

Konzeptentwicklungen in einer Lernprozessstudie im Bereich „Komplexe Systeme und Selbstregulation“

Thorsten Bell

IPN – Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften,
Olshausenstraße 62, 24098 Kiel
(Eingegangen: 11.01.2006; Angenommen: 24.12.2007)

Kurzfassung

Der Artikel [1] hat eine fächerübergreifende Lerneinheit über qualitative Zusammenhänge im Bereich *Komplexe Systeme und Selbstregulation* vorgestellt. Schülerinnen und Schüler erkunden nacheinander sieben selbstregulierende Modellsysteme verschiedener Domänen. In den Explorationsphasen halten die Lernenden ihre Überlegungen in Form grafischer Darstellungen fest, aus denen sie durch angeleitete Reflexion die Strukturprinzipien Fließgleichgewicht und Rückkopplung bzw. Regelkreis abstrahieren können. Der vorliegende Beitrag stellt summarische Ergebnisse zur Konzeptentwicklung dar, die in einer Lernprozessstudie mit acht (inklusive Pilotstudien 19) Zweiergruppen von Physik-Grundkurschülerinnen und -schülern erzielt wurden. In der Untersuchung traten neben die anfangs sehr unvollständigen und überwiegend statischen Schülervorstellungen von Ordnung, Gleichgewicht und Rückkopplung in den meisten Fällen allgemeinere, dynamische Konzeptausprägungen. Durch stimulierte Reflexion auf die Erklärungsmethode lernten die meisten Probanden, auch neue selbstregulierende Modellsysteme anhand grafischer Analyse mit dynamischen Strukturkonzepten zu erklären.

Vorbemerkung

Dieser Beitrag fasst Teile der Ergebnisse zusammen, die im Promotionsvorhaben des Autors [2] erzielt wurden. Im Unterschied zu vorherigen Veröffentlichungen [3,4] liegt der Fokus dabei auf Konzeptentwicklungen auf Schülerseite, die sich beim Einsatz der in [1] vorgestellten Lerneinheit zum Bereich *Komplexe Systeme und Selbstregulation* durch den Vorher-Nachher-Vergleich im Rahmen einer Lernprozessstudie ergeben haben. Zur Motivation einer Forschungsfrage folgt zunächst ein kurzer Blick auf Entwicklungen bei Schülervorstellungen im Bereich der Nichtlinearen Dynamik, die verschiedene Autoren mit anderen Lernkonzeptionen erzielen konnten und veröffentlicht haben.

1. Hintergrund der Untersuchung

1.1 Forschungsbefunde zum Lernen im Bereich Nichtlineare Physik

Obwohl die Themenbereiche Nichtlineare Dynamik, Komplexe Systeme und Strukturbildung schon in den 1990er Jahren Einzug in die Fachdidaktik gehalten haben und auch in jüngeren Jahren verschiedene Unterrichtskonzepte vorgeschlagen worden sind [5-12], ist die Zahl der empirischen Untersuchungen, wie Schülerinnen und Schüler in diesem Bereich lernen, eher gering. Einige wesentliche Befunde sollen kurz umrissen werden.

Die Studie von Komorek [13] zu Lernprozessen im Bereich des deterministischen Chaos hat belegt, dass Schüler aus Jahrgang 11 oder 12 bei Erkundung eines Chaos-Magnetpendels sowie weiterer dazu analoger Modellsysteme („Chaosschüssel“, Berggrat, Würfel, Galton-Brett), also durch anschauliche labile Gleichgewichte die Konzepte der dynamischen Instabilität und der eingeschränkten Vorhersagbarkeit erfassen können. Bei weiteren Untersuchungen Komoreks wurde dieser Ansatz in Zusammenarbeit mit Lehrkräften zu einer modularen Unterrichtseinheit erweitert, die das Thema Strukturbildung noch eingehender beleuchtet (weitere Beispiele u.a.: Zinkdendrit, Bénard-Zellen, Phasenraumstrukturen beim Doppelpendel, Sierpinski-Dreieck) und in Physik-Grundkursen sowie der 10. Klasse erprobt wurde [7,14]. Ausgehend von deterministischen Vorstellungen, waren die meisten Schülerinnen und Schüler in der Lage, die Rolle von Zufall bei der Entstehung von Strukturen zu erkennen und dadurch ihr Bild von Physik zu erweitern.

Wilbers [15,16] untersuchte im Detail Prozesse der Analogiebildung durch Schüler bei Erkundung strukturell ähnlicher Systeme wie Magnetpendel, Chaosschüssel und Berggrat. Die Analogiebildungsprozesse zeigten sich als komplex, langwierig und nicht selten fehlerträchtig; mit hinreichender Sorgfalt führten sie jedoch zu den gewünschten Erkenntnissen auf Schülerseite, und zwar durch eine wech-

seitige Entschlüsselung vermeintlich schon bekannter und unbekannter Beispiele.

Korneck [17] entwickelte und erprobte eine umfangreiche Unterrichtseinheit, die mit einem Schwerpunkt auf Beispiele der Strömungsdynamik (u.a. Wirbelstürme, Wasserwirbel, Taylor-Couette-System) viele grundlegende Prinzipien der Nichtlinearen Physik und der Strukturbildung abdeckt. Erprobungen bei einer Schülerakademie und mit Lehramtsstudenten zeigten Lernerfolge hinsichtlich der Reproduktion physikalischer Prinzipien, jedoch weniger bei der Analogiebildung zwischen einfacheren Modellsystemen (Magnetpendel) und Strömungsphänomenen.

Die Untersuchungen von Stavrou [6,18] ergaben, dass Schüler des 12. Jahrgangs am Beispiel der Zinkdendriten-Entstehung das Zusammenwirken von gesetzmäßigen und zufälligen Prozessen in der Strukturbildung entdecken können. Darüber hinaus wurden auch die Prinzipien der Selbstverstärkung beim Wachstum der Dendriten und der Wiederholung beim Entstehen neuer Zweige (Verästelung) einsichtig (Rückkopplungsstruktur). Analogiebasierte Erklärungen der Entstehung von Bénard-Zellen gelangen den Lernenden, wenn die mikroskopischen Prozesse bei der Zellbildung eingehend durchgesprochen wurden.

1.2 Forschungsfrage der Untersuchung

Einige der oben zitierten Studien belegen, dass die Extraktion strukturtheoretischer Konzepte und Erkenntnisse aus geeigneten, strukturell analogen Beispielen möglich ist, wenn die Schülerinnen und Schüler ausreichend Gelegenheit haben, die Mikroprozesse der Systeme im Detail nachzuvollziehen und an kritischen Punkten Hilfestellung erhalten. Die hier beschriebene Untersuchung konzentriert sich auf Konzeptentwicklungen bei Schülerinnen und Schülern des 12. Jahrgangs, die sich durch Einsatz der in [1] beschriebenen Lerneinheit im Vorher-Nachher-Vergleich feststellen ließen. In der Einheit erkunden und erklären die Lernenden durch Analogiebildung nacheinander die folgenden selbstregulierenden Modellsysteme: Pickspecht, Reibungspendel, gestrichene Saite, angeblasene Orgelpfeife, Blutzuckerregulation, Adaption der Auge-Arm-Koordination, Preisregulation (Details in [1]). Dabei nutzen und entwickeln sie Vorstellungen von „Ordnung“, „Gleichgewicht“, „Rückkopplung“ bzw. „Regelkreis“, verbinden verschiedene strukturtheoretische Konzepte in Aussagen und entwickeln ein

Prozessdenken. Neben der Erhebung *deklarativen Wissens* zu den genannten Konzepten, besteht eine wesentliche Forschungsfrage darin, inwieweit die Schülerinnen und Schüler lernen, dieses Wissen auch *anzuwenden*, um das Verhalten von Systemen zu erklären, die eine Selbstregulation aufweisen.

1.3 Detailziele der untersuchten Einheit

In der in [1] vorgestellten Lerneinheit studieren die Schülerinnen und Schüler an den genannten Modellsystemen *Selbstregulation im engeren Sinne*: Eine Systemgröße entwickelt sich durch negative Rückkopplung(en) hin zu einem stabilen Wert; Störungen werden ausgedämpft. Wie in [1] dargestellt, untersuchen Schüler in kleinen Gruppen die Modellsysteme und fertigen nach entsprechenden Aufträgen möglichst selbstständig folgende Arten von Diagrammen an, die zur Extraktion der genannten Konzepte dienen (zur Rolle der grafischen Darstellungen siehe insbesondere [4]): (a) ein Zeitdiagramm zur Entwicklung der sich regulierenden Größe (\rightarrow Konzept „Ordnung“); (b) ein Behälterschema für den Energie- oder auch Materiestrom (\rightarrow Konzept „Fließgleichgewicht“); (c) ein Wirkungsdiagramm, das die Selbstregulation erklärt (\rightarrow Konzept „Rückkopplung“ bzw. „Regelkreis“).

Die Vorstellungen der Lernenden von „Ordnung“ und „Gleichgewicht“ sollen sich von rein statischen Ausprägungen hin zu einer Koexistenz von weiterhin berechtigten statischen und neuen dynamischen Vorstellungen entwickeln. Das Konzept „Rückkopplung“ sollte am Ende idealerweise folgende Elemente umfassen: eine *abstrakte* Formulierung der *zyklischen Wirkungsstruktur* (aus mindestens zwei Komponenten), das *wiederholte Durchlaufen* des Zyklus und die *dynamische Entwicklungsmöglichkeit* (Stabilisierung, Eskalation, Reduktion oder Oszillation).

