pedocs
Open Access Erziehungswissenschaften

DIPF

Bell, Thorsten

Komplexe Systeme und Strukturprinzipien der Selbstregulation im fächerübergreifenden Unterricht - eine Lernprozessstudie in der SII

Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften : ZfDN 10 (2004), S. 163-181

Quellenangabe/ Reference:
Bell, Thorsten: Komplexe Systeme und Strukturprinzipien der Selbstregulation im fächerübergreifenden Unterricht - eine Lernprozessstudie in der SII - In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften : ZfDN 10 (2004), S. 163-181 - URN: urn:nbn:de:0111-pedocs-316015 - DOI: 10.25656/01:31601

https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0111-pedocs-316015
https://doi.org/10.25656/01:31601

in Kooperation mit / in cooperation with:

IPN
Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik

https://www.leibniz-ipn.de

Nutzungsbedingungen

Gewährt wird ein nicht exklusives, nicht übertragbares, persönliches und beschränktes Recht auf Nutzung dieses Dokuments. Dieses Dokument ist ausschließlich für den persönlichen, nicht-kommerziellen Gebrauch bestimmt. Die Nutzung stellt keine Übertragung des Eigentumsrechts an diesem Dokument dar und gilt vorbehaltlich der folgenden Einschränkungen: Auf sämtlichen Kopien dieses Dokuments müssen alle Urheberrechtshinweise und sonstigen Hinweise auf gesetzlichen Schutz beibehalten werden. Sie dürfen dieses Dokument nicht in irgendeiner Weise abändern, noch dürfen Sie dieses Dokument für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, aufführen, vertreiben oder anderweitig nutzen.
Mit der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Terms of use

We grant a non-exclusive, non-transferable, individual and limited right to using this document.
This document is solely intended for your personal, non-commercial use. Use of this document does not include any transfer of property rights and it is conditional to the following limitations: All of the copies of this documents must retain all copyright information and other information regarding legal protection. You are not allowed to alter this document in any way, to copy it for public or commercial purposes, to exhibit the document in public, to perform, distribute or otherwise use the document in public.

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

Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften; Jg. 10, 2004, S. 163-181

Thorsten Bell

Komplexe Systeme und Strukturprinzipien der Selbstregulation im fächerübergreifenden Unterricht – eine Lernprozessstudie in der SII

Zusammenfassung:
Der vorliegende Artikel beschreibt Zugänge für Schülerinnen und Schüler der S II zum Themenbereich *Komplexe Systeme und Selbstregulation.* Er leistet damit einen Beitrag zu einer didaktischen Rekonstruktion der nichtlinearen Dynamik. Anhand einer fächerübergreifenden Sequenz von Beispielsystemen entdecken Schüler durch grafische Konstruktion die Strukturprinzipien Rückkopplung und Fließgleichgewicht und lernen, sie zur qualitativen, analogiebasierten Erklärung von Prozessen der Selbstregulation einzusetzen. Eine dreiteilige Lernprozessstudie wurde in Form von Lerninterviews mit insgesamt 19 Zweiergruppen von Schülerinnen und Schülern aus Physik-Grundkursen des 11. und 12. Jahrgangs durchgeführt. Die Studie erbrachte detaillierte Einblicke in Schülerlernprozesse. Die qualitative Auswertung der transkribierten Lerninterviews und der Schülerzeichnungen belegt zum einen, wie die Schülerlernprozesse erfolgreich in zyklische Phasen selbstständiger grafischer und mentaler Konstruktion und geleiteter Reflexion gegliedert werden können. Des Weiteren wird deutlich, dass sich die Lernprozesse auf mehreren Ebenen abspielen und dass die Abstraktion von Anwendungsregeln für systemische Prinzipien den bereichüberschreitenden Transfer erleichtert.

Abstract:
This article describes accesses to the subject of *complex systems and self-regulation* for students at upper secondary level. Following an interdisciplinary sequence of exemplary systems, students discover and construct the structural principles of feedback and dynamic equilibrium by drawing sketches. They learn to use these principles for qualitative, analogy-based explanations of processes of self-regulation. In order to start an educational reconstruction of this field, a learning process study consisting of three parts was carried out with 19 pairs of students who were enrolled in basic physics courses in either grade 11 or 12. The detailed qualitative analysis of learning interviews and students' drawings shows how to organise students' learning processes in alternating phases of self-guided exploration of model systems and stimulated reflection. The usefulness of self-guided graphical construction for the analysis of complex systems, and the positive effects of meta-cognitive processes on cross-domain transfer are demonstrated.

1 Strukturbildung in komplexen Systemen und systemisches Denken

Die Welt bietet dem Betrachter eine große Vielfalt verschiedener Formen, Strukturen und Prozesse, die in komplexen Systemen der belebten sowie der unbelebten Sphäre entstehen. Man denke an Formationen von Wolken am Himmel, an Flussdeltas, an die Anordnung von Sandrippeln im Ebbegebiet und von Sanddünen in der Wüste (Schlichting & Nordmeier, 1996; 2000). Und erst recht sind und bilden die Lebewesen, insbesondere die Menschen, komplexe Systeme, die Gegenstand biologischer, ökologischer, soziologischer und ökonomischer Theoriebildung werden. Die Auseinandersetzung mit komplexen Strukturen ist zu einem notwendigen Bestandteil unserer Gesellschaft geworden. Sie fordert von Menschen die Kompetenz, dynamische Modelle der Problemzusammenhänge zu bilden, zu analysieren und für Prognosen zu nutzen. Phänomene in komplexen Systemen unterliegen Prozessen des Werdens und Vergehens, die sich auf sehr verschiedenen Zeitskalen abspielen können. Des Weiteren sind vielfach Mechanismen der Selbststabilisierung zu erkennen, die über eine

gewisse Zeitspanne der Tendenz zum Vergehen durch ständigen Neuaufbau begegnen. Steter Wandel sichert Stabilität, und Dynamik wird zu einem wesentlichen Bestandteil einer angemessenen Beschreibung komplexer Systeme. Der vorliegende Artikel beschreibt eine Perspektive für möglichst selbstständiges Lernen über komplexe Zusammenhänge.

Fragen nach dem Zustandekommen von Formen- und Prozessvielfalt behandelt seit einiger Zeit der disziplinen-übergreifende Forschungszweig, der mit der Bezeichnung *Selbstorganisation komplexer Systeme* umrissen wird und wesentlich auf Konzepte der nichtlinearen Dynamik zurückgreift. Inzwischen hat sich aus den Anfängen ein disziplinenübergreifendes Paradigma entwickelt, das Strukturbildungsphänomene nach einheitlichen, strukturwissenschaftlichen Prinzipien zu beschreiben sucht. Die neue Betrachtungsweise ist zu charakterisieren als *dynamisches Denken* (Denken in Zeitgestalten), *systemisches Denken* und *strukturorientiertes Denken*. Den *Strukturprinzipien* des energetischen Antriebs (Strom von Energie und ggf. Materie durch das System) und der Rückkopplung wird in vielen fachwissenschaftlichen und didaktischen Ansätzen ein großes Erklärungspotential für Strukturbildung und Selbstorganisation zuerkannt (Jantsch, 1992; Schlichting, 1993; Euler, 1995a; 1995b; 2000).

Für das Bildungssystem stellt sich die Frage, an welcher Stelle der naturwissenschaftlichen Ausbildung tragende Inhalte und Konzepte aus diesem Forschungszweig aufgenommen werden sollten. Dabei haben der Schulbereich und die ihn betreffende didaktische Forschung immer noch einen großen Nachholbedarf. Bis heute gibt es wenige erprobte Unterrichtskonzeptionen in den Bereichen der nichtlinearen Dynamik und insbesondere der Strukturbildung sowie komplexer Systeme (Komorek, 1998; Korneck, 2001). Demgegenüber messen Experten der nichtlinearen Dynamik einen hohen Bildungswert zu (Komorek, Wendorff et al., 2002), und sehr ähnlich lässt sich für komplexe Systeme und Strukturbildung argumentieren: Diese Bereiche liefern einen wichtigen Beitrag zu einem zeitgemäßen Weltbild. Ihre Konzepte haben und behalten Bedeutung in verschiedenen Disziplinen, sowie Anwendungs- und Berufsfeldern und können Beiträge zur Lösung von Schlüsselproblemen in Gesellschaft und Umwelt leisten. Ferner wird die Förderung von Interesse und Motivation auf Schülerseite durch Zugang zu realitätsnahen Phänomenen vermutet.

2 Einfache Modellsysteme verdeutlichen Strukturprinzipien

Eine wesentliche Aufgabe der Naturwissenschaftsdidaktik besteht darin, einfache Modellsysteme (Beispiele) und Experimente zu beschreiben, die Lernenden die neuen, grundlegenden Strukturen eines Inhaltsbereichs vermitteln. Was ist „das Neue" an komplexen Systemen, das Formenvielfalt hervorbringen kann? Schon die große Anzahl von Komponenten und Relationen vieler strukturbildender Systeme scheint unauslotbare Entwicklungsmöglichkeiten zu eröffnen. Aus dieser quantitativen Fülle schält sich bei genauerer Betrachtung die Elementarstruktur der zirkulären Wirkungsverknüpfung, also der *Rückkopplung* heraus (Ebeling & Feistel, 1994). Sie ermöglicht es einem System durch die wiederholte bzw. kontinuierliche Rückeinspeisung des aktuellen Systemzustands in den weiteren Prozessablauf (Rückfaltung), komplexes Verhalten hervorzubringen (lat. *complexus* = zusammengefaltet). Die Rückeinspeisung kann entweder zur Selbstverstärkung eines Prozesses führen (positive Rückkopplung, greift in neue Parameterbereiche aus) oder auch zur Selbstregulation (negative Rückkopplung, Stabilisierung). Dieses Zyklusprinzip ist in einer vollständigeren Sicht durch das linear-einsinnige Prinzip des energetischen und eventuell stofflichen *Durchstroms* zu ergänzen (Ebeling & Feistel, 1994). Er vermittelt dem zyklischen Systemprozess einen Antrieb und wird seinerseits durch diesen gesteuert. Im Falle der stabilen Selbstregulation erreicht der Durchstrom ein *Fließgleichgewicht*.

