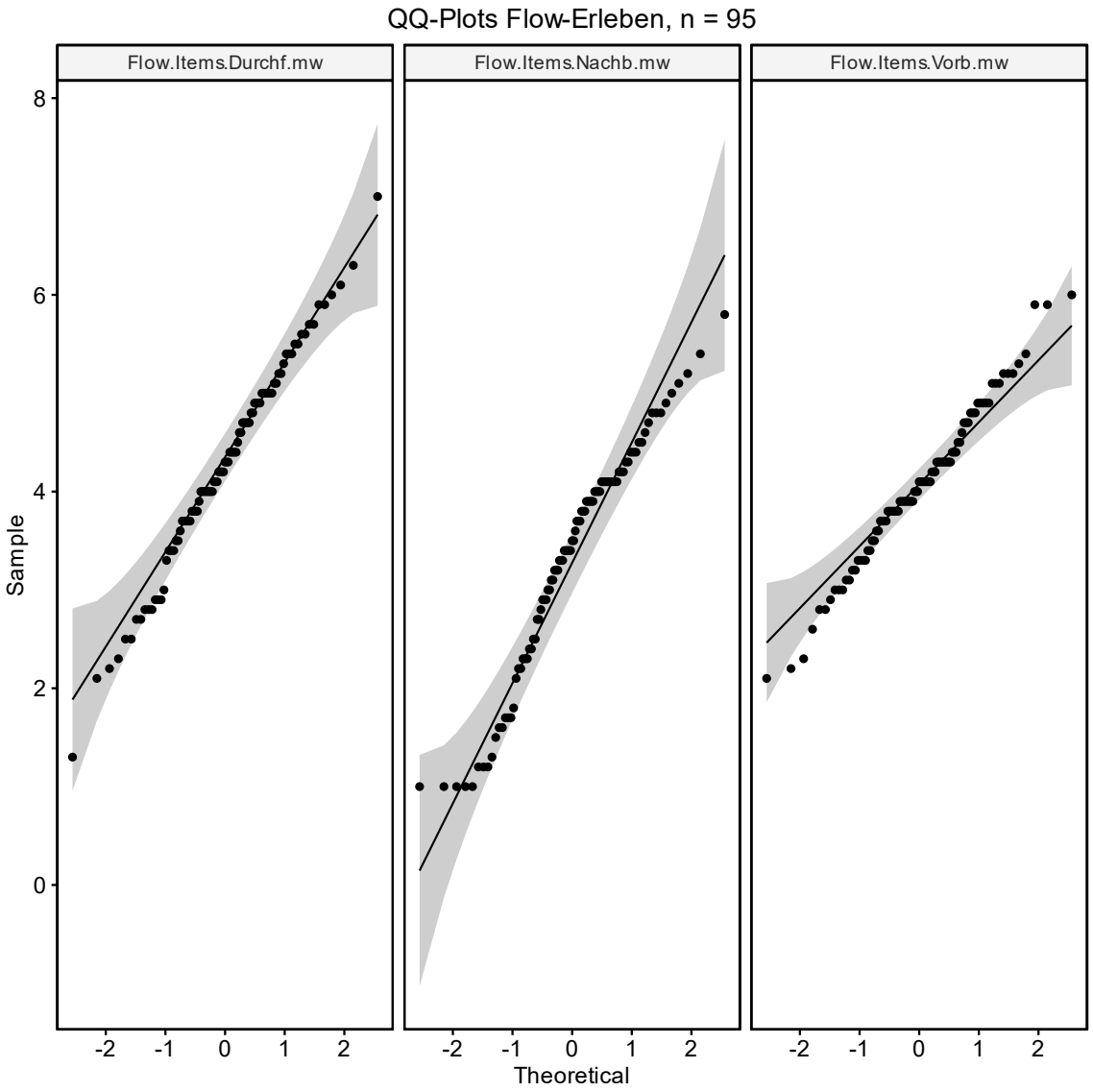


Abbildung 62: QQ-Plots für die Verteilungen zum Konstrukt Flow über die drei Testzeitpunkte. Eine Annäherung an die Normalverteilung ist in dieser Stichprobe erkennbar.

Bei einem signifikanten Ergebnis des Mauchly-Tests ($W = 0.918$, $p = .018$) kann die Nullhypothese der Sphärizitätsbedingung nicht angenommen werden. Da die Abweichung von der Sphärizitätsbedingung mit $\varepsilon > .75$ gering ist, erfolgt eine Korrektur der Freiheitsgrade nach Huynh-Feldt. Das *Flow*-Erleben unterscheidet sich mit mittlerem Effekt hoch signifikant zwischen den Testzeitpunkten ($F(1.88,\ 177.04) = 22.481$, $p < .001$, $\eta_G^2 = 0.142$; Abbildung 63). Paarweise t-Tests mit Bonferroni-Korrektur zeigen mit großem Effekt hoch signifikante Abweichungen der Mittelwerte zwischen TZP2 und TZP3 ($t(94) = 5.99$, $p < .001$, $d = 0.86$) sowie signifikante Abweichungen mit mittlerem Effekt zwischen TZP3 und TZP1 ($t(94) = -4.63$, $p < .001$, $d = -0.75$).

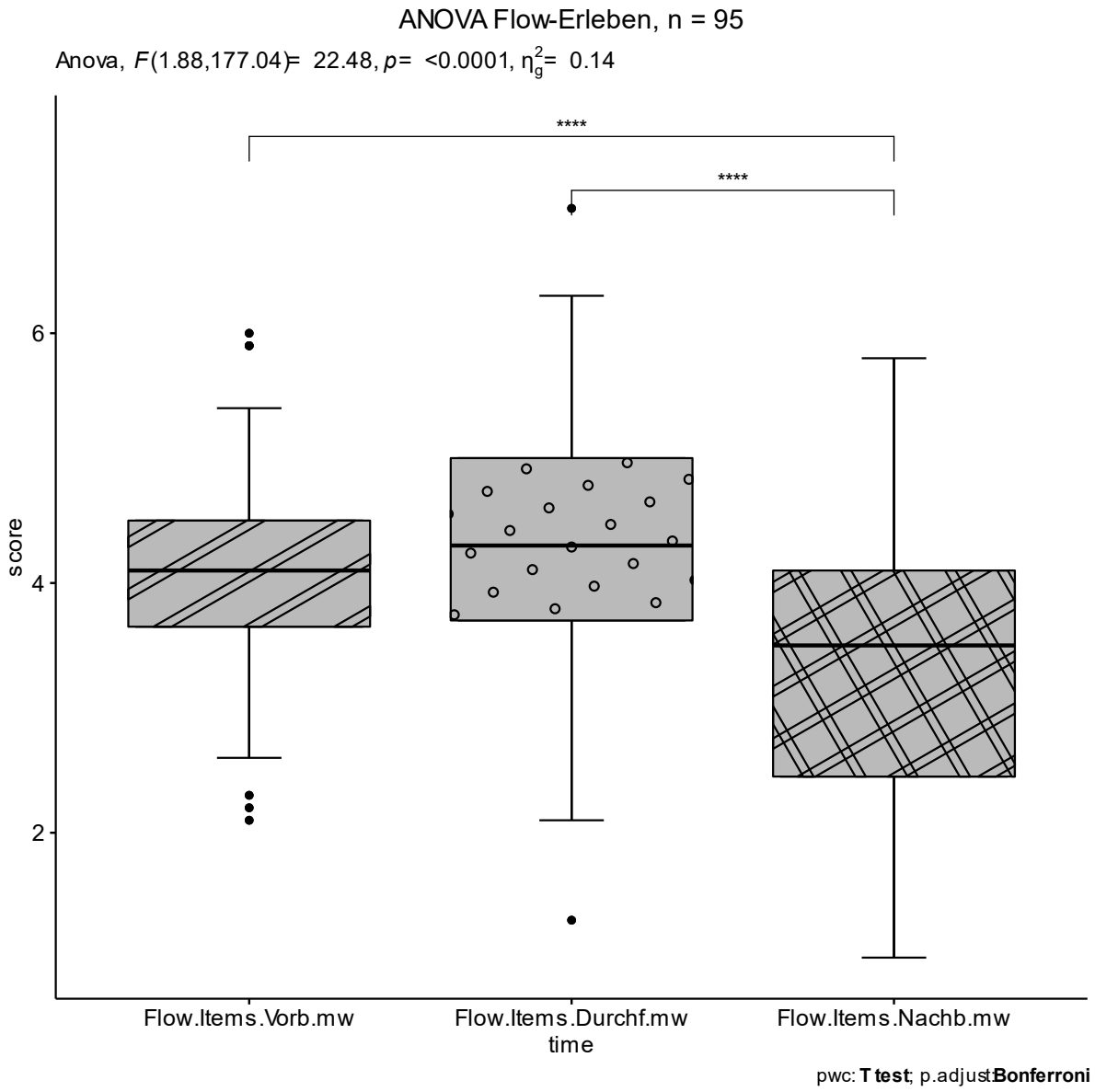


Abbildung 63: ANOVA Flow-Erleben. Die ANOVA mit Huynh-Feldt-Korrektur deckt in Kombination mit gepaarten t-Tests signifikante Rückgänge des Flow-Erlebens im Verlauf der Lerneinheit auf.

Besorgniskomponente des *Flows*

Die Daten zur Besorgniskomponente des *Flows* weisen weder Kreuzungsmuster noch einen extremen Anteil fehlender Werte auf. Sowohl anhand signifikanter Kolmogorov-Smirnov-Tests als auch durch QQ-Plots konnte keine Normalverteilung der Daten festgestellt werden. Auch die Antwortverteilung bildet die Schiefe der Verteilung und die zu erwartende Abweichung von der Normalverteilung ab (Abbildung 65). Entsprechend der Verschiebung der Verteilungen auf Itemebene (Abbildung 64) zeigen drei Items leicht erhöhte Schiefen (Items FlowV11 mit 2.17, FlowN12 mit 2.04 und FlowN13 mit 2.47). Aufgrund der nur geringfügigen Überschreitung der Grenzwerte für eine Normalverteilung (Eid et al., 2017) bei ansonsten problemlosen Verteilungen (Tabelle 24;

Tabelle 25; Tabelle 26) werden alle Items beibehalten. Durch paarweisen Ausschluss fehlender Daten ergibt sich ein maximaler Dropout von 21,9 %.

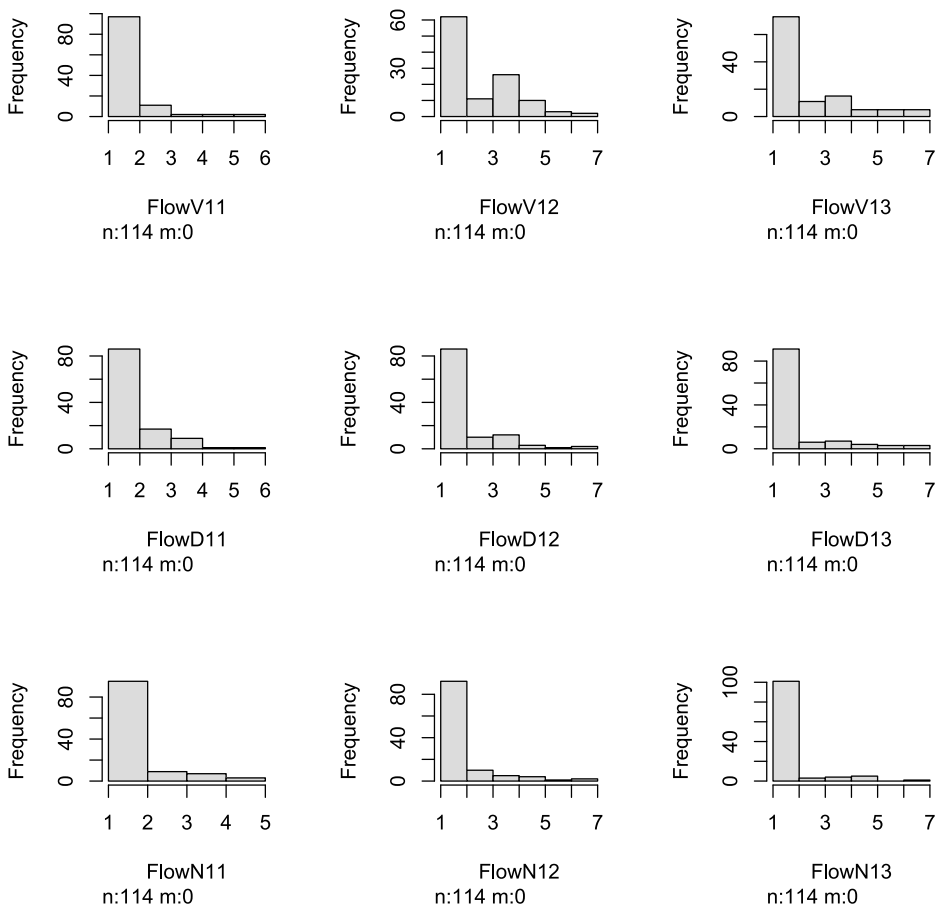


Abbildung 64: Histogrammplots der Items zur Skala Besorgniskomponente des Flows. Die Schiefe der Verteilungen ist deutlich erkennbar.

Die Verteilung der Antworthäufigkeiten nach Ausschluss fehlender Daten über alle Testzeitpunkte lässt bereits auf eher geringe Dissonanz unter den Befragten hinsichtlich der Inhalte der Subskala Besorgnis schließen (Abbildung 65). Weitere Erkenntnisse hierzu liefert die Itemschwierigkeit als Popularitätsindex.

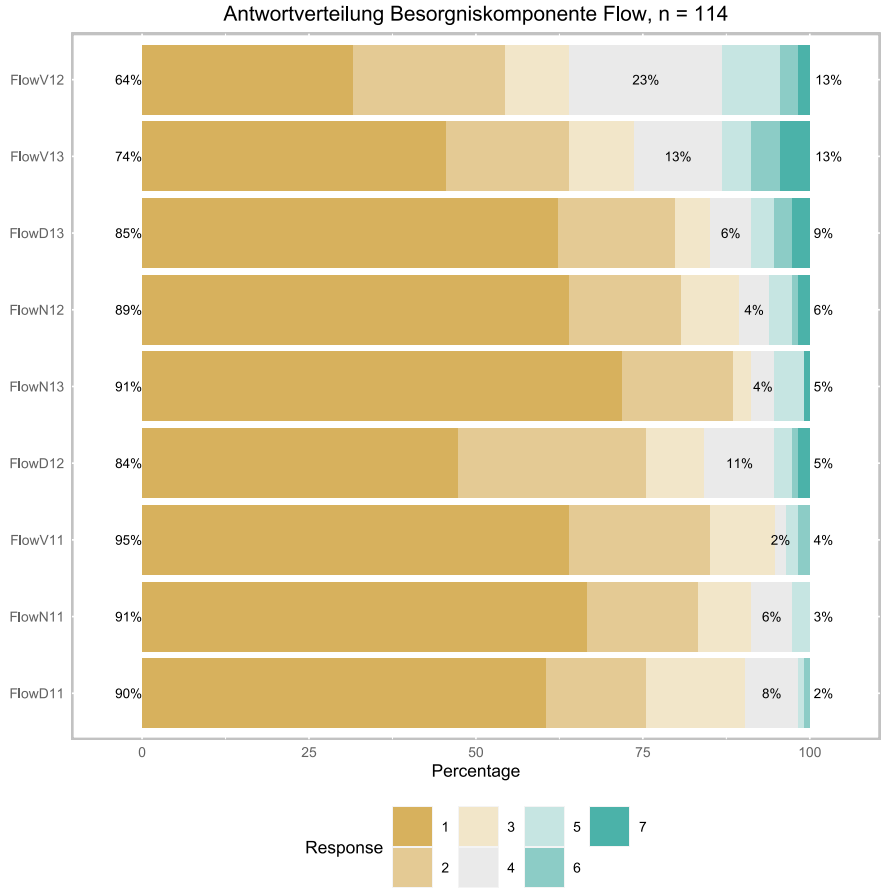


Abbildung 65: Antwortverteilung zur Skala Besorgniskomponente des Flows.

Eine Itemanalyse über die Daten des TZP1 (n = 114) liefert akzeptable bis gute Trennschärfen im Bereich von $r_{it} = .42 – .78$ sowie eine akzeptable interne Konsistenz ($\alpha = .72$). Unzureichende Itemschwierigkeit zeigt ein Item (Item FlowV11) mit einem Wert von $p_{Dahl} = 10.23$, die beiden übrigen Items liegen mit Werten von $p_{Dahl} = 23.83$ und $p_{Dahl} = 28.22$ formal im wünschenswerten Bereich von $20 < p_{Dahl} < 80$. Die Itemschwierigkeit nimmt im weiteren Verlauf der Erhebung noch weiter ab, sodass während Durchführung und Nachbereitung keine ausreichende Itemschwierigkeit erzeugt werden konnte. Die interne Konsistenz des Testinstruments zeigt sich im Verlauf der Lerneinheit als sehr volatil (TZP2: $\alpha = .62$, TZP3: $\alpha = .74$). Die aufgefundenen Itemtrennschärfen sind durchweg akzeptabel (Tabelle 25; Tabelle 26).

Deskriptiv zeigt sich für den ersten Testzeitpunkt bereits eine geringe Ausprägung der Besorgniskomponente ($M = 2.25$, $Mdn. = 2.00$, $SD = 1.20$, n = 114), welche über den zweiten ($M = 1.89$, $Mdn. = 1.67$, $SD = 1.01$, n = 114) bis hin zum dritten Testzeitpunkt ($M = 1.64$, $Mdn. = 1.00$, $SD = 0.95$, n = 114) noch weiter abnimmt.

Da die mittels Likert-Skalen erfassten Daten intervallskaliert sind und darüber hinaus auf Basis des zentralen Grenzwertsatzes bei der gegebenen Stichprobengröße eine Annäherung an die Normalverteilung angenommen werden darf, sind die Voraussetzungen für die Durchführung von Einstichproben-t-Tests erfüllt. Diese werden zum Abgleich der erhobenen Daten mit Normierungsstudien herangezogen.

Die Besorgniskomponente des *Flows* zum ersten Testzeitpunkt (n = 114) ist mit kleinem Effekt signifikant höher als die Besorgnis der Versuchspersonen in der Normierungsstudie „Computerspiel Roboguard“ ($t(113) = 4.05$, $p < .001$, $d = 0.38$), aber mit kleinem Effekt signifikant niedriger als die Besorgnis der n = 20 (49 Messungen) Versuchspersonen in der Normierungsstudie „ESM“ ($t(113) = -2.35$, $p = .02$, $d = -0.22$; Rheinberg et al., 2003; Abbildung 66).

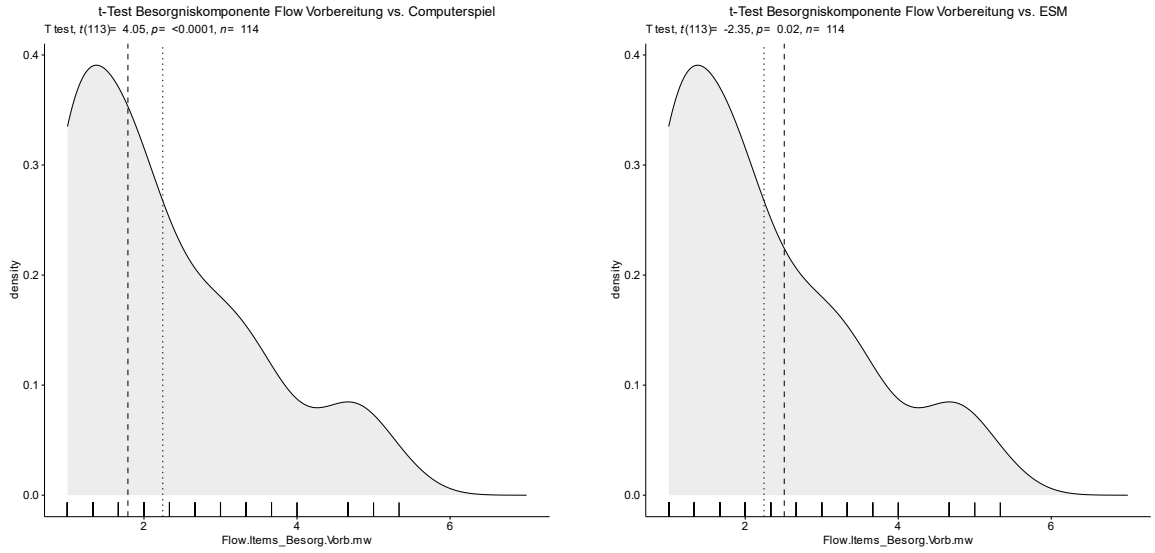


Abbildung 66: Einstichproben-t-Test zum Abgleich der Besorgniskomponente des Flow-Erlebens in der Vorbereitung der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Computerspiel Roboguard" (gestrichelte Linie, linke Abbildung) und der ESM-Studie (rechte Abbildung). Die Besorgnis liegt in der vorliegenden Lerneinheit deskriptiv zwischen diesen beiden Normierungen, unterscheidet sich jedoch von beiden signifikant.

Die Besorgniskomponente der Schüler:innen in der Lerneinheit unterscheidet sich mit $t(113) = 1.10$, $p = .27$ während der Durchführung (n = 114) und mit $t(113) = -1.64$, $p = .10$ in der Nachbereitung (n = 114) nicht signifikant von der Normierungsstudie „Computerspiel Roboguard“ (Abbildung 67). Der Abgleich mit den übrigen Normierungsstudien nach Rheinberg et al. (2003) fällt durchweg hoch signifikant aus.

Aufgrund der bereits deskriptiv ersichtlichen großen Differenzen der Mittelwerte wird auf die Ausführung im Einzelnen hier verzichtet.

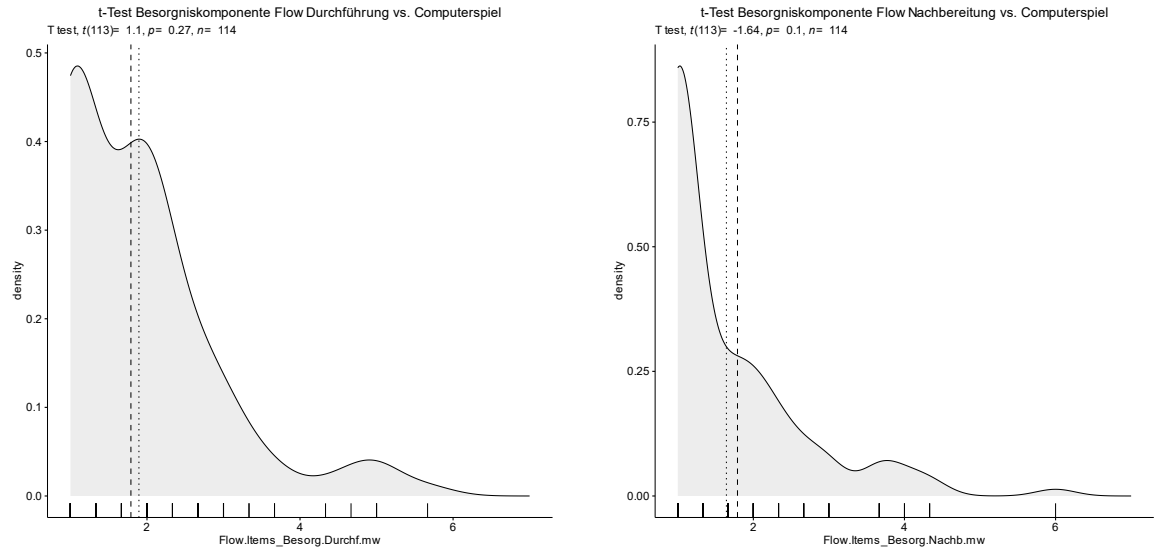


Abbildung 67: Einstichproben-t-Test zum Abgleich der Besorgniskomponente des Flow-Erlebens in der Durchführung der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Computerspiel Roboguard" (gestrichelte Linie, linke Abbildung). Die rechte Abbildung zeigt den Abgleich derselben Normierungsstudie mit dem Testzeitpunkt Nachbereitung. Die Besorgnis unterscheidet sich in beiden Fällen nicht signifikant von der Computerspiel-Studie.

Im weiteren Verlauf erfolgt die Prüfung der Voraussetzungen für eine Varianzanalyse des Konstrukts Besorgniskomponente des *Flows* mit einer Stichprobe von n = 114 Proband:innen. Zunächst wurden die Datensätze für die inferenzstatistischen Analysen grafisch und rechnerisch auf Ausreißer überprüft. Neben mehreren nicht extremen Ausreißern konnte ein Fall als Extremwert identifiziert und aus der weiteren Analyse ausgeschlossen werden (n = 113). Weiterhin ist aufgrund der verbleibenden Stichprobengröße von einer genäherten Normalverteilung gemäß dem zentralen Grenzwertsatz auszugehen.

Ein Mauchly-Test auf Sphärizität der Daten fällt signifikant aus ($W = 0.904$, $p = .004$), das Kriterium der Sphärizität ist somit nicht erfüllt. Da die Abweichung von der Sphärizität das Kriterium von $\varepsilon > .75$ übersteigt, erfolgt die Korrektur der Freiheitsgrade nach Huynh-Feldt.

Die Besorgniskomponente des *Flows* zeigt inferenzstatistisch signifikante Mittelwertsunterschiede mit kleinem Effekt ($F(1.85, 207.6) = 9.12$, $p < .001$, $\eta_G^2 = 0.051$). Post-hoc Analysen mit gepaarten t-Tests und Bonferroni-Korrektur offenbaren eine hochsignifikante Abnahme der Besorgniskomponente vom ersten zum dritten Testzeitpunkt mit mittlerem Effekt ($t(112) = 3.96$, $p < .001$, $d = -0.55$) (Abbildung 68). Die übrigen Mittelwertsunterschiede stellen sich nicht signifikant dar.

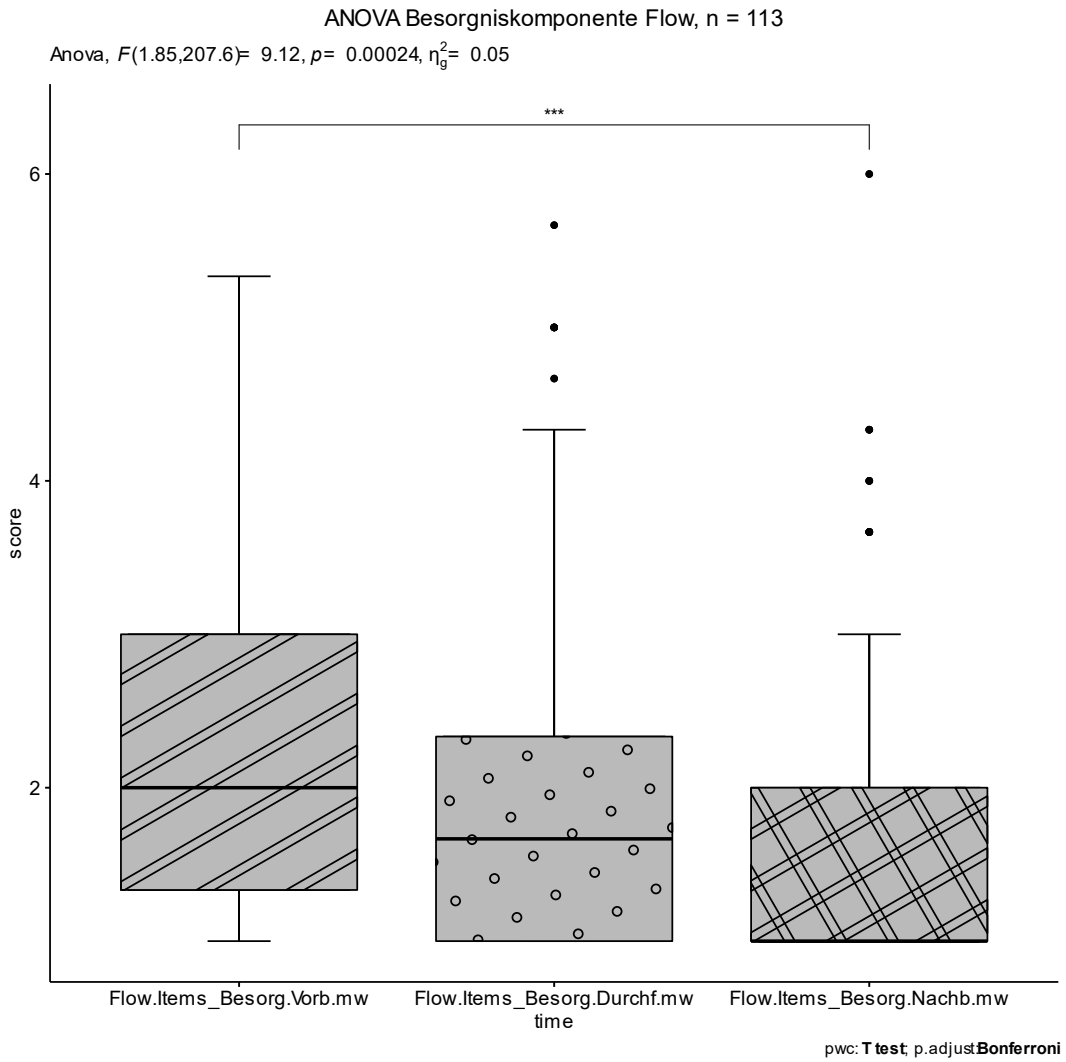


Abbildung 68: ANOVA Besorgniskomponente des Flows. Grafische Darstellung der Ergebnisse aus der nach Huynh-Feldt korrigierten ANOVA für das Konstrukt Besorgniskomponente des Flows.

Passung von Fähigkeit und Anforderung

Eine Analyse der Daten zur Passung von Fähigkeit und Anforderung zum ersten Testzeitpunkt zeigt keine Kreuzungsmuster. Die Daten weisen vergleichsweise wenige fehlende Werte auf (Abbildung 69).

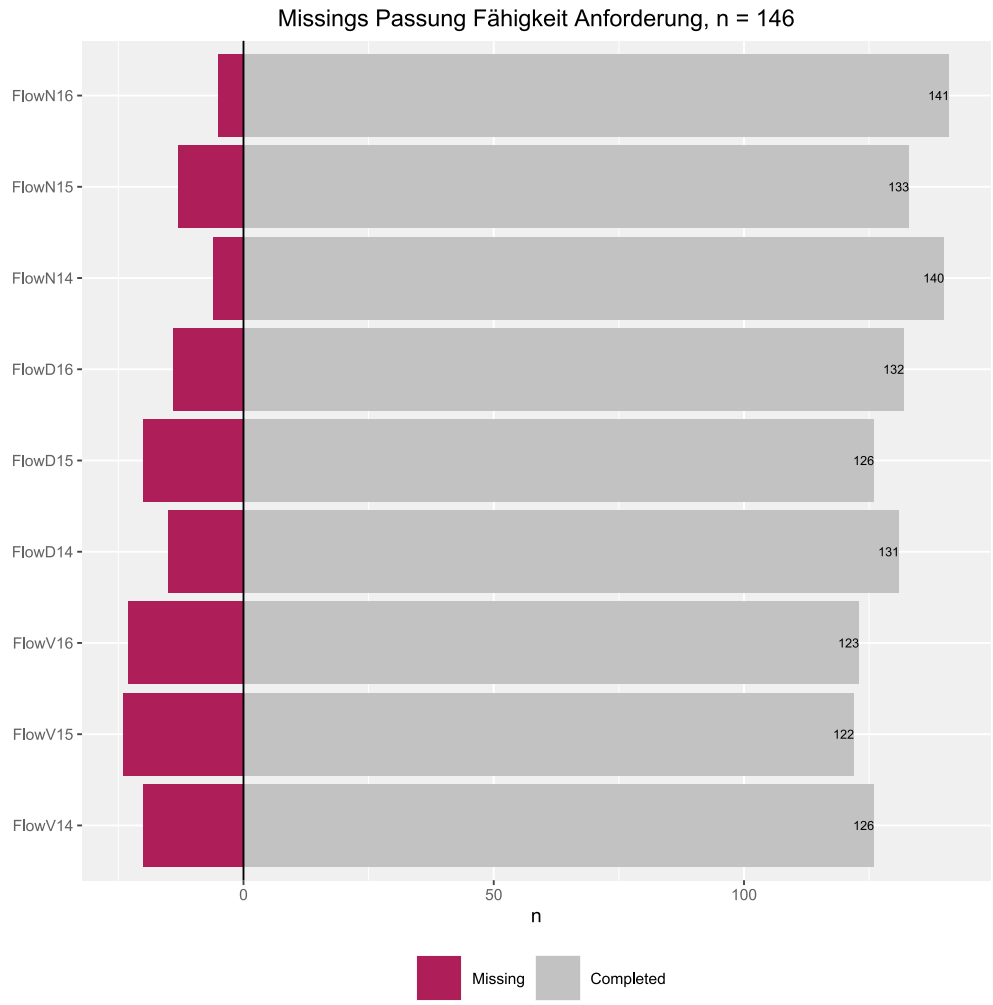


Abbildung 69: Übersicht über die Verteilung der fehlenden Werte der Items zu Passung von Anforderung und Fähigkeit.

Die Stichprobe zur Verteilungsanalyse umfasst n = 103 Versuchspersonen. Extreme Ausprägungen der Verteilungen auf Itemebene sind nicht auszumachen (Abbildung 70; Abbildung 71; Tabelle 24; Tabelle 25; Tabelle 26). Sowohl durchgeführte Kolmogorov-Smirnov-Tests als auch ein grafischer Abgleich mit QQ-Plots zeigen keine Hinweise auf Normalverteilung der Daten.

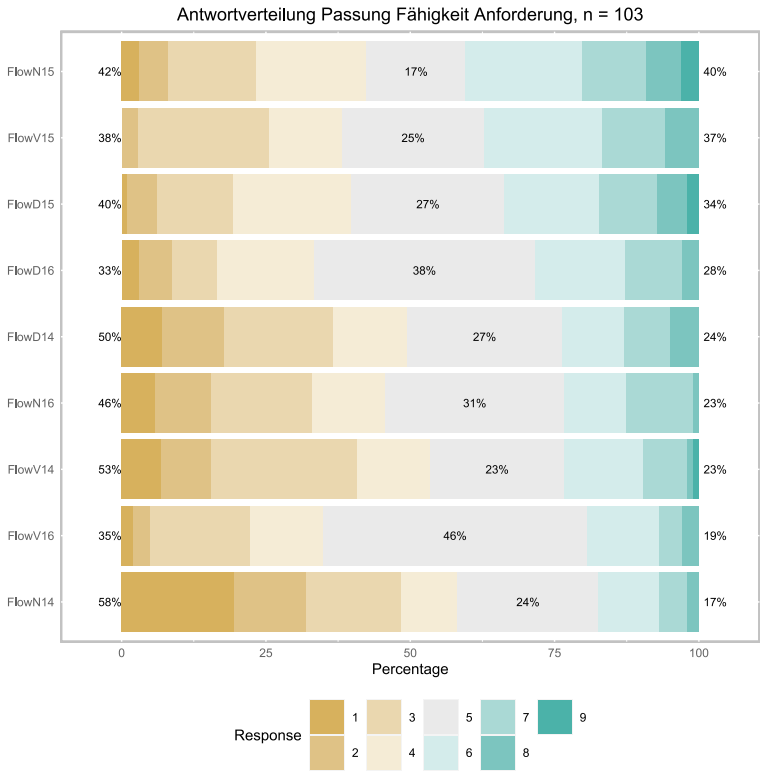


Abbildung 70: Verteilung der Ratingoptionen zur Subskala Passung von Fähigkeit und Anforderung.

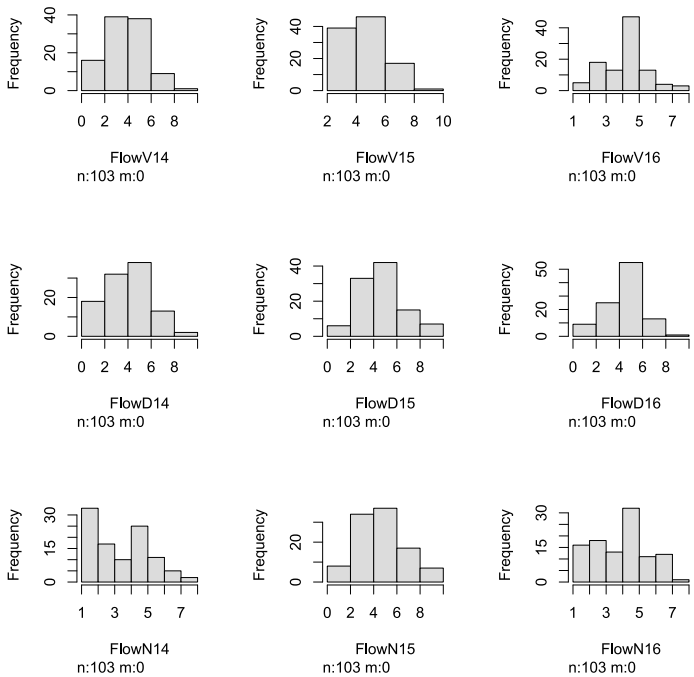


Abbildung 71: Histogramme der einzelnen Items der Subskala Passung von Fähigkeit und Anforderung. Teils deutliche Abweichungen von der Normalverteilung sind insbesondere zu TZP1 und TZP3 ersichtlich.

Aufgrund der inhaltlichen Aussage der drei Items ergibt sich keine konsistente Skala, vielmehr dienen die Items der Aufklärung der Auswirkungen von Fähigkeit, Anforderung und Passung dieser beiden Aspekte im Kontext des *Flow*-Erlebens innerhalb verschiedener Handlungskontexte (Rheinberg et al., 2019). Entsprechend wäre eine statistische Auswertung der Itemkennwerte im Sinne einer einheitlichen Subskala nicht zielführend. Die Itemschwierigkeiten liegen im mittleren Bereich (Tabelle 23).

Tabelle 23: Itemschwierigkeiten und Maße der zentralen Tendenz für die Einzelitems zur Erfassung von Anforderung, Fähigkeit und Passung von Anforderung und Fähigkeit, n = 103.

Konstrukte	**TZP**	p_{Dahl} **(20 < p < 80)**	***M***	***Mdn.***	***SD***
Anforderung (1 Item, Skalierung 1-10)	TZP1	35.49	4.19	4.00	1.75
	TZP2	37.97	4.42	5.00	1.99
	TZP3	29.77	3.68	4.00	1.94
Fähigkeit (1 Item, Skalierung 1-10)	TZP1	44.23	4.98	5.00	1.64
	TZP2	46.49	5.18	5.00	1.95
	TZP3	46.17	5.16	5.00	2.07
Passung (1 Item, Skalierung 1-10)	TZP1	40.56	4.65	5.00	1.36
	TZP2	43.04	4.87	5.00	1.59
	TZP3	37.43	4.37	5.00	1.71

Die wahrgenommene Anforderung nimmt unter den Versuchspersonen (n = 103) ausgehend von einer mittleren Ausprägung auf der zehnstufigen Likertskala (Skalierung 1 - 10) zum ersten Testzeitpunkt (*M* = 4.19, *Mdn*. = 4.00, *SD* = 1.75) in der experimentellen Phase (TZP2) deskriptiv leicht zu (*M* = 4.42, *Mdn*. = 5.00, *SD* = 1.99) und zeigt sich zu TZP3 wiederum leicht rückläufig (*M* = 3.68, *Mdn*. = 4.00, *SD* = 1.94).

Ihre eigenen Fähigkeiten in Bezug auf die gestellten Aufgaben schätzen die n = 103 Proband:innen zu Beginn der Lerneinheit auf der zehnstufigen Likertskala (Skalierung 1 - 10) als durchschnittlich ein (*M* = 4.98, *Mdn*. = 5.00, *SD* = 1.64). Diese Selbsteinschätzung bleibt im Verlauf der Einheit nahezu unverändert (TZP2: *M* = 5.18, *Mdn*. = 5.00, *SD* = 1.95; TZP3: *M* = 5.16, *Mdn*. = 5.00, *SD* = 2.07).

Nach paarweisem Ausschluss fließen 103 Befragte in die Auswertung der zehnstufigen Likertskala (Skalierung 1 - 10) zur Passung von Fähigkeit und Anforderung ein. Hier zeigt sich in der Experimentierphase (TZP2) relativ betrachtet die höchste Ausprägung dieses Merkmals (*M* = 4.87, *Mdn*. = 5.00, *SD* = 1.59), gegenüber leicht niedrigeren

Passungen während der Vorbereitungsphase (TZP1: *M* = 4.65, *Mdn*. = 5.00, *SD* = 1.36) und der Nachbereitung (TZP3: *M* = 4.37, *Mdn*. = 5.00, *SD* = 1.71).

In der Zusammenschau ist deskriptiv eine geringfügige Zunahme der Fähigkeit der Proband:innen erkennbar. Die Anforderungen werden in der Experimentierphase als leicht höher als in den digitalen Phasen wahrgenommen. Angelehnt daran ergibt sich der Verlauf der Passung von Fähigkeit und Anforderung mit einem lokalen Maximum zu TZP2 (Abbildung 72). Nachfolgend werden diese deskriptiv ermittelten Verläufe inferenzstatistisch geprüft.

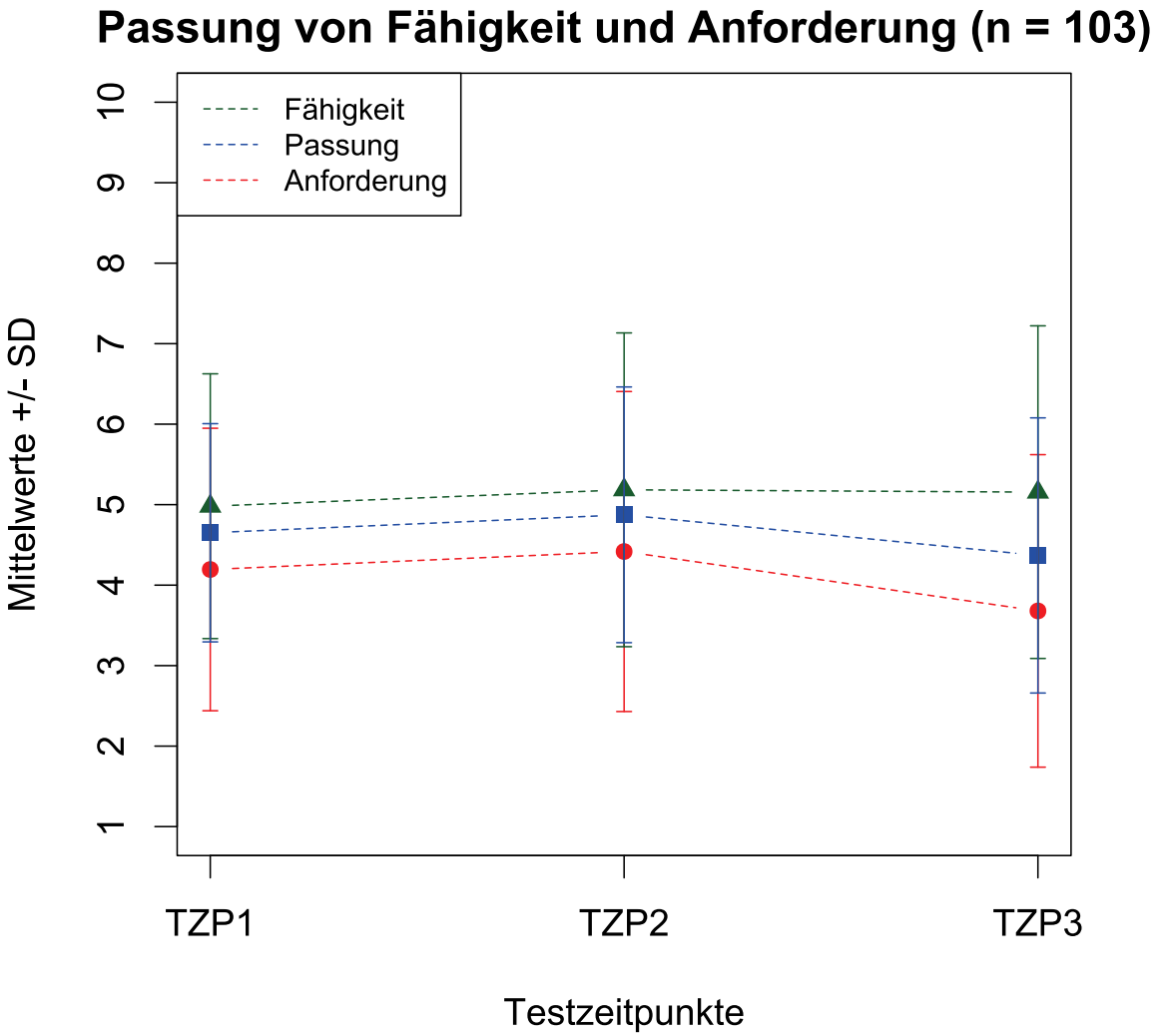


Abbildung 72: Verlauf der Mittelwerte der Items zu Anforderung, Fähigkeit und Passung über die drei Testzeitpunkte.

Die weitere Auswertung erfolgt für alle drei Items als inferenzstatistische Unterschiedsprüfung über die Testzeitpunkte hinweg. Die Daten wiesen keine Extremwerte auf. Wenige bestehende Ausreißer stellten keine Extremwerte dar und wurden beibehalten.

Neben der aufgrund der Stichprobengröße annehmbaren Annäherung an die Normalverteilung konnte diese Testvoraussetzung auch anhand von QQ-Plots grafisch plausibilisiert werden (Abbildung 73; Abbildung 74; Abbildung 75).

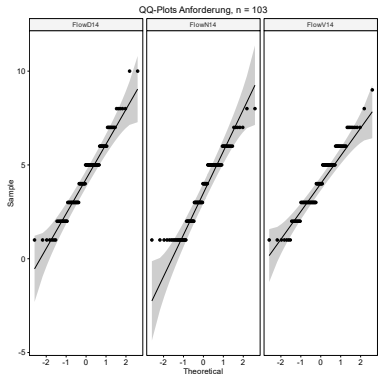


Abbildung 73: QQ-Plots für das Item zur Anforderung.

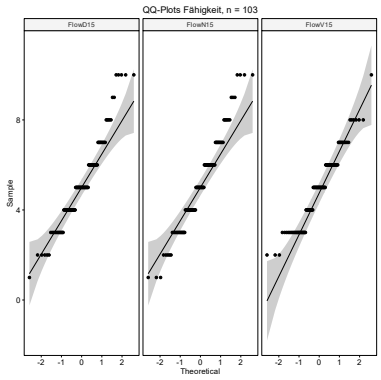


Abbildung 74: QQ-Plots für das Item zur Fähigkeit.

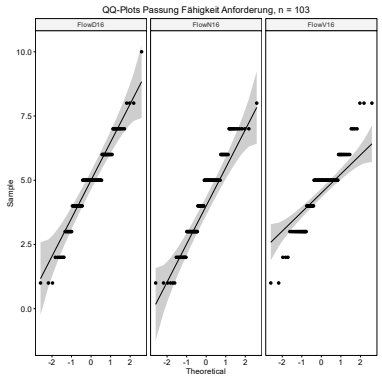


Abbildung 75: QQ-Plots für das Item zur Passung.

Für die Daten der Stichprobe zum Item Anforderung (n = 103) ist anhand eines nichtsignifikanten Mauchly-Tests die Sphärizität der Daten anzunehmen ($W = 0.97$, $p = .263$). In der ANOVA zeigen sich mit kleinem Effekt signifikante Unterschiede in der wahrgenommenen Anforderung über die drei Testzeitpunkte hinweg ($F(2, 204) = 4.38$, $p = .014$, $\eta_G^2 = 0.026$; Abbildung 76). *Post-hoc*-Prozeduren mit gepaarten t-Tests mit Bonferroni-Korrektur belegen einen signifikanten Rückgang der Anforderung mit kleinem Effekt zwischen dem zweiten und dem dritten Testzeitpunkt ($t(102) = 2.70$, $p = .024$, $d = 0.376$).

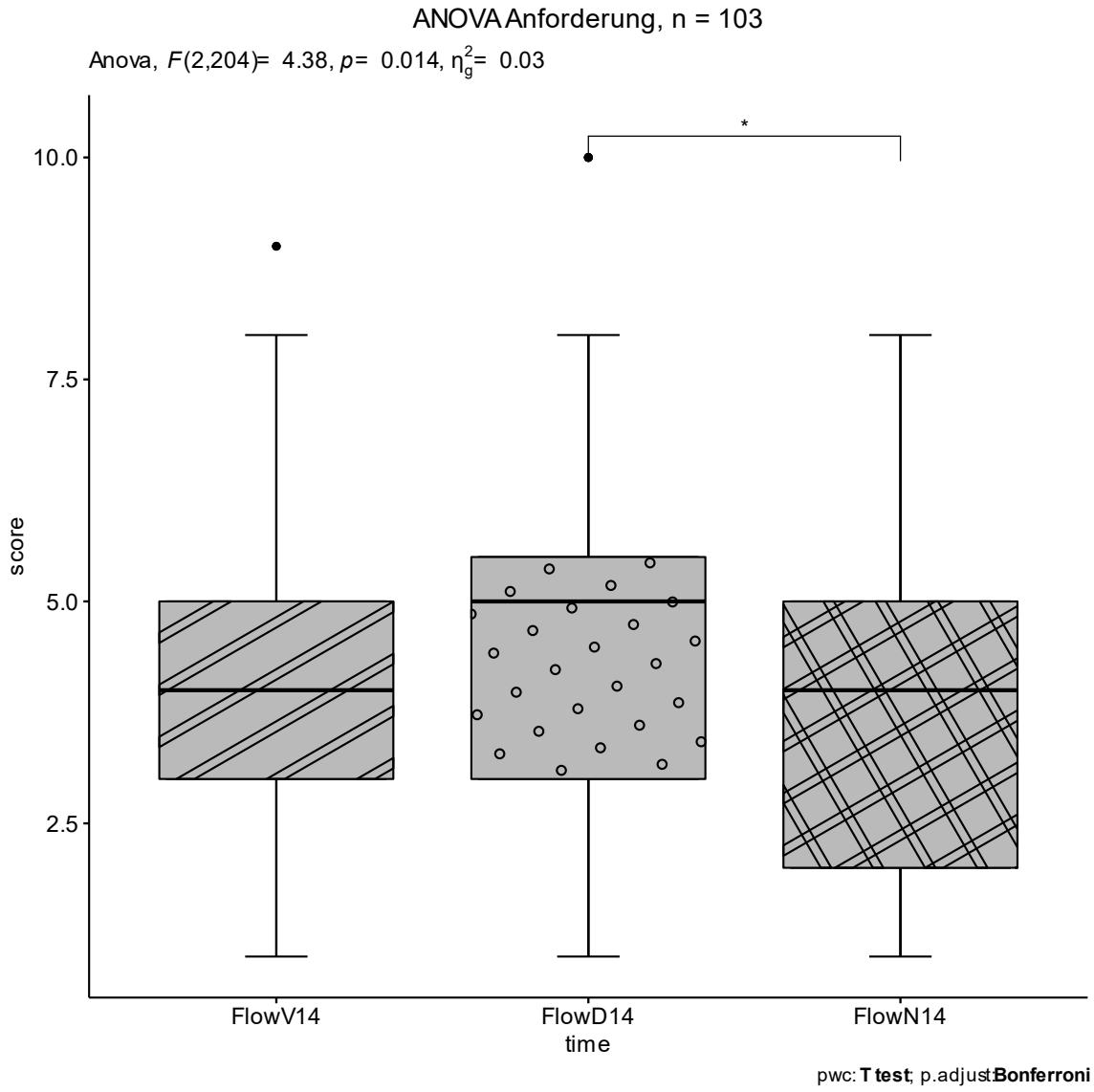


Abbildung 76: ANOVA für das Item zur wahrgenommenen Anforderung. Ein signifikanter Rückgang wurde im post-hoc-Test zwischen TZP 2 und TZP3 festgestellt.

Fähigkeiten der Befragten ($F(2, 204) = 0.34$, $p = .72$) und Passung von Fähigkeit und Anforderung ($F(2, 204) = 2.76$, $p = .07$) zeigen bei gleichen Testvoraussetzungen ($W_{Fähigkeit} = 0.964$, $p = .161$; $W_{Passung} = 0.95$, $p = .074$) in der ANOVA ohne Korrektur der Freiheitsgrade keine signifikanten Veränderungen im zeitlichen Verlauf der Lerneinheit. Die deskriptiv ermittelten Verläufe können somit inferenzstatistisch nur für das Item zur Anforderung bestätigt werden, wobei der signifikante Rückgang zwischen der Durchführungs- und der Nachbereitungsphase ersichtlich wird.

Fragebogen Aktuelle Motivation

Nach erfolgtem Ausschluss von Kreuzungsmustern lässt eine Auswertung der fehlenden Daten erkennen, dass innerhalb des ersten Testzeitpunkts ein deutlich höherer Anteil fehlender Daten gegeben ist, wobei Item FAMV18 heraussticht (Abbildung 77). Für alle Subskalen kann ein Dropout von 26% festgestellt werden.

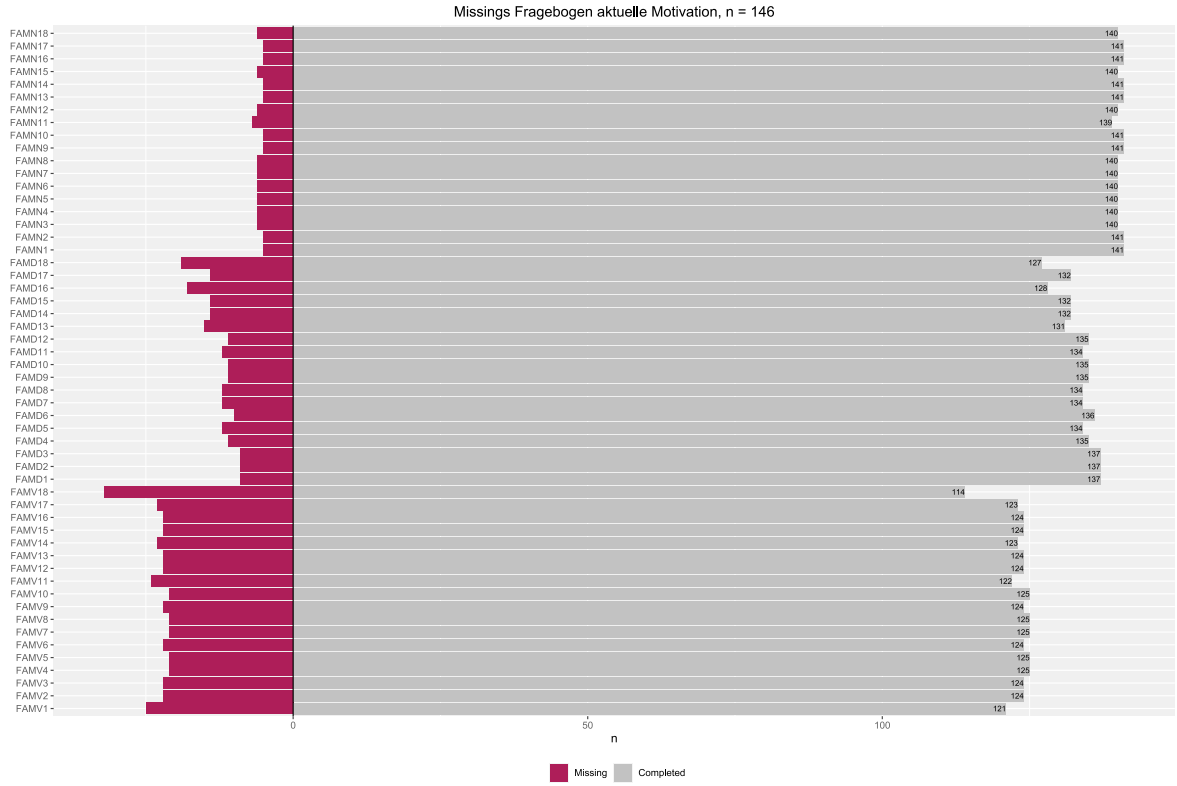


Abbildung 77: Verteilung der fehlenden Daten zum FAM über alle TZP.

Nach zeilenweisem Ausschluss über alle Testzeitpunkte ist unter den verbleibenden n = 83 Lernenden (Dropout 43,15 %) bereits erkennbar, dass die Subskalen einer diskreten Betrachtung bedürfen, welche im Nachgang dargelegt wird.

Über alle Testzeitpunkte und Subskalen hinweg weisen die Daten zum FAM auf Itemebene teils deutliche Schiefen von -1.91 bis 2.56 und ebenfalls starke Wölbungen im Bereich -1.29 bis 7.05 auf. Item FAMN9 (TZP3) sticht dabei heraus (Schiefe: 2.56, Wölbung: 7.05).

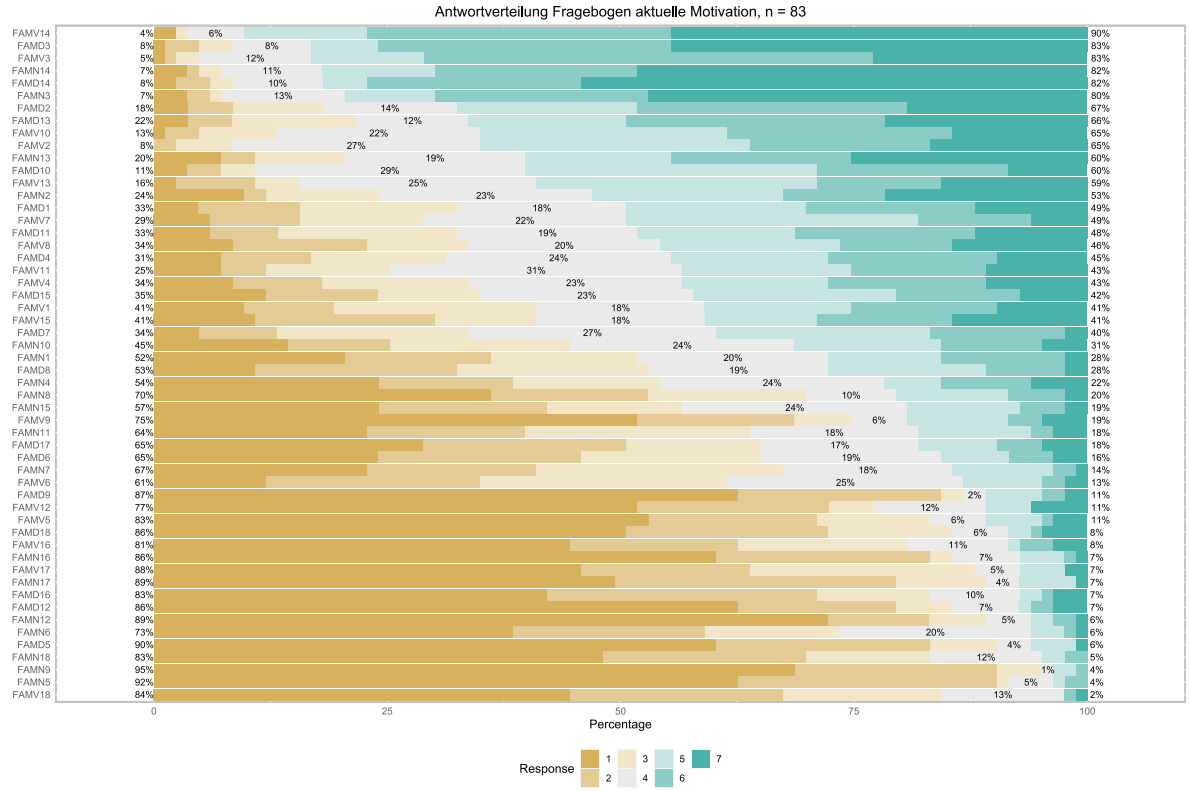


Abbildung 78: Antwortverteilung über alle Items des Fragebogens zur aktuellen Motivation über die drei Testzeitpunkte hinweg.

FAM – Herausforderung

Das Vorliegen normalverteilter Daten wurde durch Kolmogorov-Smirnov-Tests sowie grafisch anhand von QQ-Plots geprüft; dabei zeigt sich grafisch eine deutliche Annäherung an die Normalverteilung, wenngleich die KS-Tests signifikant ausfallen. Aufgrund der geringen Teststärke des KS-Tests wird für die deskriptive Darstellung eine Annäherung an die Normalverteilung auf Itemebene angenommen. Dabei können Schiefen der Verteilungen der einzelnen Items im Bereich von -0.66 bis 0.77 und Wölbungen von -1.29 bis 0.64 aufgedeckt werden. Eine extreme Verzerrung der Verteilungen ist somit nicht gegeben.

Eine Itemanalyse zeigt für die Subskala Herausforderung zum ersten Testzeitpunkt (n = 83) akzeptable bis gute korrigierte Trennschärfen (r_{it} = .34 – .76), gute Schwierigkeitsindizes nach Dahl (p_{Dahl} = 35.34 – 66.47) sowie eine akzeptable interne Konsistenz (α = .74). Für den dritten Testzeitpunkt stellen sich die Kennwerte ebenfalls durchweg als akzeptabel dar (Tabelle 26). Der Testzeitpunkt Durchführung (TZP2) hingegen stellt sich mit einer unzureichenden Itemtrennschärfe (Item FAMD6, r_{it} = .06) und einer schlechten internen Konsistenz von α = .51 dar (siehe Tabelle 25).

Deskriptiv zeigt sich ein stetiger Rückgang der durch die Teilnehmenden wahrgenommenen Herausforderung über die drei Testzeitpunkte hinweg. Lag die Ausprägung der

Herausforderung zu Beginn der Erhebung noch bei einem Wert von über vier auf der siebenstufigen Likert-Skala (TZP1, n = 83, *M* = 4.09, *Mdn.* = 4.00, *SD* = 1.25), so zeigt sich dieser Wert zum zweiten Testzeitpunkt bereits als deutlich rückläufig (TZP2, n = 83, *M* = 3.78, *Mdn.* = 3.75, *SD* = 1.02) und weist mit Ende der Erhebung eine um über einen Punkt geringere Ausprägung als zu Beginn der Lerneinheit auf (TZP3, n = 83, *M* = 2.96, *Mdn.* = 3.00, *SD* = 1.20).

Da die mittels Likert-Skalen erfassten Daten intervallskaliert sind und darüber hinaus auf Basis des zentralen Grenzwertsatzes bei der gegebenen Stichprobengröße eine Annäherung an die Normalverteilung angenommen werden darf, sind die Voraussetzungen für die Durchführung von Einstichproben-t-Tests erfüllt. Diese werden zum Abgleich der erhobenen Daten mit Normierungsstudien herangezogen.

Einstichproben t-Tests (Abbildung 79) zum TZP1 zeigen für die FAM-Subskala Herausforderung (n = 83) mit großem Effekt signifikant geringere Werte als in der Normierungsstudie „Biology-Lab“ (n = 321) wie von Rheinberg et al. (2001) berichtet (*t*(82) = -8.67, *p* < .001, *d* = -0.95). Eine signifikante Abweichung von den Ergebnissen der Normierungsstudie „induktives Denken“ (n = 85, Rheinberg et al., 2001) konnte hingegen nicht nachgewiesen werden (*t*(82) = -0.53, *p* = .60).

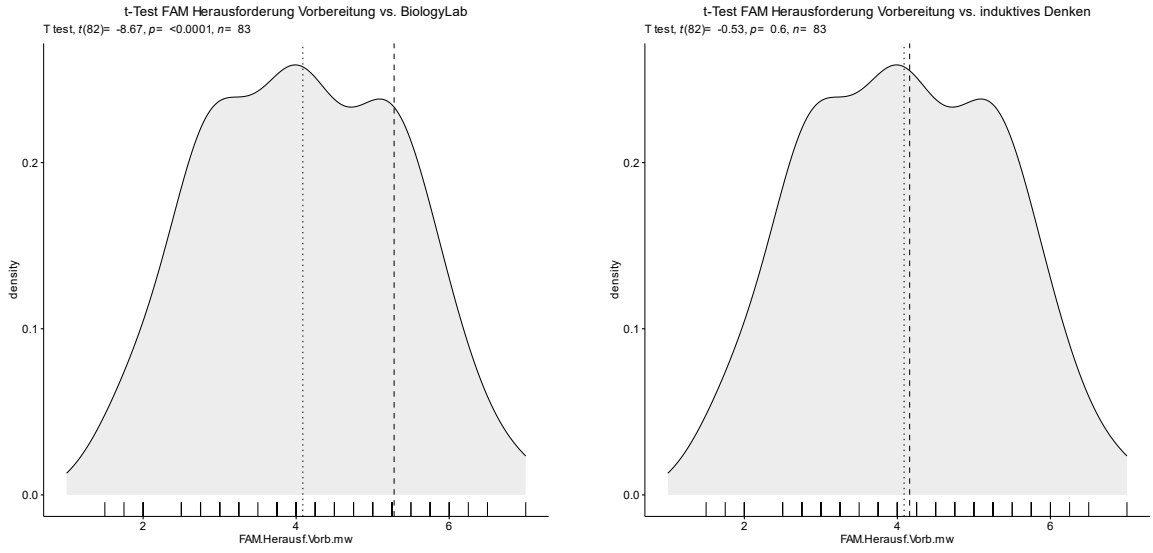


Abbildung 79: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der Subskala Herausforderung des FAM in der Vorbereitung der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Biology-Lab" (gestrichelte Linie, linke Abbildung). Die rechte Abbildung zeigt den Abgleich der Normierungsstudie „induktives Denken“ mit dem Testzeitpunkt Vorbereitung. Die Herausforderung unterscheidet sich zu TZP1 signifikant von der Biology-Lab-Studie, nicht aber von der Studie zum induktiven Denken.

Zum zweiten Testzeitpunkt hingegen unterscheiden sich beide Normierungsstudien signifikant von der durchgeführten Lerneinheit (Biology-Lab: *t*(82) = -13.46, *p* < .001, *d* = -1.48; induktives Denken: *t*(82) = -3.41, *p* = 0.001, *d* = -0.37; Abbildung 80).

Zum dritten Testzeitpunkt der vorliegenden Studie unterscheiden sich die Werte der Subskala Herausforderung mit großen Effekten hoch signifikant von der Biology-Lab-Aufgabe ($t(82) = -17.60$, $p < .001$, $d = -1.93$) und der Aufgabe zum induktiven Denken ($t(82) = -9.10$, $p < .001$, $d = -0.999$; Abbildung 81).

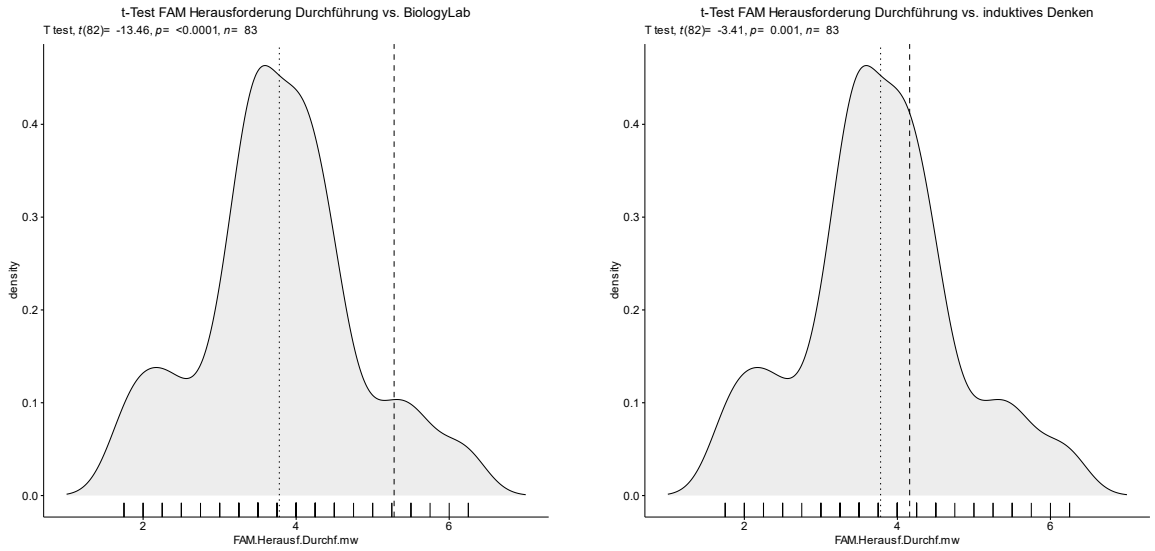


Abbildung 80: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der Subskala Herausforderung des FAM in der Durchführung der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Biology-Lab" (gestrichelte Linie, linke Abbildung). Die rechte Abbildung zeigt den Abgleich der Normierungsstudie „induktives Denken“ mit dem Testzeitpunkt Durchführung. Die Herausforderung unterscheidet sich in beiden Fällen signifikant von den Normierungsstudien.

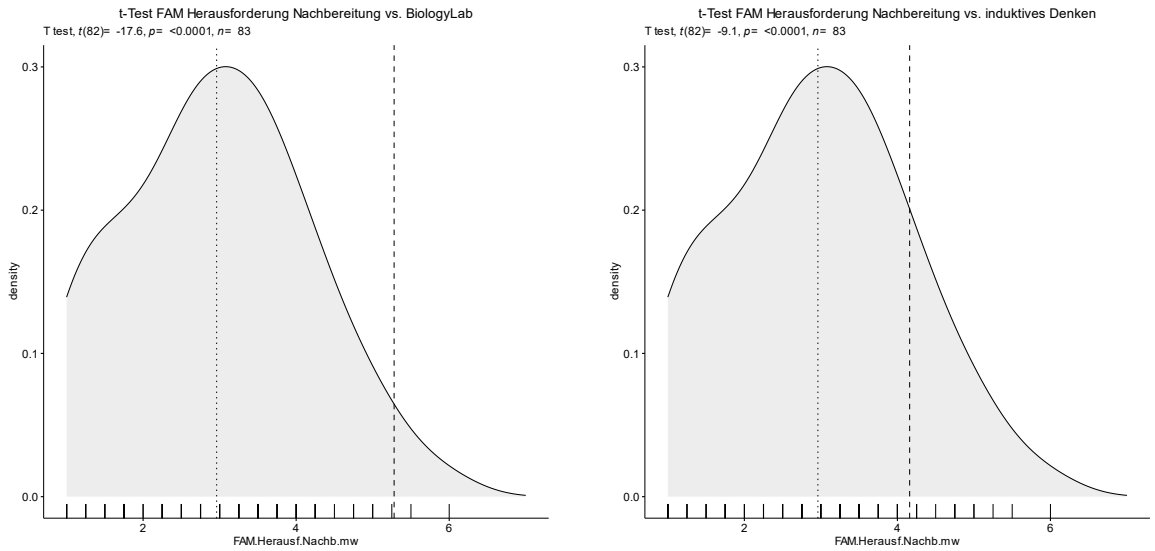


Abbildung 81: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der Subskala Herausforderung des FAM in der Durchführung der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Biology-Lab" (gestrichelte Linie, linke Abbildung). Die rechte Abbildung zeigt den Abgleich der Normierungsstudie „induktives Denken“ mit dem Testzeitpunkt Nachbereitung. Die Herausforderung unterscheidet sich in beiden Fällen signifikant von den Normierungsstudien.

In der Prüfung der Voraussetzungen für eine varianzanalytische Aufklärung der Mittelwertsunterschiede über die drei Testzeitpunkte zeigen sich drei Ausreißer in den Daten, welche jedoch keine Extremwerte darstellen und beibehalten werden. Der Datensatz von n = 83 Versuchspersonen zeigt in der grafischen Darstellung als QQ-Plots nach Testzeitpunkten ausreichende Übereinstimmung mit den Konfidenzintervallen, sodass von einer normalverteilten Datenmenge ausgegangen werden kann (Abbildung 82).

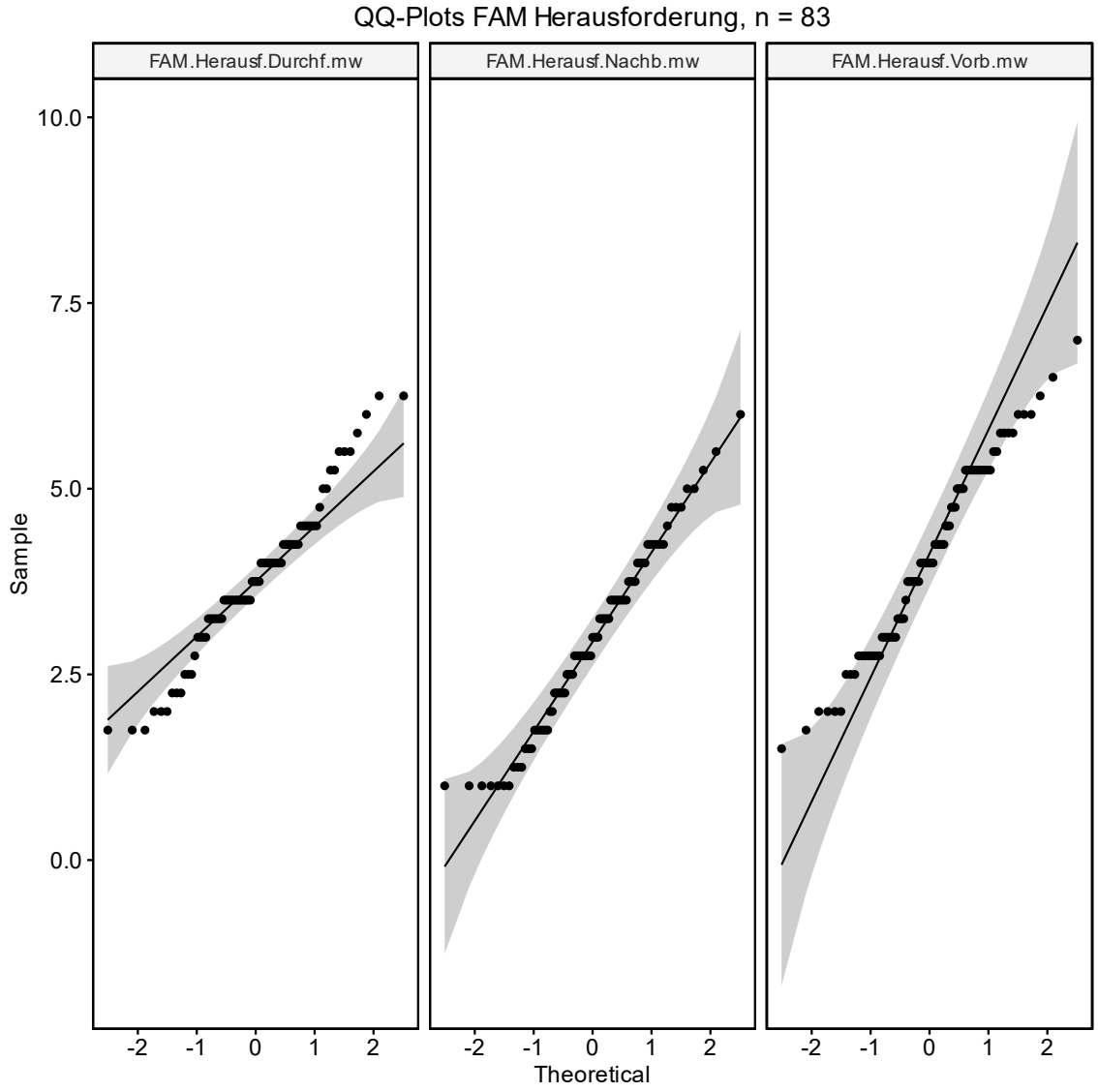


Abbildung 82: QQ-Plots der Subskala zur wahrgenommenen Herausforderung mit dem aggregierten Datensatz über alle drei Testzeitpunkte hinweg. Eine weitgehende Normalverteilung der Daten ist ersichtlich und wird für die weiteren Analysen angenommen.

Sphärizität der Daten gemäß Mauchly-Test ($W = 0.971$, $p = .302$) ist als Testvoraussetzung nicht verletzt, sodass eine Auswertung mittels messwiederholter ANOVA erfolgen kann. Diese liefert ein mit mittlerem Effekt hoch signifikantes Ergebnis (F(2,

164) = 20.33, $p < .001$, $\eta_G^2 = 0.145$), folglich konnten statistisch signifikante Mittelwertsunterschiede der wahrgenommenen Herausforderung über die drei Testzeitpunkte nachgewiesen werden. Gepaarte t-Tests mit Bonferroni-Korrektur zeigen einen mit großem Effekt hoch signifikanten Rückgang der durch die Teilnehmenden wahrgenommenen Herausforderung zwischen dem ersten und dem dritten ($t(82) = -5.71$, $p < .001$, $d = 0.92$) Testzeitpunkt. Ebenso zeigt sich ein mit mittlerem Effekt hoch signifikanter Rückgang zwischen dem zweiten und dem dritten Testzeitpunkt ($t(82) = 4.76$, $p < .001$, $d = 0.74$). Der deskriptiv ersichtliche Rückgang zwischen erstem und zweitem Testzeitpunkt fällt nicht signifikant aus (Abbildung 83).

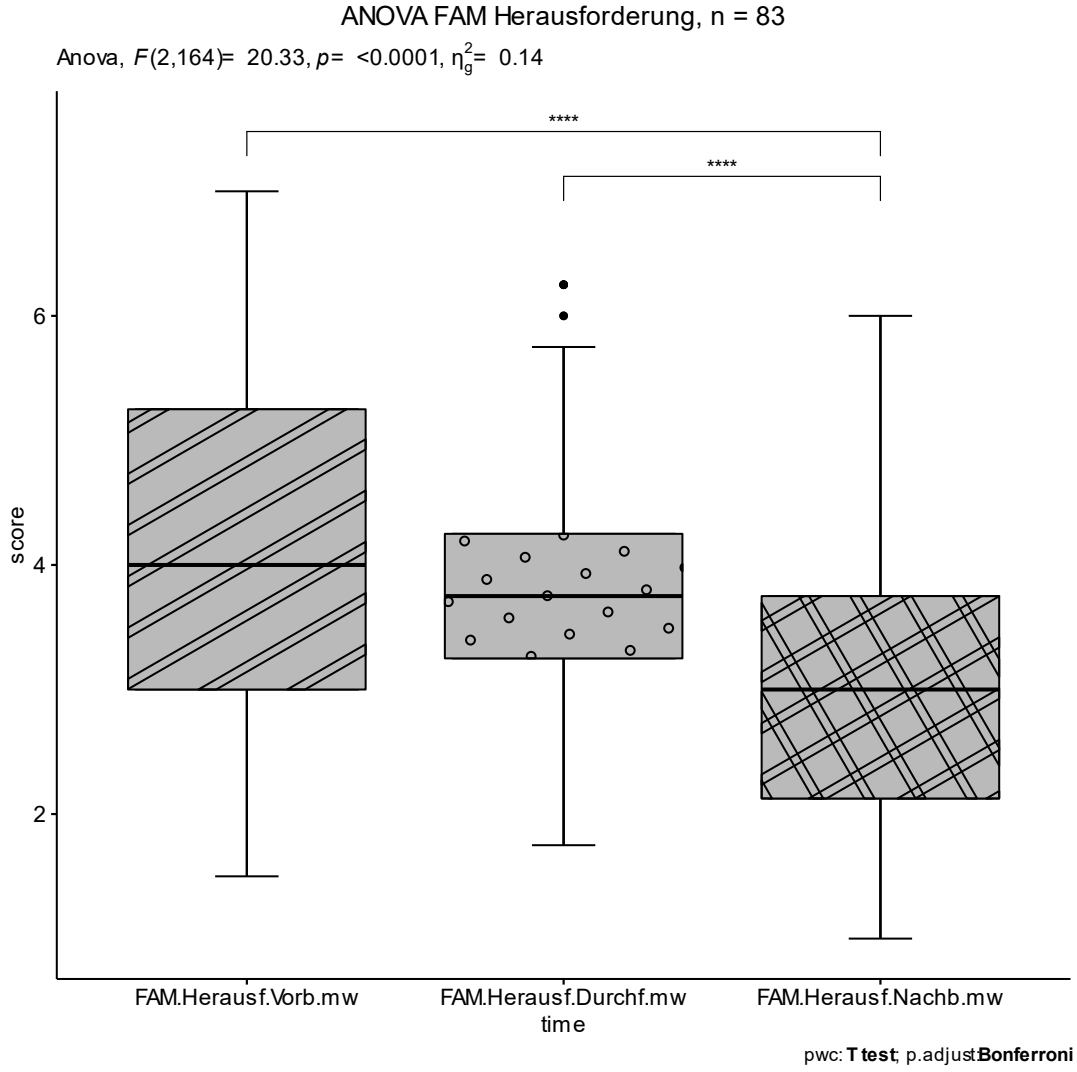


Abbildung 83: ANOVAFAM Herausforderung. Grafische Darstellung der Ergebnisse aus der inferenzstatistischen Prüfung der Daten. Mittels messwiederholter ANOVA und gepaarten t-Tests konnten die signifikanten Mittelwertsunterschiede über die Testzeitpunkte hinweg aufgedeckt werden

FAM – Interesse

Wenngleich die Kolmogorov-Smirnov-Tests signifikant ausfallen, zeigen die grafischen Auswertungen anhand von QQ-Plots größtenteils als normal verteilt zu bezeichnende Daten. Dabei weisen die Verteilungen über alle Testzeitpunkte hinweg Schiefen von -0.34 bis 1.71 und Wölbungen von -1.13 bis 2.8 auf, Abweichungen von einer Normalverteilung sind somit nicht anzunehmen.

In der Itemanalyse zeigen sich mit n = 83 Proband:innen zum ersten Testzeitpunkt für die Subskala Interesse des FAM gute korrigierte Trennschärfen der Items (r_{it} = .55 – .75). Item „FAMV17“ liegt mit p_{Dahl} = 19.08 knapp unter der wünschenswerten Marke von 20 für den Schwierigkeitsindex und verweist somit auf einen leichten Bodeneffekt dieses Items; die übrigen Items weisen mit p_{Dahl} = 51.00 – 55.82 gute Werte auf. Die interne Konsistenz liegt mit α = .80 im guten Bereich. Der zweite Testzeitpunkt weist durchweg gute Kennwerte bei akzeptabler interner Konsistenz auf (α = .77; Tabelle 25). Zum dritten Testzeitpunkt zeigt sich trotz teils unzureichender Itemschwierigkeit (Item FAMN17 mit p_{Dahl} = 15.26) und insgesamt geringer Itemschwierigkeit der Teilskala (Tabelle 26) eine gute interne Konsistenz der Subskala mit α = .86.

In der deskriptiven Auswertung der Interessenskomponente des FAM zeigt sich eine geringfügige Zunahme von erstem (TZP1, n = 83, *M* = 3.80, *Mdn.* = 3.60, *SD* = 1.21) zu zweitem Testzeitpunkt (TZP2, n = 83, *M* = 4.00, *Mdn.* = 4.00, *SD* = 1.20). Im weiteren Verlauf der Lerneinheit sinkt das Interesse deskriptiv deutlich (TZP3, n = 83, *M* = 2.89, *Mdn.* = 3.00, *SD* = 1.28).

Da die mittels Likert-Skalen erfassten Daten intervallskaliert sind und darüber hinaus auf Basis des zentralen Grenzwertsatzes bei der gegebenen Stichprobengröße eine Annäherung an die Normalverteilung angenommen werden darf, sind die Voraussetzungen für die Durchführung von Einstichproben-t-Tests erfüllt. Diese werden nachfolgend zum Abgleich der erhobenen Daten mit Normierungsstudien herangezogen.

Die ermittelten Werte zum Interesse unterscheiden sich im ersten Testzeitpunkt (Abbildung 84) mit kleinem Effekt signifikant von der Normierungsstudie Biology-Lab nach Rheinberg et al., nicht jedoch vom induktiven Denken (Biology-Lab: $t(82) = -3.55$, $p < .001$, $d = -0.39$; induktives Denken: $t(82) = -1.74$, $p = .086$).

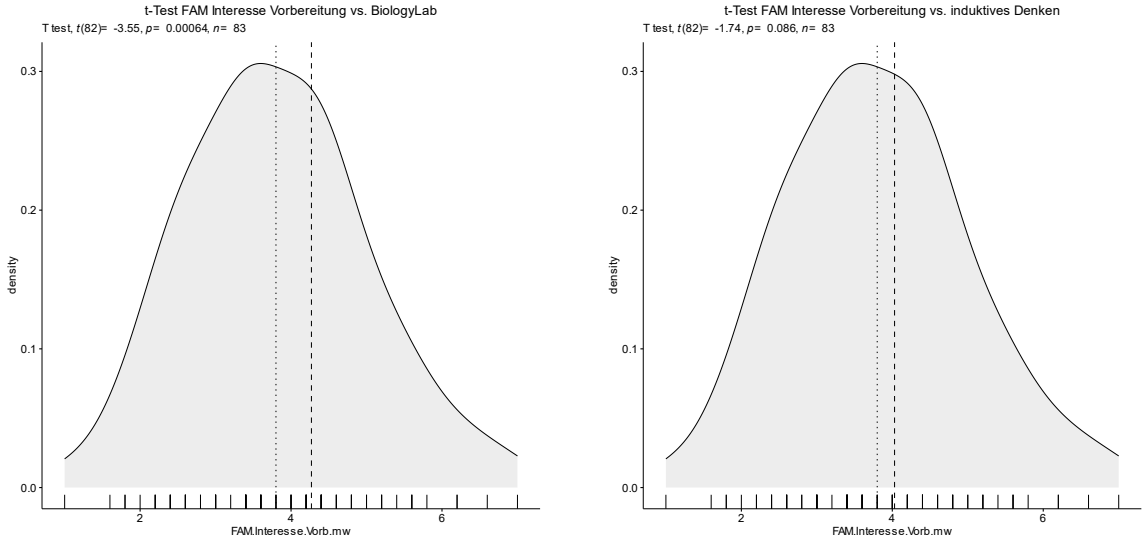


Abbildung 84: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der Subskala Interesse des FAM in der Vorbereitungsphase der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Biology-Lab" (gestrichelte Linie, linke Abbildung). Rechts: Abgleich der Normierungsstudie „induktives Denken“ mit dem Testzeitpunkt Vorbereitung. Das Interesse ist in der Normierungsstudie Biology-Lab signifikant höher als in der vorbeschriebenen Lerneinheit.

Ebenso ist das Interesse zum zweiten Testzeitpunkt (Abbildung 85) signifikant geringer ausgeprägt als in der Normierung Biology-Lab: $t(82) = -2.05$, $p = .044$, $d = -0.22$ (induktives Denken: $t(82) = -0.23$, $p = .82$).

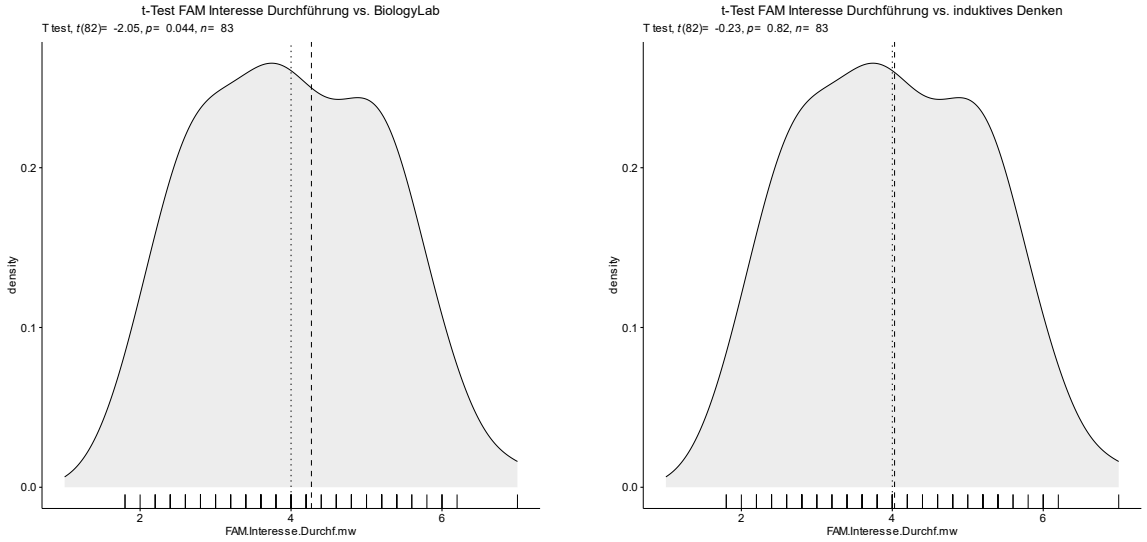


Abbildung 85: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der Subskala Interesse des FAM in der Durchführungsphase der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Biology-Lab" (gestrichelte Linie, linke Abbildung). Die rechte Abbildung zeigt den Abgleich der Normierungsstudie „induktives Denken“ mit dem Testzeitpunkt Durchführung. Das Interesse ist in der Normierungsstudie Biology-Lab signifikant höher als in der vorbeschriebenen Lerneinheit.

In der Nachbereitung (Abbildung 86) fällt das vorgefundene Interesse mit starken Effekten hoch signifikant geringer aus als in den Normierungsstudien (Biology-Lab: $t(82) = -9.84$, $p < .001$, $d = -1.08$; induktives Denken: $t(82) = -8.13$, $p < .001$, $d = -0.89$).

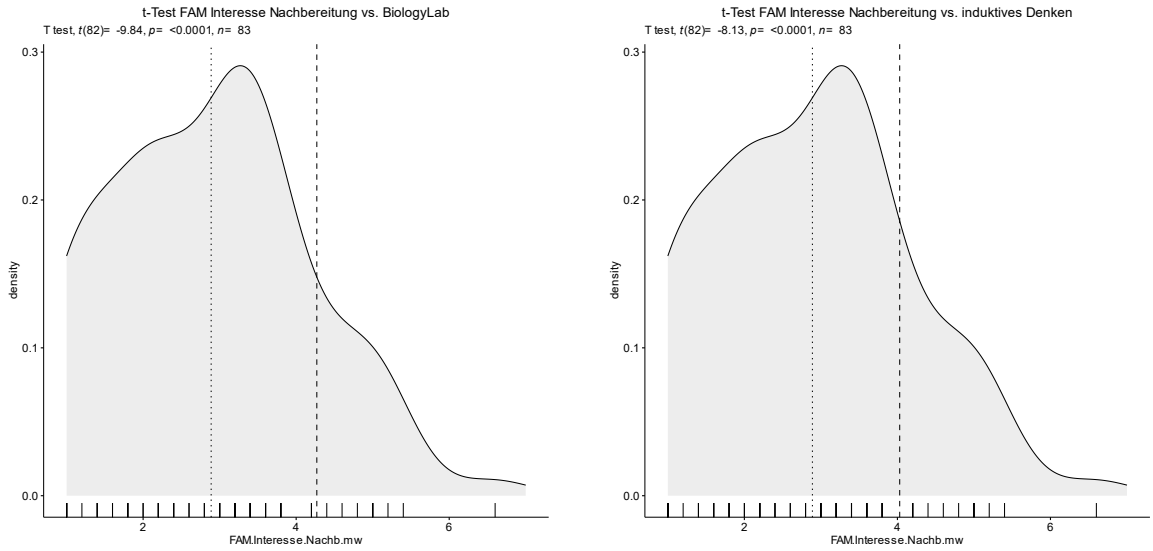


Abbildung 86: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der Subskala Interesse des FAM in der Nachbereitung der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Biology-Lab" (gestrichelte Linie, linke Abbildung). Die rechte Abbildung zeigt den Abgleich der Normierungsstudie „induktives Denken“ mit dem Testzeitpunkt Nachbereitung. Das Interesse ist in beiden Normierungsstudien signifikant höher als in der vorbeschriebenen Lerneinheit.

Eine Prüfung der Voraussetzungen für die Varianzanalyse anhand des über die Testzeitpunkte aggregierten Datensatzes (n = 83 nach zeilenweisem Ausschluss) deckt zwei nicht-extreme Ausreißer in den Daten auf, welche beibehalten werden. Die Prüfung einer Normalverteilung der Daten anhand von QQ-Plots führt, in Übereinstimmung mit dem zentralen Grenzwertsatz, nicht zur Ablehnung der Nullhypothese – die Daten werden somit als normal verteilt betrachtet (Abbildung 87).

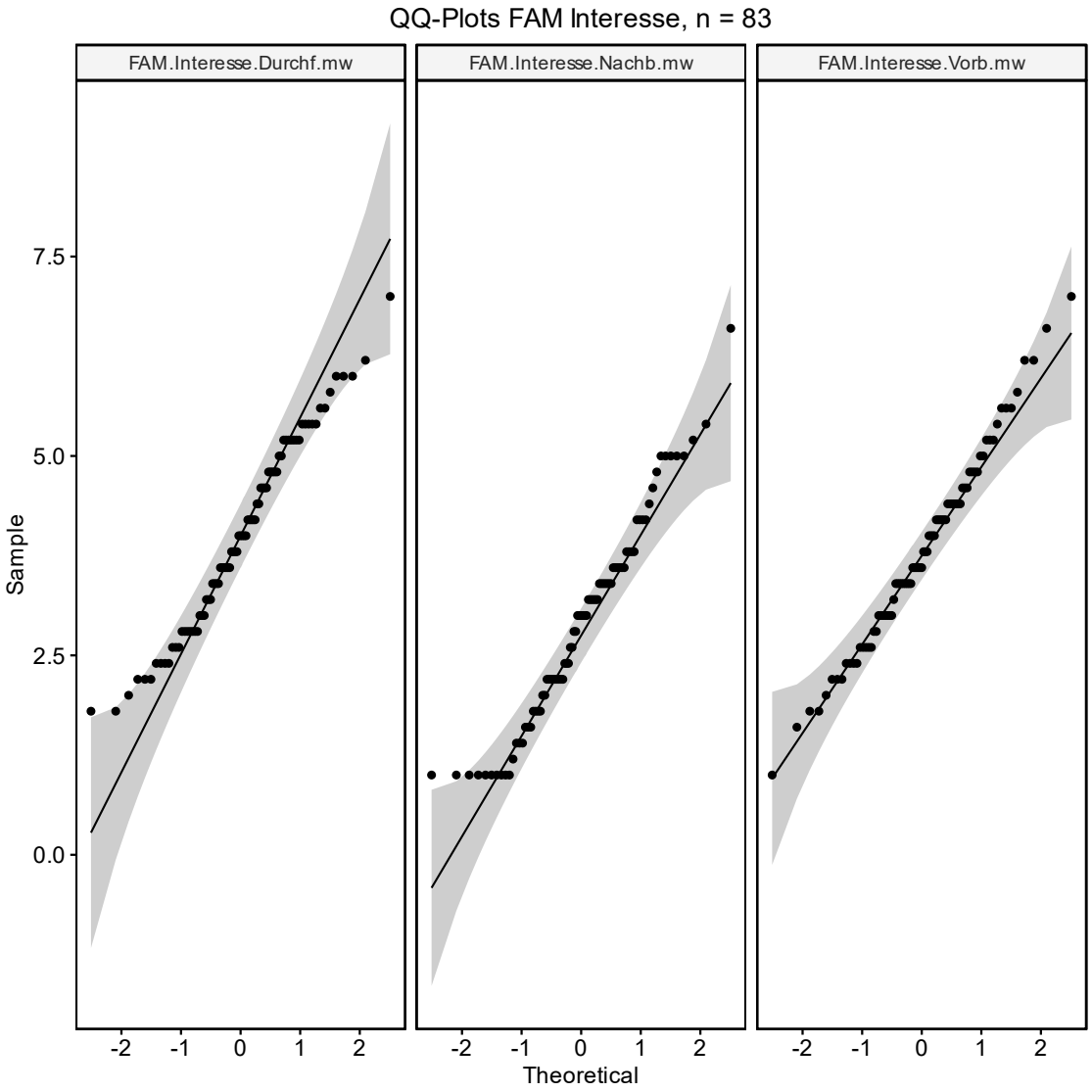


Abbildung 87: QQ-Plots der FAM-Subskala Interesse. Der für die Varianzanalyse aggregierte Datensatz zur Subskala Interesse lässt auf eine weitgehend normal verteilte Datenmenge schließen.

Ein nicht signifikanter Mauchly-Test bestätigt die Sphärizität der Daten ($W = 0.97$, $p = .293$), weshalb die weitere Auswertung mittels messwiederholter ANOVA (Abbildung 88) erfolgt. Diese liefert ein mit mittlerem Effekt hoch signifikantes Ergebnis ($F(2, 164) = 18.12$, $p < .001$, $\eta_G^2 = 0.135$). Gepaarte t-Tests mit Bonferroni-Korrektur decken einen mit großem Effekt hoch signifikanten Rückgang des Interesses zwischen Durchführung der Lerneinheit (TZP2) und Nachbereitung der Lerneinheit (TZP3) auf ($t(82) = 5.57$, $p < .001$, $d = 0.896$). Ebenso konnte ein mit mittlerem Effekt hoch signifikanter Rückgang des Interesses zwischen Vorbereitung (TZP1) und Nachbereitung (TZP3) der Lerneinheit aufgedeckt werden ($t(82) = -4.35$, $p < .001$, $d = 0.73$).

