

**Beiträge zur Didaktischen Rekonstruktion, Band 13**  
**Komorek: Lernen und Lehren nichtlinearer Physik**

## **Beiträge zur Didaktischen Rekonstruktion**

Schriftenreihe zur fachdidaktischen  
Lehr-Lern-Forschung  
herausgegeben von Michael Komorek und  
Barbara Moschner

Didaktisches Zentrum  
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg  
ISSN 1617-3139  
Band 13, 2014

Auf Basis des Modells der Didaktischen Rekonstruktion werden empirische Forschungsarbeiten durchgeführt, in denen Perspektiven von Lernenden bzw. Lehrpersonen und fachliche Konzepte eng miteinander verknüpft untersucht werden. In der Schriftenreihe werden Arbeiten zur Didaktischen Rekonstruktion und verwandte Arbeiten veröffentlicht. Die Beiträge werden extern begutachtet. Zur Publikation vorgesehene Arbeiten sind bei den Herausgebern einzureichen über:

Didaktisches Zentrum  
Carl von Ossietzky Universität  
D-26111 Oldenburg

## **Wissenschaftlicher Beirat**

Gerhard Bach / Bremen  
Lisa D. Bendixen / Las Vegas  
Karl Böhmer / Santiago  
Reinders Duit / Kiel  
Harald Gropengießer / Hannover  
Hilke Günther-Arndt / Oldenburg  
Ute Harms / Kiel  
Gustav Helldén / Kristianstad  
Corinna Hößle / Oldenburg  
Astrid Kaiser / Oldenburg  
Ulrich Kattmann / Oldenburg  
Andreas Krapp / München  
Peter Labudde / Basel  
Dirk Lange / Hannover  
Hilbert Meyer / Oldenburg  
Carmen Mörsch / Zürich  
Michael Neubrand / Oldenburg  
Ilka Parchmann / Kiel  
Susanne Prediger / Dortmund  
Bernd Ralle / Dortmund  
Dietmar von Reeken / Oldenburg  
Sibylle Reinfried / Luzern  
Kristina Reiss / München  
Falk Rieß / Oldenburg  
Thomas Zabka / Hamburg

Michael Komorek

# **Lernen und Lehren nichtlinearer Physik - eine Didaktische Rekonstruktion**

Didaktisches Zentrum  
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

**Komorek, Michael:**  
**Lernen und Lehren nichtlinearer Physik -  
eine Didaktische Rekonstruktion.**

1. Auflage  
Oldenburg: Didaktisches Zentrum, 2014  
ISBN 978-3-8142-2301-8  
ISSN 1617-3139  
(Beiträge zur Didaktischen Rekonstruktion, Bd. 13)

© Didaktisches Zentrum  
der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg  
Ammerländer Heerstraße 114-118  
D-26129 Oldenburg  
Tel.: +49-(0)441-798-3033  
Fax: +49-(0)441-798-4900  
E-Mail: [diz@uni-oldenburg.de](mailto:diz@uni-oldenburg.de)

Alle Rechte vorbehalten.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Didaktische Rekonstruktion der nichtlinearen Physik</b> .....	<b>9</b>
2.1 Ein Modell für die physikdidaktische Forschung und Entwicklung .....	9
2.2 Neue Entwicklungen des Modells - die Rolle der Lehrpersonen .....	15
2.3 Ein Projekt zur Didaktischen Rekonstruktion nichtlinearer Systeme in der allgemeinbildenden Schule .....	18
<b>3. Kompetenzen, Bildungsstandards und das Lernen nichtlinearer Physik</b> .....	<b>23</b>
3.1 Bildungsreform und Scientific Literacy .....	23
3.2 Empirische Bestimmung des Bildungswertes nichtlinearer Physik .....	26
<b>4. Nichtlineare Systeme als Gegenstand fachdidaktischer Forschung und Entwicklung</b> .....	<b>45</b>
4.1 Bibliographie zur fachdidaktischen Forschung und Entwicklung im Bereich nichtlinearer Physik .....	45
4.2 Forschungen zum Lernen und zum Unterricht .....	49
4.3 Lehrerprofessionalisierung und das Lehren moderner Physik .....	54
<b>5. Sachstruktur für den Unterricht und empirische Ergebnisse aus Unterrichts- erprobungen in Klasse 10.</b> .....	<b>61</b>
5.1 Konzepte der nichtlinearen Physik .....	61
5.2 Empirische Ergebnisse zu Lern- und Unterrichtsprozessen am Ende der Sekundarstufe I .....	70
<b>6. Fraktale als Zugang zur geordneten Unordnung</b> .....	<b>77</b>
6.1 Das Fraktal als Beispiel für die Entwicklung naturwissenschaftlicher Modelle .....	78
6.2 Die Methode des Teaching Experiment .....	84
6.3 Schülerinnen und Schüler verstehen Fraktale .....	87
6.4 Lernprozesse zum fraktalen Wachstum .....	90
<b>7. Ein Unterrichtskonzept zur nichtlinearen Physik in der gymnasialen Oberstufe.</b> <b>93</b>	
7.1 Konzeption, Ziele und Evaluationsaufgaben .....	93
7.2 Populationen und Setting .....	98
7.3 Module, Materialien und Ablaufvarianten .....	99
7.4 Untersuchungsinstrumente - qualitative und quantitative Methoden .....	112
7.4.1 Fragebögen .....	112
7.4.2 Interviews und Teaching Experiment .....	118
7.4.3 Videobasierte Unterrichtsbeobachtung .....	120
7.4.4 Field Notes und Concept Maps .....	121
7.5 Evaluationsergebnisse .....	124
7.5.1 Schwerpunkt: Prozesse der Didaktischen Rekonstruktion im Schülererteam. ....	125
7.5.2 Schwerpunkt: Praxistauglichkeit und Variabilität des Unterrichtskonzepts .....	132
7.5.3 Schwerpunkt: Lerneffekte und Kompetenzentwicklung .....	147
7.6 Diskussion der Erprobungs- und Evaluationsergebnisse .....	155

<b>8. Empirische Studien zu den Konzepten <i>Ordnung</i> und <i>Zufall</i>.....</b>	<b>157</b>
8.1 Vorstellungen und Lernprozesse im Bereich <i>Ordnung</i> .....	157
8.2 Sachanalyse und Lernprozessstudie zum Thema <i>Zufall</i> .....	179
<b>9. Blick zurück nach vorn .....</b>	<b>195</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>201</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>215</b>

# 1. Einführung

*„Die Hauptaufgabe des Lehrers ist es nicht, Bedeutungen zu erklären, sondern an die Tür des Geistes zu klopfen.“*

*Rabindranath Tagore (1861-1941), indischer Dichter (Nobelpreis 1913) und Philosoph*

In diesem Band werden Forschungs- und Entwicklungsergebnisse eines Projekts zur Didaktischen Rekonstruktion der nichtlinearen Physik vorgestellt und diskutiert. Das Projekt wurde vom Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik (IPN) an der Universität Kiel unterstützt und über weite Zeitabschnitte durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziell gefördert, wofür die Projektmitarbeiter großen Dank aussprechen. Dank gilt auch den zahlreichen Lehrpersonen sowie Schülerinnen und Schülern, die an über zehn Teilstudien tatkräftig mitgewirkt haben. Ohne das Engagement der *Partner im Forschungsprozess* ist in der empirischen Lehr-Lern-Forschung wenig zu erreichen. In Zeiten der zunehmenden Belastungen von Lehrpersonen und Schulleitungen soll hier den folgenden Schulen dafür gedankt werden, sich der empirisch-fachdidaktischen Forschung geöffnet zu haben: Friedrich-Schiller-Gymnasium (Preetz), Gymnasium Wellingdorf (Kiel), Gymnasium Elmschenhagen (Kiel), Kieler Gelehrten-schule (Kiel), Ernst-Barlach-Gymnasium (Kiel) und Jürgen-Fuhlendorf-Schule (Bad Bramstedt).

Diese Einführung soll über Ziele und Absichten des Projekts und die gesetzten Schwerpunkte informieren. Ausgangs des zwanzigsten Jahrhunderts gab es innerhalb der Physik und anderer Naturwissenschaften einen Boom, was die Beschäftigung mit den Themen deterministisches Chaos, Fraktale, selbstorganisierende Strukturbildung und nichtlineare komplexe Systeme angeht. Mit Hilfe moderner Computeranlagen war es möglich geworden, das dynamisch instabile und gleichzeitig strukturbildende Verhalten komplexer Systeme zu studieren und graphisch darzustellen. Diskussionen um einen Paradigmenwechsel in den Naturwissenschaften, also um einen Wechsel der wissenschaftlichen Grundannahmen, waren aufgekommen. In der Folge interessierte sich auch die Physikdidaktik für dieses Thema, denn neue physikalische Phänomene wurden erstmals der Beobachtung, Beschreibung und Modellierung zugänglich. Der enge Zusammenhang von Gesetzmäßigkeit und Vorhersagbarkeit wurde durch Einsichten der nichtlinearen Physik infrage gestellt bzw. erweitert. Dadurch wurde nicht nur das alltägliche, sondern auch das wissenschaftliche Verständnis vom Nutzen erkannter Naturgesetze herausgefordert. Hinzu kamen neue Erkenntnisse über Prozesse physikalischer Strukturbildung, die Konzepte von Komplexität veränderten. Bei solch grundlegenden Änderungen der Grundannahmen der Physik ist es unter dem Gesichtspunkt, dass Schule auch Wissen über den Prozess der naturwissenschaftlichen Modellbildung (Nature of Science) vermitteln soll, unabdingbar, fachdidaktisch zu prüfen, inwieweit dieses neue Thema bildungsrelevant ist. Erste didaktischen Bemühungen wurden zunächst wenig systematisch vorangetrieben, indem Schulexperimente entwickelt wurden, die einzelne Aspekte nichtlinearer Physik verdeutlichen sollten. Sie gingen einher mit Elementarisierungen der neuen fachlichen Ansätze; empirische Untersuchungen zum Lernen fehlten bislang.

Diese Situation war der Ausgangspunkt für das hier beschriebene Projekt. Es zielte darauf zu klären, welche der Ideen der nichtlinearen Physik sich für die allgemeinbildende Schule als vermittelnswerte physikalische Begriffe, Konzepte und Prinzipien herausstellen und welche davon von Schülerinnen und Schülern verschiedener Schulstufen erlernt werden können. Dies ist mit Hilfe

systematisch aufeinander bezogener analytischer und empirischer Untersuchungen geschehen. Ein generelles Ziel des Projekts ist die Förderung der naturwissenschaftlichen Grundbildung am Ende der Sekundarstufe I und in der gymnasialen Oberstufe. Dazu stellt sich die Frage, welche Einsichten der modernen Physik einer solchen Grundbildung zuliefern und dabei ein angemessenes Orientierungswissen für die Teilhabe an der Wissensgesellschaft aufzubauen helfen.

Die Kapitel 2, 3 und 4 befassen sich mit der Klärung von Bedingungen für die Vermittlung nichtlinearer Physik. Dazu gehören neben der Verankerung des Themas in Kerncurricula und Schulbüchern auch Forschungen zur fachdidaktischen Erarbeitung und Evaluation von Schulexperimenten, zu ablaufenden Lernprozessen sowie Einschätzungen zum Bildungswert nichtlinearer Physik. In den Kapiteln 5 bis 8 werden dann analytische und empirische Studien des Projekts exemplarisch dargestellt.

Den theoretischen Rahmen für die Studien im Projekt bildet das Modell der Didaktischen Rekonstruktion (KATTMANN et al., 1997; KOMOREK & KATTMANN, 2008; DUIT et al. 2012). Es ist ein innovatives Modell für die fachdidaktische Forschung und Entwicklung, das gleichermaßen in der nationalen wie internationalen Pädagogik und Physikdidaktik verwurzelt ist. Es beschreibt, wie vorunterrichtliche Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern wechselseitig auf fachwissenschaftliche Vorstellungen bezogen werden müssen, um Sachstrukturen für den Unterricht zu (re-)konstruieren und um Unterricht zu entwickeln. In Kapitel 2 werden die Komponenten des Modells vorgestellt und es wird demonstriert, wie das Modell in einen realen Forschungsprozess umgesetzt worden ist. Modellerweiterungen, die sich auf das fachdidaktische Denken und die Rolle von Lehrpersonen beziehen, werden vorgestellt und diskutiert (vgl. KOMOREK, FISCHER & MOSCHNER, 2013).

Die Frage nach dem Vermittlungswert der nichtlinearen Physik in der allgemeinbildenden Schule wird in Kapitel 3 untersucht. In einer Delphi-Studie schätzten Experten aus Bildung und Forschung den Bildungswert nichtlinearer Physik ein. Ausgangspunkt für den Fragebogen waren aktuelle Ansätze zur naturwissenschaftlichen Grundbildung. Zentrales Ergebnis dieser Studie ist, dass nichtlinearer Physik wie kaum einem anderen Thema weltbildprägende Funktionen auf zwei Ebenen zugewiesen wird. Zum einen auf der Ebene interdisziplinärer, strukturwissenschaftlicher Beschreibung von phänomenologisch recht unterschiedlichen Objekten und Systemen. Zum anderen auf der Ebene grundlegender physikalischer Konzepte wie Kausalität, Gesetzmäßigkeit oder Vorhersagbarkeit, die durch die Überlegungen der nichtlinearen Physik hinterfragt werden (WENDORFF, 2001; KOMOREK et al., 2002). Durch die Einführung von Bildungsstandards stellt sich die Frage, wie weit Inhalte der nichtlinearen Physik in Kerncurricula verankert sein sollten und welche Rolle sie z.B. für die Ausgestaltung von Schulcurricula spielen können (vgl. KLIEME et al., 2003). Im dritten Kapitel wird deshalb diskutiert, inwiefern nichtlineare Physik als ein Gebiet der modernen Physik zu fachlichen Schulprogrammen und -profilen beitragen kann.

Im vierten Kapitel wird die Verankerung des Themas in den Kerncurricula der Länder und seine Platzierung in Schulbüchern angesprochen. Zudem wird ein Überblick über Forschungs- und Entwicklungsansätze gegeben, wie nichtlineare Systeme für den Unterricht in der allgemeinbildenden Schule aufgearbeitet werden kann. Dazu wurde im Projekt u. a. eine Bibliographie geführt, in der



Projektlogo

---

relevante Artikel aus führenden fachdidaktischen Zeitschriften und Zeitschriften für die Schulpraxis ab Mitte der 80er Jahre aufgenommen wurden (vgl. KOMOREK, 2004b). Die Bibliographie ist über den Autor erhältlich. Empirische Arbeiten anderer Arbeitsgruppen zur Vermittlung von zentralen Konzepten der nichtlinearen Physik werden in diesem Kapitel exemplarisch vorgestellt. Die Frage der Lehrerprofessionalisierung mit Blick auf Themen moderner Physik wird angesprochen.

Mit Kapitel 5 werden Analysen zur Sachstruktur und erste didaktische Rekonstruktionen vorgestellt. Die Sachanalysen lenken den Blick auf die komplementären Prinzipien *dynamische Instabilität und strukturelle Stabilität, Komplexität und einfache Bildungsgesetze und Gesetzmäßigkeit und Zufall*. Diese Komplementaritäten sind das Ergebnis von Elementarisierungen, auf deren Basis eine Sachstruktur für den Unterricht entworfen wurde. Empirische Ergebnisse aus Unterrichtsstudien in Klasse 10 ergänzen dieses Kapitel. Diese Studien belegen, dass zentrale Eigenschaften deterministisch-chaotischer Systeme bereits am Ende der Sekundarstufe I vermittelt und dass Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern zu den Themen *Determinismus* und *Zufall* durch die erprobten Unterrichtskonzepte weiterentwickelt werden können.

Die Komplementarität von einfachen Bildungsregeln und komplexen Strukturen ist beispielsweise durch den Bereich der Fraktale repräsentiert. Im Projekt wurden analytische und empirische Studien zum Fraktalbegriff durchgeführt. Es stellte sich dabei heraus, dass sich das Fraktalbegriff wissenschaftlich zwar noch in der Entwicklung befindet und eine einheitliche Begriffsdefinition nicht vorliegt, dass aber zwei unterschiedliche Herangehensweisen an den Fraktalbegriff herausgearbeitet werden können. Verstehen Schülerinnen und Schüler die wichtigen Kriterien, nach denen man ein geometrisches Objekt als Fraktal einordnen möchte? Können sie fraktale Wachstumsprozesse erklären bzw. die wissenschaftlichen Erklärungen nachvollziehen? Und können sie die Komplementarität von einfachen Bildungsgesetzen und komplexen (fraktalen) Strukturen im Rahmen ihrer Vorstellungen von Einfachheit und Komplexität interpretieren? Diesen Fragen wird im sechsten Kapitel nachgegangen.

In Kapitel 7 wird ein Unterrichtskonzept für Kurse der gymnasialen Oberstufe präsentiert, das von einem Team aus erfahrenen Lehrpersonen und dem Autor entwickelt wurde und rund 16 Unterrichtsstunden umfasst. In Erprobungen, die von den Lehrpersonen des Teams durchgeführt wurden, bewährte sich die Modulstruktur des Unterrichts, weil es an die Gegebenheiten der Lerngruppen angepasst werden konnte. Für die sechs eingesetzten Module fanden sich die folgenden Titel:

- Himmelsmechanik - Erfolge und Ängste
- Dynamisch instabil - einfache Experimente helfen beim Verstehen
- Analogiebildung und Begriffe - chaotische Prozesse generalisieren
- Struktur trotz Zufall - Muster spielen mit Zufällen
- Strukturelle Ordnung - Anwendungen helfen leben
- Weltbilder - unsere Sicht von Welt und Physik im Wandel

Alle Unterrichtsmaterialien, Arbeitsbögen, Texte, Bauanleitungen für die verwendeten Experimente und Objekte, Informationsfolien für den Overheadprojektor etc. sind beim Autor erhältlich.

Die Entwicklung des Unterrichtskonzepts und seine Erprobungen wurden formativ evaluiert, alle ablaufenden Prozesse der Entwicklungsarbeit im Lehrerarbeitskreis und in den Erprobungen inklusive der Modifikationen des Konzepts wurden dokumentiert und ausgewertet. Dazu wurde eine Vielzahl von qualitativen wie quantitativen Erhebungsinstrumenten eingesetzt: eine videobasierte Unterrichtsbeobachtung, die durch Feldnotizen unterstützt wurde, Fragebögen für Lehrpersonen, Schülerinnen und Schülern sowie Interviews mit ihnen. Zu den Interviewtypen gehörten Kurzinterviews mit Schülerinnen und Schülern nach einzelnen Unterrichtsstunden, vertiefende Interviews mit Lehrpersonen und ein Teaching Experiment mit Schülerinnen und Schülern, mit

dem nach dem Unterricht untersucht wurde, wie weit sie die Inhalte des Unterrichts rekonstruieren konnten.

Die Vielzahl der Daten wird im siebten Kapitel in drei Schwerpunkten ausgewertet. Im ersten wurde untersucht, welche Prozesse der Didaktischen Rekonstruktion im Lehrerkreis stattgefunden haben. Die beteiligten Lehrpersonen waren zwar Experten bzgl. des Unterrichtens gewesen, bzgl. des Inhalts nichtlineare Physik aber Novizen. Zudem fand die Unterrichtsentwicklung in einer für sie eher unüblichen Kooperationsituation statt. Im zweiten Schwerpunkt wurde das Unterrichtskonzept als Produkt für die Praxis untersucht. Analysiert wurde, ob die Ziele des Konzepts in der Unterrichtsrealität erreicht wurden und ob es variabel genug war, damit es in verschiedene Kursformen mit unterschiedlichen Zeitvorgaben und von Lehrpersonen mit unterschiedlichen Unterrichtsstilen und inhaltlichen wie methodischen Vorlieben unterrichtet werden konnte. Hierzu wurden neben der direkten Beobachtung die Beurteilungen der Lehrpersonen sowie der Schülerinnen und Schüler (jeweils als Experten für Unterricht) herangezogen. Der dritte Schwerpunkt bezog sich auf Lernerfolge am Ende der Erprobungen. Welchen Erkenntnisgewinn erfuhren Schülerinnen und Schüler wie auch Lehrpersonen durch die inhaltliche Auseinandersetzung mit nichtlinearen Systemen? In welchen Vorstellungsbereichen gab es konzeptuelle Ausdifferenzierungen? Wo fanden evtl. sogar Konzeptwechselprozesse statt? Und welche Möglichkeiten für das Weiterlernen wurden deutlich?

Die Unterrichtsstudie warf neue Fragestellungen auf, die in vertiefenden empirischen Studien, die in Kapitel 8 vorgestellt werden, untersucht wurden. Die Begriffe *Ordnung* im Zusammenhang mit deterministischem Chaos und *Zufall* im Zusammenhang mit Gesetzmäßigkeit stellen fachlich wichtige Kategorien dar und haben – wie in Kapitel 3 – gezeigt, einen hohen Bildungswert. Doch welche Vorstellungen haben Schülerinnen und Schüler vom Konzept der Ordnung? Inwieweit können sie nachvollziehen, dass angesichts von chaotischen Attraktoren wissenschaftlich von Ordnung gesprochen wird? Die Vorstellung der Schülerinnen und Schüler zu den Begriffen Ordnung und Struktur wurden erhoben (VOGT, 2002); im Rahmen eines Teaching Experiment wurde mit Hilfe eines Simulationsprogramms untersucht, ob und inwieweit Schülerinnen und Schüler Phasenraumdiagramme chaotischer Systeme verstehen und mit dem Begriff der Ordnung fassen können. Die Studie führte auf ein Stufenmodell des Verstehens von chaotischen Attraktoren im Phasenraum.

Das Zusammenspiel von zufälligen und gesetzmäßigen Prozessen begegnet Schülerinnen und Schülern nicht nur im Alltag, sondern auch bei fraktalen Wachstumsprozessen, bei chaotischen Systemen und bei einer Reihe musterbildender, selbstorganisierender Strukturen. Nach einer grundlegenden fachlich-fachdidaktischen Analyse des Wechselspiels von Zufall und deterministischen Gesetzen (STAVROU, 2004) wurde in einem Teaching Experiment untersucht, inwieweit Schülerinnen und Schüler den Zusammenhang der beiden Konzepte im wissenschaftlichen Sinne nachvollziehen können und dabei Implikationen für die Vorhersagbarkeit von Prozessen verstehen. Es zeigte sich, dass bei Schülerinnen und Schülern unterschiedliche und undifferenzierte Vorstellungen von Zufall und dem Zusammenhang mit Gesetzmäßigkeit zu finden sind. In einem unterrichtlichen Setting, wie es das Teaching Experiment darstellt, ließen sich praktisch alle der mitwirkenden Schülerinnen und Schüler zumindest probeweise auf die wissenschaftliche Begrifflichkeit ein. Als ein Resultat konnten Leitlinien für den Unterricht zum Themenbereich Zufall in den Naturwissenschaften formuliert werden.

Das abschließende neunte Kapitel nimmt eine Gesamtschau der analytischen und empirischen Ergebnisse des Projekts vor und es wird diskutiert, welche Chancen Unterricht über nichtlineare Systeme in einer sich verändernden Bildungslandschaft in Deutschland spielen kann. Als Ausblick fokussiert zum einen auf weitere Themenfelder der modernen Physik, die bildungstheoretisch relevant erscheinen, bislang aber fachdidaktisch wenig bearbeitet wurden; und zum anderen auf die große Aufgabe, die didaktischen Strukturierungen, wie sie Lehrpersonen für ihren Unterricht

---

durchführen, von ihrer Dynamik und ihren leitenden Motiven her besser zu verstehen. Das hier dargestellte Projekt hat nämlich deutlich gemacht, dass Unterricht zu modernen physikalischen Themen nicht nur Schülerinnen und Schüler, sondern auch ihre Lehrerinnen und Lehrer herausfordert.

Neben dem Autor arbeiteten auch Nils Bücke, Claudia Cornilsen, Thomas Katscher, Barbara Naujack, Ralf Thomas, Heide Vogt und Lars Wendorff als Staatsexamenskandidaten, Dimitrios Stavrou und Jens Wilbers als Doktoranden sowie Prof. Dr. Reinders Duit als Arbeitsgruppenleiter intensiv im Projekt mit. Auch ihnen gilt der Dank des Autors.



## 2. Didaktische Rekonstruktion der nichtlinearen Physik

Seit rund vier Jahrzehnten ermöglichen die Forschungen zu selbstorganisierenden, nichtlinearen Systemen neue Einsichten in die Dynamik des Naturgeschehens. Diese Systeme entwickeln räumliche und zeitliche Muster und Strukturen. In den meisten Fällen läuft ihre mathematische Beschreibung auf nichtlineare Gleichungen hinaus. Die Methoden, die bei der Analyse nichtlinearer Systeme entwickelt worden sind, werden von angewandten Disziplinen wie der Medizin und der Technik eingesetzt; die Modelle und Theorien der nichtlinearen Dynamik haben darüber hinaus schnell Eingang in philosophische und weltanschauliche Diskussionen gefunden. Es fasziniert zweifellos, dass sich Systeme, die deterministischen Gesetzmäßigkeiten gehorchen, nur eingeschränkt vorhersagen lassen und ihr Verhalten - unwissenschaftlich gesprochen - chaotisch ist. Und es überrascht umso mehr, dass diese Systeme gewisse Ordnungsstrukturen aufweisen, so dass ihre *Chaotizität* wissenschaftlich interessant geworden ist.

Die Erkenntnisse der nichtlinearen Physik stellen bisherige Überzeugungen zum Verhältnis zwischen Gesetzmäßigkeit, Zufall und Vorhersagbarkeit infrage (ARGYRIS, FAUST & HAASE, 1994; SCHUSTER & JUST, 2005). Welche Aspekte nichtlinearer Physik sollten und können in der allgemeinbildenden Schule vermittelt werden? Wie stehen diese Aspekte in Beziehung mit Vorstellungen, die Schülerinnen und Schüler von komplexen, eben auch chaotischen Systemen nutzen? In diesem Kapitel wird dargestellt, wie das Modell der Didaktischen Rekonstruktion als theoretischer Forschungsrahmen herangezogen wird, um diese analytischen und empirischen Fragen zu klären und damit die nichtlineare Physik für den Schulunterricht zu erschließen.

### 2.1 Ein Modell für die physikdidaktische Forschung und Entwicklung

Für neue (physikalische) Themen im Schulunterricht gilt, was ebenso für etablierte Themen gelten sollte: Die fachliche Sachstruktur muss reorganisiert werden, so dass sie an Unterricht und an die Bedürfnisse von Lernern angepasst ist. Die simple Übernahme einer Sachstruktur aus der Wissenschaft für den Unterricht ist nicht möglich, weil sie in keiner Weise an die Denk- und Lernvoraussetzungen der Schülerinnen und Schüler angepasst ist, weil sie weder auf Unterrichts- noch auf Lernprozesse abgestimmt und weil sie für Unterricht zu eng gefasst ist. Denn Bezüge aus Alltag und Erfahrungswelt der Schülerinnen und Schüler, aus Gesellschaft und Technik und aus anderen Wissenschaftssparten sind in die wissenschaftliche Sachstruktur nicht integriert. Die Sachstruktur für den Unterricht lebt aber von solchen Bezügen. Während die Sachstruktur der Wissenschaft Physik für physikalische Fragestellungen optimiert ist, so ist sie für die Aufgaben von Unterricht wenig geeignet.