Die didaktische Konzeption der vorliegenden Untersuchung will Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe II qualitative Zugänge zum Bereich der Strukturbildung eröffnen. Der Ent-

wurf vollzieht in der vorliegenden Form eine didaktisch begründete Einschränkung auf den Bereich der *Selbstregulation*. Selbstregulierende Systeme einfacher Art realisieren in Form des Zyklusprinzips, der systemischen Offenheit und des resultierenden dynamischen Verhaltens *Komplexität auf einem elementaren Niveau*. Anhand einer Serie selbstregulierender Modellsysteme sollen Schülerinnen und Schüler die Prinzipien der Rückkopplung und des Fließgleichgewichts entdecken, sie grafisch konstruieren, zur Erklärung neuer, immer unanschaulicherer und komplexerer Beispielsysteme einsetzen lernen und ein dynamisches und systemisches Denken entwickeln.

Den Anfang der Modellsystemserie bildet der als Spielzeug bekannte *Pickspecht* (Abbildung 1), dessen Eignung als didaktisches Anschauungsobjekt von einigen Autoren erwartet, jedoch noch nicht empirisch untersucht worden ist. Seine Funktionsweise sei hier exemplarisch und in geraffter Form beschrieben. Weitere Details findet man in Schlichting (1988) und Bell (2003).

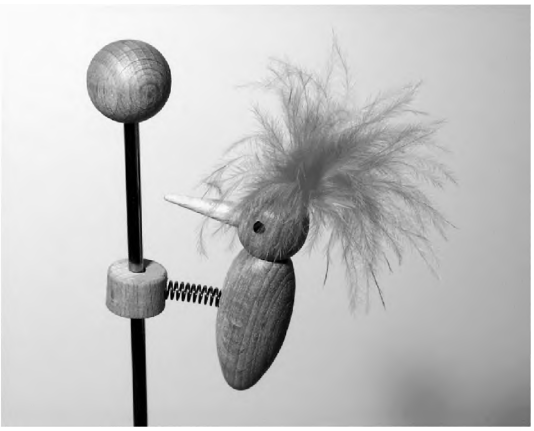

Abbildung 1: Der Spielzeugpickspecht in einer käuflich erhältlichen Ausführung.

Aus der Ruhelage angestoßen, schwingt sich der Pickspecht durch Selbstregulation in einen regelmäßigen Bewegungszyklus ein (Abbildung 6), der als dynamische Ordnung begriffen werden kann und in seiner ruckartigen, doch periodischen Schwing- und Fallbewegung sichtbar und hörbar wird. Dabei gibt das Schwingen periodisch das Fallen frei, und das Fallen regt das Schwingen neuerlich an (Rückkopplung auf mechanischer Ebene der Bewegungsphasen und deren Auslöser). Auch auf energetischer Ebene kann der Zyklus beschrieben werden, nämlich als periodische Umwandlung von Spannenergie in kinetische Energie der Schwingung. Dieser Zyklus wird durch Fallen und erneutes Verkanten aus dem Vorrat an potentieller Energie gespeist. Im eingeschwungenen Zustand befindet sich der Pickspecht in einem energetischen Fließgleichgewicht, bei dem in jeder Periode Reibungsverluste durch neuerliche Energiezufuhr ausgeglichen werden. Diese Struktur des dynamischen Durchflusses bzw. des (energetisch) offenen Systems kann in einer Behälterskizze dargestellt werden, die auf einer Flüssigkeitsanalogie aufbaut (Abbildung 2). Der beschriebene Wirkzyklus sorgt wie folgt für die Stabilisierung der Pickspechtschwingung: Eine zu große Schwingungsenergie (große Amplitude) führt zu einer zu kurzen Entkantungs- und Fallzeit des Spechts, also zu einer geringeren Energieaufnahme. Gleichzeitig finden alle Reibungsereignisse heftiger statt, was höhere Energieverluste bedeutet. Das Umgekehrte gilt für eine zu kleine Schwingungsenergie. Diese negativen Rückkopplungen lassen sich als zwei Schleifen in einer Regelkreisskizze darstellen, wie in Abbildung 3 gezeigt. Die Regelkreisstruktur führt also zur Bildung und Stabilisierung eines dynamischen Ordnungszustands.

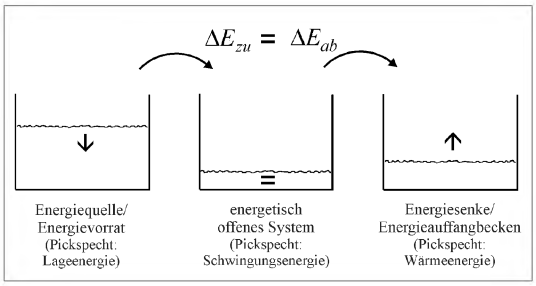

Abbildung 2: Grafisches Schema zur Veranschaulichung des energetischen Fließgleichgewichts beim Pickspecht im stationären Schwingungszustand.

Das Ziel der hier beschriebenen Studie besteht darin herauszufinden, in welcher Weise es

Schülerinnen und Schülern der S II gelingt, die Konzepte der dynamischen Ordnung (regelmäßiger Ablauf), des Fließgleichgewichts (dynamisches Gleichgewicht), des offenen Systems, der Selbstregulation, der Rückkopplung (des Regelkreises im Speziellen) durch Untersuchung der Modellsysteme zu bilden. Nach erster Herausarbeitung und Skizzierung dieser Prinzipien anhand des Pickspechts (MS 1) werden den Lernenden nacheinander weitere Modellsysteme (MS 2 bis 7, vgl. Überblick in Tabelle 2) vorgestellt. Ziel ist, dass die Schüler lernen, diese immer selbstständiger unter Rückgriff auf die neuen Konzepte und Methoden (Skizzen!) und in Analogie zu schon behandelten Systemen zu erkunden und zu erklären. An dieser Stelle sollen die restlichen Modellsysteme nur knapp vorgestellt werden (zu weiteren Details siehe Bell, 2003).

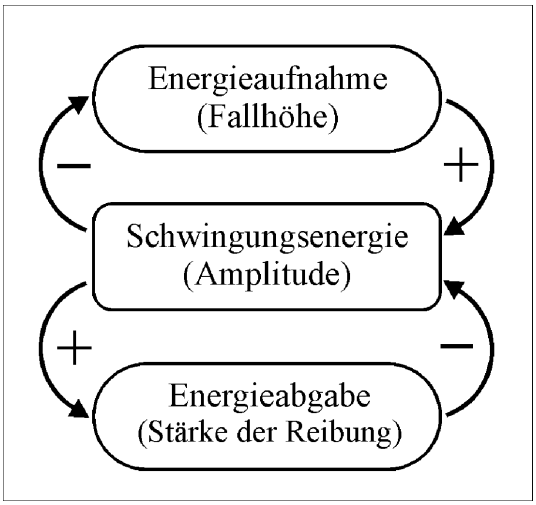

Abbildung 3: Minimaldarstellung der negativen Rückkopplungen beim Pickspecht (Regelkreis mit zwei Maschen).

Das zweite Modellsystem (MS 2) ist ein *Reibungspendel*, das aus einem Metallring und einer daran hängenden Pendelstange besteht (Abbildung 4). Der Ring wird durch eine gleichmäßig laufende Metallwalze zu einer regelmäßigen Reibungsschwingung angetrieben (energetisches Fließgleichgewicht von Antrieb und Reibungsverlust). Dieses System kann aus der Ruhelage auf eine konstante Amplitude einschwingen und stabilisiert seinen Schwingungszustand durch Zunahme der Reibung im Falle größerer Amplitude (Regelkreisstruktur). Sein Antriebs- und Regulationsmechanismus tauchen in analoger Form bei der kontinuierlich gestrichenen *Geigensaite* auf, die als drittes Modellsystem (MS 3) untersucht wird und einen Wechsel in den Bereich der Akustik bzw. – mit Alltagsbrille betrachtet – in den Bereich der Musikinstrumente vollzieht. An vierter Stelle wird dann das Einschwing- und Stabilisierungsverhalten eines *Orgelpfeifentons* behandelt (MS 4). Aus der Biologie folgt das Beispiel der *Blutzuckerregulation* beim Menschen (Fließgleichgewichte der Energie sowie von Stoffen), bei dem die Schüler natürlich nicht alle Regulationsstrukturen, aber doch einen recht komplexen Ausschnitt behandeln können (MS 5). Noch weiter gehende Abstraktion leisten die Lernenden beim sechsten Beispiel: Es handelt sich um einen eigenhändig auszuführenden *Wurfversuch* (MS 6), bei dem die Auge-Arm-Koordination sich nach Aufsetzen einer Prismenbrille neu adaptiert (motorisches Lernen, Lindner-Effland, 1997). Den Abschluss stellen Überlegungen zum *Preisniveau* dar, das sich in der Marktwirtschaft im Wechselspiel von Angebot und Nachfrage herausbildet (MS 7, Ökonomie).

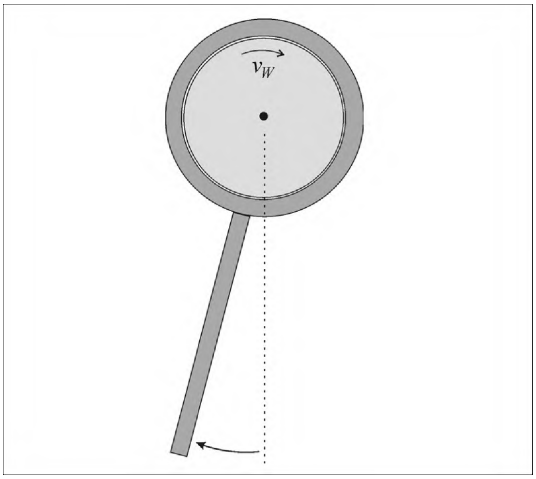

Abbildung 4: Reibungspendel (schematisch): drehende Walze hellgrau (mit Umfangsgeschwindigkeit vw); Ring und Pendelstange dunkelgrau.

In einer solchen fächerübergreifenden Lernsequenz könnte man natürlich auch manche andere selbstregulierende Modellsysteme unterbringen sowie weitere Disziplinen, z.B. die *Chemie* (Reaktionsgleichgewichte), mit einflechten. Es ist jedoch auf anfängliche Anschaulichkeit sowie auf einen langsamen Anstieg des Abstraktionsniveaus bzw. leistbare Transferschritte zu achten. Viele weitere Modellsysteme wurden mit den Schülern im Verlaufe der Pilotstudien sowie am Rande der Hauptstudie zur Sprache gebracht (s.u.).

