

Wilbers, Jens; Duit, Reinders

Heuristische Analogien und Post-festum-Analogien. Analogiebasierte Lernprozesse im Bereich des deterministischen Chaos

Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften : ZfDN 7 (2001), S. 83-104



Quellenangabe/ Reference:

Wilbers, Jens; Duit, Reinders: Heuristische Analogien und Post-festum-Analogien. Analogiebasierte Lernprozesse im Bereich des deterministischen Chaos - In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften : ZfDN 7 (2001), S. 83-104 - URN: urn:nbn:de:01111-pedocs-315373 - DOI: 10.25656/01:31537

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:01111-pedocs-315373>

<https://doi.org/10.25656/01:31537>

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

Digitalisiert

Mitglied der


Leibniz-Gemeinschaft

JENS WILBERS UND REINDERS DUIT

Heuristische Analogien und Post-festum-Analogien

Analogiebasierte Lernprozesse im Bereich des deterministischen Chaos

Zusammenfassung:

Analogien werden gemeinhin als wirksames Mittel zur Unterstützung von Lernprozessen gesehen (Vosniadou & Ortony, 1989). Dennoch zeigen verschiedene Studien, dass Analogien immer wieder auch zu Problemen im Lernprozess führen (Glynn, Duit, & Thiele, 1996). Die Studie von der hier berichtet wird, ist Teil eines Rahmenprojektes zur didaktischen Rekonstruktion der Chaostheorie (Duit, Komorek, & Wilbers, 1997). Eine Abfolge von Lernprozessstudien mit Gymnasialschülern der Jahrgangsstufe 10 zeigen deutlich die Möglichkeiten, die durch die Nutzung von Analogien bei der Vermittlung der eingeschränkten Vorhersagbarkeit chaotischer Systeme eröffnet werden. Sie legen allerdings auch eine Reihe von Schwierigkeiten bei der Nutzung von Analogien offen. Der vorliegende Artikel nimmt Bezug auf Ergebnisse dieser Studie, die auf der Mikroanalyse analogiebasierter Lernprozesse basiert.

Abstract:

Analogies are commonly considered a powerful means of enhancing conceptual change, i.e. to guide students from their pre-instructional conceptions to science concepts (Vosniadou & Ortony, 1989). However, many studies have shown that analogies may also deeply mislead students' learning processes (Glynn, Duit, & Thiele, 1996). The study presented here is part of a larger project on investigating students' learning processes in the domain of limited predictability of chaotic systems (Duit, Komorek, & Wilbers, 1997b). Preceding studies on teaching this issue to grade 10 students clearly exhibited the potential power of the analogies used in the instructional module underlying our studies. They fostered construction of understanding during instruction and reconstruction of understanding in interviews carried out some 10 months after instruction (Duit & Komorek, 1997). A closer examination however revealed some pitfalls of analogy use. In a micro-analysis it became apparent that students had severe difficulties in making use of presented analogies in order to understand the chaotic behaviour of a magnetic pendulum. The study presented here draws on these findings. The focus is on investigating the micro-structure of analogical reasoning in open inquiry settings.

1. Allgemeine Rahmung

1.1 Projekteinbindung

Während eine beachtliche Zahl von populärwissenschaftlichen Büchern zur Chaostheorie und ihren philosophischen Implikationen erschienen ist, öffnet sich die Schule diesem neuen Zweig der Physik nur allmählich. Eine Reihe von Aufsätzen in Lehrerzeitschriften informiert über Grundideen des deterministischen Chaos und stellt (Real-)Experimente und Computersimulationen vor. In den meisten dieser wichtigen Arbeiten stehen fast ausschließlich fachwissenschaftliche Aspekte im Vordergrund, wohingegen empirische Studien zu Schülervorstellungen und ihrer Entwicklungsfähigkeit bislang noch rar sind. Das Kieler Projekt zur didaktischen Rekon-

struktion der Chaostheorie setzt an diesem Defizit bisheriger didaktischer Bemühungen zum Thema Chaos an (Duit, Komorek & Wilbers, 1997a). Das Vorhaben, von dem hier berichtet wird, ist Teil dieses Forschungsprojektes zur Vermittlung von Grundideen der Chaostheorie. Im Rahmen von Lernprozessuntersuchungen wurde die Rolle von Analogien beim Verstehen von Grundideen des deterministischen Chaos untersucht (Wilbers, 2000). Analogien als Lernhilfen und ihre Nützlichkeit bei der Vermittlung der Chaostheorie bildeten dabei einen Schwerpunkt der empirischen Studien. Darüber hinaus ergaben sich Einblicke in die Mikrostruktur analogen Denkens, die ganz allgemein für Lernprozesse im naturwissenschaftlichen Unterricht, die auf Analogienutzung aufbauen, von Bedeutung sind.

1.2 Grundideen des deterministischen Chaos

Eine didaktische Rekonstruktion der Chaostheorie lieferte eine Sachstruktur zentraler Ideen des deterministischen Chaos (Komorek, 1999). Auf ihrer Basis wurde ein vier Stunden umfassender Unterricht zur Chaostheorie konzipiert, der auf die Vermittlung der eingeschränkten Vorhersagbarkeit chaotischer Systeme führt. Analogien spielen in diesem Unterricht eine zentrale Rolle. Sie eröffnen die Möglichkeit, den Aspekt der eingeschränkten Vorhersagbarkeit aufgrund ihrer dynamischen Instabilität bereits in Klasse 10 zu vermitteln.

Obwohl das Verhalten chaotischer Systeme deterministischen Gesetzen unterworfen ist, kann es dennoch nicht auf längere Zeit prognostiziert werden. Es ist trotz deterministischer Gesetze nur eingeschränkt vorhersagbar. Chaotisches Verhalten rührt dabei keineswegs ausschließlich von externen stochastischen Einflüssen her. Es ist vielmehr Ausdruck einer systemimmanenten Eigenschaft: Chaotische Systeme sind dynamisch instabil. Dynamische Instabilität äußert sich im speziellen Lösungsverhalten der Bewegungsgleichungen eines Systems, das sich in einer Phasenraumdarstellung visualisieren lässt. Eine Bahn im Phasenraum kann als Veranschaulichung einer speziellen Lösung der Bewegungsgleichungen aufgefasst werden, d.h. als Lösung, die zu gegebenen Anfangsbedingungen gehört. Betrachtet man nun die zeitliche Entwicklung von Phasenbahnen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt infinitesimal benachbart sind, entfernen sich ursprünglich benachbarte Bahnen im Fall dynamisch instabiler Systeme mit exponentieller Wachstumsrate voneinander. Eine Eigenschaft der dynamischen Instabilität ist die Sensitivität gegenüber den Startbedingungen und externen Störungen. Die Sensitivität bezüglich der Startbedingungen äußert sich darin, dass eine kleine Variation der Startkonfiguration auf ein extremes Änderungsverhalten des Systems führt. Für dynamisch instabile Phasenraumflüsse muss der Messfehler in den Startbedingungen exponen-

tiell verkleinert werden, um die Vorhersagezeit des Systemverhaltens linear zu erhöhen. Selbst infinitesimal kleine Unsicherheiten in den Startbedingungen nehmen so rasch makroskopische Dimensionen an. Vergleichbares gilt in bezug auf (schwache) Störungen des Systems, die in der Phasenraumdarstellung als Übergang von einer Trajektorie auf eine (eng) benachbarte Trajektorie interpretiert werden können. Im Fall instabiler Phasenraumflüsse werden selbst kleinste Störungen so schnell virulent.

1.3 Ein Unterricht zur eingeschränkten Vorhersagbarkeit chaotischer Systeme

Ausgangspunkt der ersten Doppelstunde des Unterrichts zur eingeschränkten Vorhersagbarkeit ist das chaotische Magnetpendel (Abb.1). Es handelt sich dabei um ein sphärisches Pendel, das über drei symmetrisch angeordneten Ringmagneten schwingt. Zum Starten des Experiments ist eine Vorrichtung zur möglichst genauen Wiederholung der Startbedingungen ratsam. Ihre Verwendung hat vorwiegend die Funktion, mit den Schülerinnen und Schülern die Bedeutung der Reproduzierbarkeit von Anfangsbedingungen zu

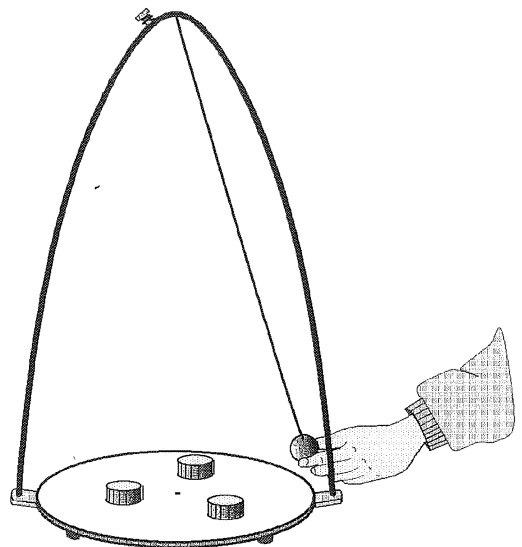


Abb. 1: Chaotisches Magnetpendel

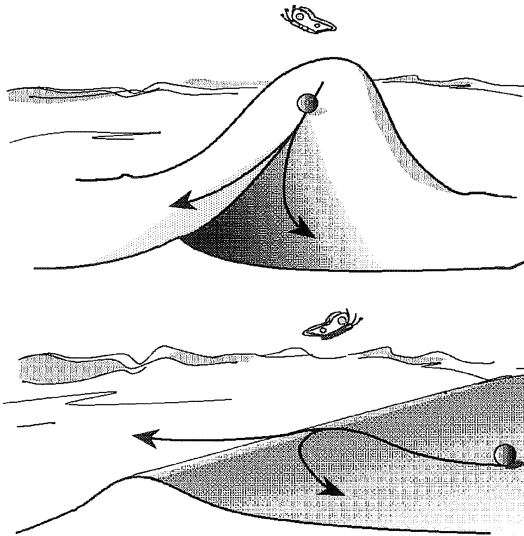


Abb. 2: Berggrat- und Wallanalogon

diskutieren. Die Schülerinnen und Schüler zeigen sich i.d.R. erstaunt angesichts des erratischen Bewegungsverhaltens des Pendels, das im deutlichen Widerspruch zu ihren Erwartungen steht. In verschiedenen Schülerexperimenten erkunden sie das Magnetpendel und versuchen, sein merkwürdiges Bewegungsverhalten aufzuklären. Im Verlauf ihrer Erklärungsversuche werden verschiedene Lernangebote in Form von Analogien gemacht. Es werden ihnen u.a. die Chaosschüssel (Abb.2) und die in Abbildung 3 gezeigten Elementaranalogien (Berggrat und Wall) vorgelegt. Im Vordergrund der zweiten Doppelstunde steht das Simulationsprogramm *MagPen* (Thomas et al., 1996), das ein Analogmodell des Magnetpendels ist. Es ermöglicht die Untersuchung des Pendelverhaltens in einer „idealen Welt“. So sind z.B. Störungen in gegeb-

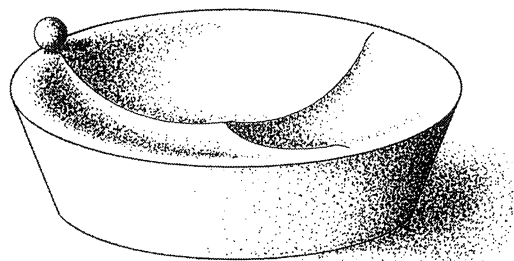


Abb. 3: Chaosschüssel

nen Grenzen besser „beherrschbar“ als im Realexperiment. Es können zeitlich kontrolliert einzelne Störimpulse eingegeben oder die Störungen völlig ausgeblendet werden. Friktionsverluste können gänzlich abgestellt und Startbedingungen exakt reproduziert werden. Die prinzipielle Unsicherheit in den Startbedingungen seitens des Realexperiments entspricht einer gezielt herbeigeführten Variation der Startbedingungen in der Simulation. Die Schülerinnen und Schüler können mit Hilfe von *MagPen* gezielt den Einfluss einzelner Variablen auf das Verhalten des Pendels untersuchen.