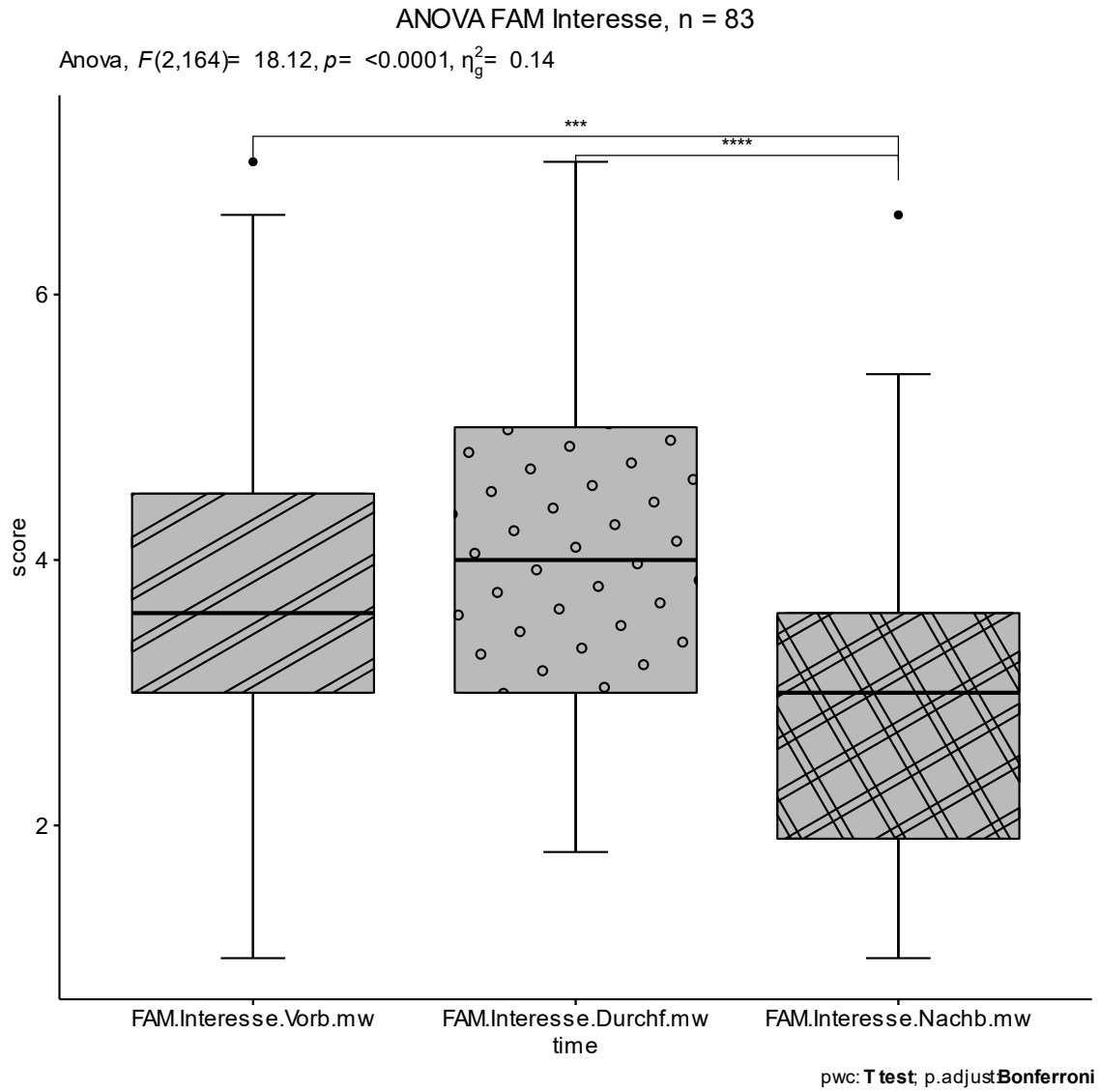


Abbildung 88: ANOVA FAM Interesse. Ergebnisse der ANOVA sowie der gepaarten t-Tests für die Subskala Interesse des FAM. Ein signifikanter Rückgang des Interesses zum dritten Testzeitpunkt der Lerneinheit wurde nachgewiesen.

FAM – Erfolgswahrscheinlichkeit

Die Verteilungen über alle Testzeitpunkte auf Itemebene weisen mit Schiefen von -1.91 bis -0.10 und Wölbungen zwischen -0.68 und 4.56 keine extremen Werte auf. Eine Normalverteilung der Daten ist auf der Basis signifikanter Kolmogorov-Smirnov-Tests nicht gegeben, in den QQ-Plots zeigt sich jedoch grafisch eine deutliche Annäherung an die Normalverteilung.

In der mit dem Datensatz zum ersten Testzeitpunkt (n = 83) durchgeführten Itemanalyse zur Subskala Erfolgswahrscheinlichkeit des FAM zeigt Item „FAMV13“ mit r_{it} = .09 eine Unterschreitung des wünschenswerten Bereichs der korrigierten Itemtrennschärfen; die übrigen Items sind mit r_{it} = .52 – .68 als unbedenklich zu betrachten. Die

Schwierigkeitsindizes der Items lagen zwischen p_{Dahl} = 62.45 – 83.94. Item „FAMV14“ überstieg damit den erstrebenswerten Bereich der Itemschwierigkeiten leicht, ein Deckeneffekt ist folglich gegeben. Trotz dieser beiden streng nach Werten als problematisch zu betrachtenden Items wurden diese zunächst beibehalten, da andernfalls die Subskala auf ein inhaltlich wenig aussagekräftiges Niveau hätte kondensiert werden müssen. Letztlich ist die interne Konsistenz der Skala mit α = .49 ohnehin als schlecht zu bezeichnen und kritisch zu erörtern. Trotz eines erkennbaren Deckeneffektes über alle Items des zweiten Testzeitpunktes zeigt sich für diese Erhebung eine gute interne Konsistenz (α = .81, siehe auch Tabelle 25). Eine akzeptable interne Konsistenz kann auch zum dritten Testzeitpunkt nachgewiesen werden (α = .77; Tabelle 26).

Deskriptiv zeigt die FAM Subskala zur Erfolgswahrscheinlichkeit im ersten Testzeitpunkt eine hohe Ausprägung auf der siebenstufigen Likert-Skala (TZP1, n = 83, *M* = 5.39, *Mdn.* = 5.50, *SD* = 0.83). Dieser Wert steigt in der zweiten Erhebung weiter minimal an (TZP2, n = 83, *M* = 5.48, *Mdn.* = 6.00, *SD* = 1.26), in der Nachbereitungsphase erscheint die Erfolgswahrscheinlichkeit in der Selbstauskunft der Versuchspersonen wiederum leicht rückläufig (TZP3, n = 83, *M* = 5.29, *Mdn.* = 5.50, *SD* = 1.30, Abbildung 89).

Da die mittels Likert-Skalen erfassten Daten intervallskaliert sind und darüber hinaus auf Basis des zentralen Grenzwertsatzes bei der gegebenen Stichprobengröße eine Annäherung an die Normalverteilung angenommen werden darf, sind die Voraussetzungen für die Durchführung von Einstichproben-t-Tests erfüllt. Diese werden zum Abgleich der erhobenen Daten mit Normierungsstudien herangezogen.

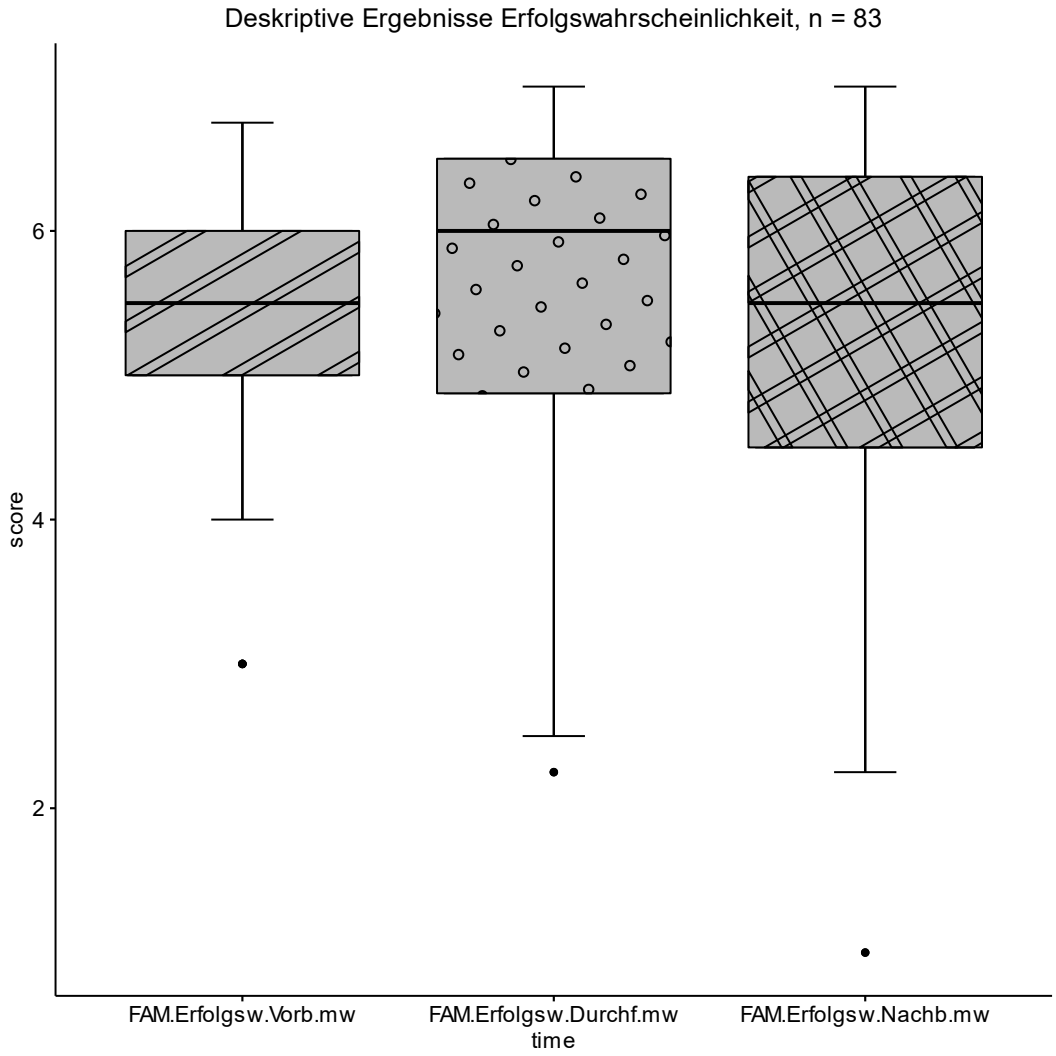
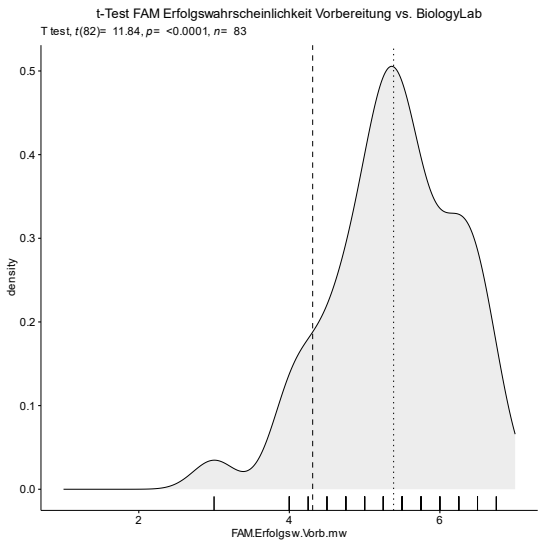
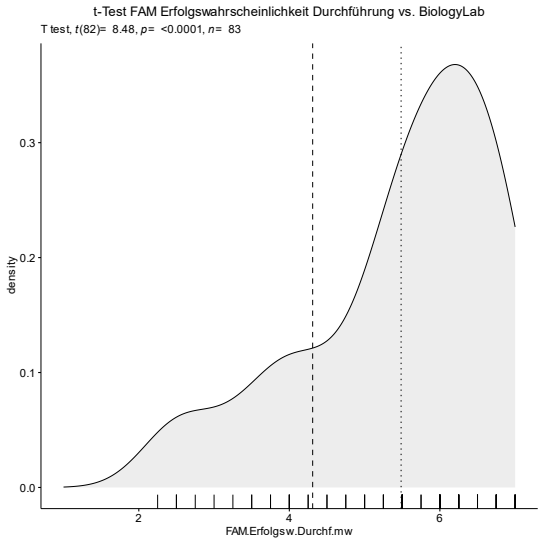


Abbildung 89: Boxplot-Darstellung der deskriptiven Ergebnisse der FAM-Subskala zur wahrgenommenen Erfolgswahrscheinlichkeit.

Die in der Normierungsstudie „Biology-Lab“ (n = 321; Abbildung 90) ermittelten wahrgenommenen Erfolgswahrscheinlichkeiten sind durchweg signifikant geringer als während der Durchführung der Lerneinheit (TZP1: $t(82) = 11.84$, $p < .001$, $d = 1.30$; TZP2: $t(82) = 8.48$, $p < .001$, $d = .93$; TZP3: $t(82) = 6.88$, $p < .001$, $d = 0.75$).

Im Vergleich der Normierungsstudie „induktives Denken“ (n = 85; Abbildung 90) mit der vorliegenden Studie zeigen die Daten der vorliegenden Erhebung während der Vorbereitung ($t(82) = 3.36$, $p = .001$, $d = 0.37$) und der Durchführung ($t(82) = 2.92$, $p = .004$, $d = 0.32$) signifikant höhere Werte für die wahrgenommene Erfolgswahrscheinlichkeit. Lediglich in der Nachbereitung konnte kein Effekt nachgewiesen werden ($t(82) = 1.49$, $p = .14$).





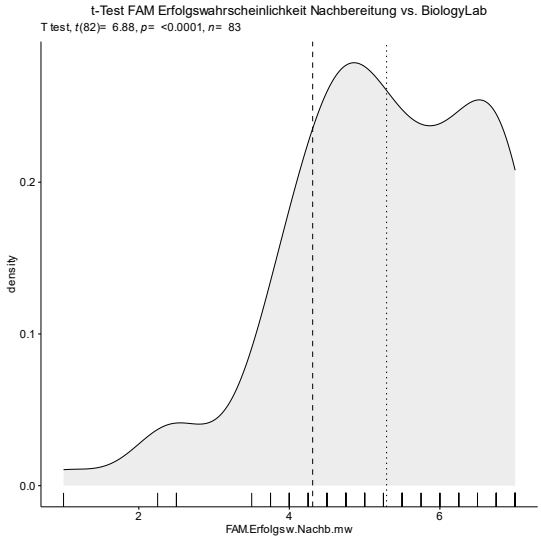
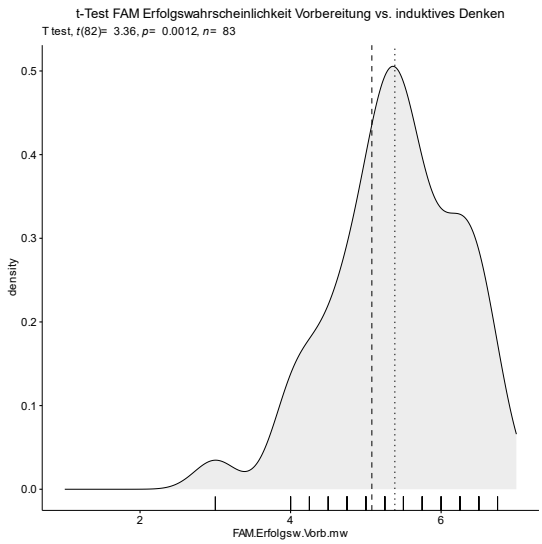
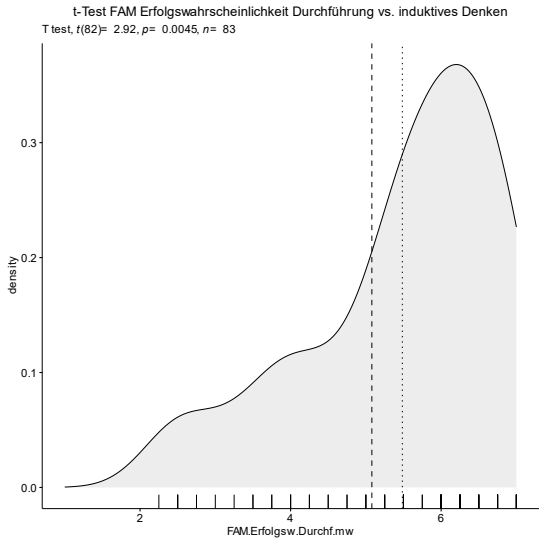


Abbildung 90: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der ermittelten Ergebnisse der FAM Subskala Erfolgswahrscheinlichkeit über die drei Testzeitpunkte hinweg mit der Normierungsstudie "BiologyLab".





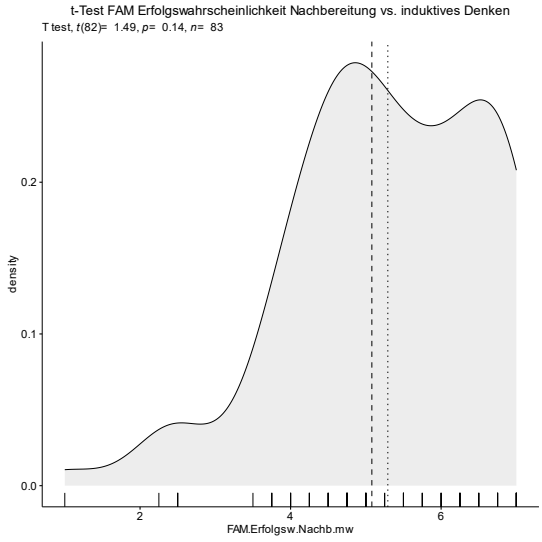


Abbildung 91: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der ermittelten Ergebnisse der FAM Subskala Erfolgswahrscheinlichkeit über die drei Testzeitpunkte hinweg mit der Normierungsstudie "induktives Denken".

Bei Betrachtung der Voraussetzungen für die varianzanalytische Prüfung der nach zeilenweisem Ausschluss verbleibenden 83 Versuchspersonen zeigen sich vier Ausreißer, welche jedoch nicht als Extremwerte identifiziert wurden. Sowohl anhand der QQ-Plots als auch nach dem zentralen Grenzwertsatz ist eine Normalverteilung der Daten weitgehend anzunehmen (Abbildung 92).

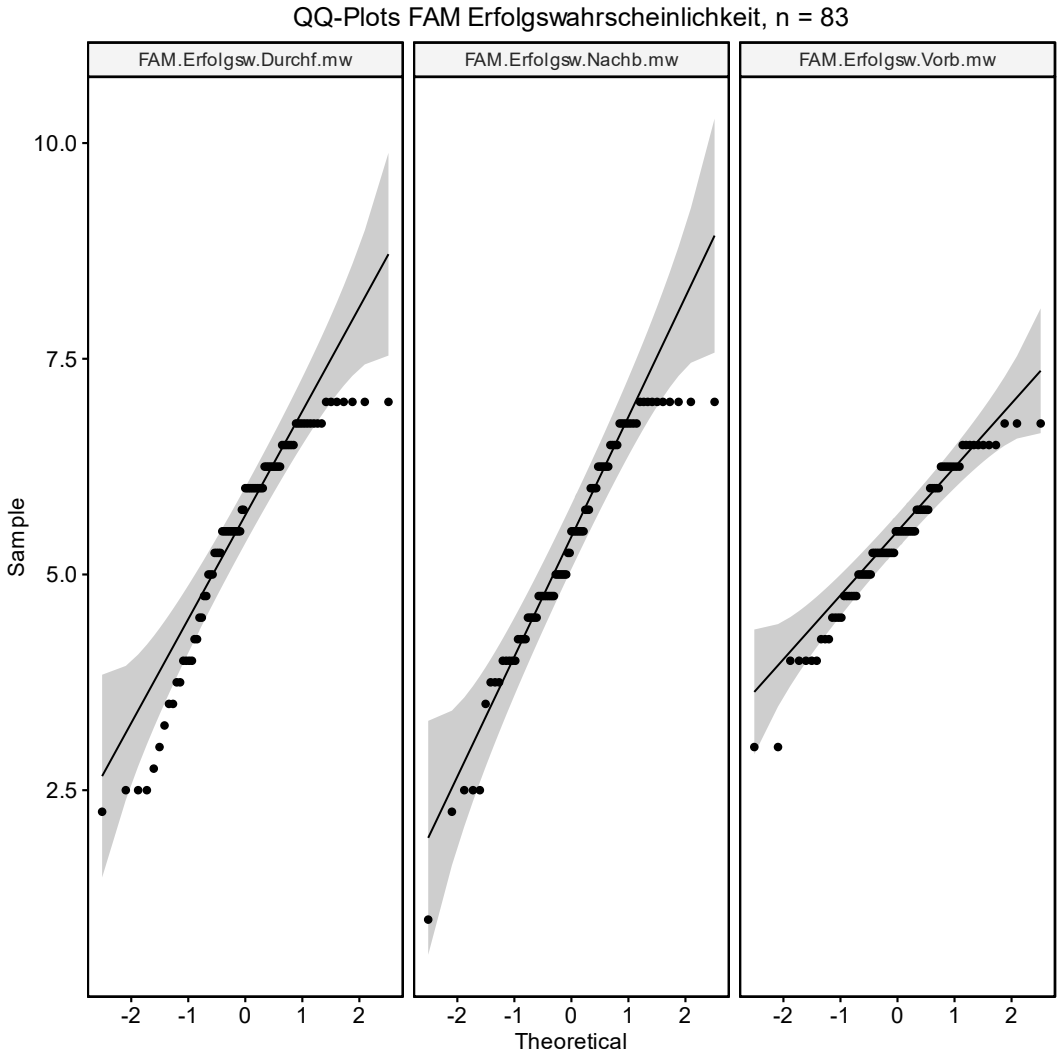


Abbildung 92: QQ-Plot der Daten zur FAM Subskala Erfolgswahrscheinlichkeit. Eine Normalverteilung ist anzunehmen.

Im Mauchly-Test zeigt sich die Sphärizität der Daten als gegeben ($W = 0.979$, $p = .429$). Die anschließende ANOVA zeigt keine signifikanten Unterschiede der Mittelwerte über die drei Testzeitpunkte hinweg ($F(2, 164) = 0.60$, $p = .55$).

FAM – Misserfolgsbefürchtung

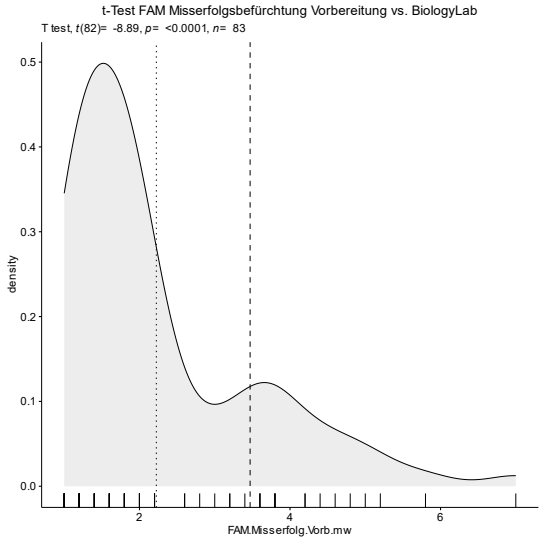
Mit Werten von 1.11 bis 2.56 sind über alle Testzeitpunkte hinweg extreme Schiefen der Daten (> 2.0) gegeben, die Wölbungen erscheinen mit Werten im Bereich von -0.05 bis 7.05 als ausgeprägt aber lediglich in einem Fall als extrem (Item FAMN9). Insgesamt drei Items weisen eine extreme Schiefe auf, sodass hier kein isolierter Ausreißer unter den Items identifiziert werden kann. Eine grafische Prüfung der QQ-Plots lässt ebenso wie die signifikanten Kolmogorov-Smirnov-Tests keine Annahme der Hypothese einer normalverteilten Datenmenge zu.

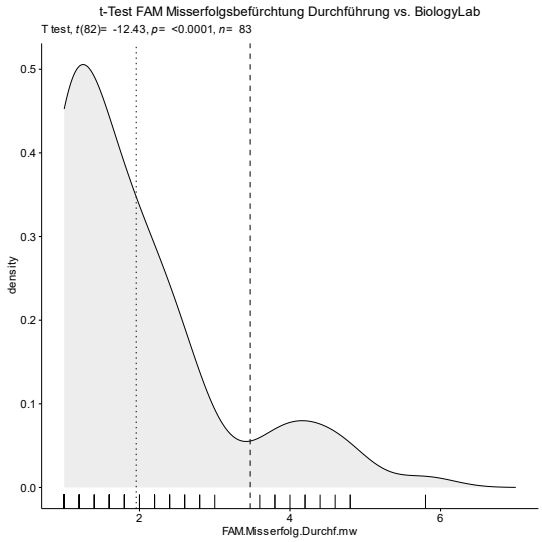
In der Itemanalyse zu Testzeitpunkt 1 (n = 83) zeigen sich für die Subskala zur Misserfolgsbefürchtung des Fragebogens zur aktuellen Motivation korrigierte Itemtrennschärfen von r_{it} = .31 bis r_{it} = .90. Die Schwierigkeitsindizes nach Dahl zeigen durchweg geringe Werte (p_{Dahl} = 18.27 – 22.89), die Items „FAMV18“ und „FAMV5“ weisen mit p_{Dahl} = 18.27 und p_{Dahl} = 18.67 eine Unterschreitung der erwünschten Itemschwierigkeit auf. Insgesamt zeigt die Subskala trotz der erkennbaren Bodeneffekte eine gute interne Konsistenz (α = .84). Für die weiteren Testzeitpunkte weist die Subskala deutliche Bodeneffekte bei zufriedenstellenden korrigierten Trennschärfen und akzeptablen internen Konsistenzen auf (Tabelle 25; Tabelle 26).

Die Misserfolgsbefürchtung der Versuchspersonen rangiert durchweg im unteren Bereich der siebenstufigen Likert-Skala. Deskriptiv stellt sich die Misserfolgsbefürchtung in der ersten Erhebung während der Vorbereitungsphase als geringfügig stärker ausgeprägt dar (TZP1, n = 83, *M* = 2.22, *Mdn.* = 1.80, *SD* = 1.28), als dies in den darauffolgenden Erhebungen der Fall ist (TZP2, n = 83, *M* = 1.96, *Mdn.* = 1.60, *SD* = 1.11; TZP3, n = 83, *M* = 1.73, *Mdn.* = 1.40, *SD* = 0.91).

Da die mittels Likert-Skalen erfassten Daten intervallskaliert sind und darüber hinaus auf Basis des zentralen Grenzwertsatzes bei der gegebenen Stichprobengröße eine Annäherung an die Normalverteilung angenommen werden darf, sind die Voraussetzungen für die Durchführung von Einstichproben-t-Tests erfüllt. Diese werden zum Abgleich der erhobenen Daten mit Normierungsstudien herangezogen.

In Bezug auf die Normierungsstudien „Biology-Lab“ (n = 321) und „induktives Denken“ (n = 85) konnten in der vorliegenden Studie durchweg signifikant geringere Ausprägungen der Werte auf der Subskala Misserfolgsbefürchtung festgestellt werden (Biology-Lab TZP1: $t(82) = -8.89$, $p < .001$, $d = -0.98$; induktives Denken TZP1: $t(82) = -3.25$, $p = .002$, $d = -0.36$; Biology-Lab TZP2: $t(82) = -12.43$, $p < .001$, $d = -1.36$; induktives Denken TZP2: $t(82) = -5.94$, $p < .001$, $d = -0.65$; Biology-Lab TZP3: $t(82) = -17.45$, $p < .001$, $d = -1.92$; induktives Denken TZP3: $t(82) = -9.52$, $p < .001$, $d = -1.04$; Abbildung 93; Abbildung 94).





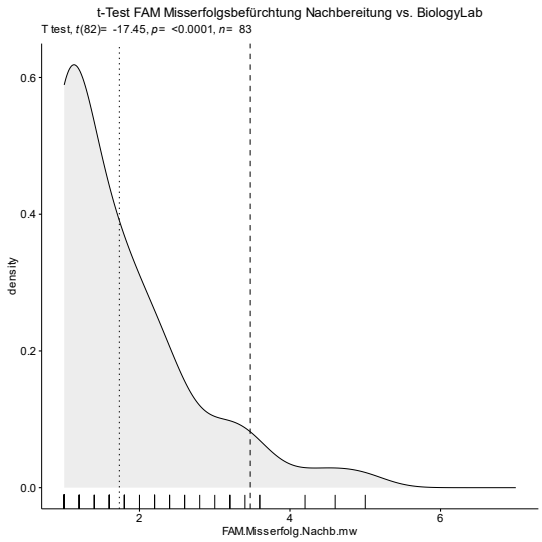
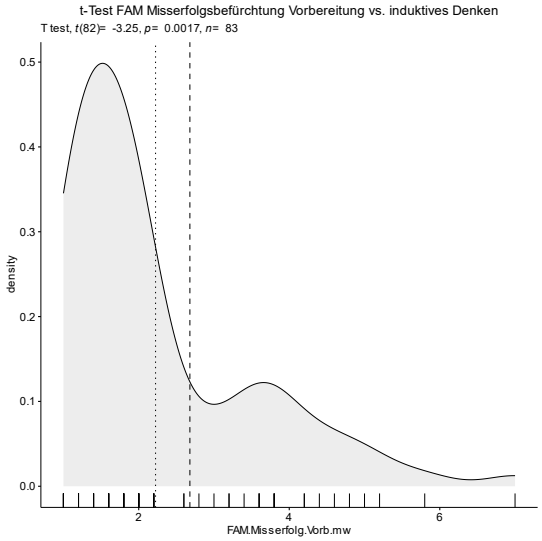
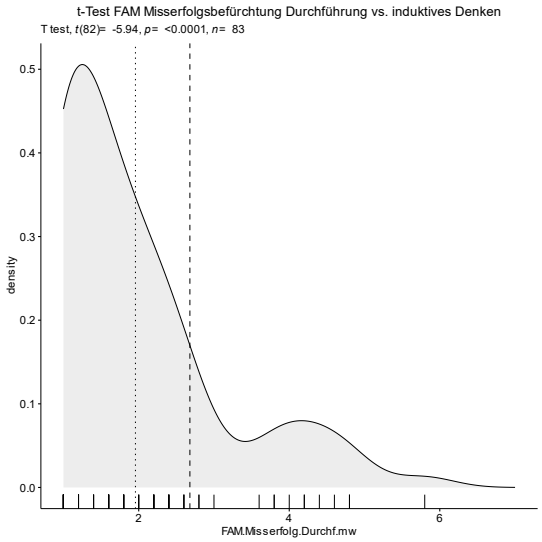


Abbildung 93: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der ermittelten Ergebnisse der FAM Subskala Misserfolgsbefürchtung über die drei Testzeitpunkte hinweg mit der Normierungsstudie "BiologyLab".





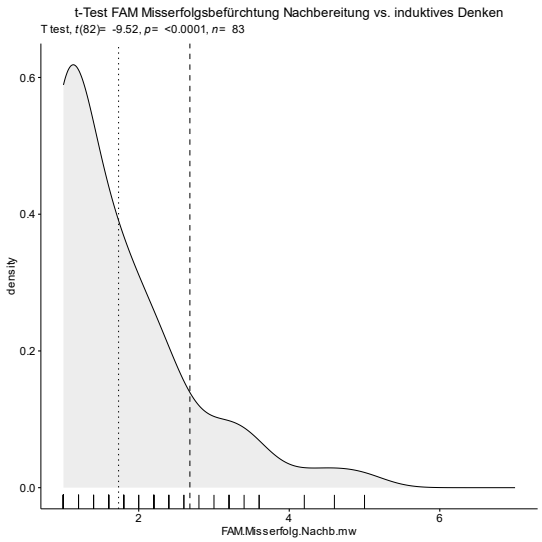


Abbildung 94: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der ermittelten Ergebnisse der FAM Subskala Misserfolgsbefürchtung über die drei Testzeitpunkte hinweg mit der Normierungsstudie "induktives Denken".

Die Daten zu dieser Subskala weisen insgesamt elf Ausreißer auf, ein Extremwert wird ausgeschlossen. Die Ausreißer werden für die Auswertung beibehalten. Grafisch zeigt sich in den QQ-Plots eine Annäherung an die Normalverteilung (Abbildung 95).

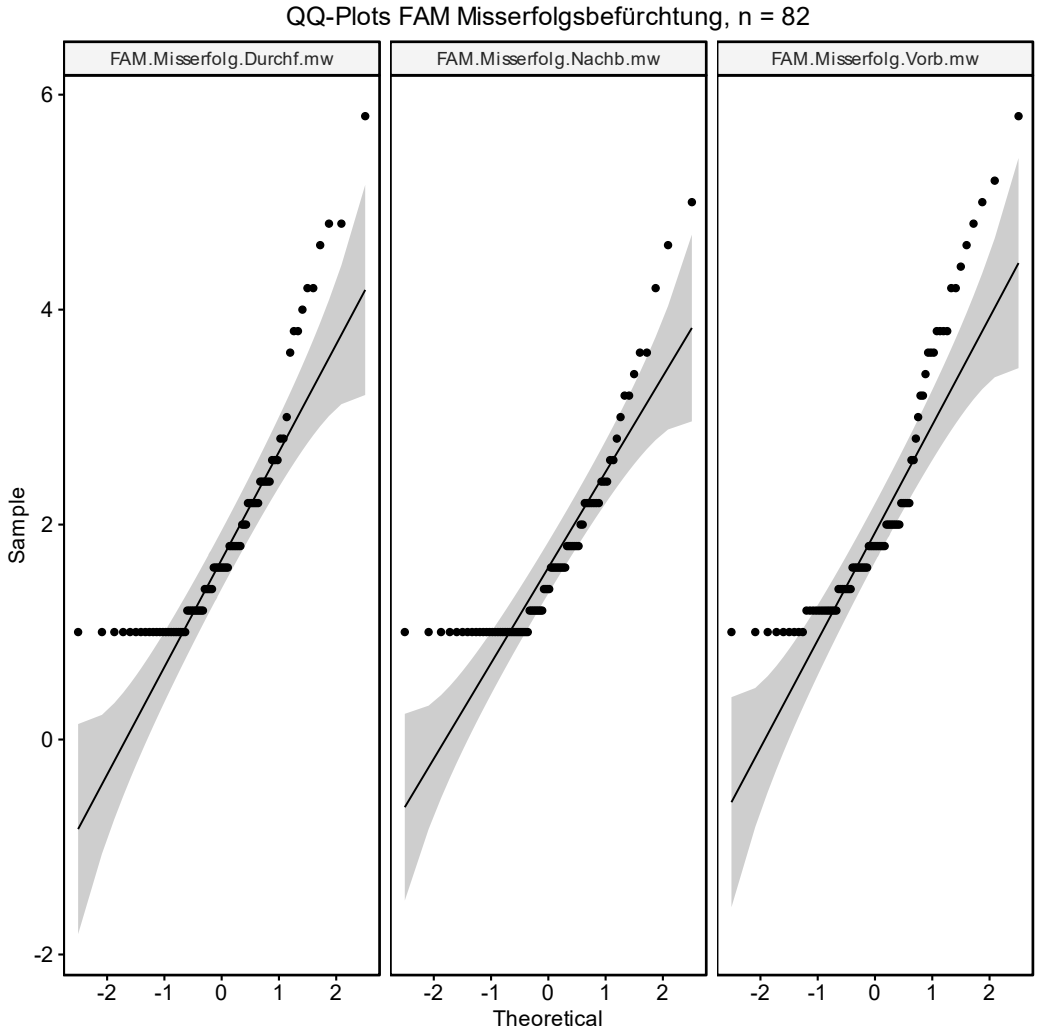


Abbildung 95: QQ-Plots der Subskala Misserfolgsbefürchtung des FAM.

Der Mauchly-Test bestätigt die Sphärizität der Daten ($W = 0.991$, $p = .711$). Eine messwiederholte ANOVA fällt mit kleinem Effekt signifikant aus ($F(2, 162) = 3.67$, $p = .028$, $\eta_G^2 = 0.03$). Daran anschließende *post-hoc*-Prozeduren in Form gepaarter t-Tests mit Bonferroni-Korrektur offenbaren einen mit kleinem Effekt signifikanten Rückgang der Misserfolgsbefürchtung der Teilnehmenden vom ersten zum dritten Testzeitpunkt ($t(81) = -2.81$, $p = .006$, $d = 0.43$). Weitere Effekte konnten nicht aufgedeckt werden (Abbildung 96).

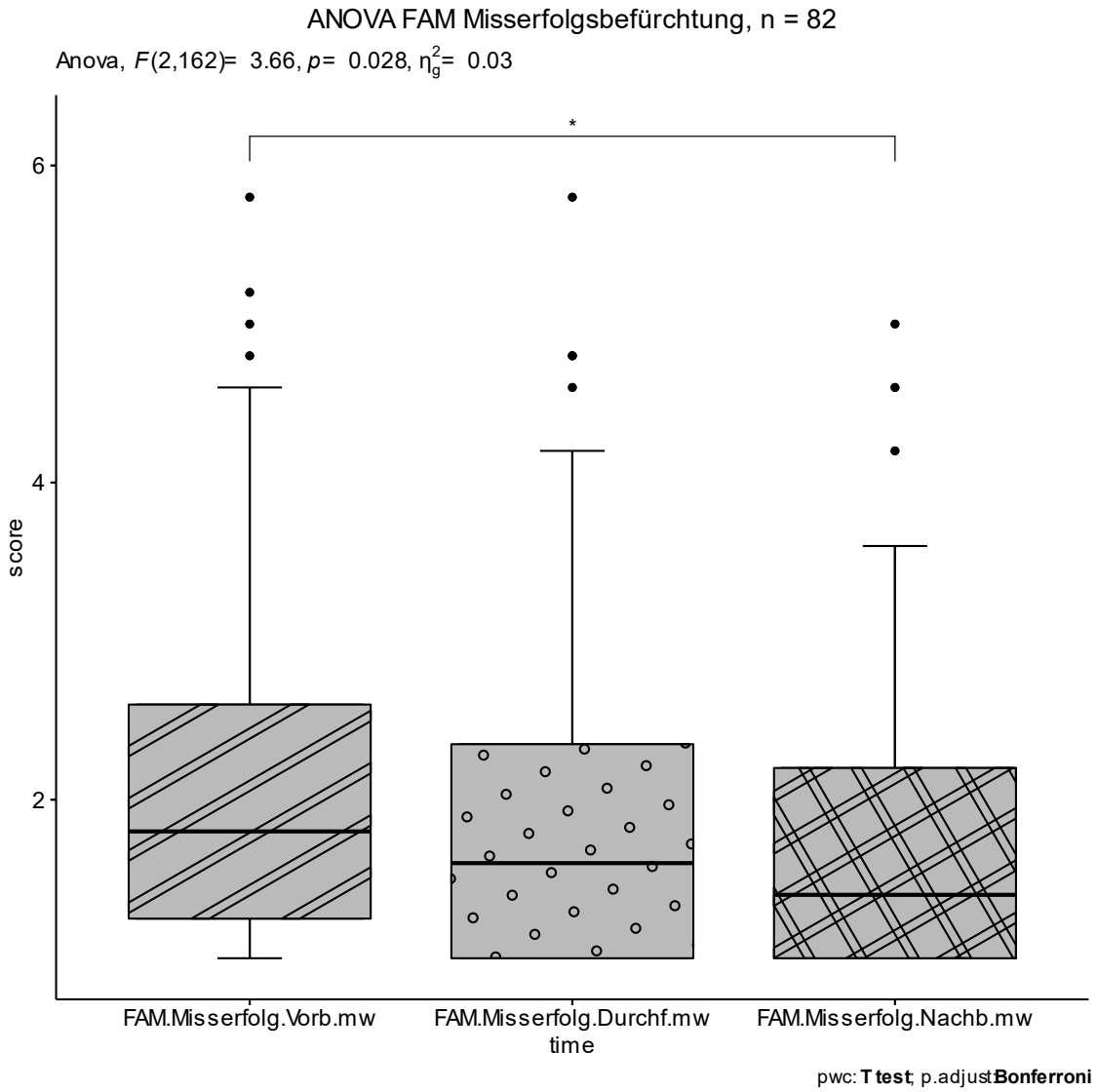


Abbildung 96: ANOVA FAM Misserfolgsbefürchtung. Varianzanalytisch zeigt sich in der Auswertung der Subskala Misserfolgsbefürchtung zum FAM zwischen erstem und drittem Testzeitpunkt ein signifikanter Unterschied.

Cognitive Load

Nachstehend werden die Ergebnisse der Skalen zur Erfassung des *Intrinsic*, *Extraneous* und *Germane Cognitive Load* berichtet.

Der Datensatz zum Fragebogen *Cognitive Load* (n = 146) zeigte keine erkennbaren Kreuzungsmuster. Auf Itemebene ergaben sich zwischen 6,8 % und 28 % an fehlenden Werten über alle Testzeitpunkte hinweg (Abbildung 97). Die Antwortverteilung zeigt tendenziell stärkere Ausprägungen der höheren Ratingoptionen unter den Items zur Erfassung des *Germane Cognitive Load* (Items CL7 bis CL10); die Items zur Erfassung von *Intrinsic* und *Extraneous Load* erscheinen mit eher niedrigem Rating auf der elfstufigen Likertskala (Ratingoptionen 1 – 11, Abbildung 98). Die Daten weisen über alle Items und Testzeitpunkte weder extreme Schiefen (-0.44 – 1.47) noch extreme Wölb-

ungen (-1.42 – 1.91) auf. Sowohl durchgeführte Kolmogorov-Smirnov-Tests als auch eine qualitative Betrachtung anhand von QQ-Plots ließen nicht auf durchgehend normalverteilte Daten schließen.

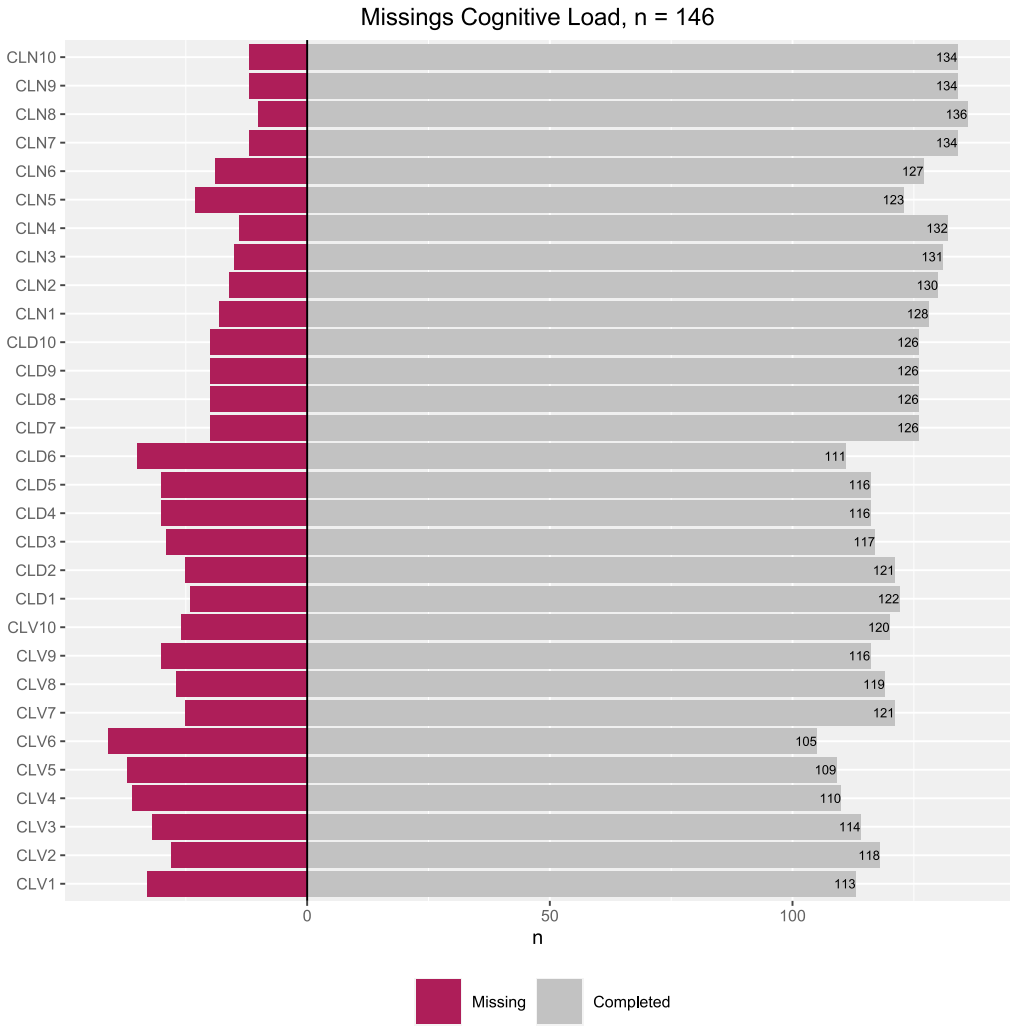


Abbildung 97: Anteile der fehlenden Werte über alle Items des Fragebogens zu Cognitive Load.

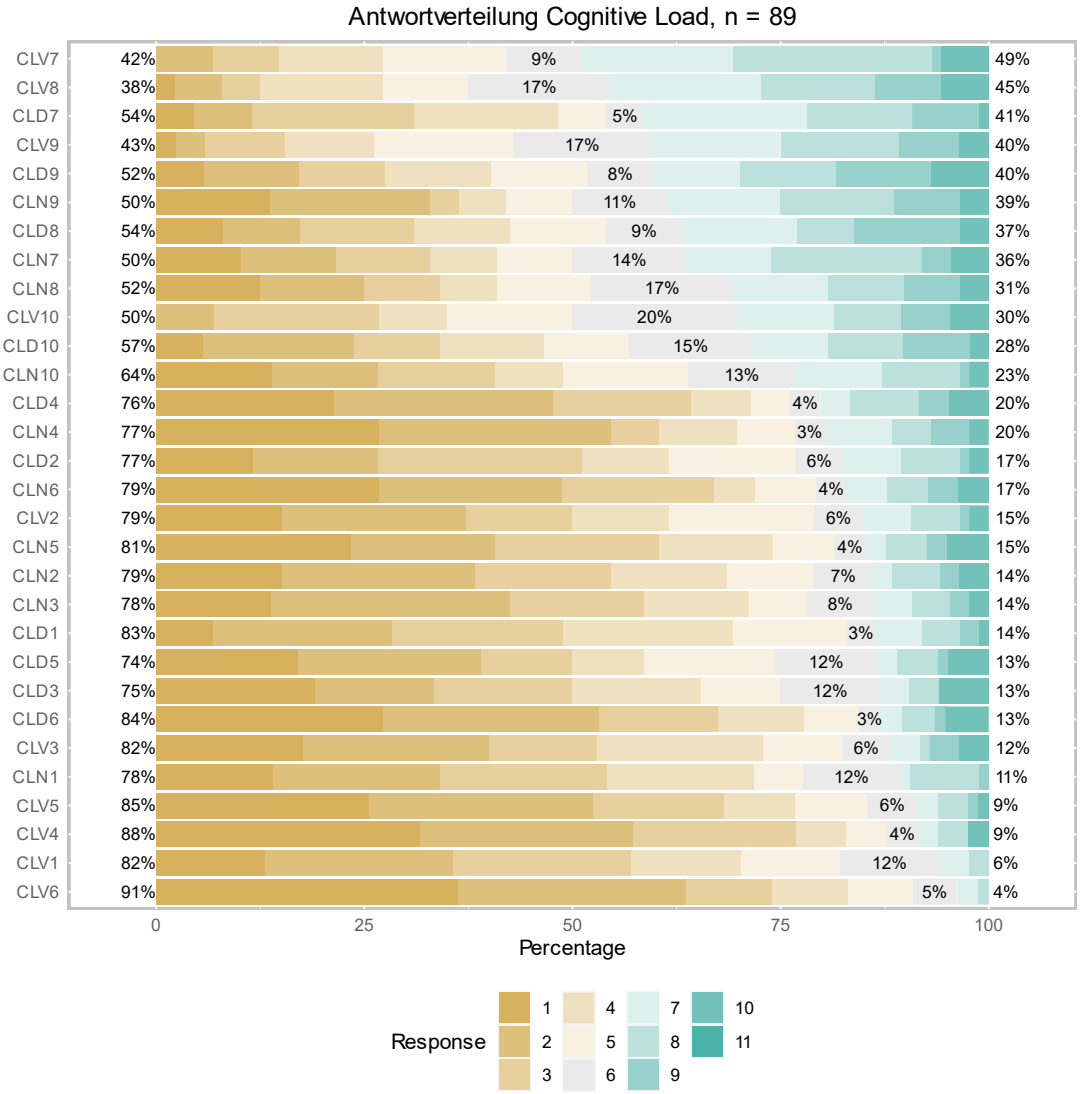


Abbildung 98: Antwortverteilung auf der elfstufigen Likert-Skala zur Erfassung des Cognitive Load über alle Testzeitpunkte.

Die Itemanalyse wurde mit einer aggregierten Stichprobe von 89 Lernenden nach Ausschluss fehlender Werte für den ersten Testzeitpunkt durchgeführt. Korrigierte Itemtrennschärfen im Bereich von $r_{it} = .60$ bis $r_{it} = .87$, Itemschwierigkeiten von $p_{Dahl} = 22.25$ bis $p_{Dahl} = 59.78$ sowie akzeptable bis gute interne Konsistenzen der drei Subskalen *Intrinsic* ($\alpha = .80$), *Extraneous* ($\alpha = .75$) und *Germane Load* ($\alpha = .87$) zum TZP1 (Testzeitpunkt Vorbereitung, n = 89) lassen auf gute Itemcharakteristika der Subskalen schließen. Für den zweiten Testzeitpunkt stellen sich die Itemkennwerte und internen Konsistenzen als ausgezeichnet dar ($\alpha_{IL} = .90$, $\alpha_{EL} = .78$, $\alpha_{GL} = .93$; Tabelle 25). Ähnlich gut stellen sich die Werte zum dritten Testzeitpunkt dar ($\alpha_{IL} = .89$, $\alpha_{EL} = .73$, $\alpha_{GL} = .92$; Tabelle 26).

Intrinsic Cognitive Load

Deskriptiv ergibt sich für den *Intrinsic Load* in der Vorbereitungsphase eine eher geringe Ausprägung (*M* = 3.51, *Mdn*. = 3.33, *SD* = 1.91, n = 89). Die deskriptiven Werte zum Testzeitpunkt 2 (Durchführung) liegen im Mittel nur geringfügig höher (*M* = 3.82, *Mdn*. = 3.33, *SD* = 2.14, n = 89). Zum dritten Testzeitpunkt ergibt sich deskriptiv keine deutliche Abweichung zum ersten Testzeitpunkt (TZP3, *M* = 3.59, *Mdn*. = 3.00, *SD* = 2.12, n = 89, Abbildung 99).

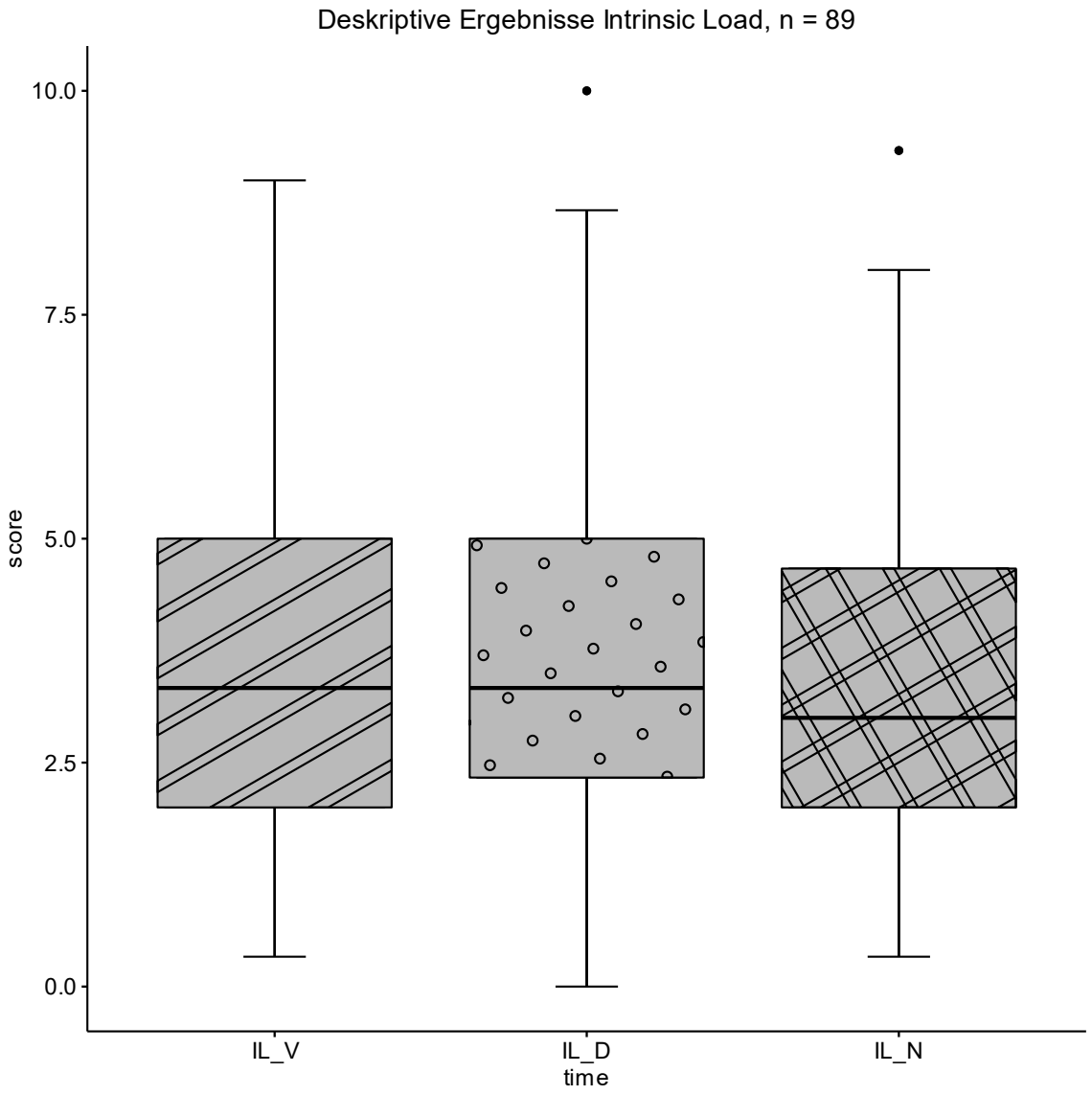


Abbildung 99: Boxplot-Darstellung der deskriptiven Ergebnisse zur Subskala Intrinsic Load. Der Intrinsic Cognitive Load ist über den gesamten Verlauf der Lerneinheit hinweg auf niedrigem Niveau nahezu konstant.

In der Prüfung der Voraussetzungen zur weiteren inferenzstatistischen Analyse zeigten sich in der Subskala *Intrinsic Load* zwei Ausreißer, welche beibehalten wurde, da keine Extremwerte nachgewiesen werden konnten. Aufgrund der Stichprobengröße (n = 89

nach Ausschluss fehlender Daten) wurde die Prüfung der Normalverteilung anhand der QQ-Plots vorgenommen. Diese lassen eine weitgehende Übereinstimmung mit der Normalverteilung erkennen, sodass die weitere Analyse unter Annahme normalverteilter Daten erfolgte (Abbildung 100). Weiterhin ist Sphärizität der Daten auf Grundlage eines nicht-signifikanten Mauchly-Tests anzunehmen ($W = 0.979$, $p = .40$). Die messwiederholte ANOVA zeigt keine signifikanten Unterschiede des *Intrinsic Load* über die drei Testzeitpunkte hinweg ($F(2, 176) = 0.624$, $p = .54$). Die deskriptiv starke Übereinstimmung der Werte über alle drei Testzeitpunkt hinweg konnte somit inferenzstatistisch bestätigt werden.

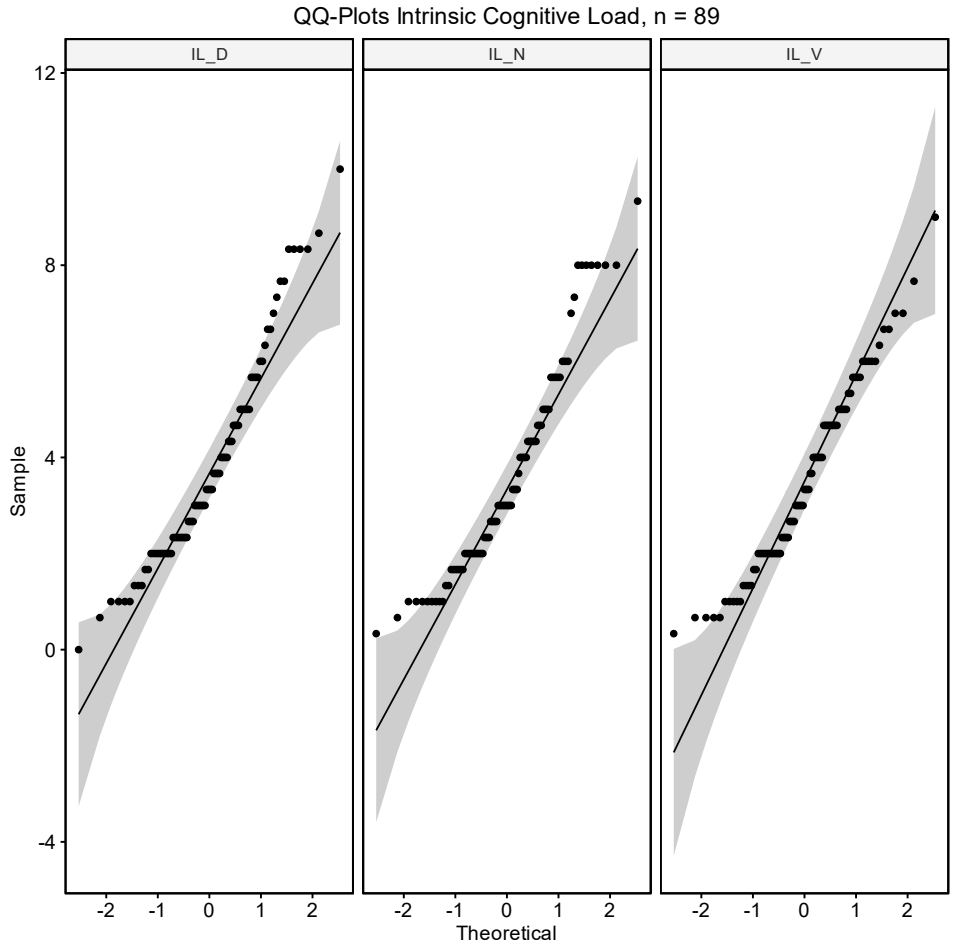


Abbildung 100: QQ-Plots der Daten zur Subskala Intrinsic Load über die drei Testzeitpunkte. Eine Normalverteilung kann aufgrund der weitgehenden Übereinstimmung der Datenpunkte mit dem Konfidenzintervall angenommen werden.

Extraneous Cognitive Load

In der deskriptiven Auswertung zeigt sich zum ersten Testzeitpunkt eine geringe Ausprägung des *Extraneous Cognitive Load* auf der elfstufigen Likertskala (Skalierung 0 – 10, $M = 2.56$, $Mdn. = 2.33$, $SD = 1.73$, n = 89). Dieser nimmt über die Durchführ-

ungsphase (TZP2, $M = 3.31$, *Mdn*. = 2.67, $SD = 2.24$, n = 89) leicht zu und variiert in der Nachbereitungsphase kaum gegenüber dem zweiten Testzeitpunkt (TZP3, $M = 3.29$, *Mdn*. = 2.67, $SD = 2.16$, n = 89).

Der Datensatz zum Konstrukt *Extraneous Load* (n = 89) weist in allen drei Testzeitpunkten in Summe zehn Ausreißer auf, jedoch ist keiner als Extremwert kritisch zu betrachten. In Anlehnung an den zentralen Grenzwertsatz und die grafische Bewertung anhand von QQ-Plots kann eine annähernde Normalverteilung der Daten angenommen werden (Abbildung 101).

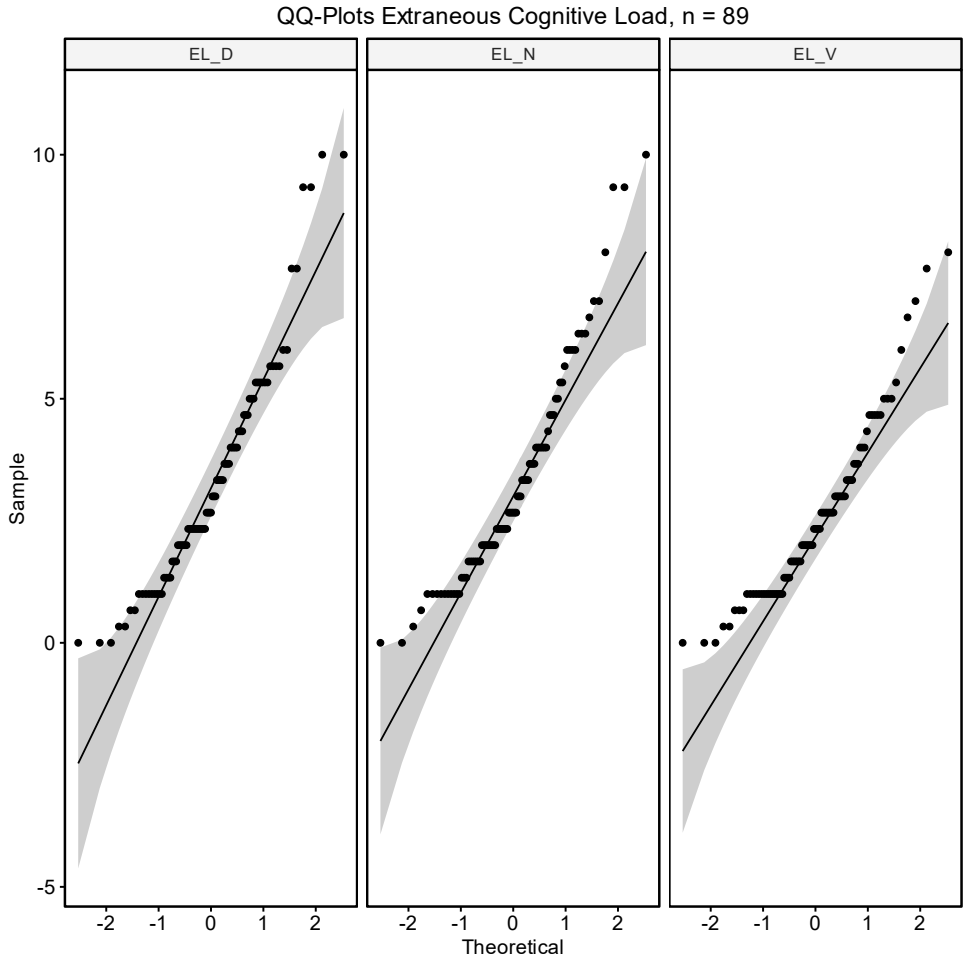


Abbildung 101: QQ-Plots der Daten zum Extraneous Load. Eine Annäherung an die Normalverteilung ist erkennbar.

Nach durchgeführtem Mauchly-Test ist auch hier die Sphärizität der Daten als gegeben anzunehmen ($W = 0.958$, $p = .154$). Eine messwiederholte Auswertung mittels ANOVA liefert mit $F(2, 176) = 4.31$, $p = .015$, $\eta_G^2 = 0.028$ signifikante Unterschiede mit kleinem Effekt in den drei Testzeitpunkten. *Post-hoc* Prozeduren mittels gepaarter t-Tests zeigen keine Effekte zwischen Durchführung (TZP2) und Nachbereitung (TZP3). Es konnte jedoch eine signifikante Zunahme des *Extraneous Load* mit kleinem Effekt von TZP1 (Vorbereitung) zu TZP2 (Durchführung) identifiziert werden ($t(88) = 2.69$,

$p = .009$, $d = 0.38$). Ebenfalls zeigt sich eine mit kleinem Effekt signifikante Zunahme des *Extraneous Load* von Vorbereitung zu Nachbereitung ($t(88) = 2.68$, $p = .009$, $d = 0.37$).

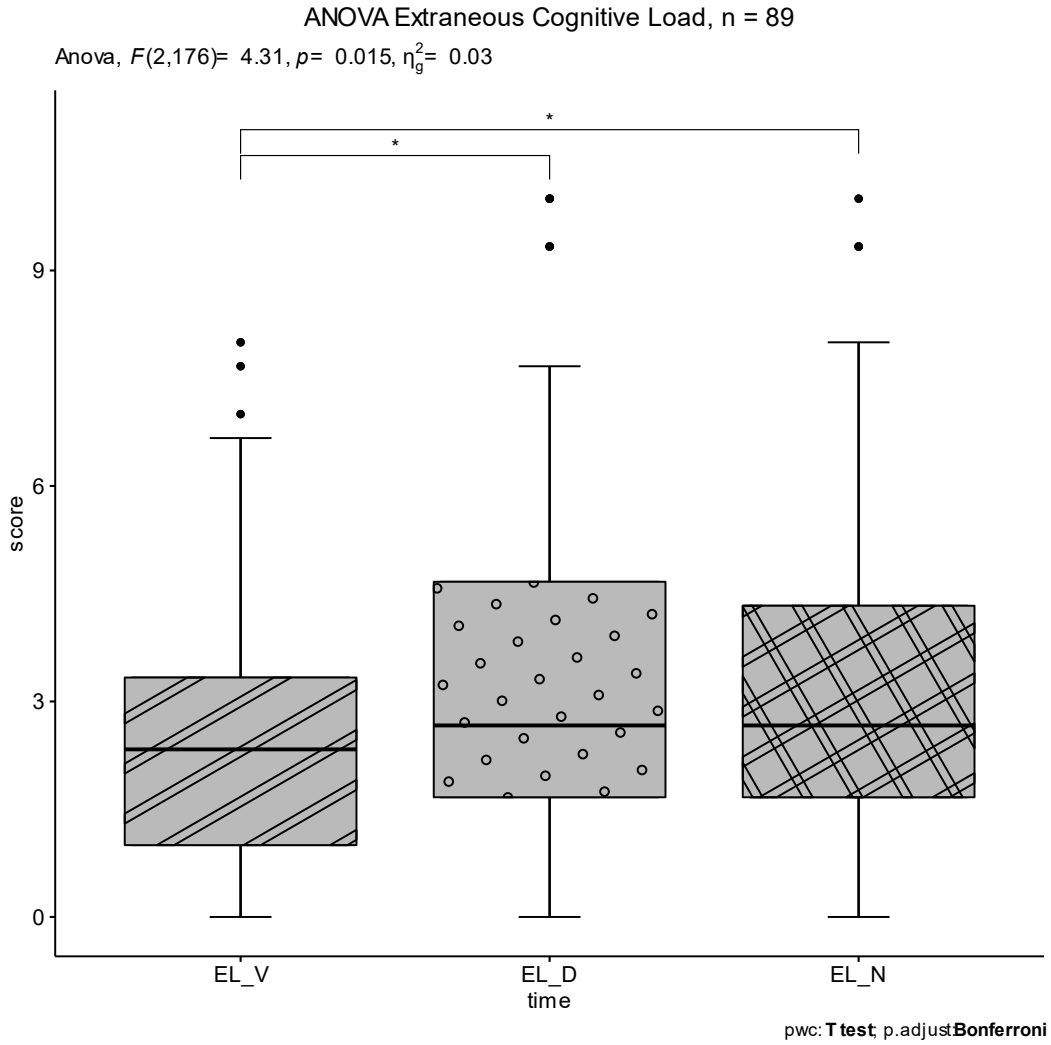


Abbildung 102: ANOVA Extraneous Load. Inferenzstatistische Unterschiedsprüfung der Daten zur Subskala Extraneous Load. Es zeigen sich statistisch signifikante Unterschiede zwischen TZP1 und TZP2 sowie zwischen TZP1 und TZP3.

Germane Cognitive Load

In der deskriptiven Betrachtung zeigt sich ein in der Vorbereitungsphase (TZP1) leicht überdurchschnittlicher *Germane Cognitive Load* (*M* = 5.68, *Mdn*. = 6.00, *SD* = 2.00, n = 89). Dieser ist zum zweiten Testzeitpunkt deutlich rückläufig mit einem Mittelwert von 5.14 (*Mdn*. = 5.00, *SD* = 2.42, n = 89) auf der elfstufigen Likert-Skala. Im Vergleich dazu erscheint der *Germane Cognitive Load* in der Nachbereitungsphase geringfügiger verändert zur Durchführungsphase (TZP3, *M* = 4.84, *Mdn*. = 5.00, *SD* = 2.42, n = 89; Abbildung 103).

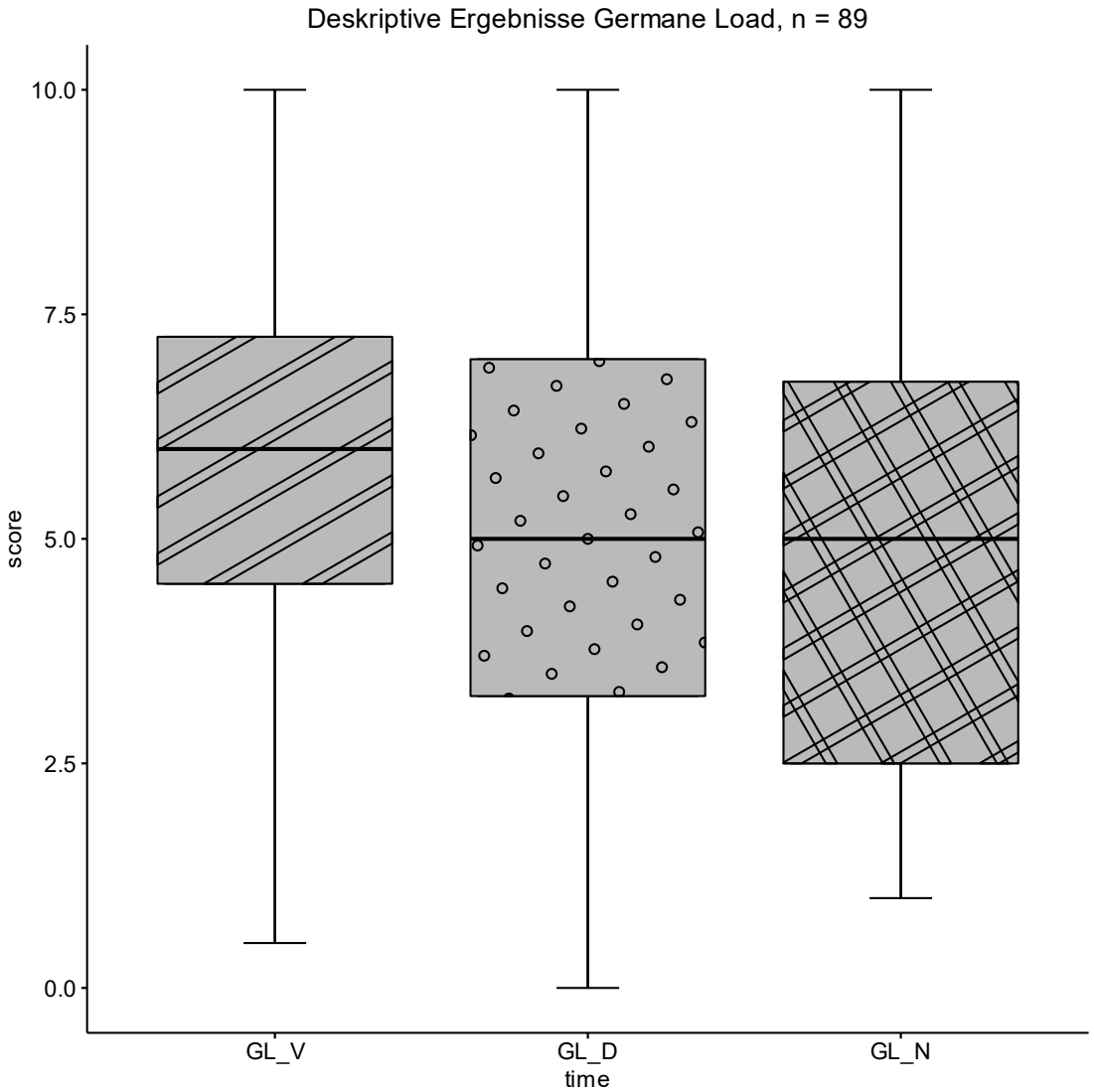


Abbildung 103: Boxplot-Darstellung der deskriptiven Ergebnisse zur Subskala Germane Load. Der Germane Cognitive Load ist deskriptiv vom ersten zum zweiten Testzeitpunkt leicht rückläufig. Insgesamt ist der Germane Load im mittleren bis hohen Bereich verortet.

Die Daten zur Subskala *Germane Cognitive Load* weisen keine Ausreißer auf. Auch hier macht der Abgleich der QQ-Plots eine Ablehnung der Normalverteilungshypothese nicht erforderlich (Abbildung 104).

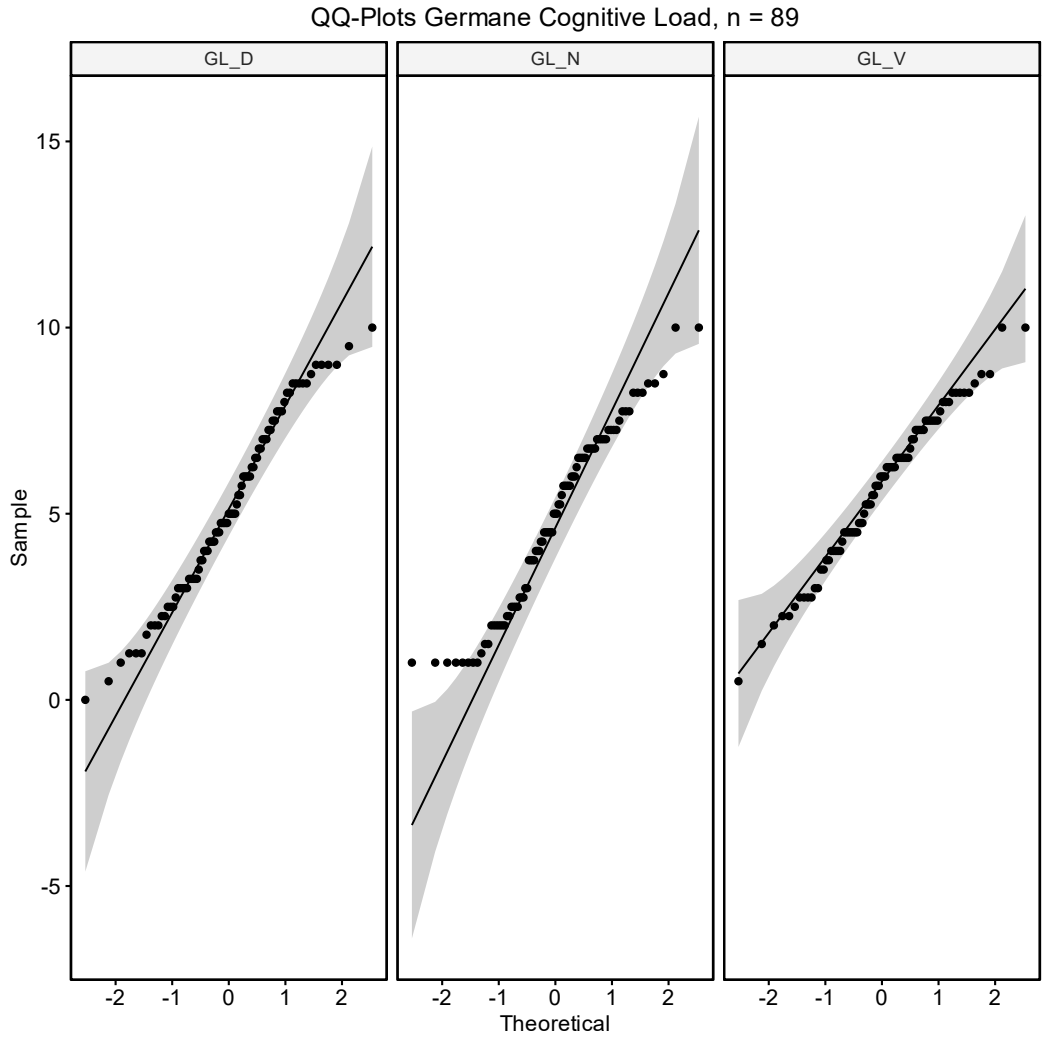


Abbildung 104: QQ-Plots zur Subskala Germane Cognitive Load. Eine Normalverteilung der Daten darf anhand der Überschneidung der Datenpunkte mit den Konfidenzintervallen angenommen werden.

Sphärizität der Daten ist gegeben (Mauchly-Test, $W = 0.972$, $p = .289$). Eine Analyse durch messwiederholte ANOVA deckt keine Effekte über die Testzeitpunkte hinweg auf ($F(2, 176) = 2.942$, $p = .055$, $\eta^2_G = 0.023$). Die deskriptiv starke Übereinstimmung der Werte über alle drei Testzeitpunkt hinweg konnte somit inferenzstatistisch bestätigt werden.

System Usability

Der Datensatz zur *System Usability* weist eine homogene Verteilung fehlender Daten auf (Abbildung 105). Die Antwortverteilung nach paarweisem Ausschluss ist in Abbildung 106 dargestellt.

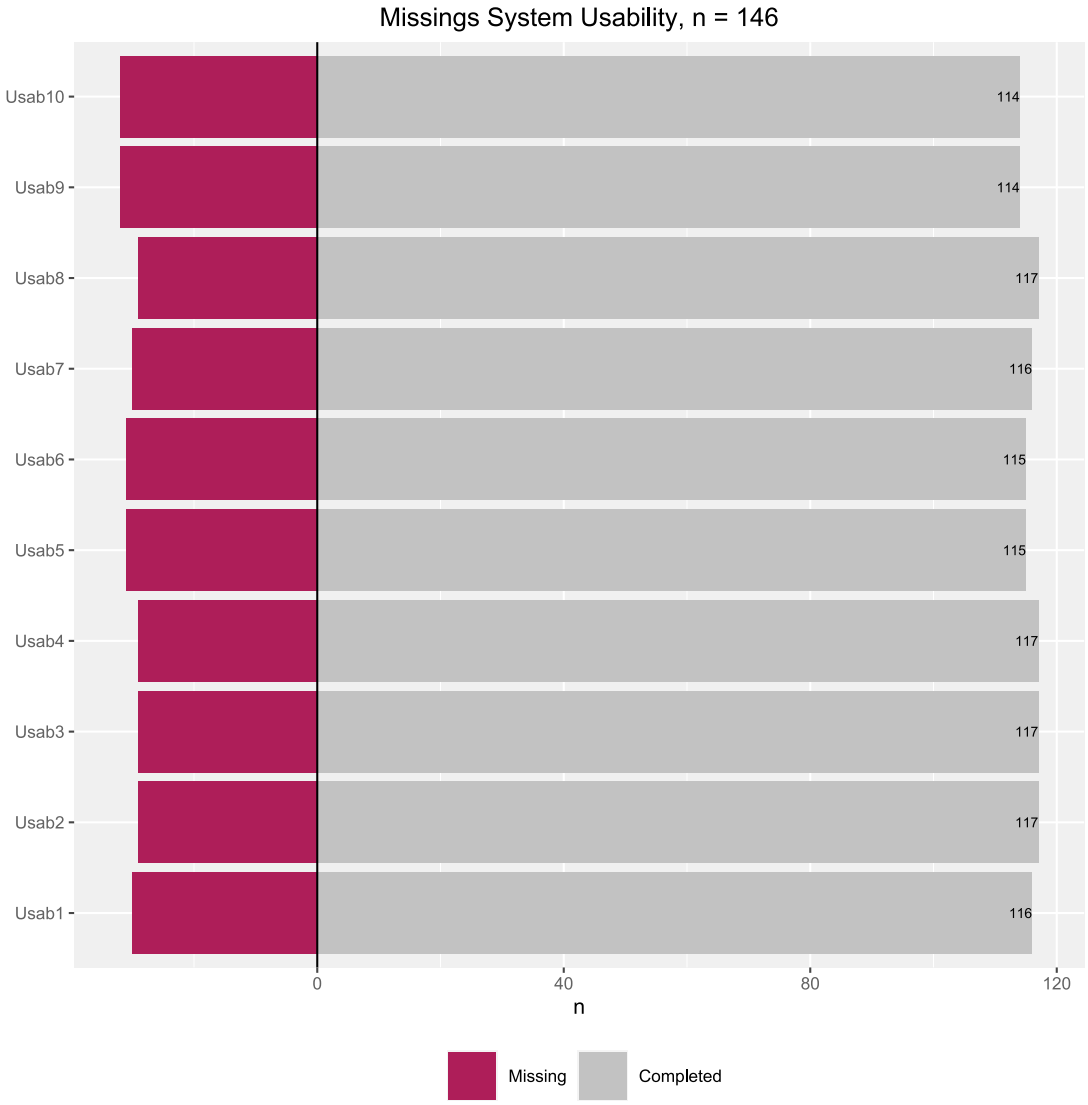


Abbildung 105: Verteilung der fehlenden Daten im Datensatz zur System Usability.

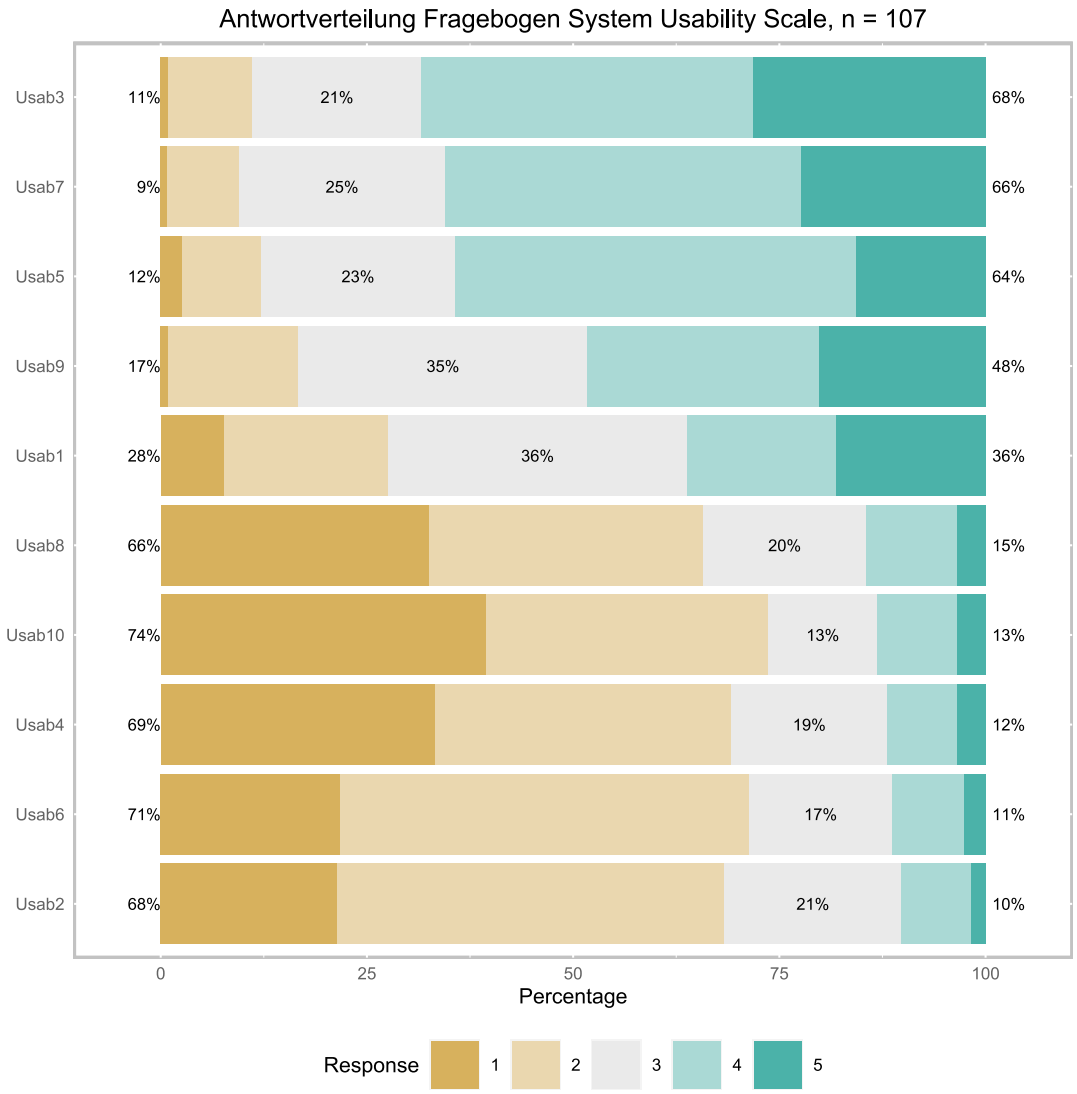


Abbildung 106: Antwortverteilung der Items zur Usability.

Eine Itemanalyse auf Grundlage des Datensatzes von 107 Lernenden nach Ausschluss fehlender Daten weist korrigierte Trennschärfen von $r_{it} = .39$ bis $r_{it} = .73$ auf. Die Itemschwierigkeit liegt im Bereich von $p_{Dahl} = 30.14$ bis $p_{Dahl} = 49.53$. Zusammen mit einer zufriedenstellenden internen Konsistenz ($\alpha = .82$) sind die Itemkennwerte somit als durchweg gut zu bezeichnen.

Die deskriptive Auswertung gemäß Manual liefert einen Wert von 68.15 Punkten auf der Skala mit dem Wertebereich 0 bis 100.

Zusammenschau der Ergebnisse der Fragebogenerhebung auf Lernendenseite

Zur Analyse der Itemkennwerte wurden in allen Fällen die Daten entlang der jeweiligen Testzeitpunkte geprüft. Eine Überprüfung auf Kreuzungsmuster ergab keine relevanten ausschlussfähigen Muster. Vor Durchführung der deskriptiven Analysen erfolgte ein paarweiser Ausschluss fehlender Daten, sodass im weiteren Verlauf über alle

Testzeitpunkte hinweg vollständige Fälle mit konstruktabhängig variabler Stichprobengröße herangezogen werden konnten. Die Kennwerte der einzelnen Skalen zu den jeweiligen Testzeitpunkten sind Tabelle 24, Tabelle 25 und Tabelle 26 zu entnehmen, die deskriptiven Ergebnisse finden sich in der Übersicht in Tabelle 27.

Tabelle 24: Itemkennwerte TZP 1 „Vorbereitung", paarweiser Ausschluss fehlender Daten. Fett gedruckte Kennwerte verweisen auf möglicherweise problematische Eigenschaften der Skalen.

Konstrukte	r_{it} **(>.3)**	p_{Dahl} **(20 < p < 80)**	**α (>.7)**	**Schiefe (<2) Kurtosis (<7)**	**n**
Aktuelle Motivation – Herausforderung (4 Items, Skalierung 1-7)	.34 – .76	35.34 – 66.47	.74	-0.44 – 0.47 -1.29 – 0.04	83
Aktuelle Motivation – Interesse (5 Items, Skalierung 1-7)	.55 – .75	**19.08** – 55.82	.80	-0.34 – 1.36 -0.99 – 1.85	83
Aktuelle Motivation – Erfolgswahrscheinlichkeit (4 Items, Skalierung 1-7)	**.09** – .68	62.45 – **83.94**	**.49**	-1.91 – -0.10 -0.64 – 4.56	83
Aktuelle Motivation – Misserfolgsbefürchtung (5 Items, Skalierung 1-7)	.31 – .90	**18.27** – 22.89	.84	1.14 – 1.50 -0.05 – 1.48	83
Flow-Erleben (10 Items, Skalierung 1-7)	.36 – .73	29.65 – 58.07	.78	-0.40 – 0.58 -0.90 – 0.63	95
Flow-Besorgniskomponente (3 Items, Skalierung 1-7)	.42 – .78	**10.23** – 28.22	.72	0.59 – **2.17** -0.63 – 5.02	114
Intrinsic Cognitive Load (3 Items, Skalierung 0-10)	.64 – .87	33.03 – 37.42	.80	0.37 – 0.95- 0.64 – 0.45	89
Extraneous Cognitive Load (3 Items, Skalierung 0-10)	.60 – .78	22.25 – 28.54	.75	1.03 – 1.47 0.36 – 1.91	89
Germane Cognitive Load (4 Items, Skalierung 0-10)	.70 – .84	52.70 – 59.78	.87	-0.44 – 0.02- 0.66 – -0.37	89
Usability (10 Items, Skalierung 1-5)	.39 – .73	30.14 – 49.53	.82	-0.91 – 0.04 -0.91 – 0.63	107

Tabelle 25: Itemkennwerte TZP 2 „Durchführung“, paarweiser Ausschluss fehlender Daten. Fett gedruckte Kennwerte verweisen auf möglicherweise problematische Eigenschaften der Skalen.

Konstrukte	**r_{it} (>.3)**	**p_{Dahl} (20 < p < 80)**	**α (>.7)**	**Schiefe (<2) Kurtosis (<7)**	**n**
Aktuelle Motivation – Herausforderung (4 Items, Skalierung 1-7)	**.06** – .75	32.13 – 62.65	**.51**	-0.66 – 0.63 -0.94 – 0.64	83
Aktuelle Motivation – Interesse (5 Items, Skalierung 1-7)	.47 – .75	31.33 – 56.63	.77	-0.20 – 0.70 -0.90 – -0.50	83
Aktuelle Motivation – Erfolgswahrscheinlichkeit (4 Items, Skalierung 1-7)	.67 – .74	67.27 – 82.73	.81	-1.61 – -0.65 -0.57 – 1.77	83
Aktuelle Motivation – Misserfolgsbefürchtung (5 Items, Skalierung 1-7)	.33 – .83	**12.45 – 19.88**	.81	1.54 – **2.00** 2.08 – 3.97	83
Flow-Erleben (10 Items, Skalierung 1-7)	.42 – .78	33.33 – 61.93	.85	-0.40 – 0.26-0.86 – 95 -0.31	
Flow-Besorgniskomponente (3 Items, Skalierung 1-7)	.44 – .67	**12.72 – 17.11**	**.62**	1.34 – 1.851.08 – 2 114 .60	
Intrinsic Cognitive Load (3 Items, Skalierung 0-10)	.84 – .88	36.97 – 39.21	.90	0.58 – 0.83 0.35 – 0.26	89
Extraneous Cognitive Load (3 Items, Skalierung 0-10)	.68 – .81	28.09 – 36.52	.78	0.65 – 1.30 -0.35 – 1.02	89
Germane Cognitive Load (4 Items, Skalierung 0-10)	.82 – .93	48.76 – 54.04	.93	-0.02 – 0.16 -1.18 – -1.08	89

Tabelle 26: Itemkennwerte TZP 3 "Nachbereitung", paarweiser Ausschluss fehlender Daten. Fett gedruckte Kennwerte verweisen auf möglicherweise problematische Eigenschaften der Skalen.

Konstrukte	**r_{it} (>.3)**	**p_{Dahl} (20 < p < 80)**	**α (>.7)**	**Schiefe (<2) Kurtosis (<7)**	**n**
Aktuelle Motivation – Herausforderung (4 Items, Skalierung 1-7)	.39 – .73	23.09 – 44.58	.71	0.04 – 0.77 -0.85 – -0.12	83
Aktuelle Motivation – Interesse (5 Items, Skalierung 1-7)	.65 – .84	**15.26** – 39.56	.86	0.17 – 1.71- 1.13 – 2.80	83
Aktuelle Motivation – Erfolgswahrscheinlichkeit (4 Items, Skalierung 1-7)	.58 – .80	60.24 – **80.72**	.77	-1.48 – -0.38- 0.68 – 1.74	83
Aktuelle Motivation – Misserfolgsbefürchtung (5 Items, Skalierung 1-7)	.52 – .81	**8.43 – 17.67**	.79	1.11 – **2.56**0.40 – **7.05**	83
Flow-Erleben (10 Items, Skalierung 1-7)	**.25** – .81	**19.47** – 52.28	.89	-0.19 – 0.62-1.19 – -0.38	95
Flow-Besorgniskomponente (3 Items, Skalierung 1-7)	.59 – .71	**9.21 – 12.72**	.74	1.69 – **2.47**1.93 – 5.94	114
Intrinsic Cognitive Load (3 Items, Skalierung 0-10)	.74 – .92	35.28 – 36.63	.89	0.59 – 0.91- 0.42 – 0.04	89
Extraneous Cognitive Load (3 Items, Skalierung 0-10)	.67 – .71	31.91 – 34.04	.73	0.89 – 1.04- 0.44 – 0.29	89
Germane Cognitive Load (4 Items, Skalierung 0-10)	.78 – .92	43.26 – 51.35	.92	-0.06 – 0.17- 1.42 – -0.98	89

Tabelle 27: Deskriptive Ergebnisse der betrachteten Subskalen zu allen drei Testzeitpunkten. Dabei wurde durch paarweisen Ausschluss mit variierenden Stichprobengrößen gearbeitet.

Konstrukte	TZP	*M*	*Mdn.*	*SD*	n
Aktuelle Motivation - Herausforderung (4 Items, Skalierung 1-7)	1	4.09	4.00	1.25	83
	2	3.78	3.75	1.02	83
	3	2.96	3.00	1.20	83
Aktuelle Motivation – Interesse (5 Items, Skalierung 1-7)	1	3.80	3.60	1.21	83
	2	4.00	4.00	1.20	83
	3	2.89	3.00	1.28	83
Aktuelle Motivation – Erfolgswahrscheinlichkeit (4 Items, Skalierung 1-7)	1	5.39	5.50	0.83	83
	2	5.48	6.00	1.26	83
	3	5.29	5.50	1.30	83
Aktuelle Motivation - Misserfolgsbefürchtung (5 Items, Skalierung 1-7)	1	2.22	1.80	1.28	83
	2	1.96	1.60	1.11	83
	3	1.73	1.40	0.91	83
Flow-Erleben(10 Items, Skalierung 1-7)	1	4.11	4.10	0.81	95
	2	4.13	4.10	1.11	95
	3	3.39	3.65	1.20	95
Flow-Erleben – Besorgniskomponente(3 Items, Skalierung 1-7)	1	2.25	2.00	1.21	114
	2	1.84	1.67	1.03	114
	3	1.65	1.00	0.94	114
Flow-Erleben - Anforderung(1 Item, Skalierung 1-10)	1	4.15	4.00	1.73	103
	2	4.36	4.50	1.96	103
	3	3.68	4.00	1.93	103
Flow-Erleben – Fähigkeit(1 Item, Skalierung 1-10)	1	4.94	5.00	1.63	103
	2	5.19	5.00	1.92	103
	3	5.22	5.00	2.08	103
Flow-Erleben – Passung (1 Item, Skalierung 1-10)	1	4.64	5.00	1.36	103
	2	4.84	5.00	1.57	103
	3	4.36	5.00	1.74	103

Tabelle 27 (Fortsetzung): Deskriptive Ergebnisse der betrachteten Subskalen zu allen drei Testzeitpunkten. Dabei wurde durch paarweisen Ausschluss mit variierenden Stichprobengrößen gearbeitet.

Konstrukte	TZP	*M*	*Mdn.*	*SD*	n
Intrinsic Cognitive Load (3 Items, Skalierung 0-10)	1	3.51	3.33	1.91	89
	2	3.82	3.33	2.14	89
	3	3.59	3.00	2.12	89
Extraneous Cognitive Load(3 Items, Skalierung 0-10)	1	2.56	2.33	1.73	89
	2	3.31	2.67	2.24	89
	3	3.29	2.67	2.16	89
Germane Cognitive Load(4 Items, Skalierung 0-10)	1	5.68	6.00	2.00	89
	2	5.14	5.00	2.42	89
	3	4.84	5.00	2.42	89
Usability (10 Items, Skalierung 1-5)		68.15			107

Für die Korrelationsanalyse erfolgte ein zeilenweiser Ausschluss fehlender Daten auf Itemebene. Die verbleibende Stichprobe umfasst n = 59 Schüler:innen. Da die Daten intervallskaliert sind und eine Normalverteilung nach dem zentralen Grenzwertsatz anzunehmen ist (Döring & Bortz, 2016; Eid et al., 2017), erfolgte die Korrelationsanalyse nach Pearson. Im Folgenden werden ausschließlich jene Korrelationen berichtet, für die eine Signifikanz der Korrelation ($p < .05$) gegeben war. Als relevant werden dabei Korrelationskoeffizienten $r > .50$ betrachtet. Aus Gründen der Lesbarkeit und grafischen Darstellbarkeit wird auf die Ausführung der Signifikanz für jede Korrelation separat verzichtet.

Die durchgeführten Zusammenhangsanalysen zwischen den einzelnen Subskalen dienen der Aufklärung möglicher Interdependenzen. Dabei zeigt sich in der Vorbereitungsphase (TZP 1) eine bedeutsame Korrelation zwischen der Besorgniskomponente des *Flows* und der Misserfolgsbefürchtung als Subfacette der aktuellen Motivation ($r = .61$). Ebenso ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen Interesse und *Flow*-Erleben ersichtlich ($r = .69$). Weiterhin korreliert der *Intrinsic Cognitive Load* in relevantem Maße mit dem *Extraneous Cognitive Load* ($r = .63$, Abbildung 107). Eine mittelmäßige negative Korrelation besteht zwischen den Subfacetten Erfolgsaussicht und *Intrinsic Cognitive Load* ($r = -0.58$). Die Herausforderung korreliert deutlich mit der Misserfolgsbefürchtung ($r = .52$) und mit dem Interesse ($r = .57$).

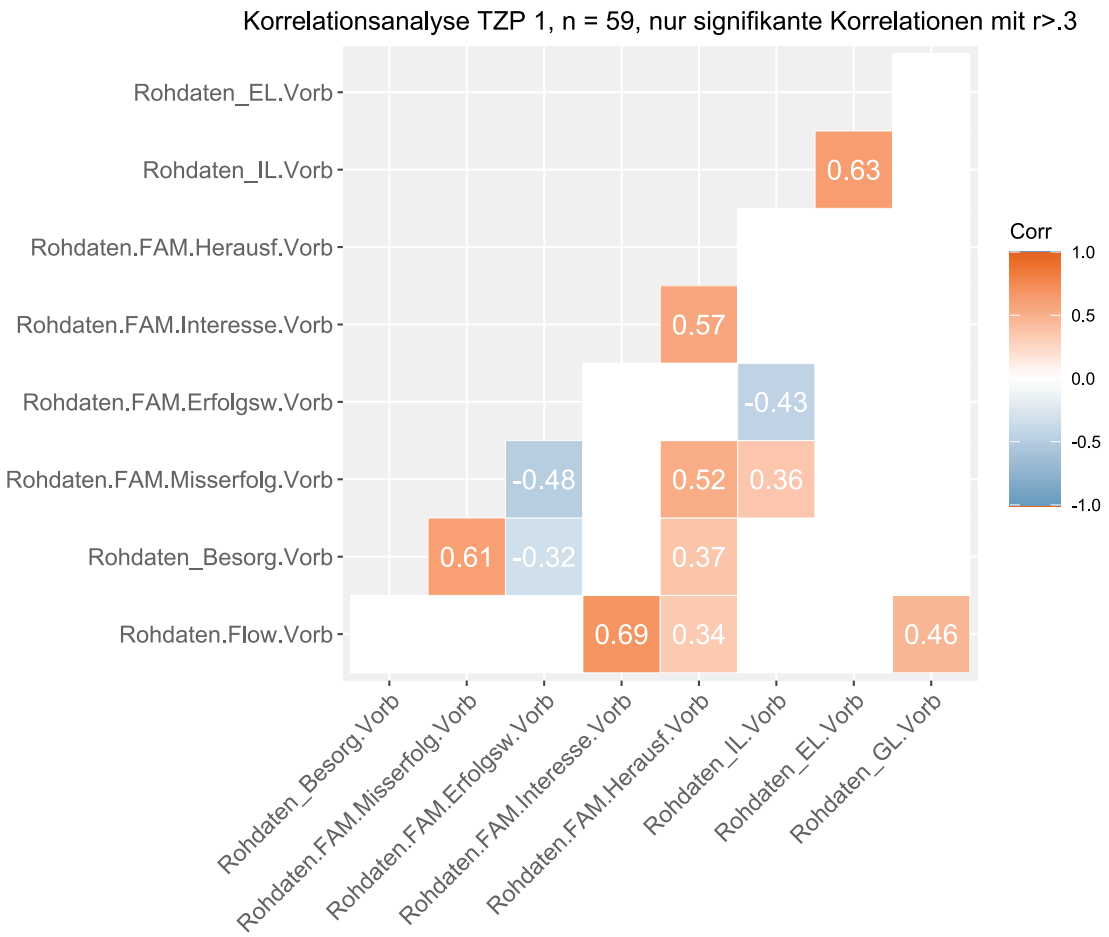


Abbildung 107: Korrelationsmatrix der Subskalen auf Lernendenseite zum TZP1. Positive Korrelationen sind in Rotschattierungen deutlich gemacht, negative Korrelationen sind blau gekennzeichnet. Die Stärke der Korrelationen spiegelt sich in der Farbintensität wider.