3 Entdeckendes Lernen und Interviewmethode

In einer moderat-konstruktivistischen Sicht besteht Lernen in der Weiterentwicklung *eigener Operationen* (des Handelns und Denkens) durch aktive Wiederholung, bis das Ergebnis den individuell erkannten Zielen entspricht (Gerstenmaier & Mandl, 1995). Nach dieser Position sollten Schülerinnen und Schüler besonders nachhaltig lernen, wenn sie zu interessanten Problemstellungen eigene Ideen entwickeln und diese überprüfen und verbessern können. Dementsprechend wurde in der vorliegenden Studie eine Konzeption des entdeckenden Lernens verwendet. Um in dieser frühen Phase der didaktischen Rekonstruktion in einem wenig beforschten Bereich möglichst viele Details der Schülerlernprozesse zu dokumentieren, wurde für alle Studienteile (2 Pilotstudien, 1 Hauptstudie, s.u.) die Form eines modifizierten Teaching Experiments gewählt (Alexopoulou & Driver, 1996; Katu & Lunetta, 1993). Je *zwei* Teilnehmer(innen) arbeiteten in Lerninterviews zusammen, entwickelten gemeinsam Ideen und konstruierten Beschreibungen der Modellsysteme. Lehr-Lernarrangements dieser Art weisen die Charakteristika von Mikrounterricht auf (vgl. Komorek & Duit, 2004). Eine wesentliche Funktion hatte die *gemeinschaftliche Konstruktion* von Zeichnungen zur Erklärung der Modellsysteme.

Hier sind zunächst die drei in Abschnitt 2 eingeführten grafischen Darstellungen (Abbildungen 6, 2, 3) gemeint, auf Anregung der Probanden kamen aber auch andere Typen zustande (Bell, 2004). Vor Durchführung der Lerninterviews wurden Interviewleitfäden entwickelt, die weiten Raum für selbstständiges Lernen bieten. In dieser methodischen Konzeption wurde den Lernenden das jeweilige Modellsystem zunächst zur eigenen, vorgabenfreien Erkundung vorgesetzt und im Folgenden alle Äußerungen der Schüler aufgegriffen und soweit wie möglich verfolgt. Wenn die Schüler in eine Sackgasse liefen, sorgten zunächst sehr offene, bei Bedarf immer konkretere Fragen des Interviewleiters (des Verfassers) für eine Fokussierung auf bestimmte Eigenschaften und Prozesse der Modellsysteme. Auf diese Weise wurde detailliert erhoben, welche Ansätze Schülerinnen und Schüler von selbst einbringen konnten und welche Hilfen unerlässlich waren. Dieser sehr offene Einstieg mit anschließender Fokussierung wurde bei jedem der sieben Modellsysteme wiederholt, um zu erfassen, ob sich die spontanen Zugänge der Probanden veränderten. Eine wesentliche Aufgabe bestand für den Versuchsleiter darin, sowohl im Interview als auch durch Fragebögen (siehe Abschnitte 4 und 5) bei den Lernenden immer wieder Prozesse der Reflexion und Abstraktion anzuregen (siehe Ergebnisteil Abschnitt 6.1).

4 Formaler Aufbau der Studie

Die vorliegende Untersuchung vollzieht die ersten Schritte eines didaktischen Rekonstruktionsprozesses (Kattmann, Duit et al., 1997). Im Wechsel mit Schritten der Sachstrukturanalyse wurden insgesamt drei aufeinander aufbauende empirische Studien durchgeführt: zwei Pilotstudien und eine Hauptstudie. In jeder Untersuchung erhielten Zweiergruppen von Schülerinnen und Schülern, die einen Physik-Grundkurs in der S II besuchten, in Lerninterviews (s.o.) die Aufgabe, selbstregulierende Modellsysteme zu erkunden. Ein Spektrum von Beispielsystemen aus verschiedenen Bereichen wurde dabei auf Eignung untersucht. Einige Details der Untersuchungen sowie deren Zielpunkte sind in Tabelle 1 dargestellt.

Die beiden Pilotstudien erbrachten – in groben Umrissen – folgende Ergebnisse: Es zeigte sich, dass Lernende zumeist mit einer statischen Sichtweise starten und in ihren Erklärungen

Studie	Jahrgang	Gruppenanzahl	Umfang d. Interviewsitzungen	Zielpunkte der Studie
Pilotstudie 1	12	6	1 Sitzung à 60-70 min	Konzeptuelle Ausgangssituation; generelle Machbarkeit; didaktisches Schema und Hilfen
Pilotstudie 2	11	5	1 Sitzung à 70-80 min	Test versch. Modellsysteme / Sequenzen und Erhebungsinstrumente; Förderung der Abstraktion (Strukturwissenschaft, Metakognition)
Hauptstudie	12	8	5-6 Sitzungen à 90-120 min	Vorher-Nachher-Vergleich; konzeptuelle Entwicklung auf versch. Ebenen, Analogiebildung, graf. Konstruktion, Lernwege, Interesse

Tabelle 1: Übersicht über die Anlage und die wesentlichen Zielpunkte der drei durchgeführten Studienteile.

Detailaspekte herausgreifen. Vor allem der Pickspecht ermöglichte den Schülern jedoch, Ansätze einer dynamischen, systemischen Sichtweise zu entwickeln und wurde daher als Einstiegsbeispiel der Hauptstudie gewählt. In Pilotstudie 1 wurde für den Pickspecht eine Einteilung von Lernphasen und Hilfestellungen erprobt und für die Hauptstudie weiterentwickelt (fünfschrittiges didaktisches Schema in Abschnitt 6.1). In Pilotstudie 2 wurden überbrückbare Transferdistanzen zwischen Modellsystemen identifiziert und verschiedene Testinstrumente erprobt, v.a. die Vergleichslisten (siehe Abschnitt 5.2). Des Weiteren zeigte sich, dass zur Generierung abstrakten Wissens auf Ebene der Strukturwissenschaft und auf Ebene der Metakognition bei den Lernenden deutlich und wiederholt Reflexionsprozesse angeregt werden müssen. Es ergaben sich Hinweise, wann und wie die Anregung geschehen kann und dass *eigene grafische Konstruktionen* den Lernprozess deutlich fördern. Diese Erkenntnisse wurden zu einem wesentlichen Bestandteil der Lehr-Lernkonzeption.

Ausgehend von den Ergebnissen der Pilotstudien, wurde die Hauptstudie konzipiert und mit acht Zweiergruppen (G1 bis G8, insgesamt sechs weiblichen und zehn männlichen Probanden) durchgeführt. Für eine einzelne Schülergruppe bestand der Hauptteil in fünf bis sechs Interviewsitzungen von je 1½ bis 2 Stunden Dauer sowie in der zwischenzeitlichen Bearbeitung von Fragebögen und Vergleichslisten (vgl. Tabelle 2). Eine Nachuntersuchung wurde so durchgeführt, dass sich für jeden einzelnen Probanden ein Abstand von gut fünf Monaten zur letzten Sitzung des Hauptteils ergab. Die Funktion und die Zielrichtungen der einzelnen Inhalts- und Erhebungsteile der Hauptuntersuchung wird im folgenden Abschnitt vor dem Hintergrund lerntheoretischer Überlegungen näher erläutert.

5 Lerntheoretischer Hintergrund und Analyserichtungen

5.1 Darstellung des Konzeptentwicklungsmodells

Die Schülerlernprozesse werden als ein *Lernen auf verschiedenen Ebenen* modelliert, vor allem auf Ebene der Konzepte (in verschiedener Repräsentation und Abstraktion) sowie auf Ebene des Metawissens: Die Aufgabe der Schüler besteht darin, die *Prozesse* der Modellsysteme durch möglichst selbstständige Explorationen nachzuvollziehen, aus diesen Abläufen *Strukturen* zu abstrahieren und dadurch strukturwissenschaftliche Konzepte zu bilden. Diese sind im Rahmen der vorliegenden Studie die Konzepte Ordnung, Fließgleichgewicht, offenes System, Rückkopplung (Regelkreis), Selbstregulierung. Insbesondere wird erwartet, dass die Schüler *dynamische* Ausprägungen dieser Konzepte bilden. Durch Behandlung mehrerer Modellsysteme sollen die Lernenden *per Analogie* dahin gelangen, diese Strukturbegriffe abstrakt zu nutzen, also die Modellsysteme strukturwissenschaftlich zu beschreiben (abstrahierte Konzepte der Strukturwissenschaft). In einem weiteren Abstraktionsschritt sollen Schüler lernen, sich

Fach / Disziplin	Inhaltliche Teile (Lerninterviews)	Zusätzliche Erhebungen
Voruntersuchungen:		Fragebogen 1
		Räuber-Beute-Syst.
		Concept Map
Modellsystemsequenz:		
Physik	MS 1: Pickspecht, Teil 1	
		Fragebogen 2
	MS 1: Pickspecht, Teil 2	
		Vergleichsliste L 1
	MS 2: Reibungsoszillator	
		Fragebogen 3
Musik-instrumente	MS 3: gestrichene Geigensaite	
		Vergleichsliste L 2
	MS 4: Orgelpfeife	
		Fragebogen 4
Biologie	MS 5: Blutzuckerspiegel	
		Vergleichsliste L 3
	MS 6: Zielwurf mit Prismenbrille	
		Fragebogen 5
Ökonomie	MS 7: Preisniveau	
		Vergleichsliste L 4
		Abschlussinterview
		Fragebogen 6
Nachuntersuchung nach etwa 5 Monaten:		Fragebogen 7
		Nachinterview

Tabelle 2: Der Aufbau der Hauptstudie: inhaltliche Teile (Hauptmodellsysteme MS 1-7) und zusätzliche Erhebungsteile in alternierender Folge (von oben nach unten).

das Erklärungsschema ihrer vorangegangenen Argumentationen bewusst zu machen und diese Argumentationen gezielt einzusetzen (metakognitive Prozesse). Letztgenannte Lernprozesse sollten geeignet sein, Veränderungen in den mentalen Strukturen herbeizuführen, die gelegentlich als *Rahmenvorstellungen* bezeichnet werden. So unterscheiden Vosniadou und Ioannides (1998) Rahmentheorien (*framework theories*) ontologischer und epistem(olog)ischer Art. Solche Rahmen legen fest, welche Arten von Objekten in Explorationssituationen überhaupt wahrgenommen werden und welche Erklärungsmuster zur Anwendung gelangen.