1.3.1 Die Chaosschüssel

Für ein anschauliches Verständnis der Sensitivität des Magnetpendels ist eine Betrachtung seiner Bewegung in der Potentiallandschaft aufschlussreich, die von der Gravitation und den Magnetkräften erzeugt wird. Abbildung 4a gibt den Potentialverlauf in Form von Äquipotentiallinien wieder. Abbildung 4b zeigt einen Schnitt durch das Potential. Zwischen den Magneten existiert ein sternförmiger Bereich in dem ein labiles Kräftegleichgewicht herrscht. Die Chaosschüssel ist ein Ana-

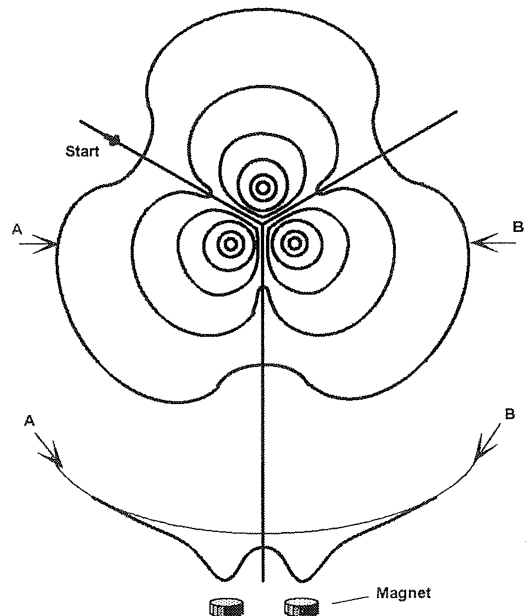


Abb. 4: Potentialverhältnisse beim Magnetpendel

logexperiment zum Magnetpendel, das diese Potentialverhältnisse in eine Höhen-und-Tiefen-Landschaft übersetzt. In Abbildung 2 sind deutlich die Zonen des labilen Gleichgewichts zu erkennen, die sich als Grate im Innern der Schüssel hervorheben. Eine Kugel, die vom Rand der Schüssel gestartet werden kann, bewegt sich qualitativ ähnlich wie das Pendel. Streng genommen sind die Orte des labilen Gleichgewichts nur von mittelbarer Bedeutung für chaotisches Verhalten. In der Nähe der Magneten hat das Potential des Chaospendels einen annähernd parabolischen Verlauf, wie in Abbildung 4b gut zu erkennen ist. In guter Näherung herrscht dort ein lineares Kraftgesetz. Wird das Pendel in diesem Bereich gestartet, zeigt es denn auch ein reguläres Verhalten. In unmittelbarer Nachbarschaft des labilen Gleichgewichts gilt diese Näherung nicht mehr. In der Umgebung des labilen Gleichgewichts werden die Kräfteverhältnisse stark nichtlinear. Das System wird dort ausgesprochen sensitiv. Ist ein mechanisches System solchen stark nichtlinearen Kräfteverhältnissen ausgesetzt, wird es dynamisch instabil und zeigt chaotisches Verhalten. Es bedarf hierfür nicht zwingend notwendig labiler Gleichgewichtslagen. In ihrer Nähe treten allerdings immer Nichtlinearitäten auf, die zur dynamischen Instabilität führen.

1.3.2 Die Elementaranaloga

Wenn ein System aufgrund von stark nichtlinearen Kräfteverhältnissen dynamisch instabil wird, weist es im Phasenraum Zonen auf, von denen alle benachbarten Trajektorien mit exponentieller Wachstumsrate divergieren. Im Phasenraum verhalten sich die Trajektorien in der Nähe einer solchen sensitiven Zone analog zu einer Kugel, die in der Nähe eines Berggrats gestartet wird (Abb.3). Am Berggrat läuft die Kugel auf Bahnen, die sich voneinander und von dem labilen Gleichgewicht auf dem Grat exponentiell entfernen. Die Berggratsituation kann damit als ein Elementaranalogon für dynamisch instabiles Verhalten aufgefasst werden, das die Verhältnisse aus einem abstrakten Orts-Impuls-Raum in einen

anschaulichen Orts-Potential-Raum übersetzt. Das labile Gleichgewicht auf dem Grat ist in dieser Analogie eine sensitive Zone. Kleinste Unsicherheiten beim Start auf dem Grat lassen die Kugel nach links oder rechts hinunterrollen. Und selbst wenn es gelänge, die Kugel exakt auf dem Grat zu starten, entscheiden kleinste Störungen darüber, welchen Weg die Kugel einschlägt. Die Schülerinnen und Schüler sollen labile Gleichgewichtslagen in diesem Sinne als sensitive Zonen auffassen und als kennzeichnendes Strukturelement chaotischer Systeme identifizieren. In einer solchen Elementaranalogie (zu Magnetpendel und Chaosschüssel) liegt freilich eine deutliche didaktische Reduktion, da dynamische Instabilität selbst im Fall mechanischer Systeme nicht notwendigerweise auf labile Kräftegleichgewichte zurückzuführen ist. Eine solche Reduktion bietet allerdings den Vorteil, dass auf eine Diskussion des Bewegungsverhaltens in einem abstrakten Phasenraum verzichtet werden kann.

2. Fragestellung und Zielsetzung

Gegenstand der empirischen Studie im Rahmen des Vorhabens war die Untersuchung von analogiebasierten Lernprozessen in einem Unterricht zum deterministischen Chaos, wie er weiter oben vorgestellt wurde (s. auch Duit, Komorek & Wilbers, 1997a). Das Forschungsvorhaben hatte zugleich eine empirische und eine theoriebildende Komponente, die eng aufeinander bezogen waren. Zum einen sollte ein Beitrag zur Theorieentwicklung auf dem Gebiet des analogen Denkens (*analogical reasoning*) im naturwissenschaftlichen Unterricht geleistet werden. Zum anderen hatte das Vorhaben eine empirische Komponente, in der untersucht wurde, in welcher Weise Schülerinnen und Schüler Analogien nutzen, um chaotisches Verhalten zu verstehen. Mit Blick auf die spezifischen didaktischen Analogien, die in der Studie Verwendung fanden, wurde untersucht, inwieweit sie prinzipiell geeignet sind, Lernprozesse in Richtung auf ein Verstehen der eingeschränkten Vorhersagbarkeit zu unterstützen. Darü-

ber hinaus sind die Überprüfung von in der Literatur vorfindlichen lerntheoretischen Positionen (Gentner, 1989; Holyoak, 1985) sowie die Entwicklung eines Modells des analogen Verstehens im naturwissenschaftlichen Unterricht in den empirischen Studien verankert. In einer vergleichenden Analyse einer Folge von Lerninterviews sind Kategorienschemata entwickelt worden, deren Aggregation im Prozess der Datenanalyse permanent mit der Herausbildung und Ausschärfung des theoretischen Bezugsrahmens zum analogen Verstehen im naturwissenschaftlichen Unterricht wechselwirkten. Die empirische und die theorieentwickelnde Komponente des Vorhabens sind in dieser Hinsicht eng miteinander verschränkt und orientieren sich in methodologischer Hinsicht am *Grounded-Theory*-Ansatz nach Glaser und Strauss (1967).

3. Die theorieentwickelnde Komponente: Post-festum-Analogien und heuristische Analogien

Wenn Analogien als Hilfen zum Verständnis komplexer Sachverhalte verwendet werden, dann können sie dabei unterschiedlichen Funktionen dienen. Eine Analogie kann z.B. als Gedächtnisstütze fungieren oder als anschauliches Instrument zur Illustration abstrakter Begriffe und Prinzipien. Sie kann aber auch in kommunikativer Absicht genutzt werden, um anderen etwas zu vermitteln. Im Zusammenhang mit Unterricht kann die Analogie so zu einem wichtigen didaktischen Hilfsmittel werden. Die Gemeinsamkeit all dieser Funktionen einer Analogie liegt darin, dass sie ihren heuristischen Wert bereits eingebüßt hat. Sie ist als *Post-festum-Analogie* in ihrer Reichweite ausgeschöpft und verstanden. Wenn wir Post-festum-Analogien generieren, dann ist uns das Ziel der Analogiebildung ebenso bekannt wie der Begriff, auf den die Analogie verweist, oder die Theorie, die wir auf sie gründen. Ein Schüler, dem wir eine Analogie unter didaktischer Absicht als heuristisches Mittel anbieten, befindet sich in einer gänzlich anderen Position. Ihm sind die wissenschaftlichen Begriffe, Prinzipien

oder Theorien, die per analogiam erarbeitet werden sollen, gänzlich unbekannt. Es steht daher zu erwarten, dass die Generierungs- und Nutzungsprozesse einer Analogie aus der Post-festum-Perspektive (z.B. Suche nach einer Analogie, um einen bereits bekannten Begriff zu illustrieren) substantiell andere sind als aus der heuristischen Perspektive (z.B. Suche nach einer Analogie, um über ein noch nicht erschlossenes Phänomen zu theoretisieren). Leitprinzip eines Modells des analogen Verstehens muß die konsequente Differenzierung zwischen einer *Post-festum-Analogie* und einer *heuristischen Analogie* sein, die im folgenden unterschiedliche Prozesse der Analogienutzung bezeichnen sollen (Wilbers, 1998; Wilbers & Duit, 1999). Eine vergleichbare Unterscheidung wird in den herkömmlichen Theorien des analogen Denkens nicht getroffen.

3.1 Mentale Analogien als Ähnlichkeitsvergleich

Eine Analogie wird gemeinhin als eine Ähnlichkeitsbeziehung zwischen einem Basis- und einem Zielanalogon hinsichtlich spezifischer Merkmale verstanden (Mach, 1920; Duit, 1991; Hoops, 1992). Der Schluss liegt nahe, dass analoges Denken als ein Prozess des Ähnlichkeitsvergleichs zwischen den Analoga beschrieben werden kann. Aus der Sicht von Gentner (1989) und Holyoak (1985) besteht Analogienutzung in diesem Sinne in einem Vergleich zwischen Basis und Ziel. Im folgenden wollen wir nun der Frage nachgehen, ob bei der Bildung von Analogien auf Ähnlichkeitsbeziehungen rekurriert wird und ob die Nutzung von Analogien im Vergleich solcher Ähnlichkeiten besteht. Ein historisches Beispiel soll hier zur Illustration dienen.

Das Bohrsche Atommodell lässt sich zurückführen auf eine Analogie zwischen einem Ein-Elektronensystem (z.B. einem freien Wasserstoff-Atom) und einem Planeten, der einen geschlossenen Orbit um einen Stern durchläuft. In analoger Weise befindet sich im Fall des Bohr-Atoms das Elektron auf einer stabilen Bahn um den positiv geladenen Atom-

kern. Ausgehend vom dritten Keplerschen Gesetz und unter der Zusatzannahme der Planckschen Quantenhypothese postuliert das Bohrs-Modell in bekannter Weise stationäre Bahnen unterschiedlicher Energieniveaus, auf denen sich das Elektron im Coulombfeld des Kerns bewegt. Es findet sich so eine weitreichende Ähnlichkeit zwischen dem Bau des Atoms und der Himmelsmechanik. Mit Blick auf das Bohr-Modell basiert eine Analogie zu Planetensystemen also in der Tat auf einem Vergleich zwischen dem H-Atom und einem Planeten, der um einen Stern kreist. Die Analogie als Ähnlichkeitsvergleich setzt allerdings in diesem Beispiel das Bohr-Modell voraus. Aus einer modernen quantenmechanischen Perspektive haben Atome und Sonnensysteme praktisch nichts gemeinsam. Sie gehören aus dieser Sicht zu völlig disparaten Phänomenbereichen. Atome sind demnach mikrokosmische Quantenobjekte, wohingegen Planetensysteme makroskopische Objekte sind, die mit dem begrifflichen Inventar der klassischen Mechanik beschrieben werden können.