Die Lehrkraft agiert in den Lernprozessen als Coach, d.h. sie stellt bei Bedarf leitende Fragen oder gibt Hinweise. Außerdem regt die Lehrkraft die Schülerinnen und Schüler zu Reflexion und begrifflicher Abstraktion an (zur Wichtigkeit dieser Funktion siehe [4]); insbesondere werden die Lernenden stimuliert, Zusammenhänge zwischen den neu entdeckten Prinzipien zu formulieren.

Ein übergeordnetes Ziel der Einheit besteht darin, dass Schülerinnen und Schüler sich Strategien aneignen, mit denen sie komplexe, rückgekoppelte Systeme analysieren können und deren Entwicklungen (in einfachen Fällen bzw. in Ausschnitten) erklären können. Zu diesem Zwecke wird eine Erwei-

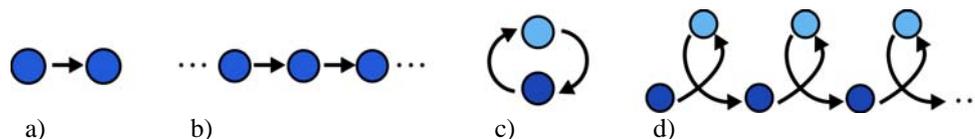


Abb. 1: Grundlegende Kategorien von Erklärungsmustern im Rahmen der Lernprozessstudie: Kreise symbolisieren Ursachen bzw. Wirkungen, Pfeile die Einwirkung. a) die lineare, zweikomponentige Ursache-Wirkungsverknüpfung, b) die lineare, mehrkomponentige Ursache-Wirkungskette, c) die zyklisch-statische Verknüpfung (Kausalkreis), d) die zyklisch-dynamische Verknüpfung mit „spiralförmiger“ Entwicklung.

terung bloß monokausal-statischer Erklärungsmuster in Richtung auf Muster angestrebt, die vielfache Vernetzung und insbesondere zyklische Verknüpfung von Ursachen und Wirkungen sowie dynamische Entwicklung einschließen. Hierbei entwickeln Schülerinnen und Schüler ihre „Rahmenvorstellungen“, v.a. ihre epistemologischen Rahmenvorstellungen, weiter (*framework theories* nach Vosniadou et al. [19], vgl. [3]). Einige im Rahmen der Untersuchung wesentliche Kategorien von Erklärungsmustern sind in Abbildung 1 symbolisch dargestellt.

2. Methode der Untersuchung

Mit Schülerinnen und Schülern aus Physik-Grundkursen wurde eine dreiteilige Lernprozessuntersuchung (zwei Pilotstudien, eine Hauptstudie) durchgeführt. Untersuchungsergebnisse zu den Schülerlernprozessen wurden bereits in [3] und [4] dargestellt, noch mehr Details findet man in [2]. Dieser Beitrag konzentriert sich auf die Entwicklungen der in den Abschnitten 1.2 und 1.3 genannten Schülerkonzepte und -fähigkeiten, die im Rahmen der Hauptstudie im Vorher-Nachher-Vergleich erfasst wurden.

2.1 Aufbau der Hauptstudie

Die Hauptstudie wurde mit acht Zweiergruppen von Schülerinnen und Schülern des 12. Jahrgangs (Alterspektrum 16-20, Schwerpunkt: 17-18 Jahre) durchgeführt. Die Probanden wurden aus drei Physik-Grundkursen zweier Gymnasien angeworben, indem der Umfang und die Ausrichtung der Studie vor allem auf physikalische und biologische Themen vom Interviewleiter (dem Autor dieses Artikels) bekannt gegeben wurden. Um nicht nur besonders interessierte Schüler zu erreichen, wurde eine Geldvergütung angeboten. Auf diese Weise fanden sich sechs weibliche und zehn männliche Probanden in acht Zweiergruppen (davon zwei gemischtgeschlechtliche) zusammen. Tatsächlich zeigten die Schüler in der Hauptstudie ein weit streuendes Leistungsvermögen, so dass ein relativ großes Spektrum möglicher Verläufe beobachtet werden konnte. Die Hauptstudie bestand für jede Gruppe aus vier bis fünf Lerninterviewsitzungen à 90-120 Minuten nach der Methode des erweiterten Teaching Experiments [20-22]. In diesen Sitzungen erkundeten die Lernenden nacheinander die genannten Modellsysteme der Einheit. Die Vorstellungen der Teilnehmer zu den zentralen Konzepten der Untersuchung wurden außer in den Interviewgesprächen in mehreren Fragebögen (FB 1-7) erhoben. Im Anschluss an das Ausfüllen jedes Fragebogens sowie des Concept Maps der Voruntersuchung gab es in der jeweils folgenden Sitzung ein Nachgespräch zu den Schülerantworten, um Missverständnisse zu vermeiden oder verkürzte schriftliche Darstellungen weiter auszuführen. Im Abstand von fünf Monaten nach dem Lernteil fand eine Langzeituntersuchung statt (siehe Tabelle 1).

Alle Erhebungsinstrumente wurden auf Basis der Ergebnisse der beiden Pilotstudien konzipiert. Die Erhebungsverfahren werden an dieser Stelle insoweit beschrieben, wie es für den Vorher-Nachher-Vergleich interessant ist; weiter gehende Darstellungen findet man in [3] und [2].

2.2 Bestandteile der Untersuchung zum Eingangszustand

Die Untersuchung zur konzeptuellen Ausgangssituation der Schülerinnen und Schüler bestand aus dem Fragebogen FB 1, einem Interview zu einem einfachen Räuber-Beute-System und aus einem Concept Mapping. Im mittleren Teil von FB 1 ging es um Vorstellungen der Probanden in Form *deklarativen Wissens* zu den Begriffen „Ordnung“, „Gleichgewicht“ und „Rückkopplung“. Es wurde nach Beispielen, nach einer Definition, nach der fachlichen Ansiedlung von Ordnung und Gleichgewicht sowie nach der Entstehung von Ordnung gefragt, so dass die Teilnehmer verschiedene Zugänge entwickeln konnten. Vorstellungen zum Begriff „Rückkopplung“ wurden mit nur einer Frage erhoben, da hier nach Ergebnissen der Pilotstudien nur geringe Vorkenntnisse erwartet wurden. Die Auslotung weitergehender Kenntnisse konnte sich im Nachgespräch

Inhaltliche Teile (Lerninterviews)	Zusätzliche Erhebungen
	<i>Voruntersuchung:</i> Fragebogen 1 Räuber-Beute-System Concept Map
Pickspecht, Teil 1 (MS 1)	
	Fragebogen 2
Pickspecht, Teil 2 (MS 1)	
	Vergleichsliste L 1
Reibungspendel (MS 2)	
	Fragebogen 3
Gestrichene Saite (MS 3)	
	Vergleichsliste L 2
Orgelpfeife (MS 4)	
	Fragebogen 4
Blutzuckerregulation (MS 5)	
	Vergleichsliste L 3
Zielwurf mit Prismenbrille (MS 6)	
	Fragebogen 5
Preisregulation (MS 7)	
	<i>Nachuntersuchung:</i> Vergleichsliste L 4 Abschlussinterview Fragebogen 6
	<i>Langzeituntersuchung nach 5 Monaten:</i> Fragebogen 7 Nachinterview

Tab. 1: Der Aufbau der Hauptstudie; inhaltliche Teile (Modellsysteme) und zusätzliche Erhebungsteile wechseln sich ab (von oben nach unten).

anschließen. Im letzten Fragenteil von FB 1 ging es um die *Anwendung* von Wissen zur Erklärung dynamischer Phänomene. Die Probanden sollten das Erzeugen eines Tons durch Reiben eines Fingers auf dem Rand eines Glases (Einschwingen durch Haft-Gleit-Mechanismus, vergleichbar mit dem Reibungsspendel, siehe [1]) und das Gleichbleiben der menschlichen Körpertemperatur erklären. Diese Phänomene waren allen Probanden in irgendeiner Form bekannt; interessant war, ob und wie die Teilnehmer sie als *dynamische, selbstregulierte* Phänomene verstehen, welcher Konzepte sie sich bei der Erklärung bedienen und wie sich diese Zugänge im Verlaufe der Studie ändern würden.

An zweiter Stelle der Voruntersuchung wurde ein Lerninterview zu einem einfachen Räuber-Beute-System, bestehend aus Schneeschuhhasen und Nordluchsen, geführt. Der Interviewleiter gab knappe einführende Erläuterungen zum System und stellte den Teilnehmern die Frage, was wohl passieren würde, wenn ein (nur kurzzeitig auftretender) Virus den Bestand der Nordluchse plötzlich stark reduzierte. Dieses Kurzinterview untersuchte, ob die Probanden in der Lage waren, eine selbstregulierende Systementwicklung zu beschreiben, in einem Zeitdiagramm der Populationszahlen darzustellen, sie zu erklären und dazu die Wechselwirkungsstrukturen des Systems – eventuell mit Anfertigung eines Wirkungsdiagramms – heranzuziehen. Außerdem wurde erhoben, ob und wie die Schülerinnen und Schüler den Gleichgewichtsbegriff in diesem ökologischen Kontext verwendeten.