Die Bewältigung der genannten Lernstufen wird mit Hilfe einer *Struktur-Prozess-Konzeption* angestrebt: Aus prozesshaftem Nachvollziehen von Abläufen werden Strukturbegriffe abstrahiert und als neue, „verdinglichte Objekte" Prozessen auf abstrakterer Ebene zugeführt. Im Bereich der Mathematikdidaktik beschreibt A. Sfard die Bildung mathematischer Konzepte als einen vielstufigen Verdinglichungsprozess (Sfard, 1991; 1994). Nach anfänglich rein prozesshaftem Operieren (Nachvollziehen von Rechenvorschriften) kommt es – so Sfard

– zunächst zu einer Phase der *Kondensation* (*condensation*), in der die abstrakte Konzeptnutzung zaghaft beginnt, jedoch noch häufige Rückversicherung auf Ebene des zugrunde liegenden Prozesses erfolgt. Anschließend folgt die *Verdinglichung* (*reification*) der Konzepte und ihre Nutzung in Prozessen auf höherer Ebene (Beispiele in Sfard, 1991). Dabei ist zu beachten, dass es bei den „verdinglichten Objekten" inhaltlich um *abstrakte* Begriffe, Konzepte, Operationen oder Strukturen geht, die vom Lernenden nun wie mentale Objekte behandelt werden können.

Nach den Ergebnissen der Pilotstudien wurde diese *duale Konzeption* in den Folgestudien, v.a. in der Hauptstudie stark akzentuiert, d.h. der Lernprozess bewusst als zyklischer Wechsel von Exploration und Abstraktion angelegt (vgl. Tabelle 2), ähnlich der Konzeption *konstruktivistischer Lernzyklen* (Driver, 1989; Lawson, Abraham et al., 1989). In Anpassung an diese Lernprozessstruktur wurde ein zyklisches *Konzeptentwicklungsmodell* erstellt (Abbildung 5), in der Hauptstudie auf seine Eignung getestet und anhand der Studienergebnisse in einigen Teilen genauer spezifiziert (siehe Abschnitt 6). Das Modell beschreibt die Entwicklung der strukturwissenschaftlichen Konzepte dieser Lernsequenz (s.o.). Es greift zurück auf den für Naturwissenschaften formulierten Konzeptbegriff der *coordination class* nach diSessa und Sherin (1998). Danach bestehen (naturwissenschaftliche) Konzepte aus zwei strukturellen Komponenten, nämlich aus Informationsgewinnungsstrategien (im Folgenden abgekürzt mit IGS, auch bezeichnet als „Suchstrategien", „Wahrnehmungsstrategien", engl. *readout strategies*) und einem Netz von Regeln verschiedenster Art (*causal net*). Beide Komponenten gemeinsam erfüllen im Verarbeiten von (externen) Informationen zwei Koordinationsfunktionen: Sie erbringen eine Integrationsleistung und eine Invarianzleistung, indem Regeln auf ausgelesene Informationsbrocken

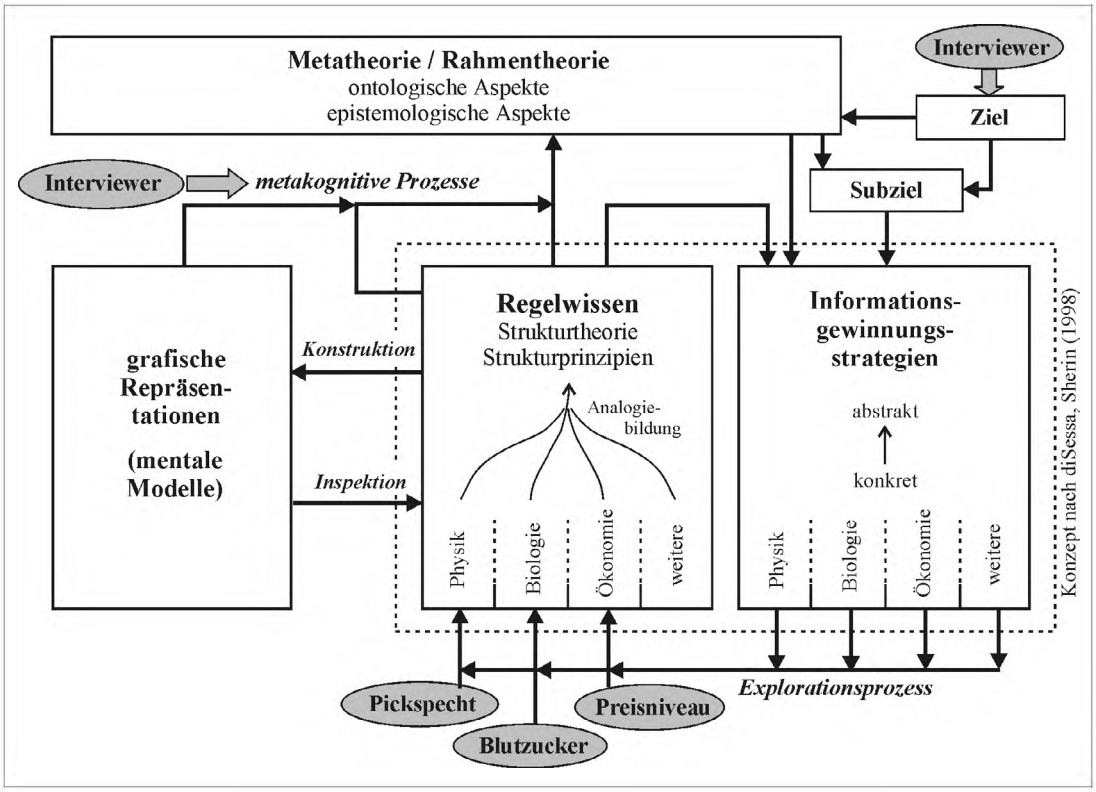

Abbildung 5: Das Konzeptentwicklungsmodell der Untersuchung.

der Umgebung angewandt werden, um sie zu verknüpfen und möglichst auf bekannte Fälle zurückzuführen. Konzepte können sich bei dieser Arbeit entweder bewähren und damit stabilisieren, oder es wird eine Modifikation in mindestens einer Komponente notwendig. So können in einer „Schule des Sehens" beispielsweise die Informationsgewinnungsstrategien weiterentwickelt werden, sodass bestimmte, in einer Situation gegebene Merkmale überhaupt erst bzw. schneller entdeckt werden. DiSessa und Sherin (1998) vermuten, dass Konzeptentwicklung als *Koevolution* der beiden Komponenten stattfindet. Unter anderem diese Hypothese wurde in der vorliegenden Untersuchung in Form von Fallstudien auf die Probe gestellt.

Die Darstellung des Konzeptentwicklungsmodells in Abbildung 5 zeigt die koevolutive Entwicklung mentaler Strukturen (Blöcke) im Verlaufe mentaler Prozesse (Pfeile). Im Kern sieht man die beiden Konzeptkomponenten des *Regelwissens* und der *Informationsgewinnungsstrategien* nach diSessa und Sherin (1998). Beide Komponenten sollen sich durch Ableitung aus schon behandelten Modellsystemen und Anwendung auf neue Modellsysteme zyklisch weiterentwickeln. Die *Analogiebildung* fördert die Abstraktion von Regelwissen, also die Weiterentwicklung von sehr konkreten Konzepten hin zu strukturwissenschaftlichen Ausprägungen (innerhalb des Blocks angedeutet). Über den Konzepten (Ordnung, Gleichgewicht, Rückkopplung, Selbstregulation, ...) sind die *Rahmentheorien* dargestellt. Veränderungen auf dieser Ebene ergeben sich durch Einsatz weiterentwickelter Konzepte, werden aber auch durch *metakognitive Prozesse* gefördert und haben wiederum Rückwirkungen auf den Einsatz von Informationsgewinnungsstrategien. Das Modell berücksichtigt des Weiteren die grafischen Darstellungen, welche die Konzepte in einem anderen Format repräsentieren und mit dem propositionalen Regelwissen in Wechselwirkung stehen (ähnliche Konzeption wie in Schnotz & Bannert, 1999).

5.2 Erläuterungen zur Erhebungsmethode

Tabelle 2 deutete bereits ein *zyklisches Design* der Hauptstudie an, das dazu diente, den zyklischen Lernprozess zum einen anzuregen und zum anderen detailliert zu analysieren. Zu Fragebogenantworten erfolgten bei Bedarf Nachfragen im jeweils anschließenden Interview. Anfangs wurde durch drei verschiedene Tests die konzeptuelle Ausgangssituation der Probanden erhoben: Fragebogen 1 fragte nach Schülerinteressen sowie Vorstellungen zu den Begriffen „Ordnung", „Gleichgewicht" und „Rückkopplung". Durch selbstständige Erklärung eines Räuber-Beute-Systems zeigten sich Gleichgewichtsbegriffe der Lernenden in aktiver Anwendung. Das Concept Mapping erforschte schließlich, inwieweit strukturwissenschaftliche Begriffe überhaupt schon bekannt waren und ob sie mit üblichen Begriffen der Mechanik in Beziehung gesetzt werden konnten. Die Modellsystemexplorationen im Interviewgespräch dienten der Anwendung und gleichzeitigen Erhebung von Schüler-IGS sowie ihres Regelwissens in Anwendung. Ab dem zweiten Modellsystem wurde erhoben, ob bzw. auf welchem Wege die Lernenden die strukturellen Analogien mit vorab behandelten Modellsystemen entdeckten (spontane Analogiebildung). Die Fragebögen ab FB 2 hatten vor allem die Aufgabe, die Lernenden im Rückblick auf schon behandelte Modellsysteme zur Reflexion und Abstraktion von Ergebnissen anzuregen. FB 2 untersuchte, ob die Schüler *von sich aus* (ohne Erläuterung des Interviewleiters) strukturwissenschaftliche Begriffe mit den Modellsystemen verbinden konnten. FB 3 erkundete *nach* erfolgter Einführung der Begriffe im Interview, inwieweit diese wiedergegeben werden konnten (Regelwissen). FB 2 bis FB 4 fragten jeweils nach den „wichtigsten Ergebnissen" der vorangegangenen Interviewsitzungen sowie nach den „Prinzipien" der behandelten Modellsysteme und induzierten bei den Probanden somit Prozesse der Analogiebildung. Freiere Analogiebildung wurde durch Fragen nach „eigenen ähnlichen Beispielen" in den Fragebögen 2, 3, 6 und 7 angeregt. Demselben Ziel dienten die Vergleichslisten L 1 bis L 4. Hier sollten die Schüler die schon

behandelten Modellsysteme mit einer Liste von 9 bis 14 Systemen (Vorgängen) verschiedener Bereiche vergleichen, wie z.B. mit einem Fallschirmspringer, mit einem Klick-Klack, mit Aktienkursen, mit der Körpertemperatur, mit dem Balancieren eines Stabes usw. Auch hier erfolgte jeweils eine Nachbesprechung, um falsche Interpretationen der schriftlichen Schüleräußerungen zu vermeiden. Ab FB 3 – dieser Zeitpunkt schien nach den Erfahrungen der Pilotstudien günstig – fand zudem eine Verschiebung des Fokus statt, um metakognitive Prozesse in Gang zu setzen: FB 3 und 4 fragten nach dem *Argumentationsgang* („Kette der Begründungen", „Beobachtung und Schlussfolgerung" etc.) schon geleisteter Modellsystemerklärungen, FB 4 des Weiteren nach der Nützlichkeit der grafischen Darstellungen. FB 5 erbat eine Stellungnahme zur Anwendung der „Erklärungsmethode" bei biologischen Beispielen (erwartet: Grenzen der Modellbildung); FB 6 fragte nach Anzeichen für das Vorliegen eines Regelkreises. In den Interviews zum Abschluss des Hauptteils und in der Nachuntersuchung konnten die Probanden sich äußern, welche Beispiele, Inhalte und Methoden ihr Interesse geweckt hatten. Die Nachuntersuchung testete des Weiteren, welche Konzepte die Schüler auch nach fünf Monaten noch zur Erklärung wiederum neuer Modellsysteme einsetzen konnten (Details in Bell, 2003). Die Interviews wurden audiographiert und transkribiert und zusammen mit den Schülerskizzen sowie den Schüleräußerungen in den Fragebögen und den Vergleichslisten mit Methoden der qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet (Mayring, 1995).