Zum zweiten Testzeitpunkt können etliche starke Korrelationen zwischen den einzelnen Subskalen festgestellt werden. So korrelieren Misserfolgsbefürchtung und Besorgniskomponente ($r = .51$), Erfolgsaussicht und *Flow*-Erleben ($r = .55$), Herausforderung und *Flow*-Erleben ($r = .54$) und *Extraneous* und *Intrinsic Cognitive Load* ($r = .58$) positiv miteinander. *Germane Cognitive Load* korreliert in deutlichem Maße positiv mit dem Interesse ($r = .59$). Die wahrgenommene Herausforderung zeigt relevante Zusammenhänge mit der Interessenskomponente ($r = .61$) und dem *Flow*-Erleben ($r = .54$). Ebenso zeigt sich ein starker positiver Zusammenhang von Interesse und *Flow*-Erleben ($r = .70$). *Intrinsic Cognitive Load* und Erfolgsaussicht stehen mit $r = -0.56$ in deutlichem negativem Zusammenhang (Abbildung 108).

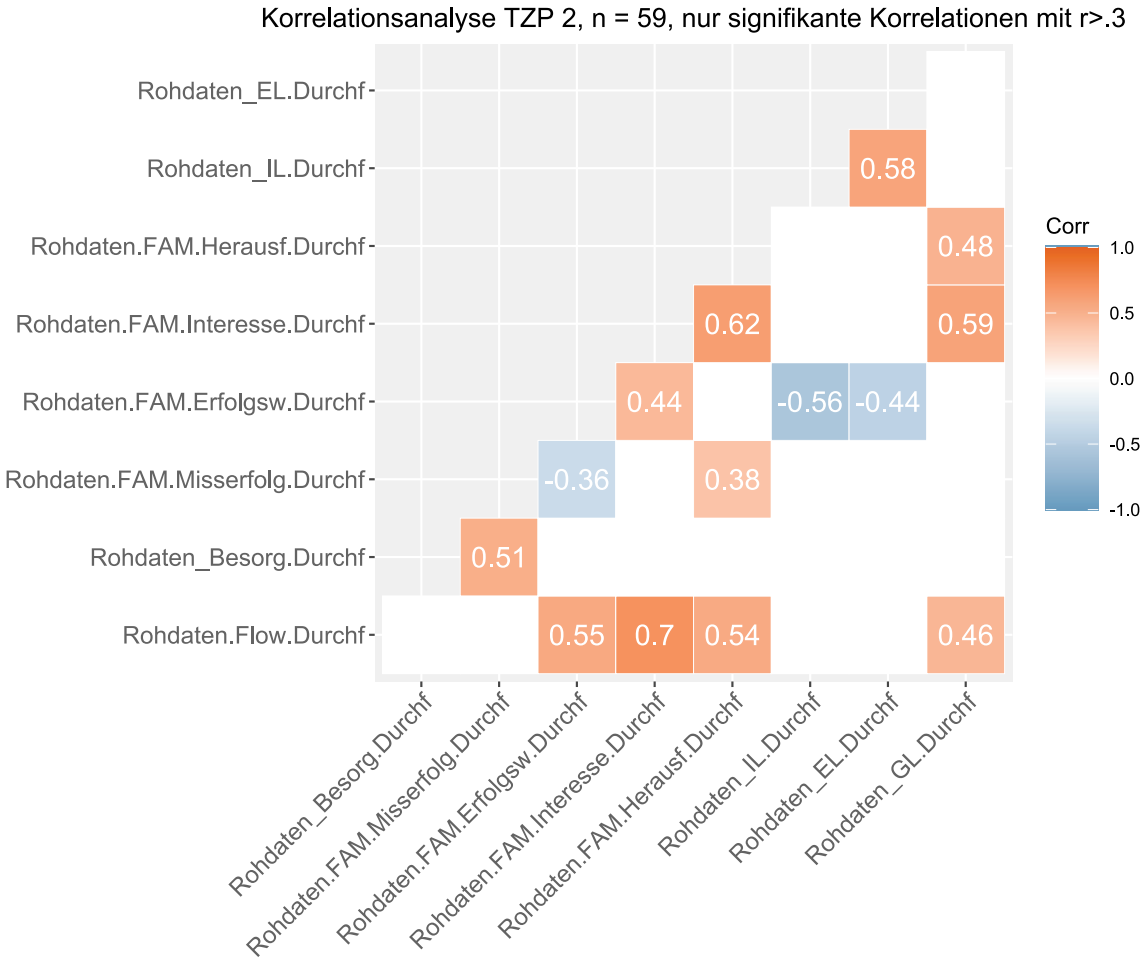


Abbildung 108: Heatmap-Plot der Korrelationen während des zweiten Testzeitpunktes (TZP2). Positive Korrelationen sind in Rotschattierungen deutlich gemacht, negative Korrelationen sind blau gekennzeichnet. Die Stärke der Korrelationen spiegelt sich in der Farbintensität wider.

Zum dritten Testzeitpunkt werden ebenfalls zahlreiche Korrelationen zwischen den Konstrukten ersichtlich. Das *Flow*-Erleben korreliert stark positiv mit Interesse (r = .76) und wahrgenommener Herausforderung (r = .72) und mäßig mit dem *Germane Load* (r = .50). Die Subskala Interesse zeigt starke Korrelationen mit der Herausforderung (r = .73) sowie dem *Germane Cognitive Load* (r = .73). Geringere Korrelationsmaße zeigen sich für *Germane Load* und Herausforderung (r = .59) sowie für *Intrinsic Load* und *Extraneous Load* (r = .62; Abbildung 109).

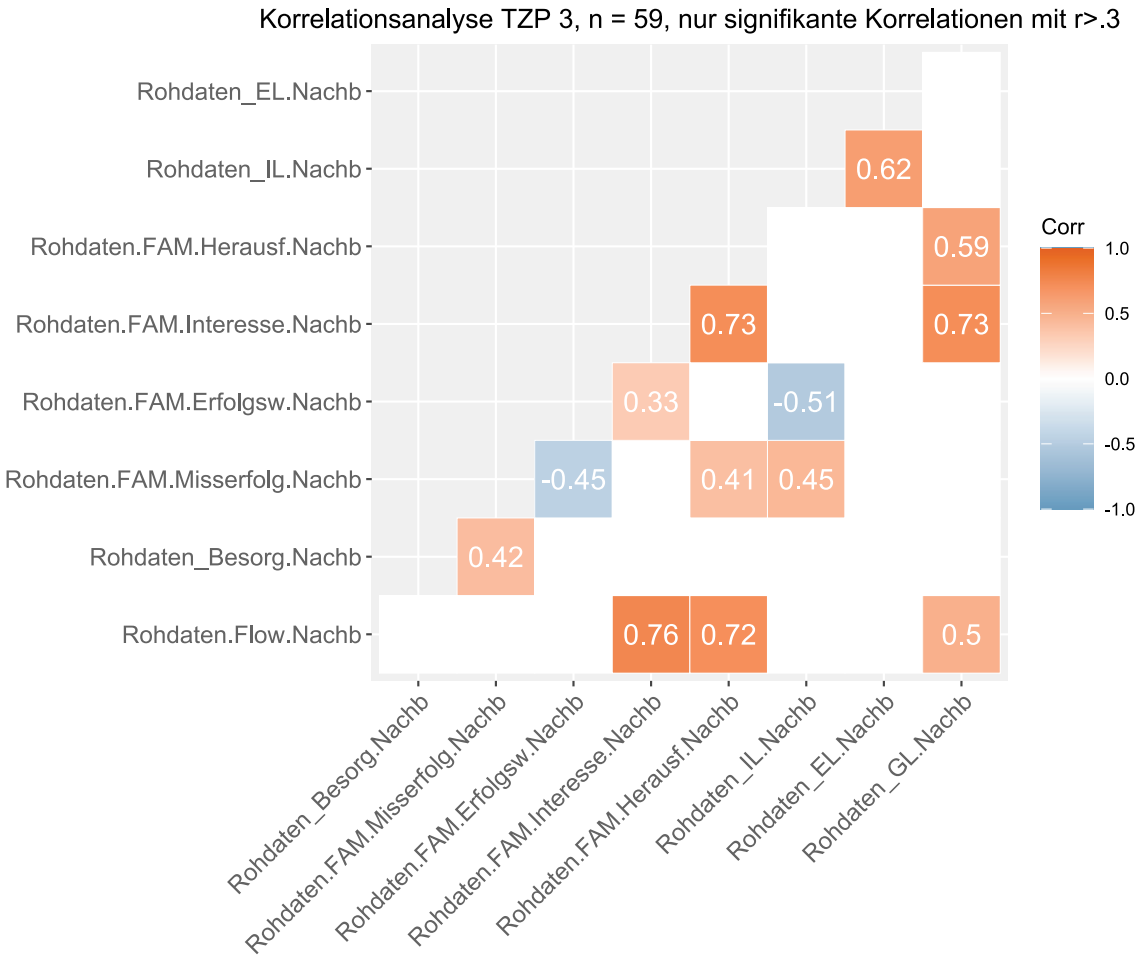


Abbildung 109: Zusammenhangsanalyse für den dritten Testzeitpunkt. Positive Korrelationen sind in Rotschattierungen deutlich gemacht, negative Korrelationen sind blau gekennzeichnet. Die Stärke der Korrelationen spiegelt sich in der Farbintensität wider.

Auswertung der Logfiles

Innerhalb der eingesetzten virtuellen Labore konnten zahlreiche aussagekräftige Logdatensätze der Teilnehmenden identifiziert und ausgewertet werden (Tabelle 28). Bereits in der Betrachtung der Verweildauern in den einzelnen Kapiteln zeigt sich eine große Streuung (Abbildung 110).

Tabelle 28: Anzahl der auswertbaren Logdatensätze je virtuellem Labor.

Virtuelles Labor	$\mathbf{n_{Logdaten}}$
Aufbau Messgeräte	84
Chloridgehalt	23
Fließgeschwindigkeit	15
Leitfähigkeit	25
pH-Wert	26
Sauerstoffsättigung	19
Stickstofflieferanten	25

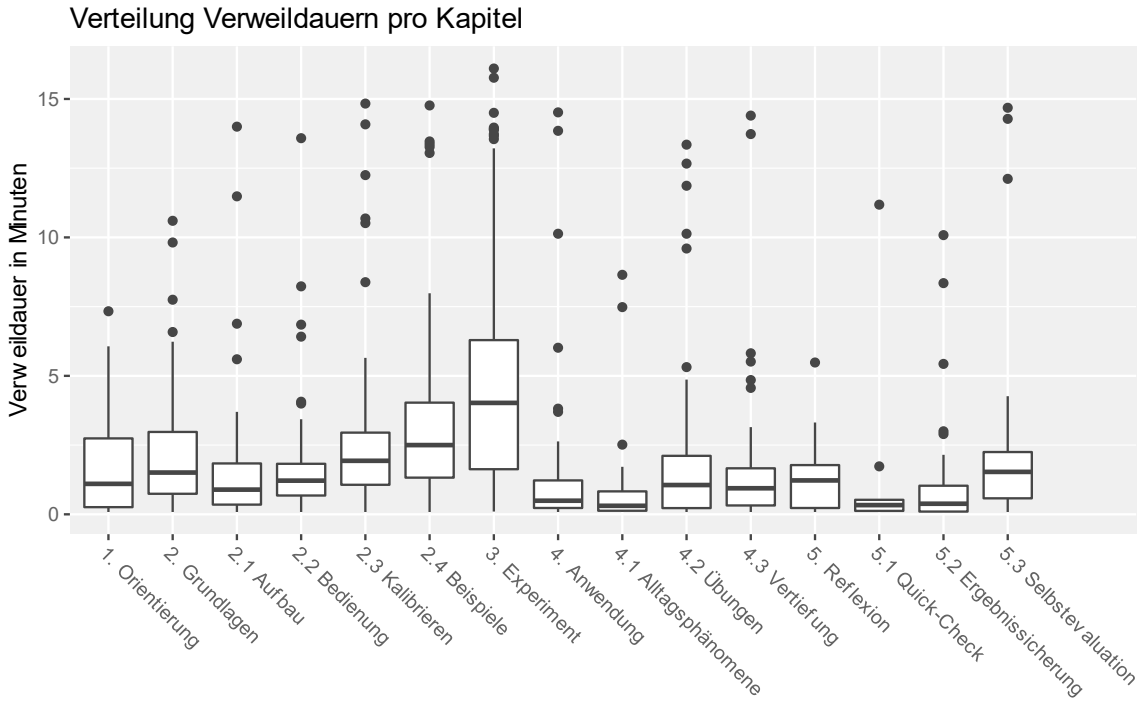


Abbildung 110: Verweildauern der Nutzenden in den einzelnen Teilkapiteln des virtuellen Labors zu Aufbau der Messgeräte und allgemeinen Aspekten der Datenauswertung.

Zahlreiche Nutzende zeigen ein Navigationsverhalten, welches sich stark am prototypisch durch die Struktur der Lernumgebung vorgegebenen Lernpfad orientiert (Abbildung 111). Dabei fällt auf, dass die zur Verfügung stehende Zeit von jeweils rund 90 Minuten für Vor- und Nachbereitung selten ausgereizt wurde. Häufig wurde die Nutzung der Labore bereits nach weniger als einem Drittel der maximalen Bearbeitungsdauer durch Logout beendet oder es fand keine weitere Nutzeraktivität mehr statt. Ebenso wurden teils sehr kurze Verweildauern innerhalb der Teilkapitel registriert, welche allein aufgrund der zu erwartenden Lesedauern der Kapitelinhalte eine inhaltliche Bearbeitung wenig plausibel erscheinen lassen (Abbildung 112).

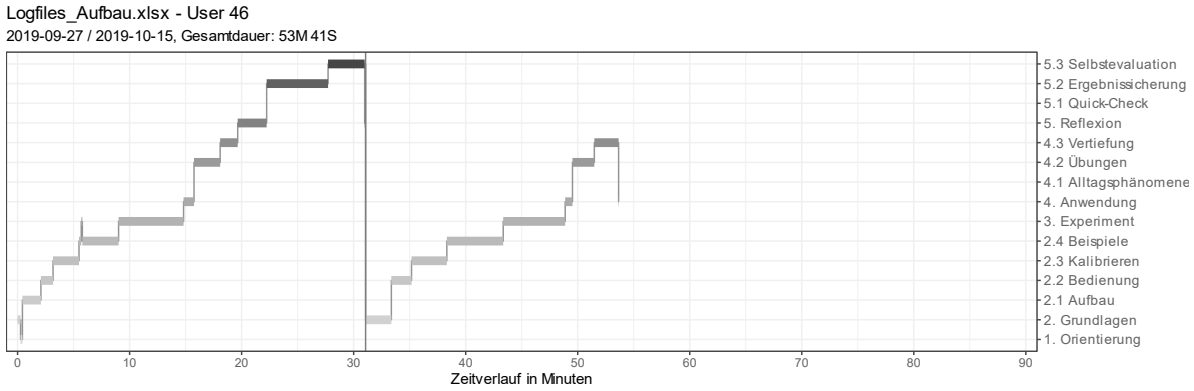


Abbildung 111: Bearbeitungsverlauf von User 46 im virtuellen Labor zum Aufbau der Messgeräte. Die vertikale Trennlinie unterteilt die beiden datengesteuert ermittelten Sessions (Vor- und Nachbereitung).

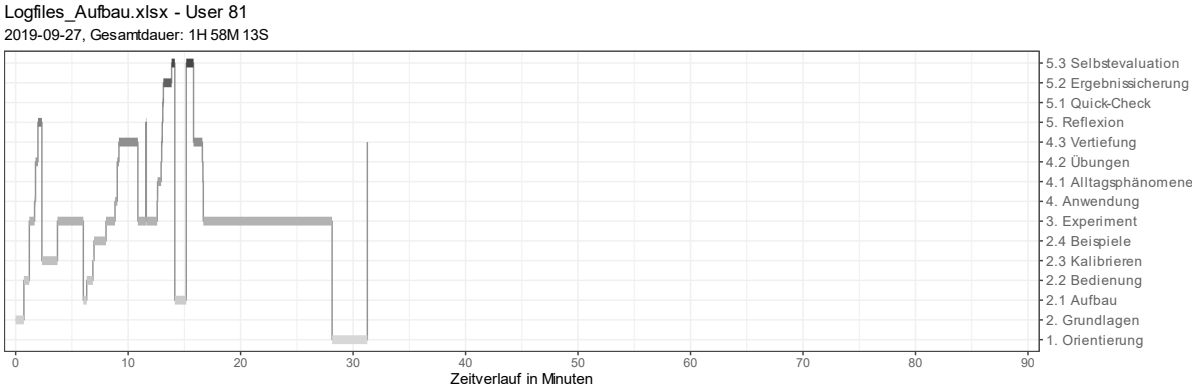


Abbildung 112: Bearbeitungsverlauf von User 81 im virtuellen Labor zum Aufbau der Messgeräte. Das scheinbar wahllose Navigationsverhalten wird in der Auftragung deutlich ersichtlich.

Weiterhin lassen sich Rückgriffe auf bereits bearbeitete Teilkapitel in den Logfiles finden, welche auf reflexive Prozesse der Teilnehmenden hinweisen (Abbildung 113).

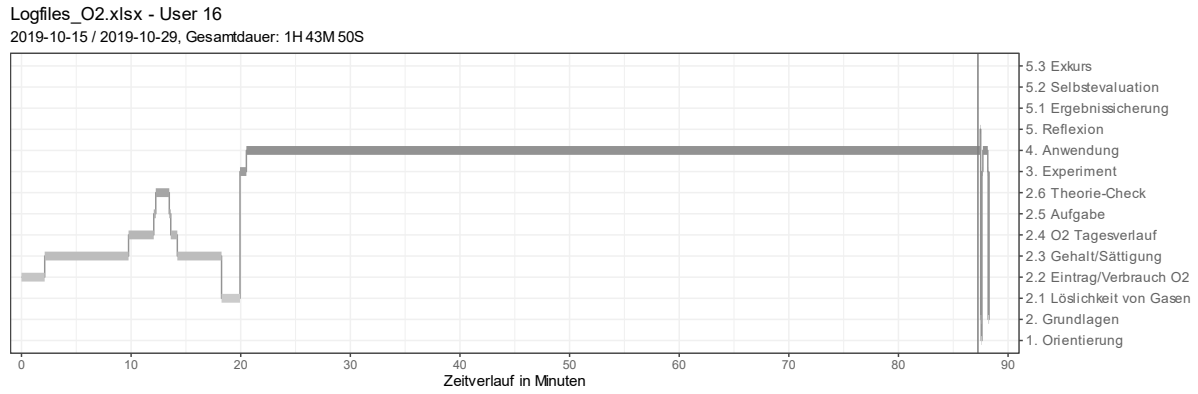


Abbildung 113: Bearbeitungsverlauf von User 16 im virtuellen Labor zur Sauerstoffsättigung. Der mehrfache Rückgriff auf bereits bearbeitete Teilkapitel wird in dieser Aufzeichnung erkennbar.

Jedoch werden auch reflexive Navigationsmuster ersichtlich, deren Plausibilität in Hinblick auf eine lernförderliche Bearbeitung der virtuellen Labore inhaltlich kritisch zu diskutieren bleibt. Insbesondere sei hier auf die teils extrem kurzen Verweildauern verwiesen (Abbildung 114).

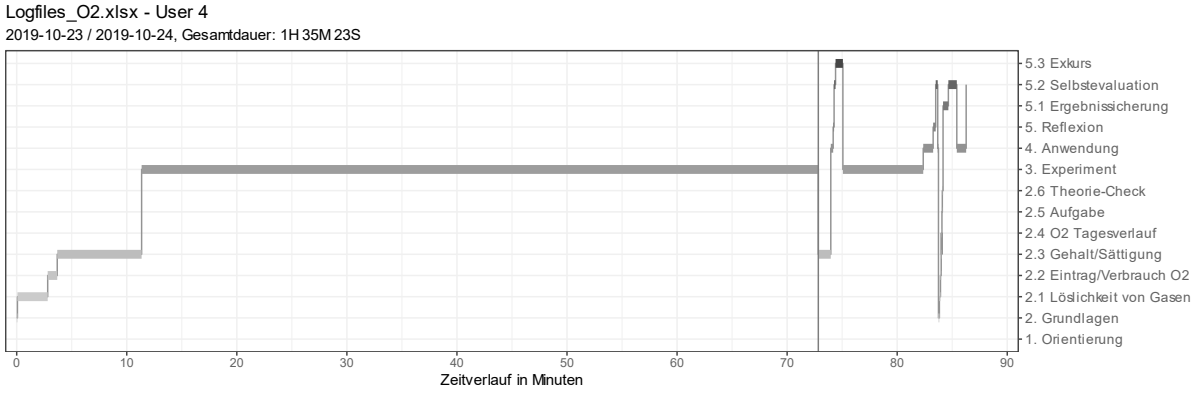


Abbildung 114: Bearbeitungsverlauf von User 4 im virtuellen Labor zur Sauerstoffsättigung. Rückgriffe auf vorangegangene Teilkapitel mit kurzen Verweildauern und vergleichsweise extrem lange Verweildauern in wenigen Teilkapiteln, welche bereits zuvor besucht wurden, werden deutlich.

6 Diskussion

Die gewählten Methoden der Datenerhebung wie auch die Methoden der Datenauswertung weisen in beiden Teilen der Studie Optimierungspotenziale und damit Ansatzpunkte für Kritik auf. Nach einer kritischen Reflexion dieser Punkte sollen die Ergebnisse dann zur rahmenden theoretischen Grundlage in Bezug gesetzt werden. Daran schließen eine Bewertung und Diskussion der Konzeption wie auch der Ergebnisse der Studien an. Es erfolgt außerdem eine Rückführung auf das vorgestellte Modell der Barrieren des Transfers einer digitalen Innovation in Schulen. Relevanz der vorliegenden Arbeit und mögliche Anknüpfungspunkte werden aufgezeigt.

6.1 Methodenkritik

Methodenkritik

Stichproben

- Gelegenheitsstichproben, eingeschränkte Generalisierbarkeit, mögliche Positivauswahl
- Angestrebte Effektstärken, Passung zu Stichprobengröße

Testinstrumente und Gütekriterien

- Erprobte Testinstrumente, Hinweise zur Validität liegen weitgehend vor
- Reliabilität der Skalen weitgehend zufriedenstellend
- Konstruktbreite teils kritisch für die Reliabilität
- Im gewählten Design keine Prüfung der Reliabilität der Items zu Passung von Fähigkeit und Anforderung möglich
- Objektivität der Datenerhebung durch Fragebogenmethode weitgehend abgesichert
- Objektivität der Datenauswertung durch computergestützte, offenliegende Auswertung
- Objektivierung der qualitativen Anteile durch mehrere Rater und Inter-Rater-Reliabilität

Vergleichbarkeit der Lernumgebungen

- Hohes Maß an Übereinstimmung zwischen den virtuellen Laboren hinsichtlich Struktur und Bedienbarkeit
- Variierende Fachinhalte und Kontexte lassen dennoch keine direkten Vergleiche zu

Standardisierung der Durchführung

- Praxisnahe Forschung (fachdidaktische Entwicklungsforschung) unter dem Einfluss schulischer Bedingungsfaktoren (z. B. Verfügbarkeit digitaler Endgeräte, Schulorganisation)
- Variierende Erhebungssituationen und externe Gegebenheiten
- Insbesondere unterschiedliche zeitliche Abläufe der Lerneinheiten (kompakte vs. gestreckte Durchführung)

Stichproben

Beiden untersuchten Populationen, also sowohl auf der Seite der Lehrenden als auch der Lernenden, liegen Gelegenheitsstichproben zugrunde. Diese Stichproben ergaben sich für die Lehrenden insbesondere aus bestehenden schulisch-universitären Kooperationen sowie anhand der Lehrpersonen, welche dem didaktischen Konzept offen gegenüberstanden und Gelegenheit zu dessen Erprobung einräumten. Die Stichprobenziehung unter den Lehrpersonen folgte in erster Linie der Bereitschaft zur Teilnahme an der Befragung im Rahmen von Fortbildungsveranstaltungen und Vorstellungen der virtuellen Labore in Schulen. Mit dieser in den Sozialwissenschaften bekanntermaßen problematischen Art der Stichprobenziehung geht eine geringe Generalisierbarkeit der Ergebnisse einher (Döring & Bortz, 2016). Ebenso ist die globale Generalisierbarkeit durch die gezielte Konzeption der Lerneinheit für ausgewählte Klassenstufen der weiterführenden Schulen in Rheinland-Pfalz stark limitiert.

Auch hinsichtlich der Erhebung unter Lernenden wurde keine zufällige Stichprobenziehung vorgenommen. Vielmehr erfolgte die Durchführung klassenweise mit Lernenden und Lehrenden, die zur Mitwirkung bereit waren. Wenngleich das Design der vorliegenden Studie unter Lernenden keine Randomisierung oder Clusterung erfordert, wäre vom forschungstheoretischen Standpunkt eine zufällige Stichprobenziehung aus der Grundgesamtheit der Zielgruppe vorzuziehen. Aufgrund des Charakters der fachdidaktischen Entwicklungsforschung ist dies jedoch kaum praktikabel umsetzbar.

Die gewählten Stichprobengrößen erscheinen angesichts des explorativen Charakters der durchgeführten Erhebungen unter Lehrpersonen als dem Ziel angemessen und ökonomisch (Kraft, 2020). Die qualitative Befragung der Lehrenden wurde bis zum Erreichen einer theoretischen Sättigung durchgeführt, sodass auch hier die Stichprobengröße als ausreichend bezeichnet werden kann (Döring & Bortz, 2016). Weiterhin war hier der Stichprobenumfang durch die externen Einflüsse der Pandemielage begrenzt.

Ein weiterer möglicher Kritikpunkt ergibt sich trotz des explorativen Charakters aus den im Rahmen der Studie erzielten Effektstärken. Nach Hattie (2009) gelten Effektstärken oberhalb von $d = 0.40$ als in der „*zone of desired effects*“ (Hattie, 2009, S. 19) gelegen. In der Definition nach Cohen (1988) deckt dies den Bereich der großen, der mittleren und einen geringen Anteil der kleinen Effekte ab (Cohen zieht die Grenze zwischen kleinen und mittleren Effekten bei $d = 0.30$; vgl. Lenhard & Lenhard, 2016). Unter Berücksichtigung der von Cohen (1988) angemerkten Willkür, die der Zuschreibung qualitativer Bewertungen der numerischen Effektstärken immanent ist, diente Hatties Erkenntnis über real im Bildungssystem erreichbare Effekte (Zone der gewünschten Effekte, $d > 0.40$) als Grundlage zur Abschätzung der erwarteten Effektstärken (Hattie, 2009; Lenhard & Lenhard, 2016). Folgt man der adaptierten, empirisch fundierten Einschätzung von Kraft (2020), lassen sich bereits Effektstärken ab $d = 0.20$ im Bildungskontext als große Effekte belegen. Ungeachtet dieser neuen und deutlich

liberaleren Referenzwerte für in der Bildungslandschaft tatsächlich erzielbare Effektstärken wurde in der vorliegenden Arbeit die klassische Einordung der Effekte nach Cohen angewandt. Dies erfolgte insbesondere vor dem Hintergrund einer besseren Vergleichbarkeit. Anhand der Erkenntnisse von Kraft (2020) ist somit zu konstatieren, dass die vorgefundenen Effekte durchaus eine große Relevanz für den Bildungssektor mit sich bringen und somit keinesfalls unterschätzt werden sollten. In Ermangelung belastbarer Referenzwerte für das vorliegende explorative, messwiederholte Design mit Bezug zu Fachthematik und Zielgruppe, wurden mittlere Effekte im Verlauf der Lerneinheit als erzielbar betrachtet.

Zur Prüfung signifikanter Abweichungen ohne Vergleichsgruppendesign bei erwartetem mittleren Effekt (in der Definition nach Cohen, 1988) sind nach Bortz und Lienert (2008) optimalerweise 97 Personen in der Stichprobe erforderlich. Dieser Stichprobenumfang wurde aufgrund des gewählten Vorgehens zum Ausschluss fehlender Werte nicht über alle Konstrukte erreicht. Die Entscheidung zum Ausschluss fehlender Werte wurde zugunsten der konsequenten Vergleichbarkeit über die Testzeitpunkte hinweg gefällt. Aufgrund des zeitlichen Verlaufs und der gegebenen externen Einflussfaktoren insbesondere der Pandemielage, aber auch des Ablaufs des begleitenden Projektvorhabens und der damit entfallene Support, konnte eine Nacherhebung nicht durchgeführt werden.

Testinstrumente und Gütekriterien

Alle als Fragebogen eingesetzten Testinstrumente, ausgenommen die Befragungen zu demographischen beziehungsweise persönlichen Angaben, basieren auf bereits publizierten und validierten Instrumenten. Da allen Fragebogen-Instrumenten entsprechende standardisierte Formen des Tests zugrunde liegen, kann das Testgütekriterium der Objektivität in diesen Fällen nach Döring und Bortz (2016) als gegeben betrachtet werden. Da die Durchführung als einfache Applikation der Fragebögen ohne weiteres Zutun der Durchführenden stattfand, findet die Objektivität der Fragebogen-Instrumente daher in der weiteren Diskussion keine gesonderte Betrachtung.

George et al. (2013) stellten die Validität des *Stages of Concern Questionnaire* unter anderem durch Interviews im Verlauf der Testentwicklung immer wieder sicher. Neben zahlreichen eigenen Studien berichten die Autoren auch von Studien in anderen Anwendungskontexten, welche neben den durch die Testentwickler durchgeführten Erhebungen auch die Reliabilität des Testinstruments absichern. Überwiegend akzeptable bis gute interne Konsistenzen konnten, wie auch in der deutschen Adaption des Fragebogens nach Sachse et al. (2012), in der vorliegenden Studie repliziert werden. Kritisch ist an dieser Stelle die Imputation der Subskalenmittelwerte für fehlende Werte zu

betrachten, da insbesondere die Varianz und Kovarianz mit anderen Variablen eingeschränkt wird.

Der durch Auslassung einzelner Items leicht modifizierte Fragebogen zur Einstellung der Lehrpersonen gegenüber digitalen Medien, zeigte in der vorliegenden Erhebung eine deutlich geringere Reliabilität als in der Originalfassung (Tigges, 2008). Dies lässt sich neben der Adaption und Kürzung der Skala auch mit der veränderten Stichprobenwahl begründen. Tigges (2008) führte die Erhebung unter Studierenden durch, wohingegen im vorliegenden Fall Lehrpersonen befragt wurden. Darüber hinaus erfolgte die Auswertung in der vorliegenden Studie mit positiver Ausrichtung der Items; dem Original sind keine expliziten Angaben zur Polung der Items zu entnehmen. Aufgrund der Formulierungen ist jedoch eine hohe Augenscheinvalidität sowie eine Eindeutigkeit der Itemausrichtungen anzunehmen. Die in der Erhebung unter Lehrpersonen gefundene akzeptable Reliabilität auf Grundlage der internen Konsistenz der Skala spricht für eine ausreichende Reliabilität auch in der adaptierten, gekürzten Fassung des Testinstruments.

Wie bereits für die Skala zur Einstellung gegenüber digitalen Medien beschrieben, lässt sich auch in Bezug auf die Skala der Wertzuschreibung an digitale Endgeräte annehmen, dass die eher schlechte interne Konsistenz der Skala auf deren Kürzung zurückzuführen ist. Weiterhin kann die vergleichsweise geringe interne Konsistenz dadurch erklärt werden, dass die Skala zur Erfassung eines breiten Konstruktes lediglich drei Items umfasst. Wenngleich die Autorin keine Referenzwerte für die Reliabilität der gesamten Skala darlegt, so ist doch aufgrund der theoretischen Ableitung der Items anhand des Erwartung-Wert-Modells nach Dickhäuser (2001) davon auszugehen, dass einzelne Domänen des Wertkonstruktes nicht ausreichend abgebildet werden (Tigges, 2008). Da die publizierten Items teilweise keine ausreichende Passung zu Zieldomäne, Stand der Technik und Nutzungsszenario aufwiesen, wäre hier retrospektiv eine inhaltliche Neuausrichtung und damit eine grundlegend neue Itemkonstruktion zur Auflösung dieser Schwierigkeit und zur Verbesserung der Kennwerte der Skala anzustreben.

Die Skala zum Selbstkonzept im Umgang mit digitalen Medien als Itemzusammenstellung der Versionen von Dickhäuser (2001) und Tigges (2008) zeigt eine im Vergleich zu den gewählten Itemformulierungen nach Tigges geringere, aber dennoch in der absoluten Betrachtung als gut zu bezeichnende Reliabilität.

Wenngleich angesichts der mittleren Itemschwierigkeiten der Skala zum Selbstkonzept aus statistischer Sicht hohe Trennschärfen für ein eindimensionales Konstrukt zu erwarten wären, gilt es hier, die inhaltliche Breite des Konstruktes zu berücksichtigen (Döring & Bortz, 2016). Die Skala umfasst Items mit eher globaler Ausrichtung in Bezug auf digitale Endgeräte und Medien wie auch gleichermaßen eng gefasste Items mit Bezug zu konkreten Aufgaben in der Nutzung dieser Medien. Folglich wird eine Vielzahl an Verhaltensausschnitten operationalisiert, wodurch nach Döring und Bortz (2016)

geringere Trennschärfen zu erwarten sind. Ungeachtet dieser inhaltlichen Erklärbarkeit der Abweichung in den Itemkennwerten erscheint eine kritische Betrachtung dieses Umstandes aufgrund der breiten Streuung in den Trennschärfen unumgänglich. Eine vergleichbare Struktur zeigen die korrigierten Trennschärfen der Items innerhalb der Subskalen der *Stages of Concern*. Hier konnten Items mit sehr geringen Trennschärfen identifiziert werden, welche jedoch auf Grundlage der umfangreichen Validierungen durch die Autoren in der Testentwicklung und -erprobung nicht aus der Auswertung ausgeschlossen wurden (George et al., 2013; Hall et al., 1977).

Auf der Seite der Lernenden zeigte sich die Skala zum *Flow*-Erleben als weniger reliabel als in der laut Rheinberg et al. (2003) replikationsstabilen Auswertung mehrerer Studien ($\alpha = .79$ in der vorliegenden Studie gegenüber einer mittleren internen Konsistenz von $\alpha = .90$ bei Rheinberg et al.). Gleiches gilt für die Subskala zur Besorgniskomponente des *Flows* ($\alpha = .74$ in der vorliegenden Studie gegenüber $\alpha = .80.–.90$; Rheinberg et al., 2003). Gleichzeitig liefern die Autoren auch Hinweise auf die Validität der Skalen, welche sich unter anderem auf die Kurvenpassung mit der Passung von Fähigkeit und Anforderung sowie auf Bezüge zur Vorhersage von Lernleistungen stützen. Sowohl eine theoretisch-argumentative Darstellung der Inhaltsvalidität als auch Ansätze zur Aufklärung der faktoriellen und konvergenten Validität als Subfacetten der Konstruktvalidität finden sich bei Rheinberg et al. (2003) ausführlich dargestellt (Döring & Bortz, 2016). Die Items zur Erfassung von Fähigkeit und Anforderung beziehungsweise deren Passung wurden dort ebenfalls mit in die Betrachtungen einbezogen, sodass auch hierfür Hinweise auf eine Inhaltsvalidität vorliegen. Aufgrund der geringen Nutzung der prädiktiven Items zur Passung von Fähigkeit und Anforderung wurde auf eine Betrachtung der Reliabilität dieser Items in der vorliegenden Studie verzichtet. Ausgehend von der Tatsache, dass diese Items jeweils separat zu betrachten sind, kann eine interne Konsistenz nicht bestimmt werden. Als alternatives Verfahren zur Reliabilitätsprüfung ist aufgrund der separaten Items am ehesten die Testwiederholungs-Reliabilität in Betracht zu ziehen. Nach Döring und Bortz (2016) verbietet sich jedoch auch dieses Vorgehen aus theoretischer Sicht, da Änderungen in den Merkmalsausprägungen durchaus auch situativ und nicht nur itembedingt zu interpretieren wären, womit wiederum keine ausreichende Aussagekraft zur Reliabilität erreicht werden könnte. Letztlich bleibt die Reliabilitätsprüfung dieser Items somit offen, da in der vorliegenden Studie die Messwiederholungen verschiedene Erhebungssituationen abbilden und somit eine bewusste Manipulation der Merkmalsausprägungen darstellen.

Die Subskalen des Fragebogens zur aktuellen Motivation zeigen interne Konsistenzen im Bereich von $\alpha = .61 – .85$, worüber Rheinberg et al. (2021) konstatieren, dass diese „Für eine Kurzskala, die als Forschungsinstrument verwandt wird […] als hinreichend angesehen werden [können]“ (Rheinberg et al., 2021, S. 6; die konkreten Bezugswerte der Autoren liegen hier bei $\alpha = .66 – .90$). Die Skalen können somit als reliabel betrach-

tet werden. Rheinberg et al. (2021) liefern darüber hinaus in zwei Studien Hinweise auf die Validität der Skalen, welche vorrangig als Konstruktvalidität überprüft wurde.

Leppink et al. (2013) konnten für die Skala zur Erfassung der drei Dimensionen des *Cognitive Load* neben der inhaltlichen und faktoriellen Validität auch hohe interne Konsistenzen ($\alpha = .81 – .91$) als Maß der Reliabilität nachweisen. Die gemäß ITC-Guidelines (International Test Commission, 2017) für die vorliegende Studie validierte Übersetzung weist etwas geringere interne Konsistenzen auf ($\alpha = .75 – .85$), welche jedoch durchaus als zufriedenstellend zu betrachten sind.

Brooke (1996) attestiert dem Testinstrument zur Erfassung der *System Usability* eine hohe Augenscheinvalidität ausgehend von der Feststellung, dass die Skala alle relevanten Aspekte der Bedienbarkeit abdeckt. Mit Itemkorrelationen im Wertebereich von .70 – .90 zwischen allen Items der Skala wurde darüber hinaus auch die Reliabilität gesichert (Brooke, 1996). Brooke (2013) merkt an, dass Übersetzungen der Skala deren Reliabilität negativ beeinflussen könne. Nach erfolgter, anhand der Kriterien der ITC validierter Übersetzung konnte ein solcher Einfluss in der vorliegenden Studie kaum ausgemacht werden. Bei einer guten internen Konsistenz ($\alpha = .82$), die auch in zahlreichen anderen Studien repliziert werden konnte (siehe Bangor et al., 2008 für weitere, adaptierte Skalen mit Reliabilitäten im Bereich von .85 – .96), ist die Reliabilität des Testinstruments als gegeben anzusehen. Ebenso lässt sich hierin ein Indiz für die Qualität der Übersetzung erkennen.

Objektivität der Datenauswertung konnte für die quantitativen Daten durch eine computergestützte Auswertung sichergestellt werden. Zur Sicherung einer Replizierbarkeit sind die zur Auswertung eingesetzten Skripte dieser Arbeit beigefügt. Für die qualitativen Anteile der Arbeit – Auswertung der Interviewdaten und Zuordnung der Personenprofile der *Stages of Concern* – kann die Reliabilität durch die berichteten Maße der Inter-Koder-Übereinstimmung nach Brennan und Prediger (1981) in Anlehnung an das Vorgehen nach Döring und Bortz (2016) nachvollzogen werden. Wenngleich somit eine Objektivierung der Datenauswertung erreicht wird, so ist diesen letztgenannten Methoden dennoch ein subjektives *Bias* immanent.

Vergleichbarkeit der Lernumgebungen

Sowohl unter Aspekten der *Usability* als auch in Anbetracht der geplanten Evaluation wurde bereits in der Erstellung der virtuellen Labore auf ein hohes Maß an Übereinstimmung zwischen den einzelnen Lernumgebungen geachtet. Konzeptionell lag das Ziel dabei vorrangig in der Schaffung wiederkehrender Elemente und intuitiv zu bedienender virtueller Lernumgebungen.

Dennoch ergeben sich allein aus den variierenden fachlichen Inhalten der virtuellen Labore trotz grundlegend sehr ähnlichem Aufbau Unterschiede in der inhaltlichen Ausgestaltung der virtuellen Labore. Im Rahmen der vorliegenden Studie bearbeiteten die Lernenden virtuelle Labore unterschiedlicher inhaltlicher Ausrichtungen. Damit einher geht eine reduzierte Vergleichbarkeit und Generalisierbarkeit der Ergebnisse der Erhebungen. Trotz dieser methodischen Schwäche der Erhebung wurde die Entscheidung hierfür bewusst getroffen, da nur so eine ausreichende Schultauglichkeit der Studie gegeben ist. Ein stärker klinisches Design wäre wünschenswert, allerdings ginge damit das Risiko einher, dass die verantwortlichen Lehrpersonen aufgrund des hohen Zeitaufwandes einer Durchführung in ihren Unterrichtsstunden nicht zustimmen. Gleiches gilt für einen deutlich größeren Stichprobenumfang. Sofern ausreichend große Gruppen an Versuchspersonen gewonnen werden könnten, wäre eine Unterscheidung in Subgruppen anhand der virtuellen Labore möglich. Auch dies erscheint in Anbetracht der Stundenansätze in den mit den Lernumgebungen angesprochenen Fächern höchstens im Zuge einer groß angelegten Untersuchung weit über den lokalen Wirkungsbereich hinaus als darstellbar – was wiederum mit einer deutlich erschwerten Akquise der Proband:innen einherginge.

Standardisierung der Durchführung

Aufgrund der verschiedenen schulischen Settings wurde die Studie unter wechselnden externen Einflüssen und in variierenden Strukturen durchgeführt. Durch diese Einflüsse ergaben sich Variationen in den Untersuchungsbedingungen, wie sie im Rahmen einer Feldstudie unvermeidbar sind (Döring & Bortz, 2016). So wurde beispielsweise an einem Erhebungstag aufgrund einer Wetterlage mit massiven Niederschlägen lediglich die Probenahme im Freiland durchgeführt, die anschließenden Messungen fanden an diesem Tag im Klassenraum statt. Aus quasi-experimentellen Studien ist bereits hinlänglich bekannt, dass insbesondere außerschulische Lernorte durchaus einen relevanten Einfluss auf die affektiven Persönlichkeitsmerkmale und Haltungen ausüben können (z. B. Pawek, 2009; Schüttler et al., 2021; Schüttler, 2022). Folglich ist im Umkehrschluss nicht auszuschließen, dass diese Veränderung des Lernortes eine Auswirkung auf die Lernenden mit sich brachte. Ebenso konnte durch die Anforderungen der schulischen Praxis kein einheitlicher zeitlicher Ablauf etabliert werden. Die unterschiedliche Relevanz der jeweiligen Fächer in den Stundenplänen, aber stellenweise auch die übergeordneten Unterrichtskonzeptionen wie etwa Projektunterricht, trafen hier aufeinander. In der Folge bearbeiteten Teile der Proband:innengruppe die gesamte Lerneinheit im Verlauf eines Tages, während andere Teilnehmende bei einem Zeitansatz von lediglich drei Wochenstunden im entsprechenden Fachunterricht Biologie oder Chemie die Lerneinheit über einen Zeitraum von drei Wochen durchliefen. Im letztgenannten Fall fand die Vorbereitung in der ersten Woche statt, die Durchführung in der nächsten

Doppelstunde der darauffolgenden Woche gemäß Stundenplan und die Nachbereitung erfolgte in der dritten Woche. Anhand dieser Problemstellung wird deutlich, dass externe Einflussfaktoren im zeitlichen Verlauf nicht ausgeschlossen werden konnten. Es konnte nicht kontrolliert werden, ob, und wenn ja in welchem Umfang, die Teilnehmenden zwischen den drei Teilen der Lerneinheit Lern- oder Vergessenseffekte erfahren haben, etwa durch zwischenzeitliche Beschäftigung mit anderen Inhalten.

Ähnliche Kritikpunkte können an der Studie unter Lehrenden angebracht werden. Die Lehrenden bearbeiteten im Vorfeld der Befragungen und Interviews inhaltlich verschiedene virtuelle Labore. Ebenso erfolgten die Erhebungen in diversen Kontexten, von Kurzvorstellungen in Kollegien bis hin zu zweitägigen Fortbildungsveranstaltungen. Diese Erfordernisse der Praxis zu bedienen stellt eine der zentralen Herausforderungen fachdidaktischer Forschung dar. Gleichzeitig bietet sich so Gelegenheit für eine praxistaugliche Schulforschung, welche an die konkreten Bedarfe adaptiert ist (vgl. Bernholt & Parchmann, 2020; Eilks & Ralle, 2002; Ralle & Di Fuccia, 2014).

6.2 Bewertung der Lernumgebung

Bewertung der Lernumgebung

- Beteiligung mehrerer Fachdidaktiker:innen
- Zwei Durchsichten durch unabhängige Lehrpersonen
- Spannungsfeld Interessenserzeugung durch Kontexte vs. Kohärenz-Prinzip
  - Einbindung einer Kontextualisierung
- Orientierung an Bildungsstandards und Lehrplänen RLP, jedoch keine Berücksichtigung weiterer Bundesländer
- Ansätze einer inklusiven Gestaltung erkennbar, aber keine umfassende inklusive Konzeption
- Überwiegend positive Rückmeldungen von Lehrpersonen. Anregungen:
  - Möglichkeit zur Adaption der Lernumgebungen durch die Lehrperson einbinden
  - Möglichkeit zum direkten Feedback an die Lernenden schaffen

Im Konsens mehrerer Fachdidaktiker:innen und einer Lehrperson wurden die Lernumgebungen intensiv konzipiert und fachlich sowie didaktisch mehrfach überarbeitet. Während der Konzeptionsphase erfolgten darüber hinaus zwei Durchsichten der Lernumgebungen durch unabhängige Lehrende, wobei beide Beteiligte sowohl fachdidaktische als auch schulpraktische Expertise vorweisen konnten. Neben der kriteriengeleiteten Gestaltung wurde so auch den theoretischen und praktischen Erfahrungen Lehrender Raum zur Verbesserung der virtuellen Labore gegeben.

Interessenserzeugung – am Beispiel der virtuellen Labore sei hier die Kontextualisierung genannt – kann im Spannungsfeld mit dem Kohärenz-Prinzip stehen. Konkret könnten die Lernumgebungen durch die Auslassung der inhaltlich nicht relevanten aber zur Generierung eines Kontextes erforderlichen Anteile verschlankt werden. Eine solche Reduzierung des fachlich nicht relevanten Umfangs könnte nach Mayer (2009) die

kognitive Beanspruchung der Lernenden insgesamt reduzieren. Diese Abwägung und Problematik ist jedoch bekannt und stellt ein Desiderat für weitergehende Forschung dar (Clark & Mayer, 2011). Eine mit erwartbar positiven Effekten kontextualisierter Lernumgebungen auf die affektive Auseinandersetzung der Lernenden mit dem Lerngegenstand einhergehende Reduzierung des kognitiven Outcome ist nicht unstrittig (z. B. Parchmann & Kuhn, 2018; Fechner, 2009). Letztlich scheint auch die Intensität der Kontextualisierung ausschlaggebend für die erfolgreiche Wissenskonstruktion bei gleichzeitiger positiver Auswirkung auf die affektiven Merkmale der Lernenden in der Auseinandersetzung mit den Inhalten und Materialien zu sein (Broman & Parchmann, 2014). Ob eine tiefgreifende Kontextualisierung der Lerneinheit gelungen ist und inwiefern diese trotz oder gerade wegen dieser Kontextualisierung lernförderlich ist, stellte jedoch keinen erklärten Gegenstand der vorliegenden Studie dar. Insofern ist an dieser Stelle zu konstatieren, dass eine Kontextualisierung der Lerneinheiten für die Sekundarstufe II in Anlehnung an Broman und Parchmann (2014) bei simultaner Fokussierung auf die fachlichen Inhalte sehr bewusst vorgenommen und ausgearbeitet wurde.

Wenngleich eine Orientierung der Konzeption an den Bildungsstandards die Übertragbarkeit in bundesweiten Kontexten ermöglicht, fand dennoch kein Abgleich mit weiteren Lehrplänen der föderalen Bildungslandschaft statt. Eine detaillierte Ausarbeitung der bundeslandspezifischen Anforderungen und deren Berücksichtigung in der Konzeption stellte kein Ziel dieser Arbeit dar. Dennoch ist aufgrund der inhaltlichen Kongruenz des Themenbereichs anzunehmen, dass eine Anpassung der Inhalte auf andere Lehrpläne als den Rheinland-Pfälzischen durch einfache Adaptionen oder Auslassungen des rahmenden Konzepts möglich werden. Insbesondere vor dem Hintergrund der gemeinsamen Bildungsstandards sind die in den virtuellen Laboren adressierten Lernziele als übertragbar zu betrachten. Deutlich wird dies anhand der dargelegten Berücksichtigung von Basiskonzepten und Kompetenzbereichen der Bildungsstandards, entlang welcher die Lerneinheit gestaltet wurde.

Im Zuge der Konzeption fanden Ansätze der inklusiven Gestaltung Eingang in die virtuellen Labore. So werden etwa vertiefende Erklärungen optional angeboten, multiple Zugänge zu Inhalten werden in Teilen ermöglicht und eine sprachliche Vereinfachung (Leiß, 2018; Seitz, 2014) wurde im Laufe der Entwicklung der Lerneinheit durch die beteiligten Expert:innen mehrfach vorgenommen. Dennoch ist klar festzuhalten, dass es sich lediglich um Ansätze einer inklusiven Gestaltung von Lernumgebungen handelt; eine umfassende Ausrichtung an Grundsätzen der inklusiven Didaktik erscheint vorstellbar, war jedoch nicht das vorrangige Ziel des zugrunde liegenden Forschungsvorhabens.

Informelle Rückmeldungen von Lehrpersonen fielen insgesamt überwiegend positiv aus. Vereinzelt wurde jedoch angemerkt, dass eine Möglichkeit zur Adaption der

Lernumgebung durch die Lehrperson wünschenswert wäre. Ebenso wurde mehrfach der Wunsch nach einer Möglichkeit zur Auswertung der Eingaben der Lernenden während der Bearbeitung der Aufgaben vorgebracht. Eine Adaption der Lernumgebungen durch die Lehrpersonen, also die Option, einzelne Lernbausteine auszublenden oder zuzuschalten, wäre technisch umsetzbar, wurde jedoch in der vorliegenden Studie bewusst nicht realisiert, da hierdurch keine einheitliche Erprobung und Evaluation der virtuellen Labore möglich gewesen wäre. Auswertungen der Dateneingaben waren im Rahmen der vorliegenden Studien aus Gründen des Datenschutzes nicht möglich. Eine solche Auswertung hätte die Aufhebung der Anonymisierung der Schüler:innen erfordert, was sich sowohl forschungsethisch verbat wie auch systemseitig aus eben diesen Gründen nicht vorgesehen war.

6.3 Bewertung der Ergebnisse der Lehrenden

Bewertung der Ergebnisse der Lehrenden

Stages of Concern und Interviews

- Die Lehrpersonen zeigen eine hohe Diversität in der affektiv-kognitiven Auseinandersetzung mit der digitalen Innovation.
- Personenprofil durchgehend hoher Ausprägungen der *Stages of Concern* zeigt im Interview Anhaltspunkte für eine intensive Auseinandersetzung mit allen Facetten der Innovation.
- Kooperierer sehen die Zusammenarbeit mit anderen Lehrpersonen als gute Chance für eine Übernahme der Innovation.
- Innovationsgegner-Profile erzeugten eine hohe Dissonanz zwischen den Kodierern.
- Nicht-Nutzer mit Ideen stehen der Innovation offen gegenüber, möchten jedoch ihre Optimierungsvorschläge kritisch-konstruktiv mit einbringen.
- Zeitlicher Umfang und inhaltliche Komplexität der Lerneinheit werden teils kritisch gesehen.
- Interviews liefern klare Hinweise darauf, dass der Ideenreichtum der Lehrpersonen nicht kompetitiv-destruktiver Natur ist.
- Es zeigt sich, dass den Vorbehalten der Lehrenden Raum zur Ausführung gewährt werden muss.
- Die mittelmäßige Übereinstimmung der beiden Kodierer in der Zuordnung der Personenprofile ist durch die Beschaffenheit und Komplexität der Konstrukte, die damit einhergehende hoch inferente Verfahrensweise und die hohe Anzahl an Kategorien zu relativieren.

Einstellung gegenüber digitalen Medien

- Mittlere bis hohe aufgefundene Einstellungswerte gelten als gute Grundvoraussetzung und als Prädiktor für eine unterrichtliche Nutzung.
- Oftmals unzureichende Operationalisierung der Einstellung erschwert einen Abgleich mit *Large-Scale-Assessments*.
- Mittlere bis hohe Einstellungswerte sind theorie- und erwartungskonform.
- Positiv-Auswahl durch die Stichprobenziehung ist kritisch zu hinterfragen.

Selbstkonzept im Umgang mit digitalen Medien

- Mittelmäßig bis hoch ausgeprägtes Selbstkonzept ist erwartungskonform.
- Korrelation des Selbstkonzeptes mit der Einstellung konnte nicht nachgewiesen werden.
- Spezifizierung auf das lehrbezogene Selbstkonzept des Umgangs mit digitalen Medien ist wünschenswert, erste Instrumente sind inzwischen verfügbar.
- Unidimensionalität der eingesetzten Skala und stellenweise möglicher Einbezug einer Selbstwirksamkeitserwartung als Kritikpunkte.
- Weiterer Forschungsbedarf gegeben, sehr spärliche Befundlage in der Literatur ist allgemein zu bemängeln.

Wertzuschreibung gegenüber digitalen Endgeräten

- Inhaltlich erforderliche Kürzung der Skala ist als mögliche Ursache für teils unzulängliche Itemkennwerte zu sehen.
- Reduktion der Skala auf den Teilfaktor „Nützlichkeit“ als Komponente der Wertzuschreibung → Grundlegende Neukonzeption der Skala ist anzustreben.
- Hohe aufgefundene Wertzuschreibung zeigt sich als nicht erwartungskonform.
- Transferhinderlichkeit durch geringe Wertzuschreibung scheint nicht gegeben zu sein.

Nachstehend werden die vorgestellten Ergebnisse aus der Stichprobe der Lehrenden diskutiert. Hierzu werden die quantitativen Daten der Fragebogenerhebung zu *Stages of Concern* mit den qualitativen Daten der Interviews zur Explikation der vorgefundenen Vorbehalte der Lehrenden und zur Validierung der *Stages of Concern* in Bezug gesetzt.

Dann erfolgt die Diskussion der Konstrukte Einstellung, Selbstkonzept und Wertzuschreibung im Kontext digitaler Medien, bevor abschließend eine zusammenführende Diskussion der gesamten Befundlage vorgenommen wird.

Stages of Concern und Interviews

Auf Basis der vorliegenden Auswertungen der *Stages of Concern* Profile und nach Abgleich mit literaturbekannten Persönlichkeitsprofilen ist zu konstatieren, dass keine ausreichende Evidenz vorliegt, welche eine Ablehnung von Hypothese 1.1 rechtfertigen würde (vgl. Abbildung 39).

> H 1.1: Die befragten Lehrpersonen zeigen in der affektiv-kognitiven Auseinandersetzung mit der digitalen Innovation virtueller Labore diverse Ausprägungen der *Stages of Concern*, welche als Persönlichkeitsprofile identifiziert werden können.

Die identifizierten Profile des Typs „*Negative One-Two Split with Tailing Up at Stage 6*" (George et al., 2013, S. 40) sind nach George et al. kritisch zu betrachten. Diese Profile zeichnen sich durch eine höhere Ausprägung der *Concerns* in Stufe 2 als in Stufe 1 aus und weisen darüber hinaus nach abfallender *Concerns*-Lage einen erneuten Anstieg in Stufe 6 auf. Damit einher gehen vergleichsweise ausgeprägte Vorbehalte der Lehrpersonen in Bezug auf die Auswirkungen der Innovation auf die persönliche Situation oder die berufliche Sicherheit. Da diese Vorbehalte sehr stark wiegen, kann sogar der Wunsch nach mehr Information über diese Innovation in den Hintergrund rücken. George et al. (2013) betonen, dass Personen dieses Typs nicht empfänglich für allgemeine Informationen zur Innovation sind, vielmehr müssen deren persönliche Vorbehalte zunächst aufgenommen und gezielt adressiert werden, andernfalls können die Vorbehalte in Widerstand gegenüber der Innovation umschlagen. Gleichzeitig weist der Anstieg der Kurve im Bereich der Neuausrichtung (*Stage* 6) auf konkurrierende Ideen der Lehrperson hin (George et al., 2013). Diese Lehrenden sehen die Innovation folglich nicht als optimal an, ihre Ideen zur Neuausrichtung sind aufgrund der bestehenden persönlichen Vorbehalte jedoch eher als kompetitiv denn als konstruktiv optimierend anzusehen. Im Sinne der Implementationsbemühungen wären diese Lehrenden daher gezielt anzusprechen.

Die zur Interpretation der Lehrpersonen des Typs „*Unconcerned Innovation User*" (George et al., 2013, S. 49) ausschlaggebende Stufe 0 (die Stufen 1 und 2 werden teil-

weise ebenfalls mit betrachtet, vgl. Hall & Loucks, 1978b) ist als Interesse an der Innovation zu interpretieren, wobei jedoch eine hohe Ausprägung dieser Stufe innerhalb des Profils darauf hindeutet, dass andere Innovationen oder Aktivitäten als vorrangig betrachtet werden (George et al., 2013). Die hier zugeordneten fünf Lehrpersonen scheinen daher interessiert aber auch entsprechend stark ausgelastet, sodass eine Übernahme der Innovation durch diese Lehrpersonen als fraglich einzustufen wäre.

Die fünf Profile, welche durchgehend hohe Ausprägungen auf allen *Stages of Concern* zeigen, sind als nicht konform mit der zugrunde liegenden Theorie des CBAM anzusehen. Eine theoretische Herleitung der Aussagekraft dieser Profile ist somit nicht möglich. Selbst die nach Bitan-Friedlander et al. (2004) identifizierten besorgten Typen von Lehrpersonen bilden in der qualitativen Betrachtung die vorgefundene Intensität der jeweiligen *Stages of Concern* nicht ausreichend ab. Der vielfach beschriebene wellenartige Verlauf der am stärksten ausgeprägten *Concerns* (z. B. Hall & Hord, 2020; Hollingshead, 2009) lässt sich in den Daten dieser Lehrpersonen nicht auffinden. Dennoch sollen diese Profile nicht unbeachtet bleiben, da sie in Anlehnung an das theoretische Framework des CBAM wie auch in Anbetracht der Itemformulierungen ein sehr hohes Maß an kognitiv-affektiver Auseinandersetzung mit der Innovation auf allen Ebenen widerspiegeln. Für den Einzelfall eines Befragten mit durchgehend hoher Ausprägung, welcher auch an den Interviews teilnahm, kann der Eindruck der intensiven Auseinandersetzung mit der Innovation bestätigt werden. Die Lehrperson ließ sich auf ausführliche didaktisch-methodische Überlegungen in Hinblick auf die Innovation ein. In der näheren inhaltlichen Betrachtung dieses Interviews wird deutlich, dass die Lehrperson inmitten einer Phase großer Unsicherheit an den Schulen während der Corona-Pandemielage befragt wurde. Entsprechende Äußerungen der Lehrperson geben daher Anlass, in der allgemeinen Unsicherheit der schulischen Situation zumindest einen möglichen Erklärungsansatz für die hohe kognitiv-affektive Beschäftigung zu erkennen.

> *„Ich würde tatsächlich das OML auch gerade zur aktuellen Zeit als Möglichkeit sehen, Schüler sich Sachen selbst erarbeiten zu lassen im Homeschooling. Oder/ Also es sind ja verschiedene Modelle denkbar. Und zwar ist jetzt angedacht, dass nach den Sommerferien wieder normaler Präsenzunterricht stattfindet, aber wenn du dir die Entwicklung der Zahlen anguckst, dann ist es auch sehr gut möglich, dass wir noch einmal eine Homeschooling-Phase haben werden oder eine Phase haben werden, wo wir mit halber Kraft fahren so wie jetzt vor den Sommerferien. Das heißt, dass die eine Klassenhälfte im Homeschooling ist, während die andere Klassenhälfte im Präsenzunterricht ist. Und diese OMLs die würden sich ja eigentlich auch gut eignen, dass man*

> *die von den Schülern zumindest in Teilen zu Hause machen lässt. Deswegen ist es für mich immer auch so ein Augenmerk, wie selbsterklärend oder nicht selbsterklärend ist so etwas. Das heißt nicht, dass ich das nur machen würde, aber ich denke, so ein Format eignet sich ja irgendwie, dass die Schüler das zumindest teilautonom bearbeiten, sagen wir es so."*– (Lehrperson 47)

Die Personenprofile der acht identifizierten kooperationsbereiten Lehrpersonen deuten auf deren Bereitschaft zur Mitwirkung an der Umsetzung der Innovation hin. Bei teils noch fehlendem Wissen über die Innovation selbst, sehen die Kooperierer die Zusammenarbeit mit anderen Lehrenden als gute Möglichkeit zur Übernahme der Innovation an (Bitan-Friedlander et al., 2004). Auch hier beschreibt ein Statement einer der befragten und interviewten Lehrpersonen eindrücklich deren Haltung gegenüber der Innovation. Befragt nach den konkreten Bedenken in Bezug auf die digitale Innovation und deren Umsetzung antwortete die Lehrperson:

> *„Ne, also eher positiv formuliert. Also ich habe keine Angst vor ich ändere mich in eine digitale Lehrperson. Sondern eher ich bin/ ich mache mir Gedanken, wie mich das positiv zu einer Lehrperson verändert, die auf unterschiedlichen Lernwegen, Kommunikationswegen, Schülerinnen erreicht, ja."* – (Lehrperson 50)

Dem gegenüber stehen die Innovationsgegner, deren Personenprofile durch weniger Informationsbedarf bei hohen persönlichen Vorbehalten (Stage 3) sowie durch eine große Diskrepanz zwischen Kollaboration und Neuausrichtung gekennzeichnet sind (Bitan-Friedlander et al., 2004). Bei diesem Profil ist anzumerken, dass hier eine vergleichsweise hohe Dissonanz der beiden Beurteiler in der Zuordnung der Personen- zu den Literaturprofilen entstand. Während der erste Beurteiler lediglich zwei Proband:innen dieser Gruppe zuwies, waren es in der zweiten Beurteilung fünf Proband:innen, deren Personenprofil aus Sicht des Beurteilenden am ehesten ein Innovationsgegner-Profil zeigte. Diese qualitative Dissonanz lässt sich vermutlich vorrangig aus der vergleichsweise hohen Komplexität des Profils ableiten. In der Folge sind quantitative Vergleiche der Gruppengröße kritisch zu betrachten.

Weiterhin konnten zahlreiche Personenprofile (elf Personenprofile in der ersten Beurteilung, 14 in der zweiten) zu einem Cluster zusammengefasst werden. Dieses Cluster an Lehrenden zeigt zunächst einen Verlauf des Personenprofils, welcher dem eines Nicht-Nutzers entspricht (George et al., 2013). Insbesondere die relative Position der Stufen 1 und 2 zueinander lässt auf weiteren Informationsbedarf derjenigen Lehrenden

schließen, welche noch ganz am Anfang des Implementationsprozesses stehen. George et al. (2013) sehen im typischen Nicht-Nutzer-Profil eine interessierte Person ohne übermäßige Vorbehalte und mit positiver Grundhaltung gegenüber der Innovation. Die in der vorliegenden Studie aufgefundene Ausprägung dieses Profils mit einer „*Tailing Up Stage 6*“ verweist jedoch auf eine Konstellation, in welcher die noch kaum aktiv an der Innovation teilhabenden Lehrenden bereits klare Ideen über deren Neuausrichtung entwickelt haben. Wenngleich eine Optimierung der Konzepte durch neue Ideen zunächst begrüßenswert erscheint, können eben jene Ideen jedoch auch als konkurrierend zur eigentlichen Innovation betrachtet werden (vgl. Ausführungen zu *Negative One-Two Split with Tailing Up at Stage 6*). Einen Ansatz zum Umgang mit dieser Sachlage könnte die Formulierung der Ideen zur Neuausrichtung der Innovation sein. Möglicherweise ließen sich die Vorbehalte anschließend gezielt adressieren. Eben diese Möglichkeit zur Explikation wurde den Befragten in der vorliegenden Studie in Form der leitfadengestützten Interviews geboten. So bezieht eine der interviewten Lehrpersonen ausführlich Stellung zu ihrem Personenprofil und begründet ihre Einordnung wie folgt.

> *„Man muss sich halt nur damit einarbeiten. Ich glaube, dass der Aufwand durch das, dass ich halbwegs versiert bin glaube ich nicht größer ist als in allen anderen Bereichen. Bei der Konsequenz eigentlich auch nicht, weil ich eigentlich ziemlich überzeugt bin, dass es für die Schüler und für MICH einen Mehrwert bietet, sich darauf einzulassen. Gerade die Gestaltung von Unterrichtsmaterial fällt ja hier weg, wenn man was benutzen kann. Es geht ja dann mehr um die/ okay wie krieg ich es mit meinem Konzept in Einklang, damit ich parallel meine Struktur, die ich im Kopf habe und die ich mir für die Schüler überlege, mit der OML in Einklang bringe. Ohne jetzt etwas zu nehmen und mich selbst erst einmal darauf einstellen zu müssen. So das ist so die Schwierigkeit. So diese eigenen Ideen zu kombinieren mit OML ohne fremdgeleitet zu sein und nur noch Anwender oder begleitete Anwender zu sein. Kann aber auch funktionieren. Also das sind diese/ Zusammenarbeit mit anderen und Neuausrichtung eher weniger. Weil, ich glaube die beiden Bereiche kommen dann, wenn man eine gewisse Selbstsicherheit in der eigenen Umsetzung unter Laborbedingungen mit einer Klasse durchgeführt hat oder mit mehreren Klassen und Erfahrung hat. Ich glaube erst DANN hat man Freiraum für Zusammenarbeit. Also eher im Bereich Persönliches, Management. Und Konsequenz. Ich mache es ja, weil ich / ich würde es ja tun, weil ich überzeugt bin, dass die Konsequenz für die Schüler positiv ist. Also das steht für mich*

> *eigentlich außer Frage, da der Mehrwert völlig ersichtlich ist, weil dort Materialien drin sind, die ich selbst nie in der Lage wäre so zu gestalten. Auf diese Hilfe, das ist ja das was man auch häufig sucht. Gute Materialien, die so etwas bieten […]"* – (Lehrperson 54)

Deutlich erkennbar wird in diesen Äußerungen die grundlegend positive Haltung gegenüber den virtuellen Laboren; diese werden als gute Materialien betrachtet. Dennoch liefert die Lehrperson gezielte und konstruktive Optimierungsansätze. Diese zielen im vorliegenden Fall konkret auf die Adaptierbarkeit der Lernumgebung durch die Lehrperson ab. Eine modifizierbare Lernumgebung könnte die bestehenden Ideen der Lehrperson aufgreifen und damit zur Übernahme der Innovation beitragen.

> *„Ja wobei konkret an dem Beispiel finde ich es für die Art der Strukturierung/ der Art von dem Aufbau / Oder nicht die Strukturierung, sondern eher der Umfang und der Aufbau ist finde ich für den Lehrer gut geeignet. Selbst als Lehrer, wenn man drauf guckt mit dem kompletten Fachwissen braucht man gewisse Zeit, weil es alles SEHR umfangreich ist. Sehr kompliziert. Sehr ich sag jetzt mal universitär. Für den Schüler / für das was ich von den Schülern kenne, merke ich einfach, ich könnte das nicht auf die Schüler / es müsste sozusagen eine B-Version mit einer ganz reduzierten Version für die Schüler geben. Wo der Umfang immer DEUTLICH geringer ist. Weil das glaube ich die einfach erschlägt. Weil das war so das erste wo ich gedacht habe okay. Das ist sehr gut. Das Konzept passt, ich kann es verwenden. Aber wie krieg ich es hin diesen erschlagenden Umfang so zu reduzieren, dass ich für die Schüler dort quasi eintauchen kann und sagen: okay blendet man das aus, das ist nicht wichtig, das nicht wichtig, das nicht wichtig. Guckt euch mal NUR das an. So dieses Fokussieren so das ist was ich jetzt hier gemerkt habe, da müsste ich vielleicht noch ein bisschen Arbeit investieren. Die könnte weggenommen werden, wenn es eine B-Variante für Schüler gäbe."* – (Lehrperson 54)

Auch eine weitere Lehrperson mit dem Profil eines Nichtnutzers mit Ideen zeigt im Interview auf, dass sie grundsätzlich sehr angetan vom didaktischen Konzept und den digitalen Lernumgebungen sei, erwähnt aber auch, dass ihr für eine regelmäßige Einbind-

ung in den Unterrichtsverlauf der Zeitansatz der virtuellen Labore zu umfangreich erscheine.

> *„Also es war super. Ich finde die OMLs genial gut. Wirklich. Ich wüsste jetzt nicht auf Anhieb, was man da verbessern KÖNNTE oder MÜSSTE. Die sind super gemacht. Die Anleitung genial gut. Die Videos, Erklärvideos und so weiter. Wir haben das durchgeführt. Ich habe das in einer zehnten Klasse durchgeführt. In zwei zehnten Klassen und das hat eigentlich super funktioniert. Aber ich würde es genauso einstufen also Konsequenz die sollten vorher natürlich klassisch auch einmal so eine Auswertung gemacht haben und klassisch auch wirklich so Diagramme mal auswerten. Was ich immer halt als Problem sehe, ist der Zeitaufwand. Wir haben für diese Theorie, für die Vorbereitung zu den Experimenten, haben wir zwei Zeitstunden/ Doppelstunde gebraucht. Und dann für die Nachbesprechung hatten wir noch einmal zwei Stunden. Das heißt, ich kann das zwar im Unterricht einbinden. Das geht. Kann man machen aber natürlich nur begrenzt. Weil mir einfach die Zeit fehlt dafür. Wenn ich jedes Mal für jedes OML vier Stunden rechne. Für die Vor und Nachbereitung dann kann ich pro Halbjahr drei vier vielleicht machen. Das war es. Also der Zeitfaktor ist halt da extrem SCHWIERIG, weil eine Nachbereitung MUSS sein. Also sowohl die Vorbereitung als auch die Nachbereitung MUSS absolut sein. Das ist wichtig. Weil sonst machen die das nur aus Vergnügen, ne. Nur damit der Unterricht ausfällt und man sich ein paar Videos anschaut und so weiter.“* – (Lehrperson 47)

Auf die Rückfrage, ob denn auch Teile der Lernumgebung separat eingesetzt werden könnten, liefert Lehrperson 47 einen Ansatz zur Extraktion einzelner Teile der virtuellen Labore unter gleichzeitiger Nutzung einführender Kolloquien.

> *„Absolut. Absolut. Ja. Ich habe auch schon überlegt, ob man das als Hausaufgabe aufgeben könnte zur Vorbereitung. Da müsste man halt dann vorher kurz überprüfen, ob das wirklich gemacht wurde. So vielleicht so ein kleiner Eingangstest, wie auch immer. So eine Art Kolloquium oder so etwas, wie man das an der Uni ja auch macht. Aber auf jeden Fall also Teile klar oder als Hausaufgabe zur Vorbereitung finde ich gut.“* – (Lehrperson 47)

Die so explizierten eigenen Ideen und Optimierungswünsche der Lehrperson lassen darauf schließen, dass die im Personenprofil ersichtlichen Ideen dieser Lehrperson zur Neuausrichtung keinesfalls destruktiver oder kompetitiver Natur sind. Dies wird im weiteren Verlauf des Interviews nochmals deutlich: Die Lehrperson stellt hier die flexible Nutzbarkeit der virtuellen Labore in den Fokus und sieht diese als geeignet für eine variable und spontane Unterrichtsgestaltung an.

> *„Also ich bin kein Lehrer, der eine Unterrichtsreihe hat. Das habe ich früher immer so gemacht. Ich habe mir eine Unterrichtsreihe überlegt. Mittlerweile bin ich komplett davon weggekommen. Das heißt, ich unterrichte von Stunde zu Stunde. Teilweise weil viele Stunden ausfallen oder verlegt werden. Und es oft von/ Also die Realität von der Planung so stark abweicht, weil es irgendwelche unerwarteten Probleme in der Klasse gibt oder Rückfragen oder Impulse, die dann das Thema in eine andere Richtung lenken innerhalb der Klasse. Deshalb also entwickele ich kaum noch Unterrichtsreihen, wie man das so früher gemacht hat. Ich würde es zur Vorbereitung einsetzen, zur Vertiefung würde ich es einsetzen auf jeden Fall das wäre eine Möglichkeit, wo ich mir das also spontan im Kopf jetzt schon vorstellen könnte, wie ich das machen könnte im Unterricht. Es gibt ja aber auch noch mehr Möglichkeiten. Also ich denk die Anwendungsmöglichkeiten sind nahezu unbegrenzt.“* – (Lehrperson 47)

Folglich sind diese Optimierungsvorschläge eher als eine Adaption des didaktischen Konzepts zu betrachten, welche jedoch die digitale Innovation nicht infrage stellt. Weiterhin ist anzumerken, dass die Lehrperson einen sehr flexiblen Ansatz der Unterrichtsvorbereitung verfolgt. Es liegt nahe, dass sich der Ideenreichtum aus der Neigung zur spontanen Unterrichtsgestaltung oder Adaption ergibt und das Personenprofil somit auch eine gewisse Disposition für oder wider eine strukturierte Unterrichtsplanung reflektieren könnte.

In Summe ist festzuhalten, dass die Lehrpersonen teils sehr diffuse Vorbehalte zeigen, welche, ersichtlich durch nicht identifizierbare Profiltypen, auch durch das theoretisch fundierte Instrument der *Stages of Concern* nur unzureichend beschrieben werden können. In der Folge kann Hypothese 1.2 ebenfalls nicht abgelehnt werden.

> H 1.2: Vorbehalte von Lehrpersonen gegenüber einer digitalen Innovation in Bezug auf die schulische Situation sind diffus. Ihnen muss Raum zur Ausführung gewährt werden.

Insgesamt können die aufgefundenen, überwiegend hohen Ausprägungen der *Concerns* in den Stufen 0 – *Awareness*, 1 – *Informational* und 2 – *Personal* anhand des theoretischen Bezugsrahmens interpretiert werden. Da die Befragung unter Lehrpersonen frühzeitig im Prozess der Implementation der Innovation an Schulen stattfand, sind vergleichsweise ausgeprägte Vorbehalte im Bereich der *Self-related Concerns* theoriekonform (Hall et al., 1973).

Im weiteren Fortgang des Transferprozesses sollten aufgabenbezogene und späterhin auswirkungsbezogene Vorbehalte in den Vordergrund rücken. Dies setzt jedoch voraus, dass zuvor den *Concerns* auf persönlicher Ebene Raum zur Explikation eingeräumt und diese somit abgebaut werden konnten. Folglich ist anhand der vorliegenden Personenprofile ein hoher Bedarf an weiterführender Bewusstmachung und vertiefenden Informationen über die Innovation selbst (*Awareness* – Stage 0 & *Informational* – Stage 1) erforderlich. Dieser Informationsbedarf wurde im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit aufgegriffen. In Kooperation mit dem für die dritte Phase der Lehrer:innenbildung zuständigen Pädagogischen Landesinstitut wurden entsprechende Fortbildungsangebote zur Information über die virtuellen Labore, die inhaltliche Auseinandersetzung mit diesen sowie der technischen Erprobung bereitgestellt. Eine qualitativ vergleichsweise hohe Nachfrage nach diesen Fortbildungen wie auch die aus den Fortbildungen resultierenden Kooperationen mit Lehrpersonen werden als Indiz für eine erfolgreiche Adressierung der *Concerns* betrachtet.

In der näheren Betrachtung der Personenprofile ließen sich zahlreiche kooperationsbereite Lehrpersonen und wenige Lehrende mit Fokussierung auf die problematischen Aspekte der Innovation (Innovationsgegner) ausmachen (Bitan-Friedlander et al., 2004), was auf eine tendenziell positive Grundhaltung eines Großteils der befragten Lehrpersonen schließen lässt. Das identifizierte Profil des „Nicht-Nutzers mit Ideen“ (in Anlehnung an George et al., 2013) legt eine bereits in der Informationsphase erfolgte intensive Beschäftigung mit der Innovation nahe. Das so erkannte Potenzial zur Optimierung der Innovation konnte im Rahmen der Interviews teilweise abgefragt und so als Anregung für eine mögliche Adaption der virtuellen Labore aufgenommen werden.

Die Übereinstimmung zwischen den beiden unabhängigen Kodierern in der Zuordnung der Personenprofile zu literaturbasierten Profilen ist als mittelmäßig zu bezeichnen.

Angesichts der komplexen Beschaffenheit der Konstrukte, welche sich daraus ergibt, dass nicht nur die Ausprägungen der *Concerns* auf den einzelnen Stufen, sondern auch der gesamte Verlauf der *Concerns* über alle Stufen hinweg mit in die Betrachtung einbezogen wird, ist dieser Wert jedoch als durchaus praktikabel für ein hoch inferentes Kategoriensystem zu betrachten (Döring & Bortz, 2016). Ebenso wurde die Anzahl der Kategorien im Verhältnis zur Stichprobe als sehr hoch eingestuft, was ebenfalls zur Aufwertung des eher mittelmäßigen Übereinstimmungsmaßes im konkreten Anwendungsfall beiträgt (Döring & Bortz, 2016).

Einstellung gegenüber digitalen Medien

Einstellung gegenüber Technologie stellt einen der wichtigsten Prädiktoren (neben Selbstwirksamkeit und Computerangst) für die tatsächliche unterrichtliche Nutzung digitaler Technologien durch Lehrende dar (Celik & Yesilyurt, 2013; Pietzner, 2009). Folglich sind die aufgefundenen mittleren bis hohen Einstellungswerte der befragten Lehrpersonen als gute Grundvoraussetzung für die Implementation einer digitalen Innovation zu werten.

Diese Ergebnisse kontrastieren auf den ersten Blick in Teilen die Ergebnisse groß angelegter Befragungen unter Lehrpersonen. So konstatieren beispielsweise Drossel et al. (2019) im Rahmen der Studie ICILS 2018, dass Lehrpersonen in Deutschland dem unterrichtlichen Einsatz digitaler Medien eher skeptisch gegenüber träten. Trotz hoher Varianz in den Ergebnissen, unter anderem abhängig von der jeweiligen Schulform, und bei positiver zeitlicher Entwicklung der Einstellungen bliebe demnach für Lehrende weiterhin das Potenzial zur Steigerung des tatsächlichen Lernerfolgs durch die Nutzung digitaler Medien offen (Drossel et al., 2019). Im direkten Vergleich mit diesen Erkenntnissen ist anzumerken, dass die Operationalisierung des Einstellungskonstruktes im Kontext der Nutzung digitaler Medien hier durchaus als fraglich zu bezeichnen ist. So zielen sowohl Drossel et al. (2019) als auch Eickelmann (2011) eher auf eine wahrgenommene Nützlichkeit digitaler Medien ab, wohingegen in der vorliegenden Studie klar die persönliche Haltung im Sinne einer Personenvariable operationalisiert wurde, welche geplantes Verhalten bedingt (Ajzen, 1985). Möglicherweise könnte eine stärkere theoretische Abgrenzung der Einstellungskonstrukte gegeneinander mehr Klarheit im Verständnis der jeweiligen Werthaltungen liefern. So zeigen auch Herzig und Grafe (2007) subsummiert unter dem Einstellungsbegriff eher wahrgenommene Potenziale digitaler Medien auf; Lorenz et al. (2021) nehmen unter dem Oberbegriff der Einstellungen gar Bezug zum Vorhandensein eines Medienkonzeptes. Diese mangelnde Ausschärfung des Konstruktes Einstellung gegenüber digitalen Medien wurde exemplarisch bereits von Pietzner (2009) angeführt. Waffner (2020) quantifizierte diese Problematik

im Rahmen einer Metaanalyse und stellte dabei fest, dass 76 % der von ihr erfassten Studien wissenschaftlichen Gütekriterien nicht genügten.

Betrachtet man stärker operationalisierte Untersuchungen der Einstellung Lehrender gegenüber digitalen Medien, so lassen sich die vorgefundenen mittleren bis hohen Einstellungswerte als durchaus konform mit vorherigen Untersuchungen bezeichnen (Krause et al., 2014; Krause et al., 2017; Krause & Eilks, 2015). Neuere Untersuchungen deckten eine teils noch stärker positive Einstellung angehender Lehrender gegenüber digitalen Medien auf (Vogelsang et al., 2019). Insgesamt zeigen sich somit die erwarteten mittleren bis hohen Einstellungen der befragten Lehrpersonen gemäß Hypothese 1.3 als erwartungskonform. Es ergeben sich keine Anhaltspunkte welche eine Ablehnung derselben erforderlich machten.

> H 1.3: Die Einstellung gegenüber digitalen Medien und Endgeräten der Lehrpersonen, welche Bereitschaft zur Mitwirkung an der Studie zeigten, liegt im mittleren Bereich. Lehrpersonen mit sehr positiver Einstellung gegenüber digitalen Medien würden deren Einsatz im Unterricht eigenständig gestalten, solche mit sehr negativer Einstellung würden sich vollständig davon abkehren.

Einschränkend ist anzumerken, dass, wie bereits in der Ausführung der Hypothese dargelegt, aufgrund der Stichprobenziehung von einer relativ homogenen mittleren Einstellung der Lehrpersonen ausgegangen werden konnte, da anzunehmen ist, dass sich diese Lehrenden tendenziell am ehesten mit neuen digitalen Lehrkonzepten befassen. Diese der Hypothese immanente erklärende Komponente wurde nicht geprüft, da sie als Limitierung dieser Hypothese zur vollumfänglichen Verifikation oder Falsifikation einer deutlich größeren und heterogeneren Stichprobe bedürfte.

Selbstkonzept im Umgang mit digitalen Medien

Das vorgefundene, mittelmäßig bis hoch ausgeprägte, Selbstkonzept der befragten Lehrpersonen weist auf eine positive Einschätzung der eigenen Fähigkeiten der Lehrenden in der Domäne der digitalen Medien hin. In Bezug auf Hypothese 1.4 sind diese Ergebnisse als erwartungskonform einzuordnen und somit nicht zu deren Ablehnung geeignet.

Allerdings ist zu beachten, dass in der vollständigen Formulierung der Hypothese ein Zusammenhang zwischen Einstellung und Selbstkonzept angenommen wurde. Auf Grundlage der erfolgten Prüfung der Korrelationen zwischen den einzelnen Konstrukten muss dieser Teil der Hypothese kritisch hinterfragt werden. Eine entsprechende Korrelation der Konstrukte Einstellung und Selbstkonzept konnte in der vorliegenden Erhebung nur schwach nachgewiesen werden. Hier wären weitere Untersuchungen mit größeren Stichproben und variierenden Anwendungsfeldern erforderlich. Entsprechend kann die Hypothese teilweise – konkret in Hinblick auf die Ausprägung des vorgefundenen Selbstkonzeptes der Lehrenden im Umgang mit digitalen Medien – angenommen werden.

> H 1.4: Das Selbstkonzept von Lehrpersonen im Umgang mit digitalen Medien und Endgeräten knüpft an deren Einstellung hierzu an und ist damit im mittleren Bereich zu verorten.

Anknüpfend an die allgemeine Operationalisierung des Konstruktes Selbstkonzept als facettenreich beziehungsweise domänenspezifisch (Marsh, 1990; Shavelson et al., 1976) heben Schauffel et al. (2021) diese Eigenschaft auch für das auf Informations- und Kommunikationstechniken gerichtete Selbstkonzept hervor. Dabei ist nach Meinung der letztgenannten Autoren die Domänenspezifität des Selbstkonzeptes im genannten Kontext von weitaus größerer Bedeutung als die betrachteten Werkzeuge beziehungsweise Endgeräte. Diese Feststellung schränkt die Aussagekraft der Ergebnisse der vorliegenden Erhebung auf Konstruktebene ein, da hier ein übergeordnet operationalisiertes Selbstkonzept des Umgangs mit digitalen Medien betrachtet wurde. Eine zielgerichtetere Operationalisierung mit Fokus auf ein lehrbezogenes Selbstkonzept des Umgangs mit digitalen Medien erscheint wünschenswert. Mögliche Ansätze hierfür stellen beispielsweise die neu formulierten Instrumente nach Mahler und Arnold (2022) oder Schauffel et al. (2021) dar.

Aus letzterem leitet sich auch eine Kritik an der vorliegend eingesetzten Skala zur Erfassung des Selbstkonzeptes ab. Insbesondere die Unidimensionalität des in der vorliegenden Studie eingesetzten Instrumentes, welche der theoretisch begründeten Multidimensionalität nicht gerecht wird, ist hier kritisch anzumerken (Schauffel et al., 2021). Ebenso konstatieren Schauffel et al. (2021), dass die den eingesetzten Itemformulierungen weitgehend zugrunde liegende Skala nach Dickhäuser (2001) und Tigges (2008) keine reine Messung des Selbstkonzeptes zulasse. Insbesondere der Itemformulierung „Ich traue mir zu, dass ich mich in ein neues Computerprogramm selbst einarbeiten

kann.“ (Item Nummer 6 nach Dickhäuser) schreiben Schauffel et al. (2021) eine Ausrichtung auf die Selbstwirksamkeit zu, wodurch der in den theoretischen Ausführungen dargelegten Abgrenzbarkeit dieser Konstrukte keine Rechnung getragen wird (Bong & Skaalvik, 2003; Schauffel et al., 2021).

In den theoretischen Betrachtungen wurde abgeleitet, dass ein hohes Selbstkonzept in Hinblick auf digitale Medien als Prädiktor für deren unterrichtliche Nutzung angesehen werden kann. Ausgehend von dieser Prämisse ist anhand der vorliegenden Ergebnisse von guten affektiven Voraussetzungen für eine Nutzung digitaler Medien im Unterricht der untersuchten Stichprobe auszugehen. Damit wären die selbst eingeschätzten Begabungen im Sinne eines Begabungs-Selbstkonzeptes als positive persönliche Voraussetzung für die Implementation digitaler Medien im Unterricht zu werten.

Wie Schauffel et al. (2021) betonen, ist die Forschung zu Selbstkonzept in Hinblick auf Informations- und Kommunikationstechnik jedoch nach wie vor sehr spärlich. Für eine belastbare Befundung der vermuteten Kausalzusammenhänge wären weitere Untersuchungen, insbesondere in größeren und repräsentativeren Stichproben, dringend erforderlich. Dabei ist eine theoretisch fundierte und konsequent operationalisierte Vorgehensweise nachdrücklich anzuraten. Bestehende Publikationen zeigen hier allzu oft eine populärwissenschaftliche Ausrichtung, welche einer Prüfung, insbesondere der Operationalisierung der Konstrukte, kaum standzuhalten vermögen.

Wertzuschreibung gegenüber digitalen Endgeräten

Vor einer inhaltlichen Bewertung der Ergebnisse aus der Erhebung des wahrgenommenen Wertes digitaler Endgeräte unter Lehrenden müssen zunächst die vorgefundenen skalenbezogenen Herausforderungen adressiert werden. Aufgrund der augenscheinlich nicht mehr zeitgemäßen Itemformulierungen wurde während der Ausarbeitung des Instrumentes eine konsequente Itemselektion vorgenommen. Dabei wurden Items ausgeschlossen, welche augenscheinlich nicht mehr dem Zeitgeist entsprechen (beispielsweise Item F nach Tigges (2008, S. 112): „Ich würde Computer und Internet auch als Hobby bezeichnen“). Angesichts des heutigen Standes der Digitalisierung und der Bedeutung computerbasierter Aktivitäten war hier nicht zu erwarten, dass dieses Item in der Erhebung Dissonanz erzeugen würde. Als mehr oder minder etablierte Hobbies, welche mit zu dieser Entscheidung beitrugen, seien etwa 3D-Druck, Foto- und Videobearbeitung oder auch E-Sports genannt.

Wie bereits in der Diskussion der Testinstrumente ausgeführt, liefert die Skala zur Wertzuschreibung – vermutlich auch aufgrund deren Kürzung – keine vollständig zufriedenstellenden Kennwerte. In Anlehnung an die für die Skalen Einstellung und Selbstkonzept bereits diskutierte Thematik der Operationalisierung könnten auch hinsichtlich der Skala zur Wertzuschreibung hier entsprechende Probleme vorliegen. Auch aus diesem

Grund wurden Items ausgeschlossen. Dennoch wäre auf theoretischer Basis der Diskurs zu eröffnen, ob beispielsweise die Itemformulierung „Mit digitalen Endgeräten bekomme ich schneller und bessere Arbeitsergebnisse als mit Papier und Stift“ (Adaption von Item A nach Tigges, 2008, S. 112) allein auf eine Wertwahrnehmung abzielt oder ob hier nicht auch eine Selbstwirksamkeitserwartung operationalisiert wurde.

In der effektiv in dieser Studie zur Anwendung gekommenen Form des Testinstrumentes bildet dieses nach der ursprünglichen Konzeption von Tigges (2008) in Anlehnung an die Vorarbeiten von Dickhäuser (2001) den Teilaspekt „Nützlichkeit“ (Items A, B und G, Tigges, 2008, S. 111) ab. Es bleibt daher zu befürchten, dass die tatsächlich gemessene Ausprägung der Wertzuschreibung eher einer instrumentellen Absicht im Sinne der Nutzung digitaler Endgeräte als Mittel zum Zweck als einer tatsächlichen Werthaltung gleichkommt, welche alle theoretisch operationalisierten Aspekte widerspiegelt (Eccles et al., 1983; Eccles, 1984; Wigfield & Cambria, 2010).

Ungeachtet dieser retrospektiven methodischen Überlegungen liefert die adaptierte Skala mittlere bis hohe Werte der Wertzuschreibung an digitale Endgeräte. Dieses Ergebnis ist jedoch stärker als die vorhergehenden Skalen mit der Wahl der Stichprobe und der Anlage der Studie zu relativieren. Es ist anzunehmen, dass Lehrpersonen, welche digitalen Endgeräten einen hohen Wert zuschreiben eher aktiv Informationen über deren unterrichtlichen Einsatz sammeln und an entsprechenden Fortbildungen teilnehmen. Ein hohes eigenes Selbstkonzept des Umgangs mit digitalen Endgeräten ist hierzu vermutlich nicht zwingend erforderlich. Es erscheint jedoch unwahrscheinlich, dass eine Lehrperson, welche digitalen Endgeräten keine relevante Bedeutung beimisst (und damit eine niedrige Wertzuschreibung zeigt), überhaupt an Konzepten wie dem in dieser Arbeit vorgestellten interessiert wäre. Folglich ist die Stichprobe in Hinblick auf diese Skala als Positivauswahl zu werten und kritisch zu betrachten.

Unter der Prämisse der vorstehend bezeichneten Kritikpunkte widersprechen die deskriptiven Ergebnisse der theoriebasierten Annahme einer geringen Wertzuschreibung durch Lehrpersonen und führen somit zur Ablehnung von Hypothese 1.5.

> H 1.5: Die Wertzuschreibung gegenüber digitalen Endgeräten durch Lehrpersonen stellt sich als eher gering ausgeprägt dar.

Der von Eickelmann (2011) als transferhinderlich beschriebene Faktor einer geringen Wertzuschreibung an Informations- und Kommunikationstechnologien konnte somit in der vorliegenden Studie nicht repliziert werden. Es ist folglich davon auszugehen, dass die eher positiven Werthaltungen der Lehrpersonen gegenüber digitalen Endgeräten

einer nachhaltigen Implementation in das Unterrichtsgeschehen zuträglich sein können (Eickelmann, 2011). Eine positive Werthaltung gegenüber Informations- und Kommunikationstechniken ist nach Quast et al. (2021) in einen direkten positiven Zusammenhang mit der Nutzung solcher Technologien zur Umsetzung der Unterrichtsqualitätsdimensionen zu setzen. Dennoch sei auch an dieser Stelle erneut auf die vorgenannten Limitationen der hiesigen Erhebung verwiesen.

Wenngleich in weitaus weniger stark operationalisiertem Rahmen, so konstatiert Huber (2022) hinsichtlich des Wertes digitaler Technologien für die Schule: „Lernen mit, durch und über Technologie bekommt einen besonderen Stellenwert“ (Huber, 2022, S. 28). Insbesondere angesichts des durch die Corona-Pandemielage forcierten digitalen Wandels kommt den Werthaltungen Lehrender eine zunehmende Bedeutung zu. Diese reliabel und valide zu erfassen, sollte folglich auch weiterhin im Fokus fachdidaktischer Entwicklungsforschung mit Bezug zu digitalen Medien stehen. Dies erscheint als besonders wünschenswert, da zwar einige Publikationen die Wertzuschreibungen oder Werthaltungen Lehrender an digitale Endgeräte als Stichwort aufgreifen, jedoch ohne diesem Aspekt (quantitativ-)forschungsperspektivisch Beachtung zu schenken.

Zusammenschau der diskutierten Ergebnisse der Lehrenden

Im Zuge der Interpretation der Ergebnisse aus der Erhebung unter Lehrpersonen konnte festgestellt werden, dass die Lehrenden in der Stichprobe trotz einer vergleichsweise geringen Streuung (siehe Diskussion der Stichprobe) als sehr heterogene Gruppe hinsichtlich der sie beschäftigenden Thematiken zu verstehen sind. Entsprechend zeigen sich die aufgefundenen Vorbehalte als sehr divers. Dennoch war eine kategorienbasierte Clusterung der Profile der *Stages of Concern* mit ausreichender Interrater-Reliabilität und somit eine Identifikation verschiedener Muster oder Typen möglich. Wenngleich nur sehr wenige Proband:innen als Innovationsgegner identifiziert werden konnten (3,5 %), so muss dennoch zur Sicherstellung der Qualitätsansprüche wie auch für eine möglichst effektive Implementation allen geäußerten *Concerns* Raum gewährt werden. Die Interviews konnten untermauern, was die theoretische Verortung der *Stages of Concern* bereits betont: Die Ausprägungen der *Concerns* sind nicht als grundsätzlich negativ zu betrachten und wären mit dem englischen Begriff „*Worries*“ nur unzulänglich beschrieben; auch die deutsche Bezeichnung als „Vorbehalte“ wird der so umschriebenen Bedeutung nur bedingt gerecht (Hall & Hord, 2006; Pant et al., 2008; Sieve, 2015).

Es ist festzuhalten, dass der überwiegende Anteil der befragten Lehrpersonen eine innovationsförderliche Ausprägung der *Stages of Concern* zeigt (z. B. Kooperierer-Profil). Die Interviews konnten weiterhin belegen, dass die teilweise gezeigten, nach CBAM möglicherweise die Implementation gefährdenden *Concerns* zumindest teil-

weise als konstruktive Beiträge zur Optimierung des didaktischen Konzepts und der Lernumgebungen anzusehen sind.

Als interessante Feststellung ist das in dieser Arbeit neu aufgedeckte *SoC*-Profil des Nichtnutzers mit Ideen zu betrachten. Möglicherweise ergibt sich diese Besonderheit der bis dato nicht bezeichneten Ausprägung der *Stages of Concern* auch aufgrund der besonderen Erhebungssituationen (siehe Diskussion der Durchführung). Es ist vorstellbar, dass die befragten Lehrpersonen – in ihrer gewohnten Autonomie und Individualität ihrem Lehrauftrag folgend (Gräsel, Fußangel & Pröbstel, 2006) – kollegial-korrigierende Ansätze zeigten, um so die aus ihrer Sicht bereits (qualitativ) als weitgehend sehr gut beschriebene Innovation schon in ihrer Entwicklungsphase zu optimieren. Wenngleich ein solcher Effekt, sofern er denn nachweisbar sein sollte, die empirischen Befunde, für welche die Lehrenden als Befragte weniger in der Rolle des handelnd-korrigierenden Subjekts gesehen werden, verzerren könnte, war aus konzeptioneller Sicht genau dieser korrigierende und optimierende Beitrag der Lehrpersonen wünschenswert. Denn so können letztlich auch fundiert erprobte und kritisch reflektierte digitale Lernumgebungen, einschließlich eines zugehörigen didaktischen Konzeptes, als praxisrelevanter Output der vorliegenden Arbeit zur Dissemination gebracht werden und somit Transfer aktiv mit gestalten.

Weiterhin konnte durch die Interviews dargelegt werden, dass trotz intensiver Bemühungen der an der Schulentwicklung beteiligten Institutionen (z. B. Digitalpakt Schule, BMBF) auch heute noch Hürden in Form fehlender technischer Ausstattung auftreten. Dass Digitalisierung im Unterricht teilweise als zusätzlicher Aufwand wahrgenommen wird und analoge Alternativen aufgrund einer subjektiv empfundenen Unzuverlässigkeit digitaler Medien simultan vorgehalten werden, kann dem Anspruch einer zukunftsfähigen Digitalkompetenz ebenfalls nicht zuträglich sein.

Trotz dieser häufig genannten Hürden des Einsatzes einer digitalen Innovation attestierten die Lehrpersonen den virtuellen Laboren eine gute Eignung zum Einsatz als Teil einer Unterrichtsreihe zu einem Themenfeld. Die Einsatzmöglichkeiten werden insbesondere in der Vorbereitung einer Experimentierphase gesehen; eine Sequenzierung der virtuellen Labore scheint zu diesem Zweck gut darstellbar. Insgesamt wird das didaktische Konzept zu den in dieser Arbeit vorgestellten virtuellen Laboren als praxistauglich und als gute Variante eines schülerzentrierten Einsatzes digitaler Medien betrachtet. Die Lehrpersonen sehen sich dabei selbst in einer überwiegend moderierenden und impulsgebenden Rolle im Lernprozess ihrer Schüler:innen. Weiterführende Informationen im Sinne einer Handreichung und die Einbindung adaptierbarer Elemente wurden durch die Lehrpersonen angeregt.