Das heuristische Ziel der Analogiebildung ist die theoretische Modellierung eines erklärungsbedürftigen Phänomens; im genannten Beispiel wäre dies das charakteristische Emissionsspektrum, das elementarer Wasserstoff z.B. in einer Gasentladung aussendet. Das Zielanalogon ist das ontische Objekt, das dieses Phänomen hervorbringt. In einer „vortheoretischen“ Phase des Erkenntnisgewinns in einem Phänomenbereich gestattet die heuristische Analogie die gezielte Generierung von Hypothesen, bevor überhaupt eine gefestigte Theorie zu seiner Beschreibung vorliegen muss. Das Basisanalogon stellt dabei gewissermaßen eine „Prototheorie“ auf dem Weg zur Modellierung des Zielanalogons bereit. Dies gilt gleichermaßen phylogenetisch für den Erkenntnisgewinn wissenschaftlicher Forschung wie ontogenetisch für den individuellen Wissenserwerb. Indem ein Wissenschaftler oder ein Schüler eine Analogie generiert, versetzt er sich in die Möglichkeit zielgerichteter Handlungen in bezug auf das Zielanalogon. Seine Analogie stellt damit

zunächst einmal epistemische Handlungsfähigkeit sicher. Als heuristisches Mittel erlaubt sie z.B. dem Wissenschaftler die Planung von Experimenten und organisiert Erwartungen bezüglich ihrer Ergebnisse, indem sie Facetten einer bereits bestehenden Theorie aus dem Basisbereich (gegebenenfalls modifiziert und) „probehalter“ auf einen noch nicht erschlossenen Zielbereich überträgt. Erst nach Abschluss der heuristischen Nutzung einer Analogie, wenn also ein Modell des Zielanalogons vorliegt, ist die Grundlage für einen Ähnlichkeitsvergleich gelegt. Dies ist im Sinne der hier eingeführten Terminologie also ausschließlich aus der Post-festum-Perspektive der Fall. Es kann also nur für die Post-festum-Analogie sinnvoll von Ähnlichkeitsbeziehungen gesprochen werden, die streng genommen zwischen den Modellen von Basis- und Zielanalogon hergestellt werden. Ähnlichkeitsbeziehungen sind also nicht der Ausgangspunkt für die heuristische Nutzung einer Analogie, sie sind das Ergebnis der Konstruktion einer Analogierelation im Rahmen heuristischer Bemühungen.

Eine Analogie ist also immer dann keine Frage des Vergleichens, wenn das Ziel der Analogiebildung (ein Begriff, ein Modell oder eine Theorie) noch nicht oder, wie im obigen historischen Beispiel, nicht mehr kanonisiert ist. Wenn Schüler dazu angehalten sind, das Bohr-Modell via Analogie zu einem Planetensystem zu erschließen, dann müssen sie „so tun als ob“. Sie müssen das Atom in seiner „Planetensystemhaftigkeit“ sehen. Sfard (1994, S.50) spricht in diesem Sinne von der „as-if synthetic nature“ der Analogie. Eine Analogie heuristisch zu nutzen heißt, das Zielanalogon in seiner „Basishaftigkeit“ zu sehen. Dies ist ein ebenso kreativer wie tentativer Akt, wie insbesondere die geringe Reichweite des historischen Beispiels zeigt.

Die herkömmlichen Theorien des analogen Denkens gehen davon aus, dass die Nutzung einer Analogie eine Frage des Vergleichens von Basis und Ziel ist. Dies ist in der Tat aus der Perspektive der Post-festum-Analogie der Fall. Für die Konstruktion einer Analogie unter diesem Blickwinkel können gleicher-

maßen kanonisierte theoretische Bezugsrahmen für Basis- und Zielanalogon vorausgesetzt werden. Es sind die gefestigten theoretischen Bezugsrahmen, die eine Generierung der Post-festum-Analogie leiten und die analogieinhärente Gütekriterien für die Validität analoger Schlüsse bereitstellen. Die herkömmlichen Theorien des analogen Denkens unterstellen generell für mentale Analogien die Verfügbarkeit derartiger Kriterien für die Einschätzung ihrer Reichweite. Der Nutzer einer Analogie kann nach Gentner et al. (1993) grundsätzlich und unabhängig von dem Modus ihrer Generierung aus der Analogie heraus über ihre Tragfähigkeit entscheiden. Diese Sicht wird aber gerade dem kreativen Akt der heuristischen Analogienutzung nicht gerecht. Die heuristische Analogie verlangt die Konstruktion analoger Beziehungen und nicht das Aufspüren objektiver Merkmalskorrespondenzen im Rahmen eines Vergleichs (Wilbers & Duit, 1997; Wilbers, 1997).

3.2 Ein Modell der heuristischen Analogie

Aus Sicht der Strukturabbildungstheorie spielt propositional organisiertes Wissen eine zentrale Rolle für das analoge Verstehen (Gentner & Markman, 1997). Dieser Konzeption gemäß eignen sich Analogien als Mittel zur Kommunikation im Unterricht, weil sie Repräsentanten für Begriffe und Begriffssysteme (z.B. propositionale Netzwerke) sind. Begriffe können aber nicht die Voraussetzung dafür sein, dass didaktische Analogien funktionieren, denn diese Begriffe sind das Ziel unterrichtlicher Bemühungen. Repräsentation ist nicht Ausgangspunkt und Voraussetzung, sie ist der Endpunkt einer heuristischen Analogienutzung, die zu einem Begriff hinführt. Wir nehmen an, dass non-propositionales, bildhaftes Wissen die heuristische Verwendung von Analogien leitet. In der Tat weist bereits Zeitoun (1984) auf die Bedeutung einer bildhaften Visualisierung („visual imagery“) für analoges Verstehen hin. Mentale Bilder und mentale Modelle spielen aus dieser

Sicht eine wichtige Rolle für heuristische Analogien. Neben den mentalen Modellen können abstrakte Visualisierungen auch den Charakter von Schemata besitzen. Clement (1993) betont die Rolle derartiger qualitativer Schemata für das analoge Verstehen, die er *intuitive Schemata* nennt. Auch Sfard (1994) weist auf die Bedeutung non-propositionaler, bildhafter Schemata für analoges Verstehen hin, die sie als *image schemata* bezeichnet. Lakoff und Johnson (1980) und Johnson (1987) meinen mit ihren *embodied schemata* mit Blick auf Metaphern etwas Vergleichbares.

In Bezug auf Post-festum-Analogien gilt in gewissem Maße, was herkömmliche Theorien für analoges Denken im allgemeinen unterstellen. Übergeordnete Begriffe und Begriffssysteme machen die Analoga zu Beispielen, die miteinander verglichen werden. Die Relevanz von Merkmalen und die Adäquatheit von analogen Transfers kann auf dem Hintergrund begrifflicher Generalisierungen entschieden werden. Sie liefern gleichermaßen Kriterien der Relevanz und Adäquanz analoger Schlüsse. Für analoges Verstehen im Rahmen von Unterricht sind aber vorwiegend heuristische Analogien von Interesse.

Im Prozess der heuristischen Analogie werden zunächst eng am Zielphänomen durch erste Beobachtungen intuitive Schemata und mentale Bilder getriggert. In diesem ersten Schritt wird das Basisanalogon über diese unmittelbar phänomenorientierten intuitiven Schemata und mentalen Bilder an das Zielanalogon angebunden. Gelingt diese assoziative Anbindung nicht, kann die Exploration der Basis so weit gehen, dass der Schüler die Basis erschöpfend (im Sinne der Lehrziele) erschließt, ohne auch nur im geringsten seine Relevanz für das Zielanalogon zu sehen. Er konnte es dann nicht heuristisch, d.h. zum Verständnis des Ziels nutzen. Es hat dann faktisch keine Analogiebildung stattgefunden. Gelingt es, eine erste Assoziation zwischen Basis und Ziel zu knüpfen, stellt die Basis gewissermaßen eine Prototheorie bereit. Die Basis bzw. die Prototheorie, die auf ihrer Grundlage konstruiert wird, erlaubt dann Hypothesen über das Zielphänomen zu gene-

rieren. Die mentalen Bilder des Ziels werden also über die Basis als „Visualisierungshilfe“ in Form mentaler Modelle „theoriefähig“. Auf diesem Wege generierte Analogieschlüsse müssen in ihrer Validität dann analogieextern überprüft werden. Im Verlauf der heuristischen Nutzung kommt es also immer wieder zu einem Wechselspiel von analogieinterner Hypothesengenerierung und analogieexterner Hypothesentestung. Durch das Testen von Hypothesen kommt es naturgemäß zu einer veränderten Sicht auf das Zielphänomen. In gleicher Weise werden die mentalen Bilder und intuitiven Schemata modifiziert, die mit dem Zielphänomen verbunden werden. Entsprechend ändert sich auch die Sicht auf die Basis und die Prototheorie, die von ihr bereitgestellt wird. Die Sicht auf Basis und Ziel bedingen also einander und koevolvieren im Rahmen der Analogienutzung. Die heuristische Nutzung der Analogie bricht dann ab, wenn der subjektive Klärungsbedarf des Schülers gedeckt ist. Dies geschieht zunächst einmal unabhängig von der Basis und ihrer Reichhaltigkeit in bezug auf die Analogie aus Sicht der Instruktionsziele. Eine Übersicht

über das Modell in Gestalt eines Flussdiagramms bietet die Abbildung 5. Sie macht noch einmal zusammenfassend deutlich, wie im Prozess der heuristischen Nutzung in einer Art Regelkreis eine Analogie zwischen Basis- und Zielbereich konstruiert wird. Initiator dieses Prozesses ist das (erklärungsbedürftige) Zielphänomen, das erste mentale Bilder und intuitive Schemata triggert.

4. Methoden

4.1 Methoden der Datenerhebung

Für die Lernprozessuntersuchung wurde ein Kleingruppendesign gewählt, das sich an der Methode des *teaching experiment* nach Steffe (1983) orientiert. Das *Teaching-experiment-Design*, das Steffe (1983) für die Untersuchung von Lernprozessen vorschlägt, gewährleistet eine Balance zwischen Aspekten einer Labor- und einer Feldstudie. Es handelt sich um eine Interviewtechnik, die methodische Elemente enthält, wie man sie bereits vom *sokratischen Dialog* und vom *kritischen Interview* nach Piaget kennt. Steffe und D'Ambrosio

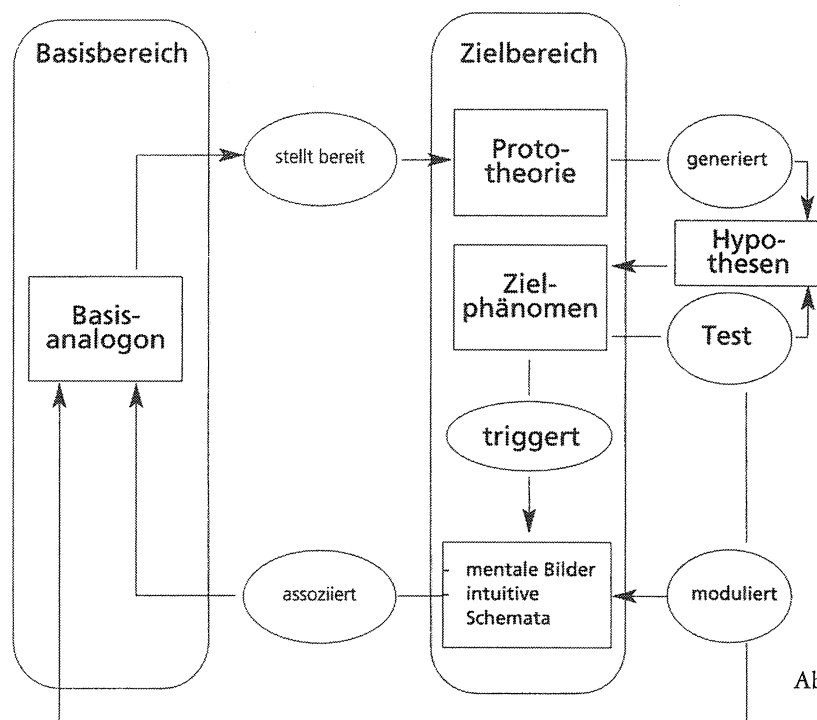


Abb.5 : Ein Modell des analogen Verstehens

(1996) weisen ausdrücklich darauf hin, dass sich das teaching experiment am Piaget-Interview orientiert. Es gibt allerdings zwei Unterschiede. Zum einen erstreckt sich ein teaching experiment über mehrere Sitzungen, die zum anderen über weite Strecken ganz gezielt als Lehr-Lern-Situationen organisiert sind. Aus der Erkenntnis heraus, dass jedes Interview immer auch Aspekte von Unterricht besitzt, wird im teaching experiment das Interview bewusst auch als Unterrichtssituation gestaltet. Es erlaubt so, über die reine Erhebung von Schülervorstellungen hinaus, Daten für eine Lernprozessuntersuchung zu sammeln. Das Design des teaching experiment ist so angelegt, dass mit einer kleinen Anzahl von Schülerinnen und Schülern eine Serie von Einzelinterviews geführt wird, in denen diese mit einer Reihe von erklärungsbedürftigen Experimenten und Phänomenen konfrontiert werden. Der Versuchsleiter ist dabei gleichzeitig Interviewer und Lehrer. Das Ineinandergreifen der Elemente Interview und Unterricht ist ein wesentlicher Teil der Planung des teaching experiment nach Steffe und macht es zu einem wirkungsvollen Erhebungsinstrument für Lernprozessstudien.