Ein Concept Mapping stellte den Probanden die Aufgabe, vorgegebene Begriffe aus dem Bereich der Mechanik und dem Bereich von Selbststrukturierungsphänomenen, ohne dass ein bestimmter Kontext gegeben wäre, anzuordnen und mit beschrifteten Pfeilen zu verknüpfen. Bei den Begriffen der Mechanik handelte es sich um „Kraft“, „Masse“, „Bewegung“, „Raum“, „Zeit“, „Energie“, „Energieaufnahme“, „Energieverlust“, „Gleichgewicht“, „Geschwindigkeit“, „Reibung“, und „Wärme“. Aus dem Bereich der Selbststrukturierung (inklusive einiger alltäglich gebräuchlicher Begriffe) wurden angeboten: „Konstanz“, „Fließgleichgewicht“, „Selbstregulierung“, „Periodizität“, „Selbststrukturierung“, „Gleichmäßigkeit“, „Gleichförmigkeit“, „Regelkreis“, „Selbstorganisation“, „Rückkopplung“, „Ordnung“, „Zustand“ und „System“. Das Concept Mapping und insbesondere auch die anschließende Nachbesprechung mit den Probanden zu ihrem fertigen Map sollten u.a. zu Tage fördern, welche Begriffe der Selbststrukturierung den Schülern überhaupt schon bekannt waren und ob sie diese untereinander und mit der Mechanik in Verbindung setzen konnten.

Auch die Behandlung des ersten Modellsystems, des Spielzeug-Pickspechts trug zur Untersuchung der Ausgangslage bei: Zu Anfang konnten die Schülerinnen und Schüler den Pickspecht ganz frei erkun-

den und sollten ihn beschreiben und erklären. Hier traten Schülerkonzepte in *Anwendung* zu Tage: Es wurde deutlich, inwieweit die Lernenden mit Energieformen und Energieumwandlungen umgehen und ob sie die Konzepte Ordnung, Gleichgewicht, Rückkopplung in dynamischer Ausprägung auf das Modellsystem anwenden konnten.

2.3 Bestandteile der Untersuchung zum Endzustand

Die Behandlung der letzten Modellsysteme (MS 4-7) fand in deutlich kürzerem zeitlichem Rahmen statt als die der ersten drei Modellsysteme, an denen die neuen Konzepte zum ersten Mal gebildet werden mussten. Somit ist es sinnvoll, Ergebnisse der Behandlung von MS 4-7 zur Beschreibung des gegen Ende erreichten Wissensstands heranzuziehen. Dabei bot die Orgelpfeife (MS 4, letztes physikalisches Modellsystem) v.a. ein schnelles transientes Phänomen (Tonaufbau beim Anblasen; → Ergebnisse zum Prozessdenken) und ein energetisches Fließgleichgewicht an. Aus den Schülerbetrachtungen zur Blutzuckerregulation (MS 5) ließen sich die erworbenen Fähigkeiten zur Anwendung des (Fließ-)Gleichgewichtskonzepts und so wie aus der Diskussion des Wurfexperiments (MS 6) und des Preisniveaus (MS 7) Ergebnisse zur Anwendung der Konzepte Ordnung und Rückkopplung- bzw. Regelkreis erheben. Auch Veränderungen in der Herangehensweise der Schülerinnen und Schüler an komplexe Systeme konnten sich bei den Modellsystemen 4-7 zeigen.

Fragebogen 6 zum Abschluss des Lernteils der Studie zielte u.a. darauf ab, inwieweit die Schülerinnen und Schüler systemische Sichtweisen erworben hatten. Zwei Fragen untersuchten, ob den Lernenden deutlich geworden war, was für Systeme man durch Rückgriff auf Regelkreise erklären könne (Schluss von der Beobachtung einer Stabilisierung auf das Vorhandensein eines Regelkreises). Eine Aufgabe forderte dazu auf, in einigen Sätzen die Zusammenhänge zwischen den Begriffen, „Regelkreis“, „Gleichgewicht“, „Ordnung“, „Zustand“, „Gleichmäßigkeit“, „Selbstregulierung“ und „offenes System“ zu erklären.

Nach fünf Monaten fand dann eine *Langzeituntersuchung* statt. Jeder Proband füllte den Fragebogen 7 aus und kam dann in ein Interview. FB 7 fragte u.a. jeweils nach Beispielen und nach Definitionen der Begriffe „Ordnung“, „Gleichgewicht“ und „Rückkopplung“. Hier sollte sich zeigen, inwieweit sich das deklarative Wissen der Probanden erhalten hatte und ob die Konzepte noch dynamisch aufgefasst wurden. Im abschließenden Interview wurden jedem Probanden mit kurzen Worten, die viel Spielraum für eigene Überlegungen ließen, vier *neue* Beispielsysteme angedeutet, um herauszufinden, ob sie diese von alleine anhand dynamischer Konzepte analysieren konnten (Zielpunkte in Klammern): „eine Bakterienkultur“ (Selbstregulation bei begrenzter Nahrungszufuhr führt zu logistischem Wachstum), „Ski-

fahren auf einem Hang mit konstanter Neigung“ (dynamisches Gleichgewicht von Hangabtriebs- und Reibungskraft oder auch von Energiezufuhr und -abgabe), „eine Weihnachtspyramide“ (energetisches Fließgleichgewicht), „zwei Kassenschlangen“ (dynamisches Gleichgewicht). Nach einer ersten Behandlung dieser vier Systeme wurde eine Phase der Erinnerung an den Lernteil vor fünf Monaten eingeschaltet. Hier konnten die Schülerinnen und Schüler die zentralen Konzepte an selbst gewählten Beispielen der damaligen Sequenz grafisch rekonstruieren. Nach dieser Konzept-Rekonstruktion wurden noch einmal die vier neuen Beispiele betrachtet.

2.4 Erläuterungen zur Auswertung

Neben den schriftlichen Antworten in den Fragebögen waren die anschließenden Interviews jeweils von großer Bedeutung, um zu knappe schriftliche Äußerungen zu erhellen. Insbesondere wurde oft erst hier deutlich, ob die Konzepte der Probanden bereits dynamische Anteile hatten. Als dynamischer Anteil wurde jede ohne größere Hilfestellung erbrachte Erläuterung gewertet, die Prozesse (Abläufe) und nicht bloße statische Konfigurationen mit einbezog. So kann etwa die Beschreibung „wiederkehrendes Muster“ für *Ordnung* rein statisch im Sinne eines räumlichen, unveränderlichen Musters aufgefasst werden oder auch dynamisch, wenn man zum Beispiel an periodische Bewegungsmuster denkt (so bei einer Schülerin in der Langzeituntersuchung). Beispielen für *Gleichgewicht* wurden dann deutliche dynamische Anteile zuerkannt, wenn darunter nicht nur die Gleichheit oder das Gleichbleiben von Größen verstanden wurde, sondern auch Prozesse des fortwährenden Austauschs (z.B. Zu- und Abfluss) oder der Stabilisierung im Falle von Schwankungen miteinbezogen wurden. Die Beispiele und Definitionen der Probanden zu „Ordnung“, „Gleichgewicht“ und „Rückkopplung“ inklusive der Äußerungen in den Nachbesprechungen wurden als *rein statisch*, *überwiegend statisch* (nur schwach erkennbare dynamische Anteile) oder mit *deutlichem dynamischem Anteil* klassifiziert (siehe Abschnitt 3). Es sei noch einmal angemerkt, dass die recht aufwändig erhobenen Daten in verschiedenen Dimensionen ausgewertet worden sind. Über Ergebnisse mehrerer Dimensionen ist bereits in [3] und [4] berichtet worden; im Folgenden werden ergänzend die Ergebnisse des Vorher-Nachher-Vergleichs zur Konzeptentwicklung dargestellt.

3. Konzeptentwicklung im Vorher-Nachher-Vergleich

3.1 Konzept *Ordnung*

3.1.1 Deklaratives Wissen

Die 16 Probanden der Hauptstudie wurden zu Anfang (FB 1) und in der Langzeituntersuchung (FB 7) befragt, welche Beispiele von „Ordnung“ sie kennen und wie sie „Ordnung“ definieren würden. Aus den

genannten Beispielen und expliziten Äußerungen zu Domänen wurde extrahiert, mit welchen Bereichen bzw. Disziplinen die Schülerinnen und Schüler den Begriff *Ordnung* von sich aus in Beziehung brachten. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der Auszählung im Vorher-Nachher-Vergleich; einige wesentliche Resultate werden besprochen: Die Schülerinnen und Schüler siedelten den Begriff *Ordnung* zu Anfang der Untersuchung (FB 1) vorrangig in verschiedenen Naturwissenschaften an, v.a. in Physik und Biologie, die nach Ankündigung auch den Kern der Studie ausmachen sollten. Daneben wurde *Ordnung* vor allem aber auch mit dem Alltag verknüpft. Eine *inhaltliche* Analyse der genannten Beispiele für Ordnung ergab folgendes Bild: Neun von 15 Ordnungsbeispielen im Alltag bezogen sich auf die *statische Ordnung* des „aufgeräumten Zimmers“ (Haushalt, Ordnung halten o.Ä.), fünf weitere auf sortierte Anordnungen, Hefter oder Lagerhaltung (ebenfalls statisch). Die physikalischen und chemischen Beispiele waren ebenfalls weit überwiegend statischer Natur (und wurden auch auf Nachfrage nicht dynamisch erläutert): „Ordnung“ bei Lichtbeugung (dreimal), Periodensystem, Aggregatzustände, Gesetze der Physik (je zweimal), Sonnensystem, Atom-, Molekülbau, Ordnung in der Versuchsauswertung, im Gleichgewicht ruhende Gegenstände (je einmal). Hingegen fanden sich im Bereich Biologie sowohl statische Beispiele (zweimal Klassifizierung