Die quantitativen Daten liefern zufriedenstellende Ausprägungen der Konstrukte Einstellung, Selbstkonzept und Wertzuschreibung im Kontext digitaler Medien in der Schule. Diese Ergebnisse konnten in den Interviews ebenfalls exemplarisch validiert

werden. Es ist folglich davon auszugehen, dass die befragten Lehrenden affektive Haltungen und Werthaltungen mitbringen, welche einem Einsatz der vorgestellten digitalen Innovation in der Schule zuträglich sind (Drossel et al., 2019; Eickelmann, 2011; Schulz-Zander & Eickelmann, 2007). Limitierend ist hier erneut auf eine mögliche Positivauswahl in der Stichprobe zu verweisen (siehe Diskussion *Convenience*-Stichprobe).

6.4 Bewertung der Ergebnisse der Lernenden

Bewertung der Ergebnisse der Lernenden

Flow-Erleben

- *Flow*-Erleben in der Vorbereitung statistisch nicht von einem Computerspiel zu unterscheiden.
- Besorgniskomponente des *Flows* variiert deutlich mit der Erhebungssituation.
- Vorgefundenes *Flow*-Erleben gilt als Prädiktor für motiviertes Verhalten.
- *Flow*-Erleben könnte möglicherweise durch höhere wahrgenommene Anforderung noch gesteigert werden.
- Konkrete Optimierungsansätze für das *Flow*-Erleben: unmittelbares Feedback und bessere Passung von Fähigkeit und Anforderung.

Aktuelle Motivation

- Teils signifikante Abweichungen von inhaltlich in Bezug stehenden Normierungen.
- Die Herausforderung ist in der Vorbereitung vergleichbar mit Aufgaben zum induktiven Denken.
- Das Interesse ist durchgehend geringer als in den Normierungen.
- Höhere Erfolgswahrscheinlichkeit und geringere Misserfolgsbefürchtung als in den meisten Normierungen deuten ähnlich wie das *Flow*-Erleben auf eine optimierbare Passung der Anforderungen an die Fähigkeiten hin.
- Die Situation des folgenlosen Lernens erscheint nicht unbedingt motivationsförderlich.
- Eine leistungsthematische Interpretation der Aufgaben findet statt.
- Das Anforderungsniveau deutet nicht auf eine realistische Zielsetzung hin.
- Eine mittlere Ausprägung des Interesses ist für den Fächerverbund zufriedenstellend.
- Tendenziell lernförderliche Ausprägungen der aktuellen Motivation konnten trotz Optimierungspotenzials nachgewiesen werden.

Cognitive Load

- Geringe Ausprägung des *Intrinsic Cognitive Load* ist auf geringe thematische Komplexität oder auf einen hohen Vorwissensstand der Lernenden zurückzuführen.
- Für das Verständnis der Lernmaterialien werden nur geringe kognitive Kapazitäten gebunden. Dennoch nimmt der *Extraneous Cognitive Load* im Verlauf der Lerneinheit zu.
- Eine Aussage über die Verständlichkeit der Inhalte im Vergleich digital vs. analog kann aufgrund des gewählten Designs nicht getroffen werden.
- Den Lernenden stehen ausreichend kognitive Kapazitäten für ein aktives Lernen (Schemabildung, *Germane Cognitive Load*) zur Verfügung.

Usability

- Die *Usability* (Gebrauchstauglichkeit, Bedienbarkeit) der virtuellen Labore ist als akzeptabel („OK“) zu bezeichnen.
- Aufgrund der externen Gestaltungseinflüsse und der begrenzten Ressourcen ist die *Usability* zufriedenstellend.
- Die *Usability* gilt als wichtiges Merkmal der Interaktion Lernender mit digitalen Medien und korreliert bekanntermaßen mit der Leistung der Schüler:innen.

Nachfolgend werden die im Ergebnisteil dargestellten Befunde aus der Stichprobe der Lernenden aufgegriffen, anhand des theoretischen Bezugsrahmens verortet und bewertet sowie kritisch diskutiert.

Flow-Erleben

Die in der vorliegenden Studie aufgefundenen Ausprägungen des *Flow*-Erlebens zeigen in der Vorbereitungsphase keine signifikante Abweichung gegenüber der Normierungsstudie in der Erhebungssituation während eines ausgewählten Computerspiels. In Bezug auf das *Flow*-Erleben lässt sich die Vorbereitung der digital gestützten Lerneinheit somit nicht von einem Computerspiel unterscheiden. Es darf konstatiert werden, dass die gestaltete Lernumgebung die Teilnehmenden einen ähnlichen *Flow* erleben lässt wie ein Computerspiel. In diesem Kontext ist die vorgefundene Ausprägung des *Flow*-Erlebens positiv zu bewerten. Gleichzeitig konnte ebenfalls keine signifikante Abweichung von der Erhebungssituation einer Vorlesung festgestellt werden. In Anbetracht der unterrichtlichen Lernsituation ist dies wenig verwunderlich. Ein ähnlich ausgeprägtes *Flow*-Erleben war für den zweiten Testzeitpunkt, die experimentelle Arbeit im Freiland, nachweisbar. Lediglich in der Nachbereitungsphase unter Nutzung virtueller Labore ergibt sich ein signifikant geringeres *Flow*-Erleben als dies in den Normierungsstudien der Fall war.

Hinsichtlich der Besorgniskomponente des *Flows* sind die Ergebnisse weniger konsistent. Hier scheint die Erhebungssituation einen stärkeren Einfluss auszuüben. Am ehesten zeigt sich eine Übereinstimmung der Besorgniskomponente mit der Normierung Computerspiel während der experimentellen Arbeit im Freiland und in der Nachbereitungsphase. Weitere Übereinstimmungen mit Normierungsstudien in Lernsituationen konnten nicht identifiziert werden.

Das Erleben eines *Flows* stellt das Aufgehen in einer glatt laufenden, aber dennoch anspruchsvollen Tätigkeit (Csikszentmihalyi, 2008, 2014) dar. Ein glatter, automatisierter Ablauf sowie ein wahrgenommenes Absorbiertsein in der Ausübung der Tätigkeit sind kennzeichnend (Rheinberg et al., 2019). Die vorgefundenen Werte im mittleren Bereich der *Flow*-Kurzskala verweisen somit auf ein mittelmäßiges *Flow*-Erleben der Teilnehmenden zu den ersten beiden Testzeitpunkten. Die Varianzanalyse konnte bestätigen, dass die leicht über der Skalenmitte rangierenden Werte von TZP1 und TZP2 signifikant größer sind als der Wert des *Flow*-Erlebens zum dritten Testzeitpunkt. Zunächst deuten die mittleren Ausprägungen darauf hin, dass mit der Lerneinheit ein gewisses Maß an *Flow* geschaffen werden konnte. In Anlehnung an Csikszentmihalyi (2008) konnte der durch Ängstlichkeit und Langeweile abgegrenzte *Flow*-Channel wohl zumindest ansatzweise getroffen werden. Anforderung und Fähigkeiten scheinen daher in einem akzeptablen Verhältnis zueinander zu stehen. Da sich die Besorgniskomponente

des *Flows* als sehr gering ausgeprägt darstellt, scheint dieser Faktor wenig negativen Einfluss auszuüben. Die Varianzanalyse zeigt einen signifikanten Rückgang der Besorgniskomponente des *Flows* parallel zur Abnahme des *Flow*-Erlebens zwischen TZP1 und TZP3. Ein Zusammenhang ist daher nicht nur auf theoretischer Basis (Rheinberg et al., 2019) sondern auch datenbasiert zu vermuten.

Weiterhin zeigen auch die Einzelitems zur Passung von Fähigkeit und Anforderung einen signifikanten Rückgang der Anforderung von TZP2 zu TZP3 und damit – bei varianzanalytisch gleichbleibender Fähigkeit – einen simultanen, nicht-signifikanten Rückgang der Passung von Fähigkeit und Anforderung. Die Abnahme des *Flow*-Erlebens ist somit konform mit den in der Theorie bereits ausgeführten Zusammenhängen und konnte in der Studie, teils deskriptiv, teils inferenzstatistisch, entsprechend repliziert werden (z. B. Csikszentmihalyi, 2008).

Zusammenfassend deuten diese Ergebnisse des *Flow*-Erlebens als Prädiktor für motiviertes Verhalten (Rheinberg, 2000; Rheinberg et al., 2003) auf positive Voraussetzungen für die aktuelle Motivation hin, da die wahrgenommene Herausforderung bewältigbar erscheint, wobei eine hohe Erfolgsaussicht sowie eine geringe Misserfolgsbefürchtung auf eine Situation des „folgenlosen Lernens“ (Rheinberg et al., 2001, S. 11) hinweisen. Hypothese 3.2 kann somit nicht abgelehnt werden.[43]

> H 3.2: Die Schülerinnen und Schüler erfahren im Verlauf der Lerneinheit ein Flow-Erleben.

Damit bleibt die Frage bestehen, wie das *Flow*-Erleben weiter optimiert werden könnte, um einen noch besseren Tätigkeitsanreiz zu schaffen. Nach Csikszentmihalyi (2014) wären hierzu die Bedingungen für *Flow*-Erleben zu überprüfen und das Lernerlebnis dahingehend stärker auszurichten. Da einige Bedingungen bereits im Zuge der Konzeption der Lernumgebungen und des didaktischen Konzeptes berücksichtigt wurden (etwa die Zielklarheit), könnte weitere Optimierung vermutlich am ehesten im Bereich der *Flow*-Prädiktoren unmittelbares Feedback und Passung von Fähigkeit und Anforderung erreicht werden (Csikszentmihalyi, 2014).

Unterstützt wird dieser Eindruck auf theoretischer Ebene durch Ergebnisse einer Studie unter Schüler:innen der sechsten Klassenstufe von Großmann und Wilde (2021). Wenngleich in anderem inhaltlichem Kontext, so konnten die Forschenden in dieser Untersuchung doch eine hohe Korrelation des *Flow*-Erlebens mit der wahrgenommenen Kom-

[43] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 96), modifiziert

petenz der Lernenden nachweisen. Die Korrelation des *Flows* mit einer Selbsteinschätzung des Konstrukts Druck / Anspannung fiel dagegen vernachlässigbar gering aus. Es ist somit anzunehmen, dass die wahrgenommene Kompetenz der Lernenden durchaus einen großen Einfluss auf das *Flow*-Erleben hat, dies aber nicht gleichbedeutend mit der Wahrnehmung einer negativ konnotierten Anspannungskomponente ist. In der vorliegenden Studie schätzten die Teilnehmenden ihre Fähigkeiten als mittelmäßig ein. Somit bleibt anzunehmen, dass ein höheres Kompetenzerleben, welches mit größerer Anforderung bei ebenfalls stärker ausgeprägten Fähigkeiten einher ginge, zu einer Verbesserung des *Flow*-Erlebens führen könnte.

Berger et al. (2020) folgerten anhand einer Crossover-Studie mit Proband:innen aus verschiedenen Klassenstufen der Sekundarstufe I einen Rückgang des *Flow*-Erlebens im Umgang mit virtuellen Lernumgebungen mit zunehmendem Alter der Versuchspersonen. Angesichts dieser Ergebnisse sind die leicht überdurchschnittlichen *Flow*-Werte der vorliegenden Studie durchaus positiv zu betrachten. Ein Rückgang des *Flow*-Erlebens scheint somit nicht nur durch das Alter der Versuchspersonen begründet zu sein.

Bekanntermaßen erfordert *Flow* einen gewissen kognitiven Anspruch der Aufgabe an die Lernenden (Csikszentmihalyi, 2014). Eine mögliche Implikation dieser Erkenntnisse stellt somit die Vermutung dar, dass das Konstrukt des *Flow*-Erlebens insbesondere bei thematisch hoch komplexen Aufgabenstellungen seine Relevanz zeigt und auch vorwiegend dann als Prädiktor der Motivation auftritt. Eine solch hohe Komplexität der Lerninhalte war in der vorliegenden Studie gemessen am *Intrinsic Cognitive Load* ganz klar nicht gegeben.

Aktuelle Motivation

Die vorgefundenen Werte für die FAM-Subskalen zeigen teils signifikante Abweichungen von inhaltlich in Bezug zu bringenden Normierungsstudien. Während der Vorbereitungsphase zeigt der ermittelte Wert für die Herausforderung im Vergleich zur Normierungsstudie zum induktiven Denken keinen Effekt. Folglich ist die Herausforderung zumindest während der Vorbereitung mit digitalen Medien ähnlich einzuordnen.

Das Interesse ist zu allen Erhebungszeitpunkten signifikant geringer ausgeprägt als in den Normierungen mit Bezug zu Biologieaufgaben. In der Vorbereitung und der Durchführung der Lerneinheit zeigt sich gegenüber der Normierungsstudie zum induktiven Denken kein Effekt, sodass hier von einer Übereinstimmung der Interessensausprägung auszugehen ist. Zum dritten Testzeitpunkt ist dieses Ergebnis nicht replizierbar. Optimierungsbedarf der Lernumgebungen beziehungsweise der Erhebungssituation hinsichtlich der Interessensförderung kann auf dieser Grundlage als ein Desiderat für die Weiterentwicklung der Lernkonzeption, insbesondere der Nachbereitungsphase, konstatiert werden. Dabei ist jedoch die Unterscheidbarkeit von aktuellem Interesse als

situationaler Form und dispositionalem Interesse als stabilem Persönlichkeitsmerkmal zu berücksichtigen (Blankenburg & Scheersoi, 2018; Engl, 2020; Krapp, 1992). Entsprechend bedürfte es zunächst einer spezifischeren Untersuchung des in der vorliegenden Studie als gering ausgeprägt identifizierten Interesses der Teilnehmenden. Anschließend wäre eine gezielte Adressierung der interessensförderlichen Ausrichtung der Lerneinheit denkbar.

Im Vergleich mit den Normierungsstudien zeigten sich die in dieser Studie erhobenen Werte für die wahrgenommene Erfolgswahrscheinlichkeit überwiegend als signifikant höher ausgeprägt, eine Übereinstimmung zeichnet sich lediglich für den Vergleich mit der Normierung zum induktiven Denken in der Nachbereitungsphase ab. Die Misserfolgsbefürchtung wurde durchweg deutlich geringer eingeschätzt, als dies in der Bearbeitung der Biologie- und Denkaufgaben nach Rheinberg et al. (2021) der Fall war. Auch dies deutet auf die Wahrnehmung einer Situation des folgenlosen Lernens hin, wie sie bereits im Zusammenhang mit dem *Flow*-Erleben beschrieben wurde (Rheinberg et al., 2021).

Flow gilt als Prädiktor motivierten Verhaltens einer Person (H. Heckhausen, 1977; Rheinberg et al., 2003). Vor diesem Hintergrund erscheinen akzeptable Voraussetzungen motivierten Verhaltens anhand der bereits diskutierten Daten aus der Erhebung des *Flow*-Erlebens als erwartbar. Ausgehend von den theoretischen Betrachtungen sind es auch diese mittleren leistungsthematischen Anforderungen, nach welchen Aufgabenstellungen für ein motiviertes Lernen streben. Dabei ist zunächst ausschlaggebend, inwieweit die Teilnehmenden die Aufgabe überhaupt leistungsthematisch interpretieren, also ob sie eine Herausforderung in der Aufgabe erkennen (Rheinberg, 2000). Die vorliegenden Ergebnisse verweisen hierzu insbesondere in der Vorbereitung und der Durchführung mit mittleren Ausprägungen auf der siebenstufigen Likertskala auf eine stattfindende leistungsthematische Interpretation durch die Lernenden hin. Wenngleich die Herausforderung zum dritten Testzeitpunkt im Vergleich zu den ersten beiden Testzeitpunkten signifikant rückläufig ist, kann auch hier noch eine mäßige Herausforderung erkannt werden.

Weiterhin gilt es zu betrachten, wie die Lernenden das Anforderungsniveau als das für sie selbst zu Erreichende strukturieren (Rheinberg, 2000). Hierzu betrachten wir die Faktoren Erfolgswahrscheinlichkeit und Misserfolgsbefürchtung des FAM. Für eine motivationsförderliche Genese dieser beiden Faktoren müssen sowohl Misserfolg als auch Erfolg gleichermaßen möglich sein, denn hohe Anforderungen steigern den Erfolgsanreiz, machen jedoch ein Versagen wahrscheinlicher (Rheinberg, 2000). Somit muss die Abwägung dieser beiden Faktoren zu einer realistischen Zielsetzung führen, welche mit der eigenen Kompetenz vereinbar ist, um motivierend wirken zu können (Atkinson, 1957). Eine hohe Erfolgswahrscheinlichkeit ist den deskriptiven Daten der Fragebogenauswertung zu entnehmen; diese zeigt über die drei Testzeitpunkte hinweg

keine signifikante Veränderung. Zugleich zeigt die Erfolgswahrscheinlichkeit jedoch keinen Deckeneffekt. Auch Misserfolg wird durch die Teilnehmenden also nicht kategorisch ausgeschlossen, wenngleich die Ergebnisse hier auf eine recht gering ausgeprägte Misserfolgsbefürchtung schließen lassen. Es lässt sich somit konstatieren, dass die Abwägung von Erfolgswahrscheinlichkeit und Misserfolgsbefürchtung im Kontext der Lerneinheit stattfindet und dass diese nicht klar zugunsten eines der beiden Faktoren ausfällt. Unter den genannten theoretischen Voraussetzungen ist somit davon auszugehen, dass die Lernsituation durch die Lernenden leistungsthematisch strukturiert und durchaus ambivalent betrachtet wurde. Ergo ergibt sich hieraus die Voraussetzung für motiviertes Verhalten der Proband:innen (Atkinson, 1957; Rheinberg, 2000; Rheinberg et al., 2001). Ungeachtet dessen wäre eine höhere Dissonanz im Bereich der Erfolgs- und Misserfolgsabwägung tendenziell erstrebenswert. Diese könnte durch eine stärkere leistungsthematische Strukturierung beziehungsweise eine Erhöhung des Anforderungsniveaus erzielt werden. Folglich ist auch an dieser Stelle festzuhalten, dass tendenziell eine leichte Unterforderung der Lernenden vorlag.

Das Interesse als Komponente des FAM zeigt sich über alle drei Testzeitpunkte als mäßig ausgeprägt, wobei während der Nachbereitungsphase ein gegenüber Vorbereitung und Durchführung signifikant geringeres Interesse nachgewiesen werden konnte. Der Rückgang des Interesses in der Nachbereitungsphase könnte in Anlehnung an die Erkenntnis das *Flow*-Erleben betreffend ihre Ursache in der inhaltlichen Gestaltung dieses Teils der Lerneinheit haben. Dennoch darf ein Interesse im mittleren Wertebereich für den naturwissenschaftlichen Fächerverbund durchaus als zufriedenstellendes Ergebnis angesehen werden (vgl. Holstermann & Bögeholz, 2007, 75; Pawek, 2009, S. 98).[44]

Es liegen somit keine ausreichenden Anhaltspunkte vor, welche eine Ablehnung der Hypothese 3.1 begründen würden.

> H 3.1: Die Schülerinnen und Schüler zeigen im Verlauf der Lerneinheit tendenziell lernförderliche Ausprägungen der Subfacetten der aktuellen Motivation.

Cognitive Load

Der deutlich in der unteren Hälfte der Likertskala verortete *Intrinsic Cognitive Load* verweist auf einen durch die Lernenden wahrgenommenen geringen thematischen Anspruch der Aufgaben. Dies kann sowohl Ausdruck geringer Komplexität der Aufgaben

[44] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 96), modifiziert

als auch hohen Vorwissens der Lernenden in diesem Bereich sein (Leppink et al., 2013). Eine klare Abgrenzung dieser beiden Einflussfaktoren ist anhand der vorliegenden Daten nicht möglich. Aufgrund der unterschiedlichen Vorwissensstände in der Stichprobe ist – auch unter Berücksichtigung der Vorgaben der Lehrpläne – jedoch davon auszugehen, dass ein nicht vernachlässigbares Vorwissen der Lernenden mit ausschlaggebend für diese Selbsteinschätzung war. Fehlende inferenzstatistische Varianz über die drei Testzeitpunkte hinweg trägt ebenfalls nicht zur Aufklärung dieser Fragestellung bei. Die Auswertungen führen somit zur Ablehnung von Hypothese 3.3.

> H 3.3: Die Schülerinnen und Schülern zeigen in der Interaktion mit den Lernmaterialien einen mittleren bis hohen *Intrinsic Cognitive Load.*

Die über alle Testzeitpunkte als eher niedrig eingeschätzte Beanspruchung durch die Thematik der Lerneinheit deckt sich mit den deskriptiven Ergebnissen der Passung von Anforderung und Fähigkeit. Gegebenenfalls wäre hier durch ein angepasstes Management des *Intrinsic Cognitive Load* eine noch höhere Passung zu erreichen (z. B. Gerjets et al., 2004).[45]

Instruktionsbezogene, nicht lernförderliche Eigenschaften der Lernumgebungen spiegeln sich im *Extraneous Cognitive Load* wider. Eine Zunahme des *Extraneous Loads* mit signifikanten Mittelwertsunterschieden über die drei Testzeitpunkte hinweg lässt den Schluss zu, dass die einführenden Kapitel der virtuellen Labore als besonders leicht verständlich wahrgenommen wurden. In der Selbsteinschätzung der Lernenden sind demnach die schriftlichen Anleitungen während der Durchführungsphase signifikant weniger eingängig als die digitale Vorbereitung. Interessanterweise werden die auswertungsbezogenen Kapitel der virtuellen Labore erneut mit signifikant höherem *Extraneous Load* eingeschätzt als die Materialien während der Vorbereitung. *Intrinsic* und *Extraneous Load* können sowohl theoretisch als auch in den Itemformulierungen und in validierenden Faktoranalysen klar voneinander abgegrenzt werden (Kalyuga, 2011; Leppink et al., 2013). Dennoch zeigen die vorgefundenen Korrelationen dieser beiden Subfacetten mögliche inhaltliche Überschneidungen auf. Diese Problematik der Skala ist bereits bekannt und kann möglicherweise auf eine unzureichende Differenzierung der schwierigkeitsgenerierenden Faktoren in der Introspektion der befragten Personen zurückgeführt werden (Brünken et al., 2010). Ebenso ist festzuhalten, dass ausgehend

[45] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 96), modifiziert

von den vorliegenden Ergebnissen keine Aussage darüber getroffen werden kann, ob digitale Instruktionen besser verständlich sind als analoge und *vice versa*.

Ungeachtet dieser offenen Fragestellungen, welche Ansätze für weitere Untersuchungen bieten, darf konstatiert werden, dass sowohl die virtuellen Labore als auch die schriftlichen Anleitungen auf Basis der vorliegenden Daten keine übermäßigen kognitiven Kapazitäten zum Verstehen der Lernmaterialien binden. Geringe Werte des *Extraneous Cognitive Load* weisen darauf hin, dass keine übermäßigen kognitiven Kapazitäten für die reine Verarbeitung der Materialien vonnöten waren, was wiederum für das fundierte Design der Lernmaterialien spricht. In der Konsequenz kann so – ausgehend vom Postulat der Addition der drei C*ognitive Load* Typen (vgl. Moreno & Park, 2010 für eine historische Diskussion dieses Postulats) – freie Kapazität geschaffen werden (Paas, Tuovinen et al., 2003). Diese kann zur Schemabildung und somit zum „echten Lernen“ im konstruktivistischen Sinne genutzt werden.[46]

Ergo zeigen sich die eingesetzten Lernmaterialien vom Standpunkt der *Cognitive Load Theory* in ihrer Gestaltung als nicht lernhinderlich. Die Datenlage lässt somit eine Ablehnung von Hypothese 3.4 nicht zu.

> H 3.5: Die Schülerinnen und Schülern zeigen in der Interaktion mit den Lernmaterialien einen eher hohen *Germane Cognitive Load*.

Dieser Befund kann anhand der Daten zum *Germane Cognitive Load* bestätigt werden. So zeigen sich für diesen Indikator der tatsächlich auf die aktive Konstruktion von Wissen verwendeten Anteile des Arbeitsgedächtnisses über alle drei Testzeitpunkte Werte im mittleren bis oberen Bereich der Likert-Skala. Hypothese 3.5 wird daher nicht abgelehnt.

> H 3.4: Die Schülerinnen und Schülern zeigen in der Interaktion mit den Lernmaterialien einen geringen *Extraneous Cognitive Load.*

[46] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 97), modifiziert

Bei Betrachtung der gesamten Skala zum *Cognitive Load* fällt auf, dass der Rückgang des *Germane Cognitive Load* simultan zur Zunahme des *Extraneous Cognitive Load* erfolgte. Dies spricht für die Additivitätstheorie des *Cognitive Load* (Plass et al., 2010), lässt jedoch im Umkehrschluss keine subtraktive Betrachtung zu (Chandler & Sweller, 1991).

Es kann nicht bestätigt werden, ob auf Personenebene in Einzelfällen eine Überschreitung der Kapazitätsgrenzen des Arbeitsgedächtnisses im Sinne der Additivität der *Load*-Typen eingetreten ist. Für eine solche Betrachtung wäre in der neueren Interpretation der Additivität der *Load*-Typen nach Paas, Tuovinen et al. (2003) zumindest noch eine Betrachtung der freien, ungenutzten Kapazität des Arbeitsgedächtnis der Personen erforderlich. Eine Messung dieser freien Kapazität scheint jedoch mit Methoden der Selbstauskunft kaum darstellbar.

Usability

Nach Hessel (2008) benötigt die Auseinandersetzung der Lernenden mit einer multimedialen Lernumgebung immer auch kognitive Kapazitäten des kapazitiv limitierten Arbeitsgedächtnisses. Diese Kapazitäten möglichst gering zu halten und somit möglichst viel Kapazität für die eigentlichen Lernprozesse bereitzustellen, war das Ziel der vorliegenden Konzeption (Hessel, 2008). Weiterhin identifizierten Karapanos et al. (2018) die *Usability* einer Lernumgebung als wichtiges Merkmal der Interaktion Lernender mit digitalen Medien und konnten in diesem Zusammenhang eine mittlere Korrelation zwischen *Usability* einer digitalen Lernumgebung und der Schülerleistung nachweisen. Die in der Studie für die virtuellen Lernumgebungen vorgefundene *System Usability* ist nach Bangor et al. (2008) im akzeptablen Bereich zu verorten. In einer adjektivischen Beschreibung liegt der Wert für die virtuellen Labore mit rund 70 Punkten (Skalierung 0 – 100) knapp unterhalb des *Cutoff*-Wertes für die Bezeichnung als gut und damit immer noch im Bereich der adjektivischen Attribution „OK“ (Bangor et al., 2008). Angelehnt an die Betrachtung der *Usability-Scores* als Quartile ist der vorgefundene Wert als durchschnittlich (Sauro, 2011) beziehungsweise im zweiten Quartil verortet anzusehen (Bangor et al., 2008). Dieser Wert ist noch nicht ausreichend, damit Nutzende auch zu einer Weiterempfehlung des Systems tendieren (Brooke, 2013; Sauro & Lewis, 2011). Angesichts der begrenzten Ressourcen und der stellenweise einzuhaltenden externen Vorgaben, welche mit den didaktischen Vorstellungen interferierten, ist die vorgefundene *Usability* jedoch als zufriedenstellend zu betrachten.

Darüber hinaus repliziert der vorgefundene Wert für die *System Usability* das Ergebnis der Studie von Karapanos et al. (2018) sehr gut. Diese hohe Übereinstimmung stellt ein Indiz für die Annahme dar, dass die Usability der virtuellen Labore aufgrund der stringenten Gestaltungsvorgaben auf weitere virtuelle Labore übertragbar ist.

Weiteren Aufschluss über die Bedienerfreundlichkeit der Lernumgebungen könnte eine dedizierte Betrachtung anhand der inhaltlichen Aspekte der *System Usability Scale* liefern. Einen Ansatz hierfür bieten Lewis und Sauro (2009) mit dem Vorschlag einer reliablen zweifaktoriellen Modellierung der Skala, welche zwei Items der Skala als inhaltlichen Faktor „Learnable" (Lewis & Sauro, 2009, S. 95) interpretieren. Ebenso wäre darüber hinaus eine Betrachtung der *Content Usability* denkbar.

Zusammenschau der diskutierten Ergebnisse der Lernenden

Zusammenfassend darf konstatiert werden, dass die Lernenden im Umgang mit der digitalen Innovation im Rahmen des vorgestellten didaktischen Konzeptes im Mittel Ausprägungen der erfassten kognitiv-affektiven Variablen zeigen, welche darauf schließen lassen, dass das didaktische Konzept auf affektiver Ebene zufriedenstellende Reaktionen der Lernenden hervorruft und auf kognitiver Ebene aktives Lernen ermöglicht. Es ist somit davon auszugehen, dass das didaktische Konzept – in dessen Zentrum die virtuellen Labore als Lernumgebung stehen – als geeignet angesehen werden kann, ein mittleres *Flow*-Erleben sowie eine mäßig ausgeprägte aktuelle Motivation zu generieren. Kognitiv erscheinen die Inhalte als nicht ausreichend fordernd, die thematische Komplexität könnte weiter gesteigert werden. Dennoch wird aktives Lernen im konstruktivistischen Sinne durch das didaktische Konzept ermöglicht. Den virtuellen Laboren ist aufgrund der vorliegenden Befundlage keine Lernhinderlichkeit zu attestieren: Sie können mit geringem kognitivem Aufwand verstanden werden und zeigen eine ausreichende Gebrauchstauglichkeit.

Anhand der Ergebnisse der inferenzstatistischen Prüfungen zeigen sich für die Subskalen Erfolgswahrscheinlichkeit (FAM) und *Intrinsic* sowie *Germane Cognitive Load* keine signifikanten Mittelwertsunterschiede über die drei Testzeitpunkte hinweg. Die übrigen geprüften Konstrukte zeigen bei insgesamt drei Testzeitpunkten signifikante Unterschiede zwischen zwei oder mehr Testzeitpunkten. Die erklärenden Einzelitems mit Bezug zu Anforderung und Fähigkeit wurden dabei nicht berücksichtigt. Bezugnehmend auf Hypothese 3.6 ist daher festzuhalten, dass diese Hypothese nur in Teilen angenommen werden kann. Für die Subskalen Erfolgsaussicht, *Germane* und *Intrinsic Cognitive Load* kann diese Hypothese nicht angenommen werden.

> H 3.6: Die erhobenen Konstrukte zeigen signifikante Unterschiede im Verlauf der Lerneinheit.

Die von den interviewten Lehrpersonen geäußerten Bedenken, der Lerninhalt könne die Schüler:innen überfordern, lassen sich anhand der vorliegenden Querschnittsdaten

widerlegen. Insbesondere der geringe *Intrinsic Cognitive Load* lässt hierauf direkt schließen. Indirekte Hinweise für diese Feststellung liefern weiterhin die Ergebnisse der *Flow*- und Motivationserhebung. Konkret sei hier beispielsweise die hohe selbsteingeschätzte Erfolgsaussicht der Lernenden wie auch deren durchaus akzeptables *Flow*-Erleben genannt. Hierbei darf jedoch der Individualisierungsbedarf heterogener Lerngruppen unter dem Eindruck der durchschnittlichen Selbsteinschätzung nicht unberücksichtigt bleiben.[47]

6.5 Rückführung auf das Transfermodell

Rückführung auf das Transfermodell

Forschungsfrage 1: Barrieren des Transfers

- Die postulierten Barrieren 1) schulische Situation, 2) Persönlichkeit der Lehrperson und 3) Material konnten in ihrer grundlegenden Relevanz bestätigt werden.
- Barriere 1) schulische Situation stellt insbesondere hinsichtlich der vorhandenen Ressourcen ein Transferhindernis dar.
- In der Stichprobe zeigt sich kein transferhinderliches Potenzial von Barriere 2) Persönlichkeit.
- In der Stichprobe zeigt sich kein transferhinderliches Potenzial von Barriere 3) Material.

Forschungsfrage 2: Didaktische Konzepte zur Implementationsförderung

- Didaktische Konzepte müssen um die Implementation einer digitalen Innovation in Schulen zu fördern aus Sicht der Lehrpersonen…
  - sequenzierbar sein
  - curricular verortete Handreichungen bieten
  - variable Nutzbarkeiten / Einsatzszenarien abbilden
  - Kommunikationsanlässe bieten
  - Feedbackoptionen liefern
  - Diskussionsansätze darbieten
  - eine Kontrolle der Arbeitsprozesse der Lernenden sicherstellen
  - Unterrichtsgespräche mitgestalten
  - zielgruppengerechte Sozialformen vorschlagen
  - Lehrendenzentrierung (bedingt) anstreben
  - durch die Lehrperson adaptierbar sein (Schwierigkeit / Kontext)
  - den zeitlichen Umfang der Zielgruppe anpassen

Forschungsfrage 3: Genese lernförderlicher Zustände

- In der Vor- und Nachbereitung mit virtuellen Laboren konnte ein akzeptables *Flow*-Erleben erzielt werden.
- In der Bearbeitung der virtuellen Labore konnten zufriedenstellende Voraussetzungen für motiviertes Verhalten der Lernenden geschaffen werden.
- Die Verarbeitung der virtuellen Labore bindet nur geringe kognitive Kapazitäten (ECL).
- Während der Bearbeitung der virtuellen Labore konnte ein hoher Anteil kognitiver Kapazität für das aktive Lernen bereitgestellt werden (GCL).

Auf Basis der bis zu diesem Punkt der vorliegenden Arbeit dargestellten Befunde erfolgt im nachstehenden Kapitel eine Einordnung derselben in das postulierte Modell der

[47] Absatz in Teilen erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2021, S. 96), modifiziert

Transferbarrieren. Hierbei sei limitierend vorweggenommen, dass ein strukturprüfendes Vorgehen zur Untersuchung des Modells explizit nicht Ziel der vorliegenden Arbeit war. Vielmehr wurde ein explorativ-deskriptiver Ansatz verfolgt, welcher Raum für inhaltliche Explikationen und Rückmeldungen auf konzeptioneller Ebene ließ, um so den Benefit für die Schullandschaft nicht zu vernachlässigen. Im Rahmen der Rückführung auf das Modell der Transferbarrieren erfolgt die Beantwortung der Forschungsfragen.

Forschungsfrage 1: Barrieren des Transfers

Das induktive Modell der Transferbarrieren, dessen Ansätze in der vorliegenden Arbeit explorativ untersucht wurden, gliedert sich in drei übergeordnete, möglicherweise transferhinderliche, Domänen: 1) schulische Situation, 2) Persönlichkeit und 3) Material. Durch die im Verlauf der Arbeit präsentierten und diskutierten Ergebnisse können explorativ-deskriptive Aussagen darüber zu tätigen, ob diese Domänen in der Praxis empirisch bestätigt werden konnten und wenn ja, ob die vorgefundenen Ausprägungen der jeweils assoziierten Konstrukte (siehe Abbildung 115) im vorliegenden Fall als transferhinderliche Faktoren in Erscheinung treten.

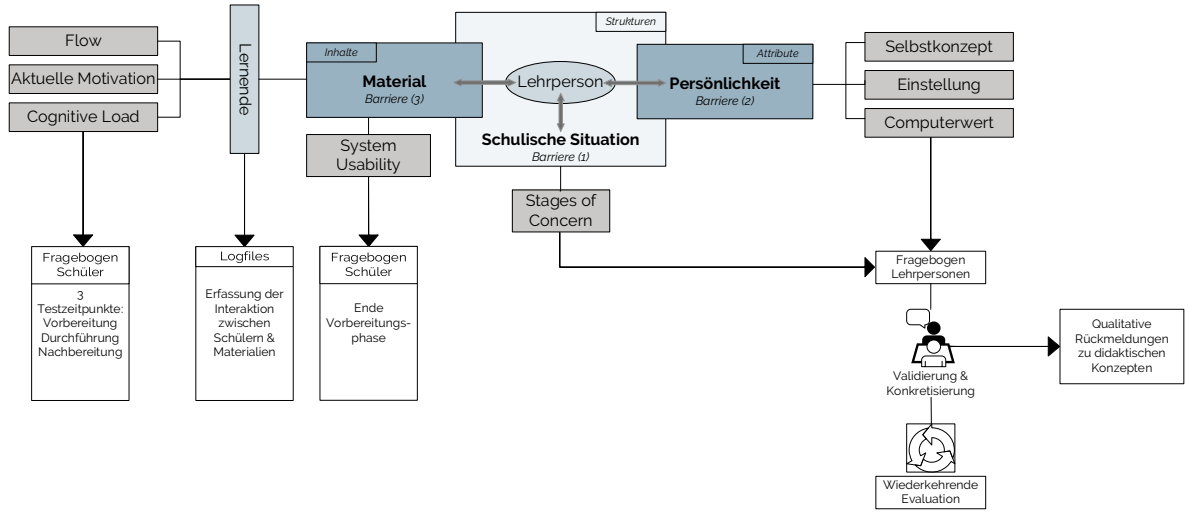


Abbildung 115: Übersichtsdarstellung zum Evaluationskonzept. Die einzelnen angenommenen Hürden eines Transfers digitaler Innovationen in die Schule werden durch qualitative und quantitative Verfahren untersucht.

Vorgefundene, teils hohe Ausprägungen der *Stages of Concern* in den Stufe 3 – Management (siehe Abbildung 39) verweisen auf eine gegebene Relevanz der ***Barriere 1) schulische Situation*** für die befragten Lehrpersonen. Stufe 3 – Management als aufgabenbezogene Komponente der *Stages of Concern* bildet dabei eine kognitiv-affektive Beschäftigung der Studienteilnehmenden mit strukturellen Gegebenheiten wie etwa vorhandenen Ressourcen und organisatorischen Gegebenheiten ab (George et al., 2013). Aufgrund des sich wellenartig entwickelnden Charakters der *Stages of Concern*

im Laufe eines Transfervorhabens ist zu erwarten, dass mit weiter voranschreitenden Implementationsbemühungen auch die Ausprägung der *Concerns* hinsichtlich des Managements der Innovation weiter zunimmt. Da lediglich eine Erhebung zu einem Testzeitpunkt erfolgte, bedarf es für eine Einschätzung der möglichen Transferhinderlichkeit dieser Facette daher einer Explikation durch die vorliegenden qualitativen Daten aus den Interviews.

Wie die Interviewdaten belegen, stellen die verfügbaren Ressourcen im Schulalltag ein Hindernis für die Nutzung digitaler Medien dar. Sowohl die Verfügbarkeit von Endgeräten oder ausreichender Bandbreite der Internetanbindung als auch die technische Zuverlässigkeit beschäftigen die Lehrenden und stellen daher einen möglichen Hinderungsgrund der Nutzung einer digitalen Innovation dar. Das vorliegende Konzept kann aufgrund der browserbasierten Umsetzung insbesondere die von den Lehrpersonen geäußerten technischen Hürden wie etwa fehlende Kompatibilität von Software und Endgeräten mindern. Diese im Rahmen der vorliegenden Studie den schulischen Strukturen zugeordneten Aspekte bieten somit durchaus ein relevantes, transferhinderliches Potenzial. Interessanterweise ging keine der befragten Lehrpersonen auf strukturelle Gegebenheiten, wie etwa ein transferförderliches Klima in der Schulgemeinschaft oder die Einbindung der Schulleitung und -administration ein. Offen bleibt dabei die Frage, ob das Fehlen von Informationen hierzu durch eine Zurückhaltung der Befragten in der entanonymisierten Interviewsituation zur Vermeidung kritischer Äußerungen über Vorgesetzte bedingt ist oder möglicherweise durch mangelnde Selbstreflexion im System Schule. Letztere könnte sich aus dem Mangel an externer Kontrolle ergeben (Gräsel, Fußangel & Pröbstel, 2006). Klar ist jedoch vom forschungsperspektivischen Standpunkt, dass erfolgreicher Transfer eine das Gesamtsystem betreffende Aufgabe darstellt (Hennen, 2021; Ostermeier & Stadler, 2004).

Als zweiter Punkt tritt ***Barriere 2) Persönlichkeit*** der Lehrperson in den Vordergrund. Unter der Prämisse, dass affektive Variablen als Prädiktoren der tatsächlichen Nutzung digitaler Medien betrachtet werden können, erfolgte eine Erhebung ausgewählter Variablen. Insofern ergibt sich die Relevanz dieser möglichen Barriere des Transfers einer digitalen Innovation in die Schule bereits aus dem theoretischen Hintergrund. Mithin ist bereits bekannt, dass Einstellungen einen der bedeutendsten prädiktiven Faktoren der Mediennutzung durch Lernende darstellen (Celik & Yesilyurt, 2013; Pietzner, 2009), dass ein geringes Selbstkonzept des gewinnbringenden Einsatzes digitaler Medien Lehrpersonen von deren tatsächlicher Nutzung abhalten kann (Snoeyink & Ertmer, 2001) und dass Werthaltungen die Entscheidungsfindung, in diesem Fall die Entscheidung für oder wider digitaler Medien, klar beeinflussen (Eccles, 1994). Vor diesem Hintergrund ist der Persönlichkeit große Bedeutung als Prädiktor eines erfolgreichen Transfers digitaler Innovationen in die Schule beizumessen.

Entsprechend positiv ist der deskriptive Befund zu bewerten, welcher den drei erfassten Konstrukten Einstellung, Selbstkonzept und Wertzuschreibung eine mittlere Ausprägung attestiert. Alle drei Konstrukte zeigen sich im Mittel in der oberen Hälfte der eingesetzten Skalen verortet, die Wertzuschreibung (oder Nützlichkeit, siehe hierzu Diskussion der Ergebnisse dieses Konstruktes) gar im oberen Drittel. Auch hier können die Interviews zu einer validierenden Einordnung der Ergebnisse herangezogen werden. So betonen einige der befragten Lehrpersonen, dass eine mit Hilfe der Likert-Skalen erfasste mittlere Ausprägung der Einstellung nicht als mittelmäßig zu werten sei. Vielmehr sehen sich diese Lehrpersonen selbst digitalen Medien gegenüber sehr positiv eingestellt; die Relativierung auf einen mittleren Wert ergibt sich vielmehr aus der Reflexion der Lehrpersonen. Sie sind sich der Grenzen und Einsatzmöglichkeiten digitaler Medien und Lernumgebungen durchaus bewusst und möchten diese nicht als Patentlösung betrachten. Es kann folglich zusammenfassend festgehalten werden, dass die erfassten Persönlichkeitsfaktoren trotz teils mittelmäßiger Ausprägungen in der vorliegenden Studie nicht als akut transferhinderlich zu bewerten sind.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage liegen in Bezug auf ***Barriere 3) Material*** sowohl quantitative Daten der Lernenden als auch qualitative Einschätzungen aus den Interviews der Lehrenden vor. Weiterhin können die erfassten *Stages of Concern* in begrenztem Umfang Ansatzpunkte bieten. Die qualitativen Daten liefern zunächst die Bestätigung des Vorhandenseins der möglichen Transferbarriere „Material“. Indem trotz positiver informeller Rückmeldungen für die ausgearbeiteten virtuellen Labore zahlreiche Anregungen durch die Lehrpersonen erfasst und kategorisiert werden konnten, ist bereits erkennbar, dass die Lehrenden der digitalen Innovation nicht ohne deren kritische Prüfung folgen. Einen quantitativen Hinweis auf die Existenz der materialbezogenen Barriere liefert *Stage* 6 des *Stages of Concerns* Fragebogens. Das Optimierungspotenzial in Hinblick auf die vorgestellte Innovation, welches durch diese Subskala erfasst wird, konnte innerhalb der Stichprobe deutlich herausgestellt werden (z. B. SoC-Personenprofil „Nichtnutzer mit Ideen“, Abbildung 40, oder auch Gruppenprofil der SoC, Abbildung 42).

Nach Verifikation der Existenz der Transferbarriere Material betrachten wir nun deren Ausprägung im vorliegenden Fall. Wie bereits ausführlich berichtet zeigen die virtuellen Labore als Materialien eine akzeptable Gebrauchstauglichkeit und binden geringe kognitive Kapazitäten zum Verständnis der Materialien (*Extraneous Cognitive Load*). Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass die Lernenden in der Interaktion mit den virtuellen Laboren tendenziell positive motivationale (aktuelle Motivation) und motivationsprädiktive (*Flow*-Erleben) Merkmalsausprägungen aufweisen. Des Weiteren konnte anhand der Logfile-Analysen nachgewiesen werden, dass die Lernenden überwiegend dem vorgegebenen Lernpfad folgten. Ergo ist in Summe zu konstatieren, dass die Materialien in der vorliegenden Stichprobe nicht als Hinderungsgrund für einen erfolgreichen Transfer in die Zieldomäne Schule ausgemacht werden konnten.

In Hinblick auf die erste Forschungsfrage konnte die Relevanz der im postulierten Modell angeführten möglichen Barrieren eines erfolgreichen Transfers einer digitalen Innovation in die Schule (schulische Situation, Persönlichkeit, Material) sowohl theoretisch abgeleitet als auch anhand der vorliegenden explorativ-deskriptiven Daten der Lehrpersonen bestätigt werden.

> FF 1: Welche der postulierten Barrieren der Implementation einer digitalen Innovation in Schulen können deskriptiv bestätigt werden?

Barriere 1) schulische Situation scheint auf Basis der Interviewdaten insbesondere mit Bezug zu vorhandenen Ressourcen, ein Transferhindernis darzustellen. Etwaige schulisch-strukturelle Einflüsse sind auf Grundlage der *Stages of Concern*-Befragung zu vermuten, konnten jedoch in den Interviews nicht weiter aufgeklärt werden. Es zeigt sich kein transferhinderliches Potenzial von ***Barriere 2) Persönlichkeit*** in der Stichprobe der Lehrpersonen, wie durch die deskriptiven Ausprägungen der Variablen Einstellung, Selbstkonzept und Wertzuschreibung nachgewiesen werden konnte. Weiterhin ist festzustellen, dass auf Basis der in dieser Arbeit vorliegenden Daten ***Barriere 3) Material*** – bestätigt durch die kognitiven Variablen Gebrauchstauglichkeit, *Extraneous Cognitive Load* und die affektiven Variablen aktuelle Motivation und *Flow*-Erleben der Lernenden in der Interaktion mit den Materialien – nicht als Transferhindernis in Erscheinung tritt.

Forschungsfrage 2: Didaktische Konzepte zur Implementationsförderung

Ausgehend von den zuvor berichteten Erkenntnissen zur ersten Forschungsfrage ist abzuleiten, dass didaktische Konzepte insbesondere dann die Implementation einer digitalen Innovation in Schulen fördern können, wenn diese die ausgearbeiteten potenziellen Barrieren berücksichtigen. Dabei sind die zur effektiven (tiefgreifenden) Umsetzung einer fachdidaktischen Konzeption erforderlichen kognitiv-affektiven Prozesse inzwischen weitaus komplexer modelliert, als dass eine alleinige Abarbeitung von Kriterien zur Implementationsförderung die Thematik erschöpfend abbilden könnte (Breuer, 2021).

Zunächst bedarf es einer Betroffenheit der Lehrpersonen durch die Innovation, zu deren Erfassung sich die *Stages of Concern* hervorragend eignen (Breuer, 2021; George et al., 2013). Sehen sich die Lehrenden als nicht von der Innovation betroffen an, ist bestenfalls mit einer heuristischen Auseinandersetzung mit der Innovation zu rechnen, welche im Falle einer als gewinnbringend erachteten Innovation in eine oberflächliche Umsetzung mündet. Wird die Neuerung als wenig gewinnbringend erachtet, kann eine

Umsetzung gar nicht erwartet werden (Breuer, 2021). Die in der vorliegenden Arbeit vorgenommene Auswertung der *Concerns*-Profile brachte für fünf der Befragten Lehrpersonen (8,9 % der Befragten) Profile zu Tage, welche nicht auf eine Betroffenheit schließen lassen („*Unconcerned Innovation User*“, George et al., 2013). Folglich ist in der weitaus überwiegenden Anzahl der Fälle von einer Betroffenheit durch die vorgestellte Innovation auszugehen.

Bei gegebener Betroffenheit der Lehrpersonen bedarf es weiterhin einer Motivation zur Auseinandersetzung mit der Innovation (Breuer, 2021). Diese muss als erforderlich und relevant angesehen werden, der *status quo* muss also als optimierbar betrachtet und die jeweilige Innovation als für diese Optimierung geeignet erfasst werden (Breuer, 2021; Gregoire, 2003). Gewinnbringende Innovationen müssen folglich, wie bereits von Jäger (2004) postuliert, einen relativen Vorteil gegenüber der bestehenden Situation bieten. Das didaktische Konzept zur Nutzung der virtuellen Labore im Kontext der Gewässeranalytik wurde von den befragten Lehrpersonen in den Interviews als praxistauglich bewertet. Ebenso sehen alle im Zuge der Studie interviewten Lehrpersonen in den virtuellen Laboren variable Einsatzmöglichkeiten, die über ein reines *Blended-Learning*-Szenario hinausgehen. Auf der Ebene der Materialien bemängelte ein Drittel der Befragten ein möglicherweise erhöhtes Ablenkungspotential der virtuellen Labore sowie fehlende Kontrolle der Lehrperson. Ebenfalls moniert ein Drittel der Lehrpersonen die fehlenden Möglichkeiten zur Adaption der virtuellen Labore. Die überwiegende Mehrheit der Stichprobe sieht im Konzept zur Nutzung der virtuellen Labore somit eine gewinnbringende Neuerung. Unterstrichen wird diese Feststellung beim Blick in die Interviews:

> „*Ich glaube, dass der Aufwand durch das, dass ich halbwegs versiert bin glaube ich nicht größer ist als in allen anderen Bereichen. Bei der Konsequenz eigentlich auch nicht, weil ich eigentlich ziemlich überzeugt bin, dass es für die Schüler und für MICH einen Mehrwert bietet, sich darauf einzulassen. Gerade die Gestaltung von Unterrichtsmaterial fällt ja hier weg, wenn man was benutzen kann. Es geht ja dann mehr um die/ okay wie krieg ich es mit meinem Konzept in Einklang, damit ich parallel meine Struktur, die ich im Kopf habe und die ich mir für die Schüler überlege, mit der OML in Einklang bringe. Ohne jetzt etwas zu nehmen und mich selbst erst einmal darauf einstellen zu müssen. So das ist so die Schwierigkeit. So diese eigenen Ideen zu kombinieren mit OML ohne fremdgeleitet zu sein und nur noch Anwender oder begleitete Anwender zu sein*.“ – (Lehrperson 54)

Eine weitere Lehrperson führt, befragt nach dem Konzept, aus:

> „*Also ich finde es echt gut. Mir hat es/ Also ich selbst fand es interessant, das durchzumachen und würde es auch einsetzen also. Ja auf jeden Fall*." – (Lehrperson 55)

Ein weiteres Interview lieferte klar formulierte Optimierungspotenziale, welche jedoch nicht die Grundfesten des Konzeptes, sondern dessen zeitliche Ausgestaltung in Relation zur Klassengröße betreffen:

> „*Ich fand die ziemlich optimal. Also zumindest das Gewässeranalytik-OML. Da wüsste ich jetzt spontan nicht, was ich optimieren würde oder könnte. Das Einzige, das habe ich aber schon rückgemeldet, war die Experimentierzeit war zu gering. Das heißt, wir hatten nur zwei Stunden Experimentierzeit. Die müsste man meiner Meinung nach verdoppeln. Also wir bräuchten vier Stunden für dieses OML Gewässeranalytik. Wir hatten über einunddreißig Schüler glaube ich in verschiedenen Kleingruppen. Das war einfach dann zu viel Schüler. Zu viele Gruppen, die ganz unterschiedlich waren. Die einen waren schon fertig, die anderen haben noch gewartet und so weiter. Auch mit dem Wechsel und so weiter, das habe ich aber schon zurückgemeldet. Dass meiner Meinung nach diese Experimentierzeit zu gering war*." – (Lehrperson 47)

Zusammengefasst ist folglich der Wunsch nach Optimierung immanent ersichtlich, da das vorgelegte Konzept bereitwillig aufgegriffen wurde. Das didaktische Konzept kann insofern als ein möglicher Ansatz, welcher einen relativen Vorteil mit sich bringt, angesehen werden, womit die Motivation in der Modellierung der Implementierung nach Breuer (2021) gegeben sein dürfte.

Unter der Annahme einer hohen Motivation der Lehrenden zur Nutzung dieses didaktischen Konzepts stellt sich in der Folge die Frage nach den zur Verfügung stehenden persönlichen und systemischen Ressourcen (Breuer, 2021). Ausgehend von den selbst eingeschätzten Fähigkeiten der befragten Lehrpersonen ist hier in Bezug auf die Fähigkeiten im Umgang mit digitalen Endgeräten und Medien eine im Mittel gute Kompetenz und damit kein Hinderungsgrund anzunehmen. Abseits der digitalen Kompetenzen der Lehrenden können jedoch allgemeine Faktoren wie etwa unzureichende zeitliche Res-

sourcen oder Erwartungs- und Anforderungshaltungen der Schulgemeinschaft hier negative Auswirkungen auf das Gelingen der Implementation zeigen. Insbesondere die zeitlichen und teils technischen Ressourcen konnten auch in der vorliegenden Studie als mögliche Hinderungsgründe identifiziert werden. Weiterhin verweisen auch die *Stages of Concern* in Einzelfällen auf systemische Hinderungsfaktoren, exemplarisch sei hier auf *Stage* 0 – Bewusstsein verwiesen (z. B. Item 3 „Ich bin vollständig mit anderen Themen beschäftigt“ und Item 4 „Mich halten wichtigere Aufgaben davon ab, meine Aufmerksamkeit darauf zu lenken.“). In der quantitativen Betrachtung, ausgehend vom vorgestellten Gruppenprofil der *Stages of Concern* mit hoher Ausprägung in *Stage* 0, ist an dieser Stelle der Modellierung der Implementation folglich die erste ernsthafte Hürde zu sehen.

Ob ausreichende Fähigkeiten und Möglichkeiten zur Verfügung stehen, um eine anschließende systematische Auseinandersetzung mit der Innovation zu ermöglichen, kann nicht abschließend geklärt werden. Gerade die interviewten Lehrpersonen lassen jedoch qualitativ darauf schließen, dass eine Einschätzung des didaktischen Konzeptes als gewinnbringend zumindest innerhalb dieser Teilmenge der Versuchspersonen als gegeben anzusehen ist. Ergo wären die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Implementation *sensu* einer tiefgreifenden Umsetzung des die virtuellen Labore tragenden didaktischen Konzeptes auf Grundlage der in dieser Arbeit vorgestellten Befunde gegeben.

Vor dem Hintergrund der zweiten Forschungsfrage lässt sich nunmehr festhalten, dass die befragten Lehrpersonen die Form des abgeschlossenen Konzeptes der virtuellen Labore und deren Integration in das vorgestellte didaktische Konzept begrüßen. Gleichzeitig sehen Sie insbesondere durch Sequenzierungsmöglichkeiten und Feedbackoptionen sowie in der Sozialform der Sicherungsphase Optimierungspotenziale. Eine ausführliche, lehrplanorientierte Handreichung zum didaktischen Konzept stellt einen Wunsch und Arbeitsauftrag an den Entwickler dar. Gesprächsimpulse, Anregungen für Diskussionsfragen und zahlreiche Verweise auf einen fragend-entwickelnden Unterricht können als Wunsch nach stärkerer Orientierung des didaktischen Konzepts an der Lehrperson im Sinne eines lehrendenzentrierten Unterrichts aufgefasst werden. Insgesamt werden die Stärken des didaktischen Konzepts insbesondere in der variablen Nutzbarkeit, entweder zur Erarbeitung theoretischer Grundlagen oder auch zur Vertiefung und Wiederholung betont.

Hinsichtlich der zweiten Forschungsfrage kann aus den qualitativen Daten der Interviews auf einige Anforderungen an didaktische Konzepte geschlossen werden (Tabelle 29).

> FF 2: Welche Anforderungen müssen didaktische Konzepte aus Sicht der Lehrpersonen erfüllen, um die Implementation einer digitalen Innovation in Schulen zu fördern?

Tabelle 29: Anforderungen an didaktische Konzepte zur Implementation einer digitalen Innovation in Schulen aus Sicht der Lehrpersonen.

Anforderungen an didaktische Konzepte
Sequenzierbarkeit anbieten
Curricular verortete Handreichung ausarbeiten
Variable Nutzbarkeit/ Einsatzszenarien skizzieren
Kommunikationsanlässe bieten
Feedbackoptionen liefern
Diskussionsansätze darbieten
Kontrolle der Arbeitsprozesse der Lernenden sicherstellen
Unterrichtsgespräch mitgestalten
Zielgruppengerechte Sozialformen vorschlagen
Bedingte Lehrendenzentrierung anstreben
Adaptierbarkeit durch Lehrpersonen (Schwierigkeitsgrad / Kontext) ermöglichen
Zeitlichen Umfang an Zielgruppe adaptieren

Forschungsfrage 3: Genese lernförderlicher Zustände

Blended-Learning-Ansätze stellen einen Ansatz zur Vorentlastung und Effizienzsteigerung praxisorientierter Lernsettings in den Naturwissenschaften dar (z. B. Graulich, 2021; Groos et al., 2021; Karapanos et al., 2018; Neff et al., 2023). Bislang standen primär hochschulische Veranstaltungen im Fokus solcher Bemühungen, das Konzept erscheint jedoch auch auf die Schule adaptierbar. Gleichzeitig ist bekannt, dass das Lernen an außerschulischen Lernorten insbesondere im Bereich der affektiven Personenvariablen, etwa des Interesses, anders wirken kann als das Lernen im Setting Schule (Pawek, 2009; Schüttler et al., 2021; Schüttler, 2022). Hinsichtlich der Bedeutung des Lernortes liegen mit Blick auf das Konstrukt Interesse als eine affektive Variable teils uneinheitliche Befunde vor (Engl, 2020; Schüttler et al., 2021).

Im Fokus der vorliegenden Arbeit stand die Exploration der von den Lernenden in der Interaktion mit den virtuellen Laboren gezeigten Ausprägung der Konstrukte aktuelle Motivation, *Flow*-Erleben und *Cognitive Load* im Kontext der Vor- und Nachbereitung eines experimentellen Settings am außerschulischen Lernort im Freiland. Hierzu werden die bereits berichteten und diskutierten Ergebnisse in den Ablauf der Lerneinheit eingeordnet und datenbasierte Zusammenhänge herausgearbeitet.

Im Verlauf der Lerneinheit wird bei inferenzstatistisch nicht signifikant verschiedenen Ausprägungen des *Flow*-Erlebens zwischen dem ersten und dem zweiten Testzeitpunkt eine signifikante Abweichung des gemittelten *Flow*-Erlebens zum dritten Testzeitpunkt deutlich. Einen Erklärungsansatz hierfür kann der Neuheitseffekt darstellen. Während die Innovation den Lernenden in der Vorbereitungsphase noch unbekannt ist, sind ihnen die virtuellen Labore in der Nachbereitungsphase bereits vergleichsweise gut bekannt. In der Durchführung arbeiten die Lernenden nicht mit den virtuellen Laboren; die hier vorgefundene Ausprägung des *Flow*-Erlebens erfasst daher eine andere Lernsituation. Wenngleich auch in der Durchführung digitale Endgeräte genutzt werden, so liegt der Schwerpunkt hier dennoch auf der experimentellen Durchführung und ist separat zu betrachten. Der Neuheitseffekt wird von Hillmayr et al. (2017) sowie von Hillmayr et al. (2020) zwar mit primärem Fokus auf den Einstellungs- und Motivationsattributionen beschrieben, angesichts der prädiktiven Qualität des *Flow*-Erlebens für die Motivation (Rheinberg, 2000; Rheinberg et al., 2003) ist jedoch von einer hierauf ausweitbaren Bedeutung dieses Effektes auszugehen. Weiterhin lässt die im Verlauf der Lerneinheit bestehende starke positive Korrelation zwischen *Flow*-Erleben und Interessensfacette der aktuellen Motivation in Kombination mit den inferenzstatistisch sich analog zum *Flow*-Erleben entwickelnden Ausprägungen des Interesses einen möglichen Zusammenhang dieser beiden Konstrukte als Erklärungsansatz vermuten. Ein Einfluss der wahrgenommenen Herausforderung auf das *Flow*-Erleben erscheint anhand gegebener und im Verlauf der Lerneinheit zunehmender Zusammenhangsmaße denkbar. Ausgehend von diesen Erkenntnissen erscheint die gezielte Förderung von Interesse und wahrgenommener Herausforderung der Lernenden zur Optimierung des *Flow*-Erlebens während der Aufgabenbearbeitung als möglicher Ansatzpunkt. Gestützt wird dies durch die Definition des Interesses als tätigkeitsbezogene Motivation, die zum Gesamtkonstrukt Motivation beiträgt (Rheinberg, 2010) und damit auch in mehr oder minder direktem Zusammenhang zum motivationsprädiktiven *Flow*-Erleben steht.

Als ebenfalls erwartungskonform und bereits ohne tiefgreifende Operationalisierungen nachvollziehbar erscheint der positive Zusammenhang zwischen Besorgniskomponente des *Flows* und der Misserfolgsbefürchtung als Subskala des FAM. Dennoch deutet hier der inferenzstatistisch nicht-identische Verlauf der beiden Konstrukte über die Lerneinheit auf zwei im Detail unterschiedlich operationalisierte Skalen hin. Auch diese Erkenntnis leuchtet aufgrund der Dependenz des Motivations- vom *Flow*-Konstrukt ein.

Die FAM-Subskala Herausforderung zeigt in der Nachbereitung einen positiven korrelativen Zusammenhang mit dem *Germane Cognitive Load*. Dieser Zusammenhang konnte jedoch für den ersten Testzeitpunkt nicht und für den zweiten nur mit mäßiger Korrelation bestätigt werden und soll daher an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden. Der Rückgang der wahrgenommenen Herausforderung zeigt sich in Relation zu den erfassten Werten des *Intrinsic Cognitive Load* als unerwartet. Gerade bei einem inferenzstatistisch nicht signifikant veränderten *Intrinsic Load* und einer Einbindung experimenteller Aspekte in der Durchführung beziehungsweise mathematischer Aspekte in der Ausarbeitung wäre eine höhere Herausforderung im Verlauf der Lerneinheit erwartbar. Möglicherweise lag hier eine unzureichende Einschätzung des Vorwissens der Zielgruppe vor, sodass deren experimentelle und mathematisch-auswertungsbezogene Kompetenzen in der Konzeption der Lerneinheit unterschätzt wurden.

Anders stellt sich dies für den vorgefundenen Zusammenhang zwischen Interesse und Herausforderung sowie zwischen Interesse und *Germane Load* dar. Interesse und eine wahrgenommene Herausforderung im Sinne der leistungsthematischen Strukturierung einer Aufgabe stellen beide notwendige Bedingungen für motiviertes Verhalten einer Person dar. Weiterhin können die Faktoren Interesse und Herausforderung die Leistung vorhersagen (Rheinberg et al., 2021). Für tatsächliche Leistung wiederum bedarf es – der konstruktivistischen Lerntheorie folgend – einer aktiven Auseinandersetzung mit der Aufgabe, welche in Form des *Germane Load* messbar gemacht wird (Leppink et al., 2013). Ebenso ist aus theoretischer Sicht begründbar, dass die Erfolgsaussicht in der Durchführungs- und Auswertungsphase deutlich negativ mit dem *Intrinsic Cognitive Load* korreliert, da mit zunehmender thematischer Komplexität die leistungsthematische Strukturierung einer Aufgabe durch den Lernenden verändert und so seine Erfolgschancen als geringer eingeschätzt werden.

Als weitere Auffälligkeit tritt in der Korrelationsanalyse der über alle Testzeitpunkte hinweg nachweisbare starke positive Zusammenhang zwischen *Extraneous Load* und *Intrinsic Load* zu Tage. Wenngleich dieser Zusammenhang nicht theoriekonform ist, so ist er doch auch nicht gänzlich neu und bereits von den Autoren des in dieser Studie eingesetzten Testinstruments berichtet (Leppink et al., 2013, siehe auch Orru & Longo, 2019). Zukić et al. (2016) konnten für das Instrument nach Leppink et al. signifikante Korrelationen zwischen *Intrinsic* und *Extraneous Cognitive Load* nachweisen, welche die Autoren mit einer hohen Elementinteraktivität begründen. Cierniak et al. (2009) stießen ebenfalls auf dieses Phänomen. Sie verweisen auf möglicherweise zu ähnliche Itemformulierungen oder Limitationen der Introspektion der Befragten als mögliche Ursachen für eine hohe Korrelation zwischen den Subskalen für *Intrinsic* und *Extraneous Load* (Cierniak et al., 2009, siehe auch Brünken et al., 2010).

Mit Blick auf die dritte Forschungsfrage lässt sich feststellen, dass während der Vor- und Nachbereitung mit virtuellen Laboren ein akzeptables *Flow*-Erleben erzielt werden

konnte. Die Subskalen des FAM weisen auf zufriedenstellende Voraussetzungen für motiviertes Verhalten der Lernenden hin. Weiterhin zeigte sich ein gegenüber der Durchführung nicht signifikant verschiedener *Intrinsic Cognitive Load*. Darüber hinaus konnte ein in der absoluten Betrachtung geringer *Extraneous Cognitive Load*, welcher aufgrund der Erhebungssituation mit den virtuellen Laboren in Verbindung gebracht werden kann, nachgewiesen werden. Ebenso konnten deskriptiv hohe Werte für den *Germane Cognitive Load* erfasst werden. Diese weisen damit auf eine lernförderliche Genese dieses die Wissenskonstruktion widerspiegelnden Konstruktes hin.

> FF 3: Wie können virtuelle Labore bei Schüler:innen die Genese von aktueller Motivation, *Flow*-Erleben und *Cognitive Load* in der Vor- und Nachbereitung eines experimentellen Settings am außerschulischen Lernort im Freiland fördern?

Zur weiteren Optimierung der Lernumgebungen wäre aufgrund der vorstehend diskutierten Befunde eine stärkere Überprüfung der Voraussetzungen der Lerngruppe und eine gegebenenfalls erforderliche Anpassung der durch die Lernenden wahrgenommene Herausforderung zu überdenken. Hierdurch könnte, wie anhand der Zusammenhangsanalysen sowie der Theorie dargelegt, das *Flow*-Erleben und damit auch ein für die Motivationsattributionen relevanter Prädiktor gefördert werden.

6.6 Relevanz der Arbeit für das Forschungsfeld

Relevanz der Arbeit für das Forschungsfeld

- Adaption bestehender Testinstrumente
- Bereitstellung von Kenn- und Referenzwerten
- Ansatz für zielführende Kombination der *Stages of Concern* mit leitfadengestützten Interviews
- Strukturierter Einblick in die Herausforderungen während der Corona-Pandemielage
- *Benchmark*-Werte für *Blended-Learning*-Konzepte auf der Seite der Lernenden
- Konkrete Umsetzungsbeispiele für die kriteriengeleitete Erstellung digitaler Lernmaterialien
- Integration verschiedener potenziell lernförderlicher Gestaltungstheorien
- Validierte kriteriengeleitete Übersetzung der *Cognitive Load* Skala und der *System Usability Scale*.
- Deskriptive beziehungsweise qualitative Bestätigung postulierter Barrieren des Transfers digitaler Innovationen in die Schule.
- Formulierung von Kriterien für die Gestaltung didaktischer Konzepte als Transfervehikel zur Förderung der Implementation einer digitalen Innovation in Schulen.
- Darstellung der Genese affektiver und kognitiver Attributionen Lernender in der Bearbeitung eines *Blended-Learning*-Szenarios.

Die vorliegende Studie verfolgte keine streng experimentelle Anlage im Sinne einer Interventionsstudie im Kontrollgruppendesign. Ebenso wurde keine Erhebung des Fachwissens beziehungsweise der Kompetenzen der Lernenden vorgenommen. Ungeachtet dieser antizipierbaren Kritikpunkte leistet die Studie einen Beitrag zur Transferforschung im Kontext Digitalisierung. Dabei stehen die Exploration der konzipierten Lernumgebungen und deren Transfer in die Schule klar im Vordergrund.

Auf Seiten der Lehrenden wurden bestehende Testinstrumente adaptiert, für welche durch diese Studie entsprechende Kenn- und Referenzwerte vorliegen und so möglicherweise einen Beitrag zur Normierung künftiger Untersuchungen leisten können. Insbesondere die meist unzureichend operationalisierten Erhebungen der affektiven Variablen der Lehrenden in Bezug auf die Digitalisierung könnten durch die Bewusstmachung dieser Problematik und dargestellte Lösungsansätze zu einer verstärkten Berücksichtigung bei künftigen Erhebungen führen. Darüber hinaus können die ermittelten Daten insbesondere angesichts des vorstehend skizzierten Operationalisierungsproblems als aktuelle Referenzwerte für nachfolgende Studien dienen. Qualitative Rückmeldungen der Lehrpersonen im Rahmen der Interviews lassen in Kombination mit den erhobenen *Stages of Concern* auf konkrete Vorbehalte und kognitiv-affektive Auseinandersetzungen der Lehrenden mit einer digitalen Innovation schließen. Gerade aufgrund der Besonderheit, dass der Erhebungszeitraum Überschneidungen mit der Corona-Pandemielage aufweist, wurde auf diese Weise ein strukturierter Einblick in die Herausforderungen der Phase der Schulschließungen und des Online-Unterrichts dargeboten.

Bei den Lernenden in Interaktion mit den Lernumgebungen auftretende *Flow*- und Motivationsattributionen konnten ermittelt und eingeordnet werden. Die Studie liefert somit einen *Benchmark*-Wert für *Blended-Learning*-Konzepte in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung an außerschulischen Lernorten. Darüber hinaus werden konkrete Umsetzungsbeispiele für die kriteriengeleitete Erstellung digitaler Lernmaterialien dargelegt. Konzeptionell wurde die Integration verschiedener potenziell lernförderlicher Gestaltungstheorien exemplifiziert und deren Vereinbarkeit theoretisch begründet.

Aus forschungsmethodischer Perspektive liegt nun eine in Anlehnung an geltende Richtlinien der International Test Commission (2017) erfolgte Übersetzung und Adaption der *Cognitive Load* Skala nach Leppink et al. (2013) in die deutsche Sprache einschließlich entsprechender Itemkennwerte vor. Ebenso liegt eine Übersetzung ins Deutsche und Adaption an die Zieldomäne der *System Usability Scale* nach Brooke (1996) mit einschlägigen Kennwerten vor. Beide Übersetzungen wiesen dabei weitgehend zufriedenstellende Kenndaten auf (vgl. Tabelle 24 für eine ausführliche Darstellung der Kennwerte).

Durch die übergeordnete erste Forschungsfrage konnten postulierte Barrieren des Transfers einer digitalen Innovation in Schulen qualitativ beziehungsweise deskriptiv bestätigt werden. Explizite Kriterien, welche einen Transfer digitaler Innovationen in die Schule durch didaktische Konzepte als Transfervehikel fördern können, wurden im Rahmen der zweiten Forschungsfrage ausgearbeitet. Letztlich konnte unter der übergreifenden dritten Forschungsfrage die Genese affektiver und kognitiver Variablen Lernender in der Bearbeitung eines *Blended-Learning*-Szenarios dargestellt werden.

Darüber hinaus wurden Ansätze für eine Nutzung automatisiert generierter Nutzerdaten zur Analyse der durch die Lernenden beschrittenen Lernpfade dargestellt.

6.7 Relevanz der Arbeit für die Schulpraxis

Relevanz der Arbeit für die Schulpraxis

- Bereitstellung eines ausgearbeiteten, curricular verorteten und kompetenzorientierten fächerverbindenden didaktischen Konzeptes
- Bereitstellung von 12 ausgearbeiteten virtuellen Laboren zum Thema Gewässeranalytik
- Interaktive Simulationsexperimente zur Klärung der Vorgänge in Messelektroden auf Teilchenebene
- Stärkung schulpraxisnaher Forschung im Bereich Transfer digitaler Innovationen

Schulpraktische Relevanz der vorliegenden Arbeit ergibt sich primär durch die konzipierten Lernumgebungen und das begleitende didaktische Konzept. Wie im Verlauf der Arbeit ausführlich dargelegt, konnten das didaktische Konzept sowie die diesem zugrunde liegenden virtuellen Labore ausführlich an ausgewählten Schulen erprobt

werden. Auch nach Beendigung der Erhebungen wurde, unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den ersten Erhebungen, die Arbeit an den virtuellen Laboren fortgeführt. So entstanden inzwischen insgesamt 12 virtuelle Labore zur Gewässeranalytik.

Neben den bereits vorgestellten Laboren zu physikalisch-chemischen Parametern wurden die biologischen Parameter der Gewässergüte (Indikatororganismen und Saprobiensystem) im Rahmen unveröffentlichter Masterarbeiten ausgearbeitet. Darüber hinaus wurden virtuelle Labore für die Aspekte CO_2-Ausgasung aus Gewässern und sensorische Beurteilung eines Gewässers (Farbe, Trübung, Geruch, optische Merkmale) in Anlehnung an die Materialien der Vereinigung Deutscher Gewässerschutz e.V. (2011) erstellt. Ebenfalls umgesetzt beziehungsweise überarbeitet wurden zwei virtuelle Labore zu den Themen Gewässerstrukturgüte und *Tracer*-Injektion als Verfahren zur Bestimmung der mittleren Fließgeschwindigkeit und Simulation der Verteilung von (Schad-)stoffströmen in Wasserkörpern.

Außerdem wurden interaktive Simulationsexperimente für alle im Verlauf der Arbeit vorgestellte chemisch-physikalische Parameter entwickelt. Diese ermöglichen die Durchführung des Messvorgangs und stellen dabei die physikalischen und chemischen Vorgänge innerhalb der verwendeten Sensoren dar. Auf diese Weise können die virtuellen Labore einen Beitrag zur Auflösung des analytischen Sensoren immanenten *Blackbox*-Charakters leisten (vgl. Maxton-Küchenmeister & Meßinger-Koppelt, 2020; Neff et al., 2023). Durch die simultane Darbietung photorealistischer Ansichten der Sensoren, vereinfachter Schnittgrafiken und bewegter Animationen zur Darstellung der elektrochemischen Abläufe kann ein umfassendes Bild der Vorgänge innerhalb der jeweils eingesetzten Elektrode während des Messvorgangs gewonnen werden (Abbildung 116).

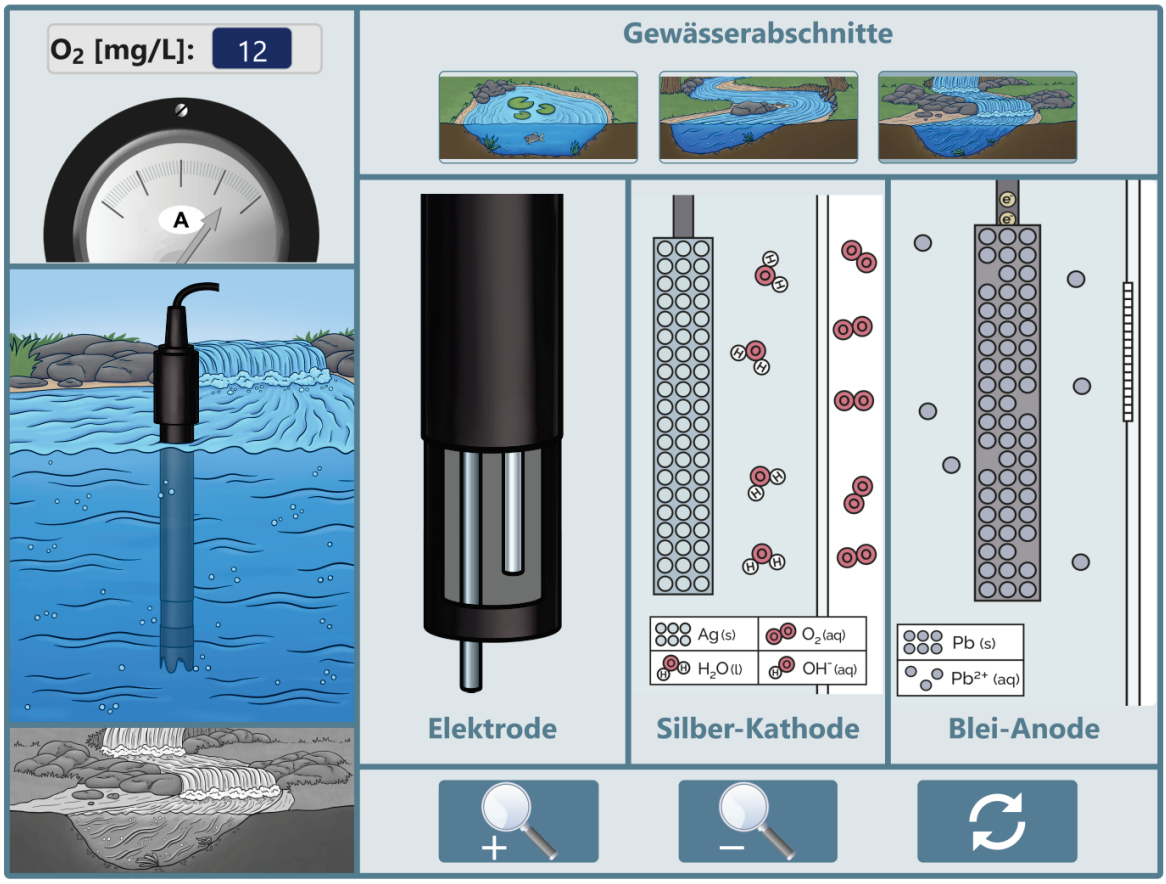


Abbildung 116: Einblick in die interaktiven Simulationen am Beispiel der Mackereth-Elektrode zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts (Screenshot, Projekt Open MINT Labs, zuerst veröffentlicht in Neff et al., 2023).

Das didaktische Konzept zur Gewässeranalytik bietet mit Abschluss der vorliegenden Arbeit eine umfassende curricular verortete und kompetenzorientierte Lerneinheit zur Gewässeranalytik mit zahlreichen fächerübergreifenden und fächerverbindenden Anknüpfungspunkten. Auch über die Erhebungen hinaus wurde das Konzept bereits mehrfach an Schulen durchgeführt und die virtuellen Labore durch Lehrpersonen weiter disseminiert. Nachfragen nach virtuellen Materialien oder der gesamten Durchführung der Lerneinheit analog zur Studie werden inzwischen auch von Schulen abseits der an der Studie beteiligten an den Ersteller der Konzeption herangetragen. Niederschwellige und kostenfreie Zugänglichkeit der Materialien ermöglichen auch weiterhin eine Verbreitung der erprobten und hinsichtlich affektiv-kognitiver Merkmale untersuchten digitalen Lernumgebungen.

Darüber hinaus erfolgte eine konstruktive Einbindung Lehrender sowohl in der Konzeptions- als auch in der Evaluationsphase. Ausgehend von den hier gewonnenen Erfahrungen ist die Nutzung symbiotischer Transferstrategien im Kontext Schule klar zu bevorzugen. Diese Erkenntnis ist nicht neu und kann vorliegend nur durch anekdotische Evidenz begründet werden. Dennoch ist damit ein klares Plädoyer für eine schulpraxisnahe Forschung im Kontext des Transfers digitaler Innovationen gegeben.

6.8 Fazit

Die vorliegende Arbeit verfolgte mehrere Ziele. Ausgehend von der in der Ausgangslage skizzierten Problemstellung galt es, den Transfer einer digitalen Innovation in die Schule zu untersuchen. Hierzu war unter anderem die Konzeption einer geeigneten digitalen Lernumgebung erforderlich.

Im Verlauf der Arbeit wurden, auf Basis eines postulierten Modells möglicher Transferbarrieren, theoretische Erkenntnisse hinsichtlich des Transfers (digitaler) Innovationen in die Schule sowie der Wirkung digitaler und multimedialer Lernmaterialien auf die Schüler:innen abgeleitet. Eine daran anknüpfende Erhebung möglicher Transferhindernisse auf der Seite der Lehrpersonen bot sowohl quantitative als auch qualitative Einblicke in mögliche personenbezogene und systemische Barrieren des Transfers. Simultan wurde die Wirkung der Lerneinheit auf die Ausprägung kognitiv-affektiver Variablen in der Gruppe der Lernenden erhoben. Im Fokus stand dabei die Durchführung als *Blended-Learning*-Szenario, welches sich durch die digitale rahmende Vor- und Nachbereitung eines Experimentiersettings im Freiland auszeichnet.

Anhand der explorativen Datenlage konnten die postulierten Barrieren des Transfers bestätigt werden. Weiterhin wurden Kriterien zur Förderung des Transfers digitaler Innovationen in die Schule durch didaktische Konzepte herausgearbeitet. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass die Lernenden in der Interaktion mit der gestalteten digitalen Lernumgebung weitgehend positive Ausprägungen kognitiver und affektiver Konstrukte zeigen und somit auch erste Hinweise auf eine potenzielle Lernförderlichkeit des didaktischen Konzeptes gegeben waren.

Ferner konnten erste Ansätze für ein prozessorientiertes formatives Assessment der durch die Lernenden beschrittenen Lernpfade dargestellt werden. Diese auf Log-Daten basierende Lernpfadanalyse bietet zahlreiche Anknüpfungspunkte, welche im Ausblick dieser Arbeit weiter konkretisiert werden.

Unter Berücksichtigung der diskutierten Limitationen der Studie konnte diese exemplarisch aufzeigen, dass ein zielgerichteter Transfer digitaler Innovationen in die Schule möglich und potenziell lernförderlich ist. Aktive Mitwirkung und Rückkopplung durch Lehrende wurden hierbei als geeignete Ansätze für eine mögliche nachhaltige Implementation wahrgenommen.

6.9 Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden Barrieren des Transfers identifiziert und Konzepte zur Überwindung dieser Hindernisse vorgestellt und evaluiert. Weiterhin wurden kognitive und affektive Bedingungsfaktoren einer potenziellen Lernförderlichkeit der konzipierten Lerneinheit praxisnah untersucht. Darauf aufbauend bedarf es weiterer Forschung.

Vorstellbar wäre eine Evaluation des Fachwissenszuwachses der Lernenden durch die Nutzung der virtuellen Labore. Auf diese Weise könnte die tatsächliche Lernförderlichkeit in Bezug auf das Fachwissen untersucht werden. Ebenfalls könnte der Einfluss der Vorbereitung mit virtuellen Laboren auf die Kompetenz des naturwissenschaftlichen Experimentierens evaluiert werden. Hierbei wäre auf eine klare Definition der zu untersuchenden Aspekte zu achten, da trotz der von Klos et al. (2008) nachgewiesenen Differenzierbarkeit von chemischem Fachwissen und naturwissenschaftlicher Experimentierkompetenz ein indirekter Einfluss des naturwissenschaftlichen Experiments auf den Wissenszuwachs, moderiert durch Aspekte der Variablenkontrollstrategie, nachgewiesen ist (Stender et al., 2017). Simultan hierzu ließen sich naturwissenschaftliche Arbeitsweisen (Henke, 2007) und Lernzeitnutzung (*Time on Task*; z. B. Siemon et al., 2016; Stallings, 1980) als für die Zielerreichung relevante Variablen erfassen.

Eine quasi-experimentelle Interventionsstudie bedürfte in diesem Zusammenhang jedoch zunächst einer Vorstudie zur Validierung der Instruktionsqualität eines möglicherweise vergleichbaren, analogen Lernproduktes. Ansätze zur Validierung einer identischen Qualität von Repräsentationsformen unterschiedlicher Medialität könnten hier beispielsweise die Vorarbeiten von Przywarra et al. (2021) und Przywarra und Risch (2022) bieten. Wenngleich diese Arbeiten Modelle in den Fokus stellen, geben sie einen aktuellen Ansatz für ein validierendes Vorgehen zur Prüfung einer Gleichwertigkeit analoger und digitaler Lernprodukte vor.

Eine weitere Untersuchung der Bedingungs- und Gelingensfaktoren auf der Seite der Lehrpersonen wie auch der Institutionen erscheint ebenfalls angezeigt. Die Kombination aus validiertem quantitativem Instrument (*Stages of Concern*) als messbarem Indikator für weiteren Informations- und Schulungsbedarf mit den qualitativen Rückmeldungen der Interviews erwiesen sich als brauchbare und äußerst reichhaltige Informationsquelle. Ein Ausbau dieser Kopplung in Kombination mit einer systematischen Evaluation des Transfers (Ansätze zur Anlage der Studie könnten hier große Transferprojekte bieten, z. B. Chemie im Kontext, SINUS-Transfer, Transfer 21, …) scheint naheliegend. Ein bedeutendes Kriterium einer über die explorative Ebene hinausgehenden Erhebung stellt dabei das Erfassen eines Gradmessers der tatsächlichen Implementation einer Innovation in Schulen dar. Als solcher empfiehlt sich die nach dem *Concerns-Based Adoption Model* vorgesehene Erhebung der *Levels of Use* sowie der *Innovation Configuration*. Letztere könnte anstatt der klassischen Darstellung einer Kartenskizze auch in der Interviewsituation erhoben und dadurch, etwa im Setting eines Lauten Denkens, noch weiter expliziert werden.

Darüber hinaus erscheint die Fortführung des in dieser Arbeit aufgezeigten Ansatzes einer auf Log-Daten basierenden Untersuchung der Lernpfade der Schüler:innen in den virtuellen Laboren vielversprechend. Neben einer Exploration der beschrittenen Lernpfade kann so ein Ansatz für individualisiertes Lernen geschaffen werden. Hierzu be-

darf es einer weiteren Optimierung des Prozesses der Datengewinnung und -auswertung. Insbesondere der Export der Log-Daten aus der in dieser Arbeit eingesetzten Lernumgebung OpenOLAT erfordert eine manuelle Abfrage. Sofern dieser Schritt, gegebenenfalls in Zusammenarbeit mit dem Betreiber der Lernplattform, automatisiert werden könnte, wäre eine *ad-hoc*-Abfrage denkbar. Die bestehenden Skripte zur Auswertung der Daten können durch die genutzte Open-Source-Software weiter automatisiert werden (z. B. aufbauend auf *R Shiny*). Damit wäre die Grundlage für eine niederschwellige Auswertung der Logfiles durch Lehrende oder Forschende gegeben. Daran anknüpfend ist der Ausbau der virtuellen Labore zu einer responsiven Lernumgebung vorstellbar. Den Lernenden könnten so auf Basis der von ihnen beschrittenen Lernpfade zusätzliche Hinweise, Informationen oder Hyperlinks inner- und außerhalb der virtuellen Labore zur Verfügung gestellt werden (vgl. Kalyuga & Sweller, 2005). Eine Individualisierung des Lernerlebnisses unter Berücksichtigung der persönlichen Bedarfe wäre somit denkbar. Ein antizipierbares Hindernis ergibt sich aus den Vorgaben hinsichtlich des Datenschutzes. Hier bedarf es zunächst einer Prüfung der Vorgaben für eine solche Entanonymisierung der Lernenden im virtuellen Raum.

Abseits der auf Personenebene beschriebenen Möglichkeit der Individualisierung ließe sich auch eine musterbasierte Adaption durch eine dynamische Lernumgebung konzipieren. Erste Ansätze hierzu wurden durch die Anwendung eines Algorithmus zur Identifikation wiederkehrender Muster in den Lernpfaden bereits erprobt. Im weiteren Verlauf der Datenauswertung werden dazu die erstellten Klickpfade als Zeitleistendiagramme nicht nur deskriptiv ausgewertet, sondern zur Mustererkennung herangezogen. Hierzu wurden mit Hilfe des SPADE-Algorithmus (Zaki, 2001) wiederkehrende Muster in den Kapitelaufrufen ermittelt (Neff et al., 2023). Entsprechend können häufig wiederkehrende Muster als Grundlage für eine Adaption der Lernumgebung dienen und somit multiple Lernpfade auf Grundlage der Navigation der Nutzenden in den virtuellen Laboren angeboten werden. Das Ziel einer solchen Arbeit läge in der Abkehr von starren, vordefinierten Lernumgebungen hin zu dynamischen Lernerlebnissen im digitalen Raum, welche persönliche Präferenzen und Lernertypen berücksichtigen und den Inklusionsgedanken mit abbilden können. Ähnliche methodische Ansätze werden in jüngster Zeit im DFG-geförderten Forschungsprojekt „ProSRL – Prozesse der Selbstregulation bei der Bearbeitung einer digitalen aufgabenbasierten Lernumgebung im Physikstudium“ der Technischen Universität München und der Justus-Liebig-Universität Gießen verfolgt (Vorholzer, 2022). Wenngleich inhaltliche Ausrichtung und eingesetzte Software-Tools deutlich von den vorstehend skizzierten Überlegungen abweichen, zeigt diese aktuelle Forschung die Relevanz der Thematik ebenso auf wie auch Möglichkeiten der Vernetzung in diesem Forschungsbereich.

7 Literaturverzeichnis

Addiscott, T. M. (2005). *Nitrate, agriculture, and the environment*. CABI Pub.

Agustian, H. Y. & Seery, M. K. (2017). Reasserting the role of pre-laboratory activities in chemistry education: a proposed framework for their design. *Chemistry Education Research and Practice*, *18*(4), 518–532.

Ainsworth, S. (2006). DeFT: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learning and Instruction*, *16*(3), 183–198.

Ajzen, I. (1985). From Intentions to Actions: A Theory of Planned Behavior. In J. Kuhl & J. Beckmann (Hrsg.), *Action Control* (S. 11–39). Springer Berlin Heidelberg.

Ajzen, I. (1987). Attitudes, Traits, and Actions: Dispositional Prediction of Behavior in Personality and Social Psychology. In *Advances in Experimental Social Psychology. Advances in Experimental Social Psychology Volume 20* (Bd. 20, S. 1–63). Elsevier.

Ajzen, I. (1991). The Theory of Planned Behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, *50*, 179–211.

Ajzen, I. (2011). *Attitudes, personality and behavior* (2. Aufl.). *Mapping social psychology*. Open Univ. Press.

Ajzen, I. (2020). The theory of planned behavior: Frequently asked questions. *Human Behavior and Emerging Technologies*, *2*(4), 314–324.

Alam, M. J. B., Islam, M. R., Muyen, Z., Mamun, M. & Islam, S. (2007). Water quality parameters along rivers. *International Journal of Environmental Science & Technology*, *4*(1), 159–167.

Allison, P. D. (2009). *Missing data*. *Sage university papers Quantitative applications in the social sciences: Bd. 136*. Sage Publ.

Almedeia, A., Loy, A. & Hofmann, H. (2023). *Quantile-Quantile Plot Extensions for 'ggplot2': [R package qqplotr version 0.0.6]*. https://cran.r-project.org/web/packages/qqplotr/index.html (Zugriff am 20. März 2023).

Anderson, S. E. (1997). Understanding Teacher Change: Revisiting The Concerns Based Adoption Model. *Curriculum Inquiry*, *27*(3), 331–367.

Astleitner, H. (2004). Multimedia Elements and Emotional Processes: Multimedia, Stories, and Emotion - An Integrated Model for Research and Design. *E-Journal of Instructional Science4 and Technology*, *7*(2).

Astleitner, H., Pasuchin, I. & Wiesner, C. (2006). Multimedia und Motivation - Modelle der Motivationspsychologie als Grundlage für die didaktische Mediengestaltung. *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung*, 1–19.

Atkins, P. W., Paula, J. de & Bär, M. (2013). *Physikalische Chemie* (5. [komplett überarb.] Aufl.). Wiley-VCH Verl.

Atkinson, J. W. (1957). Motivational Determinants of Risk-Taking Behavior. *Psychological Review*, *64*(6), 359–372.

Bach, E. (1980). Ein chemischer Index zur Überwachung der Wasserqualität von Fließgewässern. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, *24*(4), 102–106.

Bakeman, R. (2005). Recommended effect size statistics for repeated measures designs. *Behavior research methods*, *37*(3), 379–384.

Bandura, A. (1977). Self-efficacy: Toward a Unifying Theory of Behavioral Change. *Psychological Review*, *84*(2), 191–215.

Bandura, A. (1982). Self-Efficacy Mechanism in Human Agency. *American Psychologist*, *37*(2), 122–147.

Bangor, A., Kortum, P. T. & Miller, J. T. (2008). An Empirical Evaluation of the System Usability Scale. *International Journal of Human-Computer Interaction*, *24*(6), 574–594.

Bannert, M. (2002). Managing cognitive load—recent trends in cognitive load theory. *Learning and Instruction*, *12*(1), 139–146.

Barron, J. J. & Ashton, C. (2005). The effect of temperature on conductivity measurement. *TSP*, *7*(3), 1–5.

Bates, D., Chambers, J. & Dalgaard, P. *R* (Version 4.2.3) [Computer software]. R Foundation.

Bates, R. G. (1973). *Determination of pH: Theory and practice*. Wiley.

Bates, R. G. & Bower, V. E. (1956). Alkaline Solutions for pH Control. *Analytical Chemistry*, *28*(8), 1322–1324.

Bauberger, S. (2016). *Wissenschaftstheorie: Eine Einführung* (1. Aufl.). *Kohlhammer Kenntnis und Können: Band 20*. Verlag W. Kohlhammer.

Baumeister, F., König, A., Kunzmann, K., Riechert, F., Kretschmer, A., Schmid, R. D., Bachmann, T. T. & Metzger, J. W. (2001). *Ein mehrkanaliges Biosensormesssystem zur ‹berwachung der Nitrifikation in Abwasserreinigungsanlagen*. https://ub01.uni-tuebingen.de/xmlui/bitstream/handle/10900/48207/pdf/113.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Baur, W. H. & Rapp, J. (2003). *Gesunde Fische: Praktische Anleitung zum Vorbeugen, Erkennen und Behandeln von Fischkrankheiten : mit 82 Abbildungen, davon 19 farbig, und 45 Tabellen* (2., neubearbeitete Auflage). Parey.

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit. (2013). *Wasserland Bayern: Nachhaltige Wasserwirtschaft in Bayern.*

Becker, S., Meßinger-Koppelt, J. & Thyssen, C. (Hg.). (2020). *Digitale Basiskompetenzen: Orientierungshilfe und Praxisbeispiele für die universitäre Lehramtsausbildung in den Naturwissenschaften.*

Behmke, D. A. & Atwood, C. H. (2013). Implementation and assessment of Cognitive Load Theory (CLT) based questions in an electronic homework and testing system. *Chemistry Education Research and Practice*, *14*(3), 247–256.

Behr, D. (2017). Assessing the use of back translation: the shortcomings of back translation as a quality testing method. *International Journal of Social Research Methodology*, *20*(6), 573–584.

Bensberg, F. (2001). Warenkorbanalyse im Online-Handel. In H. U. Buhl, A. Huther & B. Reitwiesner (Hrsg.), *Information Age Economy* (S. 103–116). Physica-Verlag HD.

Berger, M., Knemeyer, J.-P. & Marmé, N. (2020). Auswirkungen virtueller physikalischer Experimente auf das Flow-Erleben. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen: Jahrestagung zur Jahrestagung 2018 der GDCP* (S. 78–81). Universität Duisburg-Essen.

Bernholt, S. & Parchmann, I. (2020). Unterrichtsforschung unter fachlichen Perspektiven. In T. Hascher, T.-S. Idel & W. Helsper (Hrsg.), *Springer eBook Collection. Handbuch Schulforschung* (S. 1–24). Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint Springer VS.

Bétrancourt, M. & Tversky, B. (2000). Effect of computer animation on users' performance: A review. *Le travail humain*, *63*(4), 311–329.

Beyer, G. (2016). *Wohin mit den Rückständen der Kaliproduktion?* https://www.deutschlandfunkkultur.de/das-laestige-salz-der-erde-wohin-mit-den-rueckstaenden-der.976.de.html?dram:article_id=357060 (Zugriff am 27. April 2021).

BG BAU - GISBAU. (o. J.). *Biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen (BSB5)*. https://www.bgbau.de/themen/sicherheit-und-gesundheit/gefahrstoffe/sicherheitsdatenblatt/biochemischer-sauerstoffbedarf-nach-5-tagen-bsb5/ (Zugriff am 19. Januar 2023).

Binder, W., Patt, H., Kiel, E., Pottgiesser, T., Sommerhäuser, M., Koenzen, U. & Kurth, A. (2016). Natürliche Fließgewässer, Typologie der Fließgewässer. In H. Patt (Hrsg.), *Fließgewässer- und Auenentwicklung* (S. 5–76). Springer Berlin Heidelberg.

Binnewies, M., Finze, M., Jäckel, M., Schmidt, P., Willner, H. & Rayner-Canham, G. (2016). *Allgemeine und anorganische Chemie* (3. Aufl.). *Lehrbuch*. Springer Spektrum.

Bitan-Friedlander, N., Dreyfus, A. & Milgrom, Z. (2004). Types of “teachers in training”: the reactions of primary school science teachers when confronted with the task of implementing an innovation. *Teaching and Teacher Education*, *20*(6), 607–619.

Blanca, M. J., Alarcón, R., Arnau, J., Bono, R. & Bendayan, R. (2017). Non-normal data: Is ANOVA still a valid option? *Psicothema*, *29*(4), 552–557.

Blankenburg, J. & Scheersoi, A. (2018). Interesse und Interessensentwicklung. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 245–259). Springer Berlin Heidelberg.

Blumenfeld, P., Fishman, B. J., Krajcik, J., Marx, R. W. & Soloway, E. (2000). Creating Usable Innovations in Systemic Reform: Scaling Up Technology-Embedded Project-Based Science in Urban Schools. *Educational Psychologist*, *35*(3), 149–164.

Bogner, A., Littig, B. & Menz, W. (Hg.). (2002). *Das Experteninterview*. VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Bong, M. & Clark, R. E. (1999). Comparison between self-concept and self-efficacy in academic motivation research. *Educational Psychologist*, *34*(3), 139–153.

Bong, M. & Skaalvik, E. M. (2003). Academic Self-Concept and Self-Efficacy: How Different Are They Really? *Educational Psychology Review*, *15*(1), 1–40.

Bortz, J. & Döring, N. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation: In den Sozial- und Humanwissenschaften* (5. Aufl.). Springer-Verlag.

Bortz, J. & Lienert, G. A. (2008). *Kurzgefasste Statistik für die klinische Forschung: Leitfaden für die verteilungsfreie Analyse kleiner Stichproben ; mit 13 Abblidungen und 97 Tabellen sowie zahlreichen Formeln* (3. Aufl.). *Springer-Lehrbuch Bachelor, Master*. Springer.