Es hat allerdings den Nachteil, dass Lernprozesse ausschließlich aus den dyadischen Interaktionen zwischen einem Interviewten und dem Versuchsleiter rekonstruiert werden können. Der für schulisches Lernen wichtige Aspekt der Interaktion mit anderen Lernern ist nicht gegeben. In einer Pilotstudie wurde daher ein erweitertes teaching experiment erprobt. Anstelle eines Schülers nehmen hier vier Schülerinnen und Schüler teil. Die Rollen des Versuchsleiters und der Lernenden sind weitgehend die gleichen wie im Lerninterview nach Steffe. Sein Charakter wandelt sich dahingehend, dass die Interaktionen vorwiegend innerhalb der Lerngruppe stattfinden und der Versuchsleiter erst dann eingreift, wenn die Diskussion nicht mehr fruchtbar erscheint. Den Schülern wurde im Rahmen der Studie auf diese Weise Gelegenheit gegeben, eigenständig Analogien zu generieren. Der Unterrichtscharakter des erweiterten teaching experiment zeigt sich darin, dass die

Schülergruppen bestimmte Arbeitsaufträge erhalten, etwa konkrete Versuchsaufbauten zu untersuchen. Die Interventionen des Versuchsleiters dienen vorrangig dazu, die Gruppen zur Selbsttätigkeit anzuregen. Der Interviewcharakter äußert sich speziell an solchen Stellen, an denen vertiefend nach vorunterrichtlichen Vorstellungen gefragt wird. Die Sitzungen arbeiten entlang eines teilstrukturierten Interviewleitfadens. Mit der hier vorgestellten Variante des teaching experiment ist es in angemessener Weise gelungen, die Vorzüge einer Unterrichtsstudie (originäre Lernsituationen, hoher Anteil an Schüler-Schüler-Interaktionen) mit dem Vorteil der Laborstudie, ein gewisses Maß an Kontrolle, das der Forscher über die Untersuchungsbedingungen ausübt, sicherzustellen (Wilbers & Duit, 2001).

4.2 Methoden der Datenauswertung

Gemäß dem explorativen Charakter der Studie, die sich auf ein qualitatives Forschungsdesign gründet, besteht ihr Ziel darin, Hypothesen auf der Grundlage der erhobenen Daten auszuschärfen und neue Hypothesen zu generieren (Flick et al., 1991; Bortz & Döring, 1995). In methodischer Hinsicht wird dieses Ziel durch die Anwendung inhaltsanalytischer Verfahren auf die erhobenen Videotranskripte verfolgt. Theorien werden dabei methodisch kontrolliert in direkter Auseinandersetzung mit dem Forschungsgegenstand gebildet. Dieses Vorgehen wird auch als *gegenstandsbegründete Theoriebildung* bezeichnet (Flick, 1995). Einzelfallbeschreibungen bilden dabei den Ausgangspunkt, nicht aber das Ziel der Theoriebildung. In der vergleichenden Analyse einer Serie von Einzelfällen fungieren Kategorien als Variablenausprägungen. Ein Kategoriensystem dient dabei als Interpretationshilfe bei der Konstruktion gemeinsamer Eigenschaften der individuellen Lernprozesse, die in den Einzelfallstudien beobachtet werden. Solche Kategorienschemata werden theoretisch motiviert an das erhobene Datenmaterial herangetragen und können dann gegenstandsbegründet und im Ein-

klung mit entsprechenden Veränderungen des theoretischen Bezugsrahmens modifiziert und revidiert werden. Ziel einer Inhaltsanalyse ist also die Typenbildung durch Zusammenfassung ähnlicher Lernwege und ihre Einbettung in einen angepassten Theorierahmen (Mayring, 1983, 1990).

4.3 Teilnehmer der Untersuchung

Insgesamt nahmen zusammen mit dem ersten Autor als Versuchsleiter 12 Gruppen von je vier Schülerinnen und Schülern an der Untersuchung teil. Sie rekrutierten sich aus den 10. Klassen zweier Kieler Gymnasien und wurden zu zwei jeweils zweistündigen Sitzungen eingeladen. Das Durchschnittsalter der Schülerinnen und Schüler zum Zeitpunkt der Datenerhebung betrug 161 Jahre. Die Lerninterviews fanden außerhalb des regulären Unterrichts in den Räumen des Instituts für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) in Kiel statt. Jeweils an zwei Nachmittagen wurden die Untersuchungsteilnehmer in Gruppen zu viert in das Institut eingeladen. Die beiden Interviewsitzungen umfassten zwei Zeitstunden, jeweils unterbrochen von einer dreißigminütigen Pause. Jedes der 12 Lerninterviews erstreckte sich also über vier Zeitstunden in toto. Sämtliche Aktivitäten der Schülerinnen und Schüler im Verlauf des Lerninterviews wurden durch eine stationär eingerichtete Videokamera aufgezeichnet. Die Kamera wurde also während der Aufzeichnung nicht bedient.

4.4 Dimensionen der Datenanalyse

Im Rahmen der Auswertung der Studie wurden zwei Analyserichtungen verfolgt; auf der einen Seite die intuitiven Schemata, die von den Schülerinnen und Schülern zum Labilitätsbegriff entwickelt werden und auf der anderen Seite ihre mentalen Bilder und Modelle von der Systemdynamik chaotischer Systeme. Die Sensitivität chaotischer Systeme wird in der Unterrichtseinheit auf ein wiederholtes Durchlaufen *labiler Gleichgewichtslagen* reduziert. Die Schülerinnen und Schüler ent-

wickeln nun unterschiedliche Deutungsversuche für chaotisches Verhalten aufgrund des labilen Gleichgewichts, die zum Teil erheblich vom unterrichtlich intendierten Konzept des labilen Gleichgewichts als einer sensitiven Zone abweichen. Ihre vorunterrichtlichen Vorstellungen von Labilität besitzen den Charakter intuitiver Schemata im Sinne von Clement (1993). Unterschiedliche chaotische Systeme können dabei von ein und demselben Schüler auf dem Hintergrund unterschiedlicher Labilitätsschemata gedeutet werden. Eine weitere Analyserichtung der Studie stellen die mentalen Bilder dar, die von den Schülerinnen und Schülern zur Systemdynamik chaotischer Systeme entwickelt werden. In der denkpsychologischen Literatur wird darauf hingewiesen, dass die Konstruktion mentaler Bilder empirisch nur schwer darstellbar ist (Christmann & Groeben, 1997). Inhaltsanalytisch wurden die mentalen Bilder der Schüler daher indirekt und phänomenographisch über die verschiedenen Diktionsmuster oder „Sprechweisen“ angegangen, in denen sie eine Systemdynamik charakterisieren. Methodisch orientiert sich die Analyse der Diktionsmuster an dem phänomenographischen Ansatz nach Marton (1986). Die Schülerinnen und Schüler entwickeln verschiedene Diktionsmuster, um über das Bewegungsverhalten unterschiedlicher chaotischer Systeme zu sprechen. Diese Diktionsmuster sind im unterschiedlichen Maße geeignet, über bestimmte Eigenschaften chaotischer Systeme zu reden.

5. Ergebnisse der Untersuchung

5.1 Analyserichtung: Intuitive Labilitätsschemata

Die Trennungseigenschaft chaotischer Systeme wird im Lerninterview über den Begriff des *labilen Gleichgewichts* angegangen. Das chaotische Magnetpendel bewegt sich unter dem Einfluss von Magnetkräften und der Gravitation in einer Potentiallandschaft mit solchen labilen Gleichgewichtslagen. Die Schülerinnen und Schüler entwickeln unterschied-

liche Deutungsversuche für chaotisches Verhalten aufgrund von Labilität, die zum Teil erheblich vom unterrichtlich intendierten Konzept des labilen Gleichgewichts abweichen. Die Bezeichnungen für die im folgenden vorgestellten Schülervorstellungen von den sensitiven Zonen chaotischer Systeme entsprechen Wörtern, die von den Schülerinnen und Schülern häufig verwendet werden. Gemeint sind allerdings Konzepte, die von den Schülern unter Umständen auch mit anderen Wörtern belegt werden. Insgesamt wurden im Rahmen der Datenanalyse fünf verschiedene Kategorien gebildet, unter die sämtliche in der Studie beobachteten Deutungsversuche der Schülerinnen und Schüler von der Trennungseigenschaft chaotischer Systeme rubriziert werden konnten.

Die einfachste Form der Deutung einer sensitiven Zone erfolgt im Rahmen eines Animismus. Die sensitive Zone wird dabei als eine **Entscheidungszone** verstanden. Immer dann, wenn sich das System in einer labilen Situation befindet, muss es erneut über seine weitere Bewegung entscheiden. Seine Entscheidungen sind willkürlich und für den Beobachter daher nicht vorhersagbar. Das Entscheidungszone-Schema wird häufig als eine erste Heuristik zur deskriptiven Analyse chaotischen Verhaltens generiert. Die Deutung der Trennungseigenschaft chaotischer Systeme im Rahmen eines animistischen Schemas ist nicht sonderlich stabil und wird vergleichsweise leicht zugunsten eines anderen Interpretationsrahmens wieder aufgegeben. Die Entscheidungszone-Vorstellung erweist sich als ein Schema, das in hohem Maße mit den unterschiedlichsten Analoga kompatibel ist. Dies liegt sicher nicht zuletzt darin begründet, dass die Entscheidungszone-Vorstellung, wie letztlich alle Animismen, einen weitgehenden Verzicht auf Detailklärungen impliziert. Der Horizont klärungsbedürftiger Fragen ist mithin eng gesteckt. Das Bewegungsverhalten des Magnetpendels ist chaotisch, weil in der sensitiven Zone immer wieder Entscheidungen herbeigeführt werden. Der Zielmagnet, an dem das Pendel zur Ruhe kommt, ist zufällig, weil

sich das System willkürlich entscheidet. Das Entscheidungszone-Schema ist ein rein endogener Erklärungsansatz. Störungen und Startbedingungen werden als irrelevant für ein Systemverhalten gesehen.

Die **Neutrale-Zonen-Vorstellung** akzentuiert die Bewegung des Systems in einem Bereich, in dem keine systemimmanenten Kräfte wirken. Kleine Störungen können sich so „systemsteuernd“ auswirken. Die gesamte Systemdynamik und ihre eingeschränkte Vorhersagbarkeit werden letztlich ausschließlich über Störungen der Bewegung diskutiert. Störungen genügen sich aus dieser Sicht als Argument selbst. Der Beobachter eines chaotischen Phänomens ist aus Gründen des Informationsmangels über die Komplexität möglicher Störeinflüsse nicht in der Lage, die Systemdynamik zu prognostizieren. Charakteristisch für eine Neutrale-Zonen-Vorstellung ist die Annahme, dass sich nur solche Störungen auf das Bewegungsverhalten des Systems auswirken, die in den neutralen Zonen auftreten. Dieses Labilitätsschema ist von einem Kraftkonzept getragen, das in der Literatur auch als *Winning-force-Vorstellung* beschrieben wird (Jung et al., 1981). Nur wenn sich die systemimmanenten Kräfte zu Null addieren, haben selbst kleinste externe Störkräfte eine „Chance“, auf die Systemdynamik Einfluss zu nehmen.

Die Vorstellung von einer neutralen Zone konzeptualisiert die sensitive Zone als einen kräftefreien Bereich, in dem sich kleine Störeinflüsse überhaupt erst auswirken können. Es braucht hierzu eine gewisse räumliche Ausdehnung der neutralen Zone und damit eine gewisse Aufenthaltsdauer des Systems im neutralen Bereich, damit Störungen eine Wirkung haben können. Unter der Ägide dieses Labilitätsschemas wird der sensitiven Zone des Magnetpendels daher häufig unterstellt, sie sei von endlicher Breite und gerade nicht infinitesimal schmal. Letztlich ist das Neutrale-Zonen-Schema für sämtliche der angebotenen Basisanaloga ein wenig hilfreicher Interpretationsrahmen. Da das Lernangebot allerdings eine irgendwie geartete Entscheidung nahelegt, wird am ehesten das Berggratanalo-

gon als Erklärungshilfe akzeptiert. Nur in seinem Fall ergibt sich durch die Bewegung entlang des Grates eine gewisse Aufenthaltsdauer in einem neutralen Bereich. Wird auf die Vorstellung von den neutralen Zonen zurückgegriffen, dann spielen Störungen eine zentrale Rolle für die Aufklärung chaotischen Verhaltens. Sensitive Zonen werden dabei als Orte der „Störungsverstärkung“ begriffen. Es interessieren allerdings nur solche Störungen, die in den neutralen Zonen auftreten. Nur dort können sie sich auswirken. Störkräfte, die außerhalb der neutralen Zone auftreten, bleiben aus dieser Sicht grundsätzlich ohne jeden Effekt. Die Startbedingungen werden als irrelevant gesehen. Das Neutrale-Zonen-Schema ist letztlich ein rein exogener Erklärungsansatz. Chaotische Bewegung wird über die (für einen Beobachter) unüberschaubare Komplexität möglicher Störeinflüsse und ihr zufälliges Auftreten erklärt. Sensitivität als Systemeigenschaft chaotischer Systeme wird dabei nicht näher hinterfragt.