Mit dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion (vgl. KATTMANN, DUIT, GROPPENGIESER & KOMOREK, 1997; KOMOREK & KATTMANN, 2008; DUIT et al., 2012) werden fachliche Vorstellungen, wie sie in Lehrbüchern und anderen wissenschaftlichen Quellen Ausdruck finden, mit Schülerperspektiven so in Beziehung gesetzt, dass Leitlinien und Elemente für den Unterricht sowie Unterrichtsgänge entwickelt werden können. Bezüge zwischen fachlichem und interdisziplinärem Wissen auf der einen Seite und den Sichtweisen der Schülerinnen und Schüler, ihrem Vorverständnis, ihren Anschauungen und Einstellungen auf der anderen Seite herzustellen,

ist dringend notwendig. Denn dann lassen sich Unterrichtsprozesse an Übereinstimmung beider Sichtweisen ansetzen und Diskrepanzen zwischen wissenschaftlicher Sicht und Sicht der Lernenden lassen sich für die Gestaltung kognitiver Konflikte nutzen.

In die Sachstruktur für den Unterricht sind solche fachlichen und fachübergreifenden Bezüge zu integrieren, die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nicht berücksichtigen müssen, weil sie Teil ihres impliziten Wissens sind. Schülerinnen und Schüler haben aber keinen Zugriff auf dieses Wissen, z.B. darauf, wie bestimmte naturwissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen worden sind oder wie sie verwendet werden. Auch Diskussionen innerhalb der Wissenschaft, z.B. um theoretische und historische Hintergründe, konkurrierende Sichtweisen oder unberücksichtigte Erkenntnisse von Nachbardisziplinen werden in der fachlichen Sachstruktur nicht explizit gemacht.

Bei der Entwicklung einer Sachstruktur für den Unterricht ist also zu beachten, dass die fachlichen Sachverhalte in umweltliche, gesellschaftliche und individuelle Zusammenhänge einzubetten sind, um ihre Bedeutung für das Leben des Einzelnen in der Gesellschaft sowie in der belebten und unbelebten Natur zu verdeutlichen. Die didaktisch bearbeitete Sachstruktur wird damit komplexer als die fachwissenschaftliche. Diese Komplexität ist aber notwendig, damit Schülerinnen und Schüler angemessene Vorstellungen entwickeln können und vernetzt lernen können (vgl. KATTMANN et al., 1997; DUIT et al., 2012; PREDIGER et al., 2013).

Dass die Inhalte des Unterrichts *didaktisch zu rekonstruieren* sind, bedeutet allerdings mehr als ein motivierendes Einkleiden in illustrierende Beispiele und mehr als ein effektives methodisches Umsetzen naturwissenschaftlicher Erkenntnisse. Eine Didaktische Rekonstruktion ist auch nicht ausschließlich als eine didaktische Reduktion misszuverstehen, die aus einer inhaltlichen Fülle exemplarisch auswählt. Dagegen bedeutet eine Didaktische Rekonstruktion das Herstellen pädagogisch bedeutsamer Zusammenhänge und das Wiederherstellen von Sinnbezügen, die im Wissenschafts- und Lehrbetrieb verlorengegangen sind, sowie der Rückbezug auf Primärerfahrungen und auf originäre Aussagen der Bezugswissenschaften (vgl. KATTMANN, 1994).

Grundlage des Modells der Didaktischen Rekonstruktion ist die Interdependenz didaktischer und fachlicher Aspekte. Das bedeutet, dass nicht nur die Ergebnisse einer fachlichen Klärung den Umgang mit den Schülervorstellungen beeinflussen, sondern dass auch umgekehrt die erfassten Schülervorstellungen das Verständnis und die Darstellung der fachlichen Positionen beeinflussen. Analytische und empirische Ergebnisse und ihr wechselseitiger Vergleich ermöglichen eine didaktische Strukturierung und damit die Planung von Lernwegen für Schülerinnen und Schüler. Fachliche Konzepte und Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler werden dabei als gleichwertig behandelt, so dass die Vermittlung von Wissensbeständen und pädagogische Aspekte in ein Gleichgewicht kommen.

Eine Didaktische Rekonstruktion geht konsequent von einer konstruktivistischen epistemologischen Position (vgl. GERSTENMAIER & MANDL, 1995) aus: Eine allgemein gültige fachliche Sachstruktur wird nicht postuliert, sondern die naturwissenschaftlichen Konzepte werden als bewährte Konstrukte der beteiligten Wissenschaftlergruppe angesehen, die Nützlichkeitsargumenten folgen; es wird weiter angenommen, dass Schülervorstellungen im Kontext der persönlichen Überzeugungen für die jeweilige Person ähnlich stimmig bzw. nützlich sind wie die wissenschaftlichen Konzepte innerhalb des jeweiligen Faches und sich im Bereich der Alltagsaufgaben bewährt haben (vgl. GLASERSFELD, 1989).

Bei einer Didaktischen Rekonstruktion werden drei wechselwirkende Komponenten eng aufeinander bezogen (vgl. Abb. 2.1): Die *Analyse der Sachstruktur* umfasst die fachliche Klärungen und didaktische Analysen. *Empirische Untersuchungen* zum Lernen (und Lehren) schließen die Erhebung von Schülervorstellungen ein. Und die dritte Komponente ist die didaktische Strukturierung, der die Entwicklung von pilotartigem Unterricht und seine Evaluation folgen (vgl. GROENGIESSER & KATTMANN, 1993; GROENGIESSER & KATTMANN, 1994; KATTMANN et al.,

1997; KATTMANN & GROPENGIESSER, 1996; KOMOREK & KATTMANN, 2008; DUIT et al., 2012).

### Sachstruktur mit hermeneutisch-analytischen Methoden klären

Die erste von drei Komponenten hat das Ziel, die tragenden Theorien und Konzepte, also gewissermaßen die Grundideen des betreffenden naturwissenschaftlichen Sachgebietes, und die zwischen ihnen bestehenden Beziehungen herauszuarbeiten. Dabei soll die Sachstruktur in einer Weise rekonstruiert werden, dass ihre „Elemente“ unter didaktischer Perspektive elementare Bausteine auf dem Weg zu einem Unterricht darstellen können (vgl. dazu KLAFKI, 1963, 1969, 1970; BLEICHROTH, 1991). Bei der Sachstrukturanalyse spielen sowohl Aspekte der Wissenschaftstheorie und -geschichte als auch didaktische Überlegungen zu den Zielen des Unterrichts eine wichtige Rolle. Der Hintergrund ist, dass jede Darstellung einer Sachstruktur als eine akzentuierende Übereinkunft einer speziellen Wissenschaftlergruppe mit einer bestimmten didaktischen Absicht anzusehen ist. Da es aus konstruktivistischer Sicht keine „wahre“ Sachstruktur geben kann, müssen naturwissenschaftliche Sachstrukturen je nach Absicht immer wieder neu erstellt werden. Die Grundlage für die Klärung der wissenschaftlichen Sachstruktur bilden Originalliteratur,

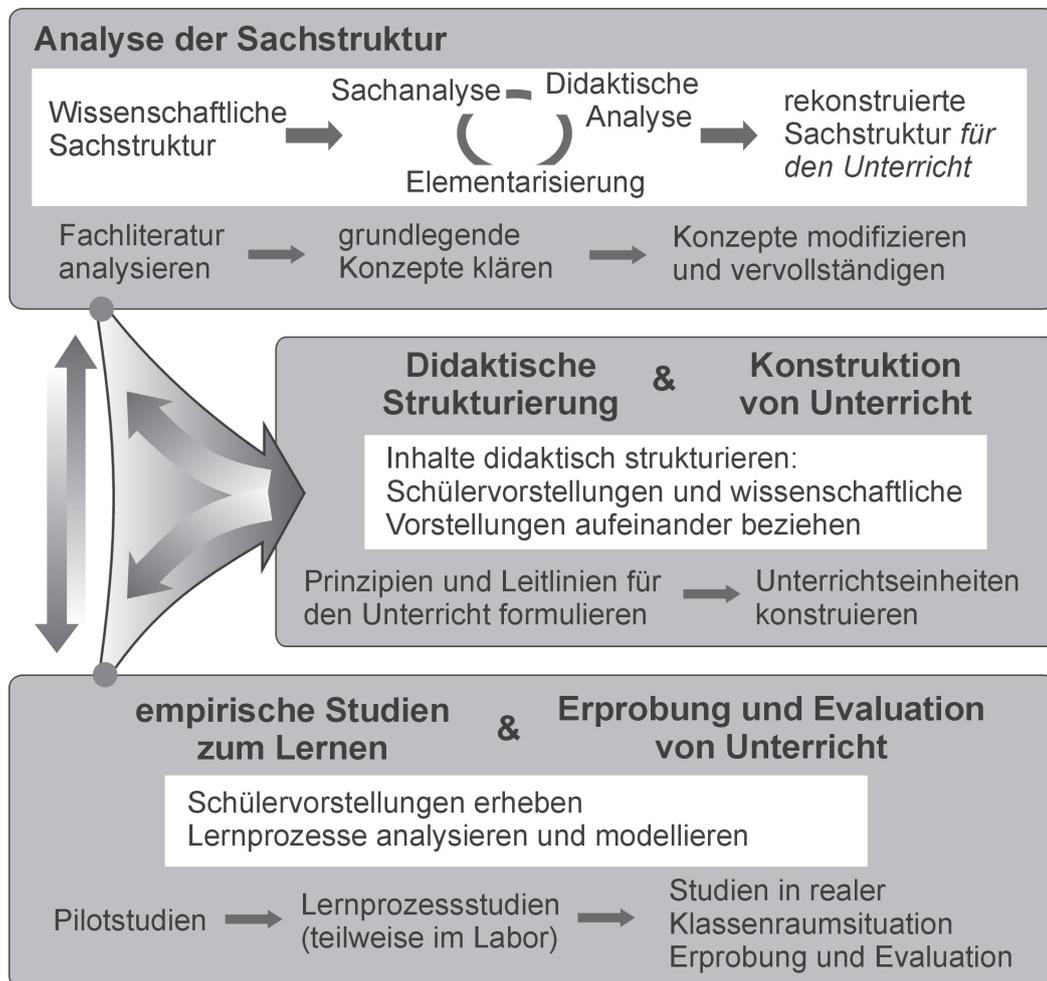


Abb. 2.1 Modell der Didaktischen Rekonstruktion

## 2. Didaktische Rekonstruktion der nichtlinearen Physik

---

führende Lehrbücher und Forschungsartikel sowie Veröffentlichungen zur Wissenschaftstheorie und -geschichte des betreffenden Sachgebietes. Die zentralen Fragen der Klärung sind (vgl. KATTMANN et al., 1997; GROPENGIESSER, 2001):

- Welche fachwissenschaftlichen Aussagen, Konzepte und Theorien liegen vor und wo zeigen sich deren Grenzen?
- Welche Genese, Funktion und Bedeutung haben diese fachwissenschaftlichen Konzepte in welchen Kontexten?
- Welche wissenschaftlichen Termini werden verwendet? Welche von ihnen behindern das Lernen aufgrund ihrer alltagssprachlichen Bedeutung?
- Welche wissenschaftstheoretischen und erkenntnistheoretischen Positionen liegen bestimmten Darstellungen der Sachstruktur zugrunde?
- Welche ethischen und gesellschaftlichen Implikationen sind mit den fachwissenschaftlichen Konzepten verbunden?
- Welche Felder sind durch die Anwendungen von Erkenntnissen berührt? Wo werden bereichsspezifische Erkenntnisse grenzüberschreitend angewendet?

Bei der Beantwortung dieser Fragen muss unterstellt werden, dass jedes Konzept und jeder Begriff „theoriegeladen“ ist, d.h. nur im konzeptuellen Rahmen einer erklärenden Theorie zu verstehen ist. Als ein praktikabler Weg, dies zu klären, hat sich der „hermeneutische Zirkel“ erwiesen. Der hermeneutische Zirkel ist als spiralförmiger und approximativer Prozess zu verstehen, bei dem die Passung von Konzepten zueinander geprüft wird. Wenn einzelne Konzepte nicht integrativ in den theoretischen Rahmen der anderen passen, kann die Passung durch eine Umstrukturierung der Konzepte hergestellt und eine neue Konsistenz erzeugt werden.

### **Schülerperspektiven empirisch untersuchen**

Die zweite Komponente bilden empirische Untersuchungen zum Erlernen der betrachteten Konzepte und Begriffe. Sie sollen klären, welche Vorstellungen Schülerinnen und Schüler im betreffenden Sachgebiet nutzen und entwickeln und welche Lernprozesse sie beim Erlernen der naturwissenschaftlichen Sicht durchlaufen. Die empirische Komponente erfüllt dabei eine Doppelfunktion. Zum einen prüft sie, ob die als vermittelenswert erkannten Konzepte und Begriffe auch vermittelbar sind. Zum anderen lenken auch sie die fachliche Klärung, denn die genaue Kenntnis der Schülervorstellungen trägt zu einem besseren Verständnis des fachlichen Inhalts bei, weil er aus einer zusätzlichen Position heraus analysiert werden kann. Folgende Fragen leiten die Untersuchung:

- Welche grundsätzlichen Möglichkeiten des Lernens bestimmter wissenschaftlicher Konzepte zeigen sich bei Schülerinnen und Schülern aus kognitions- und entwicklungspsychologischer Sicht?
- Welche Vorstellungen entwickeln Schülerinnen und Schüler bezogen auf fachlich relevante Phänomene und fachliche Konzepte?
- Welche Vorstellungen (Begriffe, Konzepte, Denkfiguren, Schemata) verwenden Schülerinnen und Schüler in fachbezogenen Kontexten? Welche Beziehungen bestehen zwischen ihren Vorstellungen?
- Wie korrespondieren die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler mit den wissenschaftlichen Vorstellungen?

- Welche Vorstellungen haben die Schülerinnen und Schüler von der Struktur der Wissenschaft, von ihrer Theorienbildung und ihren Methoden?

Eine genaue Kenntnis der Schülersicht gestattet es, Anknüpfungspunkte für geeignete Instruktionen zu entwickeln und mit Schülerinnen und Schülern die Erklärungsmöglichkeiten und -grenzen verschiedener Perspektiven zu diskutieren. Es geht bei den hier beschriebenen empirischen Untersuchungen nicht primär darum, die Häufigkeiten bestimmter Vorstellungen zu bestimmen, sondern darum, etwas über die Qualität und die Struktur alternativer Vorstellungsrahmen zu erfahren. Aus diesem Grunde sind qualitativ-explorierende Untersuchungsmethoden wie z.B. das Teaching Experiment (vgl. 6.2) angezeigt.

### **Analytische und empirische Befunde aufeinander beziehen, um die Inhalte didaktisch zu strukturieren**

Die dritte Komponente bildet die didaktische Strukturierung. Auf ihren Ergebnissen basiert schließlich die Konstruktion und Evaluation von pilotartigem Unterricht. Hier kommt es darauf an zu untersuchen, welche unterrichtlichen Möglichkeiten durch bestimmte Aspekte der Schülervorstellungen geöffnet werden (vgl. KOMOREK & PREDIGER, 2013). Außerdem wird geprüft, ob die in der ersten Komponente vorläufig rekonstruierte Sachstruktur in der Unterrichtspraxis vermittelbar ist. Die Leitfragen in dieser Komponente sind:

- Welche sind die zentralen Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler, die im Unterricht berücksichtigt werden müssen?
- Welche unterrichtlichen Möglichkeiten eröffnen sich, wenn Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler beachtet werden?
- Welche Schülervorstellungen korrespondieren mit den wissenschaftlichen Konzepten derart, dass sie ein fruchtbares Lernen unterstützen können?
- In welcher Weise fördern oder behindern wissenschaftlich geklärte Vorstellungen, Begriffe oder Termini das Lernen?
- Wie kann die Wahrnehmung und Reflexion der eigenen Vorstellungen im jeweiligen Inhaltsbereich das Lernen der wissenschaftlichen Konzepte unterstützen?
- Welche Arbeitsweisen und Unterrichtsformen sind den Unterrichtsinhalten aus Perspektive der Schülerinnen und Schüler und aus wissenschaftlicher Sicht angemessen? Welche Auswahl ist geeignet, bedeutungsvolles und kumulatives Lernen zu fördern?
- Wie müssen die Lernbedingungen (z. B. Motivation, Lernklima, Hierarchie im Klassenraum) gestaltet werden, um fachliches Lernen und Vorstellungsänderungen zu fördern?

Wie bereits angeklungen, muss der didaktisch zu rekonstruierende Inhalt komplexer gestaltet werden als der fachliche Inhalt. Kontroverse Konzepte und theoretische Vorannahmen müssen in die Rekonstruktion ebenso einfließen wie Beziehungen zu Sachgebieten in Nachbardisziplinen. Diese Verbindungen und impliziten Grundlagen müssen explizit gemacht werden, auch wenn dies in der Wissenschaft selbst nicht getan werden muss, weil sie hier zum unausgesprochenen kollektiven Wissen der Wissenschaftlergemeinschaft gehören. Außenstehenden sowie Schülerinnen und Schülern sind sie aber nicht bekannt. Die höhere Komplexität ist wichtig, um nicht zu unangemessenen Vorstellungen aufgrund einer gekürzten wissenschaftlichen Sicht zu führen. Darüber hinaus muss die didaktische Rekonstruktion eines Sachgebietes Schülerinnen und Schülern klar machen, welche Absichten hinter dem Unterricht stehen und welche Rolle Inhalt und Kontext in ihrem Leben spielen. Empirische Untersuchungen haben zeigen können, dass sorgfältig rekonstruierte Sachstrukturen, die sich auf die Kenntnis der Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern stützen, zu besseren Lernerfolgen führen (BROWN & CLEMENT, 1992).

### **Didaktische Rekonstruktion - iterativ und selbstregulierend ...**

Wenn das Modell der didaktischen Rekonstruktion in einen Forschungsprozess umgesetzt wird, müssen die einzelnen Komponenten schrittweise bearbeitet werden. Der Prozess kann mit einer ersten Analyse der Sachstruktur beginnen, die auf der Basis pädagogischer Überlegungen erste Pilotstudien nahe legt. Die Entwicklung von Unterricht folgt zeitversetzt, allerdings möglichst früh, um vorläufige Rekonstruktionen der Sachstruktur auf ihre Vermittelbarkeit hin zu untersuchen. Die Bearbeitung der einzelnen Komponenten erfolgt nicht schlicht nacheinander, sondern iterativ. Es kann z.B. sein, dass bei der Planung einer Unterrichtseinheit deutlich wird, dass ganz bestimmte Prinzipien der Sachstruktur zu geringe Berücksichtigung gefunden haben oder dass weitere empirische Untersuchungen der Vorstellungsrahmen der Schülerinnen und Schüler notwendig sind. Der iterative Prozess führt letztlich dazu, dass die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler und die wissenschaftlichen Vorstellungen aufeinander bezogen und nicht-adäquate Beziehungen vermieden werden.

**... und historisch verwurzelt.** Das Modell hat seine Wurzeln u.a. in der deutschen Pädagogik, insbesondere bei KLAFKI (1969), der den Begriff der didaktischen Analyse schuf, und bei HEIMANN, OTTO und SCHULZ (1969), die das Strukturmomentenmodell entwickelten. Klafkis bildungstheoretischer Ansatz stellt das exemplarische Lernen heraus. Bestimmte Inhalte werden danach nicht in erster Linie um ihrer selbst willen unterrichtet, sondern um generellere Ideen, die in einem größeren Zusammenhang stehen, exemplarisch zu vermitteln. WAGENSCHHEIN (1965) hat das exemplarische Lernen zu einem seiner Leitprinzipien erhoben. Voraussetzung für exemplarisches Lernen ist die didaktische Analyse. Klafki bezeichnet sie als die erste Aufgabe des Lehrenden; sie besteht darin zu klären, welche Bildungsinhalte in der zu vermittelnden *Sache* stecken. Ein Bildungsinhalt ist dadurch charakterisiert, dass er stellvertretend für eine Reihe von Kulturinhalten steht, d.h. dass er immer auch allgemeine Prinzipien, Grundprobleme, Methoden usw. verdeutlicht. Diese Analyse ist also abhängig von der didaktischen Zielsetzung und von der geistig-geschichtlichen Situation und den Perspektiven und Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler. Klafki warnt ausdrücklich davor, unter einer didaktischen Analyse lediglich eine vorpädagogisch-fachwissenschaftliche Sachanalyse zu verstehen, weil dadurch die pädagogischen Ziele an Bedeutung verlieren würden. Die Aufgabe der didaktischen Analyse sei es, das pädagogisch Entscheidende herauszustellen.

Neben dem bildungstheoretischen Ansatz Klafkis entwickelte die „Berliner Schule“ einen lerntheoretischen Ansatz, bei dem die Lernprozesse der Schülerinnen und Schüler im Zentrum der Betrachtung stehen (HEIMANN, OTTO & SCHULZ, 1969; vgl. auch DUIT, HÄUßLER & KIRCHER, 1981, S. 250 ff.). Im so genannten Strukturmomentenmodell arbeitete die Berliner Schule Dimensionen heraus, die bei der Sachstrukturanalyse und bei der Unterrichtsplanung zu berücksichtigen sind: Dies sind Entscheidungen über Ziele des Unterrichts, über seine Inhalte, über Organisationsformen des unterrichtlichen Lernens und Lehrens, d.h. über die spezielle Methodik, sowie über den Einsatz von Medien im Unterricht. Daneben stellt jenes Modell die anthropogenen und die soziokulturellen Voraussetzungen der Lernenden als wichtig für Unterrichtsprozesse heraus.

Das Modell der didaktischen Rekonstruktion knüpft daran an, geht allerdings rüber die historischen Wurzeln hinaus, indem andere wissenschafts- und erkenntnistheoretische Positionen vertreten werden: Zwar erkennen auch Klafki und die Berliner Schule an, dass die Voraussetzungen der Lernenden und die Ziele des Unterrichts die Rekonstruktion von Sachstrukturen mitbestimmen. Im Modell der Didaktischen Rekonstruktion wird aber explizit gemacht, dass sich aufgrund der Erkenntnisse über Schülersichtweisen eine veränderte Sicht auf Sachstruktur ergeben muss. Diese werden traditionell als gegeben vorausgesetzt. Tatsächlich lassen sich Sachstrukturen sehr unterschiedlich repräsentieren, auch wenn sie fachlich äquivalent sind, was aber entscheidenden Einfluss auf Lernprozesse haben kann (s. KATTMANN & GROENGIESSER, 1996; BAALMANN,

FRERICHS & ILLNER, 1996; GROPENGIESSER, 1997, 2001; KRAYNOVA, 2011; DUIT et al., 2012).

## 2.2 Neue Entwicklungen des Modells - die Rolle der Lehrpersonen

In dem Bemühen, Physikunterricht qualitativ weiterzuentwickeln, besteht weitgehend Einigkeit darin, dass dies auch über die Veränderung von Unterrichtsroutinen geschehen muss (vgl. HELMKE, 2012). Dies kann angegangen werden, indem Lehrpersonen lernen, ihr unterrichtliches Verhalten differenziert zu reflektieren und die Ergebnisse der Reflexion im Unterricht umzusetzen (vgl. DUIT, KOMOREK & MÜLLER, 2005; KOMOREK, FISCHER & MOSCHNER, 2013). Die Fähigkeit, über den eigenen Unterricht und den Unterricht von Kollegen kritisch nachzudenken und Entscheidungen im Unterricht mit didaktischen Argumenten zu begründen, kann als fachdidaktisches Denken bezeichnet werden. Es umfasst Überlegungen dazu, wie Lernprozesse durch Prozesse des Lehrens bestimmt sind oder eingeleitet werden können. Es umfasst vor allem Überlegungen dazu, wie Methoden, Inhalte und Ziele des Unterrichts aufeinander bezogen werden sollten. Seit Shulmans Überlegungen, dass fachdidaktisches Denken auf einer eigenständigen Wissensdomäne, dem fachdidaktischen Wissen (pedagogical content knowledge), beruht (SHULMAN, 1987), wird das fachdidaktische Denken als eigene Kompetenz im Lehrerberuf aufgefasst. Neben dem fachlichen Wissen (content knowledge) und dem allgemein-pädagogischen Wissen (pedagogical knowledge) gilt es in der Lehrerbildung, das fachdidaktische Wissen als eigenständige Domäne aufzubauen.

Es gab bislang nur wenige national geförderte Studien, die zur Verbesserung von Physikunterricht an der Entwicklung des fachdidaktischen Denkens von Lehrkräften ansetzen (z.B. das vom BMBF und den Ländern finanzierte Projekt „piko - Physik im Kontext“, vgl. Nawrath, 2010; Nawrath & Komorek, 2013). Als „angemessenes“ fachdidaktisches Denken werden dabei Reflexionen verstanden, die sich erst in der Auseinandersetzung mit dem eigenen unterrichtlichen Handeln entwickeln können (DUIT & LEHRKE, 2004). Danach geht der Aufbau fachdidaktischen Wissens mit der regulierenden Wirkung der eigenen Unterrichtserfahrungen Hand in Hand. Projekte wie piko oder VINT (Studie zur videogestützten Intervention, DUIT & LEHRKE, 2004) gehen davon aus, dass bei den meisten Lehrkräften nur wenige Unterrichtsroutinen vorherrschen und sich darin ein sehr eingeschränktes fachdidaktisches Denken zeigt: Der fachliche Inhalt steht im Mittelpunkt; Ziele des Unterrichts werden meist nicht explizit in Unterrichtsplanungen einbezogen; bei Überlegungen zu Medien und Methoden, z.B. zum Einsatz von Experimenten im Unterricht, dominieren nur wenige Muster. Wie PRENZEL et al. (2002) feststellen, sind die meisten Lehrkräfte über die vielfältigen Methoden, die einsetzbar wären, und die Ergebnisse der Lernprozessforschung oft nicht informiert (vgl. auch SEIDEL et al., 2002). Kennzeichen Fachdidaktischen Denkens können wie folgt zusammengefasst werden (nach DUIT, KOMOREK & MÜLLER, 2005):

- **Balance.** Fachliche und didaktische Aspekte werden bei der Unterrichtsplanung als gleich wichtig und miteinander wechselwirkend angesehen; mit didaktischen Aspekten ist gemeint, dass die Planung von Unterricht die Ziele des Unterrichts und die Perspektiven der Schülerinnen und Schüler, ihre Lernmöglichkeiten und Interessen, explizit mit einbezieht.
- **Interdependenz.** Ziele, Methoden und Medien werden bzgl. bestimmter Inhalte bewusst ausgewählt und eingesetzt; insbesondere wird gegenseitige Abhängigkeit dieser unterrichtlichen Variablen beachtet und es werden vor allem Methoden ausgewählt, die Schülerinnen und Schüler kognitiv anregen und zu eigenständigem und selbstverantwortetem Arbeiten führen.

- **Forschungsorientierung.** Ergebnisse der Lehr-Lern-Forschung und aktueller Sichtweisen von Unterrichtsprozessen werden sowohl zur Planung als auch zur Reflexion von Unterricht herangezogen.