Bower, V. E. & Bates, R. G. (1955). pH Values of the Clark and Lubs buffer solutions at 25°C. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, *55*(4), 197–200.

Braem, S. & Egner, T. (2018). Getting a grip on cognitive flexibility. *Current directions in psychological science*, *27*(6), 470–476.

Brandt, A. (2005). *Förderung von Motivation und Interesse durch außerschulische Experimentierlabors*. Zugl.: Bielefeld, Univ., Diss., 2005 (1. Aufl.). Cuvillier.

Brennan, R. L. & Prediger, D. J. (1981). Coefficient kappa: Some uses, misuses, and alternatives. *Educational and psychological measurement*, *41*(3), 687–699.

Breuer, J. (2021). *Implementierung fachdidaktischer Innovationen durch das Angebot materialgestützter Unterrichtskonzeptionen* [Dissertation, Universität Paderborn; Logos-Verlag, Paderborn]. GBV Gemeinsamer Bibliotheksverbund.

Breuer, J., Vogelsang, C. & Reinhold, P. (2022). Nutzungsverhalten von Lehrkräften bei der Implementierung einer physikdidaktisch innovativen Unterrichtskonzeption. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, *28*(1).

Broman, K. & Parchmann, I. (2014). Students' application of chemical concepts when solving chemistry problems in different contexts. *Chemistry Education Research and Practice*, *15*(4), 516–529.

Brooke, J. (1996). SUS - A quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry*, *189*(194), 4–7.

Brooke, J. (2013). SUS: A Retrospective. *Journal of Usability Studies*, *8*(2), 29–40.

Brown, T. L., LeMay, H. E. & Bursten, B. E. (2011). *Chemie: Studieren kompakt* (10. Aufl.). *always learning*. Pearson Higher Education.

Brünken, R., Seufert, T. & Paas, F. (2010). Measuring Cognitive Load. In J. L. Plass, R. Moreno & R. Brünken (Hrsg.), *Cognitive Load Theory* (S. 181–202). Cambridge University Press.

Bryer, j. & Speerschneider, K. (12. März 2023). *Analysis and Visualization Likert Items: [R Package likert version 1.3.5]*. Comprehensive R Archive Network (CRAN). https://cran.r-project.org/web/packages/likert/index.html (Zugriff am 13. März 2023).

Buck, R. P., Rondinini, S., Covington, A. K., Baucke, F. G. K., Brett, C. M. A., Camoes, M. F., Milton, M. J. T., Mussini, T., Naumann, R., Pratt, K. W., Spitzer, P. & Wilson, G. S. (2002). Measurement of pH. Definition, Standards, and Procedures: IUPAC Recommendations 2002. *Pure and Applied Chemistry*, *74*(11), 2169–2200.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser. (2013). *LAWA-Arbeitsprogramm Flussgebietsbewirtschaftung 2013 Produktdatenblatt 2.1.6: Überprüfung und Aktualisierung der Bestandsaufnahme nach EG-Wasserrahmenrichtlinie bis zum 22. Dezember 2013*. https://www.wasserblick.net/servlet/is/142651/WRRL_2.1.6_%20Arbeitshilfe_Bestandsaufnahme_GW.pdf?command=downloadContent&filename=WRRL_2.1.6_%20Arbeitshilfe_Bestandsaufnahme_GW.pdf

Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (2016; i.d.F.v. 20.06.2016).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2017). *Zustand der Oberflächengewässer*. https://www.bmu.de/themen/wasser-abfall-boden/binnengewaesser/fluesse-und-seen/zustand-der-oberflaechengewaesser/ (Zugriff am 29. April 2021).

Bund-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung. (2004). *Bericht der Projektgruppe "Innovationen im Bildungswesen" zum BLK-Modellversuchsprogramm "Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts - SINUS"*. BLK.

Calmano, W., Hong, J. & Förstner, U. (1992). Einfluß von pH-Wert und Redoxpotential auf die Bindung und Mobilisierung von Schwermetallen in kontaminierten Sedimenten. *Vom Wasser*, *78*, 245–257.

Canter, D., Rivers, R. & Storrs, G. (1985). Characterizing user navigation through complex data structures. *Behaviour & Information Technology*, *4*(2), 93–102.

Caspers, H. & Karbe, L. (1967). Vorschläge für eine saprobiologische Typisierung der Gewässer. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, *52*(2), 145–162.

Cavas, P. (2011). Factors affecting the motivation of Turkish primary students for science learning. *Science education international*, *22*(1), 31–42.

Celik, V. & Yesilyurt, E. (2013). Attitudes to technology, perceived computer self-efficacy and computer anxiety as predictors of computer supported education. *Computers & Education*, *60*(1), 148–158.

Chandler, P. & Sweller, J. (1991). Cognitive Load Theory and the Format of Instruction. *Cognition and Instruction*, *8*(4), 293–332.

Chandler, P. & Sweller, J. (1996). Cognitive Load While Learning to Use a Computer Program. *Applied Cognitive Psychology*, *10*(2), 151–170.

Chang, T. W., Yu, W. S., Liu, Y. H., Wu, C. L. & Lee, P. C. (1997). Decreasing electrical conductivity of irrigation water by dilution. *Journal of Environmental Science and Health. Part A: Environmental Science and Engineering and Toxicology*, *32*(6), 1861–1872.

Cheung, D., Hattie, J. & Ng, D. (2001). Reexamining the Stages of Concern Questionnaire: A Test of Alternative Models. *The Journal of Educational Research*, *94*(4), 226–236.

Chieu, V. M. (2005). *Constructivist Learning: An Operational Approach for Designing Adaptive Learning Environments Supporting Cognitive Flexibility* [Dissertation]. Université catholique de Louvain, Louvain.

Chieu, V. M. (2006, Juli). COFALE: An Authoring System for Supporting Cognitive Flexibility. In *Sixth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT'06)* (S. 335–339). IEEE.

Chieu, V. M. (2007a). COFALE: an authoring system for creating Web-based adaptive learning environments supporting cognitive flexibility. *Journal of Computers*, *2*(5), 26–37.

Chieu, V. M. (2007b). An Operational Approach for Building Learning Environments Supporting Cognitive Flexibility. *Journal of Educational Technology & Society*, *10*(3), 32–46.

Christou, C., Eliophotou-Menon, M. & Philippou, G. (2004). Teachers' Concerns regarding the Adoption of a New Mathematics Curriculum: An Application of CBAM. *Educational Studies in Mathematics*, *57*(2), 157–176.

Ciampa, K. (2014). Learning in a mobile age: an investigation of student motivation. *Journal of Computer Assisted Learning*, *30*(1), 82–96.

Cierniak, G., Scheiter, K. & Gerjets, P. (2009). Explaining the split-attention effect: Is the reduction of extraneous cognitive load accompanied by an increase in germane cognitive load? *Computers in Human Behavior*, *25*(2), 315–324.

Clark, R. C. & Mayer, R. E. (2008). *E-learning and the science of instruction: Proven guidelines for consumers and designers of multimedia learning* (2nd ed.). Wiley.

Clark, R. C. & Mayer, R. E. (2011). *E-learning and the science of instruction: Proven guidelines for consumers and designers of multimedia learning* (3. Aufl.). *Essential resources for training and HR professionals*. Pfeiffer.

Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and psychological measurement*, *20*(1), 37–46.

Cohen, J. (1962). The statistical power of abnormal-social psychological research: a review. *Journal of abnormal and social psychology*, *65*, 145–153.

Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Routledge.

Cohen, J. (2013). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). Taylor and Francis.

Conway, P. F. & Clark, C. M. (2003). The journey inward and outward: a re-examination of Fuller's concerns-based model of teacher development. *Teaching and Teacher Education*, *19*(5), 465–482.

Cooper, G. & Sweller, J. (1987). Effects of schema acquisition and rule automation on mathematical problem-solving transfer. *Journal of educational Psychology*, *79*(4), 347–362.

Cronbach, L. J. (1951). Coefficient Alpha and the Internal Structure of Tests. *Psychometrika*, *16*(3), 297–334.

Crowe, S. F. (1998). The differential contribution of mental tracking, cognitive flexibility, visual search, and motor speed to performance on parts A and B of the trail making test. *Journal of Clinical Psychology*, *54*(5), 585–591.

Csikszentmihalyi, M. (1997). *Finding flow: The psychology of engagement with everyday life* (1. Aufl.). *MasterMinds series*. Basic Books.

Csikszentmihalyi, M. (2008). *Flow: The Psychology of Optimal Experience*. Harper Collins.

Csikszentmihalyi, M. (2014). *Applications of Flow in Human Development and Education*. Springer Netherlands.

Czaban, J. D. (1985). Electrochemical Sensors in Clinical Chemistry: Yesterday, Today, Tomorrow. *Analytical Chemistry*, *57*(2), 345–356.

Danecker, E. (1964). Die Jauchevergiftung von Fischen - eine Ammoniakvergiftung. *Österreichs Fischerei*(3), 55–68.

Darabi, A., Hemphill, J., Nelson, D. W., Boulware, W. & Liang, X. (2010). Mental model progression in learning the electron transport chain: effects of instructional strategies and cognitive flexibility. *Advances in health sciences education : theory and practice*, *15*(4), 479–489.

Deák, G. O. & Wiseheart, M. (2015). Cognitive flexibility in young children: General or task-specific capacity? *Journal of experimental child psychology*, *138*, 31–53.

Deci, E. L. & Ryan, R. M. (1993). Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation und ihre Bedeutung für die Pädagogik. *Zeitschrift für Pädagogik*, *39*(2), 223–238.

Dennis, J. P. & Vander Wal, J. S. (2010). The Cognitive Flexibility Inventory: Instrument Development and Estimates of Reliability and Validity. *Cognitive Therapy and Research*, *34*(3), 241–253.

Deutsches Institut für Normung (2016-01). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte (ISO/DIS 9241-11:2015)*. (ISO, DIN EN ISO 9241-11 2016).

Dickhäuser, O. (2001). *Computernutzung und Geschlecht: Ein Erwartung-Wert-Modell*. Zugl.: Gießen, Univ., Diss., 2001 u.d.T.: Dickhäuser, Oliver: Nutzung von Computern. *Pädagogische Psychologie und Entwicklungspsychologie: Bd. 26*. Waxmann.

Dori, Y. J. & Barnea, N. (März 1994). *In-Service Chemistry Teachers Traning: The Impact of Introducing Computer Technology on Teacher's Attitudes.* Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching. National Association for Research in Science Teaching, Anaheim, CA.

Döring, N. & Bortz, J. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften* (5. Aufl.). *Springer-Lehrbuch*. Springer.

Drechsler, R. (2007). Exekutive Funktionen. *Zeitschrift für Neuropsychologie*, *18*(3), 233–248.

Dresing, T. & Pehl, T. (2017). *Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse: Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende* (7. Auflage). Eigenverlag.

Dretske, F. I. (2003). *Knowledge and the flow of information*. *David Hume series*. CSLI Publications.

Driscoll, M. P. (2014). *Psychology of Learning for Instruction*. *Pearson Always Learning*. Pearson Education Limited.

Drossel, K., Eickelmann, B., Schaumburg, H. & Labusch, A. (2019). Nutzung digitaler Medien und Prädiktoren aus der Perspektive der Lehrerinnen und Lehrer im internationalen Vergleich. In B. Eickelmann, W. Bos, J. Gerick, F. Goldhammer, H. Schaumburg, K. Schwippert, M. Senkbeil & J. Vahrenhold (Hrsg.), *ICILS 2018 #Deutschland.: Computer- und informationsbezogene Kompetenzen von Schülerinnen und Schülern im zweiten internationalen Vergleich und Kompetenzen im Bereich Computational Thinking* (S. 205–240). Waxmann.

Eccles, J. S. (1984). Sex differences in mathematics participation. *Advances in motivation and achievement*, *2*, 93–137.

Eccles, J. S. (1987). Gender Roles and Women's Achievement-Related Decisions. *Psychology of Women Quarterly*, *11*, 135–172.

Eccles, J. S. (1994). Understanding Women's Educational and Occupational Choices. *Psychology of Women Quarterly*, *18*, 585–609.

Eccles, J. S., Adler, T. F., Futterman, R., Goff, S. B., Kaczala, C. M., Meece, J. L. & Midgley, C. (1983). Expectancies, values, and academic behaviors. In J. T. Spence (Hrsg.), *(A Series of books in psychology). Achievement and achievement motives: Psychological and sociological approaches* (S. 75–146). W.H. Freeman.

Eccles, J. S., Adler, T. F., Futterman, R., Goff, S. B., Kaczala, C. M., Meece, J. L. & Midgley, C. (1985). Self-Perceptions, Task Perceptions, Socializing Influences, and the Decision to Enroll in Mathematics. In S. F. Chipman, L. R. Brush & D. M. Wilson (Hrsg.), *Women and mathematics: Balancing the equation* (S. 95–122). Erlbaum.

Eccles, J. S. & Wigfield, A. (2020). From expectancy-value theory to situated expectancy-value theory: A developmental, social cognitive, and sociocultural perspective on motivation. *Contemporary educational psychology*, *61*, 101859.

Eckert, P., Graulich, N. & Lengnink, K. (2021). Blended Learning und E-Learning in Schule und Hochschule. In D. Graf, N. Graulich, K. Lengnink, H. Martinez & C. Schreiber (Hrsg.), *Edition Fachdidaktiken. Digitale Bildung für Lehramtsstudierende* (S. 37–39). Springer Fachmedien Wiesbaden.

Eckstein, P. P. (2016). *Angewandte Statistik mit SPSS: Praktische Einführung für Wirtschaftswissenschaftler* (8. Aufl.). *SpringerLink Bücher*. Springer Gabler.

Eder, A. (2008). Digitale Medienverwendung an berufsbildenden Schulen–Ergebnisse einer empirischen Studie. *Berufs-und Wirtschaftspädagogik*, *Spezial 4*, 1–18.

Eickelmann, B. (2011). Supportive and hindering factors to a sustainable implementation of ICT in schools. *Journal for educational research online*, *3*(1), 75–103.

Eickelmann, B., Bos, W., Gerick, J., Goldhammer, F., Schaumburg, H., Schwippert, K., Senkbeil, M. & Vahrenhold, J. (Hg.). (2019). *ICILS 2018 #Deutschland.: Computer- und informationsbezogene Kompetenzen von Schülerinnen und Schülern im zweiten internationalen Vergleich und Kompetenzen im Bereich Computational Thinking*. Waxmann.

Eickelmann, B., Gerick, J., Labusch, A. & Vennemann, M. (2019). Schulische Voraussetzungen als Lern- und Lehrbedingungen in den ICILS-2018-Teilnehmerländern. In B. Eickelmann, W. Bos, J. Gerick, F. Goldhammer, H. Schaumburg, K. Schwippert, M. Senkbeil & J. Vahrenhold (Hrsg.), *ICILS 2018 #Deutschland.: Computer- und informationsbezogene Kompetenzen von Schülerinnen und Schülern im zweiten internationalen Vergleich und Kompetenzen im Bereich Computational Thinking* (S. 137–171). Waxmann.

Eickelmann, B., Schaumburg, H., Drossel, K. & Lorenz, R. (2014). Schulische Nutzung von neuen Technologien in Deutschland im internationalen Vergleich. In W. Bos, B. Eickelmann, J. Gerick, H. Schaumburg, M. Senkbeil & H. Wendt (Hrsg.), *ICILS 2013: Computer- und informationsbezogene Kompetenzen von Schülerinnen und Schülern in der 8. Jahrgangsstufe im internationalen Vergleich* (S. 197–229). Waxmann.

Eid, M., Gollwitzer, M. & Schmitt, M. (2017). *Statistik und Forschungsmethoden: Mit Online-Materialien* (5., korrigierte Auflage). Beltz.

Eilks, I. & Markic, S. (2011). Effects of a Long-Term Participatory Action Research Project on Science Teachers' Professional Development. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, *7*(3).

Eilks, I. & Ralle, B. (2002). Partizipative Fachdidaktische Aktionsforschung. Ein Modell für eine begründete und praxisnahe curriculare Entwicklungsforschung in der Chemiedidaktik. *CHEMKON*, *9*(1), 13–18.

Endberg, M. & Lorenz, R. (2017). Selbsteinschätzung medienbezogener Kompetenzen von Lehrpersonen der Sekundarstufe I im Bundesländervergleich und im Trend von 2016 bis 2017. In R. Lorenz, W. Bos, M. Endberg, B. Eickelmann, S. Grafe & J. Vahrenhold (Hrsg.), *Schule digital - der Länderindikator 2017: Schulische Medienbildung in der Sekundarstufe I mit besonderem Fokus auf MINT-Fächer im Bundesländervergleich und Trends von 2015 bis 2017* (S. 151–177). Waxmann.

Endberg, M. & Lorenz, R. (2022). Selbsteingeschätzte Kompetenzen von Lehrpersonen der Sekundarstufe I zum Einsatz digitaler Medien im Unterricht im Bundesländervergleich 2021 und im Trend seit 2017. In R. Lorenz, S. Yotyodying, B. Eickelmann & M. Endberg (Hrsg.), *Schule digital – der Länderindikator 2021. Lehren und Lernen mit digitalen Medien in der Sekundarstufe I in Deutschland im Bundesländervergleich und im Trend seit 2017* (S. 89–116). Waxmann Verlag GmbH.

Enders, C. K. (2010). *Applied missing data analysis*. *Methodology in the social sciences*. Guilford Press.

Engeser, S. & Rheinberg, F. (2008). Flow, performance and moderators of challenge-skill balance. *Motivation and Emotion*, *32*(3), 158–172.

Engeser, S., Rheinberg, F., Vollmeyer, R. & Bischoff, J. (2005). Motivation, Flow-Erleben und Lernleistung in universitären Lernsettings. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, *19*(3), 159–172.

Engeser, S. & Schiepe-Tiska, A. (2012). Historical Lines and an Overview of Current Research on Flow. In S. Engeser (Hrsg.), *Advances in Flow Research* (S. 1–22). Springer New York.

Engl, A. (2020). *Chemie pur - Unterrichten in der Natur* [Dissertation, Universität Koblenz-Landau; Logos-Verlag, Landau]. GBV Gemeinsamer Bibliotheksverbund.

Euler, D. (2004). *Förderung des Transfers in Modellversuchen*. Institut für Wirtschaftspädagogik der Universität St. Gallen.

Euler, D. (2005). Transfer von Modellversuchsergebnissen in die Berufsbildungspraxis: Ansprüche, Probleme, Lösungsansätze. *Zeitschrift für Berufs- und Wirtschaftspädagogik*, *101*(1), 43–57.

Euler, D. & Sloane, P. F. (1998). Implementation als Problem der Modellversuchsforschung. *Unterrichtswissenschaft*, *26*(4), 312–326.

Richtlinie 2000/60/EG (2000; i.d.F.v. 22.12.2000).

Eutsler, L. & Long, C. S. (2021). Preservice Teachers Acceptance of Virtual Reality to Plan Science Instruction. *Educational Technology & Society*, *24*(2), 28–43.

Evans, L. & Chauvin, S. (1993). Faculty Developers as Change Facilitators: The Concerns-Based Adoption Model. *To Improve The Academy*, *278*(12), 165–178.

Fechner, S. (2009). *Effects of context-oriented learning on student interest and achievement in chemistry education*. *Studien zum Physik- und Chemielernen: Bd. 95*. Logos.

Feltovich, P. J., Spiro, R. J. & Coulson, R. L. (1997). Issues of Expert Flexibility in Contexts Characterized by Complexity and Change. In P. J. Feltovich, K. M. Ford & R. R. Hoffman (Hrsg.), *Expertise in context: Human and machine* (S. 125–146). AAAI/ MIT Press.

Field, A., Miles, J. & Field, Z. (2013). *Discovering statistics using R* (Reprint). Sage.

Fischer, C. (Hg.). (2017). *Münstersche Gespräche zur Pädagogik: Band 33*. *Pädagogischer Mehrwert? Digitale Medien in Schule und Unterricht*. Waxmann.

Fischer, C., McCoy, A., Foster, B., Eisenkraft, A. & Lawrenz, F. (2019). Use of the stages of concern questionnaire in a national top-down reform effort. *Teaching and Teacher Education*, *80*, 13–26.

Fishbein, M. & Ajzen, I. (1975). *Belief, attitude, intention and behavior: An introduction to theory and research*. *Addison-Wesley series in social psychology*. Addison-Wesley.

Forio, M. A. E., Landuyt, D., Bennetsen, E., Lock, K., Nguyen, T. H. T., Ambarita, M. N. D., Musonge, P. L. S., Boets, P., Everaert, G., Dominguez-Granda, L. & Goethals, P. L. (2015). Bayesian belief network models to analyse and predict ecological water quality in rivers. *Ecological Modelling*, *312*, 222–238.

Fourier Systems Ltd. (2021a). *Ammonium Sealed Electrode Sensor Bundle: Product Number: ENAMN020A*. http://einsteinworld.com/ew/wp-content/uploads/Ammonium-Sealed-Electrode-ENAMN020A-2.pdf

Fourier Systems Ltd. (2021b). *Chloride Sealed Electrode Sensor Bundle: Product Number: ENCHL-A018A*. http://einsteinworld.com/ew/wp-content/uploads/Chloride-Sealed-Electrode-ENCHL-A018A-.pdf

Fourier Systems Ltd. (2021c). *Conductivity Sensor*. http://einsteinworld.com/ew/wp-content/uploads/Conductivity-Sensor-ENCND-A035A-1.pdf

Fourier Systems Ltd. (2021d). *Dissolved Oxygen Sensor with Temperature Compensation: Product Number: ENOXT422A*. http://einsteinworld.com/ew/wp-content/uploads/Dissolved-Oxygen-Sensor-ENOXT422A.pdf

Fourier Systems Ltd. (2021e). *einstein pH Sensor*. https://einsteinworld.com/product/ph/

Fourier Systems Ltd. (2021f). *Flow Rate Sensor: Product Number: ENFLO-A254A*. http://einsteinworld.com/ew/wp-content/uploads/Flow-Rate-ENFLO-A254A.pdf

Fourier Systems Ltd. (2021g). *Nitrate Sealed Electrode Sensor Bundle: Product Number: ENNTR-A017A*. http://einsteinworld.com/ew/wp-content/uploads/Nitrate-ENNTR-AO17A-2.pdf

Frölich, R. (2012). *Binnendifferenzierung*. https://studienseminar.rlp.de/fileadmin/user_upload/studienseminar.rlp.de/gy-kl/latein/Handout_Binnendifferenzierung.pdf

Fullan, M. (2004). *Leadership & Sustainability: System Thinkers in Action*. SAGE Publications.

Fuller, F. F. (1969). Concerns of Teachers: A Developmental Conceptualization. *American Educational Research Association*, *6*(2), 207–226.

Fußangel, K., Schellenbach-Zell, J. & Gräsel, C. (2008). Die Verbreitung von Chemie im Kontext: Entwicklung der symbiotischen Implementationsstrategie. In R. Demuth, C. Gräsel, I. Parchmann & B. Ralle (Hrsg.), *Chemie im Kontext: Von der Innovation zur nachhaltigen Verbreitung eines Unterrichtskonzepts* (S. 49–82). Waxmann.

Geisser, S. & Greenhouse, S. W. (1958). An Extension of Box's Results of the Use of the F-Distribution in Multivariate Analysis. *The Annals of Mathmatical Statistics*, *29*(3), 885–891.

Genz, F. & Bresges, A. (2017). Projektbeispiele für Design-Based Research im naturwissenschaftlichen Unterricht. Weiterentwicklung des Reichshofer Experimentierdesigns mit Tablets in Schulen. In J. Bastian & S. Aufenanger (Hrsg.), *Tablets in Schule und Unterricht* (S. 63–86). Springer Fachmedien Wiesbaden.

George, A. A., Hall, G. E. & Stiegelbauer, S. M. (2013). *Measuring implementation in schools: The Stages of Concern Questionnaire*. Southwest Educational Development Laboratory.

Gerick, J., Schaumburg, H., Kahnert, J. & Eickelmann, B. (2014). Lehr- und Lernbedingungen des Erwerbs computer- und informationsbezogener Kompetenzen in den ICILS-2013-Teilnehmerländern. In W. Bos, B. Eickelmann, J. Gerick, H. Schaumburg, M. Senkbeil & H. Wendt (Hrsg.), *ICILS 2013: Computer- und informationsbezogene Kompetenzen von Schülerinnen und Schülern*

in der 8. Jahrgangsstufe im internationalen Vergleich (S. 147–196). Waxmann.

Gerjets, P., Scheiter, K. & Catrambone, R. (2004). Designing Instructional Examples to Reduce Intrinsic Cognitive Load: Molar versus Modular Presentation of Solution Procedures. *Instructional Science*, *32*, 33–58.

Gerjets, P., Scheiter, K. & Catrambone, R. (2006). Can learning from molar and modular worked examples be enhanced by providing instructional explanations and prompting self-explanations? *Learning and Instruction*, *16*(2), 104–121.

Gerthofer, L. & Schneider, J. (2021). Fallkonstellationen zum Einsatz digitaler Medien im Unterricht. *MedienPädagogik*, 281–315.

GEW. (Juni 2020). *Digitalpakt Schule und Digitalisierung an Schulen: Ergebnisse einer GEW-Mitgliederbefragung 2020*. durchgeführt von Mauss Research im Auftrag der Gewerkschaft Erziehung und Wissenschaft (GEW). Frankfurt am Main. Gewerkschaft für Erziehung und Wissenschaft, Hauptvorstand.

Ghomi, M., Dictus, C., Pinkwart, N. & Tiemann, R. (2020). DigCompEduMINT: Digitale Kompetenz von MINT-Lehrkräften. *Kölner Online Journal für Lehrer*innenbildung*, *1*, 1–22 (1-22 Seiten / k:ON - Kölner Online Journal für Lehrer*innenbildung, Bd. 1 Nr. 1 (2020): Wege zur digitalen Kompetenz im Spannungsfeld von Politik und Realität / k:ON - Kölner Online Journal für Lehrer*innenbildung, Bd. 1 Nr. 1 (2020): Wege zur digitalen Kompetenz im Spannungsfeld von Politik und Realität).

Ghomi, M. & Redecker, C. (2019). Digital Competence of Educators (DigCompEdu): Development and Evaluation of a Self-assessment Instrument for Teachers' Digital Competence. In H. Lane, S. Zvacek & J. Uhomoibhi (Hrsg.), *CSEDU 2019: Proceedings of the 11th International Conference on Computer Supported Education : Heraklion, Crete, Greece, May 2-4, 2019* (S. 541–548). SCITEPRESS - Science and Technology Publications Lda.

Girden, E. R. (2003). *ANOVA: Repeated measures*. *Sage university papers Quantitative applications in the social sciences: Bd. 84*. Sage Publ.

Glowinski, I. (2007). *Schülerlabore im Themenbereich Molekularbiologie als Interesse fordernde Lernumgebungen* [Dissertation]. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel.

Godin, G., Valois, P. & Lepage, L. (1993). The Pattern of Influence of Perceived Behavioral Control upon Exercising Behavior: An Application of Ajzen's Theory of Planned Behavior. *Journal of Behavioral Medicine*, *16*(1), 81–102.

Goldenbaum, A. (2012). *Innovationsmanagement in Schulen*. VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Gräsel, C. (2010). Stichwort: Transfer und Transferforschung im Bildungsbereich. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, *13*(1), 7–20.

Gräsel, C., Fußangel, K. & Pröbstel, C. (2006). Lehrkräfte zur Kooperation anregen - eine Aufgabe für Sisyphos? *Zeitschrift für Pädagogik*, *52*(2), 205–219.

Gräsel, C., Jäger, M. & Willke, H. (2006). Konzeption einer übergreifenden Transferforschung und Einbeziehung des internationalen Forschungsstandes: Expertise II zum Transferforschungsprogramm. In R. Nickolaus & C. Gräsel (Hrsg.), *Innovation und Transfer: Expertisen zur Transferforschung* (S. 445–566). Schneider-Verl. Hohengehren.

Gräsel, C. & Parchmann, I. (2004). Implementationsforschung - oder: der steinige Weg, Unterricht zu verändern. *Unterrichtswissenschaft*, *32*(3), 196–214.

Graulich, N. (2021). Blended Learning als Methode zur Unterstützung der fachdidaktischen Laborpraktika. In D. Graf, N. Graulich, K. Lengnink, H. Martinez & C. Schreiber (Hrsg.), *Edition Fachdidaktiken. Digitale Bildung für Lehramtsstudierende* (S. 41–46). Springer Fachmedien Wiesbaden.

Gregoire, M. (2003). Is it a challenge or a threat? A dual-process model of teachers' cognition and appraisal processes during conceptual change. *Educational Psychology Review*, *15*(2), 147–179.

Grolemund, G. & Wickham, H. (2011). Dates and Times Made Easy with lubridate. *Journal of Statistical Software*, *40*(3).

Groos, L., Maass, K. & Graulich, N. (2021). Mimicking Students' Behavior during a Titration Experiment: Designing a Digital Student-Centered Experimental Environment. *Journal of Chemical Education*, *98*(6), 1919–1927.

Großmann, N. & Wilde, M. (2021). Unterstützung der intrinsischen Motivation und des Flow-Erlebens von Schülerinnen und Schülern im Biologieunterricht durch die Implementation von autonomieförderlichem Lehrerverhalten. In R. Lazarides & D. Raufelder (Hrsg.), *Edition ZfE. Motivation in unterrichtlichen fachbezogenen Lehr-Lernkontexten* (Bd. 10, S. 81–111). Springer Fachmedien Wiesbaden.

Gründler, P. (2007). *Chemical sensors: An introduction for scientists and engineers ; with 25 tables*. Springer.

Guderian, P. (2006). *Wirksamkeitsanalyse außerschulischer Lernorte: Der Einfluss mehrmaliger Besuche eines Schülerlabors auf die Entwicklung des Interesses an Physik* [Dissertation]. Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin.

Gunderson, J. A. (2003). *Csiksentmihalyi's state of flow and effective teaching* [Dissertation, Claremont Graduate University, Claremont, CA]. EndNote Tagged Import Format.

Häder, M. & Häder, S. (2013). Die Delphi-Methode als Gegenstand methodischer Forschungen. In M. Häder & S. Häder (Hrsg.), *ZUMA-Publikationen. Die Delphi-Technik in den Sozialwissenschaften: Methodische Forschungen und innovative Anwendungen* (S. 11–32). VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Hall, G. E. (1974). *The Concerns-Based Adoption Model: A Developmental Conceptualization of the Adoption Process Within Educational Institutions: Paper*

presented at the Annual Meeting of the American Educational Research Association. American Educational Research Association. American Educational Research Association, Chicago, Illinois. https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED111791.pdf

Hall, G. E. (1979). The concerns-based approach for facilitating change. *Research on Teaching*, *57*(4), 202–208.

Hall, G. E. & George, A. A. (24. April 2000). *The Use of Innovation Configuration Maps in Assessing Implementation: The Bridge between Development and Student Outcomes.* American Educational Research Association. American Educational Research Association, New Orleans.

Hall, G. E., George, A. A. & Rutherford, W. L. (1977). *Measuring Stages of Concern About the Innovation: A Manual for Use of the SoC Questionnaire*. University of Texas. https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED147342.pdf

Hall, G. E. & Hord, S. M. (1987). *Change in schools: Facilitating the process*. *SUNY series in educational leadership*. State University of New York Press.

Hall, G. E. & Hord, S. M. (2006). *Implementing Change. Patterns, principles, and potholes* (2. Aufl.). Pearson/ Allyn & Bacon.

Hall, G. E. & Hord, S. M. (2020). *Implementing change: Patterns, principles, and potholes*. *The Pearson educational leadership series*. Pearson Education, Inc.

Hall, G. E. & Loucks, S. F. (1978a). *Innovation Configurations: Analyzing the Adaptations of Innovations.*

Hall, G. E. & Loucks, S. F. (1978b). Teacher Concerns as a Basis for Facilitating and Personalizing Staff Development. *Teachers college record*, *80*(1), 36–53.

Hall, G. E. & Loucks, S. F. (13. April 1981). *The Concept of Innovation Configurations: An Apporach to Addressing Program Adaptation.: Research on Concerns-Based Adoption.* American Educational Research Association. American Educational Research Association, Los Angeles, Calif.

Hall, G. E., Loucks, S. F., Rutherford, W. L. & Newlove, B. W. (1975). Levels of Use of the Innovation: A Framework for Analyzing Innovation Adoption. *Journal of Teacher Education*, *26*(1), 52–56.

Hall, G. E., Newlove, B. W., George, A. A., Rutherford, W. L. & Hord, S. M. (1991). *Measuring Change Facilitator Stages of Concern*. Center for Research on Training and Learning, S. 1–98.

Hall, G. E., Wallace, R. C., Jr. & Dossett, W. F. (1973). *A Developmental Conceptualization of the Adoption Process within Educational Institutions*. Austin, TX.

Hambleton, R. K. & Zenisky, A. L. (2010). Translating and Adapting Tests for Cross-Cultural Assessments. In D. Matsumoto & F. J. R. van de Vijver (Hrsg.), *Cross-Cultural Research Methods in Psychology* (S. 46–70). Cambridge University Press.

Hanna Instruments Deutschland GmbH. (2021). *HI713 Checker HC ® - Phosphat, niedrig für Süßwasser*. https://hannainst.de/10-hi713-checker-hc-phosphat-niedrig-fuer-suesswasser.html (Zugriff am 19. Januar 2023).

Hashemi Monfared, S. A., Dehghani Darmian, M., Snyder, S. A., Azizyan, G., Pirzadeh, B. & Azhdary Moghaddam, M. (2017). Water Quality Planning in Rivers: Assimilative Capacity and Dilution Flow. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, *99*(5), 531–541.

Hattie, J. (2009). *Visible learning: A synthesis of over 800 meta-analyses relating to achievement* (Reprinted.). Routledge.

Havelock, R. G. (1973). *The change agent's guide to innovation in education* (2. print). Educational Technology Publ.

Heckhausen, H. (1977). Achievement motivation and its constructs: A cognitive model. *Motivation and Emotion*, *1*(4), 283–329.

Heckhausen, J. & Heckhausen, H. (2010). Motivation und Entwicklung. In J. Heckhausen & H. Heckhausen (Hrsg.), *Springer-Lehrbuch. Motivation und Handeln* (4. Aufl., S. 427–488). Springer.

Hede, A. (2002). An Integrated Model of Multimedia Effects on Learning. *Journal of Educational Multimedia and Hypermedia*, *11*(2), 177–191.

Henke, C. (2007). *Experimentell-naturwissenschaftliche Arbeitsweisen in der Oberstufe: Untersuchung am Beispiel des HIGHSEA-Projekts in Bremerhaven*. Zugl.: Duisburg, Essen, Univ., Diss., 2006. *Studien zum Physik- und Chemielernen: Bd. 59*. Logos-Verl.

Hennen, W. (2021). Arbeit an Schnittstellen für den Transfer aus schulischen Forschungs- und Entwicklungsprojekten in das Regelsystem. Ein Praxisbericht aus dem Projekt Ganz In. *DDS – Die Deutsche Schule*, *2021*(1), 63–73.

Herzig, B. & Grafe, S. (2007). *Digitale Medien in der Schule - Standortbestimmung und Handlungsempfehlungen für die Zukunft: Studie zur Nutzung Digitaler Medien in Allgemein Bildendenden Schulen in Deutschland*. Deutsche Telekom AG.

Hesse, K.-J. (1999). Die Bewertung der Gewässerstruktur - ein neues Instrument im Gewasserschutz. In T. Zumbroich, A. Müller & G. Friedrich (Hrsg.), *Strukturgüte von Fließgewässern* (S. 9–20). Springer Berlin Heidelberg.

Hessel, S. (2008). *Die Bedeutung von Usability und cognitive load auf die Informationssuche beim multimedialen Lernen* [Dissertation]. Universität Erfurt, Erfurt.

Hillmayr, D., Reinhold, F., Ziernwald, L. & Reiss, K. (2017). *Digitale Medien im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht der Sekundarstufe. Einsatzmöglichkeiten, Umsetzung und Wirksamkeit*. Waxmann.

Hillmayr, D., Ziernwald, L., Reinhold, F., Hofer, S. & Reiss, K. (2020). The potential of digital tools to enhance mathematics and science learning in secondary schools: A context-specific meta-analysis. *Computers & Education*, *153*.

Hofer, S., Holzberger, D., Heine, J.-H., Reinhold, F., Schiepe-Tiska, A., Weis, M. & Reiss, K. (2019). Schulische Lerngelegenheiten zur Sprach- und Leseförderung im Kontext der Digitalisierung. In K. Reiss, M. Weis, E. Klieme & O. Köller (Hrsg.), *PISA 2018* (S. 111–128). Waxmann Verlag GmbH.

Hollingshead, B. (2009). The Concerns-Based Adoption Model: A Framework for Examining Implementation of a Character Education Program. *NASSP Bulletin*, *93*(3), 166–183.

Holstermann, N. & Bögeholz, S. (2007). Interesse von Jungen und Mädchen an naturwissenschaftlichen Themen am Ende der Sekundarstufe I. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, *13*, 71-86.

Holtappels, H. G. (2019). Transfer in der Schulentwicklung. Ansätze und Gelingensbedingungen aus der Perspektive von Schulentwicklungstheorie und -forschung. *Die deutsche Schule*, *111*(3), 274–293.

Hord, S. M. & Loucks, S. F. (1980). *A Concerns-Based Model for the Delivery of Inservice.*

Hord, S. M., Rutherford, W. L., Juling-Austin, L. & Hall, G. E. (1987). *Taking Charge of Change*. Association for Supervision and Curriculum Development.

Horney, M. A. (1993). Case studies of navigational patterns in constructive hypertext. *Computers & Education*, *20*(3), 257–270.

Huber, S. (2022). Schule in der Digitalität gestalten. *schule verantworten | führungskultur_innovation_autonomie*(1), 14–30.

Hütter, L. (1994). *Wasser und Wasseruntersuchung: Methodik, Theorie und Praxis chemischer, chemisch-physikalischer, biologischer und bakteriologischer Untersuchungsverfahren* (6. Aufl.). *Laborbücher Chemie*. Salle.

Huynh, H. & Feldt, L. S. (1976). Estimation of the Box Correction for Degrees of Freedom from Sample Data in Randomized Block and Split-Plot Designs. *Journal of Educational Statistics*, *1*(1), 69–82.

International Test Commission. (2017). *The ITC Guidelines for Translating and Adapting Tests (Second Edition)*. www.InTestCom.org

Ionescu, T. (2012). Exploring the nature of cognitive flexibility. *New Ideas in Psychology*, *30*(2), 190–200.

Itzek-Greulich, H. (2014). *Einbindung des Lernorts Schülerlabor in den naturwissenschaftlichen Unterricht: Empirische Untersuchung zu kognitiven und motivationalen Wirkungen eines naturwissenschaftlichen Lehr-Lernarrangements* [Dissertation]. Eberhard Karls Universität Tübingen, Tübingen.

Jacobson, M. J. & Spiro, R. J. (1993). *Hypertext Learning Environments, Gognitive Flexibility, and the Transfer of Complex Knowledge: An Empirical Investigation* [Technical Report]. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana-Champaign, Illinois.

Jäger, M. (2004). *Transfer in Schulentwicklungsprojekten*. VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Janata, J. (2009). *Principles of chemical sensors* (2. ed.). Springer.

Jeno, L. M., Grytnes, J.-A. & Vandvik, V. (2017). The effect of a mobile-application tool on biology students' motivation and achievement in species identification: A Self-Determination Theory perspective. *Computers & Education*, *107*, 1–12.

Johnco, C., Wuthrich, V. M. & Rapee, R. M. (2014). Reliability and Validity of two Self-Report Measures of Cognitive Flexibility. *Psychological assessment*, *26*(4), 1381–1401.

Jonassen, D. H. (1997). Instructional Design Models for Well-Structured and Ill-Structured Problem-Solving Learning Outcomes. *Educational technology research and development*, *45*(1), 65–94.

Jong, T. de (2010). Cognitive load theory, educational research, and instructional design: some food for thought. *Instructional Science*, *38*(2), 105–134.

Joost, G. (5. Juni 2021). Bloß nicht mehr zurück in die Normalität! *Zeit Online*. https://www.zeit.de/digital/internet/2021-07/digitalisierung-schulen-unterricht-bildungssystem-finanzierung-digitale-infrastruktur-homeschooling/komplettansicht

Junge, T. (2021). Der Einsatz digitaler Medien an der Grundschule. Eindrücke aus dem Projekt dileg-SL aus der Perspektive von Lehrkräften. *Ludwigsburger Beiträge zur Medienpädagogik*, *21*, 1–20.

Kalyuga, S. (2009). *Managing cognitive load in adaptive multimedia learning*. *Premier reference source*. Information Science Reference.

Kalyuga, S. (2011). Cognitive Load Theory: How Many Types of Load Does It Really Need? *Educational Psychology Review*, *23*(1), 1–19.

Kalyuga, S., Ayres, P., Chandler, P. & Sweller, J. (2003). The expertise reversal effect. *Educational Psychologist*, *38*(1), 23–31.

Kalyuga, S., Chandler, P. & Sweller, J. (1998). Levels of Expertise and Instructional Design. *Human Factors*, *40*(1), 1–17.

Kalyuga, S., Chandler, P. & Sweller, J. (1999). Managing split-attention and redundancy in multimedia instruction. *Applied Cognitive Psychology*, *13*(4), 351–371.

Kalyuga, S. & Sweller, J. (2004). Measuring Knowledge to Optimize Cognitive Load Factors During Instruction. *Journal of educational Psychology*, *96*(3), 558–568.

Kalyuga, S. & Sweller, J. (2005). Rapid dynamic assessment of expertise to improve the efficiency of adaptive e-learning. *Educational Technology Research and Development*, *53*(3), 83–93.

Karagiannis, I. C. & Soldatos, P. G. (2008). Water desalination cost literature: review and assessment. *Desalination*, *223*, 448–456.

Karapanos, M., Becker, C. & Christophel, E. (2018). Die Bedeutung der Usability für das Lernen mit digitalen Medien. *MedienPädagogik*, 36–57.

Kassambara, A. (2022). *Visualization of a Correlation Matrix using 'ggplot2': [R package ggcorrplot version 0.1.4]*. https://cran.r-project.org/web/packages/ggcorrplot/index.html (Zugriff am 29. März 2023).

Kassambara, A. (2023a). *'ggplot2' Based Publication Ready Plots: [R package ggpubr version 0.6.0]*. https://cran.r-project.org/web/packages/ggpubr/index.html (Zugriff am 29. März 2023).

Kassambara, A. (2023b). *Pipe-Friendly Framework for Basic Statistical Tests: [R package rstatix version 0.7.2]*. https://cran.r-project.org/web/packages/rstatix/index.html (Zugriff am 29. März 2023).

Kelava, A. & Moosbrugger, H. (2011). Deskriptivstatistische Evaluation von Items (Itemanalyse) und Testwertverteilungen. In H. Moosbrugger & A. Kelava (Hrsg.), *Springer-Lehrbuch. Testtheorie und Fragebogenkonstruktion* (2. Aufl., S. 75–102). Springer Berlin Heidelberg.

Keller, J. M. (2010). *Motivational Design for Learning and Performance*. Springer US.

Kelly, M. P. & Staver, J. R. (2005). A case study of one school system's adoption and implementation of an elementary science program. *Journal of Research in Science Teaching*, *42*(1), 25–52.

Kemper, C. J., Ziegler, M., Krumm, S., Heene, M. & Bühner, M. (2015). Testkonstruktion. In G. Stemmler & J. Margraf-Stiksrud (Hrsg.), *Psychologie-Lehrbuch. Lehrbuch psychologische Diagnostik* (1. Aufl., S. 157–221). Verlag Hans Huber.

Klepsch, M., Schmitz, F. & Seufert, T. (2017). Development and Validation of Two Instruments Measuring Intrinsic, Extraneous, and Germane Cognitive Load. *Frontiers in psychology*, *8*(1997).

Klos, S., Henke, C., Kieren, C., Walpuski, M. & Sumfleth, E. (2008). Naturwissenschaftliches Experimentieren und chemisches Fachwissen - zwei verschiedene Kompetenzen. *Zeitschrift für Pädagogik*, *54*(3), 304–321.

Knobeloch, L., Salna, B., Hogan, A., Postle, J. & Anderson, H. (2000). Blue Babies and Nitrate-Contaminated Well Water. *Environmental Health Perspectives*, *108*(7), 675–678.

Koehler, M. J. & Mishra, P. (2009). What Is Technological Pedagogical Content Knowledge? *Contemporary Issues in Technology and Teacher Education*, *9*(1), 60–70.

Köller, O., Gogolin, I., Hastedt, D. & Klinger, T. (28. Februar 2022). *Mehr Lehrkräftefortbildung zu Digitalkompetenzen – auf Kosten anderer wichtiger Fortbildungsbereiche*. Kiel. IPN Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik, Universität Hamburg, IEA. https://www.ipn.uni-kiel.de/de/das-ipn/archiv/kwik_ergebnisse_fortbildungen.pdf

Kommer, S. & Biermann, R. (2012). Der mediale Habitus von (angehenden) LehrerInnen. Medienbezogene Dispositionen und Medienhandeln von Lehramtsstudierenden. In R. Schulz-Zander, B. Eickelmann, H. Moser, H. Niesyto & P. Grell (Hrsg.), *Jahrbuch Medienpädagogik 9* (S. 81–108). VS Verlag für Sozialwissenschaften.

König, J., Jäger-Biela, D. J. & Glutsch, N. (2020). Adapting to online teaching during COVID-19 school closure: teacher education and teacher competence effects among early career teachers in Germany. *European Journal of Teacher Education*, *43*(4), 608–622.

Kortte, K. B., Horner, M. D. & Windham, W. K. (2002). The Trail Making Test, Part B: Cognitive Flexibility or Ability to Maintain Set? *Applied Neuropsychology*, *9*(2), 106–109.

Koumi, J. (2015). Learning outcomes afforded by self-assessed, segmented video–print combinations. *Cogent Education*, *2*(1), 1045218.

Kraft, M. A. (2020). Interpreting Effect Sizes of Education Interventions. *Educational Researcher*, *49*(4), 241–253.

Krapp, A. (1992). Interesse, Lernen und Leistung. Neue Forschungsansätze in der Pädagogischen Psychologie. *Zeitschrift für Pädagogik*, *38* (Zeitschrift für Pädagogik 38 (1992) 5, S. 747-770).

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, M. & Eilks, I. (2015). Lernen über digitale Medien in der Chemielehrerausbildung. *CHEMKON*, *22*(4), 173–178.

Krause, M. & Eilks, I. (2018). Using Action Research to Innovate Teacher Education Concerning the Use of Modern ICT in Chemistry Classes. *Action Research and Innovation in Science Education*, *2*(1), 15–21.

Krause, M., Pietzner, V., Dori, Y. J. & Eilks, I. (2017). Differences and Developments in Attitudes and Self-Efficacy of Prospective Chemistry Teachers Concerning the Use of ICT in Education. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, *13*(8).

Krause, M., Pietzner, V. & Eilks, I. (2014). Einstellungen und Selbstkonzept von angehenden Lehrkräften zur Nutzung von digitalen MEdien im Chemieunterricht. In S. Bernholt (Hrsg.), *Heterogenität und Diversität - Vielfalt der Voraussetzungen im naturwissenschaftlichen Unterricht: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Bremen 2014 ; [Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 35* (S. 681–683).

Krems, J. F. (1996). Expertise und Flexibilität. In H. Gruber & A. Ziegler (Hrsg.), *Expertiseforschung: Theoretische und methodische Grundlagen* (S. 80–91). Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Krems, J. F. (2014). Cognitive Flexibility and Complex Problem Solving. In P. A. Frensch (Hrsg.), *Complex problem solving: The European perspective* (S. 207–225). Psychology Press.

Kreysa, G., Ota, K. & Savinell, R. F. (2014). *Encyclopedia of Applied Electrochemistry*. Springer New York.

Kuckartz, U. (2022). *Qualitative Inhaltsanalyse.: Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. Beltz Juventa.

Kultusministerkonferenz. (2005). *Bildungsstandards im Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss: Beschluss vom 16.12.2004*. Luchterhand. https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Chemie.pdf

Kultusministerkonferenz. (2012). *Medienbildung in der Schule.*

Kultusministerkonferenz. (2013). *Operatoren für die naturwissenschaftlichen Fächer (Physik, Biologie, Chemie) an den Deutschen Schulen im Ausland (Stand Februar 2013)*. https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/Bildung/Auslandsschulwesen/Kerncurriculum/Auslandsschulwesen-Operatoren-Naturwissenschaften-02-2013.pdf (Zugriff am 27. April 2021).

Kultusministerkonferenz. (2017). *Bildung in der digitalen Welt: Strategie der Kultusministerkonferenz*. Sekretariat der Kultusministerkonferenz.

Kultusministerkonferenz. (2020). *Bildungsstandards im Fach Chemie für die Allgemeine Hochschulreife*. Wolter Kluwer. https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Chemie.pdf

Kurth, C., Walpert, D. & Wodzinski, R. (2019). Digitale Messwerterfassung im Kontext digitaler Bildung. *PhyDidB - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, *1*, 297–302.

Leiß, J. (2018). Leichte Sprache und Einfache Sprache als Differenzierungsinstrumente im inklusiven Literaturunterricht der Sekundarstufe. In M. Dziak-Mahler, T. Hennemann, S. Jaster, T. Leidig & J. Springob (Hrsg.), *LehrerInnenbildung gestalten: Bd. 10. Fachdidaktik inklusiv II: (Fach-)Unterricht inklusiv gestalten – Theoretische Annäherungen und praktische Umsetzungen* (1. Aufl., S. 145–162). Waxmann.

Lenhard, W. & Lenhard, A. (2016). *Computation of Effect Sizes.* Psychometrica. https://www.psychometrica.de/effektstaerke.html https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17823.92329

Leppink, J., Paas, F., van der Vleuten, C. P. M., van Gog, T. & van Merriënboer, J. J. G. (2013). Development of an instrument for measuring different types of cognitive load. *Behavior research methods*, *45*(4), 1058–1072.

Levine, T. R. & Hullett, C. R. (2002). Eta Squared, Partial Eta Squared, and Misreporting of Effect Size in Communication Research. *Human Communication Research*, *28*(4), 612–625.

Lewis, J. R. & Sauro, J. (2009). The Factor Structure of the System Usability Scale. In M. Kurosu (Hrsg.), *Lecture Notes in Computer Science Ser: v.5619. Human Centered Design: First International Conference, HCD 2009, Held As Part of HCI International 2009, San Diego, CA, USA, July 19-24, 2009 Proceedings.* Springer Berlin / Heidelberg.

Likhachev, D. S. & Li, F.-C. (2013). Large-scale water desalination methods: a review and new perspectives. *Desalination and Water Treatment*, *51*(13-15), 2836–2849.

Linnenweber, C. (2005). *Hydrologischer Atlas Rheinland-Pfalz: Gewässerstrukturgüte*. Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht RLP. Mainz. https://lfu.rlp.de/fileadmin/lfu/Wasserwirtschaft/Hydrologischer_Atlas/05_gewaesserstrukturguete.pdf

Little, R. J. A. & Rubin, D. B. (1987). *Statistical analysis with missing data* (4. Aufl.). *Wiley series in probability and mathematical statistics Applied probability and statistics*. Wiley.

Liu, O. L., Bridgeman, B. & Adler, R. M. (2012). Measuring Learning Outcomes in Higher Education. *Educational Researcher*, *41*(9), 352–362.

Lorenz, R. & Bos, W. (2017). Theoretisches Rahmenmodell, Überblick über die Befunde des Länderindikators 2017 und Einordnung zentraler Ergebnisse der Erhebungszyklen 2015, 2016 und 2017. In R. Lorenz, W. Bos, M. Endberg, B. Eickelmann, S. Grafe & J. Vahrenhold (Hrsg.), *Schule digital - der Länderindikator 2017: Schulische Medienbildung in der Sekundarstufe I mit besonderem Fokus auf MINT-Fächer im Bundesländervergleich und Trends von 2015 bis 2017* (S. 11–35). Waxmann.

Lorenz, R., Bos, W., Endberg, M., Eickelmann, B., Grafe, S. & Vahrenhold, J. (Hg.). (2017). *Schule digital - der Länderindikator 2017: Schulische Medienbildung in der Sekundarstufe I mit besonderem Fokus auf MINT-Fächer im Bundesländervergleich und Trends von 2015 bis 2017*. Waxmann.

Lorenz, R. & Eickelmann, B. (2022). Nutzung digitaler Medien im Unterricht der Sekundarstufe I und Nutzungsbedingungen im Trendvergleich von 2017 und 2021. In R. Lorenz, S. Yotyodying, B. Eickelmann & M. Endberg (Hrsg.), *Schule digital – der Länderindikator 2021. Lehren und Lernen mit digitalen Medien in der Sekundarstufe I in Deutschland im Bundesländervergleich und im Trend seit 2017* (S. 63–88). Waxmann Verlag GmbH.

Lorenz, R., Eickelmann, B., Endberg, M. & Yotyodying, S. (2022). Theoretisches Rahmenmodell und Überblick über zentrale Ergebnisse. In R. Lorenz, S. Yotyodying, B. Eickelmann & M. Endberg (Hrsg.), *Schule digital – der Länderindikator 2021. Lehren und Lernen mit digitalen Medien in der Sekundarstufe I in Deutschland im Bundesländervergleich und im Trend seit 2017* (S. 11–22). Waxmann Verlag GmbH.

Lorenz, R., Endberg, M. & Eickelmann, B. (2017). Unterrichtliche Nutzung digitaler Medien durch Lehrpersonen in der Sekundarstufe I im Bundesländervergleich und im Trend von 2015 bis 2017. In R. Lorenz, W. Bos, M. Endberg, B.

Eickelmann, S. Grafe & J. Vahrenhold (Hrsg.), *Schule digital - der Länderindikator 2017: Schulische Medienbildung in der Sekundarstufe I mit besonderem Fokus auf MINT-Fächer im Bundesländervergleich und Trends von 2015 bis 2017* (S. 84–121). Waxmann.

Lorenz, R., Yotyodying, S., Eickelmann, B. & Endberg, M. (2021). *Schule digital – der Länderindikator 2021. Erste Ergebnisse und Analysen im Bundesländervergleich.*

Loucks, S. F. & Hall, G. E. (1977). Assessing and Facilitating the Implementation of Innovations: A New Approach. *Educational technology*, *17*(2), 18–21.

Loucks, S. F. & Hall, G. E. (8. April 1979). *Implementing Innovations in Schools: A Concerns-Based Approach.* American Educational Research Association. American Educational Research Association, San Francisco, Calif.

Loviscach, J. (2019). Inverted Classroom Model: mehr als nur eine Vorbereitung mit Videos. In S. Kauffeld & J. Othmer (Hrsg.), *Handbuch Innovative Lehre* (S. 87–98). Springer Fachmedien Wiesbaden.

Luciani, J. & Decorde, M. (2012). *An SVG Graphics Driver: [R Package svglite version 2.1.1]*. https://www.w3.org/Graphics/SVG/ (Zugriff am 20. März 2023).

Luhmann, N. & Bednarz, J. (2005). *Social systems*. *Writing science*. Stanford Univ. Press.

Maciuszek, D. & Martens, A. (2009). Virtuelle Labore als Simulationsspiele. In S. Fischer, E. Maehle & R. Reischuk (Hrsg.), *Informatik 2009 - Im Focus das Leben.*

Mackereth, F. J. H. (1964). An improved galvanic cell for determination of oxygen concentrations in fluids. *Journal of Scientific Instruments*, *41*(38), 38–41.

Mackereth, F. J. H. (1967). Electrolytic Oxygen Sensor(3,322,662).

Madjumdar, D. (2003). The Blue Baby Syndrome. *Resonance*, *8*(10), 20–30.

Mahler, D. & Arnold, J. (2022). MaSter-Bio – Messinstrument für das akademische Selbstkonzept zum technologiebezogenen Professionswissen von angehenden Biologielehrpersonen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, *28*(1).

Malone, M. R. (1984). Concerns Based Adoption Model (CBAM): Basis for an Elementary Science Methods Course. *Journal of Research in Science Teaching*, *21*(7), 755–768.

Malone, T. & Lepper, M. (1987). Making learning fun. A taxonomy of intrinsic motivations for learning. In R. Snow & M. Farr (Hrsg.), *Aptitude, learning, and instruction. Volume 3: Conative and affective process analyses* (S. 223–253). Erlbaum.

Manchanda, H. & Kumar, M. (2018). Study of water desalination techniques and a review on active solar distillation methods. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, *37*(1), 444–464.

Marchetti, G. M., Drton, M. & Sadeghi, K. (2022). *Graphical Markov Models with Mixed Graphs: [R Package ggm version 2.5]*. https://cran.r-project.org/web/packages/ggm/ggm.pdf (Zugriff am 29. März 2023).

Marsh, H. W. (1987). The big-fish-little-pond effect on academic self-concept. *Journal of educational Psychology*, *79*(3), 280–295.

Marsh, H. W. (1990). The Structure of Academic Self-Concept: The Marsh/Shavelson Model. *Journal of educational Psychology*, *82*(4), 623–636.

Marsh, H. W. & Craven, R. G. (2006). Reciprocal effects of Self-Concept and Performance From a Multidimensional Perspective. *Perspectives on Psychological Science*, *1*(2), 133–163.

Marsh, H. W. & Hattie, J. (1996). Theoretical Perspectives on the Structure of Self-Concept. In B. A. Bracken (Hrsg.), *A Wiley-Interscience publication. Handbook of self-concept: Developmental, social, and clinical considerations* (S. 38–90). Wiley.

Marsh, H. W. & Parker, J. W. (1984). Determinants of student self-concept: Is it better to be a relatively large fish in a small pond even if you don't learn to swim as well? *Journal of Personality and Social Psychology*, *47*(1), 213–231.

Marsh, H. W., Seaton, M., Trautwein, U., Lüdtke, O., Hau, K. T., O'Mara, A. J. & Craven, R. G. (2008). The Big-fish–little-pond-effect Stands Up to Critical Scrutiny: Implications for Theory, Methodology, and Future Research. *Educational Psychology Review*, *20*(3), 319–350.

Martin, M. M. & Anderson, C. M. (1998). The Cognitive Flexibility Scale: Three Validity Studies. *Communication Reports*, *11*(1), 1–9.

Martin, M. M., Anderson, C. M. & Thweatt, K. S. (1998). Aggressive Communication Traits and Their Relationship with the Cognitive Flexibility Scale and the Communication Flexibility Scale. *Journal of Social Behavior and Personality*, *13*(3), 531–540.

Martin, M. M. & Rubin, R. B. (1995). A New Measure of Cognitive Flexibility. *Psychological Reports*, *76*(2), 623–626.

Maxton-Küchenmeister, J. & Meßinger-Koppelt, J. (2020). Digitale Kompetenzen im naturwissen-schaftlichen Lehramtsstudium – eine Einführung. In S. Becker, J. Meßinger-Koppelt & C. Thyssen (Hrsg.), *Digitale Basiskompetenzen: Orientierungshilfe und Praxisbeispiele für die universitäre Lehramtsausbildung in den Naturwissenschaften* (S. 4–7).

Mayer, R. E. (2008). Applying the Science of Learning: Evidence-Based Principles for the Design of Multimedia Instruction. *American Psychologist*, 760–769.

Mayer, R. E. (2009). *Multimedia Learning*. Cambridge University Press.

Mayring, P. (2010). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken* (11. Aufl.). *Beltz Pädagogik*. Beltz.

Meidl, C. N. (2009). *Wissenschaftstheorie für SozialforscherInnen* (1. Aufl.). *utb-studi-e-book: Bd. 3160*. UTB GmbH; Böhlau.

Mettler-Toledo AG Analytical. (2007). *Anleitung zug Messung von pH: Theorie und Praxis von pH-Anwendungen im Labor*. MCG MarCom.

Microsoft. (2014). *Der Support für Windows XP wurde eingestellt*. https://support.microsoft.com/de-de/windows/der-support-f%C3%BCr-windows-xp-wurde-eingestellt-47b944b8-f4d3-82f2-9acc-21c79ee6ef5e (Zugriff am 19. Januar 2023).

Mike, F. C. & Davis, T. L. (2022). *'ggplot2' Pattern Geoms: [R package ggpattern version 1.0.1]*. https://cran.r-project.org/web/packages/ggpattern/index.html (Zugriff am 29. März 2023).

Milenković, D. D., Segedinac, M. D. & Hrin, T. N. (2014). Increasing High School Students' Chemistry Performance and Reducing Cognitive Load through an Instructional Strategy Based on the Interaction of Multiple Levels of Knowledge Representation. *Journal of Chemical Education*, *91*(9), 1409–1416.

Ministerium für Bildung. (2021). *Lehrplan für die gesellschaftswissenschaftlichen Fächer: Erdkunde, Geschichte, Sozialkunde*. https://lehrplaene.bildung-rp.de/no-cache.html?tx_pitsdownloadcenter_pitsdownloadcenter%5Bcontroller%5D=Download&tx_pitsdownloadcenter_pitsdownloadcenter%5Baction%5D=forceDownload&tx_pitsdownloadcenter_pitsdownloadcenter%5Bfileid%5D=6g%2Fg08UoEZakeBpGSX%2BZDg%3D%3D

Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung Rheinland-Pfalz. (1998a). *Lehrplan Biologie: Grund- und Leistungsfach Jahrgangsstufen 11 bis 13 der gymnasialen Oberstufe (Mainzer Studienstufe).*

Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung Rheinland-Pfalz. (1998b). *Lehrplan Chemie Sekundarstufe II.*

Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung Rheinland-Pfalz. (1998c). *Lehrplan Physik.*

Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Jugend und Kultur. (2010). *Rahmenlehrplan Naturwissenschaften für die weiterführenden Schulen in Rheinland-Pfalz: Klassenstufen 5 und 6*. https://naturwissenschaften.bildung-rp.de/fileadmin/user_upload/naturwissenschaften.bildung-rp.de/_Alt/pdf-download/Rahmenlehrplan_Naturwissenschaften_OS_2010.pdf

Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur. (2014). *Lehrpläne für die naturwissenschaftlichen Fächer für die weiterführenden Schulen in Rheinland-Pfalz: Biologie, Chemie, Physik Klassenstufen 7 bis 9/10*. Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur. https://naturwissenschaften.bildung-rp.de/fileadmin/user_upload/naturwissenschaften.bildung-rp.de/_Alt/pdf-download/Lehrplaene_Endversion_online.pdf

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität Rheinland-Pfalz. *Wasserportal RLP - Geoexplorer*. https://wasserportal.rlp-umwelt.de/servlet/is/2025/ (Zugriff am 13. Juli 2021).

Mishra, P. & Koehler, M. J. (2006). Technological Pedagogical Content Knowledge: A Framework for Teacher Knowledge. *Teachers college record*, *108*(6), 1017–1054.

Mitchell, S. (1988). *Applications of the Concerns-Based Adoption Model in Program Evaluation: Paper presented at the Annual Meeting of the American Educational Research Association*, New Orleans, Louisiana.

Möller, J., Pohlmann, B., Köller, O. & Marsh, H. W. (2009). A Meta-Analytic Path Analysis of the Internal/External Frame of Reference Model of Academic Achievement and Academic Self-Concept. *Review of Educational Research*, *79*(3), 1129–1167.

Möller, J. & Trautwein, U. (2015). Selbstkonzept. In E. Wild & J. Möller (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie* (S. 177–200). Springer Berlin Heidelberg.

Moreno, R. & Mayer, R. E. (2007). Interactive Multimodal Learning Environments. *Educational Psychology Review*, *19*(3), 309–326.

Moreno, R. & Park, B. (2010). Cognitive Load Theory: Historical Development and Relation to Other Theories. In J. L. Plass, R. Moreno & R. Brünken (Hrsg.), *Cognitive load theory* (S. 9–28). Cambridge University Press.

Mortimer, C. E. & Müller, U. (2003). *Chemie: Das Basiswissen der Chemie ; 520 Formelbilder, 125 Tabellen* (8., komplett überarb. und erw. Aufl.). Thieme.

Moschner, B. & Dickhäuser, O. (2018). Selbstkonzept. In D. H. Rost, J. R. Sparfeldt & S. Buch (Hrsg.), *Beltz Psychologie 2018. Handwörterbuch pädagogische Psychologie* (5. Aufl., S. 750–756). Beltz.

Mueller, J., Wood, E., Willoughby, T., Ross, C. & Specht, J. (2008). Identifying discriminating variables between teachers who fully integrate computers and teachers with limited integration. *Computers & Education*, *51*(4), 1523–1537.

Müller, K. & Wickham, H. (2023). *Simple Data Frames: [R Package tibble version 3.1.8]*. https://cran.r-project.org/web/packages/tibble/tibble.pdf (Zugriff am 20. März 2023).

Nagy, G. & Nagy, L. (2007). Halogens. In L. M. L. Nollet (Hrsg.), *Food science and technology. Handbook of water analysis* (2. Aufl., S. 157–200). CRC Press/Taylor & Francis.

Neff, S. (2018). *Konzeption, Durchführung und Evaluation einer Einheit zum Thema „Gewässeranalytik“ für die Sekundarstufe II am Schülerlabor Freilandmobil* [Masterarbeit]. Universität Koblenz-Landau, Landau.

Neff, S., Engl, A., Kauertz, A. & Risch, B. (2019). Transfer virtueller Labore in den schulischen Unterricht. In C. Maurer (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe* (S. 930–933). Universität Regensburg.

Neff, S., Engl, A., Kauertz, A. & Risch, B. (2020a). Implementation digitaler Innovationen in der Lehrer*innenbildung am Beispiel des Projekts Open MINT Labs. In M. Beißwenger, B. Bulizek, I. Gryl & F. Schacht (Hrsg.), *Digitale*

Innovationen und Kompetenzen in der Lehramtsausbildung. Universitätsverlag Rhein-Ruhr.

Neff, S., Engl, A., Kauertz, A. & Risch, B. (2020b). Virtuelle Labore zur Vor- und Nachbereitung von Freiland-Experimentiereinheiten. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen: Jahrestagung zur Jahrestagung 2018 der GDCP* (S. 705–708). Universität Duisburg-Essen.

Neff, S., Engl, A. & Risch, B. (2023). Digitale Lernumgebungen zur Vor- und Nachbereitung realer Experimentiereinheiten. In J. Roth, M. Baum, K. Eilerts, G. Hornung & T. Trefzger (Hrsg.), *Die Zukunft des MINT-Lernens: Bd. 2. Die Zukunft des MINT-Lernens - Band 2: Digitale tools und Methoden für das Lehren und Lernen* (S. 17–34). Springer Spektrum.

Neff, S., Gierl, K., Engl, A., Decker, B., Roth, T., Becker, J., Patzke, K., Winterholler, B., Kauertz, A. & Risch, B. (2021). Virtuelle Labore für den MINT-Unterricht – Transferprozess einer hochschulischen Innovation in den Schulkontext. In U. Schmidt & K. Schönheim (Hrsg.), *Transfer von Innovation und Wissen* (S. 75–101). Springer Fachmedien Wiesbaden.

Nei, L. (2007). Milestones in the 50-year History of Electrochemical Oxygen Sensor Development. *ECS Transactions*, *2*(25), 33–38.

Nei, L. & Merike, L. (2009). Mackereth Oxygen Sensor: Measurement Uncertainty. *ECS Transactions*, *19*(22), 55–64.

Neumann, H. (1979). Auswirkungen wasserbaulicher Maßnahmen auf die aquatischen Lebensgemeinschaften und das Selbstreinigungsvermögen von Fließgewässern. *Osnabrücker naturwissenschaftliche Mitteilungen*, *6*, 123–161.

Newhouse, C. P. (2001). Applying the Concerns-Based Adoption Model to Research on Computers in Classrooms. *Journal of Research on Computing in Education*, *33*(5).

Newlove, B. W. & Hall, G. E. (1976). *A Manual for Assessing Open-Ended Statements of Concern About an Innovation*. Texas University, Research and Development Center for Teacher Education. https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED144207.pdf

Nickolaus, R., Gönnenwein, A. & Petsch, C. (2010). Die Transferproblematik im Kontext von Modellversuchen und Modellversuchsprogrammen. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, *13*(1), 39–58.

Niebert, K. & Gropengießer, H. (2014). Leitfadengestützte Interviews. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 121–132). Springer Berlin Heidelberg.

Niesyto, H. (2012). Medienpädagogik in der Lehrerbildung in Baden-Württemberg. Konzeptionelle Überlegungen und praktische Schritte zu einer medienpädagogischen Grundbildung. In R. Schulz-Zander, B. Eickelmann, H. Moser, H. Niesyto & P. Grell (Hrsg.), *Jahrbuch Medienpädagogik 9* (S. 333–358). VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Nyachwaya, J. & Gillaspie, M. (2016). Features of representations in general chemistry textbooks: a peek through the lens of the cognitive load theory. *Chemistry Education Research and Practice*, *17*(1), 58–71.

o.V. (2020). *Informationen für Ackerbau und Grünland: Neue Düngeverordnung 2020*. https://www.dlr.rlp.de/Internet/global/inetcntr.nsf/dlr_web_full.xsp?src=KWI71C21G0&p1=4W1H8283HY&p3=4H0SJ5100N&p4=6T14Z53D9J (Zugriff am 26. April 2021).

OECD. (2021). *Bildung auf einen Blick 2021: OECD-Indikatoren*. wbv Media.

OECD. (2022). *Bildung auf einen Blick 2022*. wbv Media / OECD Publishing.

Oehme, F. (1994). Elektrochemische Sensoren. In F. Oehme (Hrsg.), *Sensorik: Bd. 4. Chemische Sensoren heute und morgen: Anforderungen, Fertigungstechniken, Entwicklungstrend* (S. 61–87). expert-Verl.

Olejnik, S. & Algina, J. (2003). Generalized eta and omega squared statistics: measures of effect size for some common research designs. *Psychological Methods*, *8*(4), 434–447.

Ooms, J. (2023). *Export Data Frames to Excel 'xlsx' Format: [R package writexl version 1.4.2]*. https://cran.r-project.org/web/packages/writexl/writexl.pdf (Zugriff am 20. März 2023).

Orru, G. & Longo, L. (2019). The Evolution of Cognitive Load Theory and the Measurement of Its Intrinsic, Extraneous and Germane Loads: A Review. In (S. 23–48). Springer, Cham.

Ostermeier, C. & Stadler, M. (2004). *Zwischenbericht BLK-Programm SINUS-Transfer*. Kiel.

Otto, J., Bieber, G. & Heinrich, M. (2019). Aktuelle Desiderata zum systematischen Wissenstransfer und zur Implementation: Einführender Diskussionsbeitrag zu Berichten über transferaffine Forschungsprojekte. *Die deutsche Schule*, *111*(3), 310–321.

Paas, F., Renkl, A. & Sweller, J. (2003). Cognitive Load Theory and Instructional Design: Recent Developments. *Educational Psychologist*, *38*(1), 1–4.

Paas, F., Tuovinen, J. E., Tabbers, H. & van Gerven, P. W. M. (2003). Cognitive Load Measurement as a Means to Advance Cognitive Load Theory. *Educational Psychologist*, *38*(1), 63–71.

Paas, F. & van Merriënboer, J. J. G. (1993). The Efficiency of Instructional Conditions: An Approach to Combine Mental Effort and Performance Measures. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *35*(4), 737–743.

Paas, F. & van Merriënboer, J. J. G. (1994a). Instructional control of cognitive load in the training of complex cognitive tasks. *Educational Psychology Review*, *6*(4), 351–371.

Paas, F. & van Merriënboer, J. J. G. (1994b). Variability of worked examples and transfer of geometrical problem-solving skills: A cognitive-load approach. *Journal of educational Psychology*, *86*(1), 122–133.

Pagano, R. R. (2013). *Understanding statistics in the behavioral sciences* (10th ed.). Wadsworth/Cengage Learning.

Pant, H. A., Vock, M., Pöhlmann, C. & Köller, O. (2008). Offenheit für Innovationen. Befunde aus einer Studie zur Rezeption der Bildungsstandards bei Lehrkräften und Zusammenhänge mit Schülerleistungen. *Zeitschrift für Pädagogik*, *54*(6), 827–845.

Parchmann, I. & Kuhn, J. (2018). Lernen im Kontext. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 193–208). Springer Berlin Heidelberg.

Part, R., Perera, H. N., Marchand, G. C. & Bernacki, M. L. (2020). Revisiting the dimensionality of subjective task value: Towards clarification of competing perspectives. *Contemporary educational psychology*, *62*, 101875.

Patrick, A. O., Kpangban, E. & Chibueze, O. O. (2007). Motivation effects on test scores of senior secondary school science students. *Studies on home and community science*, *1*(1), 57–64.

Patt, H., Jürging, P. & Kraus, W. (2009). *Naturnaher Wasserbau: Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern* (3. Auflage). Springer Berlin Heidelberg.

Patt, H., Vogel, G. & Pohl, R. (2013). Hydraulische und wasserbauliche Grundlagen. In H. Patt & R. Jüpner (Hrsg.), *Hochwasser-Handbuch* (S. 91–208). Springer Berlin Heidelberg.

Pätzold, G. (2003). Verstetigung und Transfer von Modellversuchsergebnissen. In H. Reinisch, K. Beck, M. Eckert & T. Tramm (Hrsg.), *Didaktik beruflichen Lehrens und Lernens: Reflexionen, Diskurse und Entwicklungen* (S. 151–166). VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Pawek, C. (2009). *Schülerlabore als interesseförderndeaußerschulische Lernumgebungenfür Schülerinnen und Schüleraus der Mittel- und Oberstufe* [Dissertation]. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel.

Petko, D. (2012). Hemmende und förderliche Faktoren des Einsatzes digitaler Medien im Unterricht: Empirische Befunde und forschungsmethodische Probleme. In R. Schulz-Zander, B. Eickelmann, H. Moser, H. Niesyto & P. Grell (Hrsg.), *Jahrbuch Medienpädagogik 9* (S. 29–50). VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Petsch, C., Gönnenwein, A. & Nickolaus, R. (2012). Effekte des Modellversuchprogramms Transfer-21 – Ein Beitrag zur Transferforschung und zu Effekten von BNE. In Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.), *Bildung: Bd. 39. Bildung für nachhaltige Entwicklung: Beiträge der Bildungsforschung* (S. 43–69). Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Referat Bildungsforschung.

Phywe Systeme GmbH & Co. KG. *Leitfähigkeit verschiedener Wasserproben*. http://www.phywe.fr/index.php/fuseaction/download/lrn_file/versuchsanleitungen/P4100560/d/P4100560d.pdf (Zugriff am 7. Februar 2021).

Pietzner, V. (2009). Computer im naturwissenschaftlichen Unterricht - Ergebnisse einer Umfrage unter Lehrkräften. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, *15*, 47–67.

Plass, J. L., Moreno, R. & Brünken, R. (Hg.). (2010). *Cognitive Load Theory*. Cambridge University Press.

Pohling, R. (2015). *Chemische Reaktionen in der Wasseranalyse*. Springer Spektrum.

Pollock, E. J., Chandler, P. & Sweller, J. (2002). Assimilating complex information. *Learning and Instruction*, *12*, 61–86.

Powlson, D. S., Addiscott, T. M., Benjamin, N., Cassman, K. G., Kok, T. M. de, van Grinsven, H., L'Hirondel, J.-L., Avery, A. A. & van Kessel, C. (2008). When does nitrate become a risk for humans? *Journal of environmental quality*, *37*(2), 291–295.

Prasse, D. (2012). *Bedingungen innovativen Handelns in Schulen: Funktion und Interaktion von Innovationsbereitschaft, Innovationsklima und Akteursnetzwerken am Beispiel der IKT-Integration an Schulen*. Zugl.: Berlin, Humboldt-Univ., Diss., 2010 u.d.T.: Prasse, Doreen: Innovationsbereitschaft, Innovationsklima und Akteursnetzwerke als zentrale Bedingungen der nachhaltigen Implementation IKT-unterstützter Unterrichtsformen in Schulen. *Empirische Erziehungswissenschaft: Bd. 38*. Waxmann.

Priemer, B. (2004). Logfile-Analysen: Möglichkeiten und Grenzen ihrer Nutzung bei Untersuchungen zur Mensch-Maschine-Interaktion. *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung*(Occasional Papers), 1–23.

Przywarra, T., Engl, A. & Risch, B. (2021). Entwicklung eines Messinstruments zur Qualitätsbestimmung von (digitalen) Anschauungsmodellen. *Empirische Pädagogik*, *35*(1), 19–37.

Przywarra, T. & Risch, B. (2022). Interventionsstudien zum Vergleich verschiedener Modelltypen:Herausforderungen und Lçsungsansätze. *CHEMKON*, *29*(S1), 250–254.

Quast, J., Rubach, C. & Lazarides, R. (2021). Lehrkräfteeinschätzungen zu Unterrichtsqualität mit digitalen Medien: Zusammenhänge zur wahrgenommenen technischen Schulausstattung, Medienunterstützung, digitalen Kompetenzselbsteinschätzungen und Wertüberzeugungen. *Zeitschrift für Bildungsforschung*, *11*(2), 309–341.

Rabin, B. A. & Brownson, R. C. (2018). Terminology for Dissemination and Implementation Research. In R. C. Brownson, G. A. Colditz & E. K. Proctor (Hrsg.), *Dissemination and implementation research in health: Translating science to practice* (2. Aufl., S. 19–45). Oxford university press.

Ralle, B. & Di Fuccia, D.-S. (2014). Aktionsforschung als Teil fachdidaktischer Entwicklungsforschung. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 43–56). Springer Berlin Heidelberg.

Ramscar, M., Dye, M., Gustafson, J. W. & Klein, J. (2013). Dual routes to cognitive flexibility: learning and response-conflict resolution in the dimensional change card sort task. *Child development*, *84*(4), 1308–1323.

Rasch, D. & Guiard, V. (2004). The robustness of parametric statistical methods. *Psychology Science*, *46*, 175–208.

Redecker, C. (2017). *EUR, Scientific and technical research series: Bd. 28775*. *European framework for the digital competence of educators: DigCompEdu* (Y. Punie, Hg.). Publications Office.

Reinmann-Rothmeier, G. & Mandl, H. (1998). Wenn kreative Ansätze versanden: Implementation als verkannte Aufgabe. *Unterrichtswissenschaft*, *26*(4), 292–311.

Revelle, W. (2022). *Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research: [R package psych version 2.2.9]*. https://cran.r-project.org/web/packages/psych/index.html (Zugriff am 20. März 2023).

Rheinberg, F. (1989). *Zweck und Tätigkeit: Motivationspsychologische Analysen zur Handlungsveranlassung*. *Motivationsforschung: Bd. 11*. Verl. für Psychologie Hogrefe.

Rheinberg, F. (2000). *Motivation* (3. Aufl.). *Urban-Taschenbücher: Bd. 555*. Kohlhammer.

Rheinberg, F. (2010). Intrinsische Motivation und Flow-Erleben. In J. Heckhausen & H. Heckhausen (Hrsg.), *Springer-Lehrbuch. Motivation und Handeln* (4. Aufl., S. 365–388). Springer.

Rheinberg, F. & Vollmeyer, R. (2003). Flow-Erleben in einem Computerspiel unter experimentell variierten Bedingungen. *Zeitschrift für Psychologie*, *211*(4), 161–170.

Rheinberg, F., Vollmeyer, R. & Burns, B. D. (2001). FAM: Ein Fragebogen zur Erfassung aktueller Motivation in Lern- und Leistungssituationen. *Diagnostica*, *47*, 57–66.

Rheinberg, F., Vollmeyer, R. & Burns, B. D. (2021). *FAM - Fragebogen zur aktuellen Motivation.* https://doi.org/10.23668/psycharchives.4486

Rheinberg, F., Vollmeyer, R. & Engeser, S. (2003). Die Erfassung des Flow-Erlebens. In J. Stiensmeier-Pelster & F. Rheinberg (Hrsg.), *Tests und Trends: Bd. 2. Diagnostik von Motivation und Selbstkonzept* (S. 261–279). Hogrefe.

Rheinberg, F., Vollmeyer, R. & Engeser, S. (2019). *FKS - Flow-Kurzskala.* https://doi.org/10.23668/psycharchives.4488

Richter, J., Scheiter, K. & Eitel, A. (2018). Signaling text–picture relations in multimedia learning: The influence of prior knowledge. *Journal of educational Psychology*, *110*(4), 544–560.

Riese, J. & Reinhold, P. (2014). Entwicklung eines Leistungstests für fachdidaktisches Wissen. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 257–268). Springer Berlin Heidelberg.

Rogers, C. R. (1959). A Theory of Therapy Personality and Interpersonal Relationships as Developed in the Client-centered Framework. In S. Koch (Hrsg.), *Psychology: A Study of a Science: Study 1, Volume 3: Formulations of the Person and the Social Context* (S. 184–256). McGraw-Hill.

Rogers, E. M. (1983). *Diffusion of Innovations* (3. ed.). Free Press.

Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations*. *Social science*. Free Press.

Rogers, E. M., Singhal, A. & Quinlan, M. M. (2019). Diffusion of Innovations. In D. W. Stacks, M. B. Salwen, K. C. Eichhorn & K. C. Eichhorn (Hrsg.), *An Integrated Approach to Communication Theory and Research* (S. 418–434). Routledge.

Rogoff, B. (1990). *Apprenticeship in thinking: Cognitive development in social context*. Oxford university press.

Roth, H.-J., Uçan, Y., Sieger, S. & Gollan, C. (2021). Stichwort: Implementationsforschung zwischen Intervention und Transfer im Kontext von Mehrsprachigkeit und sprachlicher Bildung. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, *24*(4), 775–818.

Roth, T., Permesang, J., Appel, J., Hein, U. & Hornberger, C. (2015). Virtuelle Vortestate als Zugangsvoraussetzung zu physikalischen Grundlagenlaboren. In Deutsche Physikalische Gesellschaft (Hrsg.), *PhyDidB: Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung.* Deutsche Physikalische Gesellschaft.

Rubach, C. & Lazarides, R. (2019). Eine Skala zur Selbsteinschätzung digitaler Kompetenzen bei Lehramtsstudierenden. *Zeitschrift für Bildungsforschung*, *9*(3), 345–374.

Sachse, K., Kretschmann, J., Kocaj, A., Köller, O., Knigge, M. & Tesch, B. (2012). *IQB-Ländervergleich 2008/2009. Skalenhandbuch zur Dokumentation der Erhebungsinstrumente*. *Schriftenreihe des Instituts zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen: Bd. 5*. Humboldt-Universität zu Berlin, Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen.

Sadrzadeh, M. & Mohammadi, T. (2008). Sea water desalination using electrodialysis. *Desalination*, *221*(1-3), 440–447.

Sauro, J. (2011). *A practical guide to the system usability scale: Background, benchmarks & best practices*. Measuring Usability LLC.

Sauro, J. & Lewis, J. R. (2011). When designing usability questionnaires, does it hurt to be positive? In D. Tan, G. Fitzpatrick, C. Gutwin, B. Begole & W. A.

Kellogg (Hrsg.), *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 2215–2224). ACM.

Schafer, J. L. & Graham, J. W. (2002). Missing data: Our view of the state of the art. *Psychological Methods*, *7*(2), 147–177.

Scharpf, S. & Gabes, D. (2022). Motivation und digitale Medien am Beispiel des Sachunterrichts. In M. Haider & D. Schmeinck (Hrsg.), *Digitalisierung in der Grundschule. Grundlagen, Gelingensbedingungen und didaktische Konzeptionen am Beispiel des Fachs Sachunterricht* (S. 85–97). Verlag Julius Klinkhardt.

Schauffel, N., Schmidt, I., Peiffer, H. & Ellwart, T. (2021). Self-concept related to information and communication technology: Scale development and validation. *Computers in Human Behavior Reports*, *4*.

Schellenbach-Zell, J., Rürup, M., Fußangel, K. & Gräsel, C. (2008). Bedingungen erfolgreichen Transfers am Beispiel von Chemie im Kontext. In R. Demuth, C. Gräsel, I. Parchmann & B. Ralle (Hrsg.), *Chemie im Kontext: Von der Innovation zur nachhaltigen Verbreitung eines Unterrichtskonzepts* (S. 83–124). Waxmann.

Schermelleh-Engel, K. & Werner, C. S. (2011). Methoden der Reliabilitätsbestimmung. In H. Moosbrugger & A. Kelava (Hrsg.), *Springer-Lehrbuch. Testtheorie und Fragebogenkonstruktion* (2. Aufl., S. 119–141). Springer Berlin Heidelberg.

Schindler, D. W., Hesslein, R. H., Wagemann, R. & Broecker, W. S. (1980). Effects of Acidification on Mobilization of Heavy Metals and Radionuclides from the Sediments of a Freshwater Lake. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *37*(3), 373–377.

Schindler, D. W., Mills, K. H., Malley, D. F., Findlay, D. L., Shearer, J. A., Davies, I. J., Turner, M. A., Linsey, G. A. & Cruikshank, D. R. (1985). Long-term ecosystem stress: the effects of years of experimental acidification on a small lake. *Science (New York, N.Y.)*, *228*(4706), 1395–1401.

Schmid, U., Goertz, L. & Behrens, J. (2017). *Monitor Digitale Bildung : Die Schulen im digitalen Zeitalter*. Bertelsmann Stiftung.

Schmider, E., Ziegler, M., Danay, E., Beyer, L. & Bühner, M. (2010). Is It Really Robust? *Methodology*, *6*(4), 147–151.

Schmidt, S. (2010). *Didaktische Rekonstruktion des Basiskonzepts "Stoff-Teilchen" für den Anfangsunterricht nach Chemie im Kontext* [Dissertation]. Carl von Ossietzky Universität, Oldernburg.

Schneider, S., Nebel, S., Beege, M. & Rey, G. D. (2018). The autonomy-enhancing effects of choice on cognitive load, motivation and learning with digital media. *Learning and Instruction*, *58*, 161–172.

Schneider, V. & Bolte, C. (2014). Stages of Concern angehender Chemielehrer/-innen hinsichtlich IBSE. In S. Bernholt (Hrsg.), *Heterogenität und Diversität*

- Vielfalt der Voraussetzungen im naturwissenschaftlichen Unterricht: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Bremen 2014 ; [Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 35 (S. 197–199).

Schneider, W. (Hg.). (2008). *Beuth-Kommentar Informations-, Kommunikationstechnik. Ergonomische Gestaltung von Benutzungsschnittstellen: Kommentar zur Grundsatznorm DIN EN ISO 9241-110* (2. Aufl.). Beuth.

Schöne, C., Dickhäuser, O., Spinath, B. & Stiensmeier-Pelster, J. (2002). Das Fähigkeitsselbstkonzept und seine Erfassung. In J. Stiensmeier-Pelster & F. Rheinberg (Hrsg.), *Diagnostik von Motivation und Selbstkonzept* (1. Aufl., S. 3–14).

Schrader, J., Hasselhorn, M., Hetfleisch, P. & Goeze, A. (2020). Stichwortbeitrag Implementationsforschung: Wie Wissenschaft zu Verbesserungen im Bildungssystem beitragen kann. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, *23*(1), 9–59.

Schulgesetz Rheinland-Pfalz, GVBI. 2004, 239 (2004; i.d.F.v. 26.06.2020).

Schulz-Zander, R. (2002). Geschlecht und neue Medien im Bildungsbereich Schule - Empirische Befunde zur Computernutzung, zu Interessen, Selbstkonzept, Interaktionen und Fördermaßnahmen. In M. Kampshoff & B. Lumer (Hrsg.), *Chancengleichheit im Bildungswesen* (S. 251–272). VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Schulz-Zander, R. & Eickelmann, B. (2007). Zur Erfassung von Schulentwicklungsprozessen im Bereich digitaler Medien. Methodologische Konzeption einer Fallstudienuntersuchung als Folgeuntersuchung zur deutschen IEA-Studie SITES M2. *MedienPädagogik*, *14*, 1–22.

Schüttler, T. (2022). *Schülerlabore als interessefördernde authentische Lernorte für den naturwissenschaftlichen Unterricht nutzen*. Dissertation. *Studien zum Physik- und Chemielernen: Band 328*. Logos.

Schüttler, T., Watzka, B., Girwidz, R. & Ertl, B. (2021). Die Wirkung der Authentizität von Lernort und Laborgeräten auf das situationale Interesse und die Relevanzwahrnehmung beim Besuch eines naturwissenschaftlichen Schülerlabors. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, *27*(1), 109–125.

Schütze, R. (1887). Löslichkeit von Hartblei. *Angewandte Chemie*, *2*(23), 300.

Seidel, T., Prenzel, M., Rimmele, R., Dalehefte, I. M., Herweg, C., Kobarg, M. & Schwindt, K. (2006). Blicke auf den Physikunterricht. Ergebnisse der IPN Videostudie. *Zeitschrift für Pädagogik*, *52*(6), 799–821.

Seitz, S. (2014). Leichte Sprache? Keine einfache Sprache. *Aus Politik und Zeitgeschichte*, *64*, 3–6.

Seufert, T. & Brünken, R. (2006). Cognitive load and the format of instructional aids for coherence formation. *Applied Cognitive Psychology*, *20*(3), 321–331.

Seufert, T., Jänen, I. & Brünken, R. (2007). The impact of intrinsic cognitive load on the effectiveness of graphical help for coherence formation. *Computers in Human Behavior*, *23*(3), 1055–1071.

Shashaani, L. (1997). Gender Differences in Computer Attitudes and Use among College Students. *Journal of ducational computing research*, *16*(1), 37–51.

Shavelson, R. J. & Bolus, R. (1982). Self concept: The interplay of theory and methods. *Journal of educational Psychology*, *74*(1), 3–17.

Shavelson, R. J., Hubner, J. J. & Stanton, G. C. (1976). Self-Concept: Validation of Construct Interpretations. *Review of Educational Research*, *46*(3), 407–441.

Shernoff, D. J., Csikszentmihalyi, M., Schneider, B. & Shernoff, E. S. (2003). Student engagement in high school classrooms from the perspective of flow theory. *Social Psychology Quarterly*, *18*(2), 158–176.

Shwartz, G., Avargil, S., Herscovitz, O. & Dori, Y. J. (2017). The case of middle and high school chemistry teachers implementing technology: using the concerns-based adoption model to assess change processes. *Chemistry Education Research and Practice*, *18*(1), 214–232.

Siemon, J., Scholkmann, A., Boom, K.-D. & Knigge, M. (2016). *Kodiermanual Lernzeitnutzung ("Time on Task"): Zur Analyse von Schülerverhalten anhand von Videodaten*. Hamburg. Universität Hamburg.

Sieve, B. F. (2015). *Interaktive Tafeln im naturwissenschaftlichen Unterricht*. Springer Fachmedien Wiesbaden.

Skoog, D. A. & Leary, J. J. (1996). *Instrumentelle Analytik: Grundlagen - Geräte - Anwendungen*. *Springer-Lehrbuch*. Springer.

Smol, J. P. (2008). *Pollution of lakes and rivers: A paleoenvironmental perspective* (2. ed.). Blackwell.

Snoeyink, R. & Ertmer, P. A. (2001). Thrust into Technology: How Veteran Teachers Respond. *Journal of Educational Technology Systems*, *30*(1), 85–111.

Snyder, J., Bolin, F. & Zumwalt, K. (1992). Curriculum Implementation. In P. W. Jackson (Hrsg.), *Handbook of research on curriculum: A project of the American Educational Research Association* (S. 699–703). Macmillan.

Southwest Educational Development Laboratory. (2021). *Concerns-Based Adoption Model (CBAM).* Southwest Educational Development Laboratory. https://sedl.org/cbam/ (Zugriff am 19. Januar 2023).

Spiro, R. J. (1987). *Knowledge acquisition for application: cognitive flexibility and transfer in complex content domains* (Technical Reports Nr. 409). Urbana-Champaign, Illinois. Center for the Study of Reading.

Spiro, R. J. (1988). *Cognitive Flexibility Theory: advanced knowledge acquisition in ill-structured domains* (Technical Reports Nr. 441). Urbana-Champaign, Illinois. Center for the Study of Reading.

Spiro, R. J., Collins, B. P. & Ramchandran, A. R. (2008). Modes of Openness and Flexibility in Cognitive Flexibility Hypertext Learning Environments. In L. A. Tomei (Hrsg.), *Online and distance learning: Concepts, methodologies, tools, and applications* (S. 1903–1908). IGI Global (701 E. Chocolate Avenue Hershey Pennsylvania 17033 USA).

Spiro, R. J., Collins, B. P., Thota, J. J. & Feltovich, P. J. (2003). Cognitive Flexibility Theory: Hypermedia for Complex Learning, Adaptive Knowledge Application, and Experience Acceleration. *Educational technology*, *43*(5), 5–10.

Spiro, R. J., Coulson, R. L., Feltovich, P. J. & Anderson, D. K. (1988). *Cognitive Flexibility Theory: Advanced Knowledge Acquisition in ill-structured Domains*. Technical Report.

Spiro, R. J., Feltovich, P. J., Jacobson, M. J. & Coulson, R. L. (1991). Knowledge Representation, Content Specification, and the Development of Skill in Situation-Specific Knowledge Assembly: Some Constructivist Issues as They Relate to Cognitive Flexibility Theory and Hypertext. *Educational technology*, *31*(9), 22–25.

Spiro, R. J., Feltovich, P. J., Jacobson, M. J. & Coulson, R. L. (1992). Cognitive Flexibility, Constructivism, and Hypertext: Random Access Instruction for Advanced Knowledge Acquisition in Ill-Structured Domains. *Constructivism and the technology of instruction: A conversation*, *35*, 57-76.

Spiro, R. J., Feltovich, P. J., Jacobson, M. J. & Coulson, R. L. (2012). Cognitive Flexibility, Constructivism, and Hypertext: Random Access Instruction for Advanced Knowledge Acquisition in Ill-Structured Domains. In L. P. Steffe & J. Gale (Hrsg.), *Constructivism in Education* (S. 103–126). Taylor and Francis.

Spiro, R. J. & Jehng, J.-C. (1990). Cognitive Flexibility and Hypertext: Theory and Technology for the Nonlinear and Multidimensional Traversal of Complex Subject Matter. In D. Nix & R. J. Spiro (Hrsg.), *Cognition, Education and Multimedia: Exploring Ideas in High Technology* (S. 163–205). Erlbaum.

Spiro, R. J., Vispoel, W. P., Schmitz, J. G., Samarapungavan, A. & Boerger, A. E. (1987). *Knowledge Acquisition for Application: Cognitive Flexibility and Transfer in Complex Content Domains* [Technical Report]. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana-Champaign, Illinois.

Spiro, R. J., Vispoel, W. P., Schmitz, J. G., Samarapungavan, A., Boerger, A. E., Britton, B. K. & Glynn, S. M. (1987). Cognitive flexibility and transfer in complex content domains. *Executive control processes in reading*, 177–199.

Stallings, J. (1980). Allocated Academic Learning Time Revisited, or Beyond Time on Task. *Educational Researcher*, *9*(11), 11–16.

Ständige wissenschaftliche Kommission der KMK. (11. Juni 2021). *Pandemiebedingte Lernrückstände aufholen: Unterstützungsmaßnahmen fokussieren, verknüpfen und evaluieren*. Kiel. Kultusministerkonferenz. https://www.ipn.uni-kiel.de/de/das-ipn/archiv/StawiKoStellungnahme_PandemiebedingteLernruckstandeaufholen.pdf

Steinberg, M. & Schmid, Y. (2020). "Wenn wir jetzt nichts machen, dann lernen die ja nichts – und dann haben wir sofort angefangen zu arbeiten." Wert und Rechtfertigung der Nutzung neuer Lehr- und Lernmedien in der Primarschule, vor und nach den pandemiebedingten Schulschließungen. In M. Ortrud & M. Hertrampf (Hrsg.), *Philologie im Netz: Bd. 24. Corona: Krise oder Wende? Wie Krisen Kulturen verunsichern und verändern* (S. 448–462).

Steinmayr, R. & Spinath, B. (2009). The importance of motivation as a predictor of school achievement. *Learning and Individual Differences*, *19*(1), 80–90.

Stender, A., Schwichow, M. & Härtig, H. (2017). Prädiktoren des Fachwissenserwerbs durch Experimentieren. In C. Maurer (Hrsg.), *Implementation fachdidaktischer Innovationen im Spiegel von Forschung und Praxis* (S. 284–287). Universität Regensburg.

Stralla, M. (2019). *Lehrpersonen als Change Agents: Eine rekonstruktive Studie zu Orientierungen von Lehrerinnen und Lehrern in extern induzierten schulischen Innovationsprozessen* (1. Auflage). Budrich UniPress Ltd.

Streller, M. (2015). *The Educational Effects of Pre and Post-Work in Out-Of-School Laboratories* [Dissertation]. Technische Universität Dresden, Dresden.

Streller, S., Bolte, C., Dietz, D. & La Noto Diega, R. (2019). *Chemiedidaktik an Fallbeispielen*. Springer Berlin Heidelberg.

Sweller, J. (1993). Some cognitive processes and their consequences for the organisation and presentation of information. *Australian Journal of Psychology*, *45*(1), 1–8.

Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and Instruction*, *4*(4), 295–312.

Sweller, J. (2003). Evolution of Human Cognitive Architecture. In B. H. Ross (Hrsg.), *Psychology of Learning and Motivation: v.43. Psychology of Learning and Motivation* (1. Aufl., S. 216–266). Elsevier textbooks.

Sweller, J. (2010). Cognitive Load Theory: Recent Theoretical Advances. In J. L. Plass, R. Moreno & R. Brünken (Hrsg.), *Cognitive load theory* (S. 29–47). Cambridge University Press.

Sweller, J., Ayres, P. & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive Load Theory* (1. Aufl.). *Explorations in the Learning Sciences, Instructional Systems and Performance Technologies: Bd. 1*. Springer New York.

Sweller, J. & Chandler, P. (1994). Why Some Material Is Difficult to Learn. *Cognition and Instruction*, *12*(3), 185–233.

Sweller, J., Chandler, P., Tierney, P. & Cooper, M. (1990). Cognitive load as a factor in the structuring of technical material. *Journal of Experimental Psychology: General*, *119*(2), 176–192.

Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G. & Paas, F. (1998). Cognitive Architecture and Instructional Design. *Educational Psychology Review*, *10*(3), 251–296.

Tausendpfund, M. (2018). *Quantitative Methoden in der Politikwissenschaft: Eine Einführung*. *Grundwissen Politik*. Springer VS.

Thompson, M. Y., Brandes, D. & Kney, A. D. (2012). Using electronic conductivity and hardness data for rapid assessment of stream water quality. *Journal of environmental management*, *104*, 152–157.

Tiemann, R. & Körbs, C. (2014). Die Fragebogenmethode, ein Klassiker der empirischen didaktischen Forschung. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 283–295). Springer Berlin Heidelberg.