Wenn Schüler von **Trennungslinien** sprechen, so liegt unter der Perspektive eines fachphysikalisch geprägten Vorverständnisses die Vermutung nahe, sie verstünden sensitive Zonen als Orte, an denen zunächst eng benachbarte Bahnen (mit exponentieller Wachstumsrate) getrennt werden. In der vorliegenden Untersuchung war dies *grundsätzlich* nicht der Fall. Trennungslinien sind aus Sicht der Schülerinnen und Schüler, die an der Studie teilnahmen, Barrieren, die das Feld, in dem sich ein chaotisches System bewegt, in unterschiedliche Bereiche trennen. Gemeint ist also eine Trennung von Feldbereichen und nicht eine Trennung von Bahnen. Die Schülerinnen und Schüler besitzen dabei in aller Regel keine Superpositions-Vorstellung. Sie gehen davon aus, dass an einer Trennungslinie das eine Feld endet und das nächste beginnt. Die Trennungslinien-Vorstellung geht einher mit der Unterscheidung zwischen chaotischem und zufälligem Verhalten. Chaotisches Verhalten gilt dabei nicht als erklärungsbedürftig, sondern wird vorausgesetzt. Wird mit Kräften argumentiert, so werden sie in gewisser Nähe zu einem Impetus scholastischer

Prägung konzeptualisiert. Kräfte werden also als eine Bewegungsgröße verstanden, die sich im Verlauf der Bewegung allmählich aufzehrt. Im Verlauf seiner chaotischen Bewegung überquert nun also das System immer wieder Trennungslinien und verliert dabei zusehends an Impetus. Wenn eine Trennungslinie aus Mangel an Impetus nicht mehr überwunden werden kann, bleibt das System zufällig im entsprechenden Feld. Das Zielfeld ist zufällig und nicht vorhersagbar, weil sich das System chaotisch, d.h. völlig regellos, bewegt. Störungen des Systems sind aus dieser Sicht weitgehend irrelevant. Immer dann wenn die sensitive Zone des Magnetpendels als Trennungslinie verstanden wird, wird die Wall-Situation (Abb.3) als Analogon für das Pendel akzeptiert. Das Berggratanalogon hingegen erweist sich dann in aller Regel als wenig hilfreich. Für die Chaosschüssel werden von Schülern mit einer Trennungslinien-Vorstellung nur solche Situationen diskutiert, die in Analogie zur Wall-Situation zu sehen sind. Die Kugel rollt dabei orthogonal auf einen Schüsselgrat zu und kann ihn überwinden oder auch nicht. Die chaotische Bewegung des Magnetpendels gilt auf dem Hintergrund einer Trennungslinien-Vorstellung nicht als erklärungsbedürftig, sondern wird für eine Aufklärung des zufälligen Ergebnisses des Experiments vorausgesetzt. Der Zielmagnet ist zufällig, weil sich das Pendel chaotisch bewegt. Das zufällige und das dynamisch instabile („chaotische“) Verhalten des Magnetpendels werden also ontologisch unterschieden. Störungen und Startbedingungen sind für diesen Erklärungsansatz weitgehend irrelevant. Sie sind bestenfalls in dem Sinne kontingenter Teil der Erklärung, dass sie das Bewegungsverhalten „noch chaotischer“ machen.

Die **kippelige Zone** bezeichnet eine weitere Vorstellung von Labilität. Das Kippeligkeits-Schema ist am ehesten in Richtung auf eine Vorstellung entwickelbar, die sensitive Zonen als labile Gleichgewichtslagen begreift. Im Gegensatz zu den übrigen bereits diskutierten Labilitätsschemata wird hier die sensitive Zone gewissermaßen als ein lokales Potential-

maximum in einem strukturierten Raum visualisiert. Der entscheidende Unterschied zu einem adäquaten Labilitätskonzept besteht darin, dass die Kippeligkeit als Situation, in der sich das System befindet, nicht hinterfragt wird. Von dieser Warte aus betrachtet ist es eben so, dass das System prinzipiell nicht in einer solchen Zone bleiben kann. Es braucht aus der Kippeligkeits-Perspektive z.B. keine äußeren Störungen, die erklären, warum das System sein labiles Gleichgewicht verliert. Befindet sich das System in einer kippeligen Situation, dann gerät es durch Zufall rechts oder links von dieser Zone. Der Zufall wird dabei als eine Art „generierende Kraft“ verstanden, die durch ihre Richtungsentscheidungen in der kippeligen Zone für das chaotische Systemverhalten verantwortlich ist. Kippeligkeit wird nur dem „Spitzen“ oder „Gratartigen“ attestiert. Das Berggratanalogon wird dem Wallanalogon als Erklärungshilfe für das Magnetpendel vorgezogen. Eine sensitive Abhängigkeit des Magnetpendels von seinen Startbedingungen leuchtet den Schülerinnen und Schülern unter dieser Perspektive durchaus ein. Störungen des Systems gelten allerdings als völlig irrelevant und werden entsprechend nicht problematisiert. Aus dieser Sicht ist es nun einmal so, dass ein System nicht „auf Messers Schneide“ ausbalanciert werden kann. Ein Kippeligkeitsschema wird von den Schülerinnen und Schülern, die an der Studie teilnahmen, für das Magnetpendel nur selten generiert und meist mittelbar, z.B. im Analogieschluss über die Chaosschüssel, auf das chaotische Pendel angewendet.

Eine Reihe von Schülerinnen und Schülern, die an der Untersuchung teilgenommen haben, versteht labile Gleichgewichtslagen weitgehend im unterrichtlich intendierten Sinne als Zonen, in denen ein chaotisches System sensitiv auf Störungen und Startbedingungen reagiert (**Sensitive Zonen**). Anders als im Fall von Kippeligkeit wird hier gesehen, dass sich z.B. bedingt durch Störungen ein System nie entlang eines labilen Gleichgewichts bewegen kann und dass es sich deshalb von ihm in die eine oder andere

Richtung entfernt. In den seltensten Fällen wird ein adäquates Sensitivitätsschema im Rahmen einer ersten Exploration des Magnetpendelexperimentes generiert. In einzelnen Fällen haben sich die Elementaranaloga, die Chaosschüssel oder das rechnergestützte Simulationsexperiment *MagPen* als hilfreich erwiesen, ein adäquates Labilitätsschema zu triggern.

Aus der Post festum-Perspektive besteht eine Analogie zwischen dem Magnetpendel und seinen verschiedenen Analogsystemen in Hinblick auf ihr dynamisch instabiles Verhalten aufgrund eines labilen Gleichgewichts. Diese Analogie wird von den Schülerinnen und Schülern oftmals nicht gesehen. Defizite in der Analogienutzung treten immer dann auf, wenn eine sensitive Zone zwar als kritisches Merkmal chaotischer Systeme verstanden wird, wenn sie aber durch die Anwendung unterschiedlicher intuitiver Labilitätsschemata für Basis- und Zielanalogon aus der Schülerperspektive eine unterschiedliche Ausprägung in den Analoga hat. Sie gelten dann (aus der Schülerperspektive) als disanalog. Eine Analogiebildung findet selbst dann faktisch nicht statt, wenn die Basis im Sinne der Instruktionsziele erschöpfend verstanden wird.

5.2 Analyserichtung: Diktionsmuster zur Systemdynamik

Insgesamt wurden im Rahmen der Datenanalyse fünf verschiedene Kategorien gebildet, denen die von den Schülerinnen und Schülern verwendeten Sprechweisen zugeordnet werden können. In Abbildung 6 werden diese Kategorien aus einer Taxonomie von Diktionsmustern entwickelt. Die Bezeichnungen der unterschiedlichen Kategorien sind nicht im Sinne einer physikalischen Terminologie zu verstehen. Eine dynamische Diktion impliziert also z.B. nicht die Verwendung eines physikalisch adäquaten Kraftbegriffs und den Rekurs auf Beschleunigungen, die im System auftreten. Es ist hier die Rede von den verschiedenen Sprechweisen der Schülerinnen und Schüler und nicht von den „Argumentationsmustern“ der Physik. Auch in der Physik finden letztlich

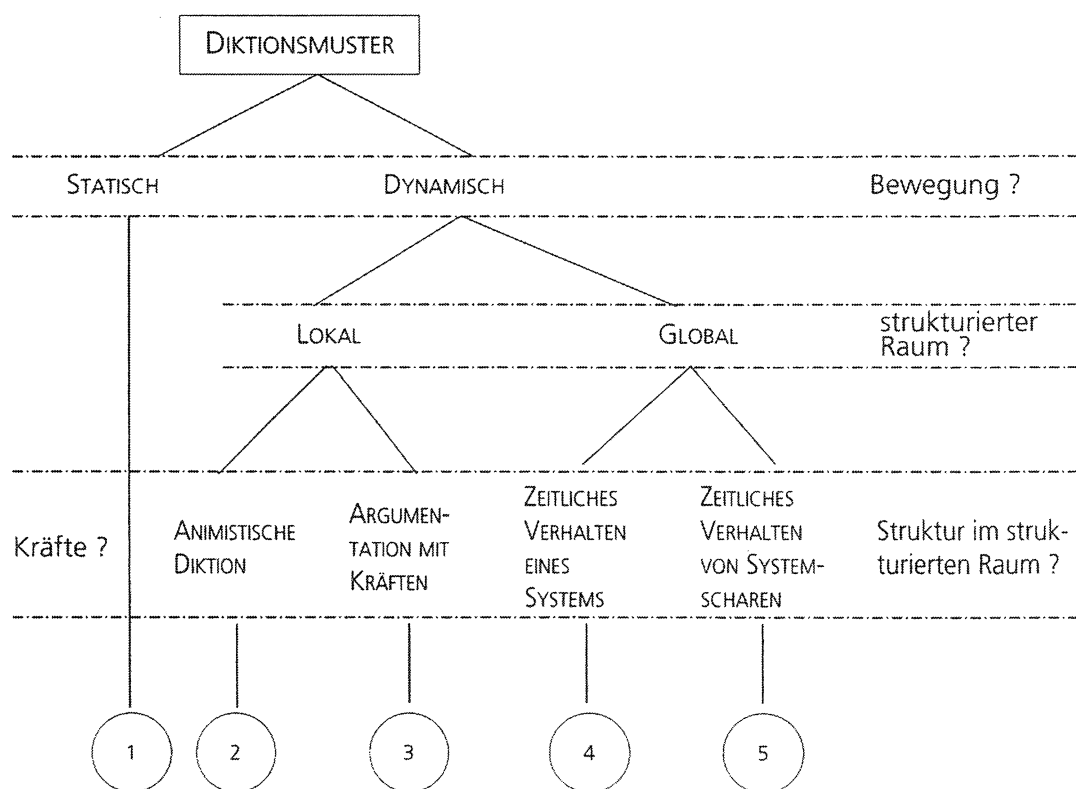


Abb. 6: Taxonomie der verwendeten Diktionsmuster

unterschiedliche Argumentationsfiguren ihre Anwendung. Es kann mit einem Energieansatz oder mit Kräften argumentiert werden. Man kann die „Berg-und-Tal-Landschaft“ eines Potentialgebirges als Teil eines Systems auffassen oder als Zwangsbedingungen für seine Bewegung betrachten etc. Die Physik achtet aber im Gegensatz zu den Schülern darauf, dass ihre unterschiedlichen „Diktionsmuster“ gegebenenfalls zueinander kompatibel und ineinander transformierbar sind. Sie sind in letzter Konsequenz nicht an mentale Bilder sondern an Begriffe, wie z.B. den Energie-, den Potential- oder den Kraftbegriff, gebunden. Die Diktionsmuster der Physik sind letztlich propositional basiert und können deshalb auch austauschbar angelegt sein. Letzteres gilt augenscheinlich nicht für die Diktionen der Schüler, wenn sie (ausschließlich) auf mentalen Bildern beruhen. Andere Diktionen erfordern dann die Aktivierung qualitativ anderer Bilder als Aus-

gangsbasis für mentale Modelle, in denen sie chaotische Systeme verstehen. Wenn die Schülerinnen und Schüler für unterschiedliche chaotische Systeme unterschiedliche Diktionen favorisieren, dann benutzen sie z.B. im Rahmen von Analogiebildungsprozessen zwischen diesen Systemen häufig simultan mehrere Diktionsmuster. Die Diktionsmuster der Schüler zeigen also in bezug auf spezifische Systeme eine erstaunliche Rigidität, die oftmals nur mit Mühe aufgebrochen werden kann. Die Annahme, dass mentale Bilder bestimmte Sprechweisen evozieren, hilft jedenfalls z.T. die Rigidität von Diktionsmustern bezüglich bestimmter Systeme zu verstehen.