Nach konstruktivistischer Auffassung (vgl. GERSTENMAIER & MANDL, 1995) kann Lernen nicht als Aufnahme oder Übernahme von Wissen gesehen werden, Lehren nicht als Mitteilung von Wissen mit dem Ziel der Speicherung. Vielmehr bedeutet Lernen eine aktive Auseinandersetzung mit der materialen und sozialen Umwelt (vgl. DUIT, 1995a,b), ein Anfügen neuen Wissens an vorhandene Wissensbestände oder auch ein Umstrukturieren von Wissen. Unter diesem Blickwinkel werden vorhandene Vorstellungen nicht ausschließlich als Lernhemmnisse gesehen. Sie bieten einen Ansatz, mit Schülerinnen und Schülern über eigene Vorstellungen und deren Grenzen nachzudenken. Lernen im Sinne eines Austausches oder einer kontinuierlichen Veränderung von Vorstellungen (Konzeptwechsel, conceptual change, vgl. z.B. SCOTT et al., 1992; DUSCHL et al., 2003) sind dann die Wege, um die im Alltag oft nützlichen Vorstellungen (mehr oder weniger radikal) in Richtung auf wissenschaftlichen Vorstellungen hin zu erweitern.

Die Rolle der Lehrperson besteht darin, diese Entwicklungen anzubahnen und zu unterstützen. Bei konstruktivistischen Instruktionsstrategien geht es in den meisten Fällen nicht darum, bewährte Alltagsvorstellungen durch naturwissenschaftliche Vorstellungen zu ersetzen. Der Lernende soll vielmehr nachvollziehen, dass die naturwissenschaftlichen Vorstellungen in bestimmten Kontexten fruchtbarer sind als die Alltagsvorstellungen (vgl. SMITH, DISESSA & ROSCHELLE, 1992; HEWSON & HEWSON, 1992). Fachdidaktisch zu denken, bedeutet außerdem, Sachstrukturen nicht als vorgegeben anzusehen (DUSCHL & HAMILTON, 2003), sondern sie z. B. im Schul- oder Lehrbuch als eine Repräsentation der Buchautoren in einer bestimmten didaktischen Absicht anzusehen. Dies zu erkennen, schafft Freiheiten, die für eine schülerorientierte Unterrichtsgestaltung genutzt werden können.

**Integration und Entwicklung von Praxiskompetenz.** Die Rolle der Lehrperson ist im Modell der Didaktischen Rekonstruktion bislang nicht explizit beschrieben worden; Prozesse der Unterrichtsplanung, -durchführung und der Unterrichtsreflexion sind noch unzureichend modelliert. Erweiterungen des Modells beziehen sich auf zwei Fragestellungen (vgl. KOMOREK, FISCHER & MOSCHNER, 2013):

- Welche Rolle können oder sollten Lehrkräfte in fachdidaktischen Forschungs- und Entwicklungsprojekten spielen?
- Welche Funktion können die obligatorischen Fragen/Aufgaben der Didaktischen Rekonstruktion für die Entwicklung der Planungs- und Reflexionskompetenz von Lehrkräften haben?

Im ersten Fall geht es um die Frage nach der Qualität Didaktischer Rekonstruktionen in Abhängigkeit davon, inwieweit erfahrene Lehrkräfte in Prozesse wie die Erforschung von Vorstellungen, die fachlichen Klärungen und didaktischen Analysen, die Entwicklung von Sachstrukturen und schließlich die Unterrichtsentwicklung und -erprobung eingebunden sind (KATTMANN, 2004). Wenn Forscher und Praktiker auf gleicher Augenhöhe miteinander agieren sollen, um praxisrelevante Ergebnisse zu produzieren, so ist die allein helfende Mitwirkung von Lehrerinnen und Lehrern nicht ausreichend.

Die zweite Fragestellung bezieht sich auf die Kompetenzentwicklung von Lehrpersonen. Im Gegenzug dazu, dass Lehrkräfte ihre Praxiskompetenz in eine Didaktische Rekonstruktion mit einbringen, können sie in anderen Kompetenzbereichen, insbesondere was das oben angeführte fachdidaktische Denken angeht, profitieren. Auch weitere Basiskompetenzen des Lehrerberufs können durch die Mitwirkung an Prozessen der Didaktischen Rekonstruktion geschult werden. Dazu gehören (nach KATTMANN, 2004) das grundlegende Verständnis der Wechselbeziehung zwischen Lernprozessen und Lehren und die Bedeutung von Metakommunikation. Auch der bewusste und achtsame Umgang mit vorunterrichtlichen Vorstellungen der Schülerinnen und

Schülern und ihren lebensweltlichen Perspektiven sowie die Anerkennung der Schülerinnen und Schüler als aktive Konstrukteure ihres Wissens zählen zu diesen Basiskompetenzen.

**Unterricht planen und kritisch reflektieren.** Didaktische Rekonstruktion kann auch als Rahmen genutzt werden, Unterricht kritisch zu reflektieren (vgl. KATTMANN, 2004) und um fachdidaktisches Denken von Lehrkräften operationalisierbar zu machen, d.h. ihren aktuellen Stand und damit ihr aktuelles Reflexionsvermögen zu bestimmen, bzw. um es zu entwickeln. KATTMANN (2004) nennt eine Reflexion, die auf den konstruktiven Fragen der Didaktischen Rekonstruktion beruht, den „*Rekurs* der Didaktischen Rekonstruktion“, da bereits die Didaktische Rekonstruktion als iterativer bzw. rekursiver Prozess verstanden wird. Der Rekurs kann mit den analytisch gewendeten Fragen der Didaktischen Strukturierung begonnen werden:

- Inwieweit waren die Unterrichtsformen und Arbeitsweisen angemessen, um bedeutungsvolles, sinnstiftendes, auch fachliches Lernen zu fördern?
- Wie wirkten sich die Lernbedingungen wie Motivation, Lernklima oder Ausstattung der Fachräume auf das bedeutungsvolle Lernen aus?
- Welche wichtigen Elemente der vorunterrichtlichen Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler wurden im Unterricht berücksichtigt?
- Welche unterrichtlichen Möglichkeiten ergaben sich, als die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler beachtet wurden? Wie wurden sie genutzt?
- Welche der vorunterrichtlichen Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler korrespondierten so mit wissenschaftlichen Konzepten, dass sie für ein bedeutungsvolles Lernen genutzt werden konnten?
- Inwiefern förderten oder behinderten die angebotenen wissenschaftlichen Vorstellungen oder Termini das Lernen?
- Inwieweit hatten die Schülerinnen und Schüler Gelegenheit, ihre eigenen Vorstellungen und ihren Lernfortschritt wahrzunehmen und zu reflektieren?

Anschließend kann sich der Rekurs auf die Erhebung von Lernerperspektiven und Prozesse des Lernens beziehen:

- Welche Vorstellungen entwickelten Schülerinnen und Schüler bezogen auf die im Unterricht fachlich relevanten Phänomene?
- Welche Begriffe, Konzepte und Denkfiguren, verwendeten die Schülerinnen und Schüler in den fachlichen Kontexten, die im Unterricht angesprochen wurden?
- Welche Vorstellungen von Wissenschaft ließen sich aus den Äußerungen der Schülerinnen und Schüler ableiten?
- Wie korrespondierten die von Schülerinnen und Schülern geäußerten lebensweltlichen bzw. vorunterrichtlichen Vorstellungen mit den zum Lernen angebotenen wissenschaftlichen Vorstellungen?

Auch auf die fachliche Klärung wird im Rekurs zurückgegriffen. Damit wird der gesamte Prozess der didaktischen Rekonstruktion rekursiv abgebildet:

- Inwieweit wurden den Schülern die mit den Lerninhalten verbundenen wissenschaftlichen und epistemologischen Positionen erkennbar?
- Inwiefern kamen Grenzüberschreitungen vor, bei denen bereichsspezifische Erkenntnisse auf andere Gebiete übertragen wurden? Wurden diese den Schülerinnen und Schülern bewusst (gemacht)?

- Wie wurden ethische und gesellschaftliche Implikationen der wissenschaftlichen Vorstellungen angesprochen oder diskutiert?
- Welche Anwendungsbereiche der Erkenntnisse wurden thematisiert?

Diese Reflexionen führen zur zentralen fachdidaktischen Aufgabe, zwischen den Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler und den fachlichen Konzepten zu vermitteln. Die Ergebnisse dieser Reflexion werden genutzt, Unterricht im Sinne einer Balancierung von fachlichen Anforderungen und Orientierung an den Belangen der Schülerinnen und Schüler zu verbessern. Gleichzeitig wird Fachdidaktisches Denken geschult, indem unterrichtliches Handeln begründungsbedürftig, aber auch begründbar wird.

Das Oldenburger Promotionsprogramm ProfaS (Prozesse fachdidaktischer Strukturierung für Schulpraxis und Lehrerbildung) (KOMOREK, FISCHER & MOSCHNER, 2013) setzt diese Überlegungen in Forschungen zu den Strukturierungsprozessen von Lehrkräften um. Im Sammelband *Der lange Weg zum Unterrichtsdesign – Zur Begründung und Umsetzung fachdidaktischer Forschungs- und Entwicklungsprogramme* (KOMOREK & PREDIGER, 2013) werden Ergebnisse dazu vorgestellt, wie Lehrkräfte fachdidaktisch strukturieren, z.B. wenn sie Unterricht zum Thema Energie konzipieren (Pahl, 2013) oder wenn sie kontextorientierten Physikunterricht planen und umsetzen (Nawrath, 2010; Nawrath & Komorek, 2013).

### 2.3 Ein Projekt zur Didaktischen Rekonstruktion nichtlinearer Systeme in der allgemeinbildenden Schule

In diesem Projekt (vgl. Abb. 2.2) wurde auf fachlicher Ebene geklärt, welche Ideen des deterministischen Chaos, der Fraktale und der Selbstorganisation unter dem Blickwinkel von Zielen als zentral und grundlegend angesehen werden können und welche dieser Konzepte sich als vermittelenswert herausstellen. In empirischen Studien wurde untersucht, welche Vorstellungen Schülerinnen und Schüler von diesen Konzepten und Prinzipien nutzen und entwickeln und auf welche Weise sie im Schulunterricht vermittelt werden können. Dazu wurden Elementarisierungen entwickelt (KOMOREK, 1998; BÜCKER, 1998) und die Prozesse des Erlernens der elementarisierten wissenschaftlichen Sicht untersucht (KOMOREK, 1998; WILBERS, 1999). Aufbauend darauf wurden Leitlinien für den Unterricht formuliert und Unterrichtskonzeptionen in der Praxis erprobt (DUIT, KOMOREK & WILBERS, 1997a; 1997b).

Die frühen Studien im Projekt haben sich zunächst mit der Vermittlung des Prinzips der eingeschränkten Vorhersagbarkeit chaotischer Systeme befasst, da im Physikunterricht der Aspekt der Berechenbarkeit des Naturgeschehens oft überbetont wird. Die Beschäftigung mit der eingeschränkten Vorhersagbarkeit kann dieser Tendenz entgegenwirken und damit einen „naiven“ Determinismus, von dem viele Schülerinnen und Schüler und auch Lehrpersonen ausgehen, infrage stellen. Eine Akzentverschiebung und eine begriffliche Erweiterung gegenüber der traditionellen Sicht soll und kann dadurch erreicht werden. Die Kombination der Ergebnisse von Vorstellungserhebungen, Lernprozessstudien und Sachanalysen hat schließlich auf eine erste rekonstruierte Sachstruktur der nichtlinearen Physik geführt.

Zielgruppe dieser Studien waren Schülerinnen und Schüler am Ende der Sekundarstufe I; es wurde geprüft, ob das Thema zu einem Zeitpunkt in die Schule gebracht werden kann, zu dem es noch alle Schülerinnen und Schüler erreicht, auch diejenigen, die kurze Zeit später die Schule verlassen und danach voraussichtlich wenig mit Physik in Berührung kommen. Denn auch ihnen soll ein fundierter Einblick in dieses Gebiet moderner Physik ermöglicht werden. Die Aspekte „Ordnung im Chaos“ und „Strukturbildung“ wurden erst in späteren Studien mit Grundkursen der

## 2.3 Ein Projekt zur Didaktischen Rekonstruktion nichtlinearer Systeme in der allgemeinbildenden Schule

Sekundarstufe II aufgenommen. Die Sachanalysen machten nämlich deutlich, dass ein vertieftes Verständnis von Strukturbildungen hohe Ansprüche an Lernende stellt; will man hier über Oberflächlichkeiten hinauskommen, sind z.B. Betrachtungen im Phasenraum komplexer Systeme notwendig.

### Kieler Projekt zur Didaktischen Rekonstruktion: Nichtlineare Physik

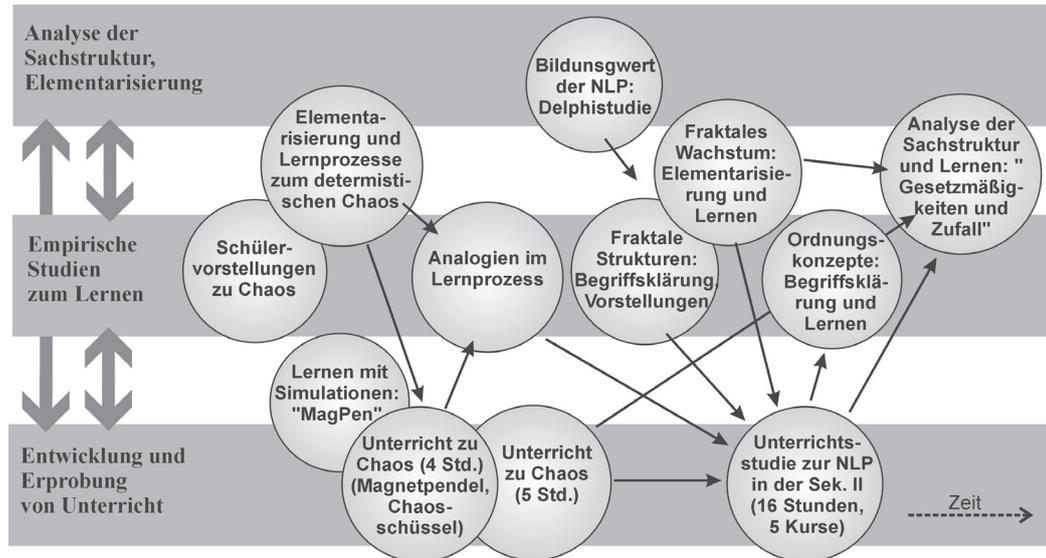


Abb. 2.2 Das Projekt zur Didaktischen Rekonstruktion der Nichtlinearen Physik. Jeder Kreis steht für jeweils eine der Studien (Dissertationen oder Staatsexamensarbeit). Die drei waagerechten Balken stehen für die drei Komponenten des Modells der Didaktischen Rekonstruktion. Die Lage jeder Studie in vertikaler Richtung symbolisiert, in welcher Ebene ihr Schwerpunkt lag. Die horizontale Richtung gibt den zeitlichen Ablauf wieder.

### Analyse der Sachstruktur: Grundkonzepte der nichtlinearen Physik

Schülergerechte Elementarisierungen im Bereich nichtlinearer Systeme konnten eigentlich erst entwickelt werden, nachdem empirische Ergebnisse über die Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern bzgl. Gesetzmäßigkeiten, Kausalität, Vorhersagbarkeit vorlagen und nachdem bekannt war, wie sie einfache chaotische Beispielsysteme erklären. Diese Vorstellungen und Erklärungsversuche zu untersuchen, wäre aber erst dann sinnvoll möglich, nachdem analytisch-hermeneutische Klärungen der fachlichen Konzepte Chaos, Nichtlinearität, Strukturbildung vorlagen. Hier zeigte sich, dass sich die Untersuchungsaufgaben der Didaktischen Rekonstruktion eng aufeinander beziehen und jeweils von den Ergebnissen der anderen Untersuchungsaufgaben abhängen. Im Projekt wurde daher iterativ vorgegangen, indem vorläufige Untersuchungsergebnisse genutzt wurden und mit wiederholtem Perspektivwechsel gearbeitet wurde. Das „Henne-oder-Ei-Problem“ am Beginn einer Didaktischen Rekonstruktion wurde im Projekt gelöst, indem mit einer ersten Elementarisierung der Physik des chaotischen Magnetpendels begonnen wurde. Das Magnetpendel ist von seinem Aufbau und seiner Funktion für Schülerinnen und Schüler nachvollziehbar (vgl. KOMOREK, 1998; vgl. auch Kapitel 5), dennoch ist es zu komplexem Verhalten in der Lage. Doch auch diese erste Elementarisierung ist nicht voraussetzungslos gewesen, sondern griff bereits auf empirischen Ergebnissen zu Schülervorstellungen von mechanischen Kräften und vom gesetzmäßigen Ablauf von Bewegungen zurück. Anschließend wurde eine erste Serie von Interviews zur Erklärung des Magnetpendels durchgeführt. Deren Ergebnisse waren spezifisch genug, um sie auf

die Resultate der fachlichen Klärung der Chaostheorie zu beziehen und Elementarisierungen ausdifferenzieren.

Weitere Elementarisierungen zu chaotischen, fraktalen und selbstorganisierenden Systemen folgten. Dabei zeigte sich, dass Begriffe, die fachwissenschaftlich eher eine untergeordnete Rolle spielen, oder Zusammenhänge, die in der Literatur implizit behandelt werden, in den Vordergrund traten. Die didaktische Strukturierung gelangte zu zwei Konzepten (vgl. Kapitel 5), aus denen sich weitere Konzepte der nichtlinearen Physik entfalten ließen. Es ist zum einen die dynamische Instabilität, die das nichtvorhersagbare Detailverhalten vieler nichtlinearer (chaotischer) Systeme beschreibt. Dynamische Instabilität stellte die Erwartungen vieler Schülerinnen und Schülern an das Verhalten physikalischer Systeme infrage. Im Rahmen der Elementarisierung wurde das Konzept des labilen Gleichgewichts als Repräsentant für dynamische Instabilität in mechanischen Systemen gewählt. Es ist zum anderen die strukturelle Stabilität, die globale Ordnungsstrukturen komplexer, chaotischer Systeme beschreibt und diese Systeme für die Wissenschaft interessant macht. Repräsentiert sind diese Strukturen insbesondere durch chaotische Attraktoren. *Dynamische Instabilität* und *Strukturelle Stabilität* wurden also zu zentralen Elementen der didaktischen Strukturierung.

### **Lernprozess- und Unterrichtsstudien im Prozess der Didaktischen Rekonstruktion**

Unterrichtskonzepte sind Ergebnisse didaktischer Strukturierungen, in die empirische Ergebnisse und fachliche Vorstellungen aufeinander bezogen eingeflossen sind. In einigen Fällen sind solche Konzepte im vorliegenden Projekt zu Unterrichtssequenzen ausgearbeitet und in eigenständigen Studien erprobt worden (vgl. Abb. 2.2). In diesen Erprobungen sind dann neue Fragen aufgetreten, z.B. zur Nutzung von Analogien beim Lernen oder zur Bedeutung von Vorstellungen vom Begriff des Zufalls für Lernprozesse. Diesen neuen Fragen ist in Laborstudien nachgegangen worden (vgl. z.B. Kapitel 8). Schülerinnen und Schüler gewinnen durch Unterricht über nichtlineare Physik offenbar wichtige Einsichten darin, wie die Naturwissenschaften Ordnungsmechanismen beschreiben, wie sich Konzepte wie „Determinismus“ wandeln und wie neue, komplexe Phänomenbereiche erschlossen werden.

**Chaotisches Verhalten und Lernprozesse.** In dieser Studie (KOMOREK, 1998; 1999) nahmen Schülerinnen und Schüler des elften Schuljahres des Gymnasiums an einer Folge von Einzelinterviews teil. Der Schwerpunkt der Studie lag auf dem Aspekt der dynamischen Instabilität chaotischer Systeme, auf der Einschränkung von Vorhersagbarkeit (vgl. KOMOREK, 1998). In den Interviews ging es für die Schülerinnen und Schüler darum, einen „strukturellen Blick“ zu entwickeln, der es ihnen ermöglichte, das Verhalten von Beispielsystemen (Magnetpendel, Chaosschüssel, Würfel, Doppelpendel etc.) auf gemeinsame strukturelle Eigenschaften zurückzuführen. Ein Teaching Experiment (vgl. 5.2) diente dazu, Vorstellungen zu den Begriffen *Determinismus*, *Vorhersagbarkeit* und *Gesetzmäßigkeit* zu erheben und wissenschaftliche Begriffe wie *Labilität*, *Sensitivität* und *Chaotisches System* zu vermitteln.

Die Studie brachte Einsichten in die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler und bewirkte, dass die vorläufige didaktische Strukturierung modifiziert wurde. Überlegungen zu grundlegenden Konzepten wie Determinismus und Kausalität und deren Erweiterung durch moderne Physik rückten stärker in den Vordergrund. Auch die Bedeutung der nichtlinearen Physik für das naturwissenschaftliche Weltbild wurde aufgrund der Schüleräußerungen explizit in die Sachstruktur aufgenommen. In der Folge wurde ein Unterrichtskonzept für das zehnte Schuljahr ausgearbeitet und unter verschiedenen Randbedingungen in Kiel und Wien erprobt (vgl. DUIT, KOMOREK, WILBERS, ROTH & STADLER, 1997, 1998; Details dazu in Kapitel 5).

**Die Rolle von Analogien beim Verstehen chaotischer Systeme.** In den Erprobungen wurde deutlich, dass der Einsatz von Analogien zur Vermittlung nichtlinearer Physik viele Vorteile bringt (vgl. Kapitel 5), aber auch als problematisch anzusehen ist: Das Entschlüsseln vorgelegter Analoga

z.B. benötigte mehr Zeit als erwartet und die Analogien wurden nicht immer in der beabsichtigten Weise genutzt (s. DUIT, ROTH, KOMOREK & WILBERS, 2001). In einer Teilstudie des Projekts (WILBERS, 1999; vgl. auch DUIT, ROTH, KOMOREK & WILBERS, 1998; 2001; WILBERS & DUIT, 1997, 2001) wurde daraufhin die Mikrostruktur der Analogienutzung untersucht und speziell die Frage, inwieweit die verwendeten Analogmodelle Schülerinnen und Schülern helfen können, dynamisch instabile Systeme zu verstehen, und unter welchen Umständen eine in didaktischer Absicht vorgegebene Analogie im Lernprozess genutzt wird.

**Verstehen komplexer Strukturbildungen.** Um die komplementäre Seite der dynamischen Instabilität anzugehen, wurde untersucht, wieweit Schülerinnen und Schüler die Bildung stabiler Strukturen, insbesondere fraktaler Muster im Sinne der nichtlinearen Physik verstehen können. Der Bereich strukturaler Stabilität, Muster- und Strukturbildung und Ordnung (im Chaos) wurde hierzu didaktisch rekonstruiert. Strukturbildungen und Ordnungskonzepte haben große Bedeutung in den modernen Naturwissenschaften und gehen weit über das Bild einfacher Symmetrien hinaus, wie es im Physikunterricht oft als Paradigma für Ordnung behandelt wird (vgl. Kapitel 8). Um Strukturbildung in nichtlinearen komplexen Systemen didaktisch zu rekonstruieren, wurde zunächst das Konzept des Fraktals analysiert und seine Vermittelbarkeit untersucht (vgl. Kapitel 5).

**Ein Unterrichtskonzept für die Sekundarstufe II.** Die bis hierhin beschriebenen Studien waren als Laborstudien oder klein dimensionierte Unterrichtsstudien konzipiert. In einer größer angelegten Unterrichtsstudie (vgl. Kapitel 7) wurden die Aspekte der dynamische Instabilität deterministisch-chaotischer Systeme und der Strukturphänomene bei solchen Systemen in einem Unterrichtskonzept integriert. U. a. die Ergebnisse der Delphistudie zum Bildungswert der nichtlinearen Physik (vgl. Kapitel 3) bestärkten darin, beide zentralen Aspekte nichtlinearer Systeme als gleich wichtig für die Vermittlung im Schulunterricht anzusehen. Zusammen mit einem Team erfahrener Physiklehrpersonen wurde ein Unterrichtsgang für Grundkurse im Gymnasium entwickelt und evaluiert (vgl. Kapitel 7).

**Vertiefende Laborstudien.** Die Ergebnisse der Labor- und Unterrichtsstudien warfen neue Fragen auf. Schülerinnen und Schüler setzen offenbar kognitive Modelle ein, wie das Modell einer „idealen Welt“ ohne Störungen und Einflüsse und das Modell einer „realen Welt“, die komplex ist und Störungen, Wechselwirkungen und Zufälle aufweist, um chaotische Systeme zu interpretieren. Diese Modelle scheinen komplementären Charakter zu haben. Der Begriff des Zufalls und seine Beziehung zu Gesetzmäßigkeiten spielt in diesen Modellen eine zentrale Rolle. Ungeklärt war aber, über welche Vorstellungen von Zufall die Schülerinnen und Schüler verfügten und wie weit sie zu einer wissenschaftlichen Sicht vom komplementären Verhältnis von Zufall und Gesetzmäßigkeiten in der nichtlinearen Physik geleitet werden konnten. Eine empirische Interviewstudie im Labor hat diese vertiefende Fragestellung untersucht (STAVROU, 2004) (vgl. Kap. 8). Eine weitere Studie untersuchte Vorstellungen zu den Begriffen Struktur und Ordnung (VOGT, 2002; vgl. Kap. 8).

Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion bot einen wertvollen Rahmen für die Erschließung der nichtlinearen Physik. Es vermied Einseitigkeiten wie eine überwiegende Orientierung am Fach oder an den Bedürfnissen der Schülerinnen und Schüler. Es unterstützte den Forschungs- und Entwicklungsprozess im hier vorgestellten Projekt, ohne ihn vollständig zu determinieren; und es machte Entscheidungen, bestimmte Teilstudien durchzuführen, begründbar. Das Modell bewährte sich bei der Erschließung der nichtlinearen Physik, indem es zur Entwicklung einer Sachstruktur für den Unterricht führte, die aus fachlicher Sicht gerechtfertigt ist und Lernziele sowie Lernschwierigkeiten und Bedingungen des Lernens (und Lehrens) in Betracht zieht; darauf aufbauend wurden ebenfalls begründbar Unterrichtsentwürfe entwickelt und erprobt.



### 3. Kompetenzen, Bildungsstandards und das Lernen nichtlinearer Physik

*„Die Schule sollte es sich immer zum Ziel setzen, den jungen Menschen als harmonische Persönlichkeit und nicht als Spezialist zu entlassen. ... Die Entwicklung der allgemeinen Fähigkeit zu selbständigem Denken und Urteilen sollte stets an erster Stelle stehen und nicht die Aneignung von Spezialkenntnissen.“*

*Albert Einstein*

#### 3.1 Bildungsreform und Scientific Literacy

*„Wenn Sie das Thema nichtlineare Physik in die Schule bringen wollen, welche anderen Inhalte wollen Sie dafür aus dem Curriculum werfen - Sie müssen bedenken, dass Lehrer schon jetzt klagen, dass sie mit der Stofffülle nicht mehr zurecht kommen.“*  
*(ein Physikdidaktiker)*

Dieser Frage standen Vertreter des Projekts zur Didaktischen Rekonstruktion nichtlinearer Physik des Öfteren gegenüber, wenn Sie über die analytischen oder empirischen Ergebnisse des Projekts berichteten. Zum einen kann man diese Frage mit Bezug auf die Ergebnisse einer Delphistudie (s. u.) beantworten, die auf empirischem Weg untersuchte, welchen Bildungswert Experten aus Bildung und Forschung dem Thema nichtlineare Physik zuerkennen (vgl. WENDORFF, 2001, 2002; KOMOREK et al., 2002). Aufgrund dieser Ergebnisse kann mit Recht dafür argumentiert werden, über eine Aufwertung oder überhaupt eine Beachtung des Themas in den Curricula nachzudenken. Zum anderen kann man „kleine Lösungen“ zur Diskussion stellen: Sie sehen vor, nicht-lineare Ergänzungen immer dort einzupassen, wo sie zwanglos zum jeweiligen Inhalt oder Kontext passen, z.B. wenn man lineare Mechanik, Schwingungen, Elektrizitätslehre, Hydrodynamik etc. behandelt. Alternativ dazu könnten diese Ergänzungen in kurzen Einheiten jeweils im Anschluss an die etablierten Themen bearbeitet werden. Eine berechtigte Kritik an diesen „kleinen Lösungen“ besteht darin, dass der Besonderheit und Eigenständigkeit des Themas nicht genügend Rechnung getragen wird.