Tierney, M. J. (1996). Practical examples of polymer-based chemical sensors. In R. F. Taylor & J. S. Schultz (Hrsg.), *Handbook of chemical and biological sensors* (S. 351–371). Inst. of Physics Publ.

Tiettmeyer, J. M., Coleman, A. F., Balok, R. S., Gampp, T. W., Duffy, P. L., Mazzarone, K. M. & Grove, N. P. (2017). Unraveling the Complexities: An Investigation of the Factors That Induce Load in Chemistry Students Constructing Lewis Structures. *Journal of Chemical Education*, *94*(3), 282–288.

Tigges, A. (2008). *Geschlecht und digitale Medien*. VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Tokan, M. K. & Imakulata, M. M. (2019a). Correlation between motivation and learning behavior with learning achievement: A case study on the Biology Education Department Faculty of Teacher Training and Education University of Nusa Cendana. *Journal of Physics: Conference Series*, *1157*, 42128.

Tokan, M. K. & Imakulata, M. M. (2019b). The effect of motivation and learning behaviour on student achievement. *South African Journal of Education*, *39*(1), 1–8.

Trempler, K., Schellenbach-Zell, J. & Gräsel, C. (2013). Der Einßuss der Motivation von Lehrpersonen auf den Transfer von Innovationen. In M. Rürup & I. Bormann (Hrsg.), *Innovationen im Bildungswesen* (S. 329–347). Springer Fachmedien Wiesbaden.

Tukey, J. W. (1977). *Exploratory data analysis*. *Addison-Wesley series in behavioral science quantitative methods*. Addison-Wesley.

Tullis, T. S. & Stetson, J. N. (2004). *A Comparison of Questionnaires for Assessing Website Usability*. Minneapolis, Minnesota.

Umweltbundesamt. (2017). *Gewässer in Deutschland: Zustand und Bewertung.*

Umweltbundesamt. (2022). *Biologische Überwachung der Flüsse*. https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/fluesse/ueberwachung-bewertung/biologisch#bewertungsinstrumente-der-wrrl-oekologischer-zustand (Zugriff am 19. Januar 2023).

van Buuren, S. & Groothuis-Oudshoorn, K. (2022). *Multivariate Imputation by Chained Equations: [R Package mice version 3.15.0]*. https://cran.r-project.org/web/packages/mice/mice.pdf (Zugriff am 20. März 2023).

van de Vijver, F. J. R. & Hambleton, R. K. (1996). Translating Tests: Some Practical Guidelines. *European Psychologist*, *1*(2), 89–99.

van Merriënboer, J. J. G. & Ayres, P. (2005). Research on cognitive load theory and its design implications for e-learning. *Educational technology research and development*, *53*(3), 1042–1629.

van Merriënboer, J. J. G., Kirschner, P. A. & Kester, L. (2003). Taking the Load Off a Learner's Mind: Instructional Design for Complex Learning. *Educational Psychologist*, *38*(1), 5–13.

van Merriënboer, J. J. G. & Sweller, J. (2005). Cognitive Load Theory and Complex Learning: Recent Developments and Future Directions. *Educational Psychology Review*, *17*(2), 147–177.

Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B. & Davis, F. D. (2003). User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly*, *27*(3), 425–478.

Vereinigung Deutscher Gewässerschutz e.V. (2011). *Ökologische Bewertung von Fließgewässern* (Schriftenreihe der Vereinigung Deutscher Gewässerschutz). Vereinigung Deutscher Gewässerschutz (VDG) e.V, *64*.

Vogelsang, C., Finger, A., Laumann, D. & Thyssen, C. (2019). Vorerfahrungen, Einstellungen und motivationale Orientierungen als mögliche Einflussfaktoren auf den Einsatz digitaler Werkzeuge im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, *25*(1), 115–129.

Voogt, J. (2012). Are teachers ready to teach in the knowledge society? Considerations based on empirical findings. In R. Schulz-Zander, B. Eickelmann, H. Moser, H. Niesyto & P. Grell (Hrsg.), *Jahrbuch Medienpädagogik 9* (S. 17–28). VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Vorholzer, A. (2022). *Forschungsschwerpunkte.* Technische Universität München. https://www.edu.sot.tum.de/ddp/forschung/ (Zugriff am 16. März 2023).

Waffner, B. (2020). Unterrichtspraktiken, Erfahrungen und Einstellungen von Lehrpersonen zu digitalen Medien in der Schule. In A. Wilmers, C. Anda, C. Keller & M. Rittberger (Hrsg.), *Bildung im digitalen Wandel: Die Bedeutung für das pädagogische Personal und für die Aus- und Fortbildung* (S. 57–102). Waxmann Verlag GmbH.

Walter, D. (2018). *Nutzungsweisen bei der Verwendung von Tablet-Apps*. Springer Fachmedien Wiesbaden.

Wang, F. H. On using data-mining technology for browsing log file analysis in asynchronous learning environment. *WIT transactions on state-of-the-art in science and engineering*, 2005–2006.

Wang, J., Zhang, Z. & Johnson, B. (2019). Low flows and downstream decline in phytoplankton contribute to impaired water quality in the lower Minnesota River. *Water research*, *161*, 262–273.

Wenzel, M. & Wilhelm, T. (2016). Einstellung von Physik-Gymnasiallehrern zum Computereinsatz. In C. Maurer (Hrsg.), *Authentizität und Lernen - das Fach in der Fachdidaktik. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Jahrestagung in Berlin 2015* (S. 214–216). Universität Regensburg.

Werra-Kalibergbau-Museum. (2021). *Informationen und Zahlen zum Monte Kali*. https://www.kalimuseum.de/monte_kali/zahlen_daten_fakten/information_und_zahlen_zum_monte_kali.html (Zugriff am 19. Januar 2023).

Whitehead, P. G., Wilby, R. L., Battarbee, R. W., Kernan, M. & Wade, A. J. (2009). A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological Sciences Journal*, *54*(1), 101–123.

Wickham, H. & Bryan, J. (2023). *Read Excel Files: [R Package readxl version 1.4.1]*. https://readxl.tidyverse.org (Zugriff am 20. März 2023).

Wickham, H., Chang, W., Henry, L., Pedersen, T. L., Takahashi, K., Wilke, C., Woo, K., Yutani, H. & Dunnington, D. (2023). *Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics: [R package ggplot2 version 3.4.1]*. https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html (Zugriff am 20. März 2023).

Wickham, H., Francois, R., Henry, L., Müller, K., Vaughan, D. & PBC, P. (2023). *A Grammar of Data Manipulation: [R package dplyr version 1.1.0]*. https://cran.r-project.org/web/packages/dplyr/index.html (Zugriff am 20. März 2023).

Wigfield, A. (1994). Expectancy-Value Theory of Achievement Motivation: A Developmental Perspective. *Educational Psychology Review*, *6*(1), 49–78.

Wigfield, A. & Cambria, J. (2010). Expectancy-value theory: retrospective and prospective. In T. C. Urdan & S. A. Karabenick (Hrsg.), *Advances in Motivation and Achievement. The Decade Ahead: Theoretical Perspectives on Motivation and Achievement* (Bd. 16, S. 35–70). Emerald Group Publishing Limited.

Wigfield, A. & Eccles, J. S. (1992). The Development of Achievement Task Values: A Theoretical Analysis. *Developmental Review*, *12*.

Wigfield, A. & Eccles, J. S. (2000). Expectancy-Value Theory of Achievement Motivation. *Contemporary educational psychology*, *25*(1), 68–81.

Wigfield, A. & Eccles, J. S. (2020). 35 years of research on students' subjective task values and motivation: A look back and a look forward. In A. J. Elliot (Hrsg.), *Advances in Motivation Science. Advances in motivation science* (Bd. 7, S. 161–198). Elsevier.

Wiggenhorn, G. & Vorndran, O. (2003). *Computer in die Schule: Eine internationale Studie zu regionalen Implementationsstrategien*. Verl. Bertelsmann Stiftung.

Wilcox, R. R. (2013). *Introduction to Robust Estimation and Hypothesis Testing: Introduction to Robust Estimation and Hypothesis Testing* (3. Aufl.). *Statistical Modeling and Decision Science Ser*. Elsevier Science & Technology.

Wild, E. & Möller, J. (Hg.). (2015). *Pädagogische Psychologie*. Springer Berlin Heidelberg.

Wirtz, M. A. & Caspar, F. (2002). *Beurteilerübereinstimmung und Beurteilerreliabilität: Methoden zur Bestimmung und Verbesserung der Zuverlässigkeit von Einschätzungen mittels Kategoriensystemen und Ratingskalen*. Hogrefe Verl. für Psychologie.

Wuhrmann, K. & Woker, H. (1949). Beiträge zur Toxikologie der Fische. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, *11*(1-2), 210–244.

Xie, Y. (o. J.). *A General-Purpose Package for Dynamic Report Generation in R: [R Package knitr version 1.42]*. https://yihui.org/knitr/ (Zugriff am 20. März 2023).

Xie, Y. (2015). *Dynamic documents with R and knitr* (2. ed.). Taylor & Francis.

Zaki, M. J. (2001). An efficient algorithm for mining frequent sequences by a new strategy without support counting. *Machine Learning*, *42*, 31–60.

Zentgraf, C. & Lampe, A. (2012). Integration neuer Medien im Projekt "Schule interaktiv Transfer", Nachhaltigkeit durch Peer-to-Peer-Konzepte. In R. Schulz-Zander, B. Eickelmann, H. Moser, H. Niesyto & P. Grell (Hrsg.), *Jahrbuch Medienpädagogik 9* (S. 133–160). VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Zimmermann-Timm, H. (2011). Versalzung von Gewässern. In Lozan, J. L. H. Graßl, P. Hupfer, L. Karbe & C.-D. Schönwiese (Hrsg.), *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?* (3. Aufl., S. 197–202).

Zukić, M., Đapo, N. & Husremović, D. (2016). Construct and Predictive Validity of an Instrument for Measuring Intrinsic, Extraneous and Germane Cognitive Load. *Universal Journal of Psychology*, *4*(5), 242–248.

Zumbroich, T. & Müller, A. (1999). *Gewässergütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland: Verfahren für kleine und mittelgroße Gewässer.*

Zumbroich, T., Müller, A. & Friedrich, G. (Hg.). (1999). *Strukturgüte von Fließgewässern*. Springer Berlin Heidelberg.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wellenmodell des Transfers nach Jäger (2004). 12

Abbildung 2: Angenommenes Modell der Transferbarrieren. 15

Abbildung 3: Die Interaktion von Quell- und Nutzersystem über das temporäre kollaborative System im CBAM-Modell. 22

Abbildung 4: Die Konstrukte und Systeme des Concerns-Based Adoption Model in der Übersicht. 25

Abbildung 5: Die drei Konstrukte des Concerns-Based Adoption Model. 26

Abbildung 6: Verlauf der Stages of Concern Profile im zeitlichen Zusammenhang mit dem Implementationsprozess. 31

Abbildung 7: Modell des Selbstkonzepts 47

Abbildung 8: Das Erwartung-Wert-Modell der leistungsbezogenen Auswahl und des Erfolgs. 53

Abbildung 9: Modell des Lernens mit Multimedia 64

Abbildung 10: Ebenen chemischer Prozesse. 78

Abbildung 11: Wegweiser zur Nutzung der virtuellen Labore. 97

Abbildung 12: Gegenständliche versus organisatorische Grafiken. 99

Abbildung 13: Kontiguitäts-Prinzip in der Anwendung auf Ebenen chemischer Prozesse. 100

Abbildung 14: Kontiguitäts-Prinzip in der Gestaltung der Aufgaben. 101

Abbildung 15: Modalitäts-Prinzip im Kontext der Lernvideos. 102

Abbildung 16: Kohärenz-Prinzip. 103

Abbildung 17: Personalisierungs-Prinzip. 104

Abbildung 18: Segmentierungs-Prinzip. 105

Abbildung 19: Förderung der kognitiven Flexibilität. 106

Abbildung 20: Kompetenz- und Anforderungsbereiche der Bildungsstandards für das Fach Chemie. 108

Abbildung 21: Unterrichtsverlaufsplan der ersten Doppelstunde 119

Abbildung 22: Unterrichtsverlaufsplan der zweiten Doppelstunde 120

Abbildung 23: Unterrichtsverlaufsplan der dritten Doppelstunde 121

Abbildung 24: Tagesverlauf der Sauerstoffsättigung. 125

Abbildung 25: Didaktisch reduzierte Darbietung des Stickstoffkreislaufs. 126

Abbildung 26: Übersicht über die fertiggestellten virtuellen Labore. 129

Abbildung 27: Schematischer Aufbau des Sensors für gelösten Sauerstoff 134

Abbildung 28: Illustration der Elektrodenvorgänge im Mackereth-Sensor 135

Abbildung 29: Längs-, Quer- und Tiefenprofil eines Fließgewässers 145

Abbildung 30: Bauteile des Sensors zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit 146

Abbildung 31: Schnittzeichnung durch den Sensor zur Fließgeschwindigkeit 146

Abbildung 32: Auszug aus dem überarbeiteten Fragebogeninstrument 155

Abbildung 33: Verlauf der Lerneinheit. 168

Abbildung 34: Items in Ergänzung zum Flow-Kurzfragebogen zur Erfassung der Passung von Fähigkeit und Anforderung 171

Abbildung 35: Einblick in die durch das Lernmanagementsystem bereitgestellten Log-Daten am Beispiel des virtuellen Labors zur Sauerstoffsättigung. 181

Abbildung 36: Absolute Werte der Antworthäufigkeit auf Itemebene zu den Stages of Concern 188

Abbildung 37: Verteilung der Antworthäufigkeiten über alle Items des SoC-Fragebogens. 189
Abbildung 38: QQ-Plot der Verteilung zu Item SoC_N_5:..... 191
Abbildung 39: Linienplot aller Personenprofile der Stages of Concern. 192
Abbildung 40: Personenprofil einer der als "Nicht-Nutzer mit Ideen" identifizierten Lehrpersonen. 194
Abbildung 41: Personenprofile der Stages of Concern im Überblick..... 195
Abbildung 42: Identifiziertes Gruppenprofil der Stages of Concern. 196
Abbildung 43: Fehlende Werte zur Skala Einstellung gegenüber digitalen Medien. 197
Abbildung 44: Boxplot-Darstellung der Items der Skala zur Einstellung gegenüber digitalen Medien. 198
Abbildung 45: Antwortverteilung der Versuchspersonen in Bezug auf die Skala zur Einstellung gegenüber digitalen Medien. 199
Abbildung 46: Heatplot zur Skala Einstellung gegenüber digitalen Medien..... 200
Abbildung 47: Verteilung der fehlenden Daten der Skala zum Selbstkonzept digitale Medien. 201
Abbildung 48: Verteilung der Ratingoptionen zur Skala Selbstkonzept digitale Medien. 202
Abbildung 49: Antworthäufigkeiten zum Konstrukt Selbstkonzept im Umgang mit digitalen Medien. 203
Abbildung 50: Verteilung der fehlenden Daten der Items zur Wertzuschreibung..... 205
Abbildung 51: Antwortverteilung der Items der Skala zur Wertzuschreibung..... 206
Abbildung 52: Heatplot zur Skala Wertzuschreibung an digitale Endgeräte..... 207
Abbildung 53: Boxplotdarstellung der Skala zur Wertzuschreibung. 208
Abbildung 54: Boxplots der Skalenmittelwerte der affektiven Variablen der Lehrpersonen 210
Abbildung 55: Heatplot der Korrelationskoeffizienten der Konstrukte in der Stichprobe der Lehrpersonen. 211
Abbildung 56: Verteilung der fehlenden Daten über die Items der Flow-Skala zum Testzeitpunkt 1. 219
Abbildung 57: Antwortverteilung zur Flow-Skala bei Testzeitpunkt 1. 220
Abbildung 58: Einstichproben-t-Test zum Abgleich des Flow-Erlebens in der Vorbereitung der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Statistik-Aufgabe" (gestrichelte Linie). 222
Abbildung 59: Abbildung links: Einstichproben-t-Test zum Abgleich des Flow-Erlebens in der Vorbereitung der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Computerspiel Roboguard " (gestrichelte Linie). Abbildung rechts: Normierung „Vorlesung Ende“ im Abgleich mit dem Flow-Erleben zum TZP1..... 222
Abbildung 60: Abgleich des Flow-Erlebens in der Durchführungsphase der Lerneinheit mit den Normierungsstudien Computerspiel (links) und Vorlesung Ende (rechts). 223
Abbildung 61: Abgleich des Flow-Erlebens in der Nachbereitung der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Computerspiel Roboguard " (gestrichelte Linie). 224
Abbildung 62: QQ-Plots für die Verteilungen zum Konstrukt Flow über die drei Testzeitpunkte. 225
Abbildung 63: ANOVA Flow-Erleben. 226
Abbildung 64: Histogrammplots der Items zur Skala Besorgniskomponente des Flows. 227
Abbildung 65: Antwortverteilung zur Skala Besorgniskomponente des Flows. 228
Abbildung 66: Einstichproben-t-Test zum Abgleich der Besorgniskomponente des Flow-Erlebens in der Vorbereitung der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Computerspiel Roboguard" (gestrichelte Linie, linke Abbildung) und der ESM-Studie (rechte Abbildung)..... 229

Abbildung 67: Einstichproben-t-Test zum Abgleich der Besorgniskomponente des Flow-Erlebens in der Durchführung der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Computerspiel Roboguard" (gestrichelte Linie, linke Abbildung). Die rechte Abbildung zeigt den Abgleich derselben Normierungsstudie mit dem Testzeitpunkt Nachbereitung. 230

Abbildung 68: ANOVA Besorgniskomponente des Flows. 231

Abbildung 69: Übersicht über die Verteilung der fehlenden Werte der Items zu Passung von Anforderung und Fähigkeit. 232

Abbildung 70: Verteilung der Ratingoptionen zur Subskala Passung von Fähigkeit und Anforderung. 233

Abbildung 71: Histogramme der einzelnen Items der Subskala Passung von Fähigkeit und Anforderung. 233

Abbildung 72: Verlauf der Mittelwerte der Items zu Anforderung, Fähigkeit und Passung über die drei Testzeitpunkte. 235

Abbildung 73: QQ-Plots für das Item zur Anforderung. 236

Abbildung 74: QQ-Plots für das Item zur Fähigkeit. 236

Abbildung 75: QQ-Plots für das Item zur Passung. 236

Abbildung 76: ANOVA für das Item zur wahrgenommenen Anforderung. 237

Abbildung 77: Verteilung der fehlenden Daten zum FAM über alle TZP. 238

Abbildung 78: Antwortverteilung über alle Items des Fragebogens zur aktuellen Motivation über die drei Testzeitpunkte hinweg. 239

Abbildung 79: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der Subskala Herausforderung des FAM in der Vorbereitung der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Biology-Lab" (gestrichelte Linie, linke Abbildung). Die rechte Abbildung zeigt den Abgleich der Normierungsstudie „induktives Denken“ mit dem Testzeitpunkt Vorbereitung. 240

Abbildung 80: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der Subskala Herausforderung des FAM in der Durchführung der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Biology-Lab" (gestrichelte Linie, linke Abbildung). Die rechte Abbildung zeigt den Abgleich der Normierungsstudie „induktives Denken“ mit dem Testzeitpunkt Durchführung. 241

Abbildung 81: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der Subskala Herausforderung des FAM in der Durchführung der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Biology-Lab" (gestrichelte Linie, linke Abbildung). Die rechte Abbildung zeigt den Abgleich der Normierungsstudie „induktives Denken“ mit dem Testzeitpunkt Nachbereitung. 241

Abbildung 82: QQ-Plots der Subskala zur wahrgenommenen Herausforderung mit dem aggregierten Datensatz über alle drei Testzeitpunkte hinweg. 242

Abbildung 83: ANOVAFAM Herausforderung. 243

Abbildung 84: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der Subskala Interesse des FAM in der Vorbereitungsphase der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Biology-Lab" (gestrichelte Linie, linke Abbildung). Rechts: Abgleich der Normierungsstudie „induktives Denken“ mit dem Testzeitpunkt Vorbereitung. 245

Abbildung 85: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der Subskala Interesse des FAM in der Durchführungsphase der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Biology-Lab" (gestrichelte Linie, linke Abbildung). Die rechte Abbildung zeigt den Abgleich der Normierungsstudie „induktives Denken“ mit dem Testzeitpunkt Durchführung. 245

Abbildung 86: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der Subskala Interesse des FAM in der Nachbereitung der Lerneinheit (gepunktete Linie) mit der Normierung "Biology-Lab" (gestrichelte Linie, linke Abbildung). Die rechte Abbildung zeigt den Abgleich der Normierungsstudie „induktives Denken“ mit dem Testzeitpunkt Nachbereitung. 246

Abbildung 87: QQ-Plots der FAM-Subskala Interesse. 247

Abbildung 88: ANOVA FAM Interesse. 248

Abbildung 89: Boxplot-Darstellung der deskriptiven Ergebnisse der FAM-Subskala zur wahrgenommenen Erfolgswahrscheinlichkeit. 250

Abbildung 90: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der ermittelten Ergebnisse der FAM Subskala Erfolgswahrscheinlichkeit über die drei Testzeitpunkte hinweg mit der Normierungsstudie "BiologyLab". 251
Abbildung 91: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der ermittelten Ergebnisse der FAM Subskala Erfolgswahrscheinlichkeit über die drei Testzeitpunkte hinweg mit der Normierungsstudie "induktives Denken". 251
Abbildung 92: QQ-Plot der Daten zur FAM Subskala Erfolgswahrscheinlichkeit. 252
Abbildung 93: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der ermittelten Ergebnisse der FAM Subskala Misserfolgsbefürchtung über die drei Testzeitpunkte hinweg mit der Normierungsstudie "BiologyLab"..... 254
Abbildung 94: Einstichproben-t-Tests zum Abgleich der ermittelten Ergebnisse der FAM Subskala Misserfolgsbefürchtung über die drei Testzeitpunkte hinweg mit der Normierungsstudie "induktives Denken"..... 254
Abbildung 95: QQ-Plots der Subskala Misserfolgsbefürchtung des FAM..... 255
Abbildung 96: ANOVA FAM Misserfolgsbefürchtung. 256
Abbildung 97: Anteile der fehlenden Werte über alle Items des Fragebogens zu Cognitive Load. 257
Abbildung 98: Antwortverteilung auf der elfstufigen Likert-Skala zur Erfassung des Cognitive Load über alle Testzeitpunkte..... 258
Abbildung 99: Boxplot-Darstellung der deskriptiven Ergebnisse zur Subskala Intrinsic Load. 259
Abbildung 100: QQ-Plots der Daten zur Subskala Intrinsic Load über die drei Testzeitpunkte. 260
Abbildung 101: QQ-Plots der Daten zum Extraneous Load. 261
Abbildung 102: ANOVA Extraneous Load. 262
Abbildung 103: Boxplot-Darstellung der deskriptiven Ergebnisse zur Subskala Germane Load. 263
Abbildung 104: QQ-Plots zur Subskala Germane Cognitive Load. 264
Abbildung 105: Verteilung der fehlenden Daten im Datensatz zur System Usability..... 265
Abbildung 106: Antwortverteilung der Items zur Usability. 266
Abbildung 107: Korrelationsmatrix der Subskalen auf Lernendenseite zum TZP1. 272
Abbildung 108: Heatmap-Plot der Korrelationen während des zweiten Testzeitpunktes (TZP2)..... 273
Abbildung 109: Zusammenhangsanalyse für den dritten Testzeitpunkt..... 274
Abbildung 110: Verweildauern der Nutzenden in den einzelnen Teilkapiteln des virtuellen Labors zu Aufbau der Messgeräte und allgemeinen Aspekten der Datenauswertung..... 275
Abbildung 111: Bearbeitungsverlauf von User 46 im virtuellen Labor zum Aufbau der Messgeräte..... 276
Abbildung 112: Bearbeitungsverlauf von User 81 im virtuellen Labor zum Aufbau der Messgeräte..... 276
Abbildung 113: Bearbeitungsverlauf von User 16 im virtuellen Labor zur Sauerstoffsättigung. 277
Abbildung 114: Bearbeitungsverlauf von User 4 im virtuellen Labor zur Sauerstoffsättigung. 277
Abbildung 115: Übersichtsdarstellung zum Evaluationskonzept. 316
Abbildung 116: Einblick in die interaktiven Simulationen am Beispiel der Mackereth-Elektrode zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts..... 330
Abbildung 117: Interaktive Zuordnungsaufgabe auf Basis von LearningApps..... I
Abbildung 118: Erläuterung der Zweipunkt-Kalibration im virtuellen Labor..... III
Abbildung 119: Ablesen von Volumenmessgeräten. III
Abbildung 120: Interaktive Beschriftungsaufgabe. IV
Abbildung 121: Versuch "Ammoniakspringbrunnen" im Video..... VII

Abbildung 122: Erklärung zum Versuch "Ammoniakspringbrunnen" mittels Skizzen VII
Abbildung 123: Stickstoffkreislauf in vereinfachter Darstellung VII
Abbildung 124: Eintragswege von Salzen in Flüsse XI
Abbildung 125: Verlauf der Werra im Kalirevier mit Messstellen und anthropogenen Eintragsstellen XIII
Abbildung 126: Reaktionen zur Entstehung saurer Niederschläge aus stickstoff- und schwefelhaltigen Gasen XV
Abbildung 127: Interaktive "Schiebe-Aufgabe" zur Zuordnung der korrespondierenden Säure-Base-Paare . XVI
Abbildung 128: Säurezugabe zu Wasser auf stofflicher Ebene, Teilchenebene und als Reaktionsgleichung. XVII
Abbildung 129: Standbilder der Animation zur Säurezugabe. XVII
Abbildung 130: Darstellung der Reaktionen des Kohlensäure-Gleichgewichts auf Teilchenebene sowie in Formelschreibweise XVIII
Abbildung 131: Reaktionsgleichungen zum Lösen von Kalk in Wasser ohne und mit Einfluss von CO_2 XIX
Abbildung 132: Das Ammonium-Ammoniak-Gleichgewicht und die Giftwirkung der beiden Formen auf Fischbestände XX
Abbildung 133: Druckausübung auf ein abgeschlossenes Gasvolumen über einer Flüssigkeit XXIII
Abbildung 134: Gegenüberstellung des Sauerstoff-Tagesverlaufs im Laborversuch und in der realen Messdatenerhebung an einem Gewässer XXIV
Abbildung 135: Verlauf des Sauerstoffgehalts über eine Woche hinweg, gemessen im Rhein bei Karlsruhe XXIV
Abbildung 136: Aufgabe zur elektrolytischen Leitfähigkeit. XXVIII
Abbildung 137: Skizze zum Verlauf des Rheins mit den in den Messdaten referenzierten Messstellen XXIX
Abbildung 138: Die Faktoren der Entstehung von Strömungen XXXI
Abbildung 139: Querschnittszeichnung eines Flusslaufes. XXXII
Abbildung 140: Grafische Erklärung des Phänomens Kehrwasser. XXXIV

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grundannahmen des Concerns-Based Adoption Model 24

Tabelle 2: Beschreibung und Abgrenzung der sieben Stages of Concern 29

Tabelle 3: Teilkompetenzen der Bildungsstandards für den mittleren Schulabschluss im Fach Chemie, welche in der Lerneinheit adressiert werden. 111

Tabelle 4: Anknüpfungsfähige Bausteine im Grund- und Leistungsfach Chemie in der Oberstufe im Sinne der Inhalte der konzipierten Lerneinheit 115

Tabelle 5: Teilkompetenzen der Bildungsstandards für die allgemeine Hochschulreife im Fach Chemie, welche in der Lerneinheit adressiert werden. 117

Tabelle 6: Im Rahmen der Lerneinheit angesprochene Kompetenzen nach dem Kompetenzmodell des Strategiepapiers digitale Bildung 123

Tabelle 7: Verwendete Sensoren des Einstein-Messsystems und deren Kenndaten nach Herstellerangaben. 130

Tabelle 8: Einwaagen der Standardlösungen zur Kalibration der ISE 138

Tabelle 9: Messinstrumente zur Erfassung der jeweiligen theoretischen Konstrukte auf Lehrendenseite 156

Tabelle 10: Übersicht über die zur Auswertung der quantitativen Daten auf der Seite der Lehrenden genutzten Packages 160

Tabelle 11: Theoriegeleitete und datengesteuerte Profile der Stages of Concern. 162

Tabelle 12: Deduktives Kategoriensystem, eigene Darstellung. 166

Tabelle 13: Messinstrumente zur Erfassung der jeweiligen theoretischen Konstrukte auf Lernendenseite 173

Tabelle 14: Übersicht der Packages, welche für die Datenauswertung auf der Seite der Lernenden herangezogen wurden. 175

Tabelle 15: Übersicht der Packages, welche für die Auswertung der Logfiles herangezogen wurden. 181

Tabelle 16: Kapitel- und Session-Parameter mit entsprechenden Referenzen. 182

Tabelle 17: Deskriptive Kennwerte (n = 56) der Skala zu Stages of Concern. 192

Tabelle 18: Deskriptive Kenndaten der Skala zur Erfassung der Einstellung gegenüber digitalen Medien auf Itemebene. 198

Tabelle 19: Deskritptive Kennwerte der Skala zum Selbstkonzept im Umgang mit digitalen Medien. 204

Tabelle 20: Deskriptive Kennwerte der Skala zur Wertzuschreibung an digitale Endgeräte. 208

Tabelle 21: Itemkennwerte der Instrumente zur Erhebung in der Zielgruppe der Lehrpersonen. 210

Tabelle 22: Kategoriensystem zur Kodierung mit Ankerbeispielen. 213

Tabelle 23: Itemschwierigkeiten und Maße der zentralen Tendenz für die Einzelitems zur Erfassung von Anforderung, Fähigkeit und Passung von Anforderung und Fähigkeit, n = 103. 234

Tabelle 24: Itemkennwerte TZP 1 „Vorbereitung“, paarweiser Ausschluss fehlender Daten. 267

Tabelle 25: Itemkennwerte TZP 2 „Durchführung“, paarweiser Ausschluss fehlender Daten 268

Tabelle 26: Itemkennwerte TZP 3 “Nachbereitung“, paarweiser Ausschluss fehlender Daten 269

Tabelle 27: Deskriptive Ergebnisse der betrachteten Subskalen zu allen drei Testzeitpunkten. 270

Tabelle 28: Anzahl der auswertbaren Logdatensätze je virtuellem Labor 275

Tabelle 29: Anforderungen an didaktische Konzepte zur Implementation einer digitalen Innovation in Schulen aus Sicht der Lehrpersonen 323

Tabelle 30: Lernziele des virtuellen Labors zu Aufbau, Bedienung und Auswertung und deren Anforderungsbereiche. II

Tabelle 31: Lernziele des virtuellen Labors zu Stickstofflieferanten in Gewässern und deren Anforderungsbereiche. VI

Tabelle 32: Lernziele des virtuellen Labors zum Chloridgehalt in Gewässern und deren Anforderungsbereiche. X

Tabelle 33: Lernziele des virtuellen Labors zum pH-Wert und deren Anforderungsbereiche. XV

Tabelle 34: Lernziele im virtuellen Labor Sauerstoffsättigung und deren Anforderungsbereiche. XXI

Tabelle 35: Lernziele und adressierte Anforderungsbereiche des virtuellen Labors zur Leitfähigkeit. XXVII

Tabelle 36: Lernziele und Anforderungsbereiche des virtuellen Labors zur Fließgeschwindigkeit..... XXX

Anhang

A) Beschreibung der evaluierten virtuellen Labore

Virtuelles Labor Aufbau, Bedienung und Auswertung

Vor dem Hintergrund der Digitalkompetenzen sowie als Vorbereitung auf die eigentlichen Versuchsdurchführungen bearbeiten die Lernenden zunächst ein virtuelles Labor mit dem inhaltlichen Fokus auf die Bedienung der Messgeräte, Datenauswertung und -interpretation.

1) Orientierung

Als Einführung in dieses virtuelle Labor werden zunächst diverse einfache Messgeräte (Geodreieck, Stoppuhr, Balkenwaage, …) illustrativ dargestellt und deren Alltagsrelevanz thematisiert. Dabei wird bereits der Aspekt der Messgenauigkeit und Kalibration mit angeführt. Daran anknüpfend ordnen die Lernenden in einer interaktiven Zuordnungsaufgabe Messgeräte deren Anwendungsfällen zu (Abbildung 117).

Abbildung 117: Interaktive Zuordnungsaufgabe auf Basis von LearningApps , hier werden Messgeräte und deren Anwendungsbereiche durch die Lernenden via drag and drop kombiniert (Screenshot, Projekt Open MINT Labs).

Weiterhin werden die Lernziele (Tabelle 30) transparent gemacht und Wegweiser sowie Schlagwortwolke der Kernbegriffe des Labors vorgestellt.

Tabelle 30: Lernziele des virtuellen Labors zu Aufbau, Bedienung und Auswertung und deren Anforderungsbereiche.

LZ 1	Sie können die Sensorsysteme aufbauen.	AFB I
LZ 2	Sie können den Unterschied zwischen *tatsächlichem Wert* und *gemessenem Wert* erklären.	AFB I
LZ 3	Sie können die begrenzte Genauigkeit von Messwerten erklären.	AFB II
LZ 4	Sie können die Notwendigkeit der Kalibrierung erklären und eine Kalibrierung durchführen.	AFB II-III
LZ 5	Sie können anhand eines Beispiels erläutern, wie Messfehler entstehen können.	AFB III

2) Grundlagen

Das Theoriekapitel startet zunächst mit dem Aufbau der Messgeräte. Hierzu sind die benötigten Bauteile abgebildet und beschrieben, außerdem werden ein exemplarisch zusammengebautes Messgerät mit Datenlogger vorgestellt und die Schritte des Aufbaus explizit ausgeführt.

Das Teilkapitel Bedienung befasst sich ausführlich mit den in der App vorzunehmenden Einstellungen und Darstellungsoptionen. Hierzu wurden Detailabbildungen aus der App als Screenshots in das virtuelle Labor mit eingebunden, um die Wiedererkennbarkeit sicherzustellen. Durch die detaillierte und schrittweise Betrachtung kann darüber hinaus dem Kontiguitätsprinzip entsprochen werden.

Im nächsten Schritt wird die Notwendigkeit einer Kalibrierung und die Funktionsweise einer Zweipunkt-Kalibrierung erläutert (Abbildung 118). Die textlichen Ausführungen werden durch Hilfebuttons zur Erläuterung von Hintergrundinformationen und *Mouse-over*-Einblendungen zur Erklärung der Kalibriergerade an einem Beispiel ergänzt. Ein Merksatz fasst die wichtigsten Informationen prägnant zusammen.

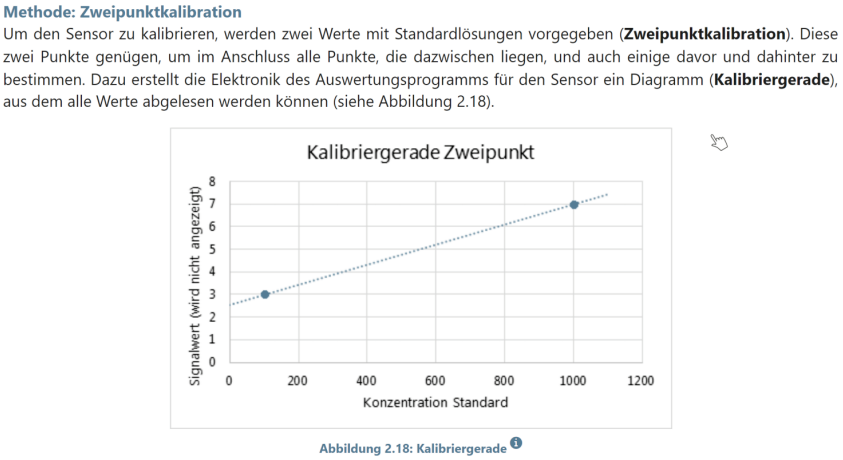


Abbildung 118: Erläuterung der Zweipunkt-Kalibration im virtuellen Labor.

Beispiele für Messwertabweichungen werden anhand verschiedener Temperaturmessungen und Füllständen von Volumenmessgeräten (Ablesegenauigkeit) angeführt (Abbildung 119). Ergänzend wird auf die gängige Praxis der Aufnahme von Messreihen zur Reduzierung des Messfehlers verwiesen.

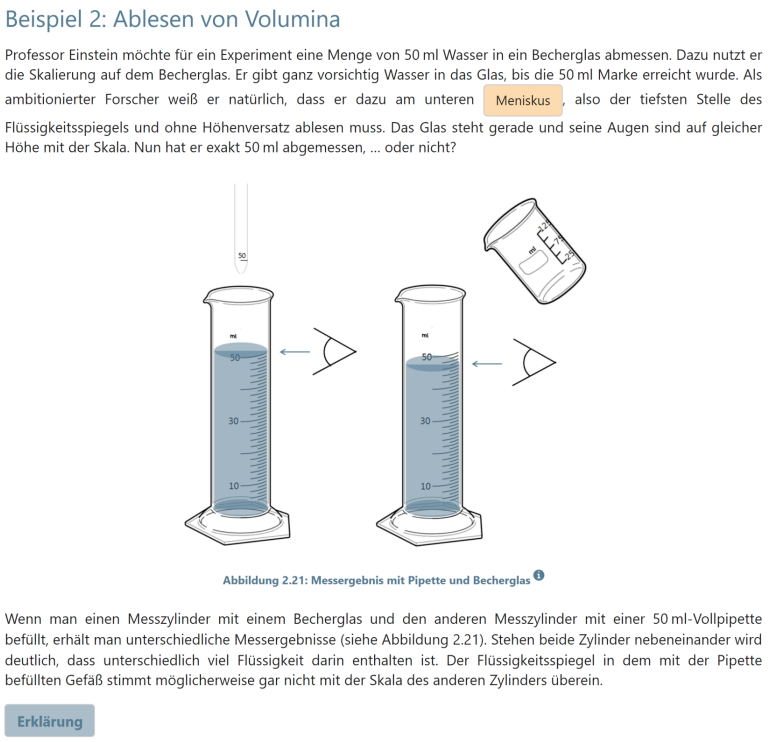


Abbildung 119: Ablesen von Volumenmessgeräten. Hilfebuttons zur Erklärung des Begriffes "Meniskus" sowie zur Erklärung des Phänomens wurden interaktiv eingebunden (Screenshot, Projekt Open MINT Labs).

3) Experiment

Das Kapitel Experiment behandelt den exemplarischen Aufbau eines Sensorsystems. Hierzu werden zunächst die Materialien als Bilderkarussell vorgestellt, anschließend können die zusammengebauten Materialien an einem Bild interaktiv beschriftet werden (Abbildung 120).

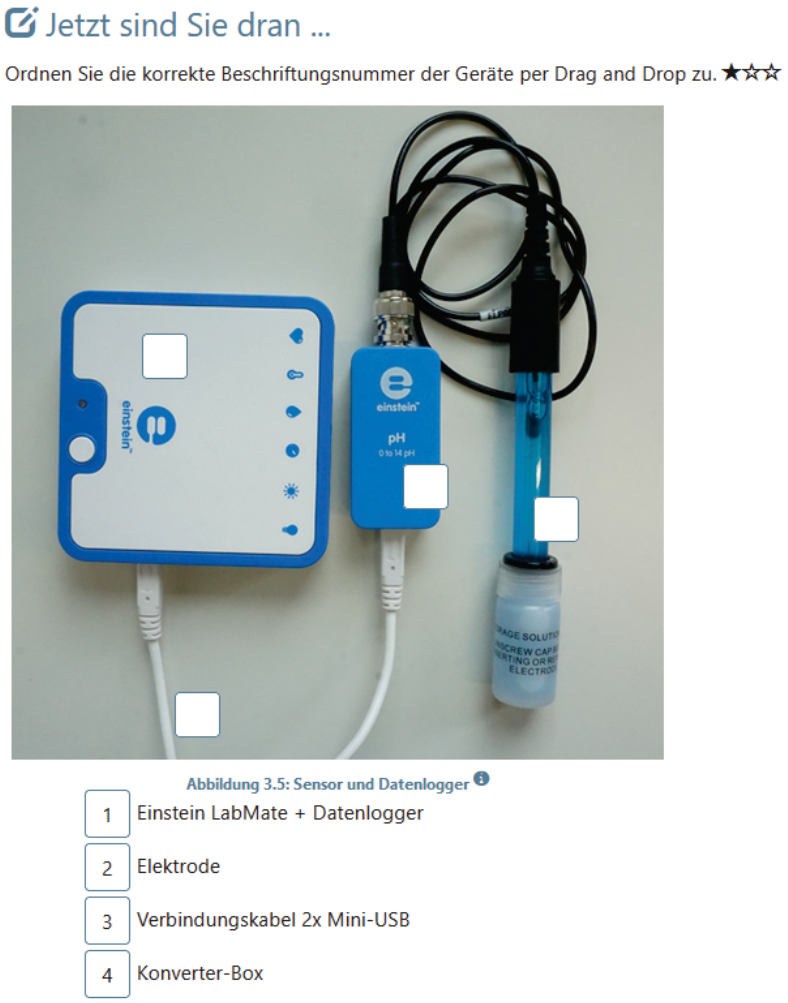


Abbildung 120: Interaktive Beschriftungsaufgabe. Die Lernenden können die jeweiligen Bezeichnungen im authentischen Bild zuordnen und ihre Zuordnungen überprüfen (Screenshot, Projekt Open MINT Labs).

Die allgemeine Vorgehensweise zur Datenerfassung mit den Sensorsystemen wird anschließend in Textform sowie als Lehrvideo und herunterladbare PDF-Datei dargeboten. Ergänzt werden darüber hinaus Informationen über die Messgenauigkeit der einzelnen Sensoren. Eine separate Beobachtung und Datenauswertung erfolgen in diesem virtuellen Labor nicht.

4) Anwendung

Im Anwendungskapitel werden weitere Beispiele für Alltagsgeräte, welche einer kalibrierten Sensorik bedürfen, vorgestellt, darunter Drohnen und Digitalkameras.

Eine Übung mit interaktiv abrufbaren Lösungsansätzen nimmt die Passung des Messgerätes zum jeweiligen Messbereich in den Blick.

5) Reflexion

Als Sicherung der Lerneinheit wird zunächst ein interaktiver Quick-Check angeboten, in welchem sich die Lernenden durch Abruf vorgefertigter Erwartungshorizonte selbst kontrollieren können. Abschließend werden eine schriftliche Ergebnissicherung als herunterladbare PDF-Datei zur Verfügung gestellt und eine Selbstevaluation mit Verlinkungen auf die jeweils bei Bedarf zu wiederholenden Teilkapitel angeboten.

Virtuelles Labor Stickstofflieferanten

1) Orientierung

Der motivationale Einstieg in die Thematik des virtuellen Labors erfolgt als Abfrage von Vorwissen. Die Schüler:innen sollen ihnen bekannte Stickstoffverbindungen, deren Nutzung und Herkunft notieren. Als Hilfestellung stehen mehrere bildliche Darstellungen zur Verfügung, welche gestuft und bedarfsgerecht abgerufen werden können. Hierbei wird auf die Bereiche Landwirtschaft, Viehzucht, Boden und Industrie abgezielt. Im ebenfalls abrufbaren Lösungsvorschlag werden diese Beispiele erläutert und um weitere exemplarische Stickstoffquellen erweitert. Gleichzeitig wird die Bedeutung von Stickstoffverbindungen für das Pflanzenwachstum unter Berücksichtigung der erforderlichen Unterscheidung von metabolisch nutzbarem und nicht nutzbarem Stickstoff herausgestellt.

Als Lernvoraussetzungen für die Durchführung des virtuellen Labors wurden Kenntnisse über die Themengebiete Säure-Base-Theorie sowie Kenntnis der Begriffe Oxidation und Reduktion angeführt. Die Relevanz dieses Vorwissens ergibt sich aus der Bedeutung für die in der Natur vorliegenden Stickstoffverbindungen und deren Umwandlungsprozessen.

Das virtuelle Labor verfolgt Lernziele aller drei Anforderungsbereiche (Tabelle 31).

Tabelle 31: Lernziele des virtuellen Labors zu Stickstofflieferanten in Gewässern und deren Anforderungsbereiche.

LZ 1	Sie können die Eintragswege von Stickstoffverbindungen in Gewässer wiedergeben.	AFB I
LZ 2	Sie können den Ammonium- und Nitratgehalt wässriger Lösungen mithilfe des vorgestellten Messsystems eigenständig ermitteln.	AFB I
LZ 3	Sie können die Auswirkungen von Ammonium und Nitraten auf das Ökosystem *Gewässer* abschätzen.	AFB II-III
LZ 4	Sie können die Notwendigkeit der Kalibrierung erklären und eine Kalibrierung durchführen.	AFB II-III
LZ 5	Sie können anhand eines Beispiels erläutern, wie Messfehler entstehen können.	AFB III

2) Grundlagen

Zur Kontextualisierung der Lerneinheit werden einige Kernpunkte der neuen Düngeverordnung des Landes Rheinland-Pfalz (o.V., 2020) in einfachen Worten umrissen. Anschließend stellen die Lernenden einen Bezug zwischen überhöhtem Stickstoffeintrag in Gewässer und Industrie und Landwirtschaft her. Ein TV-Bericht zum Thema Blaualgenblüte in Badeseen dient dabei als lebensweltlicher Bezug.

Im weiteren Verlauf werden die theoretischen Grundlagen zur Emission, zur Deposition und letztlich der Stickstoffkreislauf erläutert. Ein Kernelement stellt dabei der videografisch (Abbildung 121) sowie durch Skizzen (Abbildung 122) ausführlich beschriebene Versuch zum Ammoniak-Springbrunnen dar, welcher die Wasserlöslichkeit von gasförmigem Ammoniak eindrucksvoll abbildet. Anknüpfend daran erfolgt eine Unterscheidung der Depositionsformen in trockene, feuchte und nasse Deposition, woraufhin zum Stickstoffkreislauf (Abbildung 123) übergeleitet wird. Die relevanten Vorgänge und Umwandlungsformen des Stickstoffs wurden hierzu grafisch aufbereitet und erläutert. Dieses Wissen wird weiterhin direkt mit der Zieldomäne Gewässer verknüpft, wobei die Lernenden durch eine interaktive Aufgabenstellung eigenständig die möglichen Auswirkungen des Eintrags von Nitrat und Ammonium in Gewässer beschreiben sollen. Mit Hilfe bildlicher sowie Hilfestellungen in Textform gelangen die Lernenden so zur Erkenntnis, dass Pflanzen – auch in Gewässern – einerseits Nährstoffe benötigen, dass jedoch andererseits ein Überangebot an Nährstoffen das Ökosystem schädigen kann. Exemplarisch wird in der abrufbaren Musterlösung auf eine Algenblüte in Folge zu hohen Nährstoffaufkommens und resultierend geringe Sauerstoffverfügbarkeit für andere Lebewesen im Gewässer verwiesen. Zum Abschluss des Grundlagen-Kapitels erfolgt ein Theorie-Check als Selbsttest in Form einer S*ingle Choice* LearningApp.

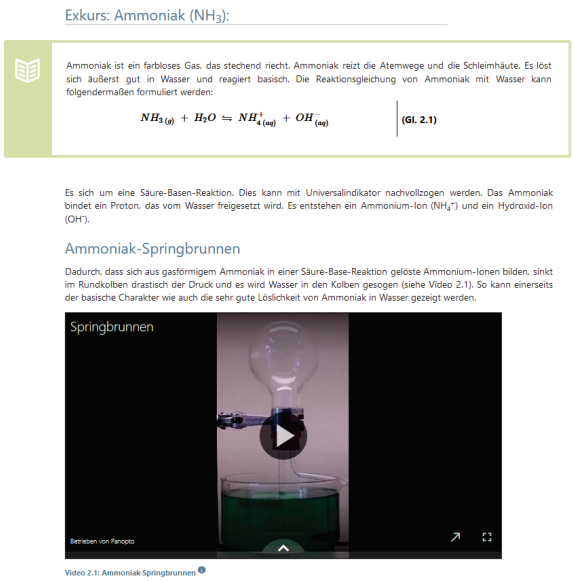


Abbildung 121: Versuch "Ammoniakspringbrunnen" im Video.

Screenshot OML (Screenshot, Projekt Open MINT Labs).

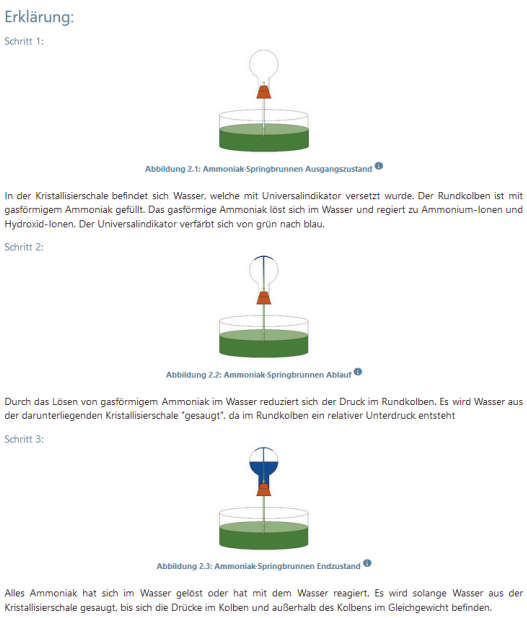


Abbildung 122: Erklärung zum Versuch "Ammoniakspringbrunnen" mittels Skizzen.

Screenshot OML (Screenshot, Projekt Open MINT Labs).

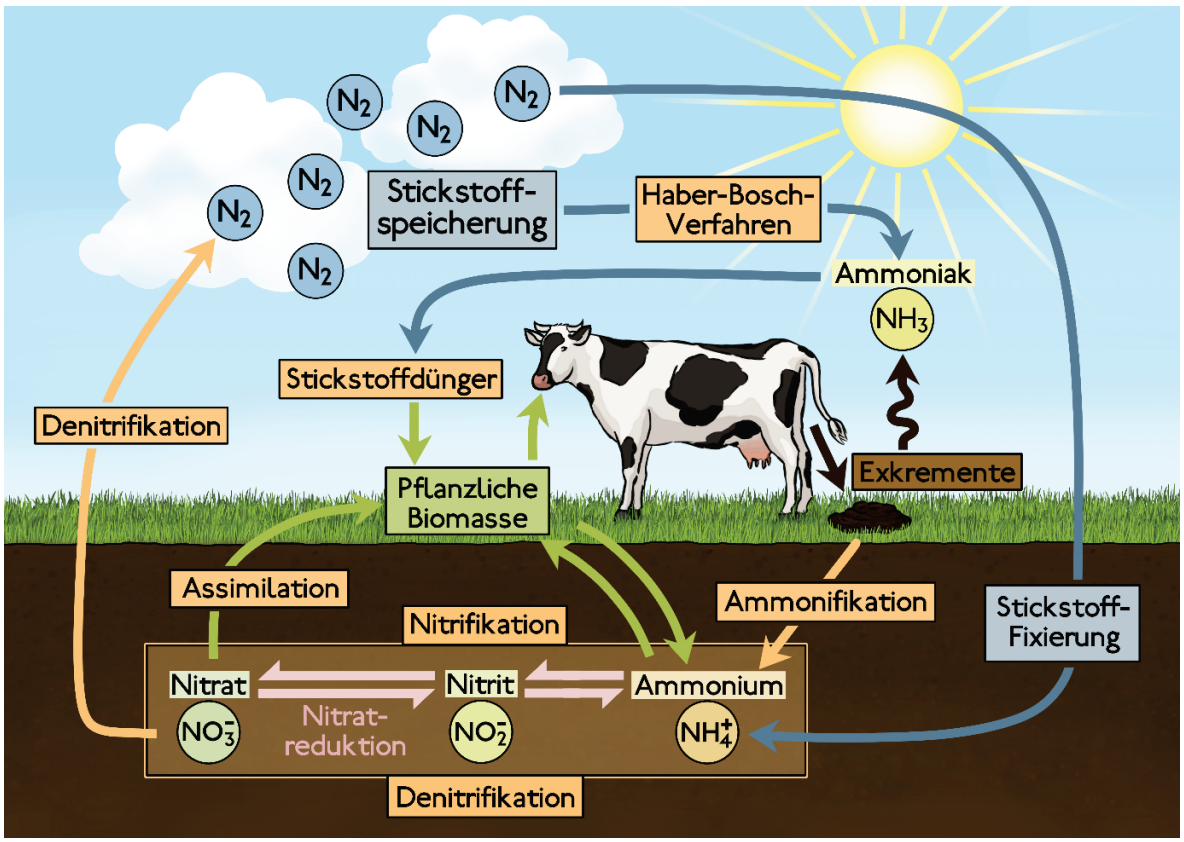


Abbildung 123: Stickstoffkreislauf in vereinfachter Darstellung (Jasmin Hirtl, Projekt Open MINT Labs).

3) Experiment

Vor der Durchführung des Experiments im Freiland erhalten die Lernenden im Baustein „Experiment“ Sicherheitshinweise, eine bebilderte Material- und Chemikalienliste sowie eine Videoanleitung zur Durchführung der Messungen. So vorbereitet können die Lernenden anschließend weitgehend eigenständig die Messwerterfassung im Freiland durchführen. Dabei arbeiten sie entlang der dann in Druckfassung vorliegenden Anleitungen sowie mit Bezug zu den Aufgabenstellungen:

1. Messen Sie an mehreren Stellen im Fließgewässer den Ammonium- und Nitratgehalt.
2. Stellen Sie eine Hypothese bezüglich der Entnahmestellen innerhalb eines Gewässers und dem zu erwartenden Messwert auf. Begründen Sie diese ausführlich.
3. Überlegen Sie, ob Sie weitere Informationen benötigen, um die gemessenen Werte später sinnvoll einordnen zu können.

Während Aufgaben 1 und 2 auf die Erarbeitung von Fachwissen (Umgang mit Geräten und Stoffen; Fachwissen strukturieren und Erklärungszusammenhänge herstellen), sowie die Erkenntnisgewinnung (naturwissenschaftlich untersuchen) abzielen, stellt Aufgabe 3 den Zusammenhang zum Gesamtökosystem her und bedient eher den Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung, da hier der naturwissenschaftliche Erkenntnisprozess reflektiert und in neue Zusammenhänge eingebettet werden soll (Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur, 2014, S. 126).

Die Auswertung der Messdaten erfolgt zunächst exemplarisch anhand bereitgestellter Daten der öffentlichen Messstellen. Durch die Bereitstellung von Musterdatensätzen wird sowohl ein standardisierter und damit transparenter Erwartungshorizont möglich, wie auch weiterhin die Nutzung der Daten ohne eine vorherige eigene Datenerhebung – dies ganz im Sinne der Sequenzierbarkeit der Lernumgebung. Hierbei werden erneut interaktive Aufgaben zur Verfügung gestellt, welche nunmehr auf den Kompetenzbereich Kommunikation (Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur, 2014, S. 126) fokussieren, da die Lernenden sowohl die Messdaten sinnvoll mit Hilfe eines Diagramms darstellen als auch Rückschlüsse aus dem Verlauf der Messdaten ziehen und mögliche Ursachen für den Verlauf der Datenkurven formulieren sollen.

4) Anwendung

Im Kapitel Anwendung wird das Erlernte in einen neuen Bezug gesetzt, indem inhaltlich die Gründüngung mittels Leguminosen als Alternative zur klassischen Düngung erläutert wird. Die Lernenden beurteilen anschließend Vor- und Nachteile der Methode

sowie deren Einsetzbarkeit für diverse landwirtschaftliche Betriebe. Auch hierzu ist eine Musterlösung abrufbar.

5) Reflexion

Zum Abschluss des virtuellen Labors können die Lernenden eine Zusammenfassung der relevanten Fachwissensinhalte im PDF-Format abrufen, sodass dies als Sicherungsphase anzusehen ist. Darüber hinaus ist eine Selbstevaluation durch einfache Ratingskalen gegeben, welche bei Bedarf direkt auf die jeweils relevanten Kapitel, in welchen die entsprechenden Inhalte nachgelesen und vertieft werden können, verweist.

Weiterhin wird im Zuge einer „*Fast-Finisher Activity*“ (Exkurs) auf die Problematik erhöhter Nitratgehalte für den Menschen, insbesondere für Säuglinge, hingewiesen. Der Prozess der Nitratreduktion zu Nitrit gekoppelt mit der physiologisch problematischen Inaktivierung des Hämoglobins zu Methämoglobin wird hierzu beschrieben und auf die toxischen Auswirkungen auf Kinder im Säuglingsalter verwiesen. Als Ursache für solche als „*Blue Baby Syndrom*“ bekannt gewordenen Erkrankungen stehen unter anderem Einträge von Düngemitteln oder Fäkalien in das Grund- und Trinkwasser in der Diskussion (Knobeloch et al., 2000).

Virtuelles Labor Chloridgehalt

1) Orientierung

Einleitend in das virtuelle Labor zum Chloridgehalt wird das Vorwissen der Lernenden durch eine interaktive Aufgabe aktiviert. Die Lernenden werden aufgefordert, ihnen aus dem Alltag bekannte Chloride und Salze sowie deren Vorkommen und Funktion zu benennen. Als gestuft abrufbare Hilfestellung hierzu stehen diverse Bilder zur Verfügung, welche Salze in folgenden Vorkommen oder Nutzungen abbilden: Kochsalz in der Küche, Salzskulpturen, Tränenflüssigkeit, Meerwasser, Streusalz im Winterdienst. Als einzige Lernvoraussetzung für dieses virtuelle Labor wird die Kenntnis der ionischen Bindung vorausgesetzt.

Das virtuelle Labor zum Chloridgehalt verfolgt die in Tabelle 32 angeführten Lernziele, die anvisierten Anforderungsbereiche nach Kultusministerkonferenz (2013) sind mit angegeben.

Tabelle 32: Lernziele des virtuellen Labors zum Chloridgehalt in Gewässern und deren Anforderungsbereiche.

LZ 1	Sie können die Eintragswege von Chlorid in Gewässer wiedergeben.	AFB I
LZ 2	Sie können den Chloridgehalt wässriger Lösungen mithilfe des vorgestellten Messsystems eigenständig ermitteln	AFB II
LZ 3	Sie können den Einfluss des Chloridgehaltes auf das Ökosystem Gewässer abschätzen	AFB II-III

Weiterhin werden der für die Labore übliche Wegweiser zur Transparentlegung der Bedienelemente und des Aufbaus sowie eine themenspezifische Wortwolke als erster Einblick in das Thema dargestellt.

2) Grundlagen

Das virtuelle Labor zum Chloridgehalt in Gewässern wird durch die Problemstellung einer zunehmenden Verödung der Gewässer und Uferstreifen in den deutschen Kalirevieren kontextualisiert. Es wird darauf verwiesen, dass der Kalibergbau insbesondere für die Düngemittelherstellung von immenser Bedeutung ist. Diese Funktion geht jedoch mit riesigen Mengen nicht weiter verwertbaren Abraums einher, welcher jahrzehntelang in Form von Abraumhalden deponiert wurde. Sowohl die bei der Aufreinigung der Salze anfallenden Abwässer als auch Sickerwässer aus den Abraumhalden fließen oberflächlich meist ungehindert in nahe Oberflächengewässer und erhöhen dort die Salzgehalte massiv. In der Folge verändert sich der Lebensraum so stark, dass nur wenige ursprünglich dort heimische Tier- und Pflanzenarten widerstandsfähig genug

sind, um weiterhin dort zu gedeihen. Diese Problemstellung betrifft insbesondere die Kalireviere an Werra und Weser. Zur bildhaften Verdeutlichung der Ausmaße, welche die Aufhaldungen annehmen können, wird auf die Kalihalde bei Heringen (im Volksmund „Monte Kali“ oder „Kalimandscharo“ genannt) verwiesen. Diese Halde mit einer Grundfläche von 114 ha und einer Höhe über Grund von 100-250m wächst pro Stunde um ca. 1.000 Tonnen Abraum an. Auf diese Weise wurden seit Beginn der Aufhaldung im Jahr 1976 allein an dieser einen Halde rund 236 Millionen Tonnen Abraum deponiert. (Werra-Kalibergbau-Museum, 2021).Im weiteren Verlauf des virtuellen Labors wird auf die schädigende Wirkung stark erhöhter Salzgehalte in Flüssen eingegangen. Eine Unterteilung der Salzeinträge nach verschiedenen Kriterien wird dargelegt (Abbildung 124).

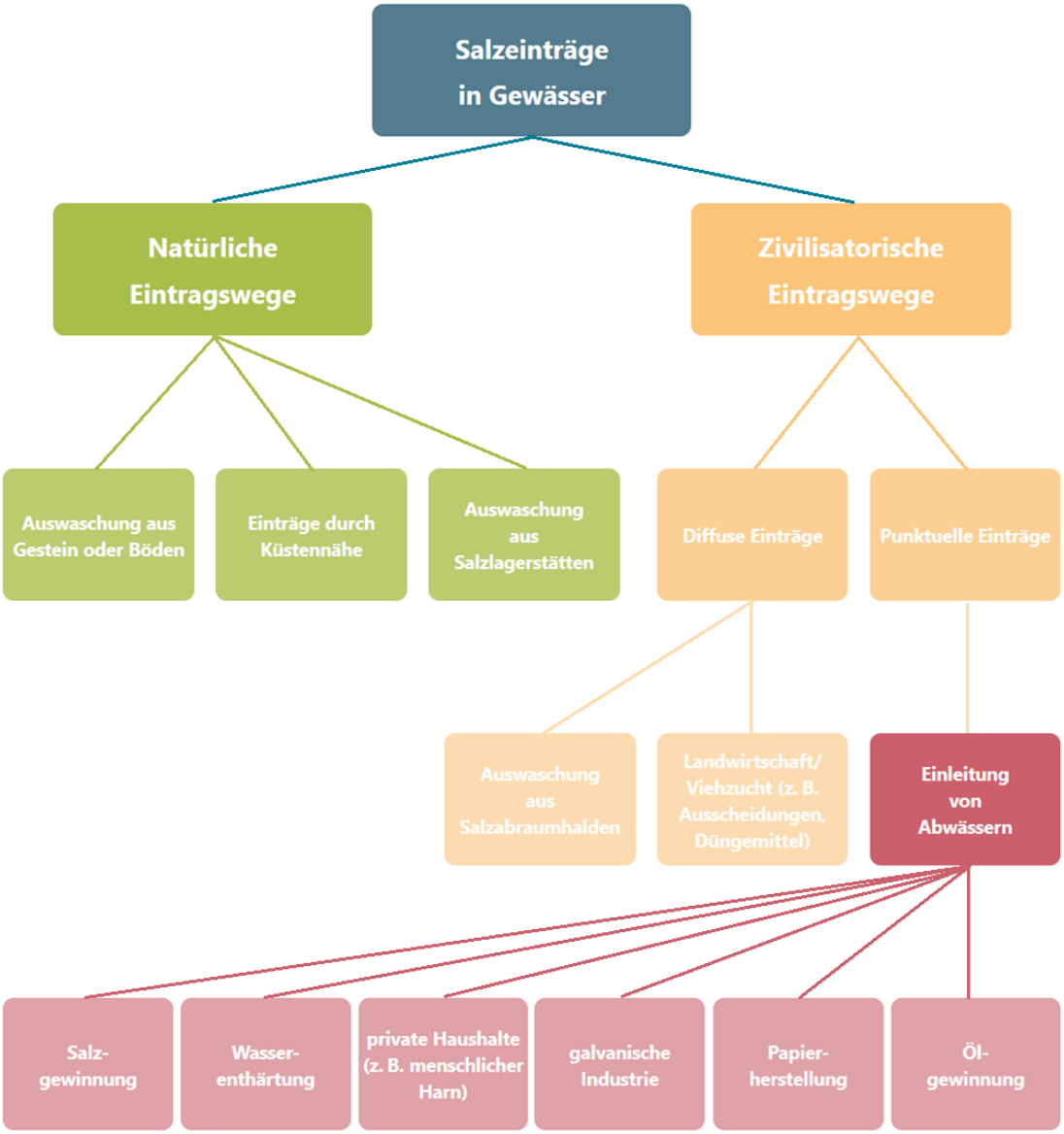


Abbildung 124: Eintragswege von Salzen in Flüsse (Screenshot, Projekt Open MINT Labs).

Neben den beiden hier kontextualisierten Punkten der direkten Einleitung von Abwässern und den diffusen Einträgen als Auswaschungen aus Abraumhalden werden so zahlreiche weitere Eintragswege skizziert. Darüber hinaus verweist ein Textbaustein im virtuellen Labor auf alternative Wege der Entsorgung salzhaltiger Abwässer sowie deren Problematiken. Als bedeutendste Variante ist hier die Verpressung der Abwässer in tiefe Gesteinsschichten zu nennen. Hierdurch werden diese zwar scheinbar dauerhaft entsorgt, jedoch sind die daraus entstehenden Risiken wie Erdbewegungen, welche durch Hebungen und Senkungen Bauwerke schädigen können oder Einträge in das Grundwasser keinesfalls vernachlässigbar. Dies gilt umso mehr, da im Werra-Kalirevier inzwischen von einem unterirdischen See mit einer Fläche, welche der des Bodensees entspricht, auszugehen ist. Eine gezielte Steuerung der Ausbreitung sowie eine exakte Lokalisation der Lagerstäte der Abwässer ist nur schwerlich möglich, wodurch auch geeignete Maßnahmen oder Risikobewertungen kaum vorzunehmen sind (Beyer, 2016).

Als Fachinhalt wird außerdem auf die unterschiedlichen Löslichkeiten verschiedener Ionensorten und den Zusammenhang zwischen Löslichkeit und Temperatur eingegangen. Letztlich wird das Kapitel Grundlagen mit einer Zwischensicherung in Form einer S*ingle Choice* LearningApp abgeschlossen.

3) Experiment

Im Kapitel „Experiment“ werden zunächst die für die praktische Durchführung im Freiland erforderlichen Materialien und Chemikalien in Form einer Liste sowie als Bildreihe dargestellt. Die Lernenden können vor der eigenen Durchführung den Ablauf der Messungen anhand eines Lehrvideos nachvollziehen. In der Praxisphase im Freiland arbeiten die Lernenden dann entlang einer bereitgestellten Anleitung, welche im PDF-Format sodann ausgedruckt oder auf dem mobilen Endgerät genutzt werden kann. Als Aufgabenstellung für die Messungen wurde formuliert:

1. Messen Sie an mehreren Stellen im Fließgewässer den Chloridgehalt.
2. Stellen Sie eine Hypothese bezüglich der Entnahmestellen innerhalb eines Gewässers und dem zu erwartenden Messwert auf. Begründen Sie diese ausführlich.

Hier steht folglich der Erwerb experimenteller Kompetenz im Vordergrund, eingebettet in eine Aufgabenstellung des Kompetenzbereichs Erkenntnisgewinnung. Das Generieren einer Hypothese zielt bereits im Ansatz auf den weiteren Prozess der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung ab.

Nach erfolgter Durchführung des Versuchs werden zunächst exemplarisch bereitgestellte Daten ausgewertet. So ist einerseits sichergestellt, dass die Lernumgebung auch

ohne eine praktische Durchführung, etwa im Zuge eines sequenzierten Einsatzes, genutzt werden kann. Andererseits werden die hier generierten Daten auch für die nachfolgende Aufgabe weiterverwendet. Die bereitgestellten Daten beinhalten sowohl einen zeitlichen als auch einen räumlichen Verlauf des Chloridgehaltes entlang des Flusses Werra. Die Daigrammerstellung sowie das Vergleichen der Daten über mehrere Messstellen und Zeitreihen hinweg ist hier den Kompetenzbereichen Kommunikation und Erkenntnisgewinnung zugeschrieben. Eine sinnvolle Darstellung ist für einen gewinnbringenden Vergleich unerlässlich, gleichfalls können jedoch aus dem eher auf die Kommunikation abzielenden Aufgabenteil neue Erkenntnisse gewonnen werden anhand der aufbereiteten Datenreihen. Eine schriftliche Beschreibung und Begründung (AFB II) durch die Lernenden kann mit bereitgestelltem, abrufbarem Erwartungshorizont abgeglichen werden. In einer weiterführenden Aufgabe wird zusätzlich zu den aufgetragenen Messdaten öffentlicher Messstellen eine eigens angefertigte Karte mit Verortung der Messstellen, Abraumhalden und Abwassereinleitungsstellen sowie möglicher diffuser Zuflüsse bereitgestellt (Abbildung 125). Anhand dieser Materialien sollen die Lernenden den Zusammenhang zwischen Messdaten und anthropogenen Salzeinträgen nachvollziehen und schriftlich interpretieren.

Abbildung 125: Verlauf der Werra im Kalirevier mit Messstellen und anthropogenen Eintragsstellen (Jasmin Hirtl, Projekt Open MINT Labs).

4) Anwendung

Versalzung als Folge der Verlandung eines Gewässers wird im Kapitel „Anwendung“ am Beispiel des Aral-Sees in Zentralasien thematisiert. Wenngleich Salz auch in Fließgewässern nicht biologisch abgebaut werden kann, so ist dort doch zumindest ein starker Verdünnungseffekt durch den stetigen Durchfluss gegeben. In weitgehend stillen Gewässern ist dieser regenerierende Effekt nicht gegeben. Als Folge massiver Wasserentnahme und weiterer Effekte fielen große Teile des Aral-Sees im Laufe der Zeit trocken. Zurück blieben extrem salzhaltige Wässer und Salzablagerungen auf dem trocken gefallenen Grund des Sees. Diese Problematik wirkte sich unmittelbar auf die Umgebung aus: Salzstaub wurde durch den Wind weitergetragen und führt zu einer fortschreitenden Versalzung der umgebenden Böden. Da die Rückstände aus dem See neben Salzen auch aufkonzentrierte Schadstoffe enthalten, welche zuvor stark verdünnt vorlagen, führte dies auch zu einem gehäuften Auftreten unter anderem von Atemwegserkrankungen (Zimmermann-Timm, 2011).

5) Reflexion

Den Abschluss des virtuellen Labors bildet die Ergebnissicherung, welche die Lernenden im PDF-Format abrufen können. Hier sind Kernpunkte des Inhalts in übersichtlicher Form zusammengefasst. Weiterhin können die Lernenden eine Selbstevaluation mittels einfacher Ratingskalen durchführen, bei Bedarf werden sie zur Rekapitulation direkt in die jeweiligen Kapitel weitergeleitet. Außerdem steht in diesem Kapitel als Exkurs ein Baustein zum Salzgehalt von Salzwasserseen und Meeren bereit, kontextualisiert an der Dichte des Toten Meers, welche es Personen ermöglicht nahezu ohne Schwimmbewegung auf der Oberfläche zu treiben.

Virtuelles Labor pH-Wert

1) Orientierung

Einleitend in das virtuelle Labor zum Thema pH-Wert wird die Bedeutung dieses Wertes für Flora und Fauna hervorgehoben. Es werden sowohl die direkten Auswirkungen im Sinne des für die jeweilige Tier- oder Pflanzenart erforderlichen pH-Milieus als auch indirekte Auswirkungen wie etwa die Mobilität von Schwermetallen in Abhängigkeit vom pH-Wert umrissen. Ebenso werden bereits hier die verfügbaren Messmethoden pH-Teststreifen, Indikatoren und Sensoren angeführt. Als Lernvoraussetzungen werden die Begriffe Indikator, Säure und Base sowie korrespondierende Säure-/Base-Paare definiert. Die Lernziele dieses virtuellen Labors stellen sich entsprechend dar (Tabelle 33).

Tabelle 33: Lernziele des virtuellen Labors zum pH-Wert und deren Anforderungsbereiche.

LZ 1	Sie können die Definition des pH-Werts wiedergeben und mathematisch darstellen.	AFB I-II
LZ 2	Sie können den pH-Wert wässriger Lösungen mithilfe des vorgestellten Messsystems eigenständig ermitteln.	AFB I
LZ 3	Sie können den Einfluss von pH-Änderungen auf ein Gewässer abschätzen und mögliche Auswirkungen beurteilen.	AFB II-III

Weiterhin werden auch in diesem virtuellen Labor ein Wegweiser zur transparenten Gestaltung der Lernumgebung sowie eine kleine Wortwolke dargeboten.

2) Grundlagen

Die Kontextualisierung dieses virtuellen Labors erfolgt anhand der Darstellung sauren Regens als Folge von Vulkanausbrüchen. Wenngleich dieser Effekt nicht allein für saure Niederschläge verantwortlich ist, so lässt sich doch hieran gut darstellen, wie die Freisetzung schwefel- und stickstoffhaltiger Gase in Kombination mit Niederschlag eine Versauerung bewirken kann, welche sich auf die Umwelt auswirkt. Dies wird durch die Reaktionen von Wasser mit SO_2, SO_3, NO_2 und N_2O_4 aufgezeigt (Abbildung 126), welche ein Absinken des pH-Werts auf pH 4,2 bis 4,8 anstelle des für Niederschläge üblichen pH-Werts im Bereich 5,5 - 5,7 bewirken können. Als Hauptursache für saure Niederschläge wird der zivilisatorische Einfluss durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe benannt. Ebenso werden hier die Folgeschäden an Natur und Umwelt, Schwächung und Wachstumshinderung von Pflanzen, vermehrter Krankheitsbefall, Schäden an Gebäuden, Löslichkeit von Schwermetallverbindungen in Gewässern, angeführt.

$$SO_2 + H_2O \leftrightharpoons H_2SO_3$$

$$SO_3 + H_2O \leftrightharpoons H_2SO_4$$

$$2\,NO_2 + H_2O \leftrightharpoons HNO_2 + HNO_3$$

$$N_2O_4 + H_2O \leftrightharpoons HNO_2 + HNO_3$$

Abbildung 126: Reaktionen zur Entstehung saurer Niederschläge aus stickstoff- und schwefelhaltigen Gasen (Screenshot, Projekt Open MINT Labs).

Nach dieser ausführlichen Kontextualisierung erfolgt in den nachstehenden Unterkapiteln zunächst ein Rückgriff auf das Konstrukt des pH-Wertes, welches ausgehend von der Säure-/ Base-Theorie nach Brønsted und Lowry hergeleitet wird. Dabei werden eine durchgängige farbliche Kennzeichnung der Säuren und Basen innerhalb der Paare sowie kleine interaktive Aufgaben genutzt (Abbildung 127).

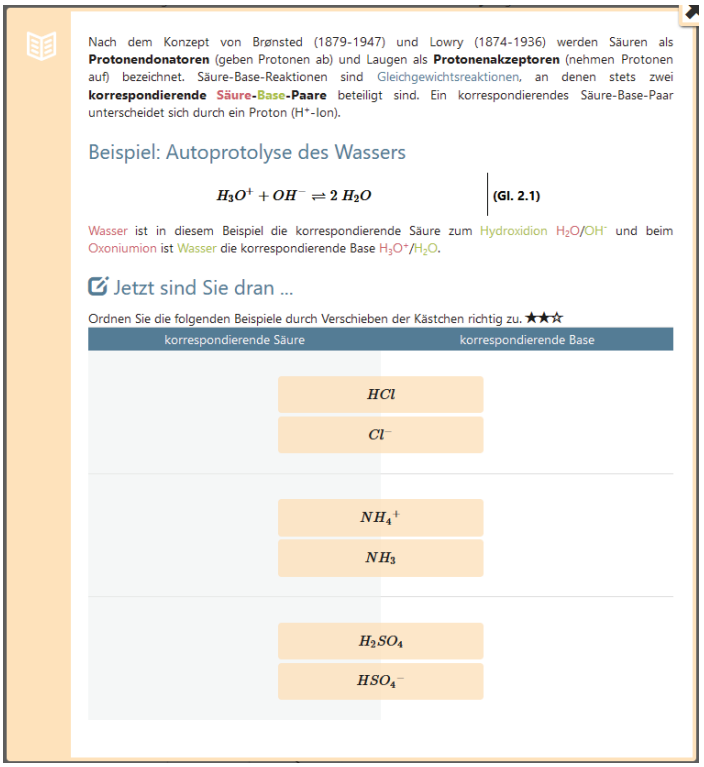


Abbildung 127: Interaktive "Schiebe-Aufgabe" zur Zuordnung der korrespondierenden Säure-Base-Paare nebst einer kurzen Erklärung der Säure-Base-Theorie nach Brønsted und Lowry (Screenshot, Projekt Open MINT Labs).

Die Reaktion bei Zugabe einer Säure zu Wasser wird anschließend auf den drei Ebenen – Stoffebene, Teilchenebene und Abstraktion als Reaktionsgleichung – abgebildet und erläutert (Abbildung 128). Ein animierter Ablauf, welcher sowohl die Säurezugabe auf Stoffebene als auch die Reaktion auf Teilchenebene abbildet, ergänzt diese Erklärung. Hierbei wurde die Teilchenebene bewusst abseits des Reaktionsgefäßes dargestellt, um einer Förderung der Fehlvorstellung des Stoff-Teilchen-Kontinuums entgegenzuwirken (für Standbilder der Animation siehe Abbildung 129).

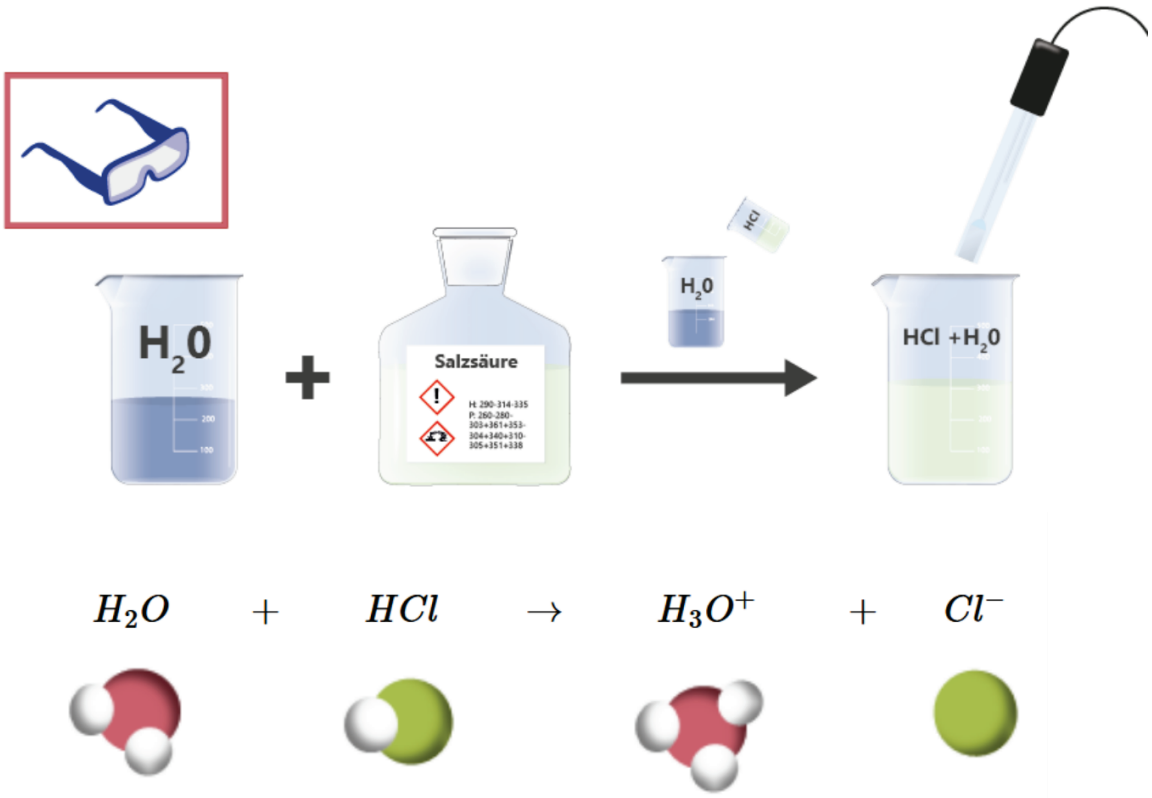


Abbildung 128: Säurezugabe zu Wasser auf stofflicher Ebene, Teilchenebene und als Reaktionsgleichung. (Screenshot, Projekt Open MINT Labs)

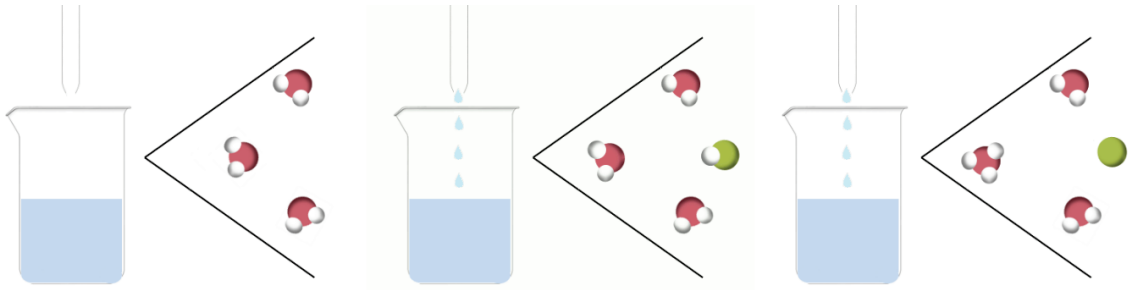


Abbildung 129: Standbilder der Animation zur Säurezugabe. Links ist die Stoffebene abgebildet, rechts daneben die modellhafte Darstellung der Reaktion auf Teilchenebene (Screenshot, Projekt Open MINT Labs).

Im weiteren Verlauf der Lernumgebung werden die Definition des pH-Werts sowie die Bedeutung der logarithmischen Skala und die Einteilung der pH-Skala erläutert. Eine Zuordnungsaufgabe, in welcher die Lernenden pH-Werte den Konzentrationen der H_3O^+-Ionen in Dezimal- oder Potenzschreibweise zuordnen müssen, leitet von der theoretischen Grundlage zum pH-Wert über in die Betrachtung der Einflussfaktoren auf den pH-Wert in Gewässern.

Während der optimale pH-Wert für Flüsse in der Regel im Bereich von 6,5 – 8 liegt, können viele Arten leichte und zeitlich begrenzte Schwankungen tolerieren. Stärke und Dauer der Abweichung vom optimalen pH-Bereich wird dabei durch die Pufferkapazität des Gewässers mitbestimmt. Als tödliche Grenzwerte für heimische Fischarten gelten die Werte pH < 4 und pH > 10,8. Es wird darauf hingewiesen, dass in natürlichen Gewässern zahlreiche chemische Verbindungen vorliegen, welche unterschiedlich auf Änderungen des pH-Wertes sowie miteinander reagieren können, wodurch die Betrachtung und Beurteilung einer Abweichung vom Soll-Wert niemals isoliert erfolgen kann. Im Weiteren werden typische Einflussfaktoren auf den pH-Wert dargestellt. Hier wird der Einfluss des Kohlensäure-Gleichgewichts über aus der Luft aufgenommenes CO_2 sowie dessen Reaktionen – erneut auf modellhafter Teilchenebene sowie mittels Reaktionsgleichung – beschrieben (Abbildung 130).

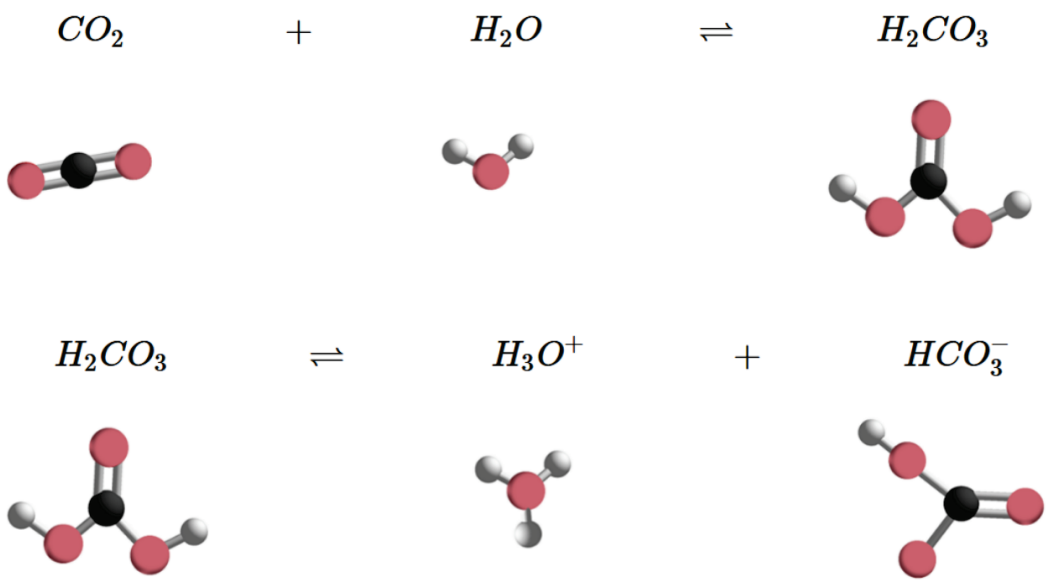


Abbildung 130: Darstellung der Reaktionen des Kohlensäure-Gleichgewichts auf Teilchenebene sowie in Formelschreibweise (Screenshot, Projekt Open MINT Labs).

Weiterhin werden Schwefel- und Stickoxide aufgrund ihrer guten Wasserlöslichkeit und der Freisetzung in bedeutenden Mengen aus natürlichen wie auch anthropogenen Quellen angeführt. Ebenso wird das Zusammenspiel aus kalkhaltigem Gestein und Kohlensäure-Gleichgewicht als eine Variante der natürlichen pH-Regulierung eines Gewässers beschrieben. Hierbei werden jedoch nur Informationen zur Lösungsreaktion von Kalk in Wasser mit dem Hinweis, dass diese Reaktion bei neutralem pH-Wert kaum abläuft, sowie der Hinweis, dass das Vorliegen von Kohlensäure diese Löslichkeit um stark erhöht, bereitgestellt (Abbildung 131). Der Transfer zur Auswirkung auf das

Gewässer soll daran anknüpfend als aktivierende Zwischenaufgabe durch die Lernenden selbst erfolgen.

$$2CaCO_3 + 2H_2O \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2$$

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2$$

Abbildung 131: Reaktionsgleichungen zum Lösen von Kalk in Wasser ohne und mit Einfluss von CO_2, die Zwischenstufe Kohlensäure ist hier nicht explizit dargestellt. Diese wurde bereits in der vorstehenden Abbildung erarbeitet (Screenshot, Projekt Open MINT Labs).

Als weitere Einflussfaktoren werden direkte Einträge von Säuren und Laugen, etwa als Seifenlaugen, sowie die Aktivität bestimmter Pflanzen, welche durch die Gewinnung von CO_2 aus dem im Wasser vorliegenden HCO_3^- auch Hydroxid-Ionen OH^- freisetzen können, erwähnt.

Aufbauend auf dieses Theoriewissen beziehen die Lernenden sodann Stellung zu folgender Hypothese: „*Der pH-Wert von Gewässern ist charakteristisch und veränderlich.*“, bevor sie das Theoriekapitel wiederum mittels eines *Single Choice* LearningApp-Quiz zu den Fachinhalten abschließen.

3) Experiment

Sicherheitshinweise bilden den Einstieg zum Kapitel Experiment, da hier anders als bei den übrigen Versuchen mit sauren oder basischen Pufferlösungen zur Kalibrierung der pH-Elektroden gearbeitet werden muss. Auch hier werden die Materialien in Listenform sowie bildlich vorgestellt, bevor die Lernenden anhand des Lehrvideos den Umgang mit den Sensoren kennenlernen. Die eigene Erhebung von Messdaten im Freiland erfolgt anhand der folgenden Aufgabenstellungen unter Zuhilfenahme der schriftlichen Anleitung, die berücksichtigten Kompetenzbereiche sind in Klammern angeführt.

1. Messen Sie an mehreren Stellen im Fließgewässer den pH-Wert. (AFB II)
2. Bestimmen Sie den pH-Wert eines stehenden Gewässers. (AFB II)
3. Bestimmen Sie den pH-Wert von reinem Wasser. (AFB II)
4. Stellen Sie eine Hypothese bezügliche der Entnahmestellen innerhalb eines Gewässers und dem zu erwartenden Messwert auf. Begründen Sie diese ausführlich. (AFB II-III)

Im Anschluss an die Durchführung werden den Lernenden real erhobene Beispielmesswerte bereitgestellt, welche sie grafisch darstellen und mögliche Ursachen für Abweichungen von den zu erwartenden Soll-Werten in Gewässern begründen sollen. Dabei werden zwei Messstellen unterschieden, wovon eine als renaturierter Bereich gilt, außerdem wurden die Daten zu unterschiedlichen Jahreszeiten erfasst. Darüber hinaus wurde im Sinne der Plausibilitätsprüfung von Messdaten auch ein real erfasster Messwert mit pH = 15,36 eingeschlossen, welcher sich über beide Messstellen hinweg exakt konstant zeigte. Dies soll die Lernenden zur Erkenntnis führen, dass an dieser Stelle der Wert einerseits nicht auf der pH-Skala vorzufinden ist und weiterhin durch die Konstanz des unplausiblen Wertes ein Defekt des Messgerätes anzunehmen ist. Die erstellte Grafik kann mittels eines Upload-Ordners den Lehrenden zugänglich gemacht werden. Weiterhin sollen die Lernenden zu Auswirkungen von pH-Werten im saure, neutralen und basischen im Gewässer Stellung beziehen, wodurch das Wissen aus dem Kapitel Grundlagen erneut abgerufen und angewandt wird (AFB II). Insgesamt zielen die hier vorgestellten Aufgaben des Kapitels Experiment somit stark auf die Kompetenzbereiche der Erkenntnisgewinnung und des Umgangs mit Fachwissen ab (Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur, 2014, S. 124).

4) Anwendung

Anhand der Verschiebung des Ammonium-Ammoniak-Gleichgewichts bedingt durch den pH-Wert wird hier ein konkretes Beispiel für eine indirekte Auswirkung des pH-Wertes auf Flora und Fauna der Gewässer gegeben. Während Ammonium für Fische unkritisch zu sehen ist, kann mit leichter basischer Verschiebung des pH-Wertes Ammoniak freigesetzt werden, welches bereits in geringen Dosen als starkes Fischgift gilt (Abbildung 132).

$$NH_4^+ + OH^- \leftrightharpoons NH_3 + H_2O$$

$$Ammonium\ (ungiftig) \leftrightharpoons Ammoniak\ (giftig)$$

Abbildung 132: Das Ammonium-Ammoniak-Gleichgewicht und die Giftwirkung der beiden Formen auf Fischbestände (Screenshot, Projekt Open MINT Labs).

Das Kapitel Anwendung schließt mit der Betrachtung der Ausbreitung einer Aschewolke nach einem Vulkanausbruch, welche hier anhand einer Modellierung des britischen Wetterdienstes *MetOffice* skizziert wird. Durch diese Rückführung auf den Einstiegskontext wird deutlich, dass auch scheinbar entfernt stattfindende Ereignisse deutliche Relevanz für die lokale Flora und Fauna haben können.

5) Reflexion

Die Ergebnissicherung stellt auch hier die relevanten inhaltlichen Punkte übersichtlich zusammen. Weiterhin ist auch in diesem virtuellen Labor die Selbstevaluation mittels Ratingskalen, welche bedarfsgerecht auf die einzelnen Theorie-Unterkapitel verlinken, gegeben. Ein weiterführender Exkurs ist hier aufgrund des inhaltlichen Umfangs des virtuellen Labors unter Berücksichtigung des Zeitansatzes einer schulischen Doppelstunde nicht vorgesehen.

Virtuelles Labor Sauerstoffsättigung

1) Orientierung

Ein authentisches Video über ein durch Sauerstoffmangel bedingtes Fischsterben bildet den problematisierenden Einstieg in das virtuelle Labor zur Sauerstoffsättigung. Zur Einführung in die Messmethoden für den Parameter Sauerstoff werden die Winkler-Titration sowie elektrochemische Messverfahren benannt.[48] Als Lernvoraussetzungen für diesen Kurs werden Kenntnisse über den Aufbau von Molekülen, Kenntnisse über chemische Gleichgewichte sowie der Fachbegriff der Diffusion definiert. Die Lernziele für diesen Kurs sind Tabelle 34 zu entnehmen:

Tabelle 34: Lernziele im virtuellen Labor Sauerstoffsättigung und deren Anforderungsbereiche.

LZ 1	Sie können die Eintragswege von Sauerstoff in Gewässer wiedergeben.	AFB I
LZ 2	Sie können den Zusammenhang zwischen Temperatur und Sauerstoffsättigung eines Gewässers erklären.	AFB II
LZ 3	Sie können zwischen Sauerstoffsättigung und Sauerstoffgehalt einer Probe unterscheiden.	AFB II
LZ 4	Sie können erklären, wie Diffusionsprozesse an der Grenzfläche Gas / Flüssigkeit ablaufen.	AFB II-III
LZ 5	Sie können die Sauerstoffsättigung wässriger Lösungen mithilfe des vorgestellten Messsystems eigenständig ermitteln und berechnen.	AFB III
LZ 6	Sie können die Bedeutung der Sauerstoffsättigung für das Ökosystem Gewässer erläutern und die Auswirkungen abweichender Werte abschätzen/beurteilen.	AFB III

[48] Aussage erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2023, S. 20), modifiziert

Der für alle hier vorgestellten virtuellen Labore identische Wegweiser dient der Transparentlegung der Struktur und der Bedienelemente des Kurses. Das Kapitel Orientierung schließt mit einer thematischen Schlagwortwolke.

2) Grundlagen

In den Grundlagen wird zunächst der problematisierende Einstieg aus der Orientierung aufgegriffen und anhand eines lokalen Pressеberichts konkretisiert. Anschließend wird ausgehend von der Diffusion die Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten erläutert. Die Diffusion als „Transport von Materie gegen einen Konzentrationsgradienten“ (Atkins et al., 2013, S. 791) stellt dabei den Ausgangspunkt für die nachfolgende Erklärung der Zusammenhänge des Gesetzes von Henry dar. Die physikalische Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten in Abhängigkeit vom Partialdruck des jeweiligen Gases über der Flüssigkeit sowie einer temperaturabhängigen Konstante wird hier dargestellt (Binnewies et al., 2016, S. 200–201; Mortimer & Müller, 2003, S. 207). Dabei wird der Einfluss der Art der Flüssigkeit sowie der Temperatur neben gegebenenfalls vorhandenen Verunreinigungen und damit einhergehender Veränderung der Löslichkeit eines Gases in der Flüssigkeit thematisiert. Tiefergehende theoretische Betrachtungen, welche etwa die Unterscheidung zwischen ideal und real verdünnter Lösung einführen (Atkins et al., 2013, S. 173), werden hier sowohl mangels der Relevanz für die gewässeranalytischen Betrachtungen wie auch aufgrund der vorgenommenen didaktischen Reduktion nicht näher beschrieben.

Zur Verdeutlichung des Effektes wird im virtuellen Labor an dieser Stelle eine animierte Darstellung der Druckausübung auf ein abgeschlossenes Gasvolumen über einer Flüssigkeit genutzt (Abbildung 133). Die dabei immanente Problematik des Teilchen-in-Kontinuumskonzepts wird in Anlehnung an die Empfehlung nach S. Schmidt (2010) im Sinne der metakonzeptuellen Kompetenz thematisiert[49]. Zahlreiche Buttons mit hinterlegten Erklärungen ermöglichen ein an die unterschiedlichen Vorwissensstände der Lernenden anknüpfende selbstgesteuerte Bearbeitungstiefe und -geschwindigkeit.

[49] Aussage erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2023, S. 20), modifiziert

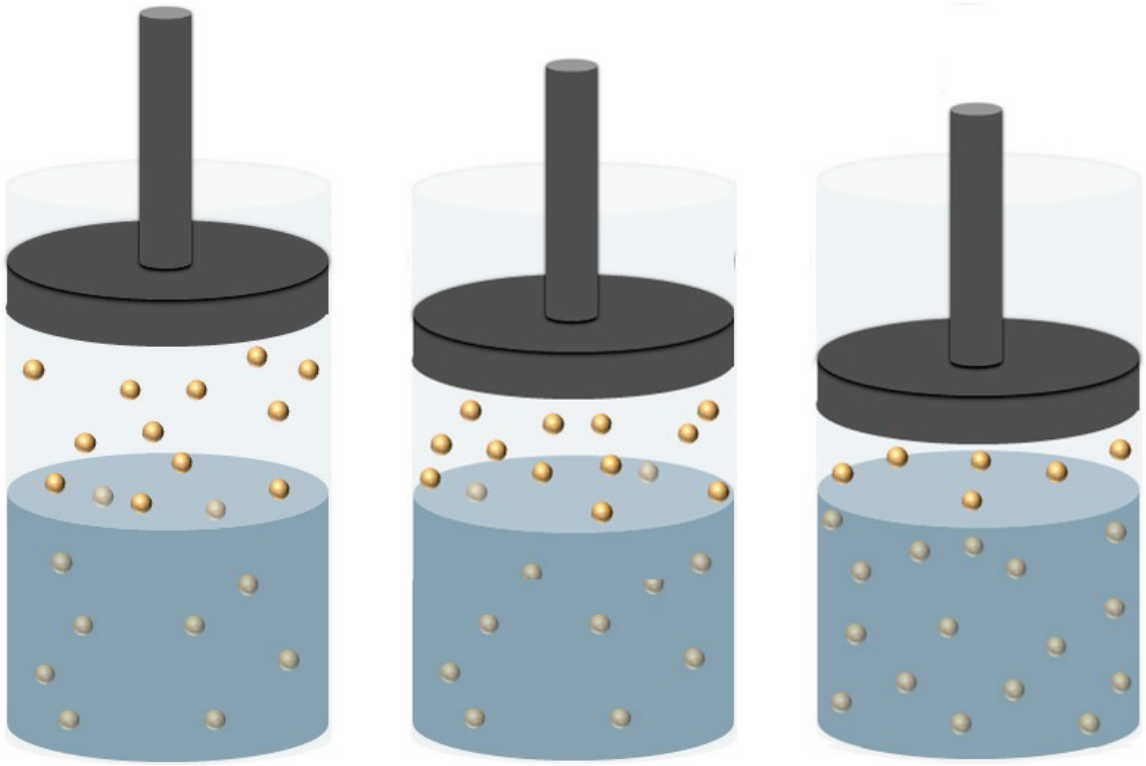


Abbildung 133: Druckausübung auf ein abgeschlossenes Gasvolumen über einer Flüssigkeit, in der Folge geht mehr Gas in Lösung. Die Teilchen-in-Kontinuumsproblematik kann hier schwerlich umgangen, wohl aber auf der Meta-Ebene thematisiert werden (Screenshot, Projekt Open MINT Labs).