Die verschiedenen Diktionsmuster, die von den Schülerinnen und Schülern verwendet werden, können mehr oder minder geeignet sein, über kritische Merkmale chaotischer Systeme zu reden. Ein Schüler benutzt also unter Umständen ein Diktionsmuster, das es

ihm nicht gestattet, über bestimmte Merkmale und Eigenschaften chaotischer Systeme zu sprechen, die für ein Verstehen ihrer eingeschränkten Vorhersagbarkeit essentiell sind. Er könnte diese Merkmale nur dann thematisieren, wenn er seine Diktion wechseln würde. Wird eine spezifische Sprechweise im Rahmen der Diskussion des Magnetpendels initiiert und wird diese Sprechweise für ein Analogsystem beibehalten, dann können beide, eine entsprechende Übertragung des Labilitätsschemas vorausgesetzt, als analog gesehen werden. Die Eigenschaften chaotischer Systeme, die eine solche Diktion nicht erschließt, werden dennoch nicht thematisiert. Im folgenden wird nun untersucht, welchen Restriktionen die verschiedenen Diktionsmuster in dieser Hinsicht unterliegen.

5.2.1 Statische Diktion

Wenn sie die Phänomene diskutieren, die ein chaotisches System wie das Magnetpendel hervorbringt, dann sprechen manche der Schüler grundsätzlich nicht über sein eigentliches Bewegungsverhalten. In der Argumentation spielen der Startpunkt und der Endpunkt der Bewegung, im Fall des Magnetpendels also der Zielmagnet, eine Rolle. Erstaunlicherweise kann das Verhalten chaotischer Systeme in einer sensitiven Zone in dieser Diktion durchaus problematisiert werden. Es wird allerdings ein deutlich statischer Akzent gesetzt. Sensitive Zonen sind demnach Orte, an denen das System nicht „bleiben“ kann. Eine solche Sprechweise soll hier statische Diktion genannt werden. Für eine Beschreibung oder gar Analyse chaotischen Bewegungsverhaltens ist eine statische Diktion gänzlich ungeeignet. Hierin liegt eine ganz kapitale Schwäche statischer Diktionen. Für eine statische Diktion wäre ein mentales Bild denkbar, in dem ein System Kräfte erfährt. Es wird also ein (ruhendes) Objekt gesehen, auf das Kräfte wirken.

Ein nicht unerheblicher Teil der Untersuchungsteilnehmer entwickelt jedenfalls in einem ersten Herangehen an das chaotische Verhalten des Magnetpendels eine statische

Diktion. In der Argumentation spielen der Startpunkt und der Zielmagnet als Endpunkt der Bewegung eine Rolle. Die Etablierung (zunächst irgend-)einer dynamischen Sprechweise scheint jedenfalls minimale Voraussetzung dafür zu sein, dass ein Verständnis der eingeschränkten Vorhersagbarkeit chaotischer Systeme entscheidend über die Einsichten hinausgeht, die bereits die Stochastik vermittelt. So wird z.B. ein Vergleich der Vorhersagbarkeit des chaotischen Magnetpendels und eines einfachen konischen Fadenpendels auf dem Hintergrund einer statischen Diktion zur Trivialität. Das einfache Fadenpendel ist im Gegensatz zum Magnetpendel deshalb problemlos vorhersagbar, weil es nur einen Punkt gibt, in dem das System zur Ruhe kommt. Im Gegensatz dazu besitzt das Chaospendel mit seinen drei Magneten drei Punkte, in denen die Bewegung endet. Symmetrieargumente sind unter Verwendung einer statischen Diktion besonders attraktiv. Legt ein Schüler seinen Akzent auf das Ergebnis des Experiments und ignoriert die Bewegung des Pendels, dann ist aus seiner Sicht die Wahrscheinlichkeit einer richtigen Vorhersage des Systemverhaltens dann besonders gering, wenn alle drei Zielmagneten dieselbe Elementarwahrscheinlichkeit besitzen. Dies ist für einen symmetrischen Aufbau der Fall, bei dem drei identische Magneten zu einem gleichseitigen Dreieck aufgestellt sind. An der eingeschränkten Vorhersagbarkeit chaotischen *Bewegungsverhaltens*, das aus statischer Perspektive irrelevant ist, ändert ein asymmetrischer Aufbau freilich nichts. Aus einer statischen Diktion heraus werden chaotische Systeme also vor allem als stochastische Systeme diskutiert, und es nimmt nicht wunder, wenn immer wieder spontane Analogien zu diversen Zufallsgeneratoren und Glücksspielen generiert werden. Assoziationskriterium ist dabei augenscheinlich der zufällige Ausgang solcher Experimente und Spiele.

5.2.2 Animistische Diktion

Für die Schülerinnen und Schüler scheint eine animistische Diktion von vergleichbarer Attrak-

tivität zu sein wie eine statische Diktion. Allemal zu Beginn eines jeden Lerninterviews, wenn sie zum ersten Mal das Verhalten des chaotischen Magnetpendels beschreiben, greifen sie vorzugsweise auf diese beiden Sprechweisen zurück. Ähnlich wie im Fall einer statischen Diktion, so wäre auch für die animistische Diktion ein mentales Bild denkbar, das nur einen „Systemparameter“ berücksichtigt. Es wird dabei ein System gesehen, das seine Bewegungsrichtung immer wieder ändert. Ursachen für diese Änderung der Bewegung, etwa in Form von systemimmanenten Kräften oder Störeinflüssen, werden nicht visualisiert und können entsprechend nicht problematisiert werden. Die animistische Sprechweise besitzt vorwiegend deskriptiven und kaum analytischen Charakter. Eine animistische Diktion erzeugt in gewisser Weise eine „empathische“ Perspektive. Ein Schüler, der sie verwendet, versetzt sich quasi in die Lage des chaotischen Systems und beschreibt den Bewegungsablauf aus seinem „Blickwinkel“. Es wird dabei als zufällig bezeichnet, wie sich das System im Verlauf seiner Bewegung immer wieder entscheidet. Eine Änderung der Geschwindigkeit des Pendels (in Betrag oder Richtung) wird als eine „freie Willensentscheidung“ des Systems gedeutet. Eine Abhängigkeit des Systemverhaltens von Störungen und Startbedingungen wird nicht thematisiert. Eine animistische Sprechweise ist von sehr begrenzter Reichweite und erlaubt letztlich ausschließlich eine deskriptive Herangehensweise an das Phänomen der chaotischen Bewegung, ohne sie analytisch zu hinterfragen. Würde sie im Verlauf des teaching experiment nicht abgelegt und durch eine andere Sprechweise ersetzt, wäre sie fatal. Entsprechendes wurde im Rahmen der Untersuchung aber nicht beobachtet. Eine animistische Diktion wird von verschiedenen Schülerinnen und Schülern flexibel und von Zeit zu Zeit immer dann verwendet, wenn es letztlich nur um eine Beschreibung der Kinetik eines Systems geht. In diesem Punkt unterscheidet sie sich deutlich von einem Entscheidungszonen-Schema, das ebenfalls animistisch angelegt ist. Einmal abgelegt wird auf eine Entscheidungszonen-Vorstellung nicht mehr zurückgegriffen.

5.2.3 Argumentation mit Kräften

Für eine animistische Diktion wurde angenommen, dass die Schülerinnen und Schüler ausschließlich die Bewegung eines Systems visualisieren. Im Fall einer Argumentation mit Kräften ziehen sie zusätzlich Kräfte in Betracht, die das System im Verlauf seiner Bewegung erfährt. Sie argumentieren mit einem sich bewegenden System, das Kräfte erfährt. Durch zufällig auftretende Störkräfte wird das System dabei immer wieder in die unterschiedlichsten Richtungen abgelenkt. Die sensitiven Zonen eines chaotischen Systems werden dabei als Orte charakterisiert, an denen sich entgegengesetzt orientierte Kräfte gegenseitig aufheben. Interessanterweise ist dabei vorzugsweise z.B. von neutralen oder kippeligen *Punkten*, statt von *Linien* oder *Zonen* die Rede.

Die Argumentation mit Kräften geht insofern über eine animistische Diktion hinaus, als sie es erlaubt, chaotische Bewegung ursächlich zu hinterfragen. Ähnlich wie in der animistischen Sprechweise wird quasi aus einer Münchhausen-Perspektive heraus argumentiert. Änderungen des Bewegungszustandes werden aber im Gegensatz zu ihr über Magnetkräfte und Störungen diskutiert. Entsprechend kann die Bedeutung beider Faktoren für chaotische Bewegung aus dieser Diktion heraus prinzipiell angegangen werden, wenn ein Labilitätschema generiert wird, für das sie relevant sind. Labilität wird dabei in erster Linie als ein Zustand verstanden, in dem sich das System zu einem gegebenen Zeitpunkt befindet und nicht als die Eigenschaft eines strukturierten Raumes. Sie ist also gewissermaßen eine Situation, in der sich das System immer wieder befindet. Da aus dieser Diktion heraus eher das Situations- oder Ereignisartige im Blick ist und z.B. nicht über den Verlauf von Bahnen gesprochen wird, finden vorwiegend solche Störungen Beachtung, die in einer labilen Situation auftreten. Die Rolle anderer Störungen kann zwar prinzipiell gesehen aber nur mit Mühe nachvollzogen werden. Entsprechendes gilt auch für die Signifikanz der Startbedingungen für die Vorhersagbarkeit

chaotischer Systeme. Schüler, die in bezug auf das Magnetpendel eine lokale Argumentation mit Kräften favorisieren, zeigen in der Regel erhebliche Schwierigkeiten bei einer Analogiebildung zwischen dem Chaospendel und verschiedenen Analogsystemen, die gerade auf eine Betrachtung von Potentialverhältnissen zielen (z.B. Chaosschüssel, Wall- und Berggratsituation nach Abb.2 und 3). Analogiebildungsprozesse sind in solchen Fällen ganz grundsätzlich gefährdet.

5.2.4 Argumentation mit dem Verhalten eines Systems

Im Rahmen dieses Diktionsmusters wird mit „Entweder-oder-Verläufen“ einer Bahn in spezifischen Höhen-und-Tiefen-Landschaften argumentiert. Wie bereits im Fall einer lokal-dynamischen Diktion, die mit Kräften argumentiert, so wird vermutlich auch hier ein mentales Bild generiert, das sich aus zwei Elementen zusammensetzt. Es wird hier eine Bahn oder ein sich bewegendes Objekt in einem strukturierten Raum gesehen. Im Rahmen global-dynamischer Sprechweisen gewinnt die Systemdynamik eine völlig neue Qualität gegenüber statischen und lokal-dynamischen Diktionen. Wird auf das zeitliche Verhalten eines Systems abgehoben, so kann bereits mit einer Bahn in einem strukturierten Raum argumentiert werden. Labilität ist aus dieser Diktion heraus die Eigenschaft eines strukturierten Raumes. Störungen während seines gesamten Bahnverlaufs können, ein entsprechendes Labilitätsschema vorausgesetzt, ebenso thematisiert werden wie die Rolle der Startbedingungen. Zwei Eigenschaften chaotischer Systeme bleiben allerdings außerhalb der Reichweite dieser Diktion, die erst im Rahmen einer global-dynamischen Sprechweise thematisiert werden können, die das zeitliche Verhalten von Systemscharen betrachtet.