Eine dritte Antwort auf obige Frage erscheint im Lichte der Bildungsstandards und der Kompetenzorientierung auch und gerade für den naturwissenschaftlichen Unterricht hochaktuell. Die neuen Freiräume der Schulen gilt es, sinnvoll zu nutzen. Die vom BMBF in Auftrag gegebene Expertise *Zur Entwicklung nationaler Bildungsstandards* (KLIEME et al., 2003) hält es für die erste Funktion der Standards, dass sich Schulen, Lehrpersonen, Schülerinnen und Schüler und Eltern an verbindlichen Zielen orientieren können. Die zweite Funktion besteht darin zu überprüfen, ob die angestrebten Kompetenzen tatsächlich erreicht worden sind (Bildungsmonitoring und Schulevaluation). Das Expertenteam um Klieme macht aber sehr deutlich, dass die Etablierung von Bildungsstandards nicht isoliert und „technisch“ behandelt werden darf, sondern in den Kontext von Bildungsreformen zu stellen ist (KLIEME et al., 2003, S. 15). Aus einer solchen Einbettung in Veränderungsmaßnahmen ergibt sich eine Reihe weiterer Funktionen der Standards. Eine

Funktion soll es sein, dass sie trotz ihrer verbindlichen Ziele den Schulen einen „Freiraum für die innerschulische Lernplanung“ (KLIEME et al., 2003, S. 9) schaffen und „Unterricht gerade nicht in ein enges Korsett zwingen, sondern den Schulen inhaltliche und pädagogische Freiräume geben“ (KLIEME et al., 2003, S. 15). Bildungsstandards sollen somit zu einem „Motor der pädagogischen Entwicklung“ (S. 15) werden, indem „curriculare Regelungen unterhalb der Ebene der Standards tendenziell in die Schulen verlagert werden können“ (KLIEME et al., 2003, S. 17).

Da die Autonomie der einzelnen Schule als wesentliche Voraussetzung für die Leistungssteigerung angesehen wird, müssen die Leitfunktion der Standards und die Orientierungsfunktion der Curricula in einer systematischen Weise gekoppelt werden. Ein Produkt dieser Kopplung stellen die Kerncurricula dar. „Kerncurricula benennen exemplarisch Themen für die inhaltliche Gestaltung schulischer Lehr- und Lernprozesse und geben modellhaft Anregungen für die Praxis pädagogischer Arbeit“ (KLIEME et al., 2003, S. 95).

Zusammengefasst erlauben es Bildungsstandards und Kerncurriculum der einzelnen Schule, „ein Profil zu bilden“ und sie [...] „ermöglichen die von der Schule, der einzelnen Lehrperson und den Kollegen ausgehende, professionsbasierte und mit Hilfe von empirischen Verfahren kontrollierbare Konstruktion von Unterricht“ (KLIEME et al., 2003, S. 98).

Was bedeutet die Einführung von Standards für die Diskussion um die Einführung neuer Inhalte in die Schule z.B. im Hinblick auf die oben gestellte Frage, welche Themen „gehen“ müssen, wenn neue kommen? Da es zunehmend der einzelnen Schule überlassen ist, mit welchem Curriculum im Detail die Kompetenzziele erreicht werden sollen, welches Schulcurriculum das fachbezogene Lernen bestimmt (vgl. KLIEME et al., 2003, S. 52/53), haben neue Inhalte eine ungeahnte Chance. Sie geben der einzelnen Lehrperson oder dem Team aus Fachkollegen die Möglichkeit, die neu erhaltene thematische Freiheit zu nutzen. Da das Kerncurriculum nur exemplarisch Themen auflistet, sind weitere Themen nicht nur möglich, sondern vom Konzept des Kerncurriculums her sogar gewünscht. Denkbar sind Schulcurricula, deren Profile durch die prominente Positionierung moderner naturwissenschaftlicher Themen gekennzeichnet sind.

Nichtlineare Physik als Unterrichtsthema kann dabei eine wichtige Rolle spielen, weil durch sie einerseits eine moderne strukturwissenschaftlich und interdisziplinär orientierte Sicht von Physik vermittelt werden kann, andererseits „klassische“ physikalische Konzepte hinterfragt werden. Beide Eigenschaften sind geeignet, Standards im Bereich des Physikunterrichts bzw. des naturwissenschaftlichen Unterrichts zu erreichen. Die Fokussierung auf strukturelle Eigenschaften von phänomenologisch unterschiedlichen Systemen kann zum Erreichen dieser Standards beitragen.

#### **Scientific Literacy und Bildungsziele**

Bildungsstandards orientieren sich an Bildungszielen, sie konkretisieren sie. Gerade angesichts der Etablierung von Bildungsstandards ist es wichtig, einen gesellschaftlichen Diskurs über Bildungsziele aufrecht zu erhalten. Der Begriff der naturwissenschaftlichen Allgemeinbildung wird derzeit heftig diskutiert. Die Ansätze verschiedener Denkrichtungen versuchen, sich dem Konzept einer naturwissenschaftlichen Allgemeinbildung zu nähern. Im nächsten Abschnitt dieses Kapitels bildet eine Reihe der heute in der Literatur auszumachenden Denkansätze die Grundlage für eine Expertenbefragung. Eine zentrale Bedeutung finden dabei neben den Ansätzen der „Deutschen Bildungstradition“ (siehe 3.2) Überlegungen zu einer Scientific Literacy, wie sie auch den PISA-Studien zugrunde liegen und von den Autoren der Bildungsstandards rezipiert werden.

Ausgangspunkt ist die Tatsache, dass Naturwissenschaften einen erheblichen Teil des gesellschaftlichen Wissens produzieren, dessen Zuwachs auch für die nächsten Jahre als kontinuierlich bis dynamisch eingestuft werden kann. Jugendliche müssen auf die Herausforderungen der heutigen Wissensgesellschaft vorbereitet werden (BAUMERT et al., 2001, S. 194), weil naturwissenschaftliche Erkenntnisse zu Innovationen führen, die über die Wissenschaft hinaus alle Lebensbereiche berühren, und weil die persönlichen und beruflichen Chancen des Einzelnen durch eine

naturwissenschaftliche Grundbildung gefördert werden. Naturwissenschaftliche Kompetenz ist eine Voraussetzung für die Teilhabe an der Wissensgesellschaft und für eine lebenslange Auseinandersetzung mit einer sich verändernden Welt (OECD, 1999).

Mit dem rapiden Erkenntniszuwachs der Naturwissenschaften verschärft sich die Frage, welche Wissensbestände und Kompetenzen grundlegend und anschlussfähig sind und welches Niveau an naturwissenschaftlicher Grundbildung erreicht werden sollte. Vor diesem Hintergrund sind in den letzten Jahren verschiedene Konzepte von Scientific Literacy diskutiert worden (GRÄBER & BOLTE, 1997; vgl. auch HARLEN, 2001). Im OECD/PISA-Projekt wird unter naturwissenschaftlicher Grundbildung die Fähigkeit verstanden, naturwissenschaftliches Wissen anzuwenden und naturwissenschaftliche Fragen zu erkennen. Dazu zählt z.B., *aus Belegen Schlussfolgerungen zu ziehen, um Entscheidungen zu verstehen oder zu treffen, die die natürliche Welt und die durch menschliches Handeln an ihr vorgenommenen Veränderungen betreffen* (deutsche Übersetzung von OECD, 1999). Hier wird deutlich, dass sich Scientific Literacy auf ein Orientierungswissen bezieht. Drei Dimensionen naturwissenschaftlicher Grundbildung werden unterschieden (vgl. BAUMERT et al., 2001, S. 192ff):

- **Naturwissenschaftliche Konzepte.** Diese Konzepte helfen, Verknüpfungen zwischen verwandten Phänomenen herzustellen und damit die natürliche und die vom Menschen geschaffene Umwelt zu verstehen. Naturwissenschaftliche Konzepte werden auf verschiedenen Ebenen formuliert und reichen von Bezeichnungen für charakteristische Merkmale einer Gruppe von Objekten oder Ereignissen bis hin zu Naturgesetzen oder Theoremen.
- **Prozedurale Fähigkeiten.** Hier geht es vor allem um die Anwendung naturwissenschaftlicher Konzepte in schulischen und außerschulischen Situationen, um die praktische Umsetzung des Wissens im Hinblick auf Alltag und Beruf und um kompetentes Handeln in einer naturwissenschaftlich-technisch geprägten Welt. Prozedurale Fähigkeiten stehen deshalb in engem Zusammenhang mit konzeptuellem Wissen und dürfen im Unterricht nur gemeinsam vermittelt werden, damit konzeptuelles Wissen nicht „träge“ (BAUMERT et al., 2001) bleibt, sondern in neuen Zusammenhängen erprobt und mit der Erfahrungswelt der Schülerinnen und Schüler verbunden wird. Hier geht es auch um Prozesse und mentale Handlungen beim Konzipieren von Experimenten oder beim Erheben, Interpretieren und Anwenden von Daten.
- **Anwendungssituationen.** Diese können aus dem Alltag stammen und beziehen sich auf Kontexte, die die Person selbst, Familie und Gesellschaft, Umwelt und Technologie oder die historische Entwicklung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse betreffen. Naturwissenschaftliche Konzepte und prozedurale Fähigkeiten in naturwissenschaftlichen Anwendungssituationen einsetzen zu können, ist Teil einer naturwissenschaftlichen Grundbildung.

Die PISA 2006-Studie legt mit einem erweiterten Konzept von Scientific Literacy (vgl. KOMOREK & NENTWIG, 2005) (vgl. Abb. 3.1) das besondere Gewicht auf das Verstehen charakteristischer Eigenschaften der Naturwissenschaften als ein Weg der Erkenntnisgewinnung. Daher bezieht sich ein Drittel der Naturwissenschaftsitems auf die Aspekte „Knowledge about Science“ und „Nature of Science“. Außerdem wird das Bewusstsein, dass Naturwissenschaften und Technik/Technologien unsere materiale, intellektuelle und kulturelle Umwelt formen, und die Bereitschaft, sich in naturwissenschaftlichen Zusammenhängen als reflektierender Bürger zu engagieren, als Teil der naturwissenschaftlichen Grundbildung aufgefasst. Die damit zusammenhängenden motivationalen Aspekte werden in rund jedem siebten der Naturwissenschaftsitems untersucht. Den verschiedenen Ansätzen von naturwissenschaftlicher Grundbildung ist gemein, dass metakonzeptuelle Fähigkeiten eine besondere Rolle spielen: die Beurteilung der eigenen Argumentations-, Lern- und Denkprozesse. Dazu gehören auch grundlegende Einsichten in das Wesen der naturwissenschaftlichen Arbeitsweise, also fachbezogene Metakompetenzen, die insbesondere das Verhältnis zwischen Beobachten und Experimentieren auf der einen sowie Theorie- und Modellbildungs-

prozessen auf der anderen Seite einschließen. In einem übergeordneten Sinn geht es sowohl um den Einblick in die „Natur der Naturwissenschaften“ (Nature of Science) als auch um die Fähigkeit, die Tragweite naturwissenschaftlicher Erkenntnisse und ihrer Umsetzung zu bewerten.

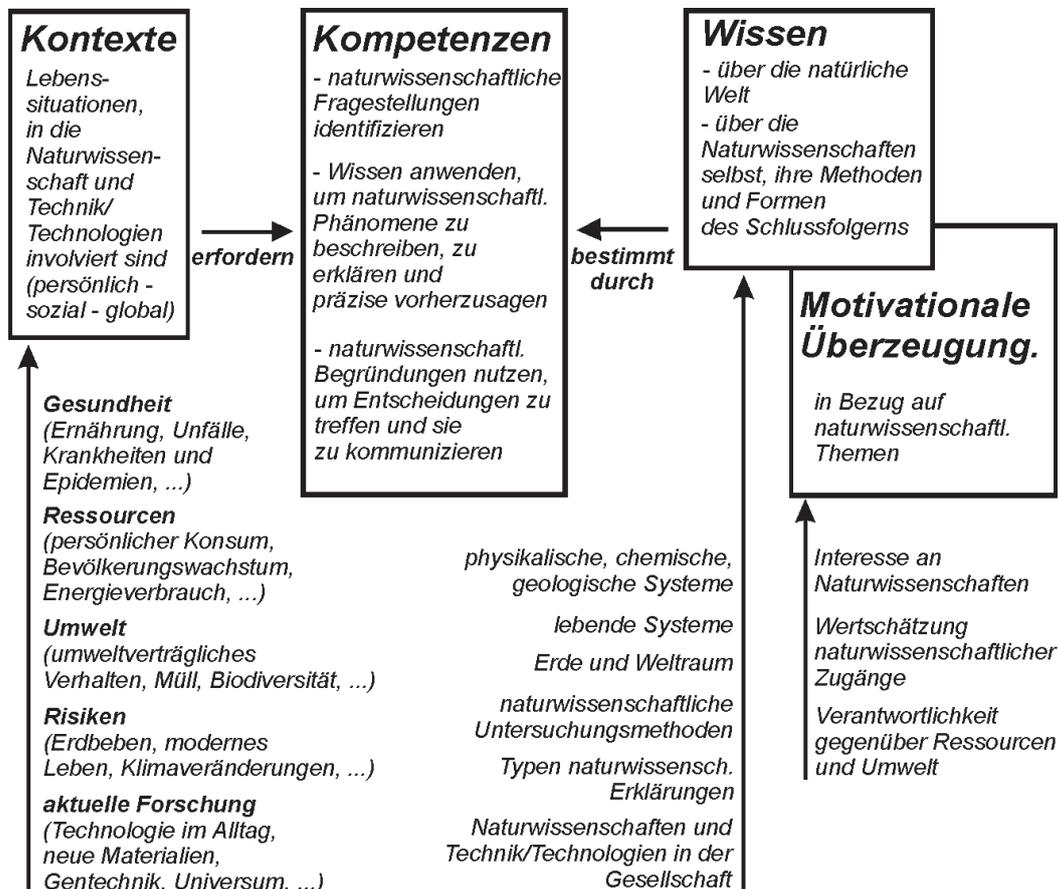


Abb. 3.1 Das Science Framework der PISA 2006-Studie

### 3.2 Empirische Bestimmung des Bildungswertes nichtlinearer Physik

Einen Inhaltsbereich didaktisch zu rekonstruieren, bedeutet immer auch zu prüfen, welcher Bildungswert damit verbunden ist. Diese Prüfung ist Teil der didaktischen Analysen, die klären sollen, wie es um die Bedeutung der zu rekonstruierenden Inhalte für die Gegenwart und die Zukunft von Lernenden steht. Allerdings ist es nicht einfach, Fragen nach Bedeutung und Bildungswert allgemeingültig zu beantworten, denn Erziehungswissenschaftler und Pädagogen, Didaktiker oder auch Politiker können je nach Interessenlage und theoretischem Hintergrund ganz unterschiedliche Themenbereiche als bedeutsam oder bildungswert ansehen. Die Fachdidaktik kann versuchen, zur Konsensbildung beizutragen, indem sie auf empirischem Weg zu Aussagen über den Bildungswert eines Themas gelangt (vgl. Frey, 1975).

Nichtlineare Physik ist Teil des interdisziplinären Forschungsprogramms zur nichtlinearen Dynamik, das komplexe und strukturbildende Phänomene in der Natur zu beschreiben und zu

erklären versucht. Auch ein technischer oder medizinischer Nutzen wird erwartet. In der Medizin z.B. werden diese Methoden erfolgreich zur Erforschung von bestimmten Herzkrankheiten oder der Epilepsie eingesetzt (MORFILL & SCHMIDT, 1994; BRAUN et al., 1998; ARNOLD, GRASSBERGER & LEHNERTZ, 2000). Die vom BMBF groß angelegte Expertenbefragung „Wissensdelphi“ (BMBF, 1998a u. 1998b) hat ergeben, dass in den nächsten 20 Jahren in den Wissensgebieten „Nichtlineare dynamische Systeme, Selbstorganisation und komplexe Systeme“ ein hoher Erkenntniszuwachs im Grundlagenbereich zu erwarten ist. Die Bedeutung für den Einzelnen, Wissen über nichtlineare komplexe Prozesse und über deren philosophische Grundlagen aufzubauen, haben die BMBF-Experten auf einer Skala von 1 bis 5 im Mittel mit 4,1 eingeschätzt; die Bedeutung des Verständnisses von Zufall und Chaostheorie für die Orientierung in der Wissensgesellschaft ist mit 3,7 ebenfalls hoch bewertet worden.

Diese Klärung des Bildungswertes nichtlinearer Physik geschah im vorliegenden Projekt auf Basis von anerkannten Bildungszielen im Rahmen einer Delphistudie (WENDORFF, 2001; KOMOREK, WENDORFF & DUIT, 2002), die eine empirische Komponente in die didaktische Analyse integriert. Zur Expertengruppe haben Personen gehört, die sich sowohl mit nichtlinearen Systemen als auch mit Bildungsfragen auskennen.

#### **Leitfragen für die Fragebogenkonstruktion**

Durch die Forderung nach Bildungsstandards und den Wunsch, eine naturwissenschaftliche Grundbildung, eine Scientific Literacy, zu fördern, rückt der Blick fort vom Aufbau von Wissensstrukturen hin zur Entwicklung von Kompetenzen. Allen Überlegungen gemein ist, dass ein solches Basiswissen und solche Kompetenzen vermittelt werden sollen, die eine Teilhabe an der modernen Wissensgesellschaft erlauben und es dabei dem Einzelnen ermöglichen, sich persönlich zu entwickeln und ein angemessenes Bild von der Welt aufzubauen.

Die Fragebogenentwicklung stützt sich auf verschiedene Denkrichtungen, u.a. auf die *deutsche Bildungstradition*. Ihre Ansätze zielen darauf, das Individuum zu stärken und im umfassenden Sinne handlungsfähig zu machen (HEYMANN, 1990). Heymann versteht unter einer zeitgemäßen allgemeinen Bildung einen Bestandteil der Persönlichkeitsentwicklung und der Sozialisation der Schülerinnen und Schüler (das „Sich-bilden“). Die charakteristischen Aufgaben der Schule bestehen nach Heymann auch darin, ein differenziertes Weltbild zu vermitteln mit dem Ziel, die Schülerinnen und Schüler durch kritischen Vernunftgebrauch zu einem verantwortungsvollen Umgang mit den erworbenen Kompetenzen zu führen.

Im Gegensatz dazu sieht KLAFKI (1995, 1996) den Zweck von Bildung nicht allein im Individuum begründet, sondern in ihrer Funktion, epochaltypische Schlüsselprobleme zu bewältigen wie z.B. die makropolitische Friedensgefährdung oder die Folgen neuer Technologien. Klafkis kritisch-konstruktive Didaktik ist auf gesellschaftliche Veränderungen ausgelegt; Bildung hat unter diesem Blickwinkel die Aufgabe, Handlungs- und Gestaltungsinteresse zu fördern, um letztlich *Selbstbestimmungs-, Mitbestimmungs- und Solidaritätsfähigkeit* bei Schülerinnen und Schülern zu bewirken.

Auf eine direkte Nützlichkeit naturwissenschaftlichen Wissens zielen derzeit Konzepte zu *Scientific Literacy*. GRÄBER und BOLTE (1997) geben eine Beschreibung von Scientific Literacy, die auf dem Erwerb von Kompetenzen beruht, die wiederum als Ziele naturwissenschaftlichen Unterrichts angesehen werden. Eine Scientific Literacy soll es dem Lerner erleichtern, kooperativ zu arbeiten und an gesellschaftlichen Prozessen teilzuhaben (vgl. BAUMERT, 1997). Zudem soll die Kritikfähigkeit der Schülerinnen und Schüler gesteigert und ihnen die Bedeutung eines lebenslangen Lernens nahegebracht werden. Im PISA/OECD-Projekt wird Scientific Literacy wie folgt verstanden: „Scientific literacy is the capacity to use science knowledge to identify questions and to draw evidence-based conclusions in order to understand and help make decisions about the natural world and the changes made to it through human activity“ (OECD, 1999; HARLEN, 2001).

Nicht unabhängig hiervon, aber als eigenständige Forschungsrichtung können derzeit Arbeiten im Bereich *Nature of Science* im Physikunterricht angesehen werden. Als Bestandteil naturwissenschaftlicher Bildung rücken die Überlegungen ins Blickfeld, was die Natur der Naturwissenschaften ausmacht, wie sie „funktionieren“, welche Arbeitsweisen vorliegen und unter welchen zusätzlichen Aspekten Naturwissenschaft gesehen werden kann (vgl. MCCOMAS et al., 1998).

Neben diesen Strömungen und Überlegungen zur naturwissenschaftlichen Allgemeinbildung haben drei Papiere bzw. Studien die Entwicklung des Expertenfragebogens unterstützt:

**BLK-Expertise zur naturwissenschaftlichen Bildung.** Die von der Bund-Länder-Kommission in Auftrag gegebene Expertise zur Vorbereitung des Modellversuchs „Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts“ (BLK, 1998) stellt ein Konzept naturwissenschaftlicher Allgemeinbildung vor. Dieses Konzept soll einerseits der *Unbestimmtheit zukünftiger Lebenssituationen und Anforderungen* sowie der *Anschlussfähigkeit erworbenen Wissens für das Weiterlernen* Rechnung tragen und andererseits *das Recht der Schüler auf Lernen in sinnstiftenden Kontexten* beachten. Es beinhaltet die Kategorien „Kulturelle Basiswerkzeuge“, „Zentrale Wissensdomänen“, „Selbstorganisation des Lernens“ und „Lebenslanges Lernen in sozialen Situationen“.

**MNU-Grundsatzpapier „Naturwissenschaftlicher Unterricht im Kontext allgemeiner Bildung“** (MNU, 2001). Dieses Papier (vgl. auch SCHECKER et al., 1996) geht in erster Linie auf die gymnasiale Oberstufe ein. SCHECKER und BETHGE (1998) beziehen sich in ihrem Artikel „Der Bildungswert der Naturwissenschaften“ auf das Papier und erkennen für den naturwissenschaftlichen Unterricht eine Akzeptanz-Krise, eine Inhalts- und Methodenkrise und eine bildungspolitische Krise, die ihrer Einschätzung nach nur durch die Einnahme fachüberschreitender Perspektiven überwunden werden können. Erst in der Reflexion ihrer Inhalte und Methoden werde der Bildungswert der Naturwissenschaften einlösbar. Die Fachlichkeit des Unterrichts gewährleiste anspruchsvolles Lernen naturwissenschaftlicher Sachverhalte und sei Voraussetzung für fachüberschreitendes Lernen. In beiden Sekundarstufen seien ergänzende Organisationsformen zu entwickeln, um die Kontinuität des Unterrichts und die Mehrperspektivität naturwissenschaftlicher Zugänge zu sichern.

**BMBF-Expertenbefragung zu den Potentialen und Dimensionen der Wissensgesellschaft.** Während im ersten Teil, der *Bildungsdelphi* (BMBF, 1998a), die erwünschte und erwartete Entwicklung des Bildungssystems im Mittelpunkt steht, untersucht die *Wissensdelphi* (BMBF, 1998b) die Entwicklung von Wissensstrukturen. Es wird dabei von der These einer Wissensgesellschaft mit exponentiell wachsender Wissensmenge ausgegangen. Die Ziele der Studien sind, die „Hauptstränge der Wissensentwicklung und ihre Bedeutung zu erkennen“ und „einen Ideenpool und Anregungsfundus für die Gestaltung eines zukünftigen Bildungssystems“ bezogen auf das Jahr 2020 zusammen zu tragen. Die Studien sind in einem mehrstufigen Delphi-Verfahren mit über tausend Wissenschaftlern und Bildungsexperten durchgeführt worden. Sie sehen einen zunehmenden Bedarf an Vermittlung von Kulturtechniken, Einstiegswissen und lernmethodischen Kompetenzen. Zur Lösung aktueller Probleme wird aber auch vermehrter Bedarf an aktuellem Fachwissen gesehen, das nur in einem Prozess des lebenslangen Lernens erworben werden kann. Die Studie zeigt, dass neue Erkenntnisse vornehmlich in aktuellen Gebieten erwartet werden, zu denen auch die nichtlineare Physik gerechnet wird. Es wird zwar weiterhin von einer steigenden Zahl von Einzelerkenntnissen ausgegangen, doch ihr Wert wird in verstärktem Maße vom interdisziplinären Verstehen systemischer Zusammenhänge gesehen. Die Bedeutung von Wissen über nichtlineare komplexe Prozesse und die damit verbundenen philosophischen und erkenntnistheoretischen Grundlagen schätzen die BMBF-Experten hoch ein (s.o.).

Die referierten Positionen führen auf Leitfragen für die Fragebogenkonstruktion:

- Wie kann Unterricht über nichtlineare Physik dabei helfen, die vordringlichen technischen, gesellschaftspolitischen und zwischenmenschlichen Probleme, denen junge Menschen gegenüberstehen, zu erfassen? (Aspekt Schlüsselprobleme)
- Welches grundlegende naturwissenschaftliche Wissen und welche naturwissenschaftlichen Grundfähigkeiten sollten junge Menschen entwickeln und wie kann Unterricht über nichtlineare Physik diese Entwicklung unterstützen? (Aspekte naturwissenschaftliche Grundbildung, Scientific Literacy)
- Wie und in welcher Form kann Unterricht über nichtlineare Physik die Effizienz des naturwissenschaftlichen Unterrichts steigern; wie lassen sich vertikale und horizontale Vernetzungen unterstützen? (Aspekt Effizienzsteigerung)
- Wie kann Unterricht über nichtlineare Physik die Vorgehensweisen und Grenzen der Naturwissenschaften verstehbar machen? (Aspekt Nature of Science)
- Wie kann Unterricht über nichtlineare Physik genutzt werden, um Formen fächerverbindenden, fächerübergreifenden oder integrierten naturwissenschaftlichen Unterrichts zu unterstützen? (Aspekt fächerverbindender Unterricht)
- Wie kann Unterricht über nichtlineare Physik Schülerinnen und Schüler unterstützen, naturwissenschaftliche Inhalte und Methoden zu reflektieren und sich ein breites Orientierungswissen als Grundlage für lebenslanges Lernen und fachüberschreitendes Arbeiten aufzubauen? (Aspekte fachüberschreitende Perspektiven und Anschlussfähigkeit von Wissen)
- Wie kann Unterricht über nichtlineare Physik dazu beitragen, ein differenziertes Weltbild und einen kritischen Vernunftgebrauch zu vermitteln? (Aspekt Weltbildgenese)

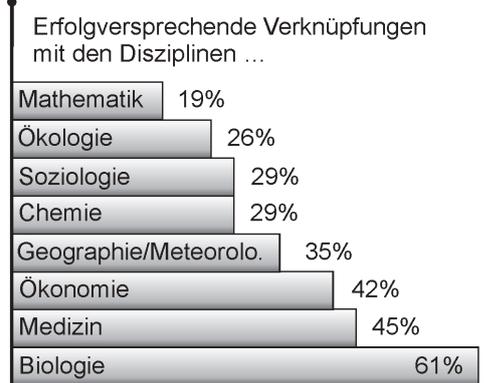
Die Items haben den Befragten Spielraum gelassen, ihre Sicht der Dinge darzustellen, indem geschlossene und offene Frageformate kombiniert worden sind. Bei den geschlossenen Fragen ist durchgehend um ein Rating auf einer Skala von 1 bis 5 gebeten worden. Der Fragebogen befindet sich im Anhang. Details der Untersuchung finden sich in WENDORFF (2001). Bei der Auswertung der offenen Fragen ist eine kategoriengeleitete Inhaltsanalyse (vgl. z.B. BORTZ & DÖRING, 1995) angewendet worden. Dabei sind Kategorien sowohl induktiv auf Basis der Daten als auch deduktiv auf Basis der oben diskutierten theoretischen Ansätze entwickelt und stabilisiert bzw. verworfen worden. Diese Kategorien an den Fragebogendaten abzugleichen, ist das eigentliche Ziel einer Delphibefragung. Jede Kategorie stellt dabei nicht nur eine Datenreduktion dar, sondern zudem die Rekonstruktion der zentralen Überzeugungen der Befragten.