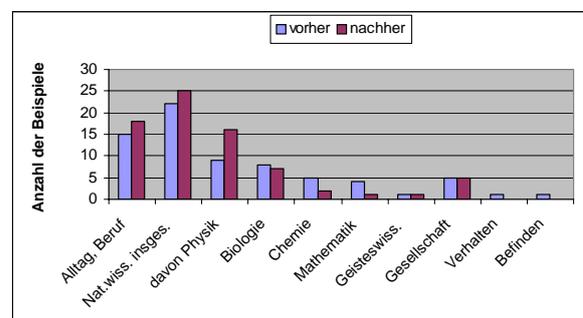
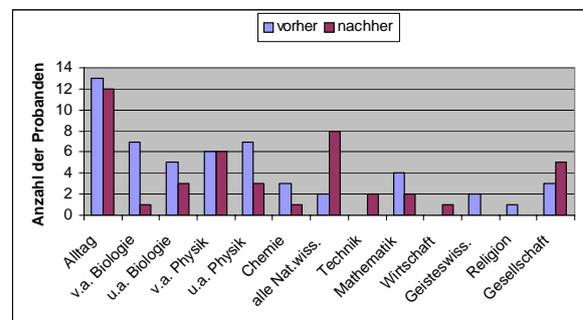


Abb. 2: Ansiedlung des Begriffs *Ordnung* in bestimmten Bereichen (oben) und Nennungen von Beispielen aus verschiedenen Bereichen (unten) durch die 16 Probanden zu Anfang und am Ende der Studie im Langzeittest (Mehrfachnennungen möglich).

von Lebewesen, einmal Anordnung in Zelle) als auch dynamisch aufgefasste Beispiele („Ordnung in der Natur“, „Ernährungskreislauf“ je einmal). Die Bereiche der Biologie und auch des Verhaltens (gesellschaftlich u.a.) boten den Schülerinnen und Schülern zu Anfang eher Möglichkeiten zur Bewusstmachung dynamischer Vorgänge als die Physik.

Bei ihren *Definitionen* für Ordnung griffen die Probanden noch stärker auf Formulierungen *statischer* Gegebenheiten zurück. Zehn der 14 gegebenen Definitionen waren rein statisch (z.B. „logische, übersichtliche Anordnung von Dingen“), die dynamischen Anteile der restlichen vier Definitionen bezogen sich nur in einem Fall auch auf „physikalische Vorgänge“. Abbildung 3 liefert eine Übersicht zur Verteilung statischer und dynamischer Vorstellungen von Ordnung im Vorher-Nachher-Vergleich.

Zur *Entstehung von Ordnung* konnten sich zwei Probanden gar nicht äußern, 13 Angaben bezogen sich auf menschliche Handlungen (aufräumen, sortieren, sich selbst beschränken), vier brachten physikalische Kategorien ins Spiel (dreimal: Kraft / Energie aufwenden, einmal: durch Versuchsaufbau). Die Äußerungen zweier Probanden ließen auf natürliche Selbstordnung schließen (z.B. „zwei oder mehr Kräfte erzwingen ein Mittelmaß“).

Das *Concept Mapping* der Voruntersuchung – dies sei kurz angedeutet – bestätigte, dass nur wenige Schülerinnen und Schüler den Begriff Ordnung mit physikalischen *Prozessen* in Verbindung brachten. Deutlich taten dies nur zwei Probanden („Periodizität“ als „eine Form von Ordnung“, „Wärme“ als „ungeordnete Bewegung“).

In der Langzeituntersuchung nach fünf Monaten (FB

7) erwiesen sich manche Vorstellungen als stabil (z.T. berechtigt), und es ergaben sich auch viele im Sinne der Lernziele positive Entwicklungen. Der Alltagsbegriff von *Ordnung* bewahrte seine Bedeutung. Die Physik setzte sich, was die Anzahl der Beispiele angeht, von den anderen Naturwissenschaften deutlich ab (Effekt der Gewichtung der Lerneinheit) und „Ordnung“ wurde nun von der Hälfte der Probanden explizit in „allen Naturwissenschaften“ angesiedelt, ein Erfolg der fächerübergreifenden Konzeption der Einheit. Die inhaltliche Analyse der Beispiele zeigte, dass von 16 Probanden nur noch einer sich, Beispiele *und* Definition betreffend, mit rein statischen Formulierungen über Ordnung äußerte (gegenüber fünf Probanden im Vortest). Alle anderen Teilnehmer hatten zumindest leichte dynamische Anteile in ihren Äußerungen, elf Probanden sogar deutlich dynamische Formulierungen, davon acht sowohl bei Beispielen als auch Definition. Bei den Alltagsbeispielen überwogen nach wie vor deutlich die statischen Auffassungen (elfmal: Ordnung im Zimmer, viermal: Sortiertes), und im Bereich Biologie blieb die Mischung statischer und dynamischer Beispiele bestehen. Hingegen wurden nun von sechs verschiedenen Probanden neun dynamische Beispiele im Bereich Physik genannt, davon nur zwei mit direktem Bezug auf Beispiele der Modellsystemsequenz. Des Weiteren ging die Anzahl der rein statischen *Definitionen* von zehn (von 14 gegebenen) auf fünf (von 16 gegebenen) zurück. Die Schülerinnen und Schüler arbeiteten nun mit fachübergreifend gültigen Formulierungen wie „Regelmäßigkeit, wiederkehrendes Muster (auch zeitlich)“, „Zustand, in dem ein komplexes System funktioniert“, „System, in dem Faktoren harmonisieren“ oder „gleich bleibender, sich bei Störungen selbst regulierender Vorgang“. Die Nähe vieler Beispiele und Formulierungen zu den Inhalten der Unterrichtseinheit sowie die Schülerberichte über wenig Anknüpfungsmöglichkeiten im zwischenzeitlichen Schulunterricht lassen die Vorstellungsentwicklungen zumindest größtenteils auf die Lerneinheit zurückführen. Gleiches gilt für die weiter unten behandelten Konzepte.

3.1.2 Anwendung des Konzepts *Ordnung*

Neben dem Zuwachs an deklarativem Wissen wurde in der Untersuchung der *spontane Einsatz* von Begriffen bzw. Konzepten zur Analyse neuer Modellsysteme betrachtet. Die Behandlung der ersten Modellsysteme zeigte, wie ungewohnt die Verwendung des dynamischen Ordnungsbegriffs für alle Probanden war. Im Verlaufe der Lerneinheit änderte sich, was die *völlig selbstständige* Verwendung des Begriffs angeht, wenig. Bei Analyse der Blutzuckerregulation (MS 5) benutzte nur ein Schüler den Begriff spontan, indem er die gerade skizzierten Regelkreise spontan als „Ordnungskreise“ bezeichnete, weil sie eine Ordnung, nämlich das Gleichbleiben des Blutzuckerspiegels sichern. Sieben weitere Probanden

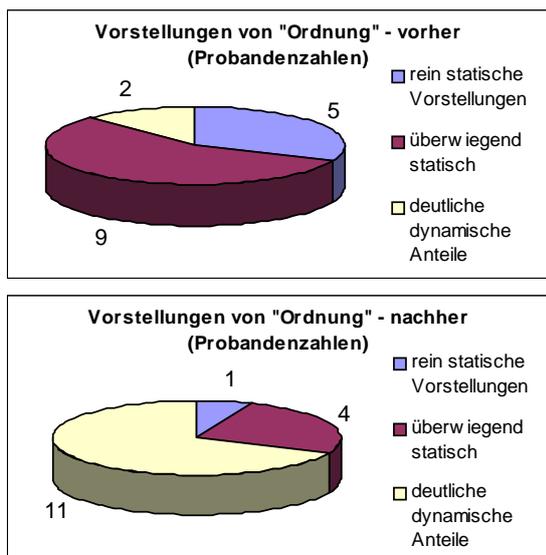


Abb. 3: Anzahl der Probanden (insges. 16) mit rein statischen, überwiegend statischen und zu deutlichen Teilen dynamischen Vorstellungen von *Ordnung* im Vergleich von Vortest und Langzeittest.

aus sechs Gruppen brachten den Begriff auf Nachfrage nach Ähnlichkeiten mit den anderen Modellsystemen ein, meist mit Bezug auf das *Gleichbleiben* des Blutzuckerspiegels. Zwei Schüler bezogen sich ausdrücklich auf das Gesamtgefüge der Abläufe. In der Langzeituntersuchung nach fünf Monaten ergab sich folgendes Bild: Bei Analyse der vier neuen Beispielsysteme nutzen nur zwei Schüler den Begriff „Ordnung“ vor der Erinnerungsphase spontan (zumindest bei einigen der vier Beispielsysteme), ein weiterer tat dies nach der Erinnerungsphase. Anzeichen einer sehr zurückhaltenden Verwendung des dynamischen Ordnungsbegriffs zeigten sich auch in einer Untersuchung von H. Vogt [23]. Demgegenüber bildete sich in allen Gruppen schon nach ein bis zwei Modellsystemen die Fähigkeit heraus, auf regelmäßige Abläufe bzw. gleich bleibende Zustände zu fokussieren und die Beobachtung als Ausgangspunkt für weitere Überlegungen zur Stabilisierung der Prozesse zu nutzen (vgl. [3]). Vereinfacht ausgedrückt: Dynamische Ordnung wurde also erkannt, aber nicht als solche benannt. Um an den herkömmlichen Begriff von Ordnung besser anzuknüpfen, müssten – so ist zu vermuten – neben dem Zeitdiagramm zusätzlich noch andere *räumliche Veranschaulichungen* der zeitlichen Regularität, beispielsweise Phasendiagramme, genutzt werden (siehe auch [23]).