5.2.5 Argumentation mit Systemscharen

Eingeschränkte Vorhersagbarkeit soll im Rahmen des Lerninterviews als eine eingeschränk-

te Vorhersagedauer interpretiert werden. Dies ist erst durch die Betrachtung von Metastrukturen in einem strukturierten Raum möglich. Prognostizierbarkeit ist gewissermaßen über Bahnen visualisiert, die sich (noch) nicht voneinander getrennt haben. Erst wenn sich benachbart gestartete Bahnen mit exponentieller Wachstumsrate voneinander trennen, ist eine Vorhersage nicht mehr möglich. Nur solche Schülerinnen und Schüler, die in diesem Sinne mit Systemfamilien argumentieren, sind in der Lage zu verstehen, dass chaotische Systeme *eingeschränkt* vorhersagbar sind. Alle übrigen Schülerinnen und Schüler interpretieren die eingeschränkte Vorhersagbarkeit chaotischer Systeme als generelle Unprognostizierbarkeit. Zentral für die Beziehung zwischen der eingeschränkten Vorhersagbarkeit und der Sensitivität chaotischer Systeme ist das wiederholte Überqueren labiler Gleichgewichtslagen. Streng genommen nähern sich chaotische Systeme sogar unendlich häufig solchen Nichtlinearitäten an. Ausschließlich die Argumentation mit „Trajektorienbüscheln“ ist ein angemessenes Tool zur Thematisierung dieser Eigenschaft chaotischer Systeme. Bahnenbüschel werden am labilen Gleichgewicht in Teilbüschel zerlegt, die sich jeweils exponentiell voneinander trennen. Diese Teilbüschel zerfallen nach mehrfachem Überqueren labiler Gleichgewichtslagen wiederum in Teilbüschel usw.

Im Fall einer Argumentation mit Systemscharen dürften wohl ausschließlich Bahnen (und keine bewegten Objekte) visualisiert werden. Es wird ein Bahnenbüschel in einem strukturierten Raum gesehen. Es ist also gewissermaßen eine doppelte Strukturiertheit des Raumes im Blick. Zum einen wird die Struktur gesehen, die von den Potentialverhältnissen erzeugt wird, die zum anderen von der Struktur eines (divergierenden) Bahnenbüschels überlagert ist. Wie für alle übrigen Diktionsmuster so kann auch für eine Argumentation mit Systemscharen ein mentales Bild angenommen werden, das sich aus höchstens zwei (in diesem Fall aus genau zwei) Elementen zusammensetzt. Die Annahme, dass die verschiedenen Diktionsmuster mit

jeweils spezifischen mentalen Bildern einhergehen, erscheint einmal mehr plausibel, wenn man bedenkt, dass im Rahmen der Studie keine entsprechende lokal-dynamische Diktion beobachtet wurde, die das Verhalten von Systemscharen thematisiert. Das korrespondierende mentale Bild müsste mindestens die Bewegung zweier „verwandter“ Systeme und die Kräfte, die auf sie wirken, für verschiedene Zeitpunkte in Betracht ziehen. Ein solches mentales Bild wäre um ein Vielfaches komplexer als die hier vorgestellten. Die Argumentation mit Systemscharen erscheint aus Sicht des Autors im Rahmen des Unterrichts zur eingeschränkten Vorhersagbarkeit chaotischer Systeme besonders förderungswürdig. Es sei an dieser Stelle noch darauf hingewiesen, dass sie von allen im Rahmen der Studie beobachteten Sprechweisen demjenigen Argumentationsmuster am nächsten kommt, das auch von Physikern bei der Behandlung chaotischer Systeme favorisiert wird. Der Unterschied liegt lediglich darin, dass hier das Verhalten von Systemscharen in einem Orts-Potential- und nicht in einem Orts-Impuls-Raum betrachtet wird.

5.2.6 Unterschiedliche Diktionsmuster für Basis- und Zielanalogon

Ähnlich wie im Fall intuitiver Labilitätsschemata, so scheint auch für die unterschiedlichen Diktionsmuster zu gelten: Verwenden die Schülerinnen und Schüler für Basis- und Zielanalogon unterschiedliche Sprechweisen, so wird eine Analogie zwischen ihnen nicht gesehen. Dies liefert ein weiteres Indiz dafür, dass bestimmte mentale Bilder und Modelle unauflöslich mit bestimmten Diktionsmustern verknüpft sind. Werden für Basis- und Zielanalogon unterschiedliche Diktionsmuster benutzt, die den aus der Post-festum-Perspektive analogen Merkmalen eine unterschiedliche Qualität verleihen, so können diese Merkmale unter Umständen zwar als relevant markiert sein, aber trotzdem nicht als analog wahrgenommen werden. Der Basisbereich gerät so erst gar nicht in das assoziative Umfeld des Zielbereichs.

5.3 Steuerung von Lernprozessen durch didaktische Analogien

Es ist ein wesentliches Ziel des Unterrichts zur eingeschränkten Vorhersagbarkeit, dass die Schülerinnen und Schüler die dynamische Instabilität chaotischer Systeme auf sensitive Zonen labilen Gleichgewichts zurückführen. Nur eine geringe Zahl der Schülerinnen und Schüler, die an der Untersuchung teilnahmen, assoziiert allerdings spontan ein adäquates Labilitätsschema mit dem chaotischen Magnetpendel. Alle Schüler, die spontan ein Kippeligkeits-Schema auf das chaotische Magnetpendel anwenden, profitieren unmittelbar von einer Analogie zwischen dem Magnetpendel und den Elementaranaloga (Wall- und Berggratsituation nach Abb.3). Die Kippeligkeits-Vorstellung kann weitgehend bruchlos zu einer adäquaten Sensitivitäts-Vorstellung ausdifferenziert werden. Sie versteht sensitive Zonen bereits als labile Gleichgewichtslagen, markiert Störungen aber als weitgehend irrelevant für eine Aufklärung chaotischen Verhaltens. Für Schüler mit einer Kippeligkeits-Vorstellung sind die Elementaranaloga eine geeignete Lernhilfe, um die Rolle von Störungen für das chaotische Magnetpendel zu problematisieren.

Der überwiegende Teil der Schülerinnen und Schüler, die an der Studie teilnahmen, zeigt für das Magnetpendel ein Trennungslinien- oder ein Neutrale-Zonen-Schema. Diese Schülerinnen und Schüler tun sich weitaus schwerer mit den didaktischen Analogien, die im Unterricht des teaching experiment verwendet werden. Die aus beiden Schemata erwachsenden Lernschwierigkeiten haben unterschiedliche Gründe. Auf dem Hintergrund eines Trennungslinien-Schemas ist dynamisch instabiles („chaotisches“) Verhalten nicht erklärungsbedürftig, es wird vorausgesetzt, um die Zufälligkeit des Zielmagnetens beim Magnetpendel zu erklären. Didaktische Analogien, die wie die Elementaranalogien dazu dienen, die Mechanismen dynamisch instabilen Verhaltens zu vermitteln, werden entsprechend nicht im Sinne der Instruktionsziele genutzt. Eine Neutrale-Zone-Vorstellung hin-

gegen problematisiert zwar dynamische Instabilität, erklärt sie aber ausschließlich über die unüberschaubare Vielfalt externer Einflüsse auf das Systemverhalten. Das Neutrale-Zone-Schema ist im wesentlichen ein exogener Erklärungsansatz, der strukturelle Merkmale chaotischer Systeme nicht hinterfragt. Beide Interpretationsrahmen werden jedenfalls z.T. von den Schülerinnen und Schülern im Verlauf des Lerninterviews abgelegt, erweisen sich aber, etwa im Gegensatz zum animistischen Entscheidungszonen-Schema, als zunächst resistent gegenüber Änderungsversuchen.

Eine völlig neue Dimension der Nützlichkeit didaktischer Analogien wird durch die Perspektive der Diktionsmuster aufgespannt. Spezifische Analoga können geeignet sein, bestimmte Diktionen bei den Lernern zu evokieren, die es ihnen ermöglichen, über bestimmte kritische Merkmale des Zielanalogons zu reden. Als hilfreich für ein Verständnis der dynamischen Instabilität erwies sich ein Diktionsmuster, das gewissermaßen auf die Betrachtung einer Metastruktur in einem strukturierten Raum abhebt. Die Lerner „sehen“ in diesem Fall offenbar ein Bahnenbüschel, das von einer Systemschar erzeugt wird und das in einem Potentialgebirge divergiert. Das Computersimulationsprogramm *MagPen* (Thomas et al., 1996) konnte diese Sichtweise mit einigem Erfolg triggern. *MagPen* fördert bei den Lernern also eine Sprechweise, die es erlaubt, z.B. die Bedeutung der wiederholten Überquerung sensitiver Zonen für die Trennungseigenschaft chaotischer Systeme zu verstehen. Die Analyse einzelner Fallbeispiele hat gezeigt, dass manche der Schülerinnen und Schüler offenbar unzureichend auf eine solche Diktion vorbereitet sind, wenn sie sich mit den Simulationsexperimenten zum chaotischen Magnetpendel auseinandersetzen. Eine Reihe von ihnen argumentiert selbst im Rahmen der Simulationsexperimente mit den „Entweder-oder-Verläufen“ einzelner Bahnen. Der Blick auf den heuristischen Nutzen von *MagPen* für das Realexperiment bleibt ihnen so grundsätzlich verstellt. Sie erkennen nicht, dass das System für eine gewisse, wenn auch

kurze Zeit prognostizierbar ist, weil sie den zunächst ähnlichen Verlauf benachbart gestarteter Bahnen nicht thematisieren, den sie gegebenenfalls als Indiz für eine (zeitlich) eingeschränkte Vorhersagbarkeit interpretieren könnten. Darüber hinaus verstehen sie eine gezielte Variation der Startbedingungen in der Simulation nicht als eine Modellierung der Unsicherheiten in der Startkonfiguration des Realexperiments. Da sie nur einzelne Bahnen in Betracht ziehen, gehen sie z.T. sogar davon aus, *MagPen* könne über eine Schnittstelle zur Messdatenaufnahme dazu genutzt werden, die Startbedingungen des Realexperiments so präzise zu bestimmen, dass sein chaotisches Verhalten beliebig vorhersagbar wird. *MagPen* wird für diese Schüler so zu einer modernen technischen Realisierung des Laplaceschen Dämons, der auch kleinste Unsicherheiten in der Realisierung von Startbedingungen messtechnisch „beherrschbar“ macht. Der unterrichtliche Einsatz von *MagPen* wirkt sich auf den Lernerfolg dieser Schülerinnen und Schüler sogar regelrecht kontraproduktiv aus.

6. Diskussion

Analogiebasierte Lernprozesse im Bereich des deterministischen Chaos waren der Gegenstand der hier vorgestellten Untersuchung. Die Entwicklung eines lerntheoretischen Bezugsrahmens zum analogen Verstehen arbeitete der empirischen Untersuchung des Forschungsgegenstandes zu. Sie mündete in ein Modell der heuristischen Analogie, auf dessen Hintergrund die Mikroprozesse der Analogienutzung in einem Unterricht zur Chaostheorie analysiert wurden. Epistemologisch und psychologisch motiviert haben wir die konsequente Differenzierung zwischen einer Post-festum-Analogie und einer heuristischen Analogie vorgeschlagen. Post-festum-Analogie und heuristische Analogie bezeichnen dabei unterschiedliche mentale Prozesse der Analogienutzung. Unter einer Post-festum-Analogie soll dabei die Generierung einer Analogie zum Zweck der Illustration oder Kommunikation eines vom Analogienutzer bereits gebildeten Begriffs oder

Begriffssystemen verstanden werden. Eine heuristische Analogie dient der „vortheoretischen“ Modellierung eines erklärungsbedürftigen Phänomens. Unter heuristischer Perspektive sind im Gegensatz zur Post-festum-Analogie Begriffe und Begriffssysteme zur Beschreibung eines Phänomens nicht Voraussetzung sondern Ziel der Nutzung einer Analogie.