#### **Expertensicht zum Bildungswert der nichtlinearen Physik**

Neben Fachwissenschaftlern, die nichtlineare Systeme erforschen oder modellieren, haben zu den befragten Experten auch Fachdidaktiker und Bildungsforscher, Lehrbuchautoren sowie Lehrerinnen und Lehrer der Naturwissenschaften gehört, jeweils mit spezifischen Erfahrungen im Bereich der nichtlinearen Physik. In den Antworten der 34 auswertbaren Fragebögen ist insgesamt eine positive Grundhaltung gegenüber der Vermittlung von nichtlinearer Physik in der Schule zu erkennen gewesen. Da dies ein Stichprobeneffekt gewesen ist, hat sich die Auswertung darauf konzentriert, wie die Experten ihre vorwiegend positiven Einschätzungen begründen (vgl. WENDORFF, 2001; WENDORFF, KOMOREK & DUIT, 2002). Einige Fragen haben sich auf die gesellschaftliche Relevanz des Themas und seine Bedeutung für den Einzelnen bezogen.

**Gesellschaftliche Relevanz.** Die Experten haben geschätzt, dass in den nächsten 15 Jahren in der nichtlinearen Physik mit einem kontinuierlichen bis dynamischen Wissenszuwachs zu rechnen ist und es hat sich dafür auf einer Skala von 1 bis 5 ein Mittelwert von 3,2 (Streuung  $\sigma = 0,7$  (innerhalb der doppelten Streuung um den Mittelwert liegen 65% der Antworten) ergeben. Bei der

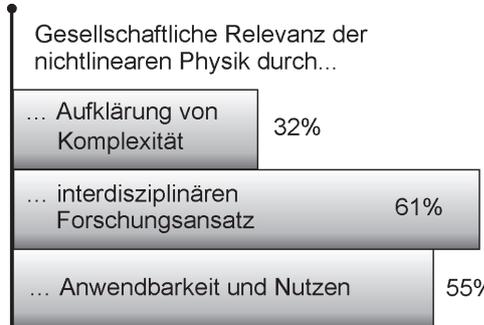
entsprechenden Frage im Wissensdelphi ist sogar eine Wertung von 3,8 vorgenommen (BMBF, 1998b, 224) worden. Ein Indiz für die gesellschaftliche Relevanz ist die Vernetztheit mit Disziplinen außerhalb der Physik. Alle Befragte haben die extradisziplinäre Verknüpfungen für wichtig, die meisten halten sie sogar für unverzichtbar gehalten; es hat sich ein hoher Mittelwert von 4,4 ( $\sigma = 0,8$ ) ergeben. Bemerkenswert ist hier die hohe Bewertung der Verknüpfung mit humanwissenschaftlichen Disziplinen, aber auch mit Ökonomie gewesen (Tab. 3.1).



Tab. 3.1 Anteil der Experten, die eine Verknüpfung der nichtlinearen Physik mit bestimmten anderen Disziplinen für wichtig und erfolgversprechend halten

Zur Beurteilung der gesellschaftlichen Relevanz sind Kategorien vorgegeben worden, die sich an Kategorien aus der BMBF-Studie Wissensdelphi (BMBF, 1998b) angelehnt haben. Geringe bis mittlere Wertungen der Bedeutung der nichtlinearen Physik ist den Kategorien „Befriedigung individueller Bedürfnisse wie Ernährung, Gesundheit, wirtschaftliche und soziale Sicherheit“ (2,3), „Soziale, kulturelle und ethische Orientierung und Verständigung“ (2,4), „Steigerung der technisch-wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit“ (3,2) und „Lösung von Schlüsselproblemen“ (3,3) beigemessen worden. Bemerkenswert hoch ist die Einschätzung in der Kategorie „Erkennen elementarer Zusammenhänge und Bestimmung von Forschungszielen“ mit einem Mittelwert von 4,1 (Streuung  $\sigma = 1,1$ ) gewesen. Bei der entsprechenden Kategorie im Wissensdelphi hat das Thema nichtlineare Dynamik eine gleich hohe Bewertung (BMBF, 1998b, S. 225) erhalten. Die Analyse der frei zu formulierenden Begründungen in diesem Fragebogenteil hat ergeben, dass die Experten drei Aspekte gesellschaftlicher Bedeutung betonten, zu denen nichtlineare Physik spezifisch beitrage (vgl. Tab. 3.2):

- **Interdisziplinarität.** Rund zwei Drittel der Befragten hat betont, dass nichtlineare Dynamik und nichtlineare Physik aufgrund der strukturwissenschaftlichen und systemischen Ansätze zu bestimmten Gebieten außerhalb der Physik stark beitrage und dass Erkenntnisse in diesen Gebieten wiederum die Entwicklung der nichtlinearen Physik voranbrächten. Die so verstandene Interdisziplinarität fördere demnach die Weiterentwicklung von wissenschaftlichen Disziplinen.



Tab. 3.2 Aspekte gesellschaftlicher Relevanz, zu denen nichtlineare Physik nach Ansicht von Experten spezifisch beiträgt, und der Experten, die diese Aspekte hervorheben

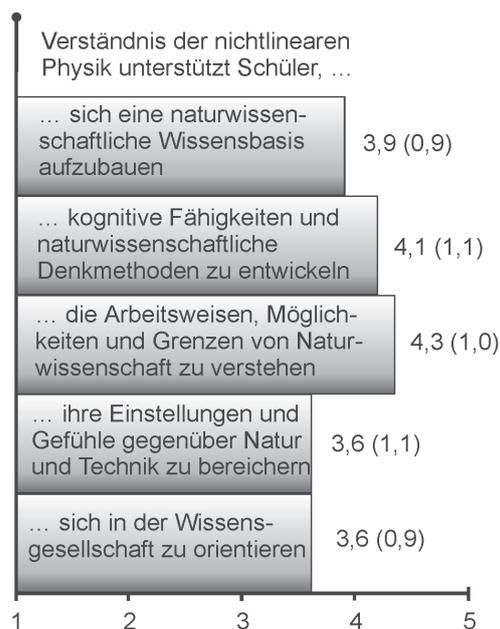
- **Komplexität.** Rund ein Drittel der Befragten hat hervorgehoben, dass nichtlineare Physik und nichtlineare Dynamik die Instrumentarien bereithalten, mit denen komplexe Phänomene und vernetzte Systeme modelliert und aufgeklärt werden können: *Welt als komplexes System mit vielen nichtlinearen Abhängigkeiten (Ökologie, Klima, Soziales,...) [und die] Einsicht in mögliche Entwicklungen bzw. Unvorhersagbarkeiten. [...] Die nichtlineare Dynamik gibt Einsichten und Erklärungen zum komplexen Verhalten all der hier genannten Systeme, die in der Regel vom erwarteten Verhalten (aus einfacher Extrapolation) erheblich abweichen [...]* (Experte R zu Frage 24).

- **Anwendungen.** Etwas mehr als die Hälfte der Befragten hat unterstrichen, dass nichtlineare Physik schon heute Erfolge bei der Umsetzung z.B. in der Medizin oder der Technik vorweisen könne. Weitere Anwendungen werden für die Zukunft erwartet.

Die gesellschaftliche Bedeutung der nichtlinearen Dynamik ist von den Experten vor allem in der Modellierung interdisziplinär zu erforschender, komplexer Probleme und im Potential gesehen worden, diese Probleme in Zukunft angehen zu können. Das methodische Rüstzeug dazu werde demnach bereits heute entwickelt und habe bereits zu wichtigen Anwendungen geführt.

### Nichtlinearen Physik und die Entwicklung von „Zielkompetenzen“

Welche Kompetenzen der Einzelne durch das Verständnis der nichtlinearen Physik entwickeln kann, haben die Experten in einem weiteren Fragebogenteil eingeschätzt. Elf „Zielkompetenzen“ sind vorgegeben worden, ebenfalls angelehnt an Kategorien aus dem Wissensdelphi (BMBF, 1998b). Auf diese Weise haben sich Aussagen wie z.B.: „Verständnis für nichtlineare Physik kann dem Einzelnen helfen, eine Vorstellung von den Arbeitsweisen der Naturwissenschaften und den Möglichkeiten und Grenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnis zu entwickeln“ ergeben. Die Experten haben diese Aussagen auf einer Skala von 1 bis 5 (1: *sehr gering und indirekt* ... 5: *unmittelbar und stark*) bewerten und ihre Wertung begründen sollen. Sehr geringe bis mittlere Wertungen sind bezogen auf die Bewältigung des Alltags, die Pflege sozialer Kontakte, die Kommunikation und Kooperation mit Anderen, die geistige und kulturelle Orientierung, die Entfaltung von Kreativität und die Entwicklung der Dispositionen, gesellschaftlich verantwortungsbewusst zu handeln und kritisch zu urteilen, gegeben worden. Wertungen ab 3,5 sollen genauer beleuchtet werden (Tab. 3.3):



Tab. 3.3 Beitrag der nichtlinearen Physik zur Entwicklung von Kompetenzen nach Ansicht der Experten und ihre mittlere Einschätzung auf einer Skala von 1 (gering und indirekt) bis 5 (unmittelbar und stark); (Mittelwert und Streuung)

**Entwicklung kognitiver Fähigkeiten und naturwissenschaftlicher Denkmethoden.** Mit einem Mittelwert von 4,1 ( $\sigma = 1,1$ ) haben die Experten den Beitrag der nichtlinearen Physik zur Entwicklung kognitiver Fähigkeiten und naturwissenschaftlicher Denkmethoden sowie zu kreativen Problemlösungen als sehr hoch bewertet. Begründet worden ist diese Einschätzung mit der neuen Herangehensweise der nichtlinearen Physik an vertraut erscheinende Prozesse. Sie nutze kreative Ansätze und Methoden zum Lösen von Problemen und zur Bewältigung von Krisen. Durch den hohen Abstraktionsgrad sei eine Übertragung auf diverse Bereiche möglich:

*Verständnis der nichtlinearen Physik spiegelt das Grundverständnis der modernen Naturwissenschaften wider; nicht das Faktenwissen bzw. -lernen steht im Vordergrund, sondern vielmehr das Wissen und Erlernen von Herangehensweisen, Denk- und Problemlösemethoden; es werden weniger spezielle Gesetzmäßigkeiten betrachtet als globale Zusammenhänge und universelle Prinzipien bzw. Wirkungszusammenhänge etc.[...] (V37)*

**Einstellungen und Gefühle gegenüber Natur und Technik.** Auch bei der Bereicherung von Einstellungen und Gefühlen gegenüber Natur und Technik ist die nichtlineare Dynamik recht hoch eingeschätzt worden, ein Ergebnis, das sich in bisherigen Überlegungen zum Bildungswert nicht im gleichen Maße widerspiegelt. Es hat sich ein Mittelwert von 3,6 ( $\sigma = 1,1$ ) ergeben. Einige Befragte sind der Meinung gewesen, dass das Verständnis der nichtlinearen Dynamik helfen könne, die Grenzen der Beherrschbarkeit von Natur und Technik zu erkennen und infolge dessen den eigenen Standpunkt (als Mensch) zu überdenken. Exemplarisch sei eine Begründung herausgegriffen:

*[Die nichtlineare Dynamik] zeigt ganz unmittelbar die Grenzen der Beherrschbarkeit der Natur auf, selbst wenn man ihre Gesetze kennt; [die nichtlineare Dynamik] hat die Wissenschaft einen ganz entscheidenden Schritt näher an die reale Formenvielfalt in der Natur herangeführt [...] (R37)*

**Arbeitsweisen, Möglichkeiten und Grenzen.** Die Befragten haben den Beitrag der nichtlinearen Dynamik bei einem Mittelwert von 4,3 ( $\sigma = 1,0$ ) als sehr hoch eingeschätzt, eine Vorstellung von den Arbeitsweisen der Naturwissenschaften und den Möglichkeiten und Grenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnis zu entwickeln. Einige Befragte haben explizit auf den Beitrag einer kritischen Auseinandersetzung mit naturwissenschaftlichen Themen hingewiesen und haben die nichtlineare Physik für ein geeignetes Beispiel gehalten, um naturwissenschaftliche Methoden zu kritisieren. Eine Begründung lautet folgendermaßen:

*Allein die Tatsache, dass im Rahmen der nichtlinearen Dynamik linearisierte Modelle, die bisher die Schulphysik beherrschten, hinterfragt werden, ist für naturwissenschaftliches Weiterlernen von elementarer Bedeutung. Die kritische Auseinandersetzung mit naturwissenschaftlichen Sachverhalten wird im Rahmen der nichtlinearen Dynamik exemplarisch gezeigt. (L95)*

**Entwicklung einer naturwissenschaftlichen Wissensbasis.** Hier ist der nichtlinearen Physik ebenfalls eine gewichtige Rolle zugesprochen worden, die Experten haben im Mittel eine Wertung von 3,9 ( $\sigma = 0,9$ ) abgegeben. Eine beispielhafte Begründung für eine hohe Wertung sei herausgegriffen:

*[...] Naturwissenschaftliches Wissen ohne die Erkenntnisse der nichtlinearen Dynamik (und damit der Grenzen der linearisierten Physik) ist eingeschränkt. --> gehört inzwischen zum Kanon der Physik. (L37)*

**Orientierung in der Wissensgesellschaft.** Hier ist untersucht worden, ob Verständnis für nichtlineare Physik dem Einzelnen helfen könne, sich in der Wissensgesellschaft zu orientieren. Eine ähnliche Fragestellung im Wissensdelphi ist von den dort befragten Experten mit 3,7 bewertet worden. In der vorliegenden Studie ist diese Kategorie bei einem Mittelwert von 3,6 ( $\sigma = 0,9$ ) ebenfalls hoch eingeschätzt worden. Eine Begründung dazu lautet z.B.:

*Ein Sichzurechtfinden in der komplexen Umwelt ist nur mit nichtlinearen Denkmethode zu erreichen. (K37)*

#### **Nichtlineare Physik und naturwissenschaftliche Allgemeinbildung**

Das in der BLK- Expertise (BLK, 1998; vgl. Abschnitt 3) beschriebene Allgemeinbildungskonzept umfasst die vier Kategorien „kulturelle Basiswerkzeuge“, „zentrale Wissensdomänen“, „Selbstorganisation des Lernens“ und „Lebenslanges Lernen in sozialen Situationen“. Die Beschreibungen dieser vier Kategorien sind den Experten vorgestellt worden; sie haben sich dazu geäußert,

inwieweit und in welcher Form Unterricht über nichtlineare Systeme und das damit verbundene Wissen zur Umsetzung des jeweiligen Aspekts beitragen kann.

• **BLK-Kategorie „Kulturelle Basiswerkzeuge“.** Den Experten ist folgendes gekürztes Zitat vorgestellt worden (vgl. BLK, 1998): „Die schulische Grundbildung muss die sichere Beherrschung kultureller Basiswerkzeuge vermitteln. Dazu gehören [...] grundlegende Kenntnisse und Fertigkeiten im muttersprachlichen Bereich und hinreichende Vertrautheit im Umgang mit mathematischen Symbolen und einfachen Routinen. [...] Diese Wissensbestände haben unmittelbar instrumentelle Funktion für das Weiterlernen [...]“ Diese Aussage wird in Bezug auf nichtlineare Dynamik von gut der Hälfte der Befragten unterstützt, indem Beispiele genannt werden, wie nichtlineare Dynamik zur Umsetzung der oben genannten Absicht beitragen kann.

**Mathematische Methoden und Begriffe.** Ein Drittel der Befragten ist in erster Linie auf die mathematische Seite des Themas eingegangen und hat den Beitrag der nichtlinearen Dynamik zur Entwicklung von mathematischen Grundkenntnissen bei Schülerinnen und Schülern unterstrichen. Dabei ist die Tatsache hervorgehoben worden, dass einfache mathematische Gesetzmäßigkeiten wesentlich zur Beschreibung komplexer dynamischer Vorgänge dienen können. Außerdem ist angeführt worden, dass die geometrische Begriffswelt der Lerner durch das Konzept der Fraktale bereichert werden könne (vgl. auch KOMOREK et al., 1998):

*Im Rahmen nichtlinearer Dynamik spielt das Prinzip der Entwicklung/Entfaltung durch Iteration eine wichtige Rolle. Durch wiederholte Anwendung relativ einfacher Gesetzmäßigkeiten können sehr komplexe Strukturen entstehen. Die Iteration ist als eine fundamentale Routine in der Mathematik, aber auch für die Behandlung äußerst vieler natürlicher Strukturbildungsphänomene anzusehen. (A488)*

• **BLK-Kategorie „Zentrale Wissensdomänen“.** Die zweite Kategorie des BLK-Allgemeinbildungskonzepts ist wie folgt zitiert worden: „Zum obligatorischen Wissensfundament gehört [...] ein hinreichend breites, in sich gut organisiertes und vernetztes sowie in unterschiedlichen Anwendungssituationen erprobtes Orientierungswissen in zentralen Wissensdomänen unserer Kultur, die unterschiedliche, nicht wechselseitig ersetzbare Horizonte des Weltverstehens erschließen. [...] Die Naturwissenschaften stehen hierbei für Systematisierung und theoretische Modellbildung, die auf Beobachtungen beruhen ...“ (vgl. BLK, 1998).

Systematisierung und Modellbildung. Rund drei Viertel der Befragten haben erklärt, dass die nichtlineare Dynamik bedeutend zur Systematisierung und Modellbildung innerhalb der Naturwissenschaften beitrage. Diese Systematisierung als Unterrichtsthema ermögliche einen Überblick über naturwissenschaftliches Vorgehen und vermittele grundlegende Einsichten in Natur und Naturwissenschaft. Zwei Zitate sollen diese Einschätzung belegen.

*Das Thema hat paradigmatischen Charakter und stellt ein Orientierungswissen bereit, das durch kein anderes Teilgebiet ersetzt werden kann. Der interdisziplinäre Charakter und der Aspekt der Modellbildung bieten einzigartige Möglichkeiten zu vernetztem Wissen. (D89)*

*Die wissenschaftstheoretischen Implikationen z.B. Kausalitätsprinzip, Laplacescher Dämon, Determinismus [...] bilden einen wesentlichen Bestandteil des Rüstzeugs zum Verständnis naturwissenschaftlicher Grundzusammenhänge für Abiturienten. (W89)*

• **BLK-Kategorie „Selbstorganisation des Lernens“.** Diese Kategorie ist den Befragten folgendermaßen vorgestellt worden: „Teile einer zukunftsfähigen Allgemeinbildung sind [...] Fähigkeiten der Selbstorganisation und Selbstregulation des Lernens einschließlich der Bereitschaft, selbstständig weiterzulernen, und der Fähigkeit, Durststrecken im Lernprozess zu überstehen. Zu diesen metakognitiven Kompetenzen und motivationalen Orientierungen gehört das Wissen über das eigene Denken und Lernen, [...]“ (vgl. BLK, 1998).

**Förderung selbstorganisierten Lernens.** Die Hälfte der Experten hat unterstrichen, dass Unterricht über nichtlineare Physik den Lernenden bei der Selbstorganisation ihres Lernens oder beim selbstständigen Weiterlernen behilflich sein kann. Sie haben auf das Motivationspotential des Themas und auf Unterrichtsformen, die eine Selbstorganisation des Lernens voraussetzen und fördern, sowie auf die dem Thema inhärente Interdisziplinarität verwiesen, die das Weiterlernen auch in anderen Disziplinen ermöglicht. Ein Zitat illustriert das:

*Nichtlineare Physik schließt interdisziplinäre Bezüge mit ein, somit auch kognitionspsychologische Erkenntnisse [...]. Nichtlineare Physik eignet sich in besonderer Weise für handlungsorientierten und offenen Unterricht, der ja gerade selbstorganisiertes Lernen fördert; Miteinbeziehung moderner Medien etc. (V90)*

**Selbstorganisation des Lernens als Unterrichtsinhalt.** Einige der Befragten haben Unterrichtsthemen angegeben, die sich um Selbstorganisation des Lernens drehen. Ihrer Ansicht nach begründe die nichtlineare Physik als eine Art Hintergrundtheorie die Prozesse der Selbstorganisation und der Selbstregulation des Lernens; und dieser Zusammenhang könne im Unterricht thematisiert werden, wie folgendes Zitat darlegt:

*Zunächst im Unterricht Erläuterung von Selbstorganisation in nichtlinearen atomaren u. molekularen Systemen (z.B. Ferromagnet, Bénard-Experiment, Musterbildung in der Biologie). Dann aber auch nichtlineare Gehirndynamik als Grundlage der Selbstorganisation von Lernen ansprechen! (AC90)*

Hierzu wird aber auch kontrovers Stellung genommen:

*Die Frage, inwieweit Lernen selbstorganisiert vor sich gehen kann, ist deutlich zu trennen von der Vermittlung von Wissen über selbstorganisierende Naturprozesse. Dieses Wissen kann auch in „klassischem“ Unterricht vermittelt werden. (I90)*

• **BLK-Kategorie „Lebenslanges Lernen in sozialen Situationen“.** Die Kategorie ist folgendermaßen vorgestellt worden: „Wissensergänzung und Weiterlernen werden sich zunehmend in sozialen Situationen vollziehen, in denen Menschen zusammenarbeiten und aufeinander angewiesen sind. Unter den sogenannten Schlüsselqualifikationen nehmen deshalb [...] sozial-kognitive und soziale Kompetenzen einen besonderen Rang ein. [...] Gerade ein experimentell ausgerichteter naturwissenschaftlicher Unterricht kann in dieser Hinsicht in besonderer Weise in die Pflicht genommen werden“ (vgl. BLK, 1998).

**Förderung sozialer Kompetenzen.** Viele der Experten sind der Ansicht gewesen, dass Unterricht über nichtlineare Physik bei geeigneten Unterrichtsmethoden soziale Kompetenzen fördern kann. Es ist von den Experten die große Anzahl leicht durchführbarer Experimente für die Gruppenarbeit und die Möglichkeit hervorgehoben worden, auch mit Hilfe der interdisziplinären Verknüpfungen soziale Interaktion zu fördern.

*Im Unterricht über nichtlineare Dynamik können viele (interessante) Modellsysteme behandelt werden, die sich für eine Exploration durch Kleingruppen von Schülern eignen; die Modellsysteme sind in wesentlichen Eigenschaften zwar prinzipiell für Schüler (der Oberstufe, z.T. Mittelstufe) durchschaubar, aber nicht so schnell auf Grund ihrer etwas komplexeren Dynamik --> Zusammenarbeit und Diskussion erweisen sich als nötig und fruchtbar. (AA91)*

*[...] Lebenslanges Lernen, Arbeit in wechselnden Teams [ist] notwendig. Der Einzelne ist angewiesen auf Kooperation, Kommunikation, interdisziplinäre Zusammenarbeit. (U91)*

**Modellierbarkeit sozialer Situationen.** Einige der Experten haben die Modellierbarkeit sozialer Situationen mit Hilfe der nichtlinearen Dynamik und die nichtlinearen Eigenschaften sozialer Interaktion angesprochen. Das folgende Zitat zeigt, welchen Bezug die Befragten zwischen Lernen in sozialen Situationen und nichtlinearer Physik hergestellt haben:

*Viele soziale Interaktionen sind nicht „zufällig“, sondern lassen sich mit Konzepten der nichtlinearen Physik behandeln. (C91)*

**Zusammenfassung.** Nach Ansicht der Experten unterstütze nichtlineare Physik die Systematisierung naturwissenschaftlichen Wissens und die Modellbildung, die es dem Lerner erlauben, notwendiges Orientierungswissen zu entwickeln. Prozesse der Selbstorganisation in der Natur und interdisziplinäre Forschungsprozesse könnten zudem als Paradigmen für die Unterrichtsgestaltung dienen, um selbstorganisiertes Lernen in sozialen Situationen zu fördern. Basiswerkzeuge der mathematischen Modellierung komplexer, aber auch einfacher Systeme sollten im Unterricht über nichtlineare Systeme entwickelt werden.

#### **Lernmotivation, Interesse und Anschlussmöglichkeiten für das Weiterlernen**

Die befragten Personen haben das Motivationspotential der nichtlinearen Dynamik als besonders hoch eingeschätzt und haben dem entsprechenden Item ein Rating von im Mittel 4,0 ( $\sigma = 1,2$ ) gegeben. Überwiegend ist dies mit der Alltagsrelevanz bzw. der Interdisziplinarität begründet worden. Diese Begründungen sind u.a. mit Beispielen aus der Biologie (Naturschutz, Strukturbildung), Musik, Medizin etc. unterfüttert worden. Des Weiteren ist der ästhetische Reiz von Strukturen, z.B. fraktalen Strukturen, genannt worden. Diese Einschätzungen sind dadurch gestützt worden, dass einige der Befragten auf eigene Erfahrung in der Vermittlung zurückgreifen können. Die folgenden Zitate illustrieren dies:

*Anlässlich einer Befragung im Rahmen meiner Arbeit zur NLD werteten die Schüler die Themen „Chaos“ und „Strukturbildung“ als besonders interessant. Sie begründen dies mit der Schönheit der Phänomene, der Aktualität der NLD und der Anwendbarkeit im Alltag bzw. der Interdisziplinarität des Themengebiets. (L93)*

*Motivierend könnte sich auswirken, dass Phänomene aus unterschiedlichsten Gebieten mit Hilfe einheitlicher Konzepte beschreiben lassen. Die Verknüpfung fördert das Interesse. (AF93)*

Ob das Verständnis der nichtlinearen Physik den Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit bietet, weiteres Wissen bruchlos und systematisch anzufügen, ist nach Einschätzung der Experten im Mittel mit 3,3 ( $\sigma = 1,2$ ) bewertet worden. Eine Begründung für eine hohe Wertung ist die folgende gewesen:

*Allein die Tatsache, dass im Rahmen der nichtlinearen Dynamik linearisierte Modelle, die bisher die Schulphysik beherrschten, hinterfragt werden, ist für naturwissenschaftliches Weiterlernen von elementarer Bedeutung. Die kritische Auseinandersetzung mit naturwissenschaftlichen Sachverhalten wird im Rahmen der nichtlinearen Dynamik exemplarisch gezeigt. (L95)*

Aber auch die gegenteilige Meinung ist zu finden gewesen:

*Auf der Basis des traditionellen Gebietskanons der Physik ist die nichtlineare Dynamik ein Zusatzgebiet, das mit anderen noch (!) kaum vernetzt ist. Insofern ist eine systematische Fortführung und der Anschluss für nachfolgendes Lernen z.Z. nicht in Sicht. (D95)*

Diese kontroverse Einschätzung hat sich aufklären lassen, indem zwischen fächerübergreifender und fachinterner Anschlussmöglichkeit unterscheidet worden ist. 42% der Befragten haben darauf hingewiesen, dass das Verständnis der nichtlinearen Physik auf Wissen außerhalb typischer physikalischer Inhalte bezogen werden kann und somit eine fächerübergreifende Anschlussmöglichkeit besteht, die es einzusetzen gilt. Die Anschlussmöglichkeit innerhalb des Faches Physik sind weniger erfolversprechend eingestuft worden. Lediglich 15% der Befragten haben eine gute fachinterne Anschlussmöglichkeit gesehen.