3.2 Konzept Gleichgewicht

3.2.1 Deklaratives Wissen

Bei den Beispielen und Definitionen der 16 Schülerinnen und Schüler zum Begriff „Gleichgewicht“ (Daten aus FB 1, FB 7 und jeweils anschließenden Interviews) ergab sich folgendes Bild: In der Voruntersuchung konnten die Probanden „Gleichgewicht“ viel leichter in Beziehung mit Physik bringen als den Begriff „Ordnung“. Dabei zeigte sich weit überwiegend eine Vorstellung vom statischen Kräftegleichgewicht (in verschiedenen Formulierungen, z.B. „zwei gleiche Massen“, „Waage“, „Wippe“). Auch aus anderen Bereichen tauchten mehr Beispiele auf, was sich in den absoluten Zahlen niederschlug. Nach der Physik spielte die Biologie die wichtigste Rolle, insbesondere die Ökologie, danach auch die Bereiche Chemie, Politik, menschliches Befinden und Verhalten. Dem Begriff „Gleichgewicht“ wurde also von vornherein Bedeutung in vielen Domänen zuerkannt (vgl. Abb. 4).

Nur eine Probandin beschrieb ein dynamisches Gleichgewicht aus dem Bereich der Physik, nämlich die „radioaktive Zerfallskette“. Aus anderen Bereichen kamen mehr Beispiele dynamischer Vorstellungen: das „Reaktionsgleichgewicht“ aus der Chemie (zweimal), „Angebot und Nachfrage“ aus der Ökonomie (einmal), das Stoffwechselgleichgewicht bei Lebewesen aus der Biologie (zweimal) und das „ökologische Gleichgewicht“ oder das „natürliche Gleichgewicht der Arten“ (siebenmal, davon dreimal deutlich dynamisch erklärt).

Bei ihren *Definitionen* griffen zwölf Schülerinnen und Schüler auf die „Gleichheit“ oder das „Sich-Ausgleichen“ zweier oder mehrerer „Kräfte“ (fünfmal) oder allgemeiner von „Eigenschaften“, „Sachen“, „Dingen“ oder „Komponenten“ zurück. Lediglich ein Schüler konnte einen Ausgleichsvorgang beschreiben, und nur zwei Schülerinnen deuteten ein fortgesetztes Aufeinander-Einwirken an (Auszählung in Abb. 5).

Bei der Besprechung des *Räuber-Beute-Systems* aus Hasen und Luchsen im Rahmen der Voruntersuchung konnten alle acht Schülergruppen den Begriff „Gleichgewicht“ einbringen (sechsmal spontan, zweimal auf kurze Nachfrage). Bei zehn Probanden wurde deutlich, dass sie darunter die *Gleichheit* der Populationszahlen von Hasen und Luchsen verstanden, und dies auch nachdem die Wirkungsbeziehungen zwischen Hasen und Luchsen bereits herausgearbeitet worden waren. Alle 16 Teilnehmer gingen davon aus, dass sich die Populationszahlen ohne äußere Störungen auf *konstante Werte* einstellen würden. Hier ist von überwiegend bis deutlich statischen Gleichgewichtsvorstellungen in Anwendung zu sprechen.

Beim *Concept Mapping* zeigten sich ebenfalls überwiegend statische Gleichgewichtsvorstellungen. Zwar konnte die Hälfte der Probanden den Begriff „Gleichgewicht“ oder „Fließgleichgewicht“ mit „Energieaufnahme“ und „Energieverlust“ verbinden,

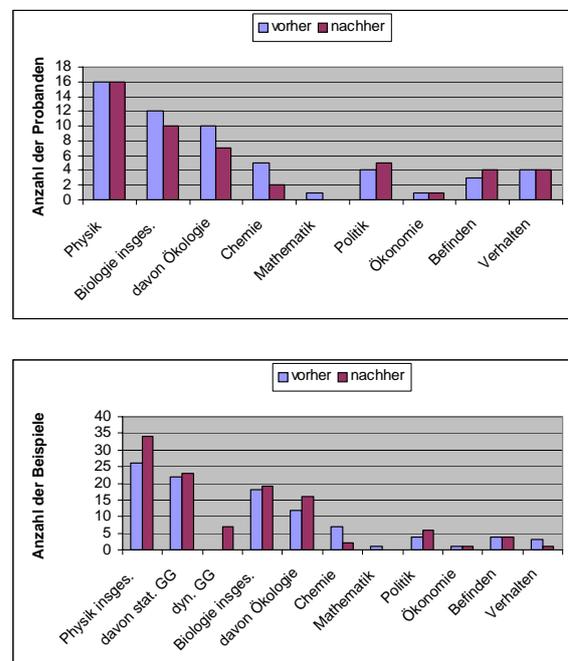


Abb. 4: Ansiedlung des Begriffs *Gleichgewicht* in bestimmten Bereichen (oben) und Nennungen von Beispielen aus verschiedenen Bereichen (unten) durch die 16 Probanden zu Anfang und am Ende der Studie im Langzeittest (Mehrfachnennungen möglich).

dies jedoch allein aufgrund des Wortlauts (mithin eine gute Anknüpfungsmöglichkeit), kannte dazu aber (bis auf einen Schüler) noch keine Beispiele. Lediglich eine Schülerin kannte die Regulation von Energieaufnahme und -verlust bei Lebewesen.

In der *Langzeituntersuchung* nach fünf Monaten ergaben sich leichte Veränderungen in der *Ansiedlung* des Begriffs Gleichgewicht (Abb. 4): Die Chemie verlor aufgrund der Gewichtung der Lerneinheit etwas an Boden, die Zahl der Physik-Beiträge nahm noch zu, und zwar vor allem dadurch, dass nun siebenmal das energetische Fließgleichgewicht eingebracht (und dynamisch erklärt) wurde. Bei den Bio-Beispielen verlagerte sich der Schwerpunkt noch ein wenig weiter in Richtung Ökologie, wobei die ökologischen Beispiele größtenteils dynamisch verstanden wurden. Auch das statische Kräftegleichgewicht war nach wie vor vertreten, so dass es insgesamt zur intendierten Mischung aus statischen und dynamischen Vorstellungen und einer Ausweitung dynamischer Vorstellungen in den Bereich der Physik kam. Auch bei den *Definitionen* von Gleichgewicht wurden Fortschritte deutlich. In der *Langzeituntersuchung* fanden sich nur noch drei statische Definitionen, drei mit leichten und zehn mit deutlichen dynamischen Ansätzen. Dabei bezogen sich insgesamt elf Probanden auf den Aspekt des dynamisch verstandenen Ausgleichs bzw. Sich-Aufhebens zweier oder mehrerer Wirkfaktoren (z.B.: „etwas, das sich zumindest nach außen hin nicht mehr ändert, weil sich die beteiligten Kräfte oder Energien des Systems gegenseitig ausgleichen.“). Acht Schülerinnen und Schüler bezogen sich auf das Phänomen der Stabilität. Zwei erwähnten den Vorgang des „Sich-

Herstellens“ bzw. „Einpendelns“ und einer nannte „Rückkopplung“ als Bedingung. Im Ganzen waren es nur drei Probanden, die in der *Langzeituntersuchung* noch in vorwiegend statischen Vorstellungen von Gleichgewicht verharren, rein statische Vorstellungen sowohl in Beispielen und Definition hatte keiner mehr (Abbildung 5).

3.2.2 Anwendung des Konzepts *Gleichgewicht*

Zu Anfang der Modellsystemsequenz, d.h. beim Pickspecht, fanden Gleichgewichtsvorstellungen keine spontane Anwendung vonseiten der Schülerinnen und Schüler. Auch dies belegte, dass die Verknüpfungen mit „(Fließ)Gleichgewicht“ in einigen der Concept Maps aufgrund des Wortlauts, aber ohne tieferes Verständnis zustande gekommen waren (vgl. Abschnitt 3.2.1). Nach ersten eigenen Erklärungsversuchen zum Pickspecht konstruierten die Schülergruppen mit Unterstützung des Interviewleiters zum ersten Mal das grafische Schema des energetischen Fließgleichgewichts; der Begriff „Fließgleichgewicht“ wurde eingeführt. Durch mehrfache Anwendung des Konzepts im Laufe der Lerneinheit änderte sich das Bild: Beim vierten Modellsystem, der Orgelpfeife, erkannten sechs Teilnehmer (aus sechs von acht Gruppen) spontan das Vorliegen eines Fließgleichgewichts, das, führt man sich den Luftstrom vor Augen, hier besonders gut zugänglich wird. Bei der Blutzuckerregulation waren es sogar 14 (von 16) Probanden, die dynamische Gleichgewichtsvorstellungen von sich aus oder sehr schnell auf Nachfrage nach Ähnlichkeiten mit vorangehenden Modellsystemen einbrachten. Dabei profitierten sie von ihrem Alltagswissen zu Nahrungs- bzw. Energieaufnahme und -abgabe. Zwei Probanden übertrugen den Gleichgewichtsbegriff von sich aus auch auf Signaleingang und -ausgang einzelner Komponenten der Blutzuckerregelkreise.