6 Analyseergebnisse in ausgewählten Richtungen

Die Lernprozessstudie hat Ergebnisse in verschiedenen Richtungen erbracht, die sich stichwortartig wie folgt umreißen lassen:

a) Entwicklung einer Lernsequenz zum Bereich Selbstregulation;
b) Entwurf einer zyklischen Organisation des Lernprozesses („Prozess & Struktur");
c) Entwicklung physikalischer und strukturwissenschaftlicher Konzepte von Schülern;
d) Entwurf eines Modells der Konzeptentwicklung auf verschiedenen Ebenen;
e) Wirksamkeit des selbstständigen Konstruierens grafischer Darstellungen;
f) Entwicklung der Transferfähigkeiten (Analogiebildung);
g) Entwicklung systemischen Denkens;
h) Individuelle Lernwege;
i) Erhebungen zum Schülerinteresse.

Der vorliegende Bericht konzentriert sich vor allem auf die Bereiche des zyklischen Lernprozesses (b) und des Konzeptentwicklungsmodells (d). Der fortsetzende Beitrag (Bell, 2004) befasst sich mit den Befunden zur Rolle grafischer Darstellungen (e), zum Transfer (f), zur Entwicklung systemischen Denkens (g) und zum Schülerinteresse (i). Alle Bereiche sind ausführlich dargestellt in Bell (2003).

6.1 Zyklische Organisation des Lernprozesses

Wie beschrieben, werden die Schülerlernprozesse als ein vielfacher Wechsel von möglichst selbstständigem prozesshaften Konstruieren und stimulierter reflektiver Strukturabstraktion geplant. Diese Konzeption kongruiert mit bereits existierenden Entwürfen konstruktivistischer Lernzyklen (s.o.). *Neue* Erkenntnisse erbrachte diese Untersuchung v.a. zur *Notwendigkeit* der Anregung expliziter Reflexion und metakognitiver Prozesse, zur *konkreten Strukturierung* des Lehr-Lernprozesses und zur benötigten *Anzahl an Lernzyklen* in einem bestimmten Inhaltsbereich. Zu diesen Punkten werden im Folgenden verschiedene Belege und Schlussfolgerungen besprochen.

Die erste Pilotstudie und die Hauptstudie (insges. 28 Probanden) belegten, dass der *Pickspecht* den Lernenden gute Möglichkeiten bietet, strukturwissenschaftliche Konzepte grafisch und mental zu konstruieren. Den Schülern gelang es meistens schon in ersten Anläufen gut, den Bewegungsablauf zu analysieren, viele *beobachtbare* Prozessschritte zu beschreiben und Vermutungen untereinander und bei Bedarf mit dem Interviewleiter zu diskutieren. Die Schüler nutzten ausgiebig die Möglichkeit, Bewegungen von Hand nachzustellen und mit dem Modell zu experimentieren. In dieser Wei-

se konnten die Lernenden durch Nachvollziehen einzelner Prozessschritte nach und nach das gesamte Bewegungsmuster konstruieren (weitgehend selbstständiger prozessualer Zugang). Die Schülerbeschreibungen hatten zumeist einen deutlichen Fokus auf *Details* der Bewegung. Nur bei neun Schülern (von 28) kam es schon früh zu vereinzelten Andeutungen des sich wiederholenden Gesamtablaufs aus Schwingen und Fallen. Die Regelmäßigkeit der Bewegung wurde meist nicht spontan als relevante und erklärungsbedürftige Eigenschaft angesehen. Erst auf Nachfrage entwickelten die Schüler – nach anfänglicher Verwunderung über die Frage – Erklärungen. Diese griffen fast ausschließlich auf *einzelne* Komponenten der Anordnung zurück, z.B. auf die „konstante Erdanziehungskraft", die „Federkonstante" oder die „Masse des Pickspechts". Auch der Begriff der „erzwungenen Schwingung" wurde in einigen Fällen herangezogen. Dieses Erklärungsmuster soll als „monokausal" und „linear-statisch" bezeichnet werden, da in ihm eine Ursache A immer gleichbleibend eine Wirkung B hervorruft. Erst im Verlaufe eingehender Explorationen des Pickspechts in der Dauer von etwa 15 Minuten konnten die Schüler ein komplexeres Bild des Bewegungsablaufs entwickeln. Dann erarbeiteten viele Probanden eine „zyklisch-statische Erklärung" der Regelmäßigkeit, indem sie den Bewegungszyklus durchgingen und jeden Teilschritt als gleichbleibende Ursache für den Folgeschritt heranzogen, bis sie in einer Art Zirkelschluss wiederum die Konstanz des Ausgangspunkts folgerten.

Nach einiger Zeit wurde auf Anregung des Interviewleiters begonnen, die Beobachtungen in einer Skizze des Bewegungsablaufs festzuhalten. Dies bedeutete ein weiteres Abschreiten des Bewegungsprozesses und führte in jeder Gruppe zu einem akzeptablen Resultat (ein Beispiel in Abbildung 6). Die Struktur des *Zyklus* (allgemein: strukturtheoretische Abstraktionen) wurde an der resultierenden Grafik jedoch nur selten spontan erkannt und benannt: Von 14 Gruppen führten nur vier von sich aus eine Schließung der grafischen Struktur ein (z.B. Rückpfeil), und nur vier Gruppen assoziierten anhand der Aufzeichnung von sich aus Begriffe wie „Kreislauf", „Zyklus" o.Ä. Auf einfache Nachfrage konnten hingegen alle Gruppen die Struktur erkennen und auf die eine oder andere Weise geeignet benennen. Durch diese *stimulierte Reflexion* auf das Produkt der eigenen Konstruktion wurde eine hinreichend allgemeine Struktur abstrahiert und konnte dann auch bei folgenden Modellsystemen *wiederentdeckt* werden (*strukturelle* Analogiebildung).

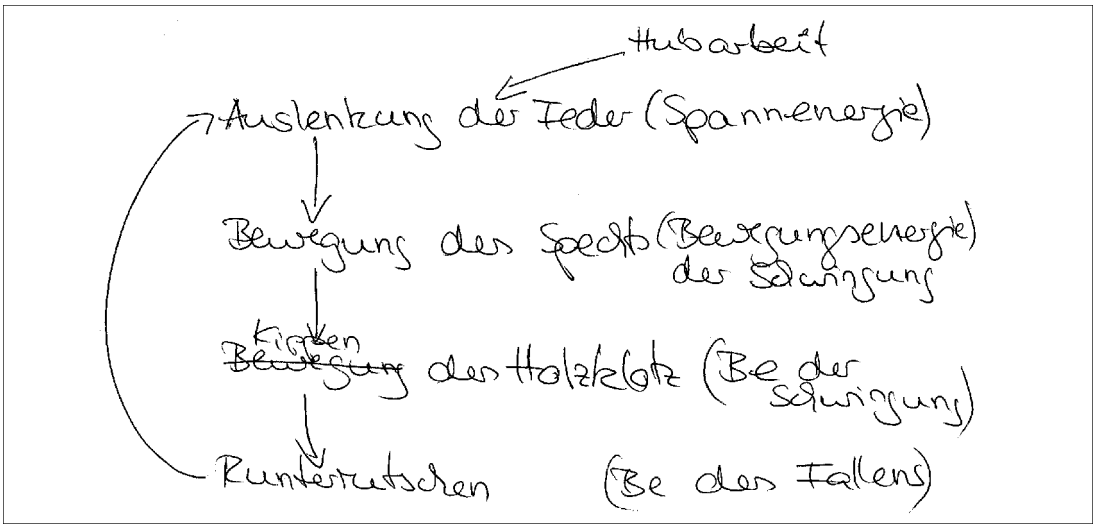

Abbildung 6: Aufzeichnung des Zyklus der Pickspechtbewegung durch Gruppe 7; die Energien wurden im zweiten Anlauf eingetragen.

Zwei an dieser Stelle eingeschobene Beispiele aus anderen Untersuchungsteilen sollen ebenfalls belegen, welche Bedeutung der Stimulation strukturtheoretischer Reflexion zukommt.
(1) Claudia und Christine (Gruppe 5 der zweiten Pilotstudie; alle Namen geändert) behandelten als erstes Modellsystem eine Bimetall-Blinkleuchte mit zyklischer Selbstunterbrechung und konnten hierfür ein Zyklusschema aufzeichnen. Als sie etwas später nach der Bedeutung des Schemas gefragt wurden, beschrieb Claudia den Zyklus so:

„[Er ist] Eine Folge, in der nichts fehlen darf."