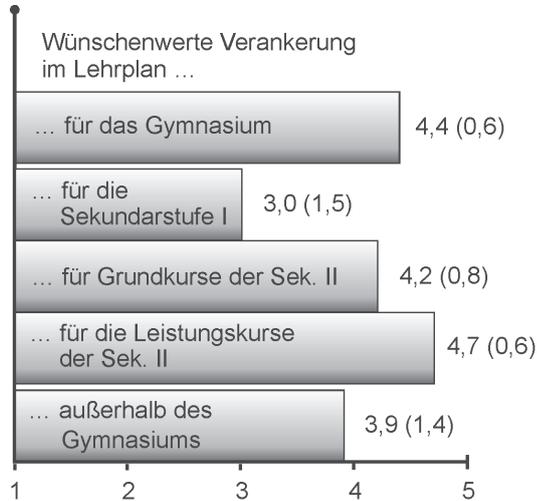
### Nichtlineare Physik im Curriculum Physik

**Vermittlung an Gymnasien.** Eine Integration nichtlinearer Physik in die Lehrpläne für Gymnasien ist als erstrebenswert angesehen worden. Es hat sich ein hoher Mittelwert von 4,4 ( $\sigma = 0,6$ ) (Tab. 3.4) ergeben. Inhalte, die nach Sicht der Experten vermittelt werden sollten, sind hauptsächlich konzeptueller Natur gewesen. Zwei Drittel der Befragten haben mindestens einen der folgenden zentralen Konzepte als Unterrichtsthema genannt: Starke und schwache Kausalität, Determinismus, Zufall, Vorhersagbarkeit, Sensitivität, Ordnung und Chaos, Strukturbildung, Selbstorganisation, Selbstregulation, Dissipation, Iteration, erkenntnistheoretische Betrachtungen. Als randständig oder als Überforderung sind hauptsächlich mathematische Methoden angesehen worden. Auf die Frage, wie eine Integration in den Lehrplan des Gymnasiums angelegt sein sollte, sind zwei Wege vorgeschlagen worden:

- Inhalte der nichtlinearen Physik bzw. der nichtlinearen Dynamik werden an klassische Themengebiete der Physik angeknüpft. Dies kann nach Ansicht einiger Experten sowohl dadurch geschehen, dass man Inhalte der nichtlinearen Physik exemplarisch als Gegenüberstellung und als Ausblick an bestimmte klassische Inhalte anbindet, als auch dadurch, dass kleinere, geschlossene Unterrichtseinheiten eingesetzt werden.
- Der interdisziplinären Charakter des Themas wird genutzt, um es im fächerverbindenden Unterricht einzusetzen. Für die Integration in die Sekundarstufe I schlagen die Experten durchgängig einen phänomenorientierten Zugang vor.

Auch außerhalb des Gymnasiums ist der Bildungswert der nichtlinearen Dynamik als hoch eingeschätzt worden. Die Befragten haben ihn im Mittel mit 3,9 ( $\sigma = 1,4$ ) bewertet. Außer den naturwissenschaftlichen Fächern sind hier auch die weiteren Schulzweige inklusive der Volkshochschule genannt worden. Desweiteren sollen die Inhalte über populärwissenschaftliche Veröffentlichungen (z.B. Zeitschriften etc.) zur Allgemeinbildung beitragen. Vor allem seitens der Lehrpersonen unter den Befragten sind mehr Veranstaltungen zur Lehrerfortbildung gewünscht worden.

**Erwartete Schwierigkeiten bei der Vermittlung.** Die erwarteten Schwierigkeiten bei der Vermittlung der nichtlinearen Physik in der Allgemeinbildenden Schule sind vielfältig



Tab. 3.4 Wünschenswerte Verankerung der nichtlinearen Physik im Lehrplan bestimmter Alters- bzw. Leistungsstufen nach Ansicht der Experten und ihre mittlere Einschätzung auf einer Skala von 1 (Verankerung denkbar) bis 5 (Verankerung unbedingt notwendig); (Mittelwert und Streuung)

gewesen. Rund die Hälfte der Experten haben Schwierigkeiten bei der mathematischen Fundierung des Themengebiets erwartet. Jeder fünfte hat Schwierigkeiten erwartet, wenn Schülerinnen und Schüler mit den im Vergleich zur klassischen Physik abweichenden Denkweisen konfrontiert werden, weil z.T. *ein fundamentales Umdenken in den gewohnten Weltbildern nötig [und ein] Einlassen darauf erforderlich [sei] (W108)*. Dies liege darin begründet, *dass nichtlineares Denken noch kein allgemeingültiges Kulturgut ist. D.h. neben der Komplexität der Thematik an sich ist ein Paradigmenwechsel zu bewirken. Die Vermittlung des Themas bedeutet die sehr ausgefeilte Entwicklung methodisch-didaktischer Konzepte (Y108)*.

**Neue Formen naturwissenschaftlichen Unterrichts.** Zwei Drittel der Experten haben verschiedene Formen von fächerverbindendem Unterricht genannt, in denen nichtlineare Dynamik eine Rolle spielen kann. Zitat: *Verbindung mit Fraktalen im Mathematikunterricht; diskrete Dynamik mit einfachen selbstgeschriebenen Programmen; evtl. autokatalytische Reaktionen im Chemie-Unterricht (E109)*. Die Bedeutung der nichtlinearen Dynamik im Rahmen des Projektunterrichts ist kontrovers bewertet worden. Aus den meisten Antworten ist aber deutlich geworden, dass diese Unterrichtsform für das hier diskutierte Themengebiet gut geeignet erscheint. Zitat: *[...] z.B. Projektunterricht: gleichzeitiges Bearbeiten von verschiedenen Ausgangsplattformen aus möglich (z.B. Fraktale aus der Biologie, Chemie, Physik, Mathematik...). (W109)*. Auch zum Offenen Experimentieren im Zusammenhang mit nichtlinearer Dynamik haben die Experten Stellung bezogen: *Offenes Experimentieren in Kleingruppen mit definierten Arbeitsaufträgen, alternierend mit Zusammentragen (lehrergelenkt); Beispiel Magnetpendel: „was passiert bei mehrfachem Start von derselben Stelle? wie kommt das? etc.“; Pickspecht: Zyklus der Bewegung aufschreiben! woher die Gleichmäßigkeit? was passiert nach Störungen? etc. (AA109)*.

#### **Der spezifische Beitrag der nichtlinearen Physik zur naturwissenschaftlichen Allgemeinbildung**

Um stärker auf die Begründungszusammenhänge zu fokussieren und um zu generellen Aussagen zu gelangen, sind die freien Antworten und die Begründungen der Experten über alle Items hinweg analysiert worden. Auf diese Weise haben sich fünf Thesen über den spezifischen Beitrag der nichtlinearen Physik zur naturwissenschaftlichen Allgemeinbildung ergeben:

##### **These 1**

**Unterricht über nichtlineare Physik trägt zur Entwicklung eines aktuellen naturwissenschaftlichen Weltbildes bei, das Komplexität und systemische Sichtweisen umschließt.**

Der Grundkonsens der Experten in dieser Studie hat darin bestanden, dass die nichtlineare Dynamik als Unterrichtsthema in spezifischer Weise zur Entwicklung eines adäquaten naturwissenschaftlichen Weltbilds beitragen kann. Die Aussage eines der Experten kann hier repräsentativ für die Einschätzung der Mehrheit dienen: *Das Begreifen von „Kausalität – Determinismus – Zufall“ prägt das (naturwissenschaftliche) Weltbild in ganz besonderer Weise und kann im Rahmen der nichtlinearen Physik besonders deutlich gemacht werden (Begriffe, Bedeutungen, Sinnzusammenhänge), dies gilt aber auch für die Quantenmechanik; wobei die nichtlineare Physik den besonderen Vorteil hat, dass sie unsere makroskopische Welt beschreibt.*

Die Entwicklung eines Weltbilds ist ein sehr umfassender Aspekt, der sich in der aktuellen Allgemeinbildungsdiskussion des öfteren wieder findet. Der Förderverein MNU z.B. fordert als ein

Kernelement physikalischer Bildung die „Kenntnis der Grundannahmen des modernen physikalischen Weltbildes [...]“ (MNU 2001, IV). SCHECKER und BETHGE (1998, S. 491) stellen dar, dass sich ein Weltverständnis nur dann herausbilden kann, wenn die Schule es vermag, eine ausreichende Grundlage zu erstellen. „Jeder junge Mensch muss für sich klären, welche Bedeutung und welche Rolle er den Naturwissenschaften bei der Herausbildung seines Selbst- und Weltverständnisses zumessen will. Für diese Entscheidung muss die Schule eine ausreichende Grundlage sicherstellen.“ Und auch HEYMANN (1990) und SCHLICHTING (1995) geben als zentrale Aufgabe der Schule explizit den Aufbau des Weltbildes an. Damit spezielle Unterrichtsinhalte eine so allgemeine Forderung erfüllen können, müssen sie einen gewissen Grad an Beispielhaftigkeit besitzen. Auch Klafki fordert den exemplarischen Charakter von Unterrichtsinhalten. Dieser exemplarische Charakter kann für die nichtlineare Physik angenommen werden.

Zwei Drittel der Experten haben die weltbildprägende Funktion der nichtlinearen Physik explizit hervorgehoben; sie haben dabei Aspekte wie die Begrenztheit von Vorhersagen trotz Determiniertheit, die Erweiterung des zugänglichen Phänomenbereichs (auch und vor allem im Mesokosmos) und die Komplementarität von Chaos und Ordnung angeführt. In diesem Zusammenhang sind auch fächerübergreifende biologische, chemische und medizinische Aspekte der nichtlinearen Physik genannt worden, die weltbildprägende Bedeutung haben. Zwei der Befragten haben geschrieben:

*Nichtlinearität wirkt in zwei Richtungen, nämlich in das Chaos und in die Ordnung. Sie ist einerseits eine notwendige Bedingung dafür, dass durch Selbstorganisation in ungeordneten dynamischen Systemen eine Ordnung entstehen kann. Genau darin sehe ich die weltbildprägende und die bildende Funktion der Thematik. (D14)*

*[Die Vermittlung nichtlinearer Physik] ist notwendig, um auf anderem Wege nicht erklär-bare Phänomene zu verstehen sowie zur Überwindung der mechanistischen Sicht von Physik und Naturwissenschaft; Unvorhersagbarkeit trotz Kenntnis der physikalischen Gesetze, Kausalität nur „im kurzen“, Indeterminismus trotz Determiniertheit, Komplexität von Systemen und Systemverhalten verstehen. (R14)*

Die Experten sind davon ausgegangen, dass der Unterricht der nichtlinearen Physik den Lernern sowohl ein aktuelles Weltbild als auch ein aktuelles Naturwissenschaftsbild vermitteln kann. In ihren Antworten ist nicht immer eine strikte Trennlinie zwischen „Weltbild“ und „Naturwissenschaftsbild“ zu finden gewesen; in vielen Fällen scheint das Naturwissenschaftsbild als Teil des Weltbildes begriffen worden zu sein. Ein Zusammenhang zwischen weltbildprägender Funktion und der Erfahrungswelt der Schülerinnen und Schüler hat sich ebenfalls herstellen lassen; er ist in der Komplexität zu sehen, der Schülerinnen und Schüler bei Naturphänomenen wie Klima, in der

#### **These 2**

**Unterricht über nichtlineare Physik fördert die kognitive Entwicklung, die zur Erarbeitung einer naturwissenschaftlichen Wissensbasis, zur Orientierung in der Wissensgesellschaft und zur Lösefähigkeit komplexer Probleme beiträgt.**

Formenvielfalt der Natur oder bei gesellschaftlichen Phänomenen begegnen.

Aspekte der kognitiven Fähigkeiten und der kognitiven Entwicklung sind von den Befragten in einer großen Zahl von Antworten berührt worden, aber nur selten so direkt angesprochen worden wie in der folgenden Aussage:

*Nichtlineare Dynamik nutzt kreative Ansätze und Methoden. Kreativität als kognitive Fähigkeit kommt in Schule, Uni etc. gelegentlich zu kurz, obwohl sie erhebliche Bedeutung für „die Arbeitswelt“ hat. [...] (AF37)*

Mit einem Mittelwert von 4,1 ( $\sigma = 1,1$ ) haben die Experten den Beitrag der nichtlinearen Physik zur „Entwicklung kognitiver Fähigkeiten und naturwissenschaftlicher Denkmethoden sowie zu kreativen Problemlösungen“ als sehr hoch eingeschätzt. Sie haben dem Denken in komplexen Zusammenhängen einen hohen Stellenwert zugeordnet und haben deshalb gefordert, dass sich der Physikunterricht zur Förderung der kognitiven Entwicklung und als andauernder Prozess und Teil der Persönlichkeitsentwicklung nicht auf die reine Vermittlung von Faktenwissen beschränken dürfe. Durch die Behandlung der nichtlinearen Physik seien die Schülerinnen und Schüler dagegen aufgefordert worden, die für sie neuen Strukturen und Gedankengänge anzuwenden. Es gibt nach Ansicht der Experten nicht viele Unterrichtsinhalte, die den Schülerinnen und Schülern ein so hohes Abstraktionsvermögen abverlangen und zugleich ihren Erfahrungshorizont berühren (vgl. auch KOMOREK, 1998, 107). Die Befragten haben darauf hingewiesen, dass in der nichtlinearen Physik multikausale Zusammenhänge erfasst werden müssen. Dies fordere kognitive Fähigkeiten heraus und fördert sie, wie folgende Aussagen von Experten illustrieren:

*Die nichtlineare Physik beinhaltet einen Ansatz, der der Alltagserfahrung widerspricht [...]. Um sie zu verstehen – oder auch sich an solche Phänomene zu gewöhnen – muss man geeignete Denkstrukturen erwerben. Die nichtlineare Physik kann faszinieren. (AD37)*

*Das gegenseitige Wechselspiel zwischen Elementarem & Komplexem zu erkennen, ist Teil der naturwissenschaftlichen und allgemeinen Bildung. Es trägt zur Persönlichkeitsformung bei, da es die Einordnung des Menschen in die verschiedenen „Welten“ ermöglicht. (M37)*

Die letzte Aussage kann so gedeutet werden, dass mit Hilfe des Erfahrens einer naturwissenschaftlichen Weltansicht eine Reflexion des Selbstbilds stattfinden kann. SCHECKER et al. (1996, 13) sehen darin ein wesentliches Ziel des naturwissenschaftlichen Unterrichts: *Naturwissenschaftliches Denken gehört zu den konstitutiven Bestandteilen unserer Kultur. Naturwissenschaftliche Erkenntnismethoden und Deutungsmuster ermöglichen eine rationale Weltansicht [...]. Ohne diese Denkweise zumindest probeweise erfahren zu haben, wäre auch eine reflektierte geistes- oder sozialwissenschaftliche Spezialisierung nicht möglich.*

Die nichtlineare Physik kann bei der Reflexion grundlegender Denkstrukturen in spezifischer Weise hilfreich sein, da sie an Beispielen wie Kausalität oder Determinismus thematisiert werden können. Die Vermittlung solcher grundlegenden Denkstrukturen durch die Naturwissenschaften wird in der Literatur als gesellschaftlich prägend und deren Reflexion als unverzichtbarer Beitrag zur Wissenschaftspropädeutik hervorgehoben. Im Vergleich zu herkömmlichen - auch im Schulunterricht - vermittelten Denkstrukturen bietet die nichtlineare Physik die Möglichkeit, naturwissenschaftliche Vorgehensweisen und Basiskonzepte kritisch zu hinterfragen. Darauf wird auch im folgenden Zitat hingewiesen.

*Globalisierung, Vernetzung, Umweltverschmutzung, Klimakatastrophe etc. sind ohne das Verständnis von Nichtlinearität im Lokalen und Globalen und im Wechselspiel der einzelnen Komponenten komplexer Systeme kaum zu verstehen. (T14)*

### These 3

**Durch Unterricht über nichtlineare Physik können zentrale Konzepte, Denkweisen, Methoden und Prinzipien der modernen Naturwissenschaften exemplarisch vermittelt werden.**

Die Vermittlung naturwissenschaftlicher Konzepte, Denkweisen und Prinzipien ist ein zentrales Unterrichtsziel. Im Bereich moderner Physik und moderner Naturwissenschaft kommen zwei Aspekte hinzu, nämlich die Wissenschaftspropädeutik, sofern es die Vermittlung in der Sekundarstufe II betrifft, und die Ermöglichung von Kommunikation zwischen wissenschaftlichen Kulturen sowie zwischen wissenschaftlichen Laien und Experten. Nach Ansicht von Experten in der vorliegenden Studie steht der Unterrichtsinhalt nichtlineare Physik exemplarisch für die Begriffsbildung und für die Prinzipien moderner Naturwissenschaft und ist geeignet, Schülerinnen und Schüler insbesondere an moderne Physik heranzuführen. Dem entsprechend haben die Experten die Bedeutung der nichtlinearen Physik für die „Entwicklung einer naturwissenschaftlichen Wissensbasis“ mit 3,9 ( $\sigma = 0,9$ ) relativ hoch eingeschätzt. Begründungen dafür haben oft auf den Kontrast zu klassischen Inhalten und darauf abgehoben, dass in der nichtlinearen Physik andere Konzepte genutzt werden als in der klassischen Physik:

*Die kontrastive Wirkung der Thematik im Vergleich zu traditionellen Themen schätze ich bedeutsam und groß ein. Dazu ist eine erweiterte Wissensbasis notwendig → Erkenntnistheoretische Fragen und Begrifflichkeiten (Determinismus, Berechenbarkeit, Vorhersagbarkeit, ...) erschließen sich erst durch den Kontrast zu den Gegenbegriffen anhand von Beispielen. (D37)*

*Schüler sollten auch mit nichtlinearer Physik vertraut gemacht werden insofern, dass es auch andere Prozesse in der Physik gibt, die mit den Gesetzen der klassischen Physik nicht erklärt werden können. (P14)*

Aus vielen Antworten der Experten hat sich zudem das Bild abgezeichnet, dass die Kenntnis zentraler Konzepte und Prinzipien der nichtlinearen Physik als Voraussetzung gesehen wird, komplexe Probleme der Zukunft zu analysieren und zu lösen. In diesem Zusammenhang hat sich die Argumentation der Experten in Bezug auf Unterricht um den Erwerb von Kompetenzen zum Auffinden von Lösungswegen bei komplexen Problemen gedreht:

*Kommende Generationen stehen vor ungeheuren Problemen: Umweltproblematik, Wasserressourcen, Medizin, Nahrungsmittel, Globalisierung etc. Wenn Lösungen gefunden werden, dann sicher nur auf der Grundlage von vernetztem Denken und nichtlinearen Zusammenhängen. Daher sollten Kinder möglichst früh mit neuen Denkweisen vertraut gemacht werden. (U14)*

In der Regel haben die Experten gefordert, dass Wissen über zentrale Konzepte und Prinzipien der nichtlinearen Physik zur naturwissenschaftlichen Grundbildung gehört bzw. gehören sollte. Relativierend sei hier bemerkt, dass von den Experten nicht bestritten worden ist, dass man auch über Themen wie Quantenphysik oder Kosmologie an moderne Physik heranzuführen kann.

**These 4**

**Unterricht über nichtlineare Physik verschafft Schülern einen Einblick in naturwissenschaftliche Arbeitsweisen, Möglichkeiten und Grenzen und vermittelt damit Wissen über das Wesen der Naturwissenschaft.**

*Wissen über die charakteristischen naturwissenschaftlichen Methoden der Erkenntnisgewinnung, ihrer Reichweite und Aussagekraft und die Fähigkeit zu ihrer Anwendung und Bewertung [...] ist als eines der Kernelemente physikalischer Bildung anzusehen (MNU 2001, IV). Ein Unterricht über nichtlineare Physik vermittelt nach Ansicht der hier Befragten den Schülerinnen und Schülern eine Vorstellung von den Arbeitsweisen, Möglichkeiten und Grenzen von Naturwissenschaft und trägt damit zum Wissen über das Wesen der Naturwissenschaften, der Nature of Science (NOS) bei. Dem derzeitigen Defizit im Unterricht an Reflexionen naturwissenschaftlicher Erkenntniswege und dem damit verbundenen mangelnden Beitrag der naturwissenschaftlichen Fächer zur Reflexion ihrer Bezugswissenschaften (vgl. SCHECKER, 1996) kann durch einen Unterricht über nichtlineare Physik begegnet werden.*

*Wissenschaftspropädeutik ist die Einsicht in die Ziele, Verfahren und Ergebnisse wissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung einschließlich deren Grenzen (SCHECKER, 1996, S. 8). Eine so verstandene Wissenschaftspropädeutik haben die Befragten als ein wichtiges Ziel angesehen, das mit Hilfe von Unterricht über nichtlineare Physik erreicht werden kann. Sie haben den Beitrag der nichtlinearen Dynamik bei einem Mittelwert von 4,3 ( $\sigma = 1,0$ ) als hoch eingeschätzt, eine Vorstellung von den Arbeitsweisen der Naturwissenschaften und den Möglichkeiten und Grenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnis entwickeln zu helfen. Dabei haben sie die Bedeutung der linearen Physik keinesfalls in Frage gestellt, sondern haben das eigentliche Potential in einer Gegenüberstellung linearer und nichtlinearer Physik gesehen.*

**These 5**

**Unterricht über nichtlineare Physik ist für fachübergreifenden und fächerverbindenden Unterricht aufgrund seines strukturwissenschaftlichen Ansatz besonders geeignet und kann interdisziplinäres naturwissenschaftliches Vorgehen und seine Bedeutung aufzeigen.**

Die befragten Experten haben es als ein wichtiges Bildungsziel hervorgehoben, die Verknüpfungen zwischen naturwissenschaftlichen Disziplinen zu thematisieren und für den Unterricht zu nutzen. Die derzeitige Herangehensweise ist u.a. im BLK-Modellversuch zur „Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts“ (1998) unter der Überschrift *Probleme des Physikunterrichts und Ansatzpunkte zu ihrer Lösung* kritisiert worden: *Unzurei-*

*chende Vernetzung der Stoffe: Die Vernetzung von Unterricht besitzt einen horizontalen und einen vertikalen Aspekt. Eine bessere horizontale Vernetzung ist insbesondere mit dem Fach Mathematik anzustreben. Auch die Berührungspunkte zwischen Physik und Chemie bedürfen einer besseren Koordination. Aber auch die vertikale Vernetzung des Physikunterrichts gelingt bislang nur unbefriedigend* (BLK, 1998). Dieses Defizit haben auch die BMBF-Experten der Studie „Bildungsdelphi“ gesehen. Sie haben einen dringenden Reformbedarf der etablierten Bildungskonzepte, Lernarrangements und Lernmethoden gefordert und bewerten vor allem fünf Faktoren als förderlich für den Erwerb von Kompetenzen: Interdisziplinarität; projektbezogenes Lernen; selbstgesteuerte Lernformen; mediengestütztes Lernen und Lernen in Teams. (BMBF, 1998, S. 62).

Ein Unterricht über nichtlineare Physik könnte in der aktuellen Bildungsdiskussion der zentralen Forderung nach mehr Interdisziplinarität nachkommen, weil die nichtlineare Physik disziplinübergreifend ausgerichtet ist und sich dabei mit mesoskopischen Phänomenen befasst, die leichter als mikroskopische oder kosmologische Phänomene einen Bezug zur Erfahrungswelt der Schülerinnen und Schüler zulassen. Die Experten haben die Wichtigkeit einer Verknüpfung mit anderen Disziplinen als sehr hoch eingestuft und haben die fachübergreifende Anschlussfähigkeit von Wissen, das im Bereich der nichtlinearen Physik erworben werden kann, betont:

*Das Thema hat paradigmatischen Charakter und stellt ein Orientierungswissen bereit, dass durch kein anderes Teilgebiet ersetzt werden kann. Der interdisziplinäre Charakter und der Aspekt der Modellbildung bieten einzigartige Möglichkeiten zu vernetztem Wissen. (D89)*

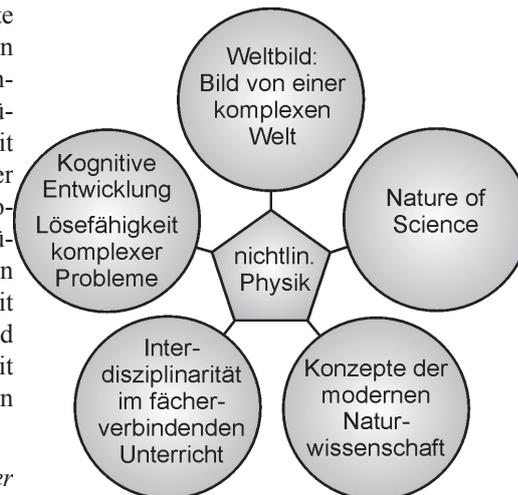


Abb. 3.2 Fünf Bereiche naturwissenschaftlicher Bildung, zu denen nichtlineare Physik spezifisch beiträgt

*Für Querverbindungen zwischen Physik, Chemie, Biologie und Informatik eignet sich der Unterricht über nichtlineare Physik hervorragend! (AC109)*

### Schluss

Die vorliegende Studie kann die Diskussion um den Bildungswert der nichtlinearen Physik (vgl. Abb. 3.2) zu einem Zeitpunkt beleben, da die innerwissenschaftliche Euphorie abgeklungen ist und nun überlegt werden muss, warum und wie nichtlineare Physik in neuen Curricula und in der Unterrichtspraxis verankert werden kann. Die Ergebnisse zeigen, wie nichtlineare Physik als Unterrichtsthema zur naturwissenschaftlichen Allgemeinbildung spezifisch beitragen kann. Die Studie stellt ein einstufiges Delphiverfahren dar. In einer weiteren Stufe könnten die entwickelten Thesen, die ja für Denkkategorien stehen, den beteiligten Experten zugeführt werden, um sie kommentieren zu lassen. So könnte u.a. geklärt werden, wie das Thema nichtlineare Physik im Verhältnis zu anderen Themen der modernen Physik, aber auch zu klassischen Themen bewertet wird. In den Antworten der Experten ist abzulesen, dass sie eher an eine Akzentverschiebung, denn an einen simplen Austausch von Unterrichtsthemen gedacht haben.

Im Projekt zur Didaktischen Rekonstruktion der nichtlinearen Physik beeinflussten die Ergebnisse der Delphibefragung die Analyse der Sachstruktur. Aspekte wie die Orientierung in der Wissensgesellschaft, die Entwicklung des Denkens in komplexen Zusammenhängen und die Funk-

tion von nichtlinearer Physik im fächerverbindenden Unterricht standen zunächst im Hintergrund. Diesen Aspekten wurde nun bei Elementarisierungen mehr Platz eingeräumt und sie flossen in die Entwicklung der Unterrichtsleitlinien stärker ein. Damit zeigte die Studie aus forschungsmethodischer Sicht, dass empirische Forschung auch die analytisch-hermeneutische Klärung von Sachstrukturen unterstützen kann und dadurch den Prozess der Didaktischen Rekonstruktion eines Themengebiets voranzubringen vermag.