In der *Langzeituntersuchung* nach fünf Monaten waren sechs Schülerinnen und Schüler *vor* der Erinnerungsphase in der Lage, bei mindestens einem der neuen Beispiele alle wesentlichen Komponenten der dynamischen Gleichgewichtsstruktur herauszuarbeiten, vier weitere Teilnehmer schafften dies mit leichter Hilfe, zwei lieferten immerhin Ansätze. Die Anwendungen des Gleichgewichtskonzepts verteilten sich in etwa gleich auf die physikalischen und nicht-physikalischen Beispiele. Dabei wurde der Begriff „(Fließ)Gleichgewicht“ jedoch nur von vier Probanden eingebracht. *Nach* der Erinnerungsphase inklusive der grafischen Rekonstruktion des Fließgleichgewichtsschemas wurde das Konzept von drei weiteren, also insgesamt 15 Teilnehmern für neue Beispiele eingesetzt. Das Fließgleichgewichtsschema skizzierten *vor* der Erinnerungsphase vier Probanden von sich aus, *während* und *nach* der Erinnerungsphase waren es weitere neun Teilnehmer. Insgesamt zeigte sich, dass etwa drei Viertel der Schülerinnen und Schüler – zum Teil mit leichter Hilfe – auch fünf Monate nach dem Lernteil noch Gleich-

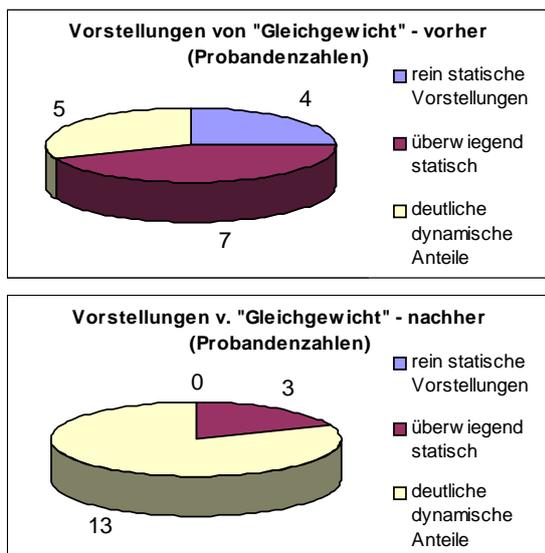


Abb. 5: Anzahl der Probanden (insges. 16) mit rein statischen, überwiegend statischen und zu deutlichen Teilen dynamischen Vorstellungen von *Gleichgewicht* im Vergleich von Vortest und Langzeittest.

gewichtungsstrukturen entdecken konnten; das grafische Schema und der Gleichgewichtsbegriff konnten bei fast allen leicht reaktiviert werden.

3.3 Konzept Rückkopplung / Regelkreis

3.3.1 Deklaratives Wissen

Die Eingangsuntersuchung förderte folgende Kenntnisse zu Tage: 13 der 16 Schülerinnen und Schüler brachten den Begriff „Rückkopplung“ mit Musikveranstaltungen, dem Musikmachen oder dem Rundfunk in Verbindung. Sieben Probanden beschrieben den lauten Pfeifton. Elf Teilnehmer wussten von zwei relevanten Komponenten zu berichten (z.B. „Mikro“ und „Box“ / „Lautsprecher“ / „Verstärker“), davon sieben jedoch ohne zyklische Wirkungsstruktur. Sechs gaben an, das Phänomen nicht erklären zu können, zwei führten „Frequenzen“ ins Feld ohne genauere Begründung. Insgesamt vier Probanden beschrieben spontan den wiederholt durchlaufenen Zyklus, eine weitere Schülerin auf Nachfrage. Nur eine Schülerin, die zusätzlich auch das Beispiel der Videorückkopplung mit Videokamera und Monitor einbrachte, beschrieb – leicht unsicher – die abstrakte Wirkungsstruktur: „Die Wirkung ist gleichzeitig die Ursache“. Nur zwei Probanden berichteten spontan vom Lauterwerden des Tons; die Möglichkeiten der Stabilisierung, Reduzierung (Konkurrenzfall) oder des Oszillierens brachte kein Proband mit Rückkopplung in Verbindung (Auszahlung zu den Konzeptbestandteilen in Abb. 6).

Auch das *Concept Mapping* zeigte, dass die Schülerinnen und Schüler den Begriff Rückkopplung anfangs noch gar nicht mit Physik oder dem Bereich der Selbstregulation in Beziehung setzen konnten.

Die *Langzeituntersuchung* belegte deutliche Fortschritte fast aller Schülerinnen und Schüler in Bezug auf das Konzept Rückkopplung: In FB 7 konnten sieben Probanden eine sehr gute Definition für „Rückkopplung“ geben, d.h. eine abstrakte Definiti-

on inklusive Zyklusstruktur, z.B. „...wenn man eine Komponente A verändert und diese Veränderung sich (über B) wieder auf A auswirkt.“ Sieben weitere gaben eine gute, aber durch Bezug auf z.B. „Kräfte“ oder „Energien“ nicht ganz allgemeine Definition, z.B. „... wenn eine Kraft so wirkt, dass eine weitere Kraft aktiviert wird, welche dann die erste wieder aktiviert.“ 13 Teilnehmer erwähnten von sich aus das *wiederholte* Durchlaufen des Wirkzyklus. Sechs Teilnehmer gaben die Verstärkungswirkung, fünf die stabilisierende Wirkung an (meist mit Bezug auf bestimmte Beispiele). Fünf Probanden nannten zunächst gar keine Entwicklungsmöglichkeit. Im Nachinterview konnten alle bis auf fünf Probanden fehlende Entwicklungsmöglichkeiten – z.T. mit leichter oder einiger Hilfe – ergänzen.

Insgesamt elf Schülerinnen und Schüler zeichneten bereits in FB 7 eine zutreffende Skizze zum Begriff „Rückkopplung“, davon vier allgemeine, drei nicht ganz allgemeine und vier auf ein konkretes Beispiel bezogene Skizzen, die im Nachinterview größtenteils verallgemeinert wurden. Fünf Teilnehmer erbrachten in FB 7 keine (zutreffende) grafische Darstellung (zumeist im Nachinterview nachgeholt).

3.3.2 Anwendung des Konzepts

Die geringen und sehr speziellen Kenntnisse zum Begriff „Rückkopplung“ führten dazu, dass zu Anfang der Untersuchung das Rückkopplungskonzept nicht zur Beschreibung der vorgestellten Beispielsysteme eingesetzt werden konnte. In FB 1 beschrieb lediglich ein Schüler Ansätze einer Wechselwirkung von „Antrieb und Hemmung“ beim Reiben einer Glaskante mit dem Finger. Zur Regulation der Körpertemperatur schilderten sieben Versuchspersonen mögliche Reaktionen des Körpers in den Fällen zu geringer oder zu hoher Körpertemperatur; die Rückwirkung auf die Temperatur wurde dabei eventuell mitgedacht, aber in keinem Falle wurde ein geschlossener Zyklus explizit konstruiert. Beim

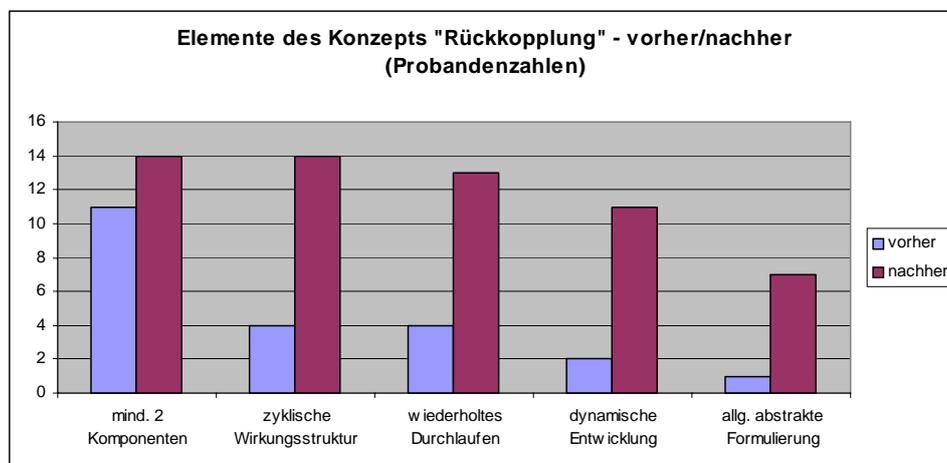


Abb. 6: Anzahlen der Probanden (insgesamt 16), deren Wissen verschiedene wünschenswerte Elemente des Konzepts „Rückkopplung“ umfasste, im Vergleich von Vortest und Langzeittest.

ersten Modellsystem der Lerneinheit, dem Pickspecht, konnte das Konzept ebenfalls von keinem Probanden selbstständig eingesetzt werden, sondern wurde erst aufwändig konstruiert (vgl. die Lernphasen in [1]). Dieser Anfangsbefund war aufgrund der hohen Anforderung insbesondere bei physikalischen Beispielen, eine Rückkopplung zu erkennen, auch nicht anders erwartet worden.