Anhand dieser aus der Aufzeichnung gewonnenen Formulierung gelang es daraufhin Christine unter Claudias Beipflichtung, spontan den Citronensäurezyklus als Analogon einzubringen, der kurz zuvor im Schulunterricht behandelt worden war. Erst durch die Thematisierung der Aufzeichnungen (hier: des Zyklusschemas) gewinnen deren Strukturen eigenständige Bedeutung, werden zum selbstständigen Objekt, das in anderen Bereichen wiederentdeckt werden kann.
(2) In einer Voruntersuchung der Hauptstudie sollten die Schüler ein Räuber-Beute-System aus Hasen und Luchsen möglichst selbstständig beschreiben (vgl. Tabelle 2). Es gelang in allen Gruppen sehr gut, die Wechselwirkung zwischen Räuber- und Beutepopulation prozesshaft, d.h. Schritt für Schritt, zu entfalten. Des Weiteren bezeichneten alle Schüler den „Normalzustand" des Systems spontan oder auf einfache Nachfrage als „Gleichgewicht". Die vorangegangene Entfaltung der dynamischen Wechselwirkung führte jedoch in keinem Falle von selbst zu einer Weiterentwicklung des Gleichgewichtsbegriffs: Alle Schüler erklärten das Gleichgewicht im ersten Anlauf als *Gleichbleiben* oder gar *Gleichheit* der Populationszahlen. Hier fehlte offenbar nach gelungener prozesshafter Entfaltung noch die Anregung verbaler Abstraktion.
Das *selbstständige grafische Aufzeichnen* (siehe auch Bell, 2004) erwies sich in allen Gruppen als eine sehr geeignete Methode, um das prozesshafte Nachvollziehen von Systemabläufen zu vertiefen und eine strukturelle Abstraktion *vorzubereiten*. Letztere konnten die Schüler anhand der fertigen Skizzen gewinnen, jedoch meist nur, wenn sie von außen dazu angeregt wurden. In der Hauptstudie wurde diese Methode konsequent umgesetzt. Die Modellsystemerkundungen wurden als mehrfacher Wechsel von – grafischen und mentalen – Konstruktionsprozessen und anschließender Strukturabstraktion geplant. Die größte Herausforderung stellte für die Lernenden die Konstruktion des Regelkreis- bzw. Rückkopplungsprinzips dar, das deshalb einen Schwerpunkt der folgenden Ausführungen bildet. Beim ersten Modellsystem, dem Pickspecht, bewährte sich in allen Gruppen ein fünfteiliges Schema des Prozess-Struktur-Wechsels, um zum (noch deutlich beispielbezogenen) Rückkopplungskonzept zu gelangen. Das Schema umfasst folgende Schritte:

1.) Erste Erkundung: Beobachten, Experimentieren, Nachstellen der Abläufe, erste Beschreibungen; Abstraktion: „Wiederholung" (der Bewegung), „Gleichmäßigkeit" o.Ä.
2.) Aufzeichnen des Bewegungszyklus (auf der dynamischen Ebene der Bewegungsphasen und Auslöser, wie Abbildung 6); Abstraktion: „Kreislauf", „Zyklus", „Schleife" o.Ä.
3.) Analyse der Energieumwandlungen und deren Eintragen in die Zyklusgrafik (anschließend auch Konstruktion der Fließgleichgewichtsgrafik, Abbildung 2); Abstraktion: zyklische Energieumwandlung & energetischer Durchstrom (Antrieb).
4.) Aufzeichnen einer „Störfallbetrachtung", zunächst in Form einer Verursachungskette (z.B. ausgehend von der Frage: „Was passiert im Falle einer zu großen Amplitude?"); Abstraktion: „Kette der Auswirkungen einer Abweichung" o.Ä.
5.) Aufzeichnen des Regelkreises in einer gestrafften und durchdachten Endversion; Abstraktion: „Regelkreis", „Rückkopplung".

Durch Bewältigen der fünften Stufe gelangten die Lernenden schließlich zu einer „zyklisch-dynamischen" Erklärung des Phänomens. Fragebogen 2 wurde nach Schritt 4 zur Erhe-

bung eines Zwischenstands und zur Anregung von Reflexion eingeschaltet. Gefragt nach den aus der Pickspechtbetrachtung gewonnenen „wichtigsten Ergebnissen" bzw. „Prinzipien", griffen die Probanden an dieser Stelle noch zumeist auf *prozesshafte Beschreibungen* des Bewegungsablaufs und einiger Energieumwandlungen zurück. So notierte z.B. Torben (Gruppe 5) in FB 2 folgenden Prozesszyklus als wichtigstes Ergebnis:

> „Lageenergie → freier Fall → Reibung → Wärme → Schwingung des Spechts (ebenfalls W_{kin}) → freier Fall etc."

Das Fragen nach den Bedeutungen der Begriffe „Selbstregulierung", „Rückkopplung", „Regelkreis" in FB 2 regte viele Probanden zu einer fruchtbaren *Hypothesenbildung* im Rückblick auf den teilbehandelten Pickspecht an. An dieser Stelle gelangen zwar in allen Fällen nur vorläufige Antworten, doch die Fragen waren „aufgeworfen": Die generierten Hypothesen leiteten die Schüler in der zweiten Explorationsphase zum Pickspecht und konnten dabei verworfen oder auch weiterentwickelt und verallgemeinert werden.

Es wurde die Erfahrung gemacht, dass die angegebenen *Wiederholungen* des Ablaufens des Bewegungszyklus (Schritte 1 bis 3) und des Regelkreises (4 und 5) für die meisten Probanden nötig sind, um die eigenständige Bedeutung des Zyklusprinzips zu entdecken. Die fünf Explorationsphasen entsprechen (im Idealfall) fünf Umläufen im zyklischen Konzeptentwicklungsmodell nach Abbildung 5. Durch das mehrfache Wiedererkennen gelangten die Lernenden zu ersten Ansätzen einer *Verdinglichung* (siehe Abschnitt 5.1) der Konzepte „Zyklus" bzw. „Rückkopplung". Diese Verdinglichung war jedoch noch nicht stabil und beschränkte sich zunächst auf den behandelten Anwendungsfall (Pickspecht).

Zum Teil schon FB 2 und insbesondere FB 3 (nach Behandlung des zweiten Modellsystems) dokumentierten bei vielen Schülern eine Zwischenphase der Konzeptentwicklung: Es wurde beobachtet, dass Schüler bei Definitionsaufgaben einen Begriff zunächst verdinglicht beschrieben und sich dann auf der Ebene der durch den Begriff eingekapselten Prozessfolge rückversicherten. So nannte z.B. Lars (G1) in FB 2 als „wichtigstes Ergebnis" der Pickspechtuntersuchung:

> „Zusammenwirken der kinetischen und potentiellen Energie."

Er gab also zunächst einen verdinglichten Gesamtwirkungszusammenhang auf energetischer Ebene an und griff danach zur weiteren Erläuterung auf eine prozesshafte Beschreibung zurück:

> „Dadurch dass der Holzspecht schwingt, rutscht das Holzstück [Ringmuffe] immer ein Stück weiter."

Diese Konzeptbildungsphase, in der noch eine Rückversicherung auf Prozessebene stattfindet, bezeichnet A. Sfard als *Kondensation* (condensation, Sfard, 1991, S. 19). Außer bei Begriffsdefinitionen wurde die Phase auch bei Systemerkundungen deutlich: Beispielsweise kamen Lernende hier in Analogie zu vorher behandelten Systemen auf die Idee, dass ein Einschwingen wiederum durch einen Regelkreis herbeigeführt werde. Diese Leitidee musste zur Vergewisserung danach noch durch eine Detailanalyse des Wirkungszyklus, also auf Prozessebene erhärtet werden. In FB 3, also nach Behandlung des zweiten Modellsystems, war der Verdinglichungsprozess bei Lars weiter vorangeschritten. Er definierte „Regelkreis" bereits wie folgt:

> „Ein Schema, das zeigt, wie sich der Specht selbst regelt/wieder einpendelt."

Die grafische Darstellung eines Regelkreises, die nun schon bei zwei Modellsystemen konstruiert worden war, diente offensichtlich als unterstützender Bezugspunkt der Verdinglichung des Konzepts. Dieser sichere Bezug auf ein Konzept-Objekt ist nach A. Sfard (1991) charakteristisch für die Phase der *Verdinglichung* (*reification*). Es ist jedoch zu betonen, dass diese Verdinglichung zunächst noch sehr

kontextgebunden stattfindet. Die Beschäftigung mit andersartigen Modellsystemen regte weitere Konzeptentwicklungszyklen an und sorgte so nach und nach für eine weiter greifende Bewährung und Abstraktion der Konzepte. Exemplarisch sei der Endpunkt dieser Entwicklung bei Juliane (G6) dokumentiert. Sie definierte „Rückkopplung" in FB 7 (Nachuntersuchung) so:

> „Wenn die Ursache von etwas auch wieder die Wirkung davon ist."

Die Verdinglichung von Konzepten zeigt sich gerade auch darin, dass sie als Objekte mentalen Prozessen auf höherer Ebene zur Verfügung gestellt werden können. Solche Prozesse wurden etwa ab Behandlung des zweiten Modellsystems immer deutlicher angeregt bis hin zu FB 6, der u.a. nach Zusammenhängen zwischen den Strukturbegriffen fragte. Hier kam beispielsweise Ben (G3) zu folgender Aussage, die dem Bereich der Strukturwissenschaft zuzuordnen ist:

> „Der Regelkreis ist das System, das versucht, ein Gleichgewicht durch Selbstregulierung herzustellen."

Eine mit der Strukturwissenschaft eng verknüpfte Ebene der Konzeptentwicklung, die ebenfalls auf verdinglichten Konzepten aufbaut, wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

6.2 Ergebnisse zum Konzeptentwicklungsmodell

Ein Ziel dieses Analyseschwerpunkts ist eine Antwort auf die Frage, ob die Aufteilung in die zwei Konzept-Komponenten IGS und Regelwissen (nach diSessa & Sherin 1998) sinnvoll ist, d.h. ob sich beide im Lernprozess als eigenständig zeigen. Des Weiteren wird die Hypothese der Koevolution beider Komponenten untersucht (vgl. Abschnitt 5.1). In welcher Weise schreitet die Koevolution voran, unter welchen Bedingungen und in welchen Grenzen?
Erkenntnisse zu diesem Schwerpunkt wurden ebenfalls aus vielen Detailbeobachtungen zur Entwicklung bestimmter Konzepte bei einzelnen Schülern gewonnen. Neben einigen summarischen Ergebnissen der Hauptstudie (16 Probanden) wird hier wiederum exemplarisch die Entwicklung des Konzepts *Rückkopplung* in der Hauptstudie thematisiert.
Das Konzept Rückkopplung ist – wie Strukturkonzepte überhaupt – als abstrakt einzustufen. Dies hat zur Folge, dass sich zwar eine Regel zum Konzept Rückkopplung kurz und griffig formulieren lässt (z.B. „eine Ursache hat (über Zwischenstufen) eine Wirkung auf sich selbst"), aber eine zugehörige IGS (etwa: „Finde in einer gegebenen Situation eine Größe, die über eine Wirkungsschleife wiederum auf sich selbst wirkt") in konkreter Anwendung recht komplexe Abläufe hervorbringen muss: Es sind Wirkungsstrukturen zu analysieren, und es ist dabei auf Wissen über möglicherweise sehr verschiedene Arten von Größen und Wirkungen zurückzugreifen. Die IGS muss also eine Vielzahl von Substrategien nutzen, die anderen Konzepten zugeordnet werden können (zur Konzeptvernetzung siehe auch diSessa & Sherin, 1998, S. 1170ff und Bell, 2003, S. 120-130). Es wird deutlich: Eine Rückkopplung in Ganzheit wird in den seltensten Fällen „mit einem Blick gesehen", sondern eher aufwändig konstruiert. Dies unterbleibt jedoch beim ungeübten Betrachter zumeist. Damit ein solcher Informationsgewinnungsprozess einsetzt, ist eine zusätzliche Motivation nötig. Dies kann eine Intervention sein, z.B. eine Aufforderung. Die Untersuchungsergebnisse zeigen aber noch einen anderen, *selbstständigeren* Weg, wie nun dargelegt wird.
Der Ausgangsbefund zum Begriff und Konzept *Rückkopplung* ist folgender: In FB 1 (Voruntersuchung) brachten 13 Schülerinnen und Schüler den Begriff Rückkopplung mit dem unangenehmen Störgeräusch auf Musikbühnen in Verbindung (Regelwissen; höchstwahrscheinlich verbunden mit einer entsprechenden IGS, hier: Geräusch wahrnehmen). Doch nur vier der 16 Probanden erkannten bei diesem Beispiel eine zyklische Wirkungsstruktur, nur zwei sprachen von einer Verstärkung (Entwicklungsdynamik) und nur eine Schülerin beschrieb Rückkopplung *abstrakt* als zyklische Wirkungsstruktur.