Sauerstoffeinträge in Gewässer kommen durch intensiven Kontakt des Wasserkörpers mit der atmosphärischen Luft und die Photosynthese-Aktivität der Flora zustande, während sich die Sauerstoffzehrung überwiegend durch Stoffwechselprozesse der größeren Lebewesen sowie chemische und biologische Zehrung ergibt (vgl. Neff, 2018). Die Einträge werden zur Schaffung eines bildhaften Verständnisses im virtuellen Labor illustriert.

Weiterhin wird in den Grundlagen eine klare Unterscheidung der Begrifflichkeiten Sauerstoffgehalt und Sauerstoffsättigung vorgenommen. Während der absolute Gehalt die relevante Kenngröße für die im Gewässer lebenden Fische und Lebewesen ist, dient die Sättigung als prozentualer Anteil der bei der gegebenen Wassertemperatur maximalen Sättigung als Parameter zur Bestimmung der Gewässergüte. Zur konsequenten Unterscheidung der Begriffe werden diese in den Grundlagenkapiteln farblich unterschieden und explizite Umwandlungsaufgaben für die Lernenden angeboten. Auch eine mögliche Übersättigung eines Gewässers wird durch eine Aufgabenstellung mit Berechnung und Interpretation des Wertes thematisiert. Die in diesem Kapitel bereitgestellte digitale Tabelle der vollständigen Sauerstoffsättigung einer Wasserprobe bei gegebener Temperatur wird für die praktische Durchführung in digitaler oder analoger Form erneut herangezogen.

Den Lernenden werden weiterhin die Ursachen für den wechselnden Tagesverlauf der Sauerstoffsättigung dargelegt. Hierzu beschreiben sie zunächst ein Diagramm, welches die Sauerstoffsättigung im Tagesverlauf in einem Laborversuch zeigt und ordnen die möglichen Ursachen für diesen Verlauf aus den bekannten sauerstoffzehrenden und sauerstoffeintragenden Prozessen zu. Diese Einflussfaktoren werden anschließend durch eine interaktive Zuordnungsaufgabe wiederholt. Der Transfer auf den realen Tagesverlauf der Sauerstoffsättigung außerhalb der Laborbedingungen erfolgt anhand authentischer Messdaten, welche entsprechend grafisch aufbereitet und bereitgestellt wurden (Abbildung 134). Auch hierzu werden die Lernenden aufgefordert, im Rahmen einer interaktiven Aufgabe mögliche Gründe für die Abweichungen von den unter Laborbedingungen erfassten Messwerten zu erläutern.

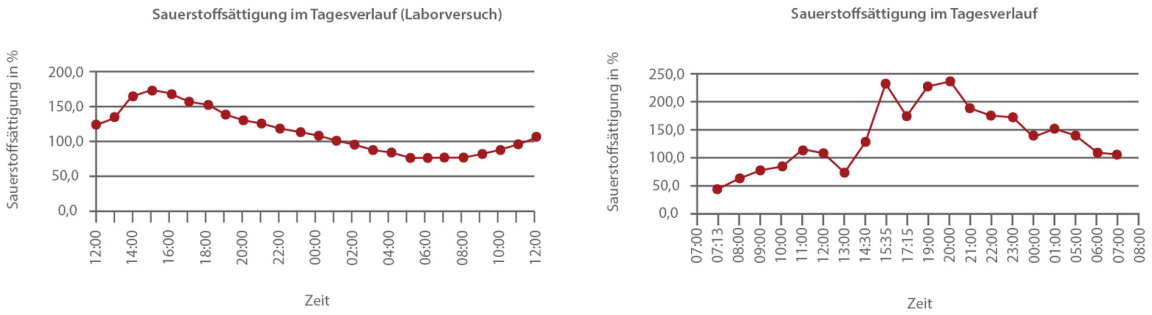


Abbildung 134: Gegenüberstellung des Sauerstoff-Tagesverlaufs im Laborversuch und in der realen Messdatenerhebung an einem Gewässer (Screenshot, Projekt Open MINT Labs, zuerst veröffentlicht in Neff et al., 2023).

In einer abschließenden Aufgabe wenden die Lernenden das neu erworbene Wissen auf eine komplexere Fragestellung an, indem sie ein Diagramm authentischer Messdaten (Abbildung 135) zunächst beschreiben und Erklärungsansätze für die teils starken Abweichungen von den theoretisch erwarteten Tagesverläufen über eine Woche hinweg liefern.

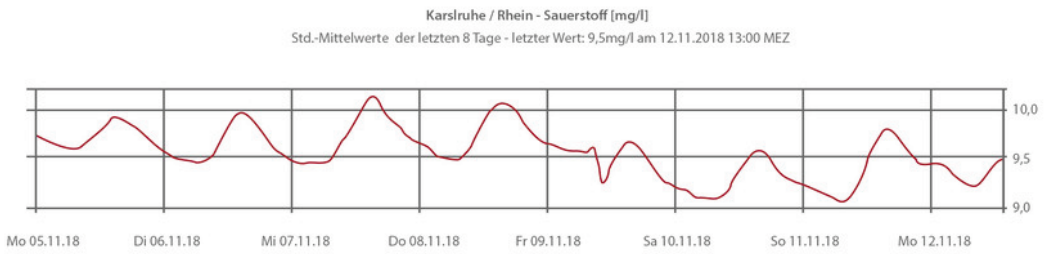


Abbildung 135: Verlauf des Sauerstoffgehalts über eine Woche hinweg, gemessen im Rhein bei Karlsruhe (Screenshot, Projekt Open MINT Labs).

Der abschließende Theoriecheck zu diesem Grundlagenkapitel erfolgt unter Rückgriff auf die Theorie des Gesetzes von Henry. Die Lernenden sollen hier die Auswirkungen der Parameter Druck und Oberfläche der Flüssigkeit in ihrer Auswirkung auf die Menge des gelösten Gases in der Flüssigkeit einordnen.

3) Experiment

Aufgrund der stark alkalischen Elektrolytlösung in der Sauerstoff-Elektrode wird das Kapitel Experiment mit Sicherheitshinweisen, insbesondere dem Hinweis, dass ein Öffnen der Elektrode nur durch die verantwortlichen Lehrpersonen durchzuführen ist, eingeleitet. Nach der Listung der benötigten Materialien und Chemikalien in schriftlicher und Bildform werden die Aufgabenstellungen benannt.

1. Messen Sie an mehreren Stellen im Fließgewässer den Sauerstoffgehalt. Wählen Sie die Messstellen ausgehend von Unterschieden in der Gewässerstruktur (z. B. ruhige vs. belebte Stellen, Randbereich vs. Flussmitte; AFB II).
2. Bestimmen Sie den Sauerstoffgehalt eines stehenden Gewässers, von frisch entnommenem Leitungswasser und von destilliertem Wasser (AFB II).
3. Nehmen Sie simultan zu allen Messungen die Temperatur der Probe auf (AFB II).
4. Errechnen Sie aus den Messwerten von Temperatur und Sauerstoffgehalt die jeweilige Sauerstoffsättigung (AFB II-III).
5. Stellen Sie eine Hypothese bezüglich der Entnahmestellen innerhalb eines Gewässers und dem zu erwartenden Messwert auf. Begründen Sie diese ausführlich (AFB III).

Die Versuchsdurchführung wird sowohl in Form einer druckbaren PDF-Anleitung wie auch als Lehrvideo einer exemplarischen Durchführung bereitgestellt.

Eine anschließende Auswertung erfolgt mit Hilfe bereitgestellter Messdaten zweier Messstellen, welche kurz beschrieben werden. Anhand der Messdaten und der Beschreibung der Messstellen sollen die Lernenden mögliche Zusammenhänge auch unter Berücksichtigung der Messzeitpunkte und möglicher Tendenzen erörtern.[50] Das Kapitel schließt mit den üblichen Hinweisen zur Entsorgung und Reinigung der Elektroden.

[50] Aussage erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2023, S. 24), modifiziert

4) Anwendung

Im Kapitel Anwendung wird die Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten am Beispiel der Aufsättigung des Gewebes beim Gerätetauchen und die resultierende Problematik der Dekompression thematisiert. Gleichermaßen wird auch die Kontextualisierung aus dem Einstieg erneut aufgegriffen und die Auswirkungen eines Sauerstoffmangels in Gewässern beleuchtet. In der Vertiefung ist hierzu ein Experten-Interview hinterlegt, welches die anthropogenen Einflüsse auf vermehrtes Fischsterben durch Sauerstoffmangel klar herausstellt.[51]

5) Reflexion

In diesem virtuellen Labor wird neben der Ergebnissicherung im PDF-Format und einer Selbstevaluation mit Verlinkung zu den jeweiligen Unterkapiteln zur Wiederholung ebenfalls ein Exkurs angeboten. Der Exkurs zeigt Möglichkeiten auf, einer Sauerstoff-Untersättigung entgegenzuwirken. Anhand der Beispiele der Belüftung eines Sees durch Einblasen von Luft und Oberflächenverwirbelung mittels Pumpen sowie einem Belüftungsschiff, welches mit flüssigem Sauerstoff arbeitet, werden die Bemühungen einem akuten Sauerstoffdefizit in Gewässern entgegenzuwirken dargestellt. Dabei werden in diesem Kapitel auch die Nachteile solcher Eingriffe in ein Ökosystem betrachtet.[52]

Virtuelles Labor Leitfähigkeit

1) Orientierung

Einführend in das virtuelle Labor zur Leitfähigkeitsmessung wird die Abhängigkeit dieses Parameters von der Menge der gelösten Ionen kurz erläutert und die ausschließliche Erfassung dieser Messgröße mittels Sensorik herausgestellt. Als Lernvoraussetzungen wird in diesem OML-Kurs auf die Begriffe Spannung, Potenzial, Stromstärke und Widerstand zurückgegriffen. Die Lernziele sind Tabelle 35 zu entnehmen. Weiterhin stellt der einheitliche Wegweiser für die virtuellen Labore die Bedienelemente und Kennzeichnungen transparent dar, ebenso bietet eine Schlagwortwolke einen ersten Überblick über die Inhalte.

[51] Absatz erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2023, S. 25), modifiziert
[52] Absatz in Teilen erstmalig veröffentlicht in Neff et al. (2023, S. 25), modifiziert

Tabelle 35: Lernziele und adressierte Anforderungsbereiche des virtuellen Labors zur Leitfähigkeit.

LZ 1	Sie können die Bildung von Ionen aus Salzen erklären.	AFB II
LZ 2	Sie können die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit einer wässrigen Lösung erläutern.	AFB II
LZ 3	Sie können die elektrische Leitfähigkeit wässriger Lösungen mithilfe des vorgestellten Messsystems eigenständig ermitteln.	AFB II
LZ 4	Sie können die Interpretation der elektrischen Leitfähigkeit als Summenparameter wiedergeben.	AFB II-III
LZ 5	Sie können Werte für die elektrische Leitfähigkeit eines Gewässers interpretieren.	AFB III

2) Grundlagen

Die Grundlagenkapitel werden durch eine einleitende Problemfrage kontextualisiert. Ausgehend von der allgemein bekannten Baderegel, bei Gewitter sofort das Gewässer zu verlassen, wird die Frage nach dem Grund hierfür aufgeworfen. Ergänzt wird diese durch die Zusatzfrage, weshalb das Baden oder Schwimmen bei Gewitter für den Menschen so gefährlich ist, wenn dies gleichzeitig für Fische scheinbar kein Risiko darstellt.

In den theoretischen Grundlagen wird zunächst die elektrische Leitfähigkeit als charakteristische Eigenschaft eines Stoffes abhängig von der Anzahl und Bindungsstärke der Ladungsträger definiert. Anschließend wird die elektrolytische Leitfähigkeit, basierend auf dem Vorliegen von Ladungsträgern in Form gelöster Ionen, erläutert und die Einheit [S/cm] eingeführt. Anhand eines Beispiels wird die Leitfähigkeit verschiedener Lösungen illustriert, wobei die Lernenden im Rahmen einer interaktiven Aufgabenstellung die auftretenden Effekte erläutern sollen (Abbildung 136). Typische Leitfähigkeiten für unterschiedliche Wässer und Materialien werden zur Einordnung der Größenordnungen angegeben (vgl. Phywe Systeme GmbH & Co. KG).

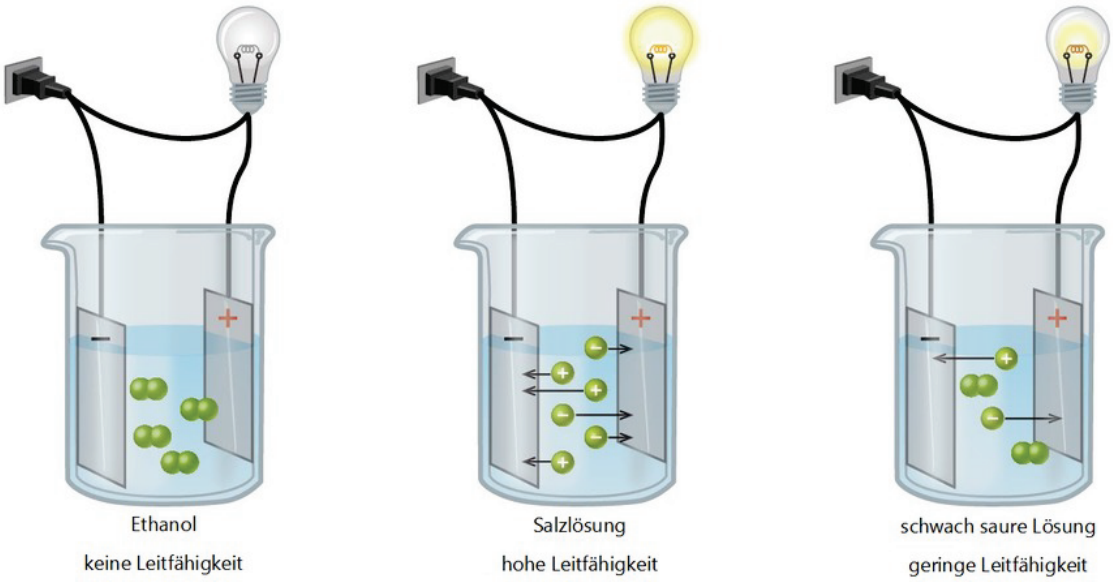


Abbildung 136: Aufgabe zur elektrolytischen Leitfähigkeit. Der Zusammenhang zwischen den drei abgebildeten Beispiellösungen und deren Leitfähigkeit soll durch die Lernenden erläutert werden (Screenshot, Projekt Open MINT Labs).

Im weiteren Verlauf stellen die Lernenden eine Vermutung zur Frage auf, woher die Ladungsträger in unseren Gewässern stammen. Gestufte Hilfen in Form von einzeln aufrufbaren Tipps führt so zur Erkenntnis, dass Salze in die Gewässer gelangen und im wässrigen Medium in Form hydratisierter Ionen Ladungen transportieren können.

Anschließend werden verschiedene Einträge, welche sich auf die Leitfähigkeit eines Gewässers auswirken können sowie deren Auswirkungen auf das Ökosystem Gewässer beziehungsweise Wechselwirkungen mit umgebenden Medien exemplarisch dargestellt. Konkret werden dabei die Auswirkungen von Nitrat, Chlorid, Eisen, Ammonium, Nitrit, Phosphat und Schwermetallen grob skizziert und Richtwerte für die Leitfähigkeit unterschiedlicher Gewässertypen angegeben. Das Grundlagenkapitel schließt mit einem Theorie-Check in Form einer Multiple-Choice-Aufgabe.

3) Experiment

Einleitend werden im Kapitel Experiment die benötigten Materialien und Chemikalien bildlich und in Tabellenform dargeboten. An die Aufgabenstellungen schließen die Versuchsanleitungen in Video- und Textform an.

1. Messen Sie an mehreren Stellen im Fließgewässer die Leitfähigkeit (AFB II).
2. Bestimmen Sie die Leitfähigkeit eines stehenden Gewässers, von frisch entnommenem Leitungswasser und von destilliertem Wasser (AFB II)

3. Stellen Sie eine Hypothese bezüglich der Entnahmestellen innerhalb eines Gewässers und dem zu erwartenden Messwert auf. Begründen Sie diese ausführlich (AFB III).

Nach erfolgter Versuchsdurchführung werden zunächst bereitgestellte, authentische Messdaten durch die Lernenden grafisch aufbereitet und verglichen. Mit Hilfe einer Skizze zur Lage der in den Messdaten verzeichneten Messstellen entlang des Gewässers sollen die Lernenden weiterhin mögliche Erklärungsansätze für den Verlauf der Leitfähigkeit ausformulieren. Am vorgegebenen Beispiel des Rheins lassen sich auf diesem Weg sowohl anthropologische (Abwassereinleitungen) als auch natürliche (Gesteine, Verdünnungseffekte) und letztlich der Einfluss der Küstengewässer als mögliche Erklärungsansätze identifizieren.

Das Kapitel Experiment schließt mit den Hinweisen zur Reinigung der Geräte und der Entsorgung der Verbrauchsmittel.

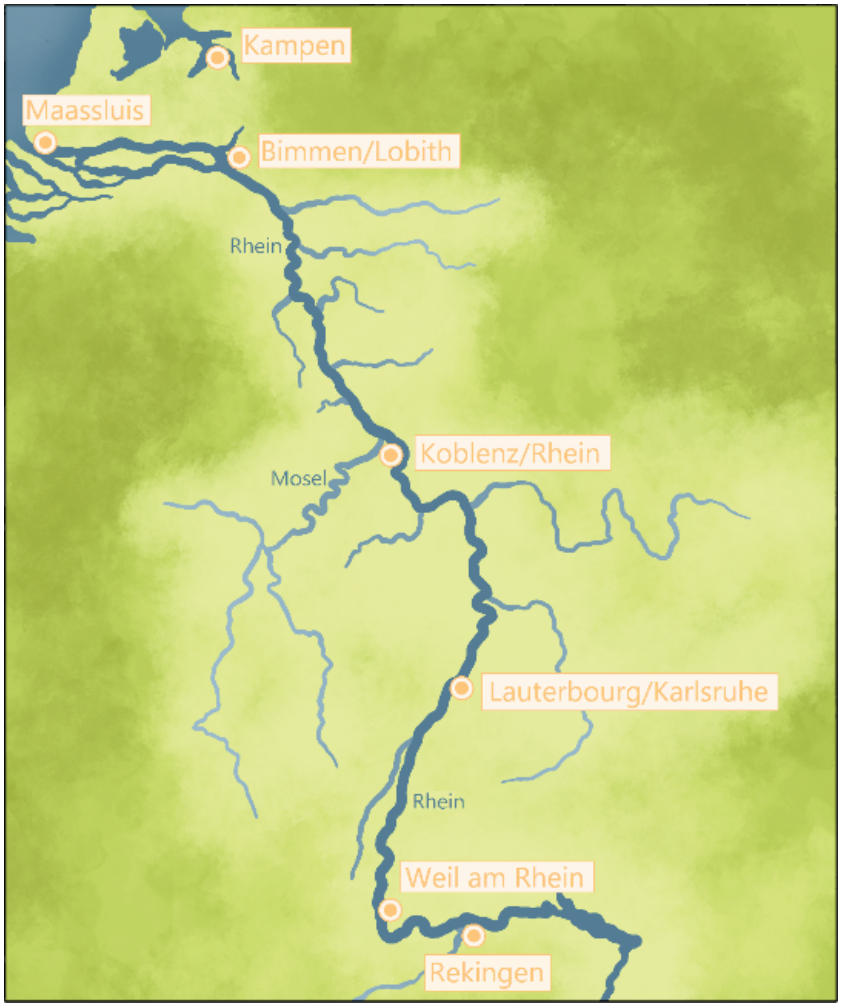


Abbildung 137: Skizze zum Verlauf des Rheins mit den in den Messdaten referenzierten Messstellen (Jasmin Hirtl, Projekt Open MINT Labs).

4) Anwendung

Die Rückführung auf den Einstiegskontext erfolgt im Kapitel Anwendung. Hier bearbeiten die Lernenden unter Rückgriff auf die erlernten theoretischen Grundlagen die Antwort auf die Frage, weshalb der Aufenthalt im Wasser für Fische ungefährlich, für Menschen dagegen sehr riskant sein kann. Auch hierzu stehen gestufte Hilfen bereit.

5) Reflexion

Das Kapitel Reflexion bietet neben einer schriftlichen Sicherung der zentralen theoretischen Inhalte im PDF-Format eine Selbstevaluation des Lernstandes mit Hyperlinks zu den entsprechenden Unterkapiteln.

Virtuelles Labor Fließgeschwindigkeit

1) Orientierung

Die einleitende Kontextualisierung des virtuellen Labors zur Fließgeschwindigkeit erfolgt durch eine Abbildung der Saarschleife als prominentes und lokales Beispiel eines Mäanders. Der Begleittext verweist auf die wechselnden Bedingungen innerhalb eines fließenden Gewässers, welche durch die Fließgeschwindigkeit maßgeblich mitbestimmt werden.

Besondere Lernvoraussetzungen sind für dieses virtuelle Labor nicht erforderlich, die Lernziele, welche im Verlauf des Labors thematisiert werden, sind in Tabelle 36 dargestellt.

Tabelle 36: Lernziele und Anforderungsbereiche des virtuellen Labors zur Fließgeschwindigkeit.

LZ 1	Sie können Ursachen für eine Strömung nennen.	AFB I
LZ 2	Sie können Einflussgrößen auf Strömungen in Fließgewässern wiedergeben.	AFB I
LZ 3	Sie können die Fließgeschwindigkeit eines Gewässers mithilfe des vorgestellten Sensors eigenständig ermitteln.	AFB II
LZ 4	Sie können die Auswirkungen menschlicher Einflussnahme auf ein Gewässer für den Aspekt der Fließgeschwindigkeit abschätzen.	AFB III

Auch in diesem Labor werden die Hinweise und Handreichungen des Wegweisers sowie eine Schlagwortwolke als Vorschau auf die anstehenden Lerninhalte dargestellt.

2) Grundlagen

Zur Einführung in die theoretischen Grundlagen dieses virtuellen Labors zeigt ein Video Extrem-Kajakfahrer im Wildwasser. Hierzu wird die Problemfrage aufgeworfen, wie es den Sportlern gelingt, inmitten des reißenden Flusses zum Stillstand zu kommen oder stellenweise gar gegen die Strömung ein stückweit bergauf zu gelangen.

Vor diesem Eindruck werden zunächst die Bedingungsfaktoren Wind, Höhenversatz und Dichteunterschiede als strömungserzeugend vorgestellt. Mittels eines interaktiven Mouse-over werden zu jedem Faktor kurze Erklärtexte eingeblendet (Abbildung 138).

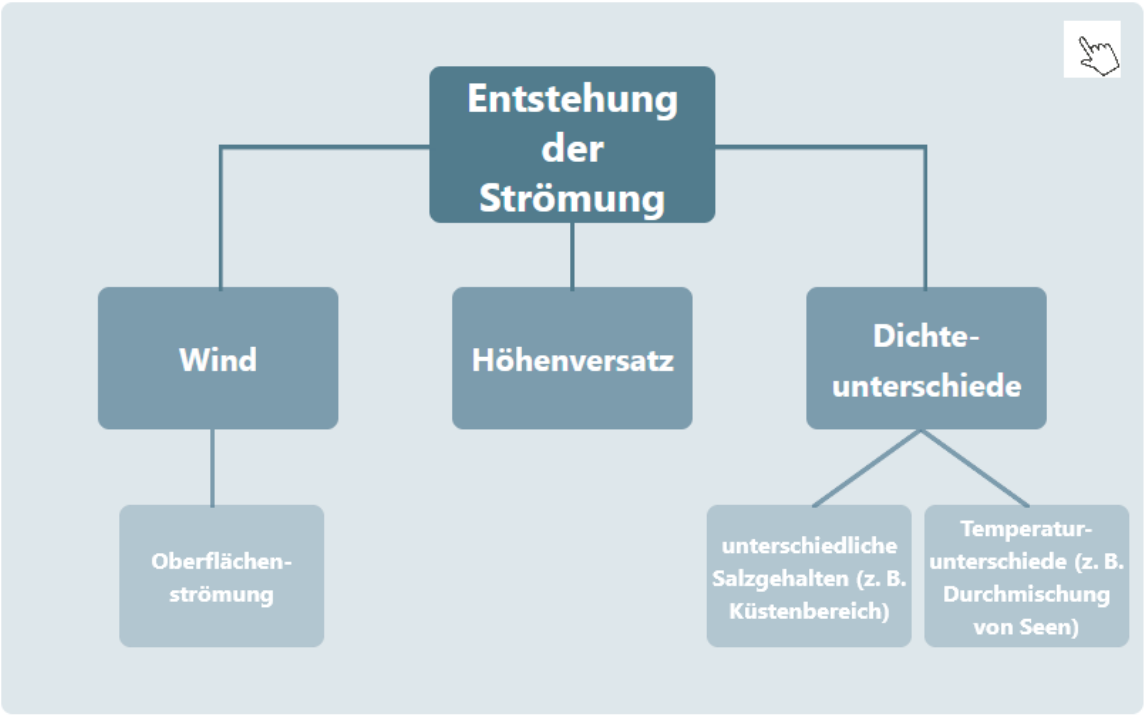


Abbildung 138: Die Faktoren der Entstehung von Strömungen werden durch Berühren mit dem Mauszeiger ("Mouse-over") als kleine Erklärtexte an der jeweiligen Stelle eingeblendet (Screenshot, Projekt Open MINT Labs).

Im weiteren Verlauf wird auf die Fließgeschwindigkeit von Flussläufen fokussiert, deren Fließgeschwindigkeit ebenfalls diversen Einflussgrößen unterliegt. Konkret werden hier benannt und erläutert: Abflussmenge, Art und Form des Flussbettes, Flussverlauf, Lage im Flusslauf und Hindernisse im Fluss. Darüber hinaus werden Quer- und Tiefenprofil eines Flusses mit Hilfe einer Querschnittszeichnung (Abbildung 139) durch einen Flusslauf begrifflich eingeführt.

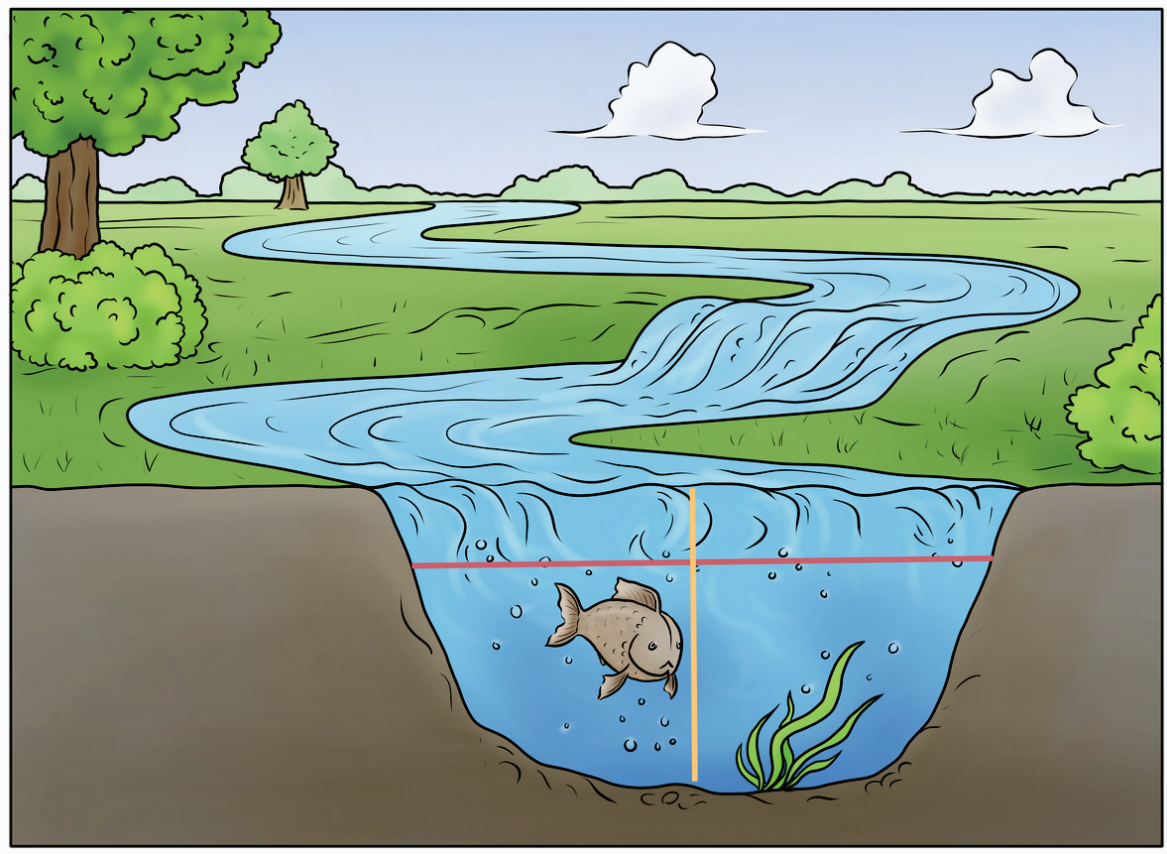


Abbildung 139: Querschnittszeichnung eines Flusslaufes. Querprofil (rot) und Tiefenprofil (gelb) sind deutlich erkennbar dargestellt (Jasmin Hirtl, Projekt Open MINT Labs).

Besonderer Fokus wird in einem weiteren Teilkapitel auf Hindernisse in Flussläufen gelegt, als Beispiele werden Abbruchkanten und Biberdämme illustriert.

Das Theoriekapitel schließt mit einem Theorie-Check in Form einer *Single-Choice*-Aufgabe, welche mit Hilfe des Tools LearningApps erzeugt wurde.

3) Experiment

Wie bereits zuvor dargestellt wird das Kapitel zur Versuchsdurchführung auch hier mit Sicherheitshinweisen und einer Materialliste eingeleitet. Neben der Darstellung in Listenform werden die Materialien ebenfalls als Bilderkarussell dargestellt.

Im Anschluss an die nachfolgend dargestellten Aufgabenstellungen wird die korrekte Durchführung der Messungen sowohl in Textform als herunterladbares PDF-Dokument wie auch als Video erläutert.

1. Messen Sie die Fließgeschwindigkeit eines Gewässers im Tiefenprofil (AFB II).

2. Nehmen Sie ein Querprofil des Gewässers von Ufer zu Ufer auf (sofern das Gewässer sicher begehbar ist oder Sie von einer Brücke aus das Wasser erreichen können; AFB II).
3. Führen Sie eine Messung durch, während Sie den Sensor aus dem Hauptstrom langsam in einen ruhigeren Bereich des Gewässers führen (AFB II).
4. Stellen Sie eine Hypothese über die Geschwindigkeitsverteilung im Gewässer auf. Begründen Sie diese ausführlich (AFB III).

Nach erfolgter Versuchsdurchführung wird eine authentische Messreihe als Beispiel vorgestellt. Die Messdaten beziehen sich hierbei auf eine viertelstündliche Messung der Fließgeschwindigkeit der Donau bei Kelheimwinzer über einen Zeitraum von einem Monat. Anhand dieses Beispiels soll der Verlauf der Messkurve zunächst beschrieben und eine Vermutung über die Ursachen für deren Verlauf aufgestellt werden. Eine Bearbeitung der Aufgabe erfolgt direkt interaktiv im virtuellen Labor, gestufte Lernhilfen in Form weiterer ergänzender und erklärender Diagramme werden als Hilfebuttons angeboten. Ebenso ist der Erwartungshorizont als Lösungsvorschlag abrufbar. Im konkreten Beispiel wird die kontinuierliche Zunahme der Fließgeschwindigkeit durch kräftige Niederschläge erklärbar. Die erläuternden Diagramme umfassen daher sowohl Pegelstände als auch Abfluss- und Niederschlagsmengen. Daran anknüpfend werden die Lernenden dazu aufgefordert eine grafische Auswertung ihrer eigenen Messdaten vorzunehmen und diese zu interpretieren. Eine Ergänzung um Bilder der Messstelle wird angeregt, sodass diese als Oberflächenformen des Wasserkörpers mitberücksichtigt werden können. Abschließend werden Hinweise zur Nachbereitung des Versuches und dem Rückbau des Messgerätes geliefert.

4) Anwendung

Das Anwendungskapitel leitet zurück auf die Problemfrage des Theoriekapitels. Neben der im virtuellen Labor auszufüllenden Fragestellung wird auch eine grafische (Abbildung 140) und schriftliche Erläuterung des Phänomens Kehrwasser angeboten, womit letztlich die Problemfrage geklärt wird.

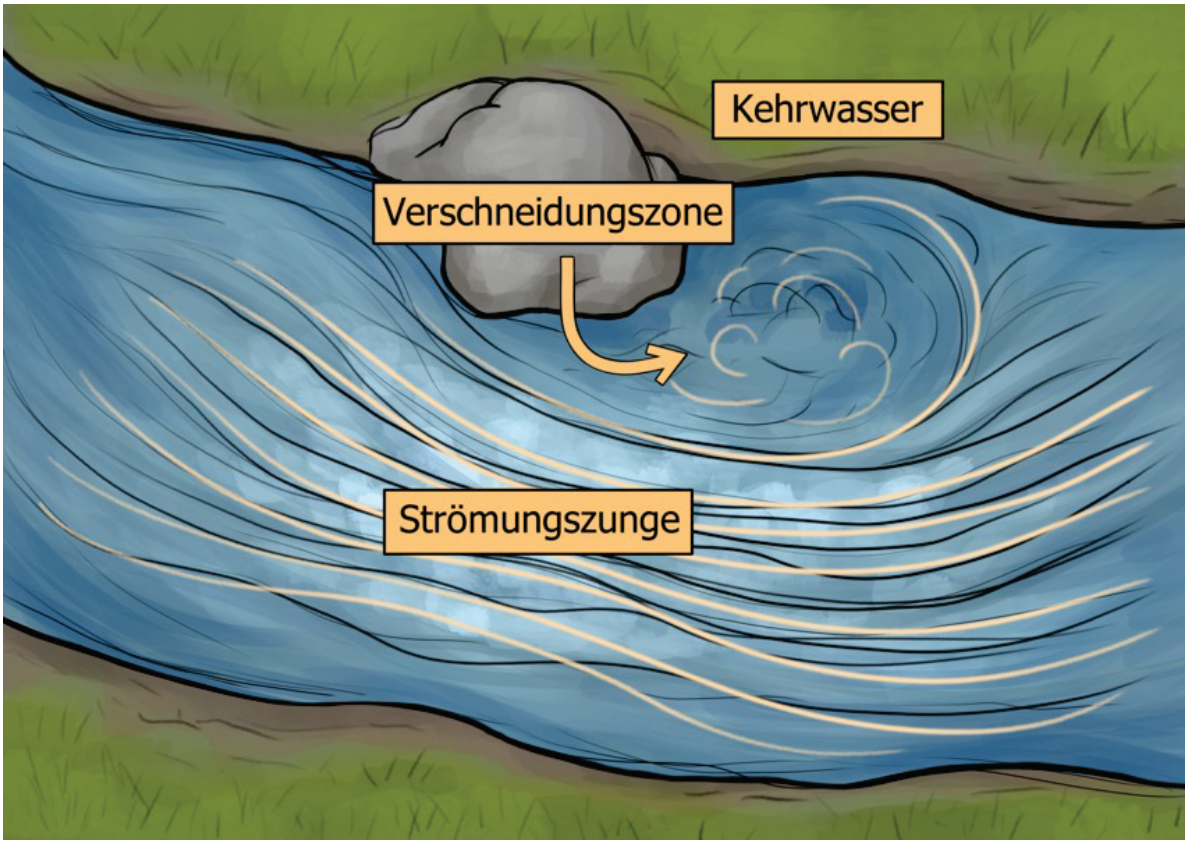


Abbildung 140: Grafische Erklärung des Phänomens Kehrwasser. Hinter Hindernissen im Wasser bilden sich ruhige Zonen aus, welche eine der Hauptströmung entgegen gerichtete Strömungsrichtung mit geringer Fließgeschwindigkeit aufweisen (Jasmin Hirtl, Projekt Open MINT Labs).

Beispiele für die Praxisrelevanz und den Lebensweltbezug des Themas werden anhand der Energiegewinnung durch Wasserkraft sowie am Beispiel der Flößerei aufgezeigt. Vertiefend hierzu wird die Begradigung des Rheins als großer Binnenschifffahrtsstraße und die damit einhergehend erforderliche Regulierung der Fließgeschwindigkeit durch Buhnen angeführt. Beispiele für Hochwasserrückhaltemaßnahmen runden den Praxisbezug ab und stellen die Kraftwirkung durch strömendes Wasser eindrücklich dar.

5) Reflexion

Im Kapitel Reflexion wird zunächst eine schriftliche Ergebnissicherung als Download im PDF-Format angeboten. Weiterhin erfolgt die Selbstevaluation der Lernenden für dieses virtuelle Labor mit entsprechendem Rückbezug auf die jeweiligen Teilkapitel für eine etwaige Wiederholung der Inhalte.

B) Druckvorlagen Arbeitsmaterialien

Versuchsanleitung Aufbau und Bedienung der Messgeräte

UNIVERSITÄT KOBLENZ · LANDAU

open MINT labs

Aufbau der Messgeräte

Für das Experiment benötigen Sie die folgenden Dinge:

- Tablet mit der App MiLab
- Einstein LabMate+ Datenlogger
- Konverter-Box (Elektroden-spezifisch)
- Verbindungskabel 2x miniUSB
- Beliebige Einstein Mess-Elektrode

So bauen Sie das Messgerät auf:

1. Starten Sie die App MiLab auf dem Tablet. Schalten Sie das einstein LabMate+ durch langes drücken der Taste ein, so dass es grün blinkt. Verbinden Sie dann die App per Bluetooth mit dem einstein LabMate+ Datenlogger.
   Anmerkung: Die letzten 4 Ziffern der Seriennummer auf der Rückseite des LabMate+ geben die Bluetooth-Kennung an.
2. Verbinden Sie die Elektrode mit dem Datenlogger durch miniUSB-Kabel und Konverter-Box.

Hinweis: Sie können die **Dauer** und die **Häufigkeit der Messungen** einstellen. Überlegen Sie sich vor jeder Messung welche Einstellungen hier sinnvoll sind. Überlegen Sie auch, ob die Genauigkeit der ausgegebenen Messwerte zur Durchführung passt. Zur Einstellung der Messrate, klicken Sie auf das Zahnrad hinter „Rate". Stellen Sie dann die ge-wünschte Messrate und –dauer ein und bestätigen Sie durch Klick auf den grünen Pfeil unten rechts.

Nach dem Experimentieren:

- Speichern Sie Ihre Daten lokal oder exportieren Sie Ihre Messreihen. Notieren Sie die wichtigsten Werte auch manuell!

Gut zu wissen:
Über die Auswahlleiste unten links in der App, können Sie sich zusätzliche Informationen anzeigen lassen oder diese zu den Daten aufnehmen.
Sie können sich dort auch die Daten in der App auf viele verschiedene Arten ansehen.

Sicherung Aufbau und Bedienung der Messgeräte

Ergebnissicherung

Standard-Lösungen sind unter Laborbedingungen exakt hergestellte Lösungen. Diese enthalten eine sehr genau definierte Menge eines Stoffes, womit der pH-Wert der Lösung bekannt ist.

Kalibrieren

Um die **Messwertabweichungen** der **Sensoren** zu bestimmen, dienen **Standard-Lösungen als Referenz**.

Vorgehen:

Der Sensor erfasst den pH-Wert der Lösung. Da der exakte pH-Wert bekannt ist, kann mithilfe der ermittelten Messwertabweichung das Gerät neu kalibriert werden. Nach dem **Kalibrieren** ist der Messwertfehler bekannt. Die später gemessenen Werte werden anschließend, um die Messwertabweichung angepasst, korrekt ausgegeben.

Beispielmethode:

Bei der **Zweipunkt-Kalibration** werden zwei Standardlösungen als Referenzwerte verwendet. Die sich daraus ergebende Gerade nennt man **Kalibriergerade**.

Messwertabweichungen können auf **Ablesefehler**, **systematische** oder **grobe Fehler** beim Experimentieren, veränderte **Umgebungsbedienungen** oder die **Messgenauigkeit** von Geräten zurückzuführen sein. Beziehen Sie diese Parameter stets in die Betrachtung Ihrer Versuchsergebnisse mit ein, um eine **Fehlinterpretation** Ihrer Werte zu vermeiden.

Aus der Praxis

Um dem **wahren Wert** möglichst nahezukommen, ist es in der Laborpraxis, üblich **Messreihen** vorzunehmen. Der Wert wird demnach mehrfach gemessen und anschließen ein **Mittelwert** berechnet. Des Weiteren werden **Fehlerrechnungen** beim Auswerten der Messwerte angewandt, um z. B. Messgeräteungenauigkeiten auszugleichen.

Achtung:

Überprüfen Sie immer die Messbereiche Ihrer verwendeten Geräte. Überdenken Sie gegebenenfalls Ihre Auswahl. Insbesondere Messwerte, die nahe an den Grenzen des Messbereiches eines Sensors liegen, sind fehlerbehaftet.

Notizen

1/1

Versuchsanleitung Ionengehalte Messen (Chlorid, Nitrat, Ammonium)

UNIVERSITÄT KOBLENZ · LANDAU

open MINT labs

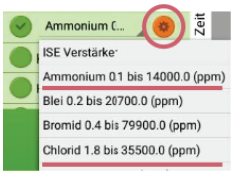
Ionengehalte messen

Für das Experiment benötigen Sie die folgenden Dinge:

- Tablet mit der App MiLab
- Einstein LabMate+ Datenlogger
- Verbindungskabel 2x miniUSB
- Einstein ISE-Elektrode
- Konverter-Box
- ISA-Lösungen
- Standardlösungen 10 & 1000 ppm
- 2 kleine Bechergläser
- Mehrere 0,1 ml und 10 ml Spritzen mit stumpfen Kanülen
- Glasstab
- Destilliertes Wasser
- Papiertücher
- Mehrere große Bechergläser zur Probenahme

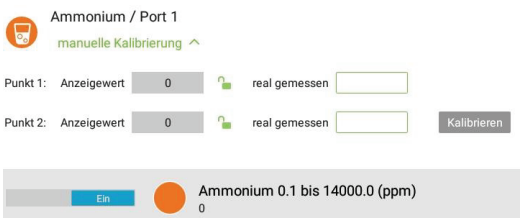
So führen Sie das Experiment durch:

1. Verbinden Sie den Sensor mit dem Datenlogger. Wählen Sie in der MiLAB App den **ISE-Sensor** aus und tippen Sie auf das Zahnrad hinter der Sensorbezeichnung. Klappen Sie das Feld zum manuellen Kalibrieren des Sensors auf.



2. Bereiten Sie folgende **Lösungen zum Kalibrieren** der Elektrode vor:
   a) Geben Sie 10 ml der 10 ppm-Lösung in ein 50 ml Becherglas. Geben Sie 0,2 ml der ISA-Lösung hinzu. Rühren Sie die Lösung kräftig durch.
   b) Geben Sie 10 ml der 1000 ppm-Lösung in ein 50 ml Becherglas. Geben Sie 0,2 ml der ISA-Lösung hinzu. Rühren Sie die Lösung kräftig durch.

3. Tippen Sie in das obere Feld den Wert „10" ein. Halten Sie die Elektrode in die vorbereitete 10 ppm-Lösung (Standard 1). Wenn sich der Wert stabilisiert hat, loggen Sie ihn durch Anklicken des „Schloss"-Symboles ein.



4. Spülen Sie die Elektrode mit destilliertem Wasser ab und tupfen Sie diese mit Papier trocken.

5. Tippen Sie in das untere Feld den Wert „1000" ein. Halten Sie die Elektrode in die vorbereitete 1000 ppm-Lösung (Standard 2). Wenn sich der Wert stabilisiert hat, loggen Sie ihn durch Anklicken des „Schloss"-Symboles ein. Tippen Sie anschließend auf „**Kalibrieren**"

6. Sie können nun die Ionengehalte von Wasserproben bestimmen. Entnehmen Sie hierzu an verschiedenen Stellen Proben und ermitteln Sie die Messwerte. Eine Messung können Sie durch Antippen des „Play-Pfeiles" starten.
Das Volumen der Probe sollte in etwa gleich dem Volumen der Kalibrierlösungen sein.

Zu je 10 ml Wasserprobe müssen vor der Messung 0,2 ml ISA-Lösung zugegeben und gut durchmischt werden.

Nach dem Experimentieren:

- Restliche Standardlösungen gut verschließen und aufbewahren, Wasserproben können ausgeschüttet werden
- Feststoffabfälle in den Mülleimer
- Säubern Sie die Materialien am Spültisch

Sicherung Chlorid

Ergebnissicherung

Der Chloridgehalt eines Gewässers zeigt die Belastung mit Salzen an. Natürliche Gewässer enthalten meist 10 – 30 mg/ml Chlorid. Der Grenzwert für Trinkwasser liegt bei 250 mg/l.

Der Chloridgehalt kann z. B. **erhöht** sein durch:

- Salzlagerstätten
- Küstennähe
- Einleitungen häuslicher Abwässer und Viehzucht (Harn)
- Einleitungen aus der Industrie (Ölgewinnung, Papierherstellung, Salzgewinnung, Galvanik, ...)

Steigende Salzgehalte verändern ein **Ökosystem** massiv. Tier- und Pflanzenarten können stark geschädigt werden oder sogar völlig verenden. Eine kontinuierliche und zuverlässige **Überwachung** der Chloridgehalte ist damit wichtiger Bestandteil jeder Gewässeranalyse.

Auch andere Salze können in Wasser gelöst werden. Wie stark sich einzelne Salze in Wasser lösen, hängt von deren **Art**, dem **Verteilungsgrad** und der **Temperatur** des Wassers ab. Mit einer entsprechenden Elektrode können wir den Chloridgehalt im Wasser direkt messen.

Chloride werden in der Umwelt kaum bis gar nicht chemisch oder biologisch abgebaut. Daher dienen als **Gegenmaßnahmen** nur die **Verdünnung** und der **Austrag** aus dem belasteten Gebiet.

Notizen

Sicherung Nitrat & Ammonium

Ergebnissicherung

Der Nitrat-und Ammoniumgehalt eines Gewässers zeigt die Belastung mit Nährstoffen an. Natürliche Gewässer enthalten meist nahezu kein Ammonium. Sehr schlechte Werte für die Gewässergüte liegen in Wasser vor bei Werten von:

Ammonium: 1,5 mg/l

Nitrat: 44 mg/l

Optimalerweise liegt der Nitratgehalt unter 4 mg/l.

Der Nitratgehalt kann z. B. erhöht sein durch:

- Viehbetriebe (Exkremente)
- Mineralische und organische Düngemittel, die eingetragen werden
- Abgase aus der Industrie, insbesondere Ammoniakhaltige Abgase
- Abwässer

Häufig können gerade **Düngemittel** gar nicht in dem Maße von Pflanzen aufgenommen werden, wie sie auf den Feldern verfügbar gemacht werden. Die nicht benötigten Nährstoffe, in Form von Nitraten und Ammoniumverbindungen, fließen dann mit **Niederschlagswasser** in die Flüsse und Bäche ab.

Erhöhte Nährstoffgehalte im Wasser können zu einer schwerwiegenden Veränderung des Ökosystems führen. Sich übermäßig entwickelnder Pflanzenbewuchs erhöht den Anteil an zu zersetzender Biomasse. Der dabei verbrauchte Sauerstoff fehlt anderen Wasserlebewesen. Im schlimmsten Fall kann es zum „Kippen" eines Gewässers kommen, dann stirbt häufig ein Großteil der Fischpopulation komplett ab.

Mit entsprechenden Elektroden können wir den **Nitratgehalt und den Ammoniumgehalt** im Wasser direkt messen.

Nitrat und Ammonium werden durch den Bewuchs in Gewässern aufgenommen und so abgebaut. Als **effektive Maßnahme** zur Vermeidung von Verschmutzungen durch Stickstoffverbindungen gilt die **Überwachung der Einleitungen**.

Notizen:

Versuchsanleitung pH-Wert Messen

UNIVERSITÄT KOBLENZ · LANDAU

open MINT labs

pH-Werte messen

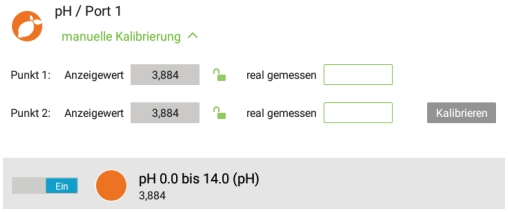
Für das Experiment benötigen Sie die folgenden Materialien:

- Tablet mit der App MiLab
- Einstein LabMate+ Datenlogger
- Verbindungskabel 2x miniUSB
- Einstein pH-Elektrode
- Konverter-Box pH
- Pufferlösung pH 4 Standard
- Pufferlösung pH 7 oder 10 Standard
- 2 kleine Bechergläser (50-100ml) zur Kalibration
- Destilliertes Wasser
- Papiertücher
- Mehrere große Bechergläser zur Probenahme

So führen Sie das Experiment durch:

1. Verbinden Sie den Sensor wie dargestellt mit dem Datenlogger. Wählen Sie in der MiLAB App den pH-Sensor aus und tippen Sie auf das Zahnrad hinter der Sensor-Bezeichnung.
   Klappen Sie das Feld zum manuellen Kalibrieren des Sensors auf.

2. Tippen Sie in das obere Feld den Wert „4" ein. Halten Sie die Elektrode in ein kleines Becherglas mit der Pufferlösung **(pH=4 Standard)**. Wenn sich der Wert stabilisiert hat, loggen Sie ihn durch Anklicken des „Schloss"-Symboles ein.



3. Spülen Sie die Elektrode mit destilliertem Wasser ab und tupfen Sie diese mit Papier trocken.
4. Tippen Sie den Wert der **zweiten Pufferlösung (pH=7 oder pH=10)** in das untere Feld ein und halten Sie die Elektrode dann in ein kleines Becherglas mit der entsprechenden Pufferlösung. Warten Sie erneut die Einstellung des Wertes ab und loggen Sie diesen dann ein. Tippen Sie anschließend auf **„Kalibrieren"**.
5. Sie können nun den pH-Wert von Wasserproben bestimmen. Entnehmen Sie hierzu an verschiedenen Stellen Proben und ermitteln Sie die pH-Werte. Eine Messung können Sie durch Antippen des „Play-Pfeiles" starten.

Nach dem Experimentieren:

- Pufferlösungen aufbewahren, Wasserproben können ausgeschüttet werden
- Feststoffabfälle in den Mülleimer
- Säubern Sie die Materialien am Spültisch
- Spülen Sie die Elektrode mit destilliertem Wasser, tupfen Sie diese trocken und bewahren Sie diese in der Aufbewahrungslösung auf (Elektrode muss eingetaucht sein!)

Sicherung pH-Wert

Ergebnissicherung

Der **pH-Wert** einer Lösung gibt an**, wie stark sauer** oder **basisch** (auch als „alkalisch" bezeichnet) eine Lösung ist. Je niedriger der pH-Wert, umso saurer reagiert eine Lösung. Je höher der pH-Wert, umso basischer reagiert sie.

Die pH-Werte werden von **0 bis 14** wie folgt klassifiziert:

pH > 7 basisch
pH = 7 neutral
pH < 7 sauer

Der pH-Wert einer Lösung ist abhängig von der **Konzentration** an **Oxonium-Ionen** (H_3O^+). Denn er ist definiert als der **negative dekadische Logarithmus** der Konzentration an H_3O^+-Ionen.

$$\mathbf{pH = -\log c(H_3O^+)}$$

Die **pH-Werte von Gewässern** bewegen sich in der Regel **im neutralen Bereich zwischen 6,5 und 8**. Abweichungen und Schwankungen sind trotzdem möglich und können zu schweren Schädigungen der Flora und Fauna führen oder in Extremfällen zum Sterben dieser.

Einflussfaktoren auf den pH-Wert von Gewässern:

- **Kohlendioxid** (CO_2): Verschiebung in den sauren Bereich
- **Schwefeloxide und Stickoxide**: Verschiebung in den sauren Bereich
- Auswaschung aus Gesteinen (z. B. **Kalk**): Verschiebung in den basischen Bereich
- Einträge von **Säuren und Laugen**
- **Pflanzenaktivität**: hoher Verbrauch an CO_2, daher Verschiebung in den basischen Bereich

Die **gegenseitige Beeinflussung,** der einzelnen **Faktoren** im komplexen System eines Gewässers, ist keinesfalls vernachlässigbar. Eine **Interpretation** der **pH-Messergebnisse** ist daher nur bedingt möglich. Dennoch gilt der pH-Wert aufgrund seiner massiven Auswirkungen auf dieses ebenso sensible wie komplexe System als einer der **wichtigsten Parameter** in der **Gewässeranalytik**.

Notizen

1/1

Versuchsanleitung Sauerstoffgehalt Messen

UNIVERSITÄT KOBLENZ · LANDAU

open MINT labs

Sauerstoffgehalte messen

Für das Experiment benötigen Sie die folgenden Dinge:

- Tablet mit der App MiLab
- Einstein LabMate+ Datenlogger
- Verbindungskabel 2x miniUSB
- Einstein O_2-Elektrode
- Konverter-Box
- Salzlösung Null-Standard
- Großes Becherglas (250 mL)
- Glasstab
- Destilliertes Wasser
- Papiertücher
- Thermometer
- Mehrere große Bechergläser zur Probenahme

So führen Sie das Experiment durch:

1. Wählen Sie in der MiLAB App den Sauerstoffsensor aus und tippen Sie auf das Zahnrad hinter der Sensorbezeichnung. Wählen Sie die **Option „Sauerstoff in Flüssigkeiten [mg/l]“.** Klappen Sie das Feld zum manuellen Kalibrieren des Sensors auf.

2. Tippen Sie in das obere Feld den Wert „0“ ein. Halten Sie die Elektrode in die Salzlösung (**Null-Standard**). Wenn sich der Wert stabilisiert hat, loggen Sie ihn durch Anklicken des „Schloss“-Symboles ein.
   <u>Anmerkung:</u> Es dauert eine Weile, bis sich der Wert stabilisiert! Die Membran der Elektrode ist sehr empfindlich und grenzt die Elektrodenlösung im Inneren ab. Falls die Membran beschädigt wurde oder Luftblasen sichtbar sind, wenden Sie sich bitte an die Verantwortlichen.

3. Spülen Sie die Elektrode mit destilliertem Wasser ab und tupfen Sie diese mit Papier trocken.

4. Sättigen Sie etwas destilliertes Wasser mit Sauerstoff, indem Sie es mit dem Glasstab kräftig aufrühren. Bestimmen Sie mit dem Thermometer die Temperatur des Wassers. Lesen Sie in untenstehender Tabelle den Wert der Sättigung bei der gemessenen Temperatur ab. Dies ist Ihr **zweiter Punkt zur Kalibration!** Tippen Sie diesen Wert in das untere Feld ein, Halten Sie die Elektrode in das Wasser, warten Sie erneut die Einstellung des Wertes ab und loggen diesen dann ein. Tippen Sie anschließend auf **„Kalibrieren“.**

5. Sie können nun den Sauerstoffgehalt von Wasserproben bestimmen. Entnehmen Sie hierzu an verschiedenen Stellen Proben und ermitteln Sie die Messwerte. **Beachten Sie, dass eine Messung der Sauerstoffsättigung immer auch eine Temperaturmessung erfordert!**

Eine Messung können Sie durch Antippen des „Play-Pfeiles" starten. Achten Sie darauf möglichst **frische Proben zu nehmen und diese schnell zu verarbeiten**, da der Sauerstoffgehalt schnell abnimmt. Die gemessenen Werte sind nur im Zusammenhang mit der Temperatur der Wasser-probe aussagekräftig. Notieren Sie diese Werte jeweils zusammen und berechnen Sie die prozentuale Sauerstoffsättigung.

Tabelle 1: Daten entnommen aus Sander, Marco. Übersicht Wasserchemische Parameter, FV Heilbronn. http://www.fv-heilbronn.de/pdf/Uebersicht%20Wasserchemische%20Parameter.pdf (abgerufen am 17.12.2018).

$t[^{\circ}C]$	,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
	$\frac{mg\,O_2}{l}$									
0	14,16	14,12	14,08	14,04	14,00	13,97	13,93	13,89	13,85	13,81
1	13,77	13,74	13,70	13,66	13,63	13,59	13,55	13,51	13,48	13,44
2	13,40	13,37	13,33	13,30	13,26	13,22	13,19	13,15	13,12	13,08
3	13,05	13,01	12,98	12,94	12,91	12,87	12,84	12,81	12,77	12,74
4	12,70	12,67	12,64	12,60	12,57	12,54	12,51	12,47	12,44	12,41
5	12,37	12,34	12,31	12,28	12,25	12,22	12,18	12,15	12,12	12,09
6	12,06	12,03	12,00	11,97	11,94	11,91	11,88	11,85	11,82	11,79
7	11,76	11,73	11,70	11,67	11,64	11,61	11,58	11,55	11,52	11,50
8	11,47	11,44	11,41	11,38	11,36	11,33	11,30	11,27	11,25	11,22
9	11,19	11,16	11,14	11,11	11,08	11,06	11,03	11,00	10,98	10,95
10	10,92	10,90	10,87	10,85	10,82	10,80	10,77	10,75	10,72	10,70
11	10,67	10,65	10,62	10,60	10,57	10,55	10,53	10,50	10,48	10,45
12	10,43	10,40	10,38	10,36	10,34	10,31	10,29	10,27	10,24	10,22
13	10,20	10,17	10,15	10,13	10,11	10,09	10,06	10,04	10,02	10,00
14	9,98	9,95	9,93	9,91	9,89	9,87	9,85	9,83	9,81	9,78
15	9,76	9,74	9,72	9,70	9,68	9,66	9,64	9,62	9,60	9,58
16	9,56	9,54	9,52	9,50	9,48	9,46	9,45	9,43	9,41	9,39
17	9,37	9,35	9,33	9,31	9,30	9,28	9,26	9,24	9,22	9,20
18	9,18	9,17	9,15	9,13	9,12	9,10	9,08	9,06	9,04	9,03
19	9,01	8,99	8,98	8,96	8,94	8,93	8,91	8,89	8,88	8,86
20	8,84	8,83	8,81	8,79	8,78	8,76	8,75	8,73	8,71	8,70
21	8,68	8,67	8,65	8,64	8,62	8,61	8,59	8,58	8,56	8,55
22	8,53	8,52	8,50	8,49	8,47	8,46	8,44	8,43	8,41	8,40
23	8,38	8,37	8,36	8,34	8,33	8,32	8,30	8,29	8,27	8,26
24	8,25	8,23	8,22	8,21	8,19	8,18	8,17	8,15	8,14	8,13
25	8,11	8,10	8,09	8,07	8,06	8,05	8,04	8,02	8,01	8,00
26	7,99	7,97	7,96	7,95	7,94	7,92	7,91	7,90	7,89	7,88
27	7,86	7,85	7,84	7,83	7,82	7,81	7,79	7,78	7,77	7,76
28	7,75	7,74	7,72	7,71	7,70	7,69	7,68	7,67	7,66	7,65
29	7,64	7,62	7,61	7,60	7,59	7,58	7,57	7,56	7,55	7,54
30	7,53	7,52	7,51	7,50	7,48	7,47	7,46	7,45	7,44	7,43

$$prozentualeSauerstoffsättigung = \frac{gemessener\ Sauerstoffgehalt\ \frac{mg}{l}}{Sättigung\ bei\ gegebener\ Temperatur\ \frac{mg}{l}} \cdot 100$$

Nach dem Experimentieren:

- Salzlösung aufbewahren, Wasserproben können ausgeschüttet werden
- Feststoffabfälle in den Mülleimer
- Säubern Sie die Materialien am Spültisch

Sicherung Sauerstoff

Ergebnissicherung

Der **Sauerstoffgehalt** eines Gewässers bildet die Grundlage für ein belebtes Biotop.

Fische benötigen je nach Art mindestens 4-10 mg/l Sauerstoff im Wasser zum Überleben.
Zu hohe Gasgehalte (z. B. O_2 > 200 %) führen zu Schädigungen bis hin zum Absterben der Fische durch die Gasblasenkrankheit oder nachfolgende Infektionen.

Die **Löslichkeit** von Gasen in Wasser wird durch das **Gesetz von Henry** beschrieben. Die Menge des lösbaren Gases ist dabei abhängig von:

- Art des Gases und der Flüssigkeit
- Temperatur
- Feststoffe/gelöste Stoffe im Wasser
- Partialdruck des Gases über der Flüssigkeit
- Kontaktfläche zwischen Gas und Flüssigkeit

Prozentuale Sättigung vs. **Absoluter Gehalt:**

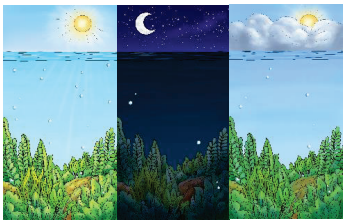
$$\textit{prozentuale Sauerstoffsättigung} = \frac{\textit{gemessener Sauerstoffgehalt}\ [mg/l]}{\textit{Sättigung bei gegebener Temperatur}\ [mg/l]} \cdot 100$$

Mit einer **Elektrode** kann der **Sauerstoffgehalt** von Wasser **gemessen** werden.

Mithilfe der maximalen Sauerstoffsättigung bei einer bestimmten Temperatur (100 %), kann die aktuelle Sauerstoffsättigung aus dem gemessenen Sauerstoffgehalt berechnet werden.

Einflussfaktoren auf die **O_2-Werte** von Gewässern:

- Photosynthese der Pflanzen produziert Sauerstoff unter Lichteinfluss
- Pflanzen verbrauchen teils Sauerstoff bei Nacht
- Fische, kleinere Lebewesen und einige Bakterienarten veratmen Sauerstoff
- Einige chemische Prozesse benötigen Sauerstoff
- Intensiver Kontakt mit atmosphärischer Luft trägt Sauerstoff in das Wasser ein



Quelle: Verbundprojekt Open MINT Labs (2019)

Notizen

Versuchsanleitung Leitfähigkeit Messen

Leitfähigkeit messen

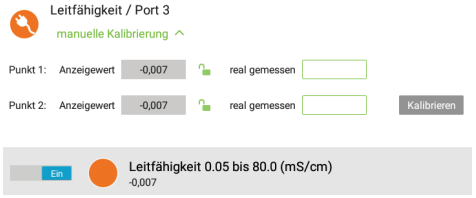
Für das Experiment benötigen Sie die folgenden Dinge:

- Tablet mit der App MiLab
- Einstein LabMate+ Datenlogger
- Verbindungskabel 2x miniUSB
- Einstein Leitfähigkeitselektrode
- Konverter-Box
- Destilliertes Wasser
- Papiertücher
- Mehrere große Bechergläser zur Probenahme
- Leitfähigkeitsstandardlösungen

So führen Sie das Experiment durch:

1. Verbinden Sie den Sensor mit dem Datenlogger. Wählen Sie in der MiLAB App den Leitfähigkeitssensor aus und tippen Sie auf das Zahnrad hinter der Sensor-Bezeichnung. Klappen Sie das Feld zum manuellen Kalibrieren des Sensors auf.

2. Tippen Sie in das obere Feld den Wert der ersten Standardlösung ein. Halten Sie die Elektrode in die Standardlösung. Wenn sich der **Wert stabilisiert** hat, loggen Sie ihn durch Anklicken des **„Schloss"-Symboles** ein.



<u>Beachten Sie:</u> Der Sensor muss bis zum oberen Ende des Ausschnittes eingetaucht sein!

3. Spülen Sie die Elektrode mit destilliertem Wasser ab und tupfen Sie diese mit Papier trocken.

4. Tippen Sie den Wert des zweiten Standards in das untere Feld ein. Halten Sie die Elektrode in diesen Standard und warten Sie bis der Wert stabil ist. Loggen Sie diesen ein. Tippen Sie anschließend auf **„Kalibrieren"**

5. Sie können nun die Leitfähigkeit von Wasserproben bestimmen. Entnehmen Sie hierzu an verschiedenen Stellen Proben und ermitteln Sie die Messwerte. Eine Messung können Sie durch Antippen des „Play-Pfeiles" starten.

Nach dem Experimentieren:

- Standards aufbewahren, Wasserproben können ausgeschüttet werden
- Feststoffabfälle in den Mülleimer
- Spülen Sie die Elektrode mit destilliertem Wasser, tupfen Sie sie trocken und verpacken Sie diese.

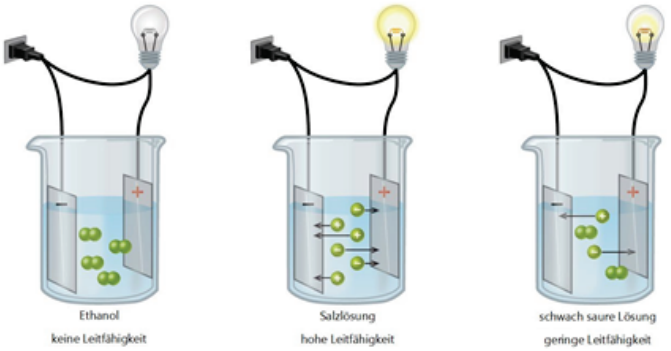
Sicherung Leitfähigkeit

Ergebnissicherung

Leitfähigkeit von Gewässerproben

Reines Wasser leitet elektrischen Strom sehr schlecht.

Salze lösen sich in Wasser, es liegen dann **gelöste Ionen** im Wasser vor. Diese **hydratisierten Ionen** dienen als **Ladungsträger** und ermöglichen die Leitung elektrischer Ströme in Wasser. Man spricht von der ***elektrolytischen Leitfähigkeit***.



Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Conductivity_(electrolytic)2.jpg, von Karishma50, veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0, aufgerufen am 14.04.2020, bearbeitet von Verbundprojekt Open MINT Labs.

Die elektrolytische Leitfähigkeit ist abhängig von:

- Angelegter Spannung
- Konzentration der Ionen
- Art der Ionen

Die elektrolytische Leitfähigkeit kann zur Bewertung der Gewässergüte herangezogen werden. Sie verschafft einen ersten Eindruck davon, **wie viele Ionen** in der Wasserprobe vorliegen. Außerdem lassen sich damit gemessene Ionengehalte (bspw. der Messungen mit den ionensensitiven Elektroden) auf ihre **Plausibilität** prüfen.

Liegen sehr viele Ionen vor, ist auch die Leitfähigkeit der Wasserprobe sehr hoch.

Einheit elektrolytischer Leitfähigkeit: **S/cm**
Bedeutung: **Siemens pro Zentimeter**.

Bei guter Gewässerqualität sollte die Leitfähigkeit unter 300 µS/cm liegen. Werte über 900 µS/cm gelten für **Süßwasser** als Indikator einer schlechten Wasserqualität.
Bei **Salzwasser** oder in Küstennähe können die Werte durch den Einfluss des Salzgehaltes des Meerwassers deutlich höher liegen. Hier werden Werte bis rund 50 mS/cm erreicht.
Deshalb muss für die Interpretation der Leitfähigkeitswerte der **Ort der Beprobung** berücksichtigt werden.

Notizen

1/1

Versuchsanleitung Fließgeschwindigkeit

UNIVERSITÄT KOBLENZ · LANDAU

open MINT labs

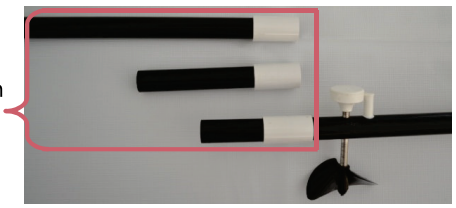
Fließgeschwindigkeit messen

Für das Experiment benötigen Sie die folgenden Dinge:

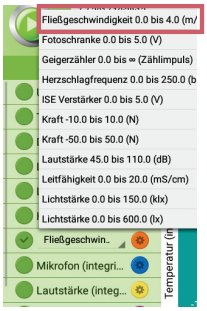
- Tablet mit der App MiLab
- Einstein LabMate+ Datenlogger
- Verbindungskabel 2x miniUSB
- Einstein Fließgeschwindigkeitselektrode
- Konverter-Box
- Papiertücher
- Kabelbinder
- Schere
- Stabiler Teleskopstab (z. B. von Keschern)

So führen Sie das Experiment durch:

1. Bauen Sie das Messgerät zusammen, indem Sie die Plastikrohre ineinanderstecken. Am unteren Ende werden **Abstandhalter** zum Gewässerboden befestigt, sodass der Propeller nicht aus Versehen in den Boden gedrückt werden kann. Wählen Sie die Abstandshalter passend zur Tiefe, in der Sie messen wollen.



2. Verbinden Sie das Kabel über die Adapter mit der Einstein LabMate+ Box. Wählen Sie in der MiLAB App den Fließgeschwindigkeitssensor aus. Sie finden diesen über den **Ausklapp-Pfeil** in der Sensorenliste am linken Bildschirmrand.



3. Befestigen Sie die Plastikrohre mit Kabelbindern so am Ende eines Teleskopstabes, dass der Propeller frei drehen kann, und Sie ihn sicher in die Strömung halten können.

4. Sie können nun die Fließgeschwindigkeit von Gewässern bestimmen. Nehmen Sie hierzu an mehreren Stellen im Gewässer Messdaten auf. Eine Messung können Sie durch Antippen des „Play-Pfeiles" starten.

5. Die gemessenen Werte sind nur im Zusammenhang der Position der Messung aussagekräftig. Notieren Sie diese Angaben jeweils zusammen. Achten Sie auf die eingestellte **Messrate**. Gegebenenfalls müssen Sie diese anpassen.

Nach dem Experimentieren:

- Säubern Sie die Materialien am Spültisch mit klarem Wasser
- Trocknen Sie das Messgerät mit Papier ab
- Speichern Sie Ihre Daten lokal oder exportieren Sie Ihre Messreihen zusammen mit Informationen zu den Messstellen für eine optimale Auswertung.

Sicherung Fließgeschwindigkeit

Ergebnissicherung Fließgeschwindigkeit

Die Fließgeschwindigkeit ist eine physikalische Größe zur Beschreibung eines Fließgewässers. Durch die Fließgeschwindigkeit wird der Lauf eines Fließgewässers beeinflusst.
Mit einem Sensor kann die **Änderungen der Fließgeschwindigkeit** innerhalb eines **Flussabschnittes** oder auch im **zeitlichen Verlauf** gemessen und ausgewertet werden.

Strömungserzeugende Faktoren:

- Gravitation → Höhenversatz
- Wind → Oberflächenströmung
- Salzgehalt/ Temperatur → Dichteunterschiede

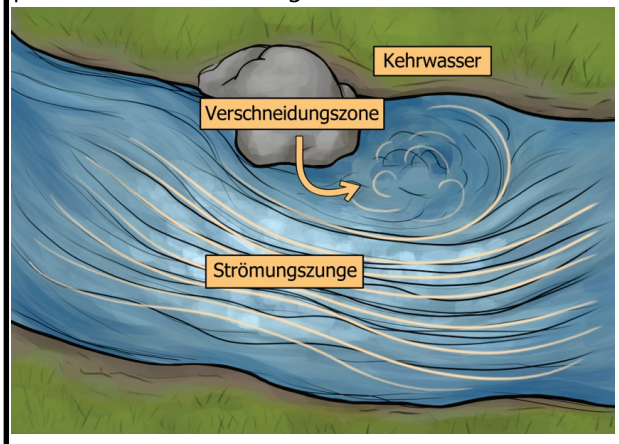
Ermittlung der Fließgeschwindigkeit:

- Zurückgelegte Strecke eines Treibgutes und Zeit messen
- Messungen mit Fließgeschwindigkeitselektrode durchführen

Einflussfaktoren auf die Fließgeschwindigkeit eines Gewässers:

- Abflussmenge
- Art und Form des Flussbettes
- Flussverlauf
- Lage im Flusslauf
- Hindernisse im Fluss
- Versatz in der Gewässersohle

Kehrwasser:
Durch Ablenkung an Hindernissen, bilden sich sogenannte **Kehrwasserbereiche**. Diese haben eine langsamere Strömung als der Hauptstrom. Die entstehende **Rückströmung** transportiert Wasser und mitgeführte Stoffe ein Stück den Fluss hinauf.



C) Fragebogen Erhebung Lehrpersonen

Open MINT Labs: Transfer virtueller Labore in den schulischen Unterricht

Liebe Lehrerin, lieber Lehrer,

vielen Dank, dass Sie die Zeit aufbringen an dieser 15-minütigen Befragung teilzunehmen! Damit helfen Sie uns, transferförderliche Faktoren für die Implementation in Schulen zu identifizieren. Die Auswertung des Fragebogens erfolgt selbstverständlich anonym und die Daten werden nicht weitergegeben. Der Serverstandort zu dieser Umfrage befindet sich innerhalb Deutschlands, technische Kennungen Ihres Zugriffs werden nicht gespeichert oder verarbeitet.

Bei den nachfolgenden Fragen erhoffen wir von Ihnen offenes und ehrliches Feedback! Uns interessiert Ihre ganz persönliche Meinung und Situation unabhängig von Erwartungen beispielsweise aus Ihrem Kollegium oder der Schulleitung. Beantworten Sie die Fragen bitte gewissenhaft aber spontan, ohne lange darüber nachzudenken. Es ist wichtig, dass Sie alle Fragen beantworten und keine auslassen. Können Sie sich bei einer Antwort nicht entscheiden, kreuzen Sie die Antwortmöglichkeit an, die für Sie am ehesten zutrifft.

Projekt Open MINT Labs

Open MINT Labs (OML) ist ein Verbundprojekt der Hochschulen Kaiserslautern, Koblenz und Trier. Hauptziel des Projekts ist die Konzeption und Erstellung von Blended-Learning-Lab-Szenarien in Form von virtuellen Laboren in laborintensiven Fächern des MINT-Bereiches (https://www.openmintlabs.de).

Mithilfe der virtuellen Labore soll das Interesse an MINT Fächern gesteigert sowie die Digitalisierung in und von Schulen vorangetrieben werden. Durch die multimediale Visualisierung werden verschiedene Lernzugänge für Schülerinnen und Schüler geschaffen. Anwendungsbeispiele aus Unternehmen bieten zusätzliche Motivation, sich näher mit einem möglichen, zukünftigen Studienplatz auseinanderzusetzen. Ob im Vertretungsunterricht, als Einstieg, einzelne Sequenz, ganze Lerneinheit oder als Vor- und Nachbereitung von Themen: Die virtuellen Labore stehen zeit- und ortsunabhängig bereit und Schulen kostenlos zur Verfügung.

Ziel der Umfrage ist die Identifikation von transferförderlichen Faktoren für die Implementation in Schulen. Der Transfer der Lernlabore in den Unterricht der Sekundarstufe II wird durch didaktische Konzepte gestützt und begleitend evaluiert. Die vorhandenen virtuellen Labore sollen so für einen weiteren Personenkreis effektiv und effizient nutzbar gemacht werden.

Teil A: Angaben zur Lerngruppe

Virtuelle Labore werden aktuell hinsichtlich ihrer Eignung für den Schulunterricht untersucht. Wählen Sie aus Ihren Lerngruppen eine Klasse / einen Kurs aus, in welcher/welchem sie das bearbeitete virtuelle Labor am ehesten im Unterricht einbinden würden.

A1. Stellen Sie sich vor, Sie wollen das gerade eben bearbeitete OML in Ihrem Unterricht nutzen. Wählen Sie dazu eine konkrete Klasse aus. In welcher Klassenstufe würden Sie das OML einsetzen?

A2. Wie schätzen Sie den Leistungsstand der ausgewählten Klasse ein?

	gering	eher gering	mittel	eher hoch	hoch
Leistungsheterogenität der Lerngruppe	☐	☐	☐	☐	☐
Leistungsstand der Lerngruppe	☐	☐	☐	☐	☐

A3. Wie viele Stunden unterrichten Sie wöchentlich in dieser Klasse?

A4. Seit wie vielen Monaten unterrichten Sie die Klasse?

A5. Wie ist die Geschlechterverteilung in der Klasse?

Geben Sie die Verteilung bitte mit absoluten Zahlen an.

weiblich

männlich

Teil B: Ressourcen

Zur Einbindung der virtuellen Labore in den Unterricht werden elektronische Ressourcen benötigt. Geben Sie an, über welche Ressourcen Ihre Schule verfügt

B1. Über welche der folgenden technischen Ressourcen für den Unterricht verfügt Ihre Schule?

- ☐ Im Fachsaal nutzbare Laptops für alle Schülerinnen und Schüler
- ☐ Beamer / Whiteboard
- ☐ Computerräume mit Rechnerplatz für alle Schülerinnen und Schüler
- ☐ WLAN-Zugänge für schülereigene Endgeräte
- ☐ Leistungsfähige Internetverbindung

B2. Bitte geben Sie an, über welche relevanten IT-Kenntnisse Sie verfügen.

	keine	wenige	einige	sehr viele
Ich verfüge über Vorerfahrungen (z.B. durch ähnliche Projekte)	☐	☐	☐	☐
Ich verfüge über Qualifikationen (z.B. IT-Schulungen, Administrator-Tätigkeiten,…)	☐	☐	☐	☐

Teil C: Gesamtbewertung

Bewerten Sie das virtuelle Labor zusammenfassend. Vergeben Sie hierzu eine Schulnote für das Labor insgesamt und beantworten Sie die Einzelfragen.

C1. Welche Schulnote würden Sie dem OML, welches Sie bearbeitet haben, zuordnen?

	1	2	3	4	5	6
Schulnote	☐	☐	☐	☐	☐	☐

C2. Könnten Sie sich vorstellen, das OML mit Ihrer Klasse durchzuführen?

Ja ☐
Nein ☐

C3. Würden Sie das OML weiterempfehlen?

Ja ☐
Nein ☐

C4. Wären Sie bereit an einer erneuten Evaluation teilzunehmen?

Ja ☐
Nein ☐

C5. Raum für Anmerkungen

Teil D: Grad der Betroffenheit durch die Innovation

D1. Die folgenden Fragen beziehen sich auf Ihre Einstellung zur Einführung von OML als unterrichtliche Innovation. Bitte beantworten Sie jede Frage mit einer Zahl von 1 bis 7(1 = „trifft zurzeit gar nicht auf mich zu“ bis 7 = „trifft zurzeit völlig auf mich zu“).

	1 = trifft zurzeit gar nicht auf mich zu	2	3	4	5	6	7 = trifft zurzeit völlig auf mich zu	zurzeit nicht relevant
Ich beschäftige mich gerade mit anderen Neuerungen für den Unterricht.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
OML beschäftigen mich zurzeit nicht.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich bin vollständig mit anderen Themen beschäftigt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich wende wenig Zeit auf, um über OML nachzudenken.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

	1 = trifft zurzeit gar nicht auf mich zu	2	3	4	5	6	7 = trifft zurzeit völlig auf mich zu	zurzeit nicht relevant
Mich halten wichtigere Aufgaben davon ab, meine Aufmerksamkeit darauf zu lenken.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Mein Wissen über das Thema ist sehr begrenzt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich würde mich gern darüber austauschen, wie man den Unterricht damit gestalten kann.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich wüsste gern, welche Ressourcen dafür zur Verfügung stehen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich möchte wissen, was die Umsetzung in naher Zukunft erfordert.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich will wissen, inwiefern das Unterrichten mit OML besser ist.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich wüsste gern, zu welchen Veränderungen es für meine Berufsrolle führt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich wüsste gerne, wer dabei die Entscheidungen trifft.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich würde gern wissen, wie sich konkret meine Aufgaben verändern sollen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich hätte gern mehr Informationen über nötigen Arbeits- und Zeitaufwand.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich möchte gern wissen, wie sich meine Rolle dadurch verändert.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich habe nicht genügend Vorbereitungszeit für täglichen Unterricht mit OML.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich mache mir Gedanken, ob es zu Konflikten zwischen meinen Interessen und Verpflichtungen führt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich mache mir Sorgen, dass ich nicht allen Anforderungen gewachsen bin.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich mache mir Gedanken, ob ich dafür viel Zeit mit unterrichtsfremden Problemen verbringen muss.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich brauche bei der Umsetzung des Unterrichts mit OML zu viel Zeit.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Es interessiert mich, was Schüler vom Unterricht mit OML halten.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich mache mir Gedanken über die Auswirkungen auf die Schüler.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich überlege wie ich die Wirkung auf die Schüler überprüfen kann.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich möchte gern die Schüler dazu anregen beim neuen Unterrichtskonzept mitzumachen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich möchte Schülerrückmeldung dazu nutzen, das Konzept fortzuentwickeln.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

	1 = trifft zurzeit gar nicht auf mich zu	2	3	4	5	6	7 = trifft zurzeit völlig auf mich zu	zurzeit nicht relevant
Ich bin bereit andere im Kollegium darin zu unterstützen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich würde gern mit anderen Lehrern zum unterrichtspraktischen Einsatz zusammenarbeiten.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich bin bereit Kollegen damit vertraut zu machen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich möchte gern meine Aktivitäten mit anderen koordinieren um die positive Wirkung zu maximieren.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Mich interessiert, was andere Lehrer auf diesem Gebiet unternehmen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Es gibt bessere Unterrichtsansätze als das Unterrichten mit OML.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich denke bereits daran, wie ich Unterricht mit OML optimieren kann.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich möchte das Konzept des Unterrichtens mit OML überarbeiten.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich möchte die Praxis durch Einbeziehen der Schüler verändern.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich möchte herausfinden, wie das Konzept ergänzt, weiterentwickelt oder ersetzt werden kann.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Teil E: Einstellung zu digitalen Medien

Bitte beantworten Sie die folgenden Fragen zu Ihrer Haltung gegenüber digitalen Medien in der Schule. (1 = „trifft überhaupt nicht zu“; 5 = „trifft völlig zu“)

E1. Im folgenden geben Sie an, wie stark die angeführten Aussagen Ihrer Meinung nach zutreffen. (1 = „trifft überhaupt nicht zu“; 5 = „trifft völlig zu“)

	1 = trifft überhaupt nicht zu	2	3	4	5 = trifft völlig zu
Multimedia steigert die Motivation.	☐	☐	☐	☐	☐
Multimedia führt zu einem besseren Verständnis der Inhalte – im Gegensatz zu einem Buch.	☐	☐	☐	☐	☐
In den Unterrichtsstunden sollte mehr Multimedia verwendet werden.	☐	☐	☐	☐	☐
Computerunterstützung verbessert die Kommunikation zwischen SchülerInnen und Lehrern.	☐	☐	☐	☐	☐
Ich glaube nicht, dass mehr Multimedia und Internetnutzung ein Vorteil gegenüber der jetzigen Lehre ist.	☐	☐	☐	☐	☐
Virtuelle Lehre ist bestimmt mit vielen technischen Problemen verbunden, auf die ich keine Lust habe.	☐	☐	☐	☐	☐

E2. **Ich verwende digitale Lernprogramme im Unterricht, weil…**

E3. **Ich setze digitale Lernprogramme <u>nicht</u> im Unterricht ein, weil…**

Teil F: Computerwert

F1. **Bitte kreuzen Sie die zutreffendste Antwort an.**

	stimme nicht zu	stimme weniger zu	stimme eher zu	stimme voll zu	weiß nicht
Mit digitalen Endgeräten bekomme ich schneller und bessere Arbeitsergebnisse als mit Papier und Stift.	☐	☐	☐	☐	☐
Ich finde, dass digitale Endgeräte unersetzlich sind.	☐	☐	☐	☐	☐
Ein souveräner Umgang mit digitalen Endgeräten ist eine wichtige Qualifikation für den Beruf.	☐	☐	☐	☐	☐

Teil G: Selbstkonzept digitale Medien

G1. **Bitte kreuzen Sie die zutreffendste Anwortmöglichkeit an.**

	stimme nicht zu	stimme weniger zu	stimme eher zu	stimme voll zu	weiß nicht
Ich habe großes Selbstvertrauen, wenn es um das Arbeiten mit digitalen Endgeräten geht.	☐	☐	☐	☐	☐
Ich glaube, dass Andere in Sachen digitale Endgeräte noch manches von mir lernen können.	☐	☐	☐	☐	☐
Es liegt mir, mit digitalen Endgeräten zu arbeiten.	☐	☐	☐	☐	☐
Es fällt mir leicht, digitale Endgeräte zu bedienen.	☐	☐	☐	☐	☐
Ich fühle mich sicher in Bezug auf meine Fähigkeit, digitale Endgeräte zu nutzen.	☐	☐	☐	☐	☐
Ich traue mir zu, dass ich mich in ein neues Computerprogramm selbst einarbeiten kann.	☐	☐	☐	☐	☐
Um mit digitalen Endgeräten zurecht zu kommen, muss ich mich anstrengen.	☐	☐	☐	☐	☐
Auch Arbeiten mit digitalen Endgeräten, die ich schon einige Male geübt habe, fallen mir schwer.	☐	☐	☐	☐	☐

	stimme nicht zu	stimme weniger zu	stimme eher zu	stimme voll zu	weiß nicht
Für das Nutzen von digitalen Endgeräten habe ich einfach keine Begabung.	☐	☐	☐	☐	☐
Viele meiner Kolleginnen und Kollegen sind - was das Lernen mit digitalen Endgeräten angeht - klüger als ich.	☐	☐	☐	☐	☐
Bei manchen Sachen, die ich am Computer nicht verstanden habe, weiß ich: Das kapiere ich nie.	☐	☐	☐	☐	☐
Häufig denke ich, dass mich das Arbeiten mit digitalen Endgeräten überfordert.	☐	☐	☐	☐	☐

Teil H: Daten zu Ihrer Person

H1. **Zur Nacherhebung Ihrer Erfahrungen mit dem Projekt Open MINT Labs (OML) ist eine persönliche aber anonyme Kennung erforderlich, welche Ihre Antworten in vorliegendem Fragebogen mit den Antworten möglicher weiterer Fragebögen in Verbindung bringen lässt. Erstellen Sie zu diesem Zweck bitte wie folgt Ihre persönliche ID-Kennung in folgendem Format:**

Die ersten beiden Buchstaben des Vornamens der Mutter Die ersten beiden Buchstaben des Vornamens des Vaters Ihr Geburtstag im Format dd/mm

z.B. Mutter: Linda; Vater: Patrick; Geburtsdatum: 01.01.1980 ⇒LIPA0101

H2. **Welches OML haben Sie bearbeitet?**

H3. **Benennen Sie Ihren höchsten Bildungsabschluss (z.B. akademischer Grad, 1./2. Staatsexamen,...)**

- ☐ Bachelor of Education
- ☐ Master of Education
- ☐ 1. Staatsexamen
- ☐ 2. Staatsexamen
- ☐ Promotion fachdidaktisch
- ☐ Promotion sonstige
- ☐ Habilitation
- ☐ Sonstiges

Sonstiges

H4. **Über welche Lehrerfahrung - in Jahren - verfügen Sie?**

H5. **Geben Sie Ihr Lebensalter in Jahren an.**

H6. **Geben Sie Ihr Geschlecht an.**

Weiblich ☐ Männlich ☐ Divers ☐ keine Angabe ☐

H7. **Haben Sie eines der folgenden Fächer studiert?**

- ☐ Chemie
- ☐ Biologie
- ☐ Physik
- ☐ Technik
- ☐ Informatik

H8. **An welcher Schulart unterrichten Sie?**

- ☐ Grundschule
- ☐ Realschule
- ☐ Regionale Schule / (Integrierte) Gesamtschule
- ☐ Förderschule
- ☐ Gymnasium
- ☐ Sonstiges

Sonstiges

Vielen Dank für Ihre aktive Teilnahme. Sie leisten somit einen wichtigen Beitrag zur Transferforschung.

D) Interview-Leitfaden Lehrpersonen

Vielen Dank, dass Sie sich die Zeit genommen haben sich mit uns persönlich über die virtuellen Labore auszutauschen. Ihre Meinung und Anregungen zu den virtuellen Laboren sind uns sehr wichtig. Wir möchten einerseits die Labore für den Einsatz an Schulen weiter optimieren und mögliche Barrieren identifizieren, die den Einsatz erschweren.

Persönlichkeitsmerkmale und digitale Medien

1. Wie stehen Sie zu digitalen Medien im Unterricht? Welche Vor- und Nachteile wägen Sie ab, wie setzen Sie digitale Medien dann letztlich ein?
2. Schätzen Sie Ihre persönliche Einstellung gegenüber digitalen Medien in der Schule auf folgender Skala ein:

   Ich finde die Nutzung digitaler Medien im Schulunterricht gewinnbringend.

1 – stimme gar nicht zu	2	3	4	5 – stimme voll zu

   2.2 Die Auswertung Ihres Fragebogens zeigt für die Einstellung gegenüber digitalen Medien eine Ausprägung von _____. Wie können Sie sich die Abweichung zwischen der schriftlichen Befragung und Ihrer Angabe hier erklären?

3. Schätzen Sie auf folgender Skala ein, welchen Stellenwert Sie digitalen Endgeräten beimessen:

   Die Nutzung digitaler Endgeräte nimmt in meinem Berufsalltag einen wichtigen Stellenwert ein.

1 – stimme gar nicht zu	2	3	4	5 – stimme voll zu

   3.2 Die Auswertung Ihres Fragebogens zeigt für den Stellenwert digitaler Endgeräte eine Ausprägung von____. Wie können Sie sich die Abweichung zwischen der schriftlichen Befragung und Ihrer Angabe hier erklären?

4. Schätzen Sie auf folgender Skala ein, wie gut Sie selbst mit digitalen Endgeräten umgehen können:

   Ich finde, ich kann gut mit digitalen Endgeräten umgehen.

1 – stimme gar nicht zu	2	3	4	5 – stimme voll zu

4.2 Die Auswertung Ihres Fragebogens zeigt für den Umgang mit digitalen Endgeräten eine Ausprägung von____. Wie können Sie sich die Abweichung zwischen der schriftlichen Befragung und Ihrer Angabe hier erklären?

5. Nachfolgend zeige ich Ihnen ein Schaubild, das 7 Bereiche darstellt. In welchem der 7 Bereiche würden Sie sich hinsichtlich des Einsatzes von OML vorrangig verorten? (ggf. Mehrfachnennungen möglich, Ausprägungen und Verbesserungspotenziale zum Bereinigen der Bedenken) → *Schaubild SoCQ im Anhang*

5.2 Wir haben Ihren Fragebogen ausgewertet und dabei das folgendes Profil identifiziert. Können Sie dieses Profil so bestätigen? Sehen Sie Abweichungen von Ihrer persönlichen Selbsteinschätzung?

5.3 Zahlreiche Lehrerinnen und Lehrer haben inzwischen den Fragebogen bearbeitet. Über die Vielzahl der Teilnehmenden lässt sich ein Kooperierer-Profil erkennen. Das heißt Ihre Kolleginnen und Kollegen sind überwiegend interessiert an den virtuellen Laboren und möchten mehr Informationen und mehr, detaillierte Infos mit Anwendungsbezug. Können Sie sich selbst auch hier zuordnen? Was zeichnet Ihre Haltung gegenüber der Ihrer Kolleg:innen aus?

Sprechen wir nun etwas konkreter über die virtuellen Labore. Welches der Labore haben Sie sich näher angeschaut?

<u>Virtuelle Labore (SocQ)</u>

6. Mit welchem virtuellen Labor haben Sie sich näher beschäftigt?
7. Beschreiben Sie die Klasse, in der Sie das Labor eingesetzt haben oder einsetzen möchten.
8. Würden Sie dieses virtuelle Labor in der Schule einsetzen oder haben Sie dieses bereits eingesetzt? → ja/ nein mit Begründung.
9. Welche weiteren Hindernisse sehen Sie hinsichtlich
   - Technische Verfügbarkeit
   - Organisatorische Einbindung
   - Zeitliche Komponente
   - Unterstützung Schulleitung
   - …
10. Welche Änderungen würden Sie an diesem virtuellen Labor gerne vornehmen?

    (z. B. zusätzliche Features oder Anpassung aktueller Inhalte, Aufgabentypen, Kontexte, etc.)
11. Welche weiteren konkreten Anmerkungen haben Sie zu diesem virtuellen Labor?

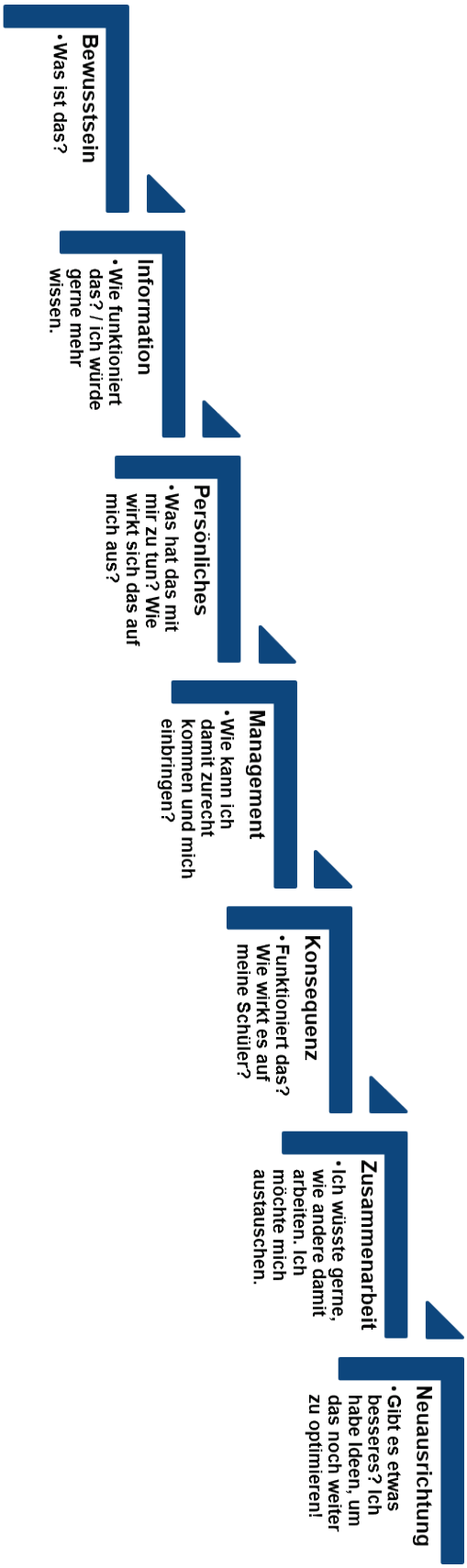
Neben dem Optimierungsbedarf interessieren uns natürlich auch Ideen für didaktische Konzepte, wie die virtuellen Labore in den Unterricht integriert werden können.

<u>Didaktische Konzepte</u>

12. Skizzieren Sie den klassischen Verlauf einer typischen Unterrichtseinheit zum Thema des virtuellen Labors ohne OML.

13. Wie würde eine Unterrichtseinheit aussehen, in der Sie das virtuelle Labor einsetzen? (Einstieg in ein neues Thema/Erarbeitung/Vertiefung eines Themas…)
14. Wie muss der Einsatz konkret vorbeireit/ nachbereitet werden, dass die Arbeit mit den OMLS gewinnbringend sind. (u.a. Lernvoraussetzungen)
15. Welche Rolle würden Sie als Lehrperson im Rahmen der Unterrichtseinheit mit den OMLs einnehmen? (Grad der Selbstständigkeit. Rolle der Lehrperson: Moderator, technische Hilfestellungen, inhaltliche Unterstützung
16. Im Rahmen welcher Sozialform soll die Arbeit mit den OMLs stattfinden? (Kooperatives Arbeiten: Gruppenarbeit/Einzelarbeit).
17. Wo soll die Arbeit mit den OMLs stattfinden? (Ort: Zuhause, Zugriff Vorort: Synchrone Arbeitsphasen)
18. Wie bzw. an welcher Stelle würden Sie das virtuelle Labor einsetzen?
19. Würden Sie den Einsatz sequenzieren?
    - Wenn ja, wie?
    - Wenn nein, warum nicht?
20. Welche Rolle nimmt dabei das virtuelle Labor ein?
21. Welche Lernziele würden Sie mit dem Einsatz der virtuellen Labore verfolgen?

Anlage:


Bewusstsein
• Was ist das?
Information
• Wie funktioniert das? / ich würde gerne mehr wissen.
Persönliches
• Was hat das mit mir zu tun? Wie wirkt sich das auf mich aus?
Management
• Wie kann ich damit zurecht kommen und mich einbringen?
Konsequenz
• Funktioniert das? Wie wirkt es auf meine Schüler?
Zusammenarbeit
• Ich wüsste gerne, wie andere damit arbeiten. Ich möchte mich austauschen.
Neuausrichtung
• Gibt es etwas besseres? Ich habe Ideen, um das noch weiter zu optimieren!

E) Fragebogen Erhebung Lernende TZP Vorbereitung

(Durchführung & Nachbereitung inhaltlich identisch)

Umfrage OML Schüler*innen Vorbereitung

Liebe Schülerin/ lieber Schüler,

Zur Optimierung unserer Lernumgebungen benötigen wir Ihre Rückmeldung.

Die Antworten werden anonym erfasst. Ihre Antworten beeinflussen keinesfalls die Bewertungen im Unterricht. Eine personenbezogene Rückmeldung über Ihre Antworten an die Lehrpersonen ist nicht möglich.

Bitte beantworten Sie die Fragen spontan, wir wollen Ihre aktuellen Empfindungen und Eindrücke bei der Bearbeitung erfassen. Bitte lassen Sie keine Frage aus. Sollten Sie eine Frage nicht eindeutig beantworten können, wählen Sie die Antwortoption, die am ehesten auf Ihre momentane Situation zutrifft.

Bitte fülle den Fragebogen möglichst vollständig aus. Die Beantwortung aller Fragen ist freiwillig.

Teil A: Fragebogen zum Flow-Erleben

A1. Bitte wählen Sie bei den folgenden Fragen die Option (1-7) aus, die Ihre aktuelle Empfindung am besten widerspiegelt.

	1 - trifft nicht zu	2	3	4 - teils-teils	5	6	7- trifft zu
Ich fühle mich optimal beansprucht.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Meine Gedanken bzw. Aktivitäten laufen flüssig und glatt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich merke gar nicht, wie die Zeit vergeht.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich habe keine Mühe, mich zu konzentrieren	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Mein Kopf ist völlig klar.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich bin ganz vertieft in das, was ich gerade mache.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die richtigen Gedanken/ Bewegungen kommen wie von selbst.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich weiß bei jedem Schritt, was ich zu tun habe.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich habe das Gefühl, den Ablauf unter Kontrolle zu haben.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich bin völlig selbstvergessen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Es steht etwas für mich wichtiges auf dem Spiel.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich darf jetzt keine Fehler machen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich mache mir Sorgen über einen Misserfolg.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A2. Bitte kreuzen Sie bei den folgenden Fragen die Antwortmöglichkeit an, die Ihre aktuelle Empfindung am besten widerspiegelt (1-10).