Durch mehrfache Konstruktion von Regelkreisen im Verlaufe der Lerneinheit wandelte sich dieses Bild. Um dies zu belegen, wird die Behandlung des 5. Modellsystems, der Blutzuckerregulation, mit den Schülerinnen und Schülern herangezogen: Die Probanden wurden zunächst aufgefordert, ihr Vorwissen über den Blutzucker zusammenzutragen. Hier gelang es in sieben der acht Gruppen, ausgehend von konkreten „Störfällen“ (Blutzucker zu hoch / niedrig), ihr bis dahin entwickeltes mentales Regelkreisschema zu aktivieren. Die umfangreichen Informationen zur Blutzuckerregulation, die daraufhin vom Interviewleiter verbal weitergegeben wurden, konnten in diesen Gruppen gut in das Schema eingeordnet werden. Alle Gruppen bedienten sich spontan des Werkzeugs der grafischen Konstruktion eines Wirkungsdiagramms, was zu einem mehrfach vernetzten Rückkopplungsschema führte (vgl. die Musterlösung in Abb. 16 in [1]).

In der *Langzeituntersuchung* nach fünf Monaten ergab sich ein geteiltes Bild: Einerseits war die Fähigkeit der Schülerinnen und Schüler deutlich angewachsen, an neuen Beispielsystemen rückkoppelnde Wirkungsstrukturen Schritt für Schritt herauszuarbeiten. Dies gelang schon vor der Erinnerungsphase zehn Teilnehmern beim einen oder anderen der vier Beispiele recht selbstständig, drei weitere benötigten dazu einige Hilfsfragen. Bei den physikalischen Modellsystemen wirkte sich der Lerngewinn hinsichtlich Reibung und Energieformen inklusive Wärmeenergie deutlich positiv aus: Die Probanden waren in der Lage, so viele Größen und Zusammenhänge zu entdecken, dass sich daraus häufig zyklische Gefüge ergaben. Andererseits wurden diese nur selten als solche abstrahiert und benannt. Lediglich zwei Schüler verwendeten *vor* der Erinnerungsphase den Begriff „Rückkopplung“, eine weitere Schülerin erkannte selbstständig eine „Wechselwirkung“. Vor der Erinnerungsphase konstruierten drei Teilnehmer ein Wirkungsdiagramm in Form eines Regelkreises. Die *Rekonstruktion* des Regelkreisschemas gelang in der Erinnerungsphase elf weiteren Probanden (also allen bis auf eine Schülerin). In der Folge konnten sie es – zum Teil mit einiger Hilfe – zur Erklärung mindestens eines Beispielsystems heranziehen. Hier manifestierte sich quantitativ, welche große Bedeutung der grafische Zugang für die meisten Probanden hatte. Nach der Erinnerungsphase gelang auch die begriffliche Abstraktion der Strukturen: Ein weiterer Schüler sprach von „Rückkopplung“, neun weitere von „Regelkreis“.

3.4 Strukturtheoretische Aussagen

Der Lernzuwachs im Hinblick auf die in der Untersuchung zentralen Konzepte *Ordnung*, (*Fließ-*) *Gleichgewicht* und *Rückkopplung* (*Regelkreis*) ist dargestellt worden; zu Eingangsvorstellungen und Entwicklungen bei weiteren relevanten Einzelkonzepten (*Selbstregulierung*, *Energieformen*, *Energie-menge* vs. *Energiefluss*, *offenes System*, *Wärme*, *Reibung*) gibt [2] zusätzliche Auskunft. An dieser Stelle sollen noch einige übergreifende Aspekte zur Sprache kommen. Die vorangehenden Abschnitte haben gezeigt, dass die Schülerinnen und Schüler zu Anfang der Untersuchungen vorwiegend statische und wenig allgemeine Vorstellungen zu den Begriffen *Ordnung*, *Gleichgewicht*, *Rückkopplung* hatten und zwischen ihnen so gut wie keine Verbindungen im Sinne einer Strukturbildungstheorie herstellen konnten (dies zeigte v.a. allem das *Concept Mapping* inkl. Nachbesprechung, siehe oben). In FB 6 am Ende des Lernteils der Studie, hatten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer Gelegenheit, abschließend strukturtheoretische Zusammenhänge zu formulieren (siehe Abschnitt 2.3). Eine Auszählung der Antworten von 14 Schülern ergab: Neun Probanden formulierten die Beziehung zwischen der Struktur *Regelkreis* und dem Vorgang *Selbstregulierung* zutreffend (z.B. „Der Regelkreis ist das System, das versucht, ein Gleichgewicht durch Selbstregulierung herzustellen“), zwei weitere brachten Ansätze in dieser Richtung. Elf Probanden erklärten das Zustandekommen eines *Gleichgewichtszustands* durch einen Regelkreis bzw. durch Selbstregulierung. Auch der Begriff der *Ordnung* fand bei 13 Schülern eine akzeptable Verwendung in der einen oder anderen Weise. Acht Teilnehmer brachten ihn direkt mit dem Gleichgewichtszustand in Verbindung, drei mit regelmäßigen Vorgängen und zwei eher mit der Systematik von Vorgängen. Defizite zeigten sich in Bezug auf den Begriff des *offenen Systems*. Vier Probanden beschrieben den Begriff ungenügend oder gar nicht. Sechs brachten ihn mit dem Ein- und Ausstrom von Energie in Verbindung. Eine engere Beziehung zwischen der Offenheit des Systems und der Selbstregulierung beschrieben nur drei Teilnehmer; bei drei weiteren wurde die Offenheit des Systems als Voraussetzung der Selbstregulation angesprochen. Demgegenüber war die Notwendigkeit eines energetischen Antriebs zu früheren Zeitpunkten der Lernprozessstudie, nämlich z.B. in FB 3 nach Behandlung zweier physikalischer Modellsysteme, von noch mehr Probanden angesprochen worden. Dadurch, dass die Energiezufuhr bei den biologischen und dem wirtschaftlichen Modellsystem nicht mehr im Mittelpunkt stand, scheint diese Erkenntnis bei einem Großteil der Probanden verschüttet worden zu sein. Um dem entgegenzuwirken, müsste der Aspekt des Antriebs auch bei nichtphysikalischen Beispielen deutlicher hervorgehoben werden. Auch könnte eine stärkere Kontrastierung mit Systemen,

die lediglich Dissipation, aber keine Regulation aufweisen, hilfreich sein.

3.5 Erklärungsmuster und Prozessdenken

Anhand der Behandlung des Pickspechts durch die Schülerinnen und Schüler sollen die von ihnen bevorzugten Erklärungsmuster zu Anfang der Untersuchung dargestellt werden. Da der Pickspecht nicht nur in der Hauptstudie, sondern auch in der ersten Pilotstudie als Einstiegsbeispiel diente, kann hierbei auf Erfahrungen mit insgesamt 28 Probanden (14 Zweiergruppen) zurückgegriffen werden. Die generelle Beobachtung war, dass fast alle Schülerinnen und Schüler, als sie die Pickspechtbewegung beschreiben sollten, sich zunächst auf *Detailschritte* des Ablaufs konzentrierten, die in Form von Wirkungsketten („... dies führt dazu, dass ...“) verbunden wurden. Immerhin gab es in zwei Dritteln der Gruppen auch überblicksartige Formulierungen (z.B. „Abwechseln von Schwingen und Fallen“), in denen die Periodizität der Bewegung anklang. Der Aspekt des energetischen Antriebs spielte nur in zwei Gruppen eine Rolle (anfangs noch undeutlich). Alle Gruppen bis auf eine nahmen lediglich die *regelmäßige* Bewegung des Pickspechts im eingeschwungenen Zustand wahr. Die Regelmäßigkeit wurde jedoch nicht als erklärungsbedürftig erachtet, sondern ganz selbstverständlich akzeptiert. Die Einschwingphase und gelegentlich auftretende Störfälle mit anschließender Regulation wurden von den Probanden nicht selbstständig wahrgenommen bzw. nicht thematisiert. Dynamische Entwicklungen des Systemzustands lagen anfangs außerhalb des Beobachtungs- und Denkhorizonts. Auf die (noch relativ frühe) Frage des Interviewleiters nach dem Grund für die Regelmäßigkeit der Bewegung herrschte bei fast allen zunächst großes Erstaunen vor; dann formulierten die Teilnehmer fast ausschließlich *monokausal-statische* Erklärungen (vgl. Abbildung 1 und Abschnitt 1.3): Etwa ein Drittel der Probanden führte die Regelmäßigkeit auf die gleich bleibende Erdanziehungskraft zurück; ein weiteres Drittel verwies auf die geläufige Regelmäßigkeit von Federschwingungen. *Nachdem* der Zyklus des Bewegungsablaufs von den Probanden genauer beschrieben worden war, entstand ein Gespür für die zyklische Komplexität des Problems: Zwei Drittel der Teilnehmer entwickelten nun *zyklisch-statische* Erklärungen, indem sie nach Art eines Zirkelschlusses vom Gleichbleiben eines Elements im Zyklus ausgingen und über das Gleichbleiben aller folgenden Elemente wieder zum Ausgangspunkt gelangten. Erst durch das deutliche Stören der Pickspechtbewegung durch den Interviewleiter und das folgende erneute Sicheinschwingen (gut zu beobachten an großen, langsam schwingenden Pickspechtmodellen) wurden transiente Prozesse ins Bewusstsein der Probanden gehoben. Störfallbetrachtungen anhand des bereits herausgearbeiteten Bewegungszyklus dienten als Einstieg in die Regelkreisrekonstruktion, die sich über

mehrere Schritte erstreckte (vgl. [3] und die Lernphasen in [1]).