Dementsprechend kam das Konzept der Rückkopplung bei Beschreibung des Pickspechts (MS 1) in keiner Gruppe selbstständig zur Anwendung (keine passenden IGS).
Der Reflexionsteil von FB 2 führte bei vielen Schülern zu einer Weiterentwicklung des Regelwissens (oft hypothetisch, vgl. Abschnitt 6.1). So erklärte Lars (G1) den Begriff Rückkopplung in FB 2 als

> „... gegenseitige Wirkung aufeinander ... von Holzstück an der Stange und Specht."

Immerhin erfasste er bereits eine zyklische Wirkungsverknüpfung, hier noch auf der Ebene materieller Komponenten und deren Bewegungsphasen. Eine Erweiterung des Regelwissens ergab sich im zweiten Teil der Pickspechtexploration nach der grafischen Konstruktion des Regelkreises (Schritt 5 des Schemas) und Anregung zur Strukturreflexion durch den Interviewleiter: Mit nur einer Nachfrage konnte Lars – wenn auch unsicher – die Begriffe Rückkopplung und Regelkreis auf die gerade von ihm gezeichnete Kreisstruktur beziehen und das Konzept dabei auf die Energieebene heben.
Bei Behandlung des zweiten Modellsystems (Reibungspendel) erkannte Lars sofort den Zyklus des Ablaufs, hatte also bereits eine IGS für Bewegungszyklen gebildet und setzte hier einen Fokus. Hingegen entdeckte und vermutete Lars von sich aus keinen *Wirkung*szyklus. Dies geschah bei MS 2 erst später nach Hinweis auf eine Störung und das anschließende Einschwingen sowie einer diesbezüglichen Nachfrage. Danach wurde der Regelkreis auch hier grafisch konstruiert. In FB 3 definierte Lars den Begriff Rückkopplung dann als

> „Auswirkung einer Amplitudenvergrößerung/-verkleinerung über einen Regelkreis wieder auf die Amplitude."

Diese Regel konnte er aus dem Vergleich der beiden ersten Modellsysteme abstrahieren. Beim dritten Modellsystem, der gestrichenen Geigensaite, gelangte diese Regel jedoch nicht zur Anwendung, auch als die Schwingung und deren Regelmäßigkeit sowie deren Einschwingen schon erkannt waren (ähnlich in anderen Gruppen). Hingegen begann an dieser Stelle eine andere, auf einer *Metaebene* angesiedelte Regel wirksam zu werden: Schon in FB 3 war Lars auf die Frage, wie man bei den ersten Modellsystemen auf einen Regelkreis gekommen sei, eine erste Abstraktion eines *Erklärungsschemas* gelungen: Er schloss vom „Einpendeln", dem *Phänomen* der Selbstregulation, auf einen Regelkreis. Dieses Schema konnte er beim dritten Modellsystem auf Nachfrage des Interviewleiters aktivieren und dann zur Erklärung des gleichmäßigen Saitentons einsetzen. Ähnliche Befunde ergaben sich in allen Gruppen: Obwohl fast alle Probanden in FB 3 gute Definitionen für Rückkopplung/Regelkreis geben konnten, fanden diese zumeist keine Anwendung auf die gestrichene Saite: Die IGS hinkt dem Regelwissen deutlich hinterher. Hingegen brachte das Erklärungsschema zwei Gruppen frühzeitig auf die richtige Fährte.
Beim vierten Modellsystem, der angeblasenen Orgelpfeife, bemerkte Lars sofort das raue Anfangsgeräusch (Tonentstehung) und konnte noch selbstständiger als bei MS 3 den abstrakten Schluss auf das Vorliegen eines Regelkreises ziehen. Da der Zyklus bei diesem System jedoch alles andere als offensichtlich ist und Lars kaum Vorwissen aus dem Bereich der Akustik zur Verfügung stand, erschien ihm diese Konsequenz zunächst unglaubhaft. Es bedurfte in diesem, der Erscheinung nach gänzlich neuen Bereich erneut einer sorgfältigen Konstruktion des konkreten Zyklus.
Die Übertragung der Selbstregulationsprinzipien auf das Beispiel des Blutzuckers (MS 5) hatte für Lars doppelte Bedeutung: Zum einen erschloss es ihm den Bereich Biologie als geeignetes Anwendungsgebiet. Solche „Bereichseffekte" des Transfers werden in Bell (2004) eingehender betrachtet. Zum anderen ergab sich für Lars nach Behandlung von fünf Modellsystemen aus drei äußerlich ganz verschiedenen Bereichen ein „Schwelleneffekt": Bei Lars bildete sich neben einem immer allgemeineren Regulationskonzept auch das Vertrauen in seine weit reichende Tragfähigkeit. Dies äußerte sich im Vergleichslistentest L

3 (nach MS 5): Hier entdeckte Lars die Selbstregulation bei der Körpertemperatur aus dem Bereich der Biologie (Bereichseffekt), vermutete sie auch beim Gehen (es fehlte ihm aber der Mechanismus) und erkannte sie nun auch bei einigen *physikalischen* Beispielen, nämlich Pendeluhr und Metronom (Schwelleneffekt). Sein Gruppenpartner Maico, der an denselben Modellsystemanalysen (MS 1-5) wie Lars mitgewirkt, das Schlussschema bis zu diesem Zeitpunkt aber noch nicht verinnerlicht hatte, konnte bei den L3-Beispielen keine Selbstregulation entdecken.

Bis zum Ende des Hauptteils hatten neun Probanden das genannte Erklärungsschema deutlich herausgebildet, drei weitere in einer Vorform. Die Hälfte der Schüler konnte dieses Schema bei den letzten Modellsystemen (MS 6, 7) und dem letzten Vergleichslistentest (L 4) recht selbstständig einsetzen und die Prinzipien der Selbstregulation dadurch auf äußerlich unähnliche Beispiele übertragen. Bei der Nachuntersuchung nach fünf Monaten wiesen die meisten Probanden immer noch gutes bis sehr gutes Regelwissen zum Rückkopplungskonzept auf: Sieben Schüler konnten eine abstrakte Definition geben, sieben weitere eine konkretere Definition (z.B. Bezug auf „Energien" oder „Kräfte"), aber immer noch inklusive einer zyklischen Wirkungsstruktur. Aber nur vier Schüler wandten dieses Wissen von sich aus auf neue Beispielsysteme an; diese vier hatten nach eigenen Angaben von sich aus auch in der Zwischenzeit das Rückkopplungskonzept und seine grafische Darstellung (Wirkungsdiagramme) weiter benutzt. Jedoch ist durch die lange Unterbrechung dem Großteil der Probanden das abstrakte Metawissen verloren gegangen. Für diese Schüler eröffnete wiederum die grafische Methode einen Weg zur Rekonstruktion der Strukturkonzepte und zu ihrem erneuten Einsatz, wie in Bell (2004) genauer dargestellt wird.

Die Hauptstudie hat an vielen Stellen die Interaktion verschiedener Komponenten des mentalen Gefüges der Lernenden belegt (vgl. Posner, Strike et al., 1982; Toulmin, 1972); dies konnte hier nur in knappen Auszügen gezeigt werden. Als Deutung der Beobachtungen folgt eine Übersicht über die Komponenten (außer den Konzeptteilen Regelwissen und IGS), die – soweit aufgefunden – an der Bildung und dem Einsatz des Strukturkonzepts Rückkopplung unter Nutzung der grafischen Methode beteiligt sind:

- Verbalisierung: Begriff „Rückkopplung" bzw. „Regelkreis" sowie weitere Begriffe im Umfeld;
- Paradigmatische Beispiele aus mehreren Bereichen (erschließen die Anwendung in den Bereichen);
- Spezifisches Wissen zur Konstruktion in einem bestimmten Bereich (Rückgriff auf eine Vielzahl anderer Konzepte, z.B. auf Energie-Konzepte, auf Akustikwissen etc.);
- Metaregel: Stabilisierung lässt auf Regelkreis schließen;
- Metawissen: grafische Methode als bewährtes Werkzeug;
- Metaregel: Stabilisierte Größe (Regelgröße) als Einsatzpunkt einer Regelkreis-Konstruktion;
- Metaregel zur Methodik der Regelkreis-Konstruktion: Störfallbetrachtung, ausgehend von Regelgröße bis zur Schließung eines Zyklus;
- Metawissen: Vertrauen in das Erklärungspotential und die Reichweite des Konzepts.

Des Weiteren wurde in der Hauptstudie hin und wieder beobachtet, dass das Selbstkonzept der Lernenden in Form ihres aus vormaligem Erfolg gewonnenen Selbstvertrauens, eine Rückkopplung konstruieren zu können, gerade bei dieser anfangs nicht überschaubaren Aufgabe einen wichtigen Faktor darstellt („erlebte Selbststeuerung" nach Konrad, 2000). Auch für das Fließgleichgewichtskonzept konnte hilfreiches Metawissen identifiziert werden (z.T. ähnlich). Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nicht alle der genannten Faktoren im Konzeptentwicklungsmodell nach Abbildung 5 dargestellt. Dies gilt auch für weitere motivationale und soziale Faktoren (Strike & Posner, 1992; Pintrich, Marx et al., 1993); jedoch wurde das Schülerinteresse an den behandelten Themen am Ende der Untersuchung erhoben (siehe Bell, 2004).