Das Modell der heuristischen Analogie (Abb. 5) ließ erwarten, dass mentale Bilder und intuitive Schemata einen wesentlichen Einfluss auf das analoge Verstehen ausüben. Die Ergebnisse der Lernprozessestudie unterstützen diese Hypothese. Die Analogiegenerierungsprozesse in den Lerninterviews zur eingeschränkten Vorhersagbarkeit konnten auf der Folie unterschiedlicher intuitiver Schemata von Labilität und mentaler Bilder der Systemdynamik chaotischer Systeme schlüssig beschrieben werden. Die Prognose der Gentnerschen Strukturabbildungstheorie (Gentner, 1989), wonach Analogiebildungsprozesse vorrangig von der propositionalen Struktur der Analoga bestimmt sind, konnte im Rahmen der Untersuchung nicht bestätigt werden. Weitgehend unabhängig von der subjektiven Vertrautheit mit einem Basisanalogon, das der Interviewer als Lernangebot präsentierte, wurde eine Analogie von den Schülerinnen und Schülern nur dann heuristisch genutzt, wenn Basis und Ziel auf der Folie derselben Labilitätsschemata und mentalen Bilder der Systemdynamik diskutiert wurden. Für die unterschiedlichen Labilitätsschemata und mentalen Bilder konnten klar abgesteckte Horizonte klärungsbedürftiger Fragen in Bezug auf chaotisches Verhalten bestimmt werden. Im Einklang mit dem Modell der heuristischen Analogie brach die Nutzung einer Analogie immer dann ab, wenn der Klärungsbedarf der Schülerinnen und Schüler gedeckt war. Selbst augenscheinlich saliente Merkmale des Basisanalogons wurden dann nicht zum Verstehen des Zielbereichs genutzt. Auf dem Hintergrund der Gentnerschen Strukturabbildungstheorie ist dieser Befund der empirischen Studie allemal erstaunlich.

Die empirische Studie hat ein Kategorienschema unterschiedlicher intuitiver Labilitäts-

schemata geliefert, in das sich die verschiedenen individuellen Deutungsversuche der Schülerinnen und Schüler vom labilen Gleichgewicht als einer sensitiven Zone rubrizieren lassen. Einige dieser Vorstellungen unterscheiden sich dabei erheblich von einem adäquaten Begriff des labilen Gleichgewichts. Besonders häufig vertreten und ausgesprochen nachhaltig im Lernprozess wirksam waren im Rahmen der Studie die Vorstellung vom labilen Gleichgewicht als einer *neutralen Zone* bzw. als einer *Trennungslinie*. Schülervorstellungen dieser Art herauszupräparieren und die auf ihrer Grundlage möglichen analogiebasierten Lernprozesse aufzuzeigen, ist ein originär fachdidaktischer Ertrag dieser Untersuchung. Als gleichermaßen bedeutsam für das analoge Verstehen der eingeschränkten Vorhersagbarkeit erwiesen sich die mentalen Bilder der Schülerinnen und Schüler von dem Bewegungsverhalten chaotischer Systeme. Inhaltsanalytisch wurden solche mentalen Bilder indirekt und phänomenographisch über die verschiedenen Diktionsmuster oder „Sprechweisen“ operationalisiert, in denen die Systemdynamik charakterisiert wurde.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es prinzipiell zwei Gründe dafür geben kann, wenn eine Analogie oder ein analoges Merkmal im Sinne der didaktischen Analogie nicht genutzt wird. Zum einen fruchtet eine didaktische Analogie ausschließlich dann, wenn ein als Lernhilfe angebotenes Basisanalogon aus Sicht des Schülers im assoziativen Umfeld des Zielanalogons liegt. Die mit dem Zielanalogon verbundenen intuitiven Schemata und mentalen Bilder, die das assoziative Umfeld abstecken, müssen auch für die Basis subjektiv plausibel erscheinen. Ist dies nicht der Fall, findet faktisch keine Analogienutzung statt. Basis und Ziel werden dann als disanalog wahrgenommen. Dies ist weitgehend unabhängig von der subjektiven Vertrautheit des Lernalters mit dem dargebotenen Basisanalogon der Fall. Zum anderen spannen die unterschiedlichen intuitiven Schemata und mentalen Bilder unterschiedliche Horizonte subjektiv erklärungsbedürftiger Fragen auf. Unabhängig von ihrer Salienz im Basisanalogon

werden analoge Merkmale nur dann für eine Analogiebildung heuristisch genutzt, wenn sie im Zielanalogon auf der Folie der von ihm getriggerten intuitiven Schemata und mentalen Bilder als relevant markiert worden sind. Verschiedene intuitive Schemata und mentale Bilder sind also mehr oder minder geeignet, spezifische Fragen in das Blickfeld des Schülers zu rücken. Die verschiedenen intuitiven Labilitätsschemata wecken ebenso wie die verschiedenen Diktionen einen bestimmten Klärungsbedarf in bezug auf chaotisches Verhalten, der die heuristische Nutzung von Analogien ganz entscheidend beeinflusst. Die Nützlichkeit der im Unterricht verwendeten didaktischen Analogien besteht in erster Linie nicht darin, dass sie kritische Merkmale chaotischer Systeme dadurch erschließen helfen, dass die Basisanaloge dem Lerner vertraute Eigenschaften besitzen, die mit abstrakten Merkmalen des Zielanalogons vergleichbar sind. Jenseits von Fragen der Vertrautheit müssen Schülerinnen und Schüler ein Basisanalogon als Visualisierungshilfe für ein Zielanalogon akzeptieren, um eine Analogie heuristisch nutzen zu können.

Literatur

- Bortz, J. & Döring, N. (1995). *Forschungsmethoden und Evaluation*. Berlin: Springer.
- Christmann, U. & Groeben, N. (1997). *Sprache*. In J. Straub, W. Kempf & H. Werbig (Hrsg.), *Psychologie. Eine Einführung* (S.345-373). München: DTV.
- Clement, J. (1993). Using bridging analogies and anchoring intuitions to deal with students' preconceptions in physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 30, 1241-1257.
- Duit, R. (1991). On the role of analogies and metaphors in learning science. *Science Education*, 75, 6, 649-672.
- Duit, R. & Komorek, M. (1997). Understanding the basic ideas of chaos-theory in a study of limited predictability. *International Journal of Science Education*, 19, 247-264.
- Duit, R., Komorek, M. & Wilbers, J. (1997a). Studien zur Didaktischen Rekonstruktion der Chaostheorie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 3(3), 19-34.
- Duit, R., Komorek, M., & Wilbers, J. (1997b). Studies on educational reconstruction of chaos theory. *Research in Science Education*, 27(3), 339-357.
- Flick, U., Kardoff, E. von, Keupp, H., Rosenstiel, L. von & Wolff, S. (1991). *Handbuch - Qualitative Sozialforschung. Grundlagen, Konzepte, Methoden und Anwendungen*. München: Psychologie-Verlags-Union.
- Flick, U. (1995). *Qualitative Forschung. Theorie, Methoden, Anwendung in Psychologie und Sozialwissenschaften*. Reinbek: Rowohlt.
- Gentner, D. (1989). The mechanisms of analogical learning. In S. Vosniadou & A. Ortony (Eds.), *Similarity and analogical reasoning* (pp.199-241). Cambridge: Cambridge University Press.
- Gentner, D., Rattermann, M.J., & Forbus, K.D. (1993). The role of similarity in transfer: Separating retrievability from inferential soundness. *Cognitive Psychology*, 25, 524-575.
- Gentner, D. & Markman, A.B. (1997). Structure mapping in analogy and similarity. *American Psychologist*, 52(1), 45-56.
- Glaser, B.G. & Strauss, A.L. (1967). *The discovery of grounded theory. Strategies for qualitative research*. Chicago, ILL: Aldine.
- Glynn, S.M., Duit, R., & Thiele, R.B. (1995). Teaching science with analogies: A strategy for constructing knowledge. In S.M. Glynn & R. Duit (Eds.), *Learning science in the schools: Research reforming practice* (pp.247-273). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Holyoak, K.J. (1985). The pragmatics of analogical transfer. In G.H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation*, Vol. 19 (pp.59-87). Orlando: Academic Press.
- Holyoak, K.J. & Koh, K. (1987). Surface and structural similarity in analogical transfer. *Memory & Cognition*, 15, 332-340.
- Hoops, W. (1992). Wenn wir Äpfel mit Birnen vergleichen. Analogien und ihr didaktisches Potential. Tübingen: Deutsches Institut für Fernstudien an der Universität Tübingen.
- Johnson, M. (1987). *The body in the mind: the bodily basis of meaning, imagination, and reason*. Chicago, ILL: University of Chicago Press.
- Jung, W., Wiesner, H. & Engelhard, P. (1981). *Vorstellungen von Schülern über Begriffe der Newtonschen Mechanik*. Bad Salzdetfurth: Franzbecker.
- Komorek, M. (1999). Lernprozessstudie zum deterministischen Chaos. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 5(3), 3-21.

- Lakoff, G. & Johnson, M. (1980). *Metaphors we live by*. Chicago, ILL: University of Chicago Press.
- Mach, E. (1920). Die Ähnlichkeit und die Analogie als Leitmotiv der Forschung. In E. Mach: *Phänomenologie der Erkenntnis*. Leipzig: Barth.
- Marton, F. (1986). Phenomenography - a research approach to investigate different understandings of reality. *Journal of Thought*, 21(3), 28-49.
- Mayring, P. (1983). *Qualitative Inhaltsanalyse*. Weinheim: Deutscher Studien Verlag.
- Mayring, P. (1990). *Einführung in die qualitative Sozialforschung*. Weinheim: Deutscher Studien Verlag.
- Seel, N.M & Dinter, F.R. (1991). Induktives Denken und Analogiebildung, *Unterrichtswissenschaft*, 19, 98-110.
- Sfard, A. (1994). Reification as the birth of metaphor. *For the Learning of Mathematics*, 14(1), 44-55.
- Steffe, L.P. (1983). The teaching experiment methodology in a constructivist research program. In M. Zwerg et al. (Eds.), *Proceedings of the Fourth International Congress on Mathematical Education*. (pp.469-471). Boston, MA: Birkhaeuser.
- Steffe, L.P. & D'Ambrosio, B. (1996). Using teaching experiments to understand students' mathematics. In D. Treagust, R. Duit, & B. Fraser (Eds.), *Improving teaching and learning in science and mathematics* (pp.65-76). New York: Teacher College Press.
- Thomas, R., Duit, R., Komorek, M., Roth, W.-M. & Wilbers, J. (1996). Das chaotische Magnetpendel - MagPen: ein Simulationsprogramm. *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik*, 36, 21-27.
- Vosniadou, S. & Ortony, A. (1989). Similarity and analogical reasoning: A synthesis. In S. Vosniadou & A. Ortony (Eds.), *Similarity and analogical reasoning* (pp.1-17). Cambridge: Cambridge University Press.
- Wilbers, J. & Duit, R. (1997). Analogien in der Chaostheorie. In J. Willer (Hrsg.), *Didaktik der Physik - Vorträge Physikertagung 1997 in Berlin* (S.288-293). Bad Honneff: Deutsche Physikalische Gesellschaft.
- Wilbers, J. & Duit, R. (1999). On the micro-structure of analogical reasoning: The case of understanding chaotic systems. In M. Komorek, H. Behrendt, H. Dahncke, R. Duit, W. Gräber, & A. Kross (Eds.), *Research in Science Education - Past, Present, and Future* (pp.204-207). Kiel: IPN.
- Wilbers, J. & Duit, R. (2001). Untersuchungen zur Mikro-Struktur des analogischen Denkens in Teaching Experiments. In S. v. Aufschnaiter & M. Welzel (Hrsg.), *Nutzung von Videodaten zur Untersuchung von Lehr-Lern-Prozessen* (S.143-155). Münster: Waxmann.
- Wilbers, J. (1997). The role of analogies for teaching and learning key issues of chaos theory. In R. Pintó (Ed.), *Theory and methodology of research in science education* (pp.306-310). *Proceedings of the 3rd European Summerschool 1996 in Barcelona*. Barcelona (Spain): U.A.B.
- Wilbers, J. (1998). Analogien und Chaostheorie. In H. Behrendt (Hrsg.), *Zur Didaktik der Physik und Chemie - Probleme und Perspektiven* (S.307-309). *Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Potsdam, Sept. 1997*. Alsbach: Leuchtturm.
- Wilbers, J. (2000). *Post-festum- und heuristische Analogien im Physikunterricht*. Kiel: IPN.
- Zeitoun, H.H. (1984). Teaching scientific analogies: A proposed model. *Research in Science & Technological Education*, 2, 107-125.

Dr. Jens Wilbers ist z.Zt. Studienreferendar am Studienseminar in Hannover.

Dr. Reinders Duit ist Professor für Didaktik der Physik am IPN in Kiel.

Dr. Jens Wilbers
Gesmannstr. 7
30459 Hannover
E-Mail: jwilbers@web.de