## 4. Nichtlineare Systeme als Gegenstand fachdidaktischer Forschung und Entwicklung

Ob und inwieweit ein neues Thema wie die nichtlineare Physik im Unterricht der allgemeinbildenden Schule unterrichtet wird, hängt von mehreren Faktoren ab. Zum einen müssen Lehrpersonen über dieses Thema informiert sein, sofern es nicht Teil ihrer Ausbildung gewesen ist. Diese Informiertheit bezieht sich sowohl auf fachliche Aspekte als auch auf Schalexperimente, Unterrichtsmaterialien und auf didaktische und pädagogische Ziele, die mit der Vermittlung des neuen Themas verbunden sind. Zum anderen sollte das Thema in den Curricula verankert sein, denn Themen, für die dies nicht der Fall ist, werden auch in aller Regel nicht unterrichtet, selbst wenn die aktuellen Kerncurricula explizit dazu anregen und Schulen Freiräume für Schulcurricula auch mit fachlichen Schwerpunkten oder Aspekten einer „Nature of Science“ bereichern könnten.

Einen weiteren Faktor stellen fachdidaktische Forschungsaktivitäten zum Lernen zentraler Aspekte des neuen Themas und zu Unterrichtsprozessen dar. In vielen Fällen sind diese Forschungen mit Unterrichtsentwicklungen verbunden, die - teilweise im Unterricht erprobt - der Schulpraxis zur Verfügung gestellt werden. In diesen Fällen haben Lehrpersonen die Möglichkeit, erprobte Konzeptionen für ihren Unterricht zu adaptieren. In diesem Kapitel wird insbesondere untersucht, in welcher Weise das Thema nichtlineare Physik und Strukturbildungen in fachdidaktischen Forschungszeitschriften und Zeitschriften für Lehrpersonen repräsentiert ist und welche Forschungen zum Lernen und zum Unterricht über nichtlineare Systeme stattgefunden haben. Eine intensive Analyse der Kerncurricula und der Schulbüchern kann hier nicht durchgeführt werden.

### 4.1 Bibliographie zur fachdidaktischen Forschung und Entwicklung im Bereich nichtlinearer Physik

Im Projekt wurde eine Bibliographie geführt, in der Artikel über fachdidaktische Forschungsaktivitäten bzgl. der Vermittlung nichtlinearer Physik und Artikel, die Lehrpersonen über das neue Unterrichtsthema nichtlineare Physik informieren, gesammelt wurden. Die Bibliographie ist eine Präsenzbibliographie (alle Artikel liegen in Kopie vor) und umfasst derzeit rund 840 Einträge, sie kann beim Autor bezogen werden. Bis zum Jahre 2006 wurden 52 Zeitschriften systematisch nach Artikeln durchgesehen, die sich mit der Vermittlung von Teilbereichen der nichtlinearen Physik bzw. der nichtlinearen Dynamik (deterministisches Chaos, Fraktale, Selbstorganisation) befassen oder Lehrpersonen über die naturwissenschaftlichen Fakten dieser Bereiche informieren. Zu den führenden fachdidaktischen Zeitschriften, deren Artikel aufgenommen wurden, gehören u.a.:

- Education in Science
- IJSE, International Journal of Science Education
- JRST, Journal of Research in Science Teaching
- Physics Education
- Research in Science Education
- Science Education

#### 4. Nichtlineare Systeme als Gegenstand fachdidaktischer Forschung und Entwicklung

- ZfDN, Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften (auch online)

U. a. folgende wichtige nationale und internationale Lehrerzeitschriften wurden nach relevanten Artikeln durchgesehen:

- MNU, Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht
- NiU, Naturwissenschaften im Unterricht - Physik
- PhyDid, Physik und Didaktik in Schule und Hochschule (online)
- Praxis der Naturwissenschaften - Physik
- The Physics Teacher
- The Science Teacher

Daneben wurde populärwissenschaftliche Zeitschriften wie „Bild der Wissenschaft“, „Spektrum der Wissenschaft“ oder auch bestimmte Ausgaben oder Themenhefte der Zeitschrift „Geo“ ebenso durchgesehen (s. u. Anmerkungen zur Zugänglichkeit der Zeitschriften für Lehrpersonen) wie die Tagungsbände der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik GDCP und des Fachverbands Didaktik Physik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft DPG.

Bei der Analyse der Bibliographieinträge wurde deutlich, dass der Boom, der fachwissenschaftlich und in der fachdidaktischen Rezeption bestand, abgeklungen ist. Es schien so zu sein, dass nichtlineare Physik zum Bestandteil der „Normalphysik“ geworden ist und damit im Kuhn'schen Sinne aus der „revolutionären“ Phase in die „evolutionäre“ Phase übergegangen ist (vgl. KUHN, 1978). Methoden und Erkenntnisse der nichtlinearen Physik gehören heute zum Alltag der Physik in vielen naturwissenschaftlichen oder technischen Sparten (vgl. dazu Artikel im Tagungsband „Experimental Chaos“, BOCCALETTI et al., 2001; die Artikel geben Auskunft über aktuelle Forschungen zu deterministisch-chaotischen, fraktalen oder selbstorganisierenden Systemen in den Bereichen Elektronik, Neuroscience, Geophysik, Optik oder auch Festkörperphysik). Auch in anderen Wissenschaftsbereichen wie der Medizin werden sie genutzt, um der dortigen Grundlagen- und Anwendungsforschung neue Impulse zu geben. Abbildung 4.1 verdeutlicht diese Entwicklungen, gemessen an den erschienenen fachdidaktisch (!) orientierten Artikeln.

Anzahl der Bibliographieinträge nach Erscheinungsjahren

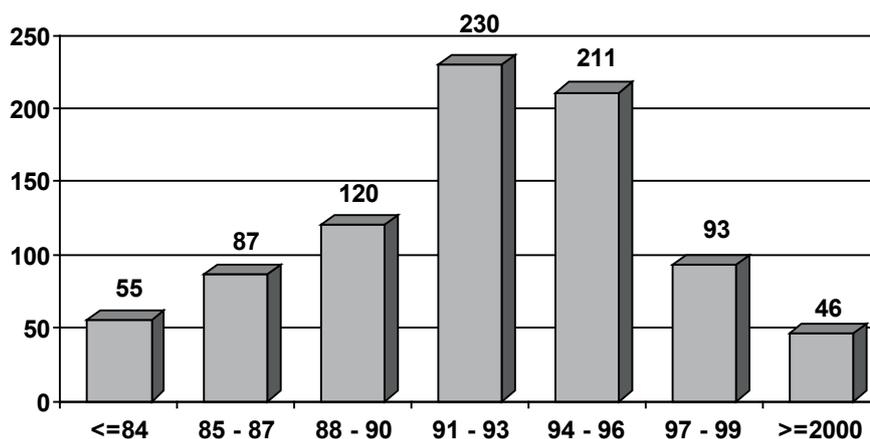


Abb. 4.1 Anzahl der Veröffentlichungen (nach Erscheinungsjahren) zur nichtlinearen Physik und ihrer Vermittlung in fachdidaktischen Zeitschriften und Zeitschriften für Lehrer (842 Einträge insgesamt)

#### 4.1 Bibliographie zur fachdidaktischen Forschung und Entwicklung im Bereich nichtlinearer Physik

Für die fachdidaktische Forschung bedeutet dies nun nicht, dass alle Arbeit geleistet ist. Aus bildungstheoretischen Gründen ist es weiterhin angezeigt, sich mit der Vermittlung der Basiskonzepte der nichtlinearen Physik auseinanderzusetzen, nun durchaus kritischer als in der Zeit des Booms. Denn der Eifer „der frühen Jahre“ hat manch seltsame Blüte getrieben. Es ist z.B. diskutiert worden, ob aus der vermeintlich erkannten „Chaotizität“ des Gehirns effektivere (chaotische) Lernmethoden ableitbar wären, die den Mechanismen chaotischer Systeme entsprechen (VAN LÜCK, 1994). Dadurch, dass Chaos „aus der Mode gekommen ist“, folgen durchaus Vorteile. Die Erwartungen an diesen Teil der Physik werden beispielsweise nicht mehr zu hoch angesetzt. Außerdem kann die nichtlineare Physik in den Kanon etablierter Themen eingeordnet werden, ohne dabei ihre Besonderheiten und Konsequenzen für die Entwicklung des naturwissenschaftlichen Weltbildes abzuwerten oder ganz unter den Tisch fallen zu lassen.

Die Artikel der Bibliographie sind naturgemäß heterogen, ließen sich aber in vier Grundkategorien einordnen. Diese sind in der folgenden Tabelle (Tab. 4.1) beschrieben und es werden die Besetzungszahlen aufgeführt. Die Kategorisierung orientiert sich nicht an physikalisch-inhaltlichen Kriterien (z.B. deterministisches Chaos, Fraktale, Strukturbildung und Selbstorganisation), nicht an der Unterscheidung zwischen qualitativ- oder quantitativ-orientierten Zugängen, sondern orientiert sich an der Zielstellung des jeweiligen Artikels. Zur Nutzung der Artikel durch Lehrpersonen sei angemerkt, dass der Zugang zu den meisten oben genannten Zeitschriften Lehrkräften in der Regel versagt ist. Unsystematische Befragungen von Lehrkräften zeigen, dass Schulen, wenn überhaupt, dann gerade einmal eine Fachzeitschrift für Physiklehrpersonen abonniert haben (meist Praxis der Naturwissenschaften-Physik, Naturwissenschaften im Unterricht oder der Mathematisch-Naturwissenschaftliche Unterricht) und Lehrpersonen privat gelegentlich eine der oben genannten populärwissenschaftlichen Zeitschriften beziehen.

Kategorie (mehrfach-Zuordnungen möglich)	Anteil der Artikel
<p><b>Fachliche Informationen und Elementarisierungen.</b> Zu dieser Kategorie gehören Artikel, die über die Physik des deterministischen Chaos, der Fraktale, der Selbstorganisation etc. informieren und das Besondere der neuen Konzepte herausstellen. Auch Artikel mit Elementarisierungsansätzen gehören zu dieser Kategorie. Beide Textsorten sind praktisch nicht zu trennen, denn auch den rein „informierenden“ Artikeln liegt eine Elementarisierung zugrunde. (zu dieser Kategorie haben in Deutschland u.a. die Arbeitsgruppen um K. Jaeckel und J. Pade (Oldenburg), H.-J. Schlichting, U. Backhaus und V. Nordmeier (Essen/Münster) (Fraktale), H.-O. Peitgen und P.H. Richter (deterministisches Chaos) sowie K. Weltner und F. Siemsen (Frankfurt) beigetragen)</p>	65 %
<p><b>Philosophische und weltanschauliche Implikationen.</b> Artikel, deren Schwerpunkt in der Diskussion der Konsequenzen der nichtlinearen Physik für das Physikbild, für das Bild von Naturwissenschaften oder für unser Weltbild liegt, gehören zu dieser Kategorie. (auch zu dieser Kategorie hat u.a. die Gruppe um H.-J. Schlichting beigetragen)</p>	8 %
<p><b>Experimente und Schüleraktivitäten.</b> Artikel, die in erster Linie neue Experimente für den Schulunterricht vorschlagen, ihren Bau beschreiben, Schüleraktivitäten vorschlagen, werden dieser Kategorie zugeordnet. Die Darstellung von Unterrichtssequenzen fällt nicht darunter. (hier haben u.a. die Gruppen um A.K. Dewdney (USA) oder J. Bruhn (Hamburg) oder J. R. Brandenburg beigetragen)</p>	22 %

<p><b>Unterrichtskonzepte und empirische Studien.</b> Artikel, die im Schwerpunkt Unterrichtskonzepte vorschlagen oder die Erprobung von Unterricht darstellen oder Artikel, die empirische Studien zum Lernen bzw. Lehren grundlegender Konzepte der nichtlinearen Physik vorstellen, werden dieser Kategorie zugeordnet; ebenso Artikel, die unabhängig vom konkreten Unterricht, pädagogische und didaktische Möglichkeiten einer Vermittlung nichtlinearer Physik diskutieren. (einige Beiträge zu dieser Kategorie werden im Abschnitt 4.2 diskutiert)</p>	<p>11 %</p>
<p>nicht zuordbar</p>	<p>1 %</p>

Tab 4.1 Kategorisierung der Artikel in der Bibliographie des Projekts: Literatur zur Vermittlung nichtlinearer Physik im Physikunterricht

Nur rund jeder zehnte Artikel zum Thema (Kategorie „Unterrichtskonzepte und empirische Studien“) setzt sich mit pädagogisch-didaktischen Überlegungen zur Einbettung nichtlinearer Physik in den Unterricht auseinander oder stellt empirische Untersuchungen zum Lernen oder mehr oder weniger erprobten Unterricht vor. Zwar wird in jedem fünften Artikel ein Experiment zur Verdeutlichung von Aspekten der nichtlinearen Physik vorgeschlagen, wie es aber in den Unterricht zu integrieren ist, wie mit seiner Hilfe Ziele des Unterrichts, z.B. der Wunsch nach kumulativem Lernen und anschlussfähigem Wissen befriedigt werden kann, wird in fast keinem Fall beantwortet. Unterrichtsumsetzungen werden fast generell den Lehrkräften überlassen. Hier könnte von Seiten der Fachdidaktik mehr Hilfestellung angeboten werden, damit Lehrpersonen die vorgeschlagenen Experimente und Unterrichtshilfen adäquat nutzen können.

Zu den vorgestellten Experimenten ist zu sagen, dass sie in den meisten Fällen von fachwissenschaftlichen oder fachdidaktischen Arbeitsgruppen vorgeschlagen worden sind (z.B. chaotisches Wasserrad, getriebenes Doppelpendel, jeweils mit Messsystem). Viel Entwicklungsarbeit ist in diese Experimente geflossen; die Feinmechanik-Werkstätten von Universitäten haben ihr Know-How in die Entwicklung und Verbesserung eingebracht. Bei einer Reihe dieser Experimente ist davon auszugehen, dass nur ein oder zwei Prototypen existieren. Lehrmittelfirmen haben die Produktion serienreifer Experimente nicht aufgenommen. Leider stehen den meisten Lehrkräften nicht die Möglichkeiten zur Verfügung, die vorgeschlagenen Experimente nachzubauen. Auch ein ambitionierter Lehrer wie z.B. Sternemann (vgl. STERNEMANN, 1995) bestätigt, dass er und seine Schüler-AG für die Prototypenentwicklung (hier: des chaotisch tropfenden Wasserhahns) sehr viel Zeit („Wochen und Monate“, STERNEMANN, private Mitteilung) investiert haben. Es ist natürlich begrüßenswert, wenn sich eine interessierte Schüler-Lehrer-Gruppe in ein Problem „verbeißt“, allerdings sind diese Umstände nicht geeignet, für eine Verbreitung des Themas im Unterricht zu sorgen. Eine grundsätzliche Lösung dieses Problems gibt es nicht, doch sollten die fachdidaktischen Arbeitsgruppen bei ihren Vorschlägen den Blick für die Schulpraxis nicht verlieren.

**Curricula und Schulbücher.** Ein wichtiger Faktor, der die Verbreitung eines Themas im Unterricht begünstigen oder hemmen kann, ist seine Verankerung in den Curricula und seine Präsenz in Schulbüchern. Hierzu hatte KORNECK (2001) eine ausführliche Analyse durchgeführt, die sich aber auf den Zeitraum vor Einführung der Kerncurricula in den Ländern bezieht. Dabei zeigte sich, dass vier Bundesländer die nichtlineare Physik als Erweiterungsthema oder Wahlbaustein in die Curricula der gymnasialen Oberstufe aufgenommen hatten, Rheinland-Pfalz sogar nach Grund- und Leistungsfach gestaffelt (hingewiesen sei hier auf eine Handreichung zur Lehrerbildung in Rheinland-Pfalz (LEISEN, 2000) zum Thema „Nichtlineare dynamische Systeme und Chaos“, die auch heute noch vielfach genutzt wird). Bremen, NRW und Hessen hatten Erweiterungen klassischer Themen wie *Schwingungen* oder *Thermodynamische Prozesse* vorgesehen. Darüber hinaus

hatte Baden-Württemberg in seinem bereits 2004 als Vorläufer der Kerncurricula veröffentlichten Bildungsplan (vgl. MINISTERIUM FÜR KULTUS, JUGEND UND SPORT, BADEN-WÜRTTEMBERG, 2004, S. 185) das Thema der nichtlinearen Physik schon für die Klassenstufe 10 angesetzt. Geschichtliche Entwicklung von Modellen und Weltbildern (z.B. Sonnensystem, Universum, Folgerungen aus der Speziellen Relativitätstheorie, Kausalität, deterministisches Chaos) sollten im Mittelpunkt stehen; die Schülerinnen und Schüler sollten mittels der behandelten Beispiele die Grenzen der klassischen Physik zu erläutern lernen. In Stufe 12 war das Thema Chaos in Modelldiskussionen und Diskussionen über Weltbilder (Sonnensystem, Folgerungen aus der Speziellen Relativitätstheorie, Kausalität, Deterministisches Chaos) eingebettet (vgl. MINISTERIUM FÜR KULTUS, JUGEND UND SPORT, BADEN-WÜRTTEMBERG, 2004, S. 188 u. 190).

Die Ziele des Bildungsplanes waren relativ hoch angesetzt, was die Vermittlung moderner Physik in Klasse 10 angeht, denn die Diskussion von Modellentwicklungen und physikalischen Weltbildern fordert hohe kognitive Leistungsfähigkeit. Wie allerdings Studien des hier beschriebenen Projekts zeigen, ist es durchaus möglich, mit Schülerinnen und Schülern über deterministisches Chaos und die damit einhergehenden Entwicklungen im naturwissenschaftlichen Weltbild zu diskutieren (vgl. Ergebnisse in Kapitel 5). Zumindest von der Tendenz her scheinen damit die Ziele des Bildungsplanes, dass Schülerinnen und Schüler die Grenzen klassischer Physik darstellen können, erreichbar.

## 4.2 Forschungen zum Lernen und zum Unterricht

Ein dritter Faktor, der die Verbreitung nichtlinearer Physik im Unterricht fördern kann, ist praxisorientierte Forschung, deren Ergebnisse dem Schulunterricht zeitnah zur Verfügung gestellt werden. Im Folgenden werden deshalb exemplarisch Arbeiten präsentiert, in denen auf empirischem Weg Lernprozesse oder Unterricht zu den Themen nichtlineare Physik, deterministisches Chaos oder Selbstorganisation untersucht werden.

**Nichtlineare Dynamik im Leistungskurs Physik (KRÜGER et al., 1995).** Die für den Leistungskurs konzipierte 42-stündige Unterrichtseinheit für die Stufe 12 ist auf den damals neuen hessischen Lehrplan abgestimmt, der für das Thema „Schwingungen und Wellen“ das Erweiterungsthema Chaotische Systeme bereitgehalten hat. Die Einheit besteht aus fünf Themenblöcken und knüpft an das Vorwissen im Bereich linearen Systemverhaltens an:

1. Lineares Schwingungsverhalten (4 Std.) - getriebenes mechanisches Pendel, Wiederholung linearer Schwingungen, Phasenraum, Energie im Phasenraumkonzept
2. Nichtlineares Schwingungsverhalten (10 Std.) - getriebenes Pendel, Duffing-Oszillator, Doppelpendel, Attraktor, Periodenverdopplung
3. Logistische Abbildung (16 Std.) - Periodenverdopplung, Strukturbildung, Fraktale, kontinuierliche/diskrete Dynamik
4. Schülerpraktikum (8 Std.) Experimente: Pendel, Pohlsches Rad, optische Rückkopplung, Simulationen
5. Exkursion zu einem physikalischen Institut (4 Std.) - Chaossteuerung, Laser und Chaos, Relaxationsoszillationen

Die Unterrichtseinheit ist für Leistungskurse vorgesehen und damit kognitiv anspruchsvoll. Der Entwurf ist nur einmal in einem Leistungskurs, Stufe 12, mit 24 Schülerinnen und Schülern erprobt worden; dazu wird berichtet, dass die Schüleraktivität relativ hoch gewesen sei, allerdings werden keine Angaben zu Gruppenarbeitsphasen und Arbeitsaufträge für Schülerinnen und Schüler

gemacht (KRÜGER et al., 1996, S. 34). Die Schülerinnen und Schüler sollen sich das Thema zu Eigen gemacht und ausgearbeitete Stundenprotokolle angefertigt haben. Insgesamt scheint in dem beschriebenen Unterrichtsgang die Metapher der Schülerin bzw. des Schülers als Forscher vorgeherrscht zu haben, so dass z.B. eigenständig Verbesserungen der Experimente vorgeschlagen worden sind. Die Unterstützung durch ein Hochschulinstitut hat zudem die Auseinandersetzung mit den mathematischen und erkenntnistheoretischen Grundlagen des Themas gefördert (KRÜGER et al., 1995, S. 333; vgl. KRÜGER et al., 1996).

Eine systematische Evaluation der Unterrichtserprobung hat nicht stattgefunden, Lernprozesse sind im Einzelnen nicht untersucht worden. Daher liegen lediglich Beobachtungseindrücke der Leiterin der Studie vor, die gleichzeitig die Unterrichtseinheit konzipiert und unterrichtet hat. Für Leistungskurse scheint die Einheit ein brauchbares Konzept darzustellen, das Schülerinnen und Schüler zur Eigenaktivität anregt. Über Modifikationen aufgrund der ersten Erprobung ist nichts bekannt. Problematisch ist wohl, dass die meisten Experimente weder in Schulen vorhanden sind, noch von Lehrkräften angefertigt werden können; sie scheinen teilweise aus dem unterstützenden Hochschulinstitut zu stammen. Damit ist die Alltagstauglichkeit des Konzepts zunächst beschnitten. Eine Weiterentwicklung des Konzepts wäre wünschenswert.

**Strömungsdynamik als Zugang zur nichtlinearen Physik (KORNECK, 1998).** Auch Korneck hat eine Unterrichtsreihe für die Sekundarstufe II (Schwerpunkt Stufe 12, eher Leistungskurs) bzw. für die Lehrerbildung entwickelt, die für 30 Unterrichtsstunden konzipiert worden ist. Sie ist modulartig aufgebaut. Die sechs zeitlich etwa gleich umfangreichen „Themenblöcke“ sind inhaltlich abgeschlossen und beziehen sich auf folgende Inhalte bzw. Phänomene:

1. Wirbel - Phänomenologische Beschreibung von Wirbelströmungen: Wirbelstürme, Tiefdruckgebiete, Helmholtzsche Wirbelströme, ästhetische Aspekte, Reynoldszahl
2. Ideale und reale Strömungen - Modelle und Kategorien von Strömungsphänomenen: Inkompressibilität, Reibungsfreiheit, Stationarität, Flüssigkeit als Kontinuum, Viskosität, Gesetz von Bernoulli
3. Rohrdurchströmungen - quantitative Beschreibungen: Übergang vom laminaren zu turbulenter Strömung, Blutkreislauf, Hagen-Poiseuille-Gesetz
4. Umströmte Körper - Beschreibung von Strömungstypen: Leonardo da Vinci, laminare und turbulente Strömung, Kármánsche Wirbelstraße
5. Chaotisches Verhalten einfacher Systeme - Erweiterung des linearen Weltbildes: Bezug zur Strömungsphysik, komplexe Vielteilchensysteme, Magnetpendel/Schwerependel, starke und schwache Kausalität
6. Strukturbildung - Beobachtung und Interpretation von Strukturbildungsphänomenen: Rayleigh-Bénardsystem, Grundideen der Synergetik, Versklavungsprinzip, Taylor-Roette-Strömung

Das Unterrichtskonzept ist zweimal erprobt worden, mit Schülerinnen und Schülern der Stufen 11 und 12 sowie mit Lehramtsstudenten im Rahmen eines Seminars. Nach Abschluss des Unterrichtsganges ist es mit Hilfe eines Fragebogens („Akzeptanzbefragung“ und „Wissenstest“) evaluiert worden. Eine formative Evaluation der ablaufenden Prozesse im Unterricht oder ein Pre-Post-Test hat es nicht gegeben. Die Analyse der Fragebögen zeigt zunächst ein hohes Interesse am Kurs und eine Erfüllung der Erwartungen. Die Beantwortung der Wissensitems mit offenem Antwortformat ergibt offenbar ein positives Bild; die Ziele der Einheit scheinen mit den beteiligten Lerngruppen erreicht worden zu sein. Schülerinnen und Schülern sowie Studierenden gelingt es, z.B. das chaotische Verhalten des Magnetpendels und die damit zusammenhängende Einschränkung der Vorhersagbarkeit auf die Sensitivität dieses Systems zurückzuführen (KORNECK, 1999, S. 261). Die Fragebogendaten geben auch bzgl. des Verstehens von Strukturbildungen Auskunft. Ein Detail

sei erwähnt: Die Termini „Ordner“ und „Versklavung“ (gemäß Hakens Synergetik, vgl. HAKEN, 1977) sind offenbar lernhinderlich; hier könnte eine geeignete Elementarisierung mit neuer Terminologie zur Vermittelbarkeit der Synergetik beitragen.

Der Wert von Kornecks Arbeit liegt weniger im empirischen Teil, denn zum Ablauf, zu den Aktivitäten der Schülerinnen und Schüler, den Unterrichtsmethoden und vor allem den Lern- und Lehrprozessen und evtl. Modifikationen zwischen den Erprobungen können aufgrund des Designs nur wenige Aussagen gemacht werden. Die Stärke der Arbeit liegt vor allem in dem entwickelten Unterrichtskonzept, das in einer Lehrerhandreichung von 120 Seiten mündet. Das Unterrichtskonzept ist ausführlich dargestellt, Versuche sind beschrieben. Trotz dieser Vorarbeiten bleiben dem interessierten Lehrpersonen genug Möglichkeiten zur Ausgestaltung des Unterrichts, zumal konkrete Aufgaben und Arbeitsblätter nicht vorliegen. Das Konzept erscheint als eine Bereicherung der didaktischen Aufarbeitung der nichtlinearen Dynamik.

**Strukturprinzipien der Selbstregulation (BELL, 2003).** Die Arbeit von Bell befasst sich mit einem zentralen Aspekt nichtlinearer komplexer Systeme, mit dem Zustandekommen der Prozess- und Formenvielfalt in der Natur, der Selbstorganisation (vgl. BELL, 2004a). Als Teil des interdisziplinären Forschungsprogramms zur nichtlinearen Dynamik wird im Bereich der Selbstorganisation nach einheitlichen Beschreibungsweisen und Strukturprinzipien gesucht (vgl. Kapitel 6). Systemisches und strukturorientiertes Denken hat sich dabei in der Selbstorganisationsforschung herausgebildet. Rückkopplungsmechanismen führen auf das allgemeine Prinzip der zyklischen Prozesse in der Natur. Bell fragt, an welcher Stelle der naturwissenschaftlichen Ausbildung die tragenden Konzepte der Selbstorganisationstheorie aufgenommen werden sollten (BELL, 2004a, S. 163). In seiner Studie wählt er die Selbstregulation als eine Repräsentation des allgemeinen Zyklusprinzips aus, um Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe II grundlegende Strukturprinzipien nahe zu bringen. Anhand einer Reihe von selbstregulierenden Modellsystemen sollen Schülerinnen und Schüler die Rückkopplungen und Fließgleichgewichte erkennen und graphisch repräsentieren. Auf dieser Basis sollen sie komplexe und weniger anschauliche Modellsysteme erklären. Insgesamt zielt Bells Studie auf die Entwicklung systemischen Denkens.