Diese Eingangsbefunde sind mit Ergebnissen aus späteren Teilen der Lerneinheit in der Hauptstudie zu kontrastieren. Durch Üben an Modellsystemen aus verschiedenen Domänen gelang eine Sensibilisierung fast aller Teilnehmer für dynamische Entwicklungen (Prozessdenken). So wurde bei der Orgelpfeife (4. Modellsystem) das raue Anblasgeräusch trotz seiner Kurzzeitigkeit in fünf (von acht) Gruppen schon anfangs wahrgenommen und führte zu einem Schluss auf einen Selbstregulationsvorgang bzw. eine wiederholte Verstärkung, die dann im Detail konstruiert wurde (zyklisch-dynamische Erklärung). Beim 6. Modellsystem, dem Zielwurf mit Prismenbrille, thematisierten sechs (von acht) Gruppen selbstständig die *Entwicklung* der Auge-Arm-Koordination (vgl. [1]), drei schlossen selbstständig, zwei mit kurzer Nachfrage und eine Gruppe mit etwas mehr Hilfe auf das Vorliegen eines Regelkreises, der im Anschluss konstruiert wurde. Eine wesentliche Rolle bei der Entwicklung des Prozessdenkens und der Erklärungsmuster spielte die explizit (in Fragebögen und Interviews) angeregte Reflexion auf das neue Erklärungsmuster: Aus der Beobachtung einer Stabilisierung („Einschwingen“, „Einpendeln“) kann auf das Vorliegen eines Regelkreises geschlossen werden. Dies ist in [3] ausführlich dargestellt.

Interessanterweise ist die Fähigkeit zur Anwendung des neuen Erklärungsmusters nicht so langfristig stabil wie das erworbene Konzeptwissen (vgl. Abschnitte 3.1-3.3): In der Langzeituntersuchung nach fünf Monaten wurde eine zyklisch-dynamische Erklärung mit Regelkreisen selbstständig nur von vier (von 16) Teilnehmern eingesetzt. *Nach* der Erinnerungsphase inklusive grafischer Rekonstruktion eines Regelkreisschemas waren es insgesamt 13 Probanden (zum Teil mit Hilfestellung). Somit konnte auch das Erklärungsschema mit Unterstützung der grafischen Rekonstruktion reaktiviert werden.

4. Fazit und Ausblick

Die vorgeschlagene Lerneinheit (siehe [1]) hat das Potential, Schülerinnen und Schüler der Oberstufe auf Grundkursniveau mit qualitativen Betrachtungen in den Bereich der Selbstregulation komplexer Systeme einzuführen und ihnen zur Bildung zentraler Strukturkonzepte und neuer Erklärungsmuster zu verhelfen. Die durchgeführte Lernprozessuntersuchung erbrachte Hinweise (Trends), dass mindestens zwei Drittel (z.T. noch mehr) der Lernenden deutlich dynamische Vorstellungen von *Ordnung*, *Gleichgewicht* und *Rückkopplung* entwickeln und diese auch langfristig (über fünf Monate) bewahren. Zu diesem Zwecke setzt die Lerneinheit auf die in mehreren Domänen an äußerlich unähnlichen Modellsystemen wiederholte, in Teilen selbstständige grafische Konstruktion und anschließend stimulierte Verbalisierung der strukturellen Prinzipien (vgl. [1]). Auch die

Methode der Erklärung selbstregulierender Systeme (Schluss von der Beobachtung einer Stabilisierung auf das Vorliegen von Regelkreisen) wird reflektiert. Auf diese Weise gelangt mindestens die Hälfte der Schülerinnen und Schüler durch Behandlung der Modellsystemsequenz zur selbstständigen Anwendung des Erklärungsschemas in verschiedenen Domänen. Es zeigte sich, dass die Fähigkeiten zur selbstständigen Anwendung der Strukturkonzepte (Fließ-)Gleichgewicht und Rückkopplung / Regelkreis sowie des Erklärungsschemas ohne zwischenzeitliche Übung über fünf Monate (Langzeittest) verschüttet werden. Sie lassen sich aber durch grafische Rekonstruktion der Strukturgrafiken (mnemonische Funktion der Grafiken!) gut reaktivieren (siehe auch [4]). Die beschriebenen Lernzuwächse sind verbunden mit einer deutlichen Weiterentwicklung der Fähigkeit zum Transfer struktureller Prinzipien sowie des *systemischen Denkens* im Sinne von Ossimitz [24] inklusive des Prozessdenkens (siehe auch [4]).

Ein Test der Lerneinheit im Klassenunterricht kann auf den Erkenntnissen zur Phaseneinteilung (siehe [1]) aufbauen und sie in eine Konzeption bestehend aus selbstständigen Explorationsphasen in kleinen Gruppen und lehrergesteuerten Reflexions- und Abstraktionsphasen im Klassenplenum umsetzen.

5. Literatur

- [1] Bell, T. (2007): Komplexe Systeme und Selbstregulation: Eine Modellsystemsequenz für fächerübergreifendes Lernen. *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 2/6, S.43-58.
- [2] Bell, T. (2003): Strukturprinzipien der Selbstregulation - Komplexe Systeme, Elementarisierungen und Lernprozessstudien für den Unterricht der Sekundarstufe II (Studien zum Physiklernen, Band 25), Logos, Berlin.
- [3] Bell, T. (2004): Komplexe Systeme und Strukturprinzipien der Selbstregulation im fächerübergreifenden Unterricht - eine Lernprozessstudie in der SII. *ZfDN* 10, 163-181.
- [4] Bell, T. (2004): Komplexe Systeme und Strukturprinzipien der Selbstregulation - Konstruktion grafischer Darstellungen, Transfer und systemisches Denken. *ZfDN* 10, 183-203.
- [5] Komorek, M., Duit, R. und Stadler, H. (2004): Ein chaotisches System erklären. In R. Duit et al. (Hrsg.): *Naturwissenschaftliches Arbeiten. Unterricht und Material* 5-10, S.100-103, Friedrich Verlag, Seelze-Velber.
- [6] Stavrou, D. (2004): Das Zusammenspiel von Zufall und Gesetzmäßigkeiten in der nichtlinearen Dynamik (Studien zum Physiklernen, Band 35), Logos, Berlin.
- [7] Bobertz, K., Vogt, K. und Komorek, M. (2006): Unterricht zu Chaos und Strukturbildung - Ein modulares Konzept für Klasse 10 und Grundkurse. *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik* 17(4), 12-14.
- [8] Reuter, V. (2006): Von der Ordnung ins Chaos - Experimente zum deterministischen Chaos. *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik* 17(4), 20-23.
- [9] Korneck, F. (2006): Wirbel im Unterricht - Laminare Strömungen, Turbulenz und Strukturbildung in Flüssigkeiten. *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik* 17(4), 24-27.
- [10] Nordmeier, V. und Schlichting, H.J. (2006): Einfache Experimente zur Selbstorganisation - Strukturbildung bei Sand und anderen Granulaten. *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik* 17(4), 28-31.
- [11] Nordmeier, V. und Schlichting, H.J. (2006): Chaos und Strukturbildung. In E. Kircher und R. Girwidz (Hrsg.): *Physikdidaktik in Theorie und Praxis*, S.103-128, Springer, Berlin u. Heidelberg.
- [12] Nordmeier, V., Jonas, O. und Kastl, R. (2007): Zugänge zur Nichtlinearen Physik - Experimente mit dem ‚Universalpendel‘. In D. Höttecke (Hrsg.): *Naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich*, S.578-580, LIT-Verlag, Berlin.
- [13] Komorek, M. (1998): Elementarisierung und Lernprozesse im Bereich des deterministischen Chaos, IPN, Kiel.
- [14] Komorek, M. (2007): Lernen und Lehren nichtlinearer Physik - Wege der Vermittlung zwischen Lernervorstellungen und moderner physikalischer Sicht, DiZ, Uni Oldenburg, Oldenburg.
- [15] Wilbers, J. (2000): Post-festum- und heuristische Analogien im Physikunterricht, IPN, Kiel.
- [16] Duit, R., Roth, W.-M., Komorek, M. und Wilbers, J. (2001): Fostering conceptual change by analogies - between Scylla and Charybdis. *Learning and Instruction* 11, 283-303.
- [17] Korneck, F. (1998): Die Strömungsdynamik als Zugang zur nichtlinearen Dynamik, Shaker Verlag, Aachen.
- [18] Stavrou, D., Komorek, M. und Duit, R. (2005): Didaktische Rekonstruktion des Zusammenspiels von Zufall und Gesetzmäßigkeit in der nichtlinearen Dynamik. *ZfDN* 11, 147-164.
- [19] Vosniadou, S. und Ioannides, C. (1998): From conceptual development to science education: a psychological point of view. *International Journal of Science Education* 20(10), 1213-1230.

- [20] Katu, N. und 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.
- [21] Alexopoulou, E. und 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.
- [22] Komorek, M. und Duit, R. (2004): The teaching experiment as a powerful method to develop and evaluate teaching and learning sequences in the domain of non-linear systems. *International Journal of Science Education* 26, 619-633.
- [23] Vogt, H. (2002): Vorstellungen und Lernprozesse zu Ordnungsstrukturen im Phasenraum nichtlinearer Systeme. Staatsexamensarbeit am Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften, Christian Albrechts Universität, Kiel.
- [24] Ossimitz, G. (2000): Entwicklung systemischen Denkens (Klagenfurter Beiträge zur Didaktik der Mathematik, Band 1), Profil Verlag, Wien.