7 Zusammenfassung und Interpretation

Schüler sind durch Exploration einfacher selbstregulierender Modellsysteme anhand von Leitfragen in der Lage, komplexe Strukturen wie Rückkopplungen (Regelkreise) und Fließgleichgewichte prozesshaft zu konstruieren. Das grafische Darstellen erweist sich dabei als wesentliches Hilfsmittel zur Umsetzung beobachteter Prozesse in eigene konstruktive Aktion. Auf Basis solcher Darstellungen können Schüler zur Abstraktion und Explizierung der Strukturkonzepte angeregt werden. Um zur Verdinglichung abstrakter Konzepte zu gelangen (Sfard, 1991, 1994), sollte im Unterricht Raum für *mehrfachen, flexiblen* Wechsel zwischen Prozess- und Strukturebene gegeben werden (Wechsel von Codierung von Prozessen in Strukturen und erneuter Decodierung). Durch diesen Wechsel werden Prozesse allmählich zu mentalen Objekten kondensiert und können mentalen Prozessen auf höherer Ebene bereitgestellt werden, wo sich das Wechselspiel wiederholen muss.

Angeregt zur Analogiebildung zwischen verschiedenen Modellsystemen, können Lernende hinreichend abstraktes Regelwissen zu Strukturkonzepten generieren. Es gelingt ihnen jedoch kaum, dem Entwicklungstand des Regelwissens entsprechende, komplexe Informationsgewinnungsstrategien (IGS) zu bilden und selbstständig einzusetzen. Diese beiden Konzeptkomponenten nach diSessa und Sherin (1998) sind deutlich zu differenzieren, umso mehr je unanschaulicher oder unbekannter neue Anwendungsbeispiele sind. Die duale Konzeptstruktur ist somit gut geeignet, das Phänomen „trägen Wissens" sowie die Schwierigkeiten spontaner Analogiebildung zu erklären (z.B. Gentner & Gentner, 1983; Duit & Wilbers, 2001). Das Hinterherhinken der IGS wird zum Teil darauf zurückzuführen sein, dass Lernende die allgemeine Bedeutung ihres Regelwissens noch nicht erfassen. So mag z.B. der Begriff „Amplitude" zunächst wenig allgemein gefüllt werden, nämlich mit einer kleinen Anzahl bekannter Beispiele. Hier wird der hypothetische Charakter von Regeln deutlich: „Gute Regeln" tragen eine fruchtbare Überschussbedeutung, die der Lernende noch gar nicht absehen kann. In diesem Sinne *müssen* sie den IGS vorauseilen und ermöglichen dadurch Erkenntnisfortschritte (vgl. die Einstein'sche Konzeption des Erkenntnisprozesses, Holton, 1981).

Die beschriebenen Transferschwierigkeiten können Lernende durch zusätzliches Orientierungswissen überwinden: So wirken insbesondere Metaregeln förderlich bzw. beschleunigend (vgl. Adey, 1999) für den Einsatz komplexer IGS, sie verändern die „Sehgewohnheiten". Solche Metaregeln (Rahmenvorstellungen in Abbildung 5) haben eine ontologische Perspektive, indem sie das Vorliegen von Strukturen wie Rückkopplungen und Fließgleichgewichten aussagen, oder auch eine epistemologische Perspektive, insofern sie das Erklärungspotential und den Erklärungswert dieser Konzepte betreffen (vgl. Vosniadou & Ioannides, 1998). Die Untersuchung zeigt, dass ein Großteil der Lernenden zur Bildung solchen Rahmenwissens gelangen kann. Diese explizit anzuregende Metakonstruktion können Schüler auf der Basis einer kleinen Anzahl paradigmatischer Beispiele bewältigen. Bewährt sich das Metawissen an mehreren Beispielen verschiedener Bereiche (bei schnellen Schülern 2-3, typischerweise 3-5 Modellsysteme), wird es dem Lernenden auch vertrauenswürdig für weit ausgreifende Anwendung (Schwelleneffekt). Das abstrakte Metawissen (Anwendungswissen) erweist sich jedoch als flüchtiger als konzeptuelles Regelwissen (Nachuntersuchung). Die Konsequenz für Unterricht über komplexe Systeme ist, dass neben den Konzepten auch Metawissen sorgfältig aufgebaut und in kürzeren Zeitabständen erneut genutzt bzw. weiterentwickelt werden sollte.

Literatur

Adey, P. (1999). Revisiting cognitive conflict, construction, and metaconstruction, and discovering metaconstructivism. In M. Komorek, H. Behrendt, H. Dahncke, R. Duit, W. Gräber & A. Kross (Eds.), Research in Science Education: Past, Present, and Future. Second International Conference of the European Science Education Research Association (E.S.E.R.A.). Kiel: E.S.E.R.A., 58-60.

Alexopoulou, E. & Driver, R. (1996). Small-group discussion in physics: peer interaction modes in pairs and fours. Journal of Research in Science Teaching 33, 10, 1099-1114.

Bell, T. (2003). Strukturprinzipien der Selbstregulation - Komplexe Systeme, Elementarisierungen und Lernprozessstudien für den Unterricht der Sekundarstufe II. Berlin: Logos.

Bell, T. (2004). Komplexe Systeme und Strukturprinzipien der Selbstregulation - Konstruktion grafischer Darstellungen, Transfer und systemisches Denken. ZfDN 10, 182-203.

diSessa, A. A. & Sherin, B. L. (1998). What changes in conceptual change? Int. J. Sci. Educ. 20, 10, 1155-1192.

Driver, R. (1989). Changing conceptions. In P. Adey (Ed.), Adolescent development and school science. London: Falmer Press, 79-99.

Duit, R. & Wilbers, J. (2001). On the benefits and pitfalls of analogies in teaching and learning physics. In R. Pinto & S. Surinach (Eds.), Physics teachers education beyond 2000. Paris: Elsevier, 11-18.

Ebeling, W. & Feistel, R. (1994). Chaos und Kosmos - Prinzipien der Evolution. Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag.

Euler, M. (1995a). Synergetik für Fußgänger I. Physik in der Schule 33, 5, 189-194.

Euler, M. (1995b). Synergetik für Fußgänger II. Physik in der Schule 33, 6, 237-242.

Euler, M. (2000). Selbstorganisation, Strukturbildung und Wahrnehmung - Versuche mit dem singenden Rohr. Biologie in unserer Zeit 30, 1, 45-53.

Gentner, D. & Gentner, D. R. (1983). Flowing waters or teeming crowds: Mental models of electricity. In D. Gentner & A. L. Stevens (Eds.), Mental Models. London, NJ: Hillsdale, 99-130.

Gerstenmaier, J. & Mandl, H. (1995). Wissenserwerb unter konstruktivistischer Perspektive. Zeitschrift für Pädagogik 41, 867-888.

Holton, G. (1981). Thematische Analysen der Wissenschaft. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.

Jantsch, E. (1992). Die Selbstorganisation des Universums. Vom Urknall zum menschlichen Geist. München: Hanser.

Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H. & Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion. ZfDN 3, 3, 3-18.

Katu, N. & Lunetta, V. N. (1993). Teaching experiment methodology in the study of electricity concepts. In Proceedings of the Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics. Ithaca, N.Y.

Komorek, M. (1998). Elementarisierung und Lernprozesse im Bereich des deterministischen Chaos. Kiel: IPN.

Komorek, M., Wendorff, L. & Duit, R. (2002). Expertenbefragung zum Bildungswert der nichtlinearen Physik. ZfDN 8, 33-51.

Komorek, M. & Duit, R. (2004). The teaching experiment as a powerful method to develop and evaluate teaching and learning sequences in the domain of non-linear systems. Int. J. Sci. Educ. 26, 619-633.

Konrad, K. (2000). Selbstgesteuertes Lernen: Differentielle Effekte unterschiedlicher Handlungsfelder und demographischer Variablen. Unterrichtswissenschaft 28, 75-91.

Korneck, F. (2001). Chaos - Fraktale - Strukturen oder Von den Schwierigkeiten die nichtlineare Dynamik zu den Schülern zu bringen. In DPG-Tagung 2001. Bremen: Deutsche Physikalische Gesellschaft.

Lawson, A. E., Abraham, M. R. & Renner, J. W. (1989). A theory of instruction: Using the learning cycle to teach science concepts and thinking skills: National Association for Research in Science Teaching.

Lindner-Effland, M. (1997). Voll ins Schwarze. Unterricht Biologie 228, 34-37.

Mayring, P. (1995). Qualitative Inhaltsanalyse. Weinheim: Deutscher Studien Verlag.

Pintrich, P. R., Marx, R. W. & Boyle, R. A. (1993). Beyond cold conceptual change: The role of motivational beliefs and classroom contextual

factors in the process of conceptual change. Review of Educational Research 63, 2, 167-199.

Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W. & Gertzog, W. A. (1982). Accomodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. Science Education 66, 211-227.

Schlichting, H. J. (1988). Der Pickspecht - ein sich selbst organisierendes System. Naturwissenschaften im Unterricht - Physik/Chemie, Heft 39, 37-39.

Schlichting, H. J. (1993). Energie, Entropie, Synergie - Ein Zugang zur nichtlinearen Physik. MNU 46, 3, 138-148.

Schlichting, H. J. & Nordmeier, V. (1996). Strukturen im Sand - Kollektives Verhalten und Selbstorganisation bei Granulaten. MNU 49, 6, 323-332.

Schlichting, H. J. & Nordmeier, V. (2000). Thermodynamik und Strukturbildung am Beispiel der Entstehung eines Flussnetzwerkes. MNU 53, 8, 450-454.

Schnotz, W. & Bannert, M. (1999). Einflüsse der Visualisierungsform auf die Konstruktion mentaler Modelle beim Text- und Bildverstehen. Zeitschrift für experimentelle Psychologie 46, 3, 217-236.

Sfard, A. (1991). On the dual nature of mathematical conceptions: reflections on processes and objects as different sides of the same coin. Educational Studies in Mathematics 22, 1-36.

Sfard, A. (1994). Reification as the birth of metaphor. For the Learning of Mathematics 14, 1, 44-55.

Strike, K. & Posner, G. (1992). A revisionist theory of conceptual change. In R. Duschl & R. Hamilton (Eds.), Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice. Albany, NY: SUNY, 147-176.

Toulmin, S. E. (1972). Human understanding. Princeton: Princeton University Press.

Vosniadou, S. & Ioannides, C. (1998). From conceptual development to science education: a psychological point of view. Int. J. Sci. Educ. 20, 10, 1213-1230.