	1 - leicht	2	3	4	5	6	7	8	9	10 - schwer
Verglichen mit allen anderen Tätigkeiten, die ich sonst mache, ist die jetzige Tätigkeit	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A3. Bitte kreuzen Sie bei den folgenden Fragen die Antwortmöglichkeit an, die Ihre aktuelle Empfindung am besten widerspiegelt (1-10).

	1 - niedrig	2	3	4	5	6	7	8	9	10 - hoch
Ich denke, meine Fähigkeiten auf diesem Gebiet sind ...	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A4. **Bitte kreuzen Sie bei den folgenden Fragen die Antwortmöglichkeit an, die Ihre aktuelle Empfindung am besten widerspiegelt (1-10).**

	1 - zu gering	2	3	4	5 - gerade richtig	6	7	8	9	10 - zu hoch
Für mich persönlich sind die jetzigen Anforderungen ...	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Teil B: Fragebogen aktuelle Motivation

B1. **Bitte kreuzen Sie die Antwortoption an, die Ihre aktuelle Wahrnehmung am besten beschreibt.**

	1 - trifft nicht zu	2	3	4	5	6	7 - trifft zu
Ich mag solche Rätsel und Knobeleien.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich glaube, der Schwierigkeit der Aufgabe gewachsen zu sein.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wahrscheinlich werde ich die Aufgabe nicht schaffen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Bei der Aufgabe mag ich die Rolle des Wissenschaftlers, der Zusammenhänge entdeckt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich fühle mich unter Druck, bei der Aufgabe gut abschneiden zu müssen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die Aufgabe ist eine richtige Herausforderung für mich.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Nach dem Lesen der Instruktion erscheint mir die Aufgabe sehr interessant.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich bin sehr gespannt darauf, wie gut ich hier abschneiden werde.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich fürchte mich ein wenig davor, dass ich mich hier blamieren könnte.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich bin fest entschlossen, mich bei dieser Aufgabe voll anzustrengen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Bei Aufgaben wie dieser brauche ich keine Belohnung, sie machen mir auch so viel Spaß.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Es ist mir etwas peinlich, hier zu versagen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich glaube, das kann jeder schaffen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich glaube, ich schaffe diese Aufgabe nicht.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wenn ich die Aufgabe schaffe, werde ich schon ein wenig stolz auf meine Tüchtigkeit sein.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wenn ich an die Aufgabe denke, bin ich etwas beunruhigt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Eine solche Aufgabe würde ich auch in meiner Freizeit bearbeiten.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die konkreten Leistungsanforderungen hier lähmen mich.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Teil C: Cognitive Load

C1. Setzen Sie das passende Kreuz!

	0 - stimmt überhaupt nicht	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 - stimmt genau
Das Thema der Lerneinheit war sehr kompliziert.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die Lerneinheit enthielt Dinge (formulas), die ich als sehr kompliziert empfunden habe.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die Lerneinheit enthielt Begriffe und Definitionen, die ich als sehr kompliziert empfunden habe.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die Anweisungen und/oder Erklärungen waren sehr unklar.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die Anweisungen und/oder Erklärungen waren - in Bezug auf das Lernen - völlig nutzlos.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die Anweisungen und/oder Erklärungen waren voller unklarer Ausdrücke.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die Lerneinheit verbesserte mein Verständnis zum behandelten Thema sehr.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die Lerneinheit verbesserte mein Wissen und Verständnis von Umweltauswirkungen sehr.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die Lerneinheit verbesserte mein Verständnis der behandelten Umweltphänomene.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die Lerneinheit verbesserte mein Verständnis der benutzten Begriffe und Definitionen sehr.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Teil D: Nutzercode

D1. Um Ihre Angaben anonym zuordnen zu können, benötigen wir hier Ihren am Experimentiertag ausgegebenen Nutzernamen. Diesen finden Sie auf Ihrem Namensschild sowie bei den ausgegebenen Zugangsdaten.

D2. Welchen OpenMINT Labs Kurs haben Sie gerade eben bearbeitet?

- ☐ Aufbau, Bedienung & Auswertung
- ☐ Stickstofflieferanten
- ☐ Chloridgehalt
- ☐ pH-Wert
- ☐ Sauerstoffsättigung
- ☐ Leitfähigkeit
- ☐ Luft- und Wassertemperatur, Wetterdaten
- ☐ CO2-Gehalt
- ☐ Farbe, Trübung & Geruch
- ☐ Gewässerstrukturgüte
- ☐ Fließgeschwindigkeit
- ☐ Bestimmung der Arten
- ☐ Häufigkeit des Vorkommens

Teil E: Hinweise zum Datenschutz

Hinweise zum Datenschutz

Während der Studie wird als persönliche Angabe ihr Geschlecht, ihr Alter sowie Schulnoten gespeichert. Eine nachträgliche Zuordnung der Daten zu einer bestimmten Person ist ausschließlich mithilfe der freiwillig generierten ID möglich, die jedoch gesondert gespeichert wird. Die Daten sind gegen unbefugten Zugriff gesichert.

Weiterhin möchten wir Sie auf folgende Rechte bezüglich deiner personenbezogenen Daten hinweisen. Sie haben das Recht: • Auskunft (gemäß Art. 15 DS-GVO) zu erhalten, einschließlich unentgeltlicher Überlassung einer Kopie • ggf. deren Berichtigung (gemäß Art. 16 DS-GVO) zu verlangen • ggf. deren Löschung zu verlangen, solange dem keine Aufbewahrungspflichten (gemäß Art. 17 DS-GVO) entgegenstehen • die Einschränkung der Verarbeitung zu verlangen (gemäß Art. 18 DS-GVO) • die Daten einem anderen ohne Behinderung zu übermitteln (Datenübertragung gemäß Art. 20 DS-GVO) • Einwendung gegen die Nutzung für wissenschaftliche Zwecke (über die direkten Zwecke der Studie hinaus) zu erheben

Darüber hinaus weisen wir Sie auf das Beschwerderecht bei einer Datenschutz Aufsichtsbehörde hin. Die Kontaktdaten der zuständigen Datenschutz-Aufsichtsbehörde: Der Landesbeauftragte für den Datenschutz Rheinland-Pfalz Hintere Bleiche 34 55116 Mainz Postanschrift: Postfach 30 40 55020 Mainz Telefon +49 6131 2082449 Telefax +49 6131 2082497 E-Mail: poststelle@datenschutz.rlp.de Kontaktdaten des zuständigen Datenschutzbeauftragten, Campus Landau: Universität Koblenz-Landau, Datenschutzbeauftragte Dr. Susanne Weis, Campus Landau, Fortstr. 7, 76829 Landau, datenschutz@uni-landau.de

Herzlichen Dank für Ihre Mithilfe!

Sie ermöglichen dadurch eine stetige Optimierung unserer Lernumgebungen und didaktischen Konzepte.

Bei Rückfragen steht unser Team gerne zur Verfügung.

F) Fragebogen Erhebung Lernende TZP Ende Vorbereitung

Umfrage OML Schüler*innen Ende Vorbereitung

Liebe Schülerin/ lieber Schüler,

Zur Optimierung unserer Lernumgebungen benötigen wir Ihre Rückmeldung.

Die Antworten werden anonym erfasst. Ihre Antworten beeinflussen keinesfalls die Bewertungen im Unterricht. Eine personenbezogene Rückmeldung über Ihre Antworten an die Lehrpersonen ist nicht möglich.

Bitte beantworten Sie die Fragen spontan, wir wollen Ihre aktuellen Empfindungen und Eindrücke bei der Bearbeitung erfassen. Bitte lassen Sie keine Frage aus. Sollten Sie eine Frage nicht eindeutig beantworten können, wählen Sie die Antwortoption, die am ehesten auf Ihre momentane Situation zutrifft.

Bitte fülle den Fragebogen möglichst vollständig aus. Die Beantwortung aller Fragen ist freiwillig.

Teil A: Gebrauchstauglichkeit / Usability

A1. Setzen Sie das passende Kreuz!

	1 - stimme überhaupt nicht zu	2	3	4	5 - stimme vollständig zu
Ich denke, ich würde diese Lernumgebung gerne häufiger nutzen.	☐	☐	☐	☐	☐
Ich fand die Lernumgebung unnötig komplex.	☐	☐	☐	☐	☐
Ich denke, die Lernumgebung war einfach zu nutzen.	☐	☐	☐	☐	☐
Ich denke, dass ich die Unterstützung eines technischen Ansprechpartners bräuchte, um die Lernumgebung zu nutzen.	☐	☐	☐	☐	☐
Ich fand die verschiedenen Funktionen der Lernumgebung waren gut integriert.	☐	☐	☐	☐	☐
Ich denke, es gab zu viele Ungereimtheiten in der Lernumgebung.	☐	☐	☐	☐	☐
Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen die Nutzung der Lernumgebung sehr schnell erlernen würden.	☐	☐	☐	☐	☐
Ich fand die Lernumgebung sehr umständlich zu nutzen.	☐	☐	☐	☐	☐
Ich fühlte mich sehr souverän in der Nutzung der Lernumgebung.	☐	☐	☐	☐	☐
Ich musste viele Dinge lernen, bevor ich mit der Lernumgebung anfangen konnte.	☐	☐	☐	☐	☐

Teil B: Persönliche Angaben

B1. **Bitte geben Sie Ihr Alter in Jahren an.**

B2. **Bitte wählen Sie Ihr Geschlecht aus.**

- ☐ Weiblich
- ☐ Männlich
- ☐ Divers

B3. **Bitte geben Sie Ihre letzte Zeugnisnote im Fach Chemie in MSS-Punkten an.**

B4. **Bitte geben Sie Ihre letzte Zeugnisnote im Fach Physik in MSS-Punkten an.**

B5. **Bitte geben Sie Ihre letzte Zeugnisnote im Fach Biologie in MSS-Punkten an.**

Teil C: Nutzercode

C1. **Um Ihre Angaben anonym zuordnen zu können, benötigen wir hier Ihren am Experimentiertag ausgegebenen Nutzernamen. Diesen finden Sie auf Ihrem Namensschild sowie bei den ausgegebenen Zugangsdaten.**

C2. **Welchen OpenMINT Labs Kurs haben Sie gerade eben bearbeitet?**

- ☐ Aufbau, Bedienung & Auswertung
- ☐ Stickstofflieferanten
- ☐ Chloridgehalt
- ☐ pH-Wert
- ☐ Sauerstoffsättigung
- ☐ Leitfähigkeit
- ☐ Luft- und Wassertemperatur, Wetterdaten
- ☐ CO2-Gehalt
- ☐ Farbe, Trübung & Geruch
- ☐ Gewässerstrukturgüte
- ☐ Fließgeschwindigkeit
- ☐ Bestimmung der Arten
- ☐ Häufigkeit des Vorkommens

Teil D: Hinweise zum Datenschutz

Hinweise zum Datenschutz

Während der Studie wird als persönliche Angabe ihr Geschlecht, ihr Alter sowie Schulnoten gespeichert. Eine nachträgliche Zuordnung der Daten zu einer bestimmten Person ist ausschließlich mithilfe der freiwillig generierten ID möglich, die jedoch gesondert gespeichert wird. Die Daten sind gegen unbefugten Zugriff gesichert.

Weiterhin möchten wir Sie auf folgende Rechte bezüglich deiner personenbezogenen Daten hinweisen. Sie haben das Recht: • Auskunft (gemäß Art. 15 DS-GVO) zu erhalten, einschließlich unentgeltlicher Überlassung einer Kopie • ggf. deren Berichtigung (gemäß Art. 16 DS-GVO) zu verlangen • ggf. deren Löschung zu verlangen, solange dem keine Aufbewahrungspflichten (gemäß Art. 17 DS-GVO) entgegenstehen • die Einschränkung der Verarbeitung zu verlangen (gemäß Art. 18 DS-GVO) • die Daten einem anderen ohne Behinderung zu übermitteln (Datenübertragung gemäß Art. 20 DS-GVO) • Einwendung gegen die Nutzung für wissenschaftliche Zwecke (über die direkten Zwecke der Studie hinaus) zu erheben

Darüber hinaus weisen wir Sie auf das Beschwerderecht bei einer Datenschutz Aufsichtsbehörde hin. Die Kontaktdaten der zuständigen Datenschutz-Aufsichtsbehörde: Der Landesbeauftragte für den Datenschutz Rheinland-Pfalz Hintere Bleiche 34 55116 Mainz Postanschrift: Postfach 30 40 55020 Mainz Telefon +49 6131 2082449 Telefax +49 6131 2082497 E-Mail: poststelle@datenschutz.rlp.de Kontaktdaten des zuständigen Datenschutzbeauftragten, Campus Landau: Universität Koblenz-Landau, Datenschutzbeauftragte Dr. Susanne Weis, Campus Landau, Fortstr. 7, 76829 Landau, datenschutz@uni-landau.de

Herzlichen Dank für Ihre Mithilfe!

Sie ermöglichen dadurch eine stetige Optimierung unserer Lernumgebungen und didaktischen Konzepte.

Bei Rückfragen steht unser Team gerne zur Verfügung.

G) Digitale Anlagen

Datensätze Logfiles https://doi.org/10.5281/zenodo.8238686

Datensatz Lernende https://doi.org/10.5281/zenodo.8238705

Datensatz Lehrende https://doi.org/10.5281/zenodo.8238711

Skript Logfiles https://doi.org/10.5281/zenodo.8238731

Skript Lehrende https://doi.org/10.5281/zenodo.8238772

Skript Lernende https://doi.org/10.5281/zenodo.8238777

H) Lebenslauf

Persönliche Daten	
Name	Sascha Andreas Neff
Anschrift	Mühlweg 21, 76779 Scheibenhardt
Geburtsdatum	04.02.1991
Geburtsort	Karlsruhe
Staats-angehörigkeit	Deutsch
Familienstand	Ledig
Universitäre Ausbildung	
10/15-06/18	Universität Koblenz – Landau, Campus Landau **Master of Education: Anglistik und Chemie**
04/12-11/15	Universität Koblenz – Landau, Campus Landau **Bachelor of Education: Anglistik und Chemie**
10/10-09/11	Karlsruher Institut für Technologie. Bachelor of Science: Chemie.
Schulischer Werdegang	
2001-03/10	Europa-Gymnasium, Wörth am Rhein **Allgemeine Hochschulreife**
Anstellungen und Tätigkeiten	
Seit 10/18	Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Promotionsstudent am Institut für naturwissenschaftliche Bildung, AG Chemiedidaktik der Universität Koblenz-Landau, Campus Landau <u>Projekte:</u> ECOSERV – 10/2018 bis 04/2019 Open MINT Labs – 04/ 2019 bis 02/2021 DigiKompASS – seit 08/2021
04/17-04/19	Vertretungslehrkraft am Gymnasium Edenkoben im Rahmen des „Projektes Erweiterte Selbstständigkeit (PES)“

11/17-09/18	Studentische Hilfskraft an der Universität Koblenz-Landau, Campus Landau, Institut für naturwissenschaftliche Bildung, AG Chemiedidaktik im Projekt „Open Mint Labs“
03/18	Studentische Hilfskraft an der Universität Koblenz-Landau, Campus Landau, Institut für Umweltwissenschaften, AG Umweltchemie
11/17-01/18	Studentische Hilfskraft an der Universität Koblenz-Landau, Campus Landau, Institut für Umweltwissenschaften, AG Umweltchemie
11/17-12/17	Studentische Hilfskraft an der Universität Koblenz-Landau, Campus Landau, Institut für naturwissenschaftliche Bildung, AG Chemiedidaktik im Projekt „Open Mint Labs“
04/12-12/13	Studentische Hilfskraft am Karlsruher Institut für Technologie, Institut für angewandte Materialien – Keramik im Maschinenbau
04/10-09/11	Studentische Hilfskraft am Karlsruher Institut für Technologie, Institut für angewandte Materialien – Keramik im Maschinenbau
Praktika	
03/17	Vertiefendes Praktikum Master, Gymnasium Edenkoben
02/14-03/14	Vertiefendes Praktikum Bachelor, Europa-Gymnasium Wörth am Rhein
02/13-03/13	Orientierendes Praktikum 2, IGS Rülzheim
09/12	Orientierendes Praktikum 1, Grundschule Berg
09/11-04/12 & 03/10 – 10/10	Praktikum am Karlsruher Institut für Technologie, Institut für angewandte Materialien – Keramik im Maschinenbau

Bisher erschienene Bände der Reihe *„Studien zum Physik- und Chemielernen“*

ISSN 1614-8967 (vormals *Studien zum Physiklernen* ISSN 1435-5280)

1 Helmut Fischler, Jochen Peuckert (Hrsg.): Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie
ISBN 978-3-89722-256-4 40.50 EUR

2 Anja Schoster: Bedeutungsentwicklungsprozesse beim Lösen algorithmischer Physikaufgaben. *Eine Fallstudie zu Lernprozessen von Schülern im Physiknachhilfeunterricht während der Bearbeitung algorithmischer Physikaufgaben*
ISBN 978-3-89722-045-4 40.50 EUR

3 Claudia von Aufschnaiter: Bedeutungsentwicklungen, Interaktionen und situatives Erleben beim Bearbeiten physikalischer Aufgaben
ISBN 978-3-89722-143-7 40.50 EUR

4 Susanne Haeberlen: Lernprozesse im Unterricht mit Wasserstromkreisen. *Eine Fallstudie in der Sekundarstufe I*
ISBN 978-3-89722-172-7 40.50 EUR

5 Kerstin Haller: Über den Zusammenhang von Handlungen und Zielen. *Eine empirische Untersuchung zu Lernprozessen im physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-242-7 40.50 EUR

6 Michaela Horstendahl: Motivationale Orientierungen im Physikunterricht
ISBN 978-3-89722-227-4 50.00 EUR

7 Stefan Deylitz: Lernergebnisse in der Quanten-Atomphysik. *Evaluation des Bremer Unterrichtskonzepts*
ISBN 978-3-89722-291-5 40.50 EUR

8 Lorenz Hucke: Handlungsregulation und Wissenserwerb in traditionellen und computergestützten Experimenten des physikalischen Praktikums
ISBN 978-3-89722-316-5 50.00 EUR

9 Heike Theyßen: Ein Physikpraktikum für Studierende der Medizin. *Darstellung der Entwicklung und Evaluation eines adressatenspezifischen Praktikums nach dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion*
ISBN 978-3-89722-334-9 40.50 EUR

10 Annette Schick: Der Einfluß von Interesse und anderen selbstbezogenen Kognitionen auf Handlungen im Physikunterricht. *Fallstudien zu Interessenhandlungen im Physikunterricht*
ISBN 978-3-89722-380-6 40.50 EUR

11 Roland Berger: Moderne bildgebende Verfahren der medizinischen Diagnostik. *Ein Weg zu interessanterem Physikunterricht*
ISBN 978-3-89722-445-2 40.50 EUR

12 Johannes Werner: Vom Licht zum Atom. *Ein Unterrichtskonzept zur Quantenphysik unter Nutzung des Zeigermodells*
ISBN 978-3-89722-471-1 40.50 EUR

13 Florian Sander: Verbindung von Theorie und Experiment im physikalischen Praktikum. *Eine empirische Untersuchung zum handlungsbezogenen Vorverständnis und dem Einsatz grafikorientierter Modellbildung im Praktikum*
ISBN 978-3-89722-482-7 40.50 EUR

14 Jörn Gerdes: Der Begriff der physikalischen Kompetenz. *Zur Validierung eines Konstruktes*
ISBN 978-3-89722-510-7 40.50 EUR

15 Malte Meyer-Arndt: Interaktionen im Physikpraktikum zwischen Studierenden und Betreuern. *Feldstudie zu Bedeutungsentwicklungsprozessen im physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-541-1 40.50 EUR

16 Dietmar Höttecke: Die Natur der Naturwissenschaften historisch verstehen. *Fachdidaktische und wissenschaftshistorische Untersuchungen*
ISBN 978-3-89722-607-4 40.50 EUR

17 Gil Gabriel Mavanga: Entwicklung und Evaluation eines experimentell- und phänomenorientierten Optikcurriculums. *Untersuchung zu Schülervorstellungen in der Sekundarstufe I in Mosambik und Deutschland*
ISBN 978-3-89722-721-7 40.50 EUR

18 Meike Ute Zastrow: Interaktive Experimentieranleitungen. *Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes zur Vorbereitung auf das Experimentieren mit Messgeräten im Physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-802-3 40.50 EUR

19 Gunnar Friege: Wissen und Problemlösen. *Eine empirische Untersuchung des wissenszentrierten Problemlösens im Gebiet der Elektrizitätslehre auf der Grundlage des Experten-Novizen-Vergleichs*
ISBN 978-3-89722-809-2 40.50 EUR

20 Erich Starauschek: Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs. *Ergebnisse einer Evaluationsstudie*
ISBN 978-3-89722-823-8 40.50 EUR

21 Roland Paatz: Charakteristika analogiebasierten Denkens. *Vergleich von Lernprozessen in Basis- und Zielbereich*
ISBN 978-3-89722-944-0 40.50 EUR

22 Silke Mikelskis-Seifert: Die Entwicklung von Metakonzepten zur Teilchenvorstellung bei Schülern. *Untersuchung eines Unterrichts über Modelle mithilfe eines Systems multipler Repräsentationsebenen*
ISBN 978-3-8325-0013-9 40.50 EUR

23 Brunhild Landwehr: Distanzen von Lehrkräften und Studierenden des Sachunterrichts zur Physik. *Eine qualitativ-empirische Studie zu den Ursachen*
ISBN 978-3-8325-0044-3 40.50 EUR

24 Lydia Murmann: Physiklernen zu Licht, Schatten und Sehen. *Eine phänomenografische Untersuchung in der Primarstufe*
ISBN 978-3-8325-0060-3 40.50 EUR

25 Thorsten Bell: Strukturprinzipien der Selbstregulation. *Komplexe Systeme, Elementarisierungen und Lernprozessstudien für den Unterricht der Sekundarstufe II*
ISBN 978-3-8325-0134-1 40.50 EUR

26 Rainer Müller: Quantenphysik in der Schule
ISBN 978-3-8325-0186-0 40.50 EUR

27 Jutta Roth: Bedeutungsentwicklungsprozesse von Physikerinnen und Physikern in den Dimensionen Komplexität, Zeit und Inhalt
ISBN 978-3-8325-0183-9 40.50 EUR

28 Andreas Saniter: Spezifika der Verhaltensmuster fortgeschrittener Studierender der Physik
ISBN 978-3-8325-0292-8 40.50 EUR

29 Thomas Weber: Kumulatives Lernen im Physikunterricht. *Eine vergleichende Untersuchung in Unterrichtsgängen zur geometrischen Optik*
ISBN 978-3-8325-0316-1 40.50 EUR

30 Markus Rehm: Über die Chancen und Grenzen moralischer Erziehung im naturwissenschaftlichen Unterricht
ISBN 978-3-8325-0368-0 40.50 EUR

31 Marion Budde: Lernwirkungen in der Quanten-Atom-Physik. *Fallstudien über Resonanzen zwischen Lernangeboten und SchülerInnen-Vorstellungen*
ISBN 978-3-8325-0483-0 40.50 EUR

32 Thomas Reyer: Oberflächenmerkmale und Tiefenstrukturen im Unterricht. *Exemplarische Analysen im Physikunterricht der gymnasialen Sekundarstufe*
ISBN 978-3-8325-0488-5 40.50 EUR

33 Christoph Thomas Müller: Subjektive Theorien und handlungsleitende Kognitionen von Lehrern als Determinanten schulischer Lehr-Lern-Prozesse im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-0543-1 40.50 EUR

34 Gabriela Jonas-Ahrend: Physiklehrervorstellungen zum Experiment im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-0576-9 40.50 EUR

35 Dimitrios Stavrou: Das Zusammenspiel von Zufall und Gesetzmäßigkeiten in der nichtlinearen Dynamik. *Didaktische Analyse und Lernprozesse*
ISBN 978-3-8325-0609-4 40.50 EUR

36 Katrin Engeln: Schülerlabors: authentische, aktivierende Lernumgebungen als Möglichkeit, Interesse an Naturwissenschaften und Technik zu wecken
ISBN 978-3-8325-0689-6 40.50 EUR

37 Susann Hartmann: Erklärungsvielfalt
ISBN 978-3-8325-0730-5 40.50 EUR

38 Knut Neumann: Didaktische Rekonstruktion eines physikalischen Praktikums für Physiker
ISBN 978-3-8325-0762-6 40.50 EUR

39 Michael Späth: Kontextbedingungen für Physikunterricht an der Hauptschule. *Möglichkeiten und Ansatzpunkte für einen fachübergreifenden, handlungsorientierten und berufsorientierten Unterricht*
ISBN 978-3-8325-0827-2 40.50 EUR

40 Jörg Hirsch: Interesse, Handlungen und situatives Erleben von Schülerinnen und Schülern beim Bearbeiten physikalischer Aufgaben
ISBN 978-3-8325-0875-3 40.50 EUR

41 Monika Hüther: Evaluation einer hypermedialen Lernumgebung zum Thema Gasgesetze. *Eine Studie im Rahmen des Physikpraktikums für Studierende der Medizin*
ISBN 978-3-8325-0911-8 40.50 EUR

42 Maike Tesch: Das Experiment im Physikunterricht. *Didaktische Konzepte und Ergebnisse einer Videostudie*
ISBN 978-3-8325-0975-0 40.50 EUR

43 Nina Nicolai: Skriptgeleitete Eltern-Kind-Interaktion bei Chemiehausaufgaben. *Eine Evaluationsstudie im Themenbereich Säure-Base*
ISBN 978-3-8325-1013-8 40.50 EUR

44 Antje Leisner: Entwicklung von Modellkompetenz im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-1020-6 40.50 EUR

45 Stefan Rumann: Evaluation einer Interventionsstudie zur Säure-Base-Thematik
ISBN 978-3-8325-1027-5 40.50 EUR

46 Thomas Wilhelm: Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung – mit CD-ROM
ISBN 978-3-8325-1046-6 45.50 EUR

47 Andrea Maier-Richter: Computerunterstütztes Lernen mit Lösungsbeispielen in der Chemie. *Eine Evaluationsstudie im Themenbereich Löslichkeit*
ISBN 978-3-8325-1046-6 40.50 EUR

48 Jochen Peuckert: Stabilität und Ausprägung kognitiver Strukturen zum Atombegriff
ISBN 978-3-8325-1104-3 40.50 EUR

49 Maik Walpuski: Optimierung von experimenteller Kleingruppenarbeit durch Strukturierungshilfen und Feedback
ISBN 978-3-8325-1184-5 40.50 EUR

50 Helmut Fischler, Christiane S. Reiners (Hrsg.): Die Teilchenstruktur der Materie im Physik- und Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-1225-5 34.90 EUR

51 Claudia Eysel: Interdisziplinäres Lehren und Lernen in der Lehrerbildung. *Eine empirische Studie zum Kompetenzerwerb in einer komplexen Lernumgebung*
ISBN 978-3-8325-1238-5 40.50 EUR

52 Johannes Günther: Lehrerfortbildung über die Natur der Naturwissenschaften. *Studien über das Wissenschaftsverständnis von Grundschullehrkräften*
ISBN 978-3-8325-1287-3 40.50 EUR

53 Christoph Neugebauer: Lernen mit Simulationen und der Einfluss auf das Problemlösen in der Physik
ISBN 978-3-8325-1300-9 40.50 EUR

54 Andreas Schnirch: Gendergerechte Interessen- und Motivationsförderung im Kontext naturwissenschaftlicher Grundbildung. *Konzeption, Entwicklung und Evaluation einer multimedial unterstützten Lernumgebung*
ISBN 978-3-8325-1334-4 40.50 EUR

55 Hilde Köster: Freies Explorieren und Experimentieren. *Eine Untersuchung zur selbstbestimmten Gewinnung von Erfahrungen mit physikalischen Phänomenen im Sachunterricht*
ISBN 978-3-8325-1348-1 40.50 EUR

56 Eva Heran-Dörr: Entwicklung und Evaluation einer Lehrerfortbildung zur Förderung der physikdidaktischen Kompetenz von Sachunterrichtslehrkräften
ISBN 978-3-8325-1377-1 40.50 EUR

57 Agnes Szabone Varnai: Unterstützung des Problemlösens in Physik durch den Einsatz von Simulationen und die Vorgabe eines strukturierten Kooperationsformats
ISBN 978-3-8325-1403-7 40.50 EUR

58 Johannes Rethfeld: Aufgabenbasierte Lernprozesse in selbstorganisationsoffenem Unterricht der Sekundarstufe I zum Themengebiet ELEKTROSTATIK. *Eine Feldstudie in vier 10. Klassen zu einer kartenbasierten Lernumgebung mit Aufgaben aus der Elektrostatik*
ISBN 978-3-8325-1416-7 40.50 EUR

59 Christian Henke: Experimentell-naturwissenschaftliche Arbeitsweisen in der Oberstufe. *Untersuchung am Beispiel des HIGHSEA-Projekts in Bremerhaven*
ISBN 978-3-8325-1515-7 40.50 EUR

60 Lutz Kasper: Diskursiv-narrative Elemente für den Physikunterricht. *Entwicklung und Evaluation einer multimedialen Lernumgebung zum Erdmagnetismus*
ISBN 978-3-8325-1537-9 40.50 EUR

61 Thorid Rabe: Textgestaltung und Aufforderung zu Selbsterklärungen beim Physiklernen mit Multimedia
ISBN 978-3-8325-1539-3 40.50 EUR

62 Ina Glemnitz: Vertikale Vernetzung im Chemieunterricht. *Ein Vergleich von traditionellem Unterricht mit Unterricht nach Chemie im Kontext*
ISBN 978-3-8325-1628-4 40.50 EUR

63 Erik Einhaus: Schülerkompetenzen im Bereich Wärmelehre. *Entwicklung eines Testinstruments zur Überprüfung und Weiterentwicklung eines normativen Modells fachbezogener Kompetenzen*
ISBN 978-3-8325-1630-7 40.50 EUR

64 Jasmin Neuroth: Concept Mapping als Lernstrategie. *Eine Interventionsstudie zum Chemielernen aus Texten*
ISBN 978-3-8325-1659-8 40.50 EUR

65 Hans Gerd Hegeler-Burkhart: Zur Kommunikation von Hauptschülerinnen und Hauptschülern in einem handlungsorientierten und fächerübergreifenden Unterricht mit physikalischen und technischen Inhalten
ISBN 978-3-8325-1667-3 40.50 EUR

66 Karsten Rincke: Sprachentwicklung und Fachlernen im Mechanikunterricht. *Sprache und Kommunikation bei der Einführung in den Kraftbegriff*
ISBN 978-3-8325-1699-4 40.50 EUR

67 Nina Strehle: Das Ion im Chemieunterricht. *Alternative Schülervorstellungen und curriculare Konsequenzen*
ISBN 978-3-8325-1710-6 40.50 EUR

68 Martin Hopf: Problemorientierte Schülerexperimente
ISBN 978-3-8325-1711-3 40.50 EUR

69 Anne Beerenwinkel: Fostering conceptual change in chemistry classes using expository texts
ISBN 978-3-8325-1721-2 40.50 EUR

70 Roland Berger: Das Gruppenpuzzle im Physikunterricht der Sekundarstufe II. *Eine empirische Untersuchung auf der Grundlage der Selbstbestimmungstheorie der Motivation*
ISBN 978-3-8325-1732-8 40.50 EUR

71 Giuseppe Colicchia: Physikunterricht im Kontext von Medizin und Biologie. *Entwicklung und Erprobung von Unterrichtseinheiten*
ISBN 978-3-8325-1746-5 40.50 EUR

72 Sandra Winheller: Geschlechtsspezifische Auswirkungen der Lehrer-Schüler-Interaktion im Chemieanfangsunterricht
ISBN 978-3-8325-1757-1 40.50 EUR

73 Isabel Wahser: Training von naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen zur Unterstützung experimenteller Kleingruppenarbeit im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-1815-8 40.50 EUR

74 Claus Brell: Lernmedien und Lernerfolg - reale und virtuelle Materialien im Physikunterricht. *Empirische Untersuchungen in achten Klassen an Gymnasien (Laborstudie) zum Computereinsatz mit Simulation und IBE*
ISBN 978-3-8325-1829-5 40.50 EUR

75 Rainer Wackermann: Überprüfung der Wirksamkeit eines Basismodell-Trainings für Physiklehrer
ISBN 978-3-8325-1882-0 40.50 EUR

76 Oliver Tepner: Effektivität von Aufgaben im Chemieunterricht der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-1919-3 40.50 EUR

77 Claudia Geyer: Museums- und Science-Center-Besuche im naturwissenschaftlichen Unterricht aus einer motivationalen Perspektive. *Die Sicht von Lehrkräften und Schülerinnen und Schülern*
ISBN 978-3-8325-1922-3 40.50 EUR

78 Tobias Leonhard: Professionalisierung in der Lehrerbildung. *Eine explorative Studie zur Entwicklung professioneller Kompetenzen in der Lehrererstausbildung*
ISBN 978-3-8325-1924-7 40.50 EUR

79 Alexander Kauertz: Schwierigkeitserzeugende Merkmale physikalischer Leistungstestaufgaben
ISBN 978-3-8325-1925-4 40.50 EUR

80 Regina Hübinger: Schüler auf Weltreise. *Entwicklung und Evaluation von Lehr-/ Lernmaterialien zur Förderung experimentell-naturwissenschaftlicher Kompetenzen für die Jahrgangsstufen 5 und 6*
ISBN 978-3-8325-1932-2 40.50 EUR

81 Christine Waltner: Physik lernen im Deutschen Museum
ISBN 978-3-8325-1933-9 40.50 EUR

82 Torsten Fischer: Handlungsmuster von Physiklehrkräften beim Einsatz neuer Medien. *Fallstudien zur Unterrichtspraxis*
ISBN 978-3-8325-1948-3 42.00 EUR

83 Corinna Kieren: Chemiehausaufgaben in der Sekundarstufe I des Gymnasiums. *Fragebogenerhebung zur gegenwärtigen Praxis und Entwicklung eines optimierten Hausaufgabendesigns im Themenbereich Säure-Base*
978-3-8325-1975-9 37.00 EUR

84 Marco Thiele: Modelle der Thermohalinen Zirkulation im Unterricht. *Eine empirische Studie zur Förderung des Modellverständnisses*
ISBN 978-3-8325-1982-7 40.50 EUR

85 Bernd Zinn: Physik lernen, um Physik zu lehren. *Eine Möglichkeit für interessanteren Physikunterricht*
ISBN 978-3-8325-1995-7 39.50 EUR

86 Esther Klaes: Außerschulische Lernorte im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Die Perspektive der Lehrkraft*
ISBN 978-3-8325-2006-9 43.00 EUR

87 Marita Schmidt: Kompetenzmodellierung und -diagnostik im Themengebiet Energie der Sekundarstufe I. *Entwicklung und Erprobung eines Testinventars*
ISBN 978-3-8325-2024-3 37.00 EUR

88 Gudrun Franke-Braun: Aufgaben mit gestuften Lernhilfen. *Ein Aufgabenformat zur Förderung der sachbezogenen Kommunikation und Lernleistung für den naturwissenschaftlichen Unterricht*
ISBN 978-3-8325-2026-7 38.00 EUR

89 Silke Klos: Kompetenzförderung im naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht. *Der Einfluss eines integrierten Unterrichtskonzepts*
ISBN 978-3-8325-2133-2 37.00 EUR

90 Ulrike Elisabeth Burkard: Quantenphysik in der Schule. *Bestandsaufnahme, Perspektiven und Weiterentwicklungsmöglichkeiten durch die Implementation eines Medienservers*
ISBN 978-3-8325-2215-5 43.00 EUR

91 Ulrike Gromadecki: Argumente in physikalischen Kontexten. *Welche Geltungsgründe halten Physikanfänger für überzeugend?*
ISBN 978-3-8325-2250-6 41.50 EUR

92 Jürgen Bruns: Auf dem Weg zur Förderung naturwissenschaftsspezifischer Vorstellungen von zukünftigen Chemie-Lehrenden
ISBN 978-3-8325-2257-5 43.50 EUR

93 Cornelius Marsch: Räumliche Atomvorstellung. *Entwicklung und Erprobung eines Unterrichtskonzeptes mit Hilfe des Computers*
ISBN 978-3-8325-2293-3 82.50 EUR

94 Maja Brückmann: Sachstrukturen im Physikunterricht. *Ergebnisse einer Videostudie*
ISBN 978-3-8325-2272-8 39.50 EUR

95 Sabine Fechner: Effects of Context-oriented Learning on Student Interest and Achievement in Chemistry Education
ISBN 978-3-8325-2343-5 36.50 EUR

96 Clemens Nagel: eLearning im Physikalischen Anfängerpraktikum
ISBN 978-3-8325-2355-8 39.50 EUR

97 Josef Riese: Professionelles Wissen und professionelle Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften
ISBN 978-3-8325-2376-3 39.00 EUR

98 Sascha Bernholt: Kompetenzmodellierung in der Chemie. *Theoretische und empirische Reflexion am Beispiel des Modells hierarchischer Komplexität*
ISBN 978-3-8325-2447-0 40.00 EUR

99 Holger Christoph Stawitz: Auswirkung unterschiedlicher Aufgabenprofile auf die Schülerleistung. *Vergleich von Naturwissenschafts- und Problemlöseaufgaben der PISA 2003-Studie*
ISBN 978-3-8325-2451-7 37.50 EUR

100 Hans Ernst Fischer, Elke Sumfleth (Hrsg.): nwu-essen – 10 Jahre Essener Forschung zum naturwissenschaftlichen Unterricht
ISBN 978-3-8325-3331-1 40.00 EUR

101 Hendrik Härtig: Sachstrukturen von Physikschulbüchern als Grundlage zur Bestimmung der Inhaltsvalidität eines Tests
ISBN 978-3-8325-2512-5 34.00 EUR

102 Thomas Grüß-Niehaus: Zum Verständnis des Löslichkeitskonzeptes im Chemieunterricht. *Der Effekt von Methoden progressiver und kollaborativer Reflexion*
ISBN 978-3-8325-2537-8 40.50 EUR

103 Patrick Bronner: Quantenoptische Experimente als Grundlage eines Curriculums zur Quantenphysik des Photons
ISBN 978-3-8325-2540-8 36.00 EUR

104 Adrian Voßkühler: Blickbewegungsmessung an Versuchsaufbauten. *Studien zur Wahrnehmung, Verarbeitung und Usability von physikbezogenen Experimenten am Bildschirm und in der Realität*
ISBN 978-3-8325-2548-4 47.50 EUR

105 Verena Tobias: Newton'sche Mechanik im Anfangsunterricht. *Die Wirksamkeit einer Einführung über die zweidimensionale Dynamik auf das Lehren und Lernen*
ISBN 978-3-8325-2558-3 54.00 EUR

106 Christian Rogge: Entwicklung physikalischer Konzepte in aufgabenbasierten Lernumgebungen
ISBN 978-3-8325-2574-3 45.00 EUR

107 Mathias Ropohl: Modellierung von Schülerkompetenzen im Basiskonzept Chemische Reaktion. *Entwicklung und Analyse von Testaufgaben*
ISBN 978-3-8325-2609-2 36.50 EUR

108 Christoph Kulgemeyer: Physikalische Kommunikationskompetenz. *Modellierung und Diagnostik*
ISBN 978-3-8325-2674-0 44.50 EUR

109 Jennifer Olszewski: The Impact of Physics Teachers' Pedagogical Content Knowledge on Teacher Actions and Student Outcomes
ISBN 978-3-8325-2680-1 33.50 EUR

110 Annika Ohle: Primary School Teachers' Content Knowledge in Physics and its Impact on Teaching and Students' Achievement
ISBN 978-3-8325-2684-9 36.50 EUR

111 Susanne Mannel: Assessing scientific inquiry. *Development and evaluation of a test for the low-performing stage*
ISBN 978-3-8325-2761-7 40.00 EUR

112 Michael Plomer: Physik physiologisch passend praktiziert. *Eine Studie zur Lernwirksamkeit von traditionellen und adressatenspezifischen Physikpraktika für die Physiologie*
ISBN 978-3-8325-2804-1 34.50 EUR

113 Alexandra Schulz: Experimentierspezifische Qualitätsmerkmale im Chemieunterricht. *Eine Videostudie*
ISBN 978-3-8325-2817-1 40.00 EUR

114 Franz Boczianowski: Eine empirische Untersuchung zu Vektoren im Physikunterricht der Mittelstufe
ISBN 978-3-8325-2843-0 39.50 EUR

115 Maria Ploog: Internetbasiertes Lernen durch Textproduktion im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-2853-9 39.50 EUR

116 Anja Dhein: Lernen in Explorier- und Experimentiersituationen. *Eine explorative Studie zu Bedeutungsentwicklungsprozessen bei Kindern im Alter zwischen 4 und 6 Jahren*
ISBN 978-3-8325-2859-1 45.50 EUR

117 Irene Neumann: Beyond Physics Content Knowledge. *Modeling Competence Regarding Nature of Scientific Inquiry and Nature of Scientific Knowledge*
ISBN 978-3-8325-2880-5 37.00 EUR

118 Markus Emden: Prozessorientierte Leistungsmessung des naturwissenschaftlich-experimentellen Arbeitens. *Eine vergleichende Studie zu Diagnoseinstrumenten zu Beginn der Sekundarstufe I*
ISBN 978-3-8325-2867-6 38.00 EUR

119 Birgit Hofmann: Analyse von Blickbewegungen von Schülern beim Lesen von physikbezogenen Texten mit Bildern. *Eye Tracking als Methodenwerkzeug in der physikdidaktischen Forschung*
ISBN 978-3-8325-2925-3 59.00 EUR

120 Rebecca Knobloch: Analyse der fachinhaltlichen Qualität von Schüleräußerungen und deren Einfluss auf den Lernerfolg. *Eine Videostudie zu kooperativer Kleingruppenarbeit*
ISBN 978-3-8325-3006-8 36.50 EUR

121 Julia Hostenbach: Entwicklung und Prüfung eines Modells zur Beschreibung der Bewertungskompetenz im Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-3013-6 38.00 EUR

122 Anna Windt: Naturwissenschaftliches Experimentieren im Elementarbereich. *Evaluation verschiedener Lernsituationen*
ISBN 978-3-8325-3020-4 43.50 EUR

123 Eva Kölbach: Kontexteinflüsse beim Lernen mit Lösungsbeispielen
ISBN 978-3-8325-3025-9 38.50 EUR

124 Anna Lau: Passung und vertikale Vernetzung im Chemie- und Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-3021-1 36.00 EUR

125 Jan Lamprecht: Ausbildungswege und Komponenten professioneller Handlungskompetenz. *Vergleich von Quereinsteigern mit Lehramtsabsolventen für Gymnasien im Fach Physik*
ISBN 978-3-8325-3035-8 38.50 EUR

126 Ulrike Böhm: Förderung von Verstehensprozessen unter Einsatz von Modellen
ISBN 978-3-8325-3042-6 41.00 EUR

127 Sabrina Dollny: Entwicklung und Evaluation eines Testinstruments zur Erfassung des fachspezifischen Professionswissens von Chemielehrkräften
ISBN 978-3-8325-3046-4 37.00 EUR

128 Monika Zimmermann: Naturwissenschaftliche Bildung im Kindergarten. *Eine integrative Längsschnittstudie zur Kompetenzentwicklung von Erzieherinnen*
ISBN 978-3-8325-3053-2 54.00 EUR

129 Ulf Saballus: Über das Schlussfolgern von Schülerinnen und Schülern zu öffentlichen Kontroversen mit naturwissenschaftlichem Hintergrund. *Eine Fallstudie*
ISBN 978-3-8325-3086-0 39.50 EUR

130 Olaf Krey: Zur Rolle der Mathematik in der Physik. *Wissenschaftstheoretische Aspekte und Vorstellungen Physiklernender*
ISBN 978-3-8325-3101-0 46.00 EUR

131 Angelika Wolf: Zusammenhänge zwischen der Eigenständigkeit im Physikunterricht, der Motivation, den Grundbedürfnissen und dem Lernerfolg von Schülern
ISBN 978-3-8325-3161-4 45.00 EUR

132 Johannes Börlin: Das Experiment als Lerngelegenheit. *Vom interkulturellen Vergleich des Physikunterrichts zu Merkmalen seiner Qualität*
ISBN 978-3-8325-3170-6 45.00 EUR

133 Olaf Uhden: Mathematisches Denken im Physikunterricht. *Theorieentwicklung und Problemanalyse*
ISBN 978-3-8325-3170-6 45.00 EUR

134 Christoph Gut: Modellierung und Messung experimenteller Kompetenz. *Analyse eines large-scale Experimentiertests*
ISBN 978-3-8325-3213-0 40.00 EUR

135 Antonio Rueda: Lernen mit ExploMultimedial in kolumbianischen Schulen. *Analyse von kurzzeitigen Lernprozessen und der Motivation beim länderübergreifenden Einsatz einer deutschen computergestützten multimedialen Lernumgebung für den naturwissenschaftlichen Unterricht*
ISBN 978-3-8325-3218-5 45.50 EUR

136 Krisztina Berger: Bilder, Animationen und Notizen. *Empirische Untersuchung zur Wirkung einfacher visueller Repräsentationen und Notizen auf den Wissenserwerb in der Optik*
ISBN 978-3-8325-3238-3 41.50 EUR

137 Antony Crossley: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher physikalischer Konzepte auf den Wissenserwerb in der Thermodynamik der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-3275-8 40.00 EUR

138 Tobias Viering: Entwicklung physikalischer Kompetenz in der Sekundarstufe I. *Validierung eines Kompetenzentwicklungsmodells für das Energiekonzept im Bereich Fachwissen*
ISBN 978-3-8325-3277-2 37.00 EUR

139 Nico Schreiber: Diagnostik experimenteller Kompetenz. *Validierung technologiegestützter Testverfahren im Rahmen eines Kompetenzstrukturmodells*
ISBN 978-3-8325-3284-0 39.00 EUR

140 Sarah Hundertmark: Einblicke in kollaborative Lernprozesse. *Eine Fallstudie zur reflektierenden Zusammenarbeit unterstützt durch die Methoden Concept Mapping und Lernbegleitbogen*
ISBN 978-3-8325-3251-2 43.00 EUR

141 Ronny Scherer: Analyse der Struktur, Messinvarianz und Ausprägung komplexer Problemlösekompetenz im Fach Chemie. *Eine Querschnittstudie in der Sekundarstufe I und am Übergang zur Sekundarstufe II*
ISBN 978-3-8325-3312-0 43.00 EUR

142 Patricia Heitmann: Bewertungskompetenz im Rahmen naturwissenschaftlicher Problemlöseprozesse. *Modellierung und Diagnose der Kompetenzen Bewertung und analytisches Problemlösen für das Fach Chemie*
ISBN 978-3-8325-3314-4 37.00 EUR

143 Jan Fleischhauer: Wissenschaftliches Argumentieren und Entwicklung von Konzepten beim Lernen von Physik
ISBN 978-3-8325-3325-0 35.00 EUR

144 Nermin Özcan: Zum Einfluss der Fachsprache auf die Leistung im Fach Chemie. *Eine Förderstudie zur Fachsprache im Chemieunterricht*
ISBN 978-3-8325-3328-1 36.50 EUR

145 Helena van Vorst: Kontextmerkmale und ihr Einfluss auf das Schülerinteresse im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3321-2 38.50 EUR

146 Janine Cappell: Fachspezifische Diagnosekompetenz angehender Physiklehrkräfte in der ersten Ausbildungsphase
ISBN 978-3-8325-3356-4 38.50 EUR

147 Susanne Bley: Förderung von Transferprozessen im Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-3407-3 40.50 EUR

148 Cathrin Blaes: Die übungsgestützte Lehrerpräsentation im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Evaluation der Effektivität*
ISBN 978-3-8325-3409-7 43.50 EUR

149 Julia Suckut: Die Wirksamkeit von piko-OWL als Lehrerfortbildung. Eine Evaluation zum Projekt *Physik im Kontext* in Fallstudien
ISBN 978-3-8325-3440-0 45.00 EUR

150 Alexandra Dorschu: Die Wirkung von Kontexten in Physikkompetenztestaufgaben
ISBN 978-3-8325-3446-2 37.00 EUR

151 Jochen Scheid: Multiple Repräsentationen, Verständnis physikalischer Experimente und kognitive Aktivierung: *Ein Beitrag zur Entwicklung der Aufgabenkultur*
ISBN 978-3-8325-3449-3 49.00 EUR

152 Tim Plasa: Die Wahrnehmung von Schülerlaboren und Schülerforschungszentren
ISBN 978-3-8325-3483-7 35.50 EUR

153 Felix Schoppmeier: Physikkompetenz in der gymnasialen Oberstufe.*Entwicklung und Validierung eines Kompetenzstrukturmodells für den Kompetenzbereich Umgang mit Fachwissen*
ISBN 978-3-8325-3502-5 36.00 EUR

154 Katharina Groß: Experimente alternativ dokumentieren. *Eine qualitative Studie zur Förderung der Diagnose- und Differenzierungskompetenz in der Chemielehrerbildung*
ISBN 978-3-8325-3508-7 43.50 EUR

155 Barbara Hank: Konzeptwandelprozesse im Anfangsunterricht Chemie. *Eine quasiexperimentelle Längsschnittstudie*
ISBN 978-3-8325-3519-3 38.50 EUR

156 Katja Freyer: Zum Einfluss von Studieneingangsvoraussetzungen auf den Studienerfolg Erstsemesterstudierender im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3544-5 38.00 EUR

157 Alexander Rachel: Auswirkungen instruktionaler Hilfen bei der Einführung des (Ferro-)Magnetismus. *Eine Vergleichsstudie in der Primar- und Sekundarstufe*
ISBN 978-3-8325-3548-3 43.50 EUR

158 Sebastian Ritter: Einfluss des Lerninhalts Nanogrößeneffekte auf Teilchen- und Teilchenmodellvorstellungen von Schülerinnen und Schülern
ISBN 978-3-8325-3558-2 36.00 EUR

159 Andrea Harbach: Problemorientierung und Vernetzung in kontextbasierten Lernaufgaben
ISBN 978-3-8325-3564-3 39.00 EUR

160 David Obst: Interaktive Tafeln im Physikunterricht. *Entwicklung und Evaluation einer Lehrerfortbildung*
ISBN 978-3-8325-3582-7 40.50 EUR

161 Sophie Kirschner: Modellierung und Analyse des Professionswissens von Physiklehrkräften
ISBN 978-3-8325-3601-5 35.00 EUR

162 Katja Stief: Selbstregulationsprozesse und Hausaufgabenmotivation im Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-3631-2 34.00 EUR

163 Nicola Meschede: Professionelle Wahrnehmung der inhaltlichen Strukturierung im naturwissenschaftlichen Grundschulunterricht. *Theoretische Beschreibung und empirische Erfassung*
ISBN 978-3-8325-3668-8 37.00 EUR

164 Johannes Maximilian Barth: Experimentieren im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe. *Eine Rekonstruktion übergeordneter Einbettungsstrategien*
ISBN 978-3-8325-3681-7 39.00 EUR

165 Sandra Lein: Das Betriebspraktikum in der Lehrerbildung. *Eine Untersuchung zur Förderung der Wissenschafts- und Technikbildung im allgemeinbildenden Unterricht*
ISBN 978-3-8325-3698-5 40.00 EUR

166 Veranika Maiseyenka: Modellbasiertes Experimentieren im Unterricht. *Praxistauglichkeit und Lernwirkungen*
ISBN 978-3-8325-3708-1 38.00 EUR

167 Christoph Stolzenberger: Der Einfluss der didaktischen Lernumgebung auf das Erreichen geforderter Bildungsziele am Beispiel der W- und P-Seminare im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-3708-1 38.00 EUR

168 Pia Altenburger: Mehrebenenregressionsanalysen zum Physiklernen im Sachunterricht der Primarstufe. *Ergebnisse einer Evaluationsstudie.*
ISBN 978-3-8325-3717-3 37.50 EUR

169 Nora Ferber: Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zur Erfassung von Kompetenzentwicklung im Fach Chemie in der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-3727-2 39.50 EUR

170 Anita Stender: Unterrichtsplanung: Vom Wissen zum Handeln.
Theoretische Entwicklung und empirische Überprüfung des Transformationsmodells der Unterrichtsplanung
ISBN 978-3-8325-3750-0 41.50 EUR

171 Jenna Koenen: Entwicklung und Evaluation von experimentunterstützten Lösungsbeispielen zur Förderung naturwissenschaftlich-experimenteller Arbeitsweisen
ISBN 978-3-8325-3785-2 43.00 EUR

172 Teresa Henning: Empirische Untersuchung kontextorientierter Lernumgebungen in der Hochschuldidaktik. *Entwicklung und Evaluation kontextorientierter Aufgaben in der Studieneingangsphase für Fach- und Nebenfachstudierende der Physik*
ISBN 978-3-8325-3801-9 43.00 EUR

173 Alexander Pusch: Fachspezifische Instrumente zur Diagnose und individuellen Förderung von Lehramtsstudierenden der Physik
ISBN 978-3-8325-3829-3 38.00 EUR

174 Christoph Vogelsang: Validierung eines Instruments zur Erfassung der professionellen Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften. *Zusammenhangsanalysen zwischen Lehrerkompetenz und Lehrerperformanz*
ISBN 978-3-8325-3846-0 50.50 EUR

175 Ingo Brebeck: Selbstreguliertes Lernen in der Studieneingangsphase im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3859-0 37.00 EUR

176 Axel Eghtessad: Merkmale und Strukturen von Professionalisierungsprozessen in der ersten und zweiten Phase der Chemielehrerbildung. *Eine empirisch-qualitative Studie mit niedersächsischen Fachleiter_innen der Sekundarstufenlehrämter*
ISBN 978-3-8325-3861-3 45.00 EUR

177 Andreas Nehring: Wissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen im Fach Chemie. Eine kompetenzorientierte Modell- und Testentwicklung für den Bereich der Erkenntnisgewinnung
ISBN 978-3-8325-3872-9 39.50 EUR

178 Maike Schmidt: Professionswissen von Sachunterrichtslehrkräften. Zusammenhangsanalyse zur Wirkung von Ausbildungshintergrund und Unterrichtserfahrung auf das fachspezifische Professionswissen im Unterrichtsinhalt „Verbrennung“
ISBN 978-3-8325-3907-8 38.50 EUR

179 Jan Winkelmann: Auswirkungen auf den Fachwissenszuwachs und auf affektive Schülermerkmale durch Schüler- und Demonstrationsexperimente im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-3915-3 41.00 EUR

180 Iwen Kobow: Entwicklung und Validierung eines Testinstrumentes zur Erfassung der Kommunikationskompetenz im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3927-6 34.50 EUR

181 Yvonne Gramzow: Fachdidaktisches Wissen von Lehramtsstudierenden im Fach Physik. Modellierung und Testkonstruktion
ISBN 978-3-8325-3931-3 42.50 EUR

182 Evelin Schröter: Entwicklung der Kompetenzerwartung durch Lösen physikalischer Aufgaben einer multimedialen Lernumgebung
ISBN 978-3-8325-3975-7 54.50 EUR

183 Inga Kallweit: Effektivität des Einsatzes von Selbsteinschätzungsbögen im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Individuelle Förderung durch selbstreguliertes Lernen*
ISBN 978-3-8325-3965-8 44.00 EUR

184 Andrea Schumacher: Paving the way towards authentic chemistry teaching. *A contribution to teachers' professional development*
ISBN 978-3-8325-3976-4 48.50 EUR

185 David Woitkowski: Fachliches Wissen Physik in der Hochschulausbildung. *Konzeptualisierung, Messung, Niveaubildung*
ISBN 978-3-8325-3988-7 53.00 EUR

186 Marianne Korner: Cross-Age Peer Tutoring in Physik. *Evaluation einer Unterrichtsmethode*
ISBN 978-3-8325-3979-5 38.50 EUR

187 Simone Nakoinz: Untersuchung zur Verknüpfung submikroskopischer und makroskopischer Konzepte im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4057-9 38.50 EUR

188 Sandra Anus: Evaluation individueller Förderung im Chemieunterricht.*Adaptivität von Lerninhalten an das Vorwissen von Lernenden am Beispiel des Basiskonzeptes Chemische Reaktion*
ISBN 978-3-8325-4059-3 43.50 EUR

189 Thomas Roßbegalle: Fachdidaktische Entwicklungsforschung zum besseren Verständnis atmosphärischer Phänomene. *Treibhauseffekt, saurer Regen und stratosphärischer Ozonabbau als Kontexte zur Vermittlung von Basiskonzepten der Chemie*
ISBN 978-3-8325-4059-3 45.50 EUR

190 Kathrin Steckenmesser-Sander: Gemeinsamkeiten und Unterschiede physikbezogener Handlungs-, Denk- und Lernprozesse von Mädchen und Jungen
ISBN 978-3-8325-4066-1 38.50 EUR

191 Cornelia Geller: Lernprozessorientierte Sequenzierung des Physikunterrichts im Zusammenhang mit Fachwissenserwerb. *Eine Videostudie in Finnland, Deutschland und der Schweiz*
ISBN 978-3-8325-4082-1 35.50 EUR

192 Jan Hofmann: Untersuchung des Kompetenzaufbaus von Physiklehrkräften während einer Fortbildungsmaßnahme
ISBN 978-3-8325-4104-0 38.50 EUR

193 Andreas Dickhäuser: Chemiespezifischer Humor. *Theoriebildung, Materialentwicklung, Evaluation*
ISBN 978-3-8325-4108-8 37.00 EUR

194 Stefan Korte: Die Grenzen der Naturwissenschaft als Thema des Physikunterrichts
ISBN 978-3-8325-4112-5 57.50 EUR

195 Carolin Hülsmann: Kurswahlmotive im Fach Chemie. Eine Studie zum Wahlverhalten und Erfolg von Schülerinnen und Schülern in der gymnasialen Oberstufe
ISBN 978-3-8325-4144-6 49.00 EUR

196 Caroline Körbs: Mindeststandards im Fach Chemie am Ende der Pflichtschulzeit
ISBN 978-3-8325-4148-4 34.00 EUR

197 Andreas Vorholzer: Wie lassen sich Kompetenzen des experimentellen Denkens und Arbeitens fördern? *Eine empirische Untersuchung der Wirkung eines expliziten und eines impliziten Instruktionsansatzes*
ISBN 978-3-8325-4194-1 37.50 EUR

198 Anna Katharina Schmitt: Entwicklung und Evaluation einer Chemielehrerfortbildung zum Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung
ISBN 978-3-8325-4228-3 39.50 EUR

199 Christian Maurer: Strukturierung von Lehr-Lern-Sequenzen
ISBN 978-3-8325-4247-4 36.50 EUR

200 Helmut Fischler, Elke Sumfleth (Hrsg.): Professionelle Kompetenz von Lehrkräften der Chemie und Physik
ISBN 978-3-8325-4523-9 34.00 EUR

201 Simon Zander: Lehrerfortbildung zu Basismodellen und Zusammenhänge zum Fachwissen
ISBN 978-3-8325-4248-1 35.00 EUR

202 Kerstin Arndt: Experimentierkompetenz erfassen.
Analyse von Prozessen und Mustern am Beispiel von Lehramtsstudierenden der Chemie
ISBN 978-3-8325-4266-5 45.00 EUR

203 Christian Lang: Kompetenzorientierung im Rahmen experimentalchemischer Praktika
ISBN 978-3-8325-4268-9 42.50 EUR

204 Eva Cauet: Testen wir relevantes Wissen? *Zusammenhang zwischen dem Professionswissen von Physiklehrkräften und gutem und erfolgreichem Unterrichten*
ISBN 978-3-8325-4276-4 39.50 EUR

205 Patrick Löffler: Modellanwendung in Problemlöseaufgaben. *Wie wirkt Kontext?*
ISBN 978-3-8325-4303-7 35.00 EUR

206 Carina Gehlen: Kompetenzstruktur naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4318-1 43.00 EUR

207 Lars Oettinghaus: Lehrerüberzeugungen und physikbezogenes Professionswissen. *Vergleich von Absolventinnen und Absolventen verschiedener Ausbildungswege im Physikreferendariat*
ISBN 978-3-8325-4319-8 38.50 EUR

208 Jennifer Petersen: Zum Einfluss des Merkmals Humor auf die Gesundheitsförderung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I.
Eine Interventionsstudie zum Thema Sonnenschutz
ISBN 978-3-8325-4348-8 40.00 EUR

209 Philipp Straube: Modellierung und Erfassung von Kompetenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung bei (Lehramts-) Studierenden im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-4351-8 35.50 EUR

210 Martin Dickmann: Messung von Experimentierfähigkeiten. *Validierungsstudien zur Qualität eines computerbasierten Testverfahrens*
ISBN 978-3-8325-4356-3 41.00 EUR

211 Markus Bohlmann: Science Education. Empirie, Kulturen und Mechanismen der Didaktik der Naturwissenschaften
ISBN 978-3-8325-4377-8 44.00 EUR

212 Martin Draude: Die Kompetenz von Physiklehrkräften, Schwierigkeiten von Schülerinnen und Schülern beim eigenständigen Experimentieren zu diagnostizieren
ISBN 978-3-8325-4382-2 37.50 EUR

213 Henning Rode: Prototypen evidenzbasierten Physikunterrichts. *Zwei empirische Studien zum Einsatz von Feedback und Blackboxes in der Sekundarstufe*
ISBN 978-3-8325-4389-1 42.00 EUR

214 Jan-Henrik Kechel: Schülerschwierigkeiten beim eigenständigen Experimentieren. *Eine qualitative Studie am Beispiel einer Experimentieraufgabe zum Hooke'schen Gesetz*
ISBN 978-3-8325-4392-1 55.00 EUR

215 Katharina Fricke: Classroom Management and its Impact on Lesson Outcomes in Physics. *A multi-perspective comparison of teaching practices in primary and secondary schools*
ISBN 978-3-8325-4394-5 40.00 EUR

216 Hannes Sander: Orientierungen von Jugendlichen beim Urteilen und Entscheiden in Kontexten nachhaltiger Entwicklung. *Eine rekonstruktive Perspektive auf Bewertungskompetenz in der Didaktik der Naturwissenschaft*
ISBN 978-3-8325-4434-8 46.00 EUR

217 Inka Haak: Maßnahmen zur Unterstützung kognitiver und metakognitiver Prozesse in der Studieneingangsphase. *Eine Design-Based-Research-Studie zum universitären Lernzentrum Physiktreff*
ISBN 978-3-8325-4437-9 46.50 EUR

218 Martina Brandenburger: Was beeinflusst den Erfolg beim Problemlösen in der Physik? *Eine Untersuchung mit Studierenden*
ISBN 978-3-8325-4409-6 42.50 EUR

219 Corinna Helms: Entwicklung und Evaluation eines Trainings zur Verbesserung der Erklärqualität von Schülerinnen und Schülern im Gruppenpuzzle
ISBN 978-3-8325-4454-6 42.50 EUR

220 Viktoria Rath: Diagnostische Kompetenz von angehenden Physiklehrkräften. *Modellierung, Testinstrumentenentwicklung und Erhebung der Performanz bei der Diagnose von Schülervorstellungen in der Mechanik*
ISBN 978-3-8325-4456-0 42.50 EUR

221 Janne Krüger: Schülerperspektiven auf die zeitliche Entwicklung der Naturwissenschaften
ISBN 978-3-8325-4457-7 45.50 EUR

222 Stefan Mutke: Das Professionswissen von Chemiereferendarinnen und -referendaren in Nordrhein-Westfalen. *Eine Längsschnittstudie*
ISBN 978-3-8325-4458-4 37.50 EUR

223 Sebastian Habig: Systematisch variierte Kontextaufgaben und ihr Einfluss auf kognitive und affektive Schülerfaktoren
ISBN 978-3-8325-4467-6 40.50 EUR

224 Sven Liepertz: Zusammenhang zwischen dem Professionswissen von Physiklehrkräften, dem sachstrukturellen Angebot des Unterrichts und der Schülerleistung
ISBN 978-3-8325-4480-5 34.00 EUR

225 Elina Platova: Optimierung eines Laborpraktikums durch kognitive Aktivierung
ISBN 978-3-8325-4481-2 39.00 EUR

226 Tim Reschke: Lesegeschichten im Chemieunterricht der Sekundarstufe I zur Unterstützung von situationalem Interesse und Lernerfolg
ISBN 978-3-8325-4487-4 41.00 EUR

227 Lena Mareike Walper: Entwicklung der physikbezogenen Interessen und selbstbezogenen Kognitionen von Schülerinnen und Schülern in der Übergangsphase von der Primar- in die Sekundarstufe. *Eine Längsschnittanalyse vom vierten bis zum siebten Schuljahr*
ISBN 978-3-8325-4495-9 43.00 EUR

228 Stefan Anthofer: Förderung des fachspezifischen Professionswissens von Chemielehramtsstudierenden
ISBN 978-3-8325-4498-0 39.50 EUR

229 Marcel Bullinger: Handlungsorientiertes Physiklernen mit instruierten Selbsterklärungen in der Primarstufe. *Eine experimentelle Laborstudie*
ISBN 978-3-8325-4504-8 44.00 EUR

230 Thomas Amenda: Bedeutung fachlicher Elementarisierungen für das Verständnis der Kinematik
ISBN 978-3-8325-4531-4 43.50 EUR

231 Sabrina Milke: Beeinflusst *Priming* das Physiklernen?
Eine empirische Studie zum Dritten Newtonschen Axiom
ISBN 978-3-8325-4549-4 42.00 EUR

232 Corinna Erfmann: Ein anschaulicher Weg zum Verständnis der elektromagnetischen Induktion. *Evaluation eines Unterrichtsvorschlags und Validierung eines Leistungsdiagnoseinstruments*
ISBN 978-3-8325-4550-5 49.50 EUR

233 Hanne Rautenstrauch: Erhebung des (Fach-)Sprachstandes bei Lehramtsstudierenden im Kontext des Faches Chemie
ISBN 978-3-8325-4556-7 40.50 EUR

234 Tobias Klug: Wirkung kontextorientierter physikalischer Praktikumsversuche auf Lernprozesse von Studierenden der Medizin
ISBN 978-3-8325-4558-1 37.00 EUR

235 Mareike Bohrmann: Zur Förderung des Verständnisses der Variablenkontrolle im naturwissenschaftlichen Sachunterricht
ISBN 978-3-8325-4559-8 52.00 EUR

236 Anja Schödl: FALKO-Physik – Fachspezifische Lehrerkompetenzen im Fach Physik. *Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zur Erfassung des fachspezifischen Professionswissens von Physiklehrkräften*
ISBN 978-3-8325-4553-6 40.50 EUR

237 Hilda Scheuermann: Entwicklung und Evaluation von Unterstützungsmaßnahmen zur Förderung der Variablenkontrollstrategie beim Planen von Experimenten
ISBN 978-3-8325-4568-0 39.00 EUR

238 Christian G. Strippel: Naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung an chemischen Inhalten vermitteln. *Konzeption und empirische Untersuchung einer Ausstellung mit Experimentierstation*
ISBN 978-3-8325-4577-2 41.50 EUR

239 Sarah Rau: Durchführung von Sachunterricht im Vorbereitungsdienst. *Eine längsschnittliche, videobasierte Unterrichtsanalyse*
ISBN 978-3-8325-4579-6 46.00 EUR

240 Thomas Plotz: Lernprozesse zu nicht-sichtbarer Strahlung. *Empirische Untersuchungen in der Sekundarstufe 2*
ISBN 978-3-8325-4624-3 39.50 EUR

241 Wolfgang Aschauer: Elektrische und magnetische Felder. *Eine empirische Studie zu Lernprozessen in der Sekundarstufe II*
ISBN 978-3-8325-4625-0 50.00 EUR

242 Anna Donhauser: Didaktisch rekonstruierte Materialwissenschaft. *Aufbau und Konzeption eines Schülerlabors für den Exzellenzcluster Engineering of Advanced Materials*
ISBN 978-3-8325-4636-6 39.00 EUR

243 Katrin Schüßler: Lernen mit Lösungsbeispielen im Chemieunterricht. *Einflüsse auf Lernerfolg, kognitive Belastung und Motivation*
ISBN 978-3-8325-4640-3 42.50 EUR

244 Timo Fleischer: Untersuchung der chemischen Fachsprache unter besonderer Berücksichtigung chemischer Repräsentationen
ISBN 978-3-8325-4642-7 46.50 EUR

245 Rosina Steininger: Concept Cartoons als Stimuli für Kleingruppendiskussionen im Chemieunterricht. *Beschreibung und Analyse einer komplexen Lerngelegenheit*
ISBN 978-3-8325-4647-2 39.00 EUR

246 Daniel Rehfeldt: Erfassung der Lehrqualität naturwissenschaftlicher Experimentalpraktika
ISBN 978-3-8325-4590-1 40.00 EUR

247 Sandra Puddu: Implementing Inquiry-based Learning in a Diverse Classroom: Investigating Strategies of Scaffolding and Students' Views of Scientific Inquiry
ISBN 978-3-8325-4591-8 35.50 EUR

248 Markus Bliersbach: Kreativität in der Chemie. *Erhebung und Förderung der Vorstellungen von Chemielehramtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-4593-2 44.00 EUR

249 Lennart Kimpel: Aufgaben in der Allgemeinen Chemie. *Zum Zusammenspiel von chemischem Verständnis und Rechenfähigkeit*
ISBN 978-3-8325-4618-2 36.00 EUR

250 Louise Bindel: Effects of integrated learning: explicating a mathematical concept in inquiry-based science camps
ISBN 978-3-8325-4655-7 37.50 EUR

251 Michael Wenzel: Computereinsatz in Schule und Schülerlabor. *Einstellung von Physiklehrkräften zu Neuen Medien*
ISBN 978-3-8325-4659-5 38.50 EUR

252 Laura Muth: Einfluss der Auswertephase von Experimenten im Physikunterricht. *Ergebnisse einer Interventionsstudie zum Zuwachs von Fachwissen und experimenteller Kompetenz von Schülerinnen und Schülern*
ISBN 978-3-8325-4675-5 36.50 EUR

253 Annika Fricke: Interaktive Skripte im Physikalischen Praktikum. *Entwicklung und Evaluation von Hypermedien für die Nebenfachausbildung*
ISBN 978-3-8325-4676-2 41.00 EUR

254 Julia Haase: Selbstbestimmtes Lernen im naturwissenschaftlichen Sachunterricht. *Eine empirische Interventionsstudie mit Fokus auf Feedback und Kompetenzerleben*
ISBN 978-3-8325-4685-4 38.50 EUR

255 Antje J. Heine: Was ist Theoretische Physik? *Eine wissenschaftstheoretische Betrachtung und Rekonstruktion von Vorstellungen von Studierenden und Dozenten über das Wesen der Theoretischen Physik*
ISBN 978-3-8325-4691-5 46.50 EUR

256 Claudia Meinhardt: Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zu Selbstwirksamkeitserwartungen von (angehenden) Physiklehrkräften in physikdidaktischen Handlungsfeldern
ISBN 978-3-8325-4712-7 47.00 EUR

257 Ann-Kathrin Schlüter: Professionalisierung angehender Chemielehrkräfte für einen Gemeinsamen Unterricht
ISBN 978-3-8325-4713-4 53.50 EUR

258 Stefan Richtberg: Elektronenbahnen in Feldern. Konzeption und Evaluation einer webbasierten Lernumgebung
ISBN 978-3-8325-4723-3 49.00 EUR

259 Jan-Philipp Burde: Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells
ISBN 978-3-8325-4726-4 57.50 EUR

260 Frank Finkenberg: Flipped Classroom im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-4737-4 42.50 EUR

261 Florian Treisch: Die Entwicklung der Professionellen Unterrichtswahrnehmung im Lehr-Lern-Labor Seminar
ISBN 978-3-8325-4741-4 41.50 EUR

262 Desiree Mayr: Strukturiertheit des experimentellen naturwissenschaftlichen Problemlöseprozesses
ISBN 978-3-8325-4757-8 37.00 EUR

263 Katrin Weber: Entwicklung und Validierung einer Learning Progression für das Konzept der chemischen Reaktion in der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-4762-2 48.50 EUR

264 Hauke Bartels: Entwicklung und Bewertung eines performanznahen Videovignettentests zur Messung der Erklärfähigkeit von Physiklehrkräften
ISBN 978-3-8325-4804-9 37.00 EUR

265 Karl Marniok: Zum Wesen von Theorien und Gesetzen in der Chemie. *Begriffsanalyse und Förderung der Vorstellungen von Lehramtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-4805-6 42.00 EUR

266 Marisa Holzapfel: Fachspezifischer Humor als Methode in der Gesundheitsbildung im Übergang von der Primarstufe zur Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-4808-7 50.00 EUR

267 Anna Stolz: Die Auswirkungen von Experimentiersituationen mit unterschiedlichem Öffnungsgrad auf Leistung und Motivation der Schülerinnen und Schüler
ISBN 978-3-8325-4781-3 38.00 EUR

268 Nina Ulrich: Interaktive Lernaufgaben in dem digitalen Schulbuch eChemBook. *Einfluss des Interaktivitätsgrads der Lernaufgaben und des Vorwissens der Lernenden auf den Lernerfolg*
ISBN 978-3-8325-4814-8 43.50 EUR

269 Kim-Alessandro Weber: Quantenoptik in der Lehrerfortbildung. *Ein bedarfsgeprägtes Fortbildungskonzept zum Quantenobjekt „Photon“ mit Realexperimenten*
ISBN 978-3-8325-4792-9 55.00 EUR

270 Nina Skorsetz: Empathisierer und Systematisierer im Vorschulalter. *Eine Fragebogen- und Videostudie zur Motivation, sich mit Naturphänomenen zu beschäftigen*
ISBN 978-3-8325-4825-4 43.50 EUR

271 Franziska Kehne: Analyse des Transfers von kontextualisiert erworbenem Wissen im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4846-9 45.00 EUR

272 Markus Elsholz: Das akademische Selbstkonzept angehender Physiklehrkräfte als Teil ihrer professionellen Identität. *Dimensionalität und Veränderung während einer zentralen Praxisphase*
ISBN 978-3-8325-4857-5 37.50 EUR

273 Joachim Müller: Studienerfolg in der Physik. *Zusammenhang zwischen Modellierungskompetenz und Studienerfolg*
ISBN 978-3-8325-4859-9 35.00 EUR

274 Jennifer Dörschelln: Organische Leuchtdioden. *Implementation eines innovativen Themas in den Chemieunterricht*
ISBN 978-3-8325-4865-0 59.00 EUR

275 Stephanie Strelow: Beliefs von Studienanfängern des Kombi-Bachelors Physik über die Natur der Naturwissenschaften
ISBN 978-3-8325-4881-0 40.50 EUR

276 Dennis Jaeger: Kognitive Belastung und aufgabenspezifische sowie personenspezifische Einflussfaktoren beim Lösen von Physikaufgaben
ISBN 978-3-8325-4928-2 50.50 EUR

277 Vanessa Fischer: Der Einfluss von Interesse und Motivation auf die Messung von Fach- und Bewertungskompetenz im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4933-6 39.00 EUR

278 René Dohrmann: Professionsbezogene Wirkungen einer Lehr-Lern-Labor-Veranstaltung. *Eine multimethodische Studie zu den professionsbezogenen Wirkungen einer Lehr-Lern-Labor-Blockveranstaltung auf Studierende der Bachelorstudiengänge Lehramt Physik und Grundschulpädagogik (Sachunterricht)*
ISBN 978-3-8325-4958-9 40.00 EUR

279 Meike Bergs: Can We Make Them Use These Strategies? *Fostering Inquiry-Based Science Learning Skills with Physical and Virtual Experimentation Environments*
ISBN 978-3-8325-4962-6 39.50 EUR

280 Marie-Therese Hauerstein: Untersuchung zur Effektivität von Strukturierung und Binnendifferenzierung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Evaluation der Strukturierungshilfe Lernleiter*
ISBN 978-3-8325-4982-4 42.50 EUR

281 Verena Zucker: Erkennen und Beschreiben von formativem Assessment im naturwissenschaftlichen Grundschulunterricht. *Entwicklung eines Instruments zur Erfassung von Teilfähigkeiten der professionellen Wahrnehmung von Lehramtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-4991-6 38.00 EUR

282 Victoria Telser: Erfassung und Förderung experimenteller Kompetenz von Lehrkräften im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4996-1 50.50 EUR

283 Kristine Tschirschky: Entwicklung und Evaluation eines gedächtnisorientierten Aufgabendesigns für Physikaufgaben
ISBN 978-3-8325-5002-8 42.50 EUR

284 Thomas Elert: Course Success in the Undergraduate General Chemistry Lab
ISBN 978-3-8325-5004-2 41.50 EUR

285 Britta Kalthoff: Explizit oder implizit? *Untersuchung der Lernwirksamkeit verschiedener fachmethodischer Instruktionen im Hinblick auf fachmethodische und fachinhaltliche Fähigkeiten von Sachunterrichtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-5013-4 37.50 EUR

286 Thomas Dickmann: Visuelles Modellverständnis und Studienerfolg in der Chemie. *Zwei Seiten einer Medaille*
ISBN 978-3-8325-5016-5 44.00 EUR

287 Markus Sebastian Feser: Physiklehrkräfte korrigieren Schülertexte. *Eine Explorationsstudie zur fachlich-konzeptuellen und sprachlichen Leistungsfeststellung und -beurteilung im Physikunterricht*
ISBN 978-3-8325-5020-2 49.00 EUR

288 Matylda Dudzinska: Lernen mit Beispielaufgaben und Feedback im Physikunterricht der Sekundarstufe 1. *Energieerhaltung zur Lösung von Aufgaben nutzen*
ISBN 978-3-8325-5025-7 47.00 EUR

289 Ines Sonnenschein: Naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsprozesse Studierender im Labor
ISBN 978-3-8325-5033-2 52.00 EUR

290 Florian Simon: Der Einfluss von Betreuung und Betreuenden auf die Wirksamkeit von Schülerlaborbesuchen. *Eine Zusammenhangsanalyse von Betreuungsqualität, Betreuermerkmalen und Schülerlaborzielen sowie Replikationsstudie zur Wirksamkeit von Schülerlaborbesuchen*
ISBN 978-3-8325-5036-3 49.50 EUR

291 Marie-Annette Geyer: Physikalisch-mathematische Darstellungswechsel funktionaler Zusammenhänge. *Das Vorgehen von SchülerInnen der Sekundarstufe 1 und ihre Schwierigkeiten*
ISBN 978-3-8325-5047-9 46.50 EUR

292 Susanne Digel: Messung von Modellierungskompetenz in Physik. *Theoretische Herleitung und empirische Prüfung eines Kompetenzmodells physikspezifischer Modellierungskompetenz*
ISBN 978-3-8325-5055-4 41.00 EUR

293 Sönke Janssen: Angebots-Nutzungs-Prozesse eines Schülerlabors analysieren und gestalten. *Ein design-based research Projekt*
ISBN 978-3-8325-5065-3 57.50 EUR

294 Knut Wille: Der Productive Failure Ansatz als Beitrag zur Weiterentwicklung der Aufgabenkultur
ISBN 978-3-8325-5074-5 49.00 EUR

295 Lisanne Kraeva: Problemlösestrategien von Schülerinnen und Schülern diagnostizieren
ISBN 978-3-8325-5110-0 59.50 EUR

296 Jenny Lorentzen: Entwicklung und Evaluation eines Lernangebots im Lehramtsstudium Chemie zur Förderung von Vernetzungen innerhalb des fachbezogenen Professionswissens
ISBN 978-3-8325-5120-9 39.50 EUR

297 Micha Winkelmann: Lernprozesse in einem Schülerlabor unter Berücksichtigung individueller naturwissenschaftlicher Interessenstrukturen
ISBN 978-3-8325-5147-6 48.50 EUR

298 Carina Wöhlke: Entwicklung und Validierung eines Instruments zur Erfassung der professionellen Unterrichtswahrnehmung angehender Physiklehrkräfte
ISBN 978-3-8325-5149-0 43.00 EUR

299 Thomas Schubatzky: Das Amalgam Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht. *Eine multiperspektivische Betrachtung in Deutschland und Österreich*
ISBN 978-3-8325-5159-9 50.50 EUR

300 Amany Annaggar: A Design Framework for Video Game-Based Gamification Elements to Assess Problem-solving Competence in Chemistry Education
ISBN 978-3-8325-5150-6 52.00 EUR

301 Alexander Engl: Chemie Pur – Unterrichten in der Natur: *Entwicklung und Evaluation eines kontextorientierten Unterrichtskonzepts im Bereich Outdoor Education zur Änderung der Einstellung zu „Chemie und Natur“*
ISBN 978-3-8325-5174-2 59.00 EUR

302 Christin Marie Sajons: Kognitive und motivationale Dynamik in Schülerlaboren. *Kontextualisierung, Problemorientierung und Autonomieunterstützung der didaktischen Struktur analysieren und weiterentwickeln*
ISBN 978-3-8325-5155-1 56.00 EUR

303 Philipp Bitzenbauer: Quantenoptik an Schulen. *Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik*
ISBN 978-3-8325-5123-0 59.00 EUR

304 Malte S. Ubben: Typisierung des Verständnisses mentaler Modelle mittels empirischer Datenerhebung am Beispiel der Quantenphysik
ISBN 978-3-8325-5181-0 43.50 EUR

305 Wiebke Kuske-Janßen: Sprachlicher Umgang mit Formeln von LehrerInnen im Physikunterricht am Beispiel des elektrischen Widerstandes in Klassenstufe 8
ISBN 978-3-8325-5183-4 47.50 EUR

306 Kai Bliesmer: Physik der Küste für außerschulische Lernorte. *Eine Didaktische Rekonstruktion*
ISBN 978-3-8325-5190-2 58.00 EUR

307 Nikola Schild: Eignung von domänenspezifischen Studieneingangsvariablen als Prädiktoren für Studienerfolg im Fach und Lehramt Physik
ISBN 978-3-8325-5226-8 42.00 EUR

308 Daniel Averbeck: Zum Studienerfolg in der Studieneingangsphase des Chemiestudiums. *Der Einfluss kognitiver und affektiv-motivationaler Variablen*
ISBN 978-3-8325-5227-5 51.00 EUR

309 Martina Strübe: Modelle und Experimente im Chemieunterricht. *Eine Videostudie zum fachspezifischen Lehrerwissen und -handeln*
ISBN 978-3-8325-5245-9 45.50 EUR

310 Wolfgang Becker: Auswirkungen unterschiedlicher experimenteller Repräsentationen auf den Kenntnisstand bei Grundschulkindern
ISBN 978-3-8325-5255-8 50.00 EUR

311 Marvin Rost: Modelle als Mittel der Erkenntnisgewinnung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Entwicklung und quantitative Dimensionalitätsanalyse eines Testinstruments aus epistemologischer Perspektive*
ISBN 978-3-8325-5256-5 44.00 EUR

312 Christina Kobl: Förderung und Erfassung der Reflexionskompetenz im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-5259-6 41.00 EUR

313 Ann-Kathrin Beretz: Diagnostische Prozesse von Studierenden des Lehramts – *eine Videostudie in den Fächern Physik und Mathematik*
ISBN 978-3-8325-5288-6 45.00 EUR

314 Judith Breuer: Implementierung fachdidaktischer Innovationen durch das Angebot materialgestützter Unterrichtskonzeptionen. *Fallanalysen zum Nutzungsverhalten von Lehrkräften am Beispiel des Münchener Lehrgangs zur Quantenmechanik*
ISBN 978-3-8325-5293-0 50.50 EUR

315 Michaela Oettle: Modellierung des Fachwissens von Lehrkräften in der Teilchenphysik. *Eine Delphi-Studie*
ISBN 978-3-8325-5305-0 57.50 EUR

316 Volker Brüggemann: Entwicklung und Pilotierung eines adaptiven Multistage-Tests zur Kompetenzerfassung im Bereich naturwissenschaftlichen Denkens
ISBN 978-3-8325-5331-9 40.00 EUR

317 Stefan Müller: Die Vorläufigkeit und soziokulturelle Eingebundenheit naturwissenschaftlicher Erkenntnisse. *Kritische Reflexion, empirische Befunde und fachdidaktische Konsequenzen für die Chemielehrer*innenbildung*
ISBN 978-3-8325-5343-2 63.00 EUR

318 Laurence Müller: Alltagsentscheidungen für den Chemieunterricht erkennen und Entscheidungsprozesse explorativ begleiten
ISBN 978-3-8325-5379-1 59.00 EUR

319 Lars Ehlert: Entwicklung und Evaluation einer Lehrkräftefortbildung zur Planung von selbstgesteuerten Experimenten
ISBN 978-3-8325-5393-71 41.50 EUR

320 Florian Seiler: Entwicklung und Evaluation eines Seminarkonzepts zur Förderung der experimentellen Planungskompetenz von Lehramtsstudierenden im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-5397-5 47.50 EUR

321 Nadine Boele: Entwicklung eines Messinstruments zur Erfassung der professionellen Unterrichtswahrnehmung von (angehenden) Chemielehrkräften hinsichtlich der Lernunterstützung
ISBN 978-3-8325-5402-6 46.50 EUR

322 Franziska Zimmermann: Entwicklung und Evaluation digitalisierungsbezogener Kompetenzen von angehenden Chemielehrkräften
ISBN 978-3-8325-5410-1 49.50 EUR

323 Lars-Frederik Weiß: Der Flipped Classroom in der Physik-Lehre. *Empirische Untersuchungen in Schule und Hochschule*
ISBN 978-3-8325-5418-7 51.00 EUR

324 Tilmann Steinmetz: Kumulatives Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik. *Theorie und Evaluation eines Lehrkonzepts*
ISBN 978-3-8325-5421-7 51.00 EUR

325 Kübra Nur Celik: Entwicklung von chemischem Fachwissen in der Sekundarstufe I. *Validierung einer Learning Progression für die Basiskonzepte „Struktur der Materie“, „Chemische Reaktion“ und „Energie“ im Kompetenzbereich „Umgang mit Fachwissen“*
ISBN 978-3-8325-5431-6 55.00 EUR

326 Matthias Ungermann: Förderung des Verständnisses von Nature of Science und der experimentellen Kompetenz im Schüler*innen-Labor Physik in Abgrenzung zum Regelunterricht
ISBN 978-3-8325-5442-2 55.50 EUR

327 Christoph Hoyer: Multimedial unterstütztes Experimentieren im webbasierten Labor zur Messung, Visualisierung und Analyse des Feldes eines Permanentmagneten
ISBN 978-3-8325-5453-8 45.00 EUR

328 Tobias Schüttler: Schülerlabore als interessefördernde authentische Lernorte für den naturwissenschaftlichen Unterricht nutzen
ISBN 978-3-8325-5454-5 50.50 EUR

329 Christopher Kurth: Die Kompetenz von Studierenden, Schülerschwierigkeiten beim eigenständigen Experimentieren zu diagnostizieren
ISBN 978-3-8325-5457-6 58.50 EUR

330 Dagmar Michna: Inklusiver Anfangsunterricht Chemie *Entwicklung und Evaluation einer Unterrichtseinheit zur Einführung der chemischen Reaktion*
ISBN 978-3-8325-5463-7 49.50 EUR

331 Marco Seiter: Die Bedeutung der Elementarisierung für den Erfolg von Mechanikunterricht in der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-5471-2 66.00 EUR

332 Jörn Hägele: Kompetenzaufbau zum experimentbezogenen Denken und Arbeiten. *Videobasierte Analysen zu Aktivitäten und Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern der gymnasialen Oberstufe bei der Bearbeitung von fachmethodischer Instruktion*
ISBN 978-3-8325-5476-7 56.50 EUR

333 Erik Heine: Wissenschaftliche Kontroversen im Physikunterricht. *Explorationsstudie zum Umgang von Physiklehrkräften und Physiklehramtsstudierenden mit einer wissenschaftlichen Kontroverse am Beispiel der Masse in der Speziellen Relativitätstheorie*
ISBN 978-3-8325-5478-1 48.50 EUR

334 Simon Goertz: Module und Lernzirkel der Plattform FLexKom zur Förderung experimenteller Kompetenzen in der Schulpraxis *Verlauf und Ergebnisse einer Design-Based Research Studie*
ISBN 978-3-8325-5494-1 66.50 EUR

335 Christina Toschka: Lernen mit Modellexperimenten *Empirische Untersuchung der Wahrnehmung und des Denkens in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten*
ISBN 978-3-8325-5495-8 50.00 EUR

336 Alina Behrendt: Chemiebezogene Kompetenzen in der Übergangsphase zwischen dem Sachunterricht der Primarstufe und dem Chemieunterricht der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-5498-9 40.50 EUR

337 Manuel Daiber: Entwicklung eines Lehrkonzepts für eine elementare Quantenmechanik *Formuliert mit In-Out Symbolen*
ISBN 978-3-8325-5507-8 48.50 EUR

338 Felix Pawlak: Das Gemeinsame Experimentieren (an-)leiten *Eine qualitative Studie zum chemiespezifischen Classroom-Management*
ISBN 978-3-8325-5508-5 46.50 EUR

339 Liza Dopatka: Konzeption und Evaluation eines kontextstrukturierten Unterrichtskonzeptes für den Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht
ISBN 978-3-8325-5514-6 69.50 EUR

340 Arne Bewersdorff: Untersuchung der Effektivität zweier Fortbildungsformate zum Experimentieren mit dem Fokus auf das Unterrichtshandeln
ISBN 978-3-8325-5522-1 39.00 EUR

341 Thomas Christoph Münster: Wie diagnostizieren Studierende des Lehramtes physikbezogene Lernprozesse von Schüler*innen? Eine Videostudie zur Mechanik
ISBN 978-3-8325-5534-4 44.50 EUR

342 Ines Komor: Förderung des symbolisch-mathematischen Modellverständnisses in der Physikalischen Chemie
ISBN 978-3-8325-5546-7 46.50 EUR

343 Verena Petermann: Überzeugungen von Lehrkräften zum Lehren und Lernen von Fachinhalten und Fachmethoden und deren Beziehung zu unterrichtsnahem Handeln
ISBN 978-3-8325-5545-0 47.00 EUR

344 Jana Heinze: Einfluss der sprachlichen Konzeption auf die Einschätzung der Qualität instruktionaler Unterrichtserklärungen im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-5545-0 47.00 EUR

345 Jannis Weber: Mathematische Modellbildung und Videoanalyse zum Lernen der Newtonschen Dynamik im Vergleich
ISBN 978-3-8325-5566-5 68.00 EUR

346 Fabian Sterzing: Zur Lernwirksamkeit von Erklärvideos in der Physik *Eine Untersuchung in Abhängigkeit von ihrer fachdidaktischen Qualität und ihrem Einbettungsformat*
ISBN 978-3-8325-5576-4 52.00 EUR

347 Lars Greitemann: Wirkung des Tablet-Einsatzes im Chemieunterricht der Sekundarstufe I unter besonderer Berücksichtigung von Wissensvermittlung und Wissenssicherung
ISBN 978-3-8325-5580-1 50.00 EUR

348 Fabian Poensgen: Diagnose experimenteller Kompetenzen in der laborpraktischen Chemielehrer*innenbildung
ISBN 978-3-8325-5587-0 48.00 EUR

349 William Lindlahr: Virtual-Reality-Experimente *Entwicklung und Evaluation eines Konzepts für den forschend-entwickelnden Physikunterricht mit digitalen Medien*
ISBN 978-3-8325-5595-5 49.00 EUR

350 Bert Schlüter: Teilnahmemotivation und situationales Interesse von Kindern und Eltern im experimentellen Lernsetting KEMIE
ISBN 978-3-8325-5598-6 43.00 EUR

351 Katharina Nave: Charakterisierung situativer mentaler Modellkomponenten in der Chemie und die Bildung von Hypothesen *Eine qualitative Studie zur Operationalisierung mentaler Modell-komponenten für den Fachbereich Chemie*
ISBN 978-3-8325-5599-3 43.00 EUR

352 Anna B. Bauer: Experimentelle Kompetenz Physikstudierender *Entwicklung und erste Erprobung eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells unter Nutzung qualitativer Methoden*
ISBN 978-3-8325-5625-9 47.00 EUR

353 Jan Schröder: Entwicklung eines Performanztests zur Messung der Fähigkeit zur Unterrichtsplanung bei Lehramtsstudierenden im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-5655-9 46.50 EUR

354 Susanne Gerlach: Aspekte einer Fachdidaktik Körperpflege *Ein Beitrag zur Standardentwicklung*
ISBN 978-3-8325-5659-4 45.00 EUR

355 Livia Murer: Diagnose experimenteller Kompetenzen beim praktisch-naturwissenschaftlichen Arbeiten *Vergleich verschiedener Methoden und kognitive Validierung eines Testverfahrens*
ISBN 978-3-8325-5657-0 41.50 EUR

356 Andrea Maria Schmid: Authentische Kontexte für MINT-Lernumgebungen *Eine zweiteilige Interventionsstudie in den Fachdidaktiken Physik und Technik*
ISBN 978-3-8325-5605-1 57.00 EUR

357 Julia Ortmann: Bedeutung und Förderung von Kompetenzen zum naturwissenschaftlichen Denken und Arbeiten in universitären Praktika
ISBN 978-3-8325-5670-9 37.00 EUR

358 Axel-Thilo Prokop: Entwicklung eines Lehr-Lern-Labors zum Thema Radioaktivität *Eine didaktische Rekonstruktion*
ISBN 978-3-8325-5671-6 49.50 EUR

359 Timo Hackemann: Textverständlichkeit sprachlich variierter physikbezogener Sachtexte
ISBN 978-3-8325-5675-4 41.50 EUR

360 Dennis Dietz: Vernetztes Lernen im fächerdifferenzierten und integrierten naturwissenschaftlichen Unterricht aufgezeigt am Basiskonzept Energie *Eine Studie zur Analyse der Wirksamkeit der Konzeption und Implementation eines schulinternen Curriculums für das Unterrichtsfach „Integrierte Naturwissenschaften 7/8“*
ISBN 978-3-8325-5676-1 49.50 EUR

361 Ann-Katrin Krebs: Vielfalt im Physikunterricht *Zur Wirkung von Lehrkräftefortbildungen unter Diversitätsaspekten*
ISBN 978-3-8325-5672-3 65.50 EUR

362 Simon Kaulhausen: Strukturelle Ursachen für Klausurmisserfolg in Allgemeiner Chemie an der Universität
ISBN 978-3-8325-5699-0 37.50 EUR

363 Julia Eckoldt: Den (Sach-)Unterricht öffnen *Selbstkompetenzen und motivationale Orientierungen von Lehrkräften bei der Implementation einer Innovation untersucht am Beispiel des Freien Explorierens und Experimentierens*
ISBN 978-3-8325-5663-1 48.50 EUR

364 Albert Teichrew: Physikalische Modellbildung mit dynamischen Modellen
ISBN 978-3-8325-5710-2 58.50 EUR

365 Sascha Neff: Transfer digitaler Innovationen in die Schulpraxis *Eine explorative Untersuchung zur Förderung der Implementation*
ISBN 978-3-8325-5687-7 59.00 EUR

366 Rahel Schmid: Verständnis von Nature of Science-Aspekten und Umgang mit Fehlern von Schüler*innen der Sekundarstufe I *Am Beispiel von digital-basierten Lernprozessen im informellen Lernsetting Smartfeld*
ISBN 978-3-8325-5722-5 53.50 EUR

367 Dennis Kirstein: Individuelle Bedingungs- und Risikofaktoren für erfolgreiche Lernprozesse mit kooperativen Experimemtieraufgaben im Chemieunterrricht *Eine Untersuchung zum Zusammenhang von Lernvoraussetzungen, Lerntätigkeiten, Schwierigkeiten und Lernerfolg beim Experimentieren in Kleingruppen der Sekundarstufe I*
ISBN 978-3-8325-5729-4 52.50 EUR

368 Frauke Düwel: Argumentationslinien in Lehr-Lernkontexten *Potenziale englischer Fachtexte zur Chromatografie und deren hochschuldidaktische Einbindung*
ISBN 978-3-8325-5731-7 62.50 EUR

369 Fabien Güth: Interessenbasierte Differenzierung mithilfe systematisch variierter Kontextaufgaben im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-5737-9 48.00 EUR

370 Oliver Grewe: Förderung der professionellen Unterrichtswahrnehmung und Selbstwirksamkeitsüberzeugungen hinsichtlich sprachsensibler Maßnahmen im naturwissenschaftlichen Sachunterricht *Konzeption und Evaluation einer video- und praxisbasierten Lehrveranstaltung im Masterstudium*
ISBN 978-3-8325-5738-6 44.50 EUR

371 Anna Nowak: Untersuchung der Qualität von Selbstreflexionstexten zum Physikunterricht *Entwicklung des Reflexionsmodells REIZ*
ISBN 978-3-8325-5739-3 59.00 EUR

Alle erschienenen Bücher können unter der angegebenen ISBN direkt online (http://www.logos-verlag.de) oder telefonisch (030 - 42 85 10 90) beim Logos Verlag Berlin bestellt werden.

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

Die Implementation empirisch erfolgreich evaluierter digitaler Innovationen in den Unterricht gelingt häufig nicht nachhaltig. Als Transferbarrieren werden u. a. Strukturen der Schule, Persönlichkeitsmerkmale von Lehrkräften und Passung von Material zum Unterricht genannt. Die vorliegende Evaluationsstudie untersucht, welche dieser Barrieren sich empirisch bestätigen bzw. inwiefern sie sich durch didaktische Konzepte minimieren lassen.

Die Studie baut auf ein entwickeltes Blended-Learning-Konzept zur Beurteilung der Gewässergüte auf, dessen Fokus auf der digitalen Vor- und Nachbereitung einer Experimentiereinheit liegt. Empirisch wurden in zwei Teilstudien strukturelle und persönliche Voraussetzungen der Lehrkräfte ($N = 75$) sowie motivationale und kognitive Aspekte der Interaktion der Schüler:innen ($N = 146$) mit den Materialien untersucht. Die Datenerhebung erfolgte mittels leitfadengestützter Interviews (Lehrkräfte) sowie einer Fragebogenerhebung zu drei Testzeitpunkten (Schüler:innen).

Die postulierten Transferbarrieren konnten expliziert werden. Hohe Lehrbelastung und fehlende Technik in Schulen können seitens der Lehrkräfte hinderlich sein. Dennoch werden virtuelle Labore von Schüler:innen kognitiv effektiv genutzt und können so den Transfer fördern. Darüber hinaus leisten konkrete Kriterien für implementationsförderliche didaktische Konzepte (z. B. Adaptierbarkeit, Feedback) einen Beitrag zum integrativen curricularen Einsatz digitaler Medien in der naturwissenschaftlichen Bildung.

Logos Verlag Berlin

ISBN 978-3-8325-5687-7