Zu den Modellsystemen zählen der Pickspecht, ein einfach aufgebautes Spielzeug, bei dem ein gegebenes Energiereservoir durch das schrittweise Herabrutschen und Verkanten des Pickspechts an einer Stange dissipiert wird. Dies geschieht in selbstregulierender Weise, so dass sich eine konstante „Pickfrequenz“ einstellt. Die Konzepte, die vermittelt werden sollen, sind neben der Selbstregulation auch deren Teilaspekte, nämlich die Offenheit des Systems, das entstehende Fließgleichgewicht bzgl. der Energie und der Rückkopplungsmechanismus. Zu weiteren Modellsystemen gehören der Ton einer Orgelpfeife oder die Regulation der Blutzuckerkonzentration im menschlichen Organismus.

Die Hauptstudie ist mit Schülerinnen und Schülern des Jahrgangs 12 durchgeführt worden (vgl. BELL, 2003). Mit acht Zweiergruppen sind je fünf Interviews durchgeführt worden, die man als Teaching Experiment bezeichnen kann und die im Schnitt zwei Unterrichtsstunden gedauert haben. Fragebögen komplettieren das Design. Bell hat Fragebögen und Interviews mit qualitativen Methoden ausgewertet und Lernprozesse sowohl auf der Ebene der Konzepte (sie ist durch Wechselwirkung von Abstraktion/Reflexion und Exploration/Repräsentation gekennzeichnet) als auch auf einer Metaebene modelliert. Der Ebene von Abstraktion und Exploration unterstellt Bell, dass dort (im Denken der Schülerinnen und Schüler) zyklische Prozesse ablaufen. Deswegen konstruiert er seine Lehr-Lern-Sequenz als zyklische Abfolge von Aufgaben für die Schülergruppen - ausgehend von den einfachen Modellsystemen hin zu den komplexeren. Bei Einführung des jeweils nächsten Modellsystems wird untersucht, inwieweit Schülerinnen und Schüler spontan Analogienrelationen zu den vorangegangenen Systemen herstellen.

Ein zentrales Ergebnis der Untersuchung von Bell besteht darin, dass der (strukturefektorischen) Stimulation durch den Interviewleiter/Lehrperson eine große Bedeutung bei der graphi-

schen bzw. mentalen Konstruktion des vorherrschenden Selbstregulationsprinzips zukommt. Es wird berichtet, dass sich die folgende fünfstufige und zyklisch zu durchlaufende Lehr-Lern-Sequenz im Teaching Experiment als wirksam erwiesen hat (vgl. BELL, 2004a, S. 173):

1. Erkunden des Systems und Testen (auch von Hypothesen) durch Wiederholen
2. Graphische Repräsentation der Beobachtung und erste Abstraktion
3. Analyse der Energieumwandlungsprozesse
4. Integration eines „Störfall“-Szenarios in die graphische Repräsentation
5. Erneute, gestraffte graphische Darstellung des Regelkreises nach weiterer Abstraktion.

Ein weiteres Ergebnis bezieht sich auf die „Nutzung“ der Metaebene für die Lernprozesse auf der Ebene der Konzepte. Es zeigt sich bei Bell ein ähnlicher Effekt wie er auch bei der Studie zum Wechselspiel von Zufall und deterministischen Gesetzen (vgl. Kapitel 8) beobachtet worden ist. Das Verstehen eines generellen Prinzips auf einer Metaebene (die man auch als strukturwissenschaftliche Ebene bezeichnen kann) hilft Schülerinnen und Schülern bei der Bestimmung der Suchrichtung auf der Konzeptebene bzw. auf der Ebene der zugrunde liegenden Struktureigenschaften des untersuchten Systems. Die Forderung Bells, neben dem konzeptuellen Wissen auch das Metawissen in einem Unterricht über komplexe, strukturbildende Systeme zu fördern, kann durch eine Reihe von Ergebnissen des Kieler Projekts (s.u.) unterstützt werden. Ein weiteres wesentliches Ergebnis der Studie liegt darin, dass sich das graphische Repräsentieren, das aufgrund eigenständiger, kreativer Aktivität der Schülerinnen und Schüler eher als graphisches Rekonstruieren bezeichnen ließe, für die Exploration von Systemen als wirksames Instrument erwiesen hat (vgl. BELL, 2004b, S. 200; vgl. auch KOMOREK, 1999, zur Entwicklung eines „strukturellen Blicks“ bei Schülerinnen und Schülern durch die Kategorisierung relevanter Strukturmerkmale von Systemen.)

Die Arbeit stellt ein wichtiges Element bei der didaktischen Erschließung der nichtlinearen Dynamik dar, weil das Verstehen zeitlicher Strukturbildungsprozesse bislang kaum untersucht worden ist. Auf Basis der gewonnenen Ergebnisse ließe sich eine Unterrichtssequenz entwickeln und mit hoher Wahrscheinlichkeit bereits in Grundkursen der Sekundarstufe II erfolgreich einsetzen. Auch könnte geprüft werden, wie weit Prinzipien der Selbstregulation komplexer Systeme bereits in Klasse 10 unterrichtet werden können. Bells Arbeit bietet zudem eine Fülle von Ergebnissen und Ideen, die über die Vermittlung der Selbstorganisation hinausgehen und das graphische Repräsentieren, zyklische Verstehensprozesse oder die Wechselwirkung von Prozess- und Strukturebene betreffen. Hier stehen lernpsychologische Erkenntnisse auch für andere Lerndomänen zur Verfügung.

**Chaotisches Wasserrad und Lernprozesse (STEHLIK, 2005).** Abschließend sei eine empirische Arbeit erwähnt, bei der das chaotische Wasserrad (vgl. SCHLICHTING et al., 1991) im Mittelpunkt gestanden hat. Es ist eingesetzt worden, sowohl um Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern zum chaotischen Verhalten zu erheben, als auch um diese Vorstellungen in Richtung auf die wissenschaftliche Sicht hin zu entwickeln. Hervorzuheben ist hier, dass an ein und demselben Objekt zwei komplementäre Aspekte chaotischer Systeme vorgestellt und mit den Schülerinnen und Schülern diskutiert worden sind: die dynamische Instabilität und die strukturelle Stabilität (vgl. Abschnitt 5.1). In dieser qualitativ und explorativ angelegten Studie ist nach einer fachlichen Klärung eine Serie von Lerninterviews durchgeführt worden. Schülerinnen und Schüler haben auf Basis ihrer physikalischen Vorstellungen von Kräften und Bewegungen und mit Hilfe ihrer Alltagsvorstellungen das irreguläre Bewegungsverhalten des Wasserrades beschreiben und erklären müssen. Nach und nach sind vom Interviewleiter Informationen, die die wissenschaftliche Sicht widerspiegeln, in die Interviews eingegeben worden. Eine Phasenraumdarstellung der Bewegung ist hinzugezogen worden. Daraufhin ist untersucht worden, inwieweit die Schülerinnen und Schü-

ler die wissenschaftliche Begrifflichkeit übernehmen und für die Erklärung des Wasserrades nutzen können.

An der Untersuchung haben neun Schülerinnen und Schüler aus Physikleistungskursen in Zweier- oder Dreiergruppen teilgenommen. Die Kommunikation untereinander und mit dem Interviewleiter ist aufgezeichnet und transkribiert worden; ausgewertet ist nach einem kategoriengestützten qualitativ-iterativem Verfahren worden (vgl. MAYRING, 2002, 2010). Die Ergebnisse zeigen, dass praktisch alle der beteiligten Schülerinnen und Schüler im Verlaufe der Studie die wissenschaftliche Begrifflichkeit übernommen haben, auch wenn die Daten nahe legen, dass diese Übernahme in vielen Fällen nur probeweise stattgefunden hat. Die Akzeptanz für die wissenschaftliche Erklärung, was das Verhalten in instabilen Phasen und die Gleichsetzung von Strukturen im Phasenraum und der wissenschaftlichen Vorstellung von Ordnung angeht (vgl. VOGT, 2002; Abschnitt 8.1), ist dann hoch, wenn Schülerinnen und Schüler von vornherein Begriffe aus dem Physikunterricht für ihre Argumentation verwenden. Die Studie zeigt, dass Schülerinnen und Schüler auch zu komplexen Bereichen moderner Physik vordringen können, wenn sie bei der Exploration kognitiv anregender Lernumgebungen sinnvoll zurückhaltend geführt werden und relevante Informationen vom „Lernbegleiter“ zum richtigen Zeitpunkt eingegeben werden.

Für die Unterrichtspraxis sind die vorgestellten Arbeiten von großem Wert, auch wenn die zugrunde liegenden Unterrichtskonzepte entweder nicht in der realen Schulsituation erprobt worden sind (Bell) oder aber die begleitende Forschung nur in eingeschränkter Weise durchgeführt worden ist (Krüger, Korneck). In keiner der Studien sind erfahrene Lehrkräfte involviert gewesen. Trotz dieser strukturellen Beschränkungen der Studien zeigen ihre Ergebnisse, dass Unterricht über nichtlineare Systeme möglich ist, dass vor allem qualitative Zugänge so konstruiert werden können, dass wesentliche Ziele der Unterrichtskonzeptionen erreicht werden können. Insbesondere die Arbeit von Bell macht deutlich, wie Schülerinnen und Schüler strukturelle Eigenschaften von Systemen erkennen können und inwieweit sie zu systemischem Denken in der Lage sind. Frühere Ergebnisse des Kieler Projekts (vgl. KOMOREK, 1998) werden dadurch gestützt. Die geschilderte Situation im deutschsprachigen Raum ist einer der Anlässe gewesen, ein Unterrichtskonzept für Grundkurse zusammen mit einem Arbeitskreis von Lehrpersonen zu entwickeln und systematisch zu evaluieren (vgl. Kapitel 7).

Wie sieht die Situation, was die Entwicklung und Erprobung von Unterricht zur nichtlinearen Physik angeht, international aus? Generell sind deutliche Ähnlichkeiten mit Deutschland zu erkennen: Nach einem Boom in den frühen 90er Jahren scheint das Interesse am Thema abgeklungen zu sein; Unterrichtstudien findet man praktisch nicht (auch nicht zur Zeit des Booms), empirische Studien zum Lernen bestimmter Aspekte der nichtlinearen Physik kommen vereinzelt vor, gelegentlich zum Thema der Fraktale oder des deterministischen Chaos. Exemplarisch sei die Studie von NEMIROVSKY (1993), „Students Making Sense of Chaotic Behavior“, angeführt. Sechs Schülerinnen und Schüler einer High School (Junior- und Seniorstufe) sind in Zweiergruppen interviewt worden (pro Gruppe zwei Interviews á 75 min Dauer). Die Interviews sind wörtlich transkribiert und mit qualitativen Methoden ausgewertet worden. Als zentrales Experiment ist in den Interviews ebenfalls das chaotische Wasserrad diskutiert worden (vgl. KÜPKER, 1989; SCHLICHTING et al., 1991), bei dem Winkelstellung, Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung gemessen und auf einem Rechner graphisch dargestellt worden sind. Das Interview ist in fünf Sektionen untergliedert gewesen:

1. Vertrautmachen mit dem chaotischen Wasserrad
2. Diskussion der zeitabhängigen Darstellung der Winkelgeschwindigkeit
3. Klassifikation von Bewegungstypen des Rades
4. Diskussion der Übergänge zwischen verschiedenen Bewegungstypen

5. Einführung und Interpretation des Phasendiagramms ‚Winkelgeschwindigkeit vs. Winkelbeschleunigung‘.

Das Interview hat sich in erster Linie mit den auf dem Computer produzierten Graphen befasst, weniger mit den strukturellen Eigenschaften des realen Systems (vgl. STEHLIK, 2005). Dabei sind Aspekte diskutiert worden, die ein nicht zu unterschätzendes Abstraktionsvermögen bei Schülerinnen und Schülern voraussetzen; bei der Zeitreihenbetrachtung etwa die Frage danach, ob sie durch eine „Mischung“ verschiedener bestimmender Regime oder durch ein schwierig zu erkennendes zeitliches Muster entstehen; bei der Betrachtung der Phasendiagramme z.B. die Frage, ob Vorhersagbarkeit und Determinismus vorliegen. Das generelle Ergebnis auch dieser Studie liegt in den deutlichen Hinweisen auf das Vermögen der Schülerinnen und Schüler der Altersklasse 16 bis 19, unerwartetes, komplexes Systemverhalten zum Anlass zu nehmen, über die Grundlagen ihres naturwissenschaftlichen Weltbildes nachzudenken.

**Fazit.** Trotz zahlreicher Veröffentlichungen zur Vermittlung nichtlinearer Physik stellt sich die Situation für Lehrkräfte, die Konzepte der nichtlinearen Physik unterrichten wollen, als schwierig dar. Führende Oberstufenbücher haben das Thema zwar teilweise mit eigenständigen Kapiteln aufgenommen und eine Reihe von Curricula haben nichtlineare Physik als Wahlthema aufgenommen. Es stellt sich aber die Frage, ob sich das Thema im Zuge der Bildungsreformen in den Kerncurricula der Länder wiederfindet oder, was noch wichtiger ist, Eingang in die Schulcurricula findet. Bildungsstandards geben Schulen neue Freiheiten der inhaltlichen Gestaltung ihrer Schulcurricula (vgl. Kapitel 2), aber es fehlt Lehrpersonen an Vermittlungskonzepten und ausgearbeiteten Unterrichtsentwürfen, die sich in der Schulpraxis bewährt haben. Die obige Analyse zeigt, dass nur wenige fachdidaktische Arbeitsgruppen in Forschung investiert haben, die über die Elementarisierung von Basiskonzepten und die Entwicklung von Experimenten hinausgeht. Dies macht nachvollziehbar, warum Lehrpersonen dem Thema gegenüber zurückhaltend geblieben sind.

### 4.3 Lehrerprofessionalisierung und das Lehren moderner Physik

Die Ergebnisse von Studien zum Bildungsmonitoring (u.a. TIMSS, PISA) haben in Politik und Wissenschaft zu einer Reihe von nachhaltigen Reaktionen geführt. Die Entwicklung von Bildungsstandards (vgl. Kapitel 3) oder die Einführung des Zentralabiturs in einigen Ländern gehören dazu. In der fachdidaktischen und empirisch-pädagogischen Forschung tritt die Lehrperson stärker als bisher in den Mittelpunkt des Interesses, nachdem die 1990er Jahre durch eine intensive Erforschung von Schülervorstellungen und durch Lernprozessforschung geprägt gewesen sind. Studien, die in den letzten Jahren den Unterricht an deutschen Schulen z. T. videounterstützt analysiert haben, kommen zu dem Ergebnis, dass Lehrkräfte nur über ein schmales Spektrum von Unterrichtsroutinen verfügen (PRENZEL et al., 2002; SEIDEL et al., 2002), dass methodische Vielfalt im Physikunterricht oft nicht vorherrscht und dass ein großer Bedarf an Maßnahmen zur Lehrerprofessionalisierung besteht.

Der Begriff der Professionalisierung ist allerdings schillernd, denn er stellt die Qualität der Erstausbildung von Lehrpersonen in Frage. Außerdem kann die Fähigkeit zur Fortbildung bereits als Teil der Profession von Lehrkräften angesehen werden, so dass bestimmte inhaltliche oder methodische Fortbildungen nicht mit einer Entwicklung der Profession (im engeren Sinne) einhergehen müssen. Der Begriff der Professionalisierung hat sich aber im Sprachgebrauch als Sammelbegriff etabliert. Er umfasst die Entwicklung des fachdidaktischen Denkens und Handelns (vgl.

Kapitel 2) von Lehrkräften, die Erschließung von Kooperationsstrategien, die Aneignung neuer Unterrichtsmethoden und die Erweiterung fachlicher Kompetenz.

Die Forschung zur Lehrerprofessionalisierung lässt sich in vier Felder einteilen. Während sich Arbeiten zur „Lehrerkognition“ darauf beziehen, wie sich das fachdidaktische Denken der einzelnen Lehrperson verändern lässt, haben Projekte, die die „Unterrichtspraxis“ untersuchen oder „Konzepte zu einer Lehrerprofessionalisierung“ erproben und evaluieren, die Komplexität des Unterrichtsgeschehens im Blick. Programme zur „Qualitätsentwicklung“ sollen sogar das gesamte Bildungssystem betreffen und sowohl direkt auf die beteiligten Lehrpersonen wirken als auch indirekt weitere Lehrkräfte über Veränderungen im Bildungssystem erreichen (vgl. Tabelle 4.4). BORKO (2004) kommt bei ihrer Analyse der amerikanischen Ansätze zur Professionalisierung auf eine ähnliche Strukturierung, spricht allerdings von aufeinander aufbauenden Phasen. Ein Phasenmodell kann für Deutschland derzeit sicher nicht mehr konstatiert werden, weil die genannten vier Felder parallel bearbeitet werden.

Nach FISCHLER (2001) werden in der Literatur mindestens zwei Gründe dafür diskutiert, sich mit dem fachdidaktischen Denken und Handeln von Lehrkräften zu befassen und die Entwicklung ihrer Expertisen zu untersuchen. Zum einen soll nach Wegen gesucht werden, wie Lehrpersonen die Ergebnisse empirischer Lehr-Lern-Forschung der 90er Jahre nicht nur wahrnehmen, sondern auch umsetzen. Zum anderen soll bei der Untersuchung von Unterrichtsprozessen weit mehr als bisher die Funktion der Lehrperson für die Lernprozesse der Schülerinnen und Schüler analysiert werden (FISCHLER, 2001, S. 105). Die zweite Forderung korrespondiert mit einer komplexen Sicht auf Unterrichtsprozesse, wie sie sich verstärkt durchsetzt. Denn die Vielschichtigkeiten auf Seiten der Schülerinnen und Schüler, ihre Erfahrungswelten und Herkünfte, die differenzierten Prozesse individueller und sozialer Bedeutungskonstruktion müssen bei der Planung von Unterricht ebenso berücksichtigt werden wie die Vorstellungen von Lehrkräften über guten Unterricht und über die Lernprozesse der Schülerinnen und Schüler. Unterrichts- und Lernprozesse sind zudem in Bedingungen der Schulklasse, der Elternschaft, der Schule und ihrer Organisation und weiterer übergeordneter Faktoren wie z.B. bildungspolitischer Art.

<b>Lehrerkognition (bezogen auf die Unterrichtspraxis)</b>	<b>Forschungen zur Unterrichtspraxis</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lehrervorstellungen zu Kognition und Instruktionen</li> <li>• subjektive Theorien bzgl. des unterrichtlichen Handelns</li> <li>• Metakognition und Metatheorien (zu Modellen und Modellieren, Experimenten, Nature of Science, ...)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterrichtsskripte/-choreographien</li> <li>• Basismodelle</li> <li>• quality of teaching</li> <li>• teachers‘ instructional strategies</li> <li>• teacher expertise</li> </ul>
<b>Fortbildungskonzepte/Konzepte zur Professionalisierung</b>	<b>Qualitätsentwicklung (,-kontrolle und -sicherung)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aktionsforschung/action research</li> <li>• professional development</li> <li>• coaching/teacher training</li> <li>• development and dissemination</li> <li>• teacher expertise/teacher knowledge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterrichtsgestaltung und Lernerfolg</li> <li>• Bedingungsfaktoren schulischer Leistung</li> <li>• interne und externe Leistungs-/Schul-Evaluation</li> <li>• large scale assessment</li> </ul>

Tab. 4.4 Forschungs- und Entwicklungsfelder (in Stichworten), die explizit oder implizit die Professionalisierung von Lehrkräften anzielen

**Lehrerkognitionen.** Vergleichbar mit der Forschung zu Schülervorstellungen werden in dieser Kategorie zunächst die Vorstellungen von Lehrpersonen zu fachlichen Aspekten untersucht, dann aber auch ihre Vorstellungen vom Lernen, Denken und Verstehen ihrer Schülerinnen und Schüler (z.B. FISCHLER, 1995). Darüber hinaus wird untersucht, von welchem fachdidaktischen Wissen Lehrpersonen ausgehen, inwieweit ihr fachdidaktisches Denken ausgeprägt ist (dazu DE JONG, KORTHAGEN & WUBBELS, 1998). Unter fachdidaktischem Denken ist hier zunächst zu verstehen, dass Lehrpersonen die Handlungen ihrer Schülerinnen und Schüler, aber auch ihr eigenes Handeln auf der Basis fachdidaktischen Wissens und fachdidaktischer Forschungsergebnisse reflektieren und begründen (vgl. Abschnitt 2.3). Lehrerkognitionen umfassen auch Metakognitionen, also die Vorstellungen von Lehrpersonen zur Bedeutung von Modellen und dem Modellieren (z.B. VAN DRIEL & VERLOOP, 1999), von der Funktion und Wirkung des Experimentierens im Unterricht (TAYLOR & DANA, 2003) oder von den Prozessen der Theoriebildung in den Naturwissenschaften und der Natur der Naturwissenschaften (Nature of Science) (vgl. LEDERMAN et al., 1987; GUSTAFSON & ROWELL, 1995).

Eng verknüpft sind Lehrerkognitionen mit dem Bereich der subjektiven Theorien von Lehrkräften (vgl. MÜLLER, 2004). Unter subjektiven Theorien sind Erklärungsschemata zu verstehen, die Lehrkräfte auf das Verhalten von Schülerinnen und Schülern, auf ihr eigenes unterrichtliches Handeln (vgl. HUIBREGTSE, KORTHAGEN & WUBBELS, 1994) und auf Unterrichtsprozesse ganz allgemein anwenden. Das Ziel der Forschung zu subjektiven Theorien besteht darin, diese Theorien zu erkunden, um isoliert oder konzeptlos erscheinende Handlungen von Lehrkräften einzuordnen, Verhaltensbegründungen von Lehrpersonen zu verstehen und um Lehrerhandeln zu prognostizieren.

Änderungen von Vorstellungen, Kognitionen und subjektiven Theorien von Lehrpersonen werden heute vor allem unter konstruktivistischen Perspektiven betrachtet. Im anglo-amerikanischen Bereich sind hier zahlreiche Forschungen betrieben worden, aus denen Vorschläge für die Lehreraus- und -weiterbildung abgeleitet werden (vgl. BAIRD & MITCHELL, 1986; BAIRD & NORTHFIELD, 1992; PRAWAT, 1992; RUSSEL & MANBY, 1992; RUSSEL, 1993; FISCHLER, 1995; HAND, 1996; TOBIN 1999; TABACHNICK & ZEICHNER, 1999). Zur Detailanalyse der Entwicklung metatheoretischer Konzepte liegen ebenfalls zahlreiche Studien vor (vgl. den Übersichtsartikel von LEDERMANN, 1992; LEDERMAN, 1995; BAIRD & WHITE, 1996; NORTHFIELD, GUNSTONE & ERICKSON, 1996; LEACH, DRIVER, MILLAR & SCOTT, 1997; vgl. auch den Übersichtsartikel von TOBIN, 1996).

**Forschungen zu Unterrichtsskripten.** Forschungen zu Kognitionen oder zu subjektiven Theorien werden in der Regel mit Fragebögen oder Interviews durchgeführt (vgl. FISCHLER, 2001). Vor allem mit Hilfe von Videoanalysen werden derzeit Studien zu so genannten Unterrichtsskripten durchgeführt, die Unterricht als komplexes Ganzes nach „Sichtstrukturen“ und „Tiefenstrukturen“ untersuchen (vgl. PRENZEL et al. 2002; SEIDEL et al., 2002). Wichtiges Ziel ist es dabei, die offensichtlichen Aktionen und Interaktionen (Sichtstrukturen) von bedeutungsrelevanten Elementen des Unterrichts (Tiefenstrukturen) zu unterscheiden. Neue Begriffe wie „unterrichtliche Choreographien“ (OSER & BAERISWYL, 2001), „Unterrichtsskripte“ (SEIDEL et al., 2002) und „Basismodelle“ (PATRY & OSER, 1994; OSER et al., 1994; FISCHER et al., 2002) haben sich in diesem Zusammenhang etabliert. Alle drei Begriffe beschreiben Handlungsschemata im Unterricht; während sich Unterrichtsskripte aber eher induktiv aus dem Beobachtungsmaterial ergeben, sind die Basismodelle als theoretisch formulierte Grundschemata zu verstehen, die man im Videomaterial wiederzuerkennen sucht. Wie TIEMANN u.a. (2003) zeigen, kann der Abgleich mit den Beobachtungsdaten zu einer Weiterentwicklung der Basismodelle führen. Die unterrichtlichen Choreographien nach Oser haben daneben noch einen metaphorischen Aspekt: Er betrachtet Unterricht als einen Pas de Deux aus Instruktion und Lernen, der evtl. durch neue Choreographien besser gelingen kann (vgl. OSER & BAERISWYL, 2001, S.1041 ff.).

Unterrichtsskripte sind auch in einer von der DFG geförderten Videostudie des Schwerpunktprogramms „Bildungsqualität von Schule“ (BiQua) untersucht worden. Sie ist im Anfangsunterricht Physik in den Klassen 7 und 8 durchgeführt worden (PRENZEL, DUIT, EULER & LEHRKE, 1999; PRENZEL et al., 2002; SEIDEL et al., 2002; SEIDEL 2003). Die Ergebnisse dieser Studie führen auf ein ähnliches Unterrichtsskript, wie es auch BAUMERT und KÖLLER (2001) bei TIMSS als Kennzeichen des Physikunterrichts in der SII beschrieben haben. In den meisten Unterrichtsstunden herrscht - vor allem in Bezug auf Experimente - ein eher enges fragend-entwickelndes Unterrichtsverfahren vor, das Schülerinnen und Schülern nur wenig Spielraum für eigene Lernprozesse lässt und wenig Hilfen für die eigenständige Bedeutungskonstruktion gibt. Der Unterricht ist zwar durchgehend fachlich korrekt und konsistent, die Vorstellungen und Interessen der Schülerinnen und Schüler werden im Unterrichtskonzept aber kaum berücksichtigt. Das unterrichtliche Denken der meisten Lehrkräfte ist vorwiegend fachlich und weniger fachdidaktisch (im obigen Sinne) orientiert. Kognitive Aktivierungen der Schülerinnen und Schüler und die Ermöglichung eigener Lernwege sind in diesem Skript selten enthalten.

**Konzepte zur Lehrerfortbildung.** Erkenntnisse, die in den oben genannten Feldern gesammelt worden sind, werden in letzter Zeit vermehrt in Maßnahmen zur Lehrerfortbildung eingesetzt. Während im anglo-amerikanischen Bereich der Gedanke einer kooperativen Arbeitsgruppe von Lehrkräften und Fachdidaktikern unter dem Aspekt der Professionalisierung seit vielen Jahren bekannt ist (Stichworte action research, professional development (u.a. MARX et al., 1998)), sind in Deutschland erst nach den TIMSS- und PISA-“Schocks“ ähnliche Initiativen gestartet worden. Neben einer Reihe von kleineren Studien, die neue Fortbildungskonzepte erproben (DANN et al., 2002; SCHWARZER, 1998), sind es vor allem von der DFG oder dem BMBF und den Ländern finanzierte größere Projekte.

Ein Beispiel ist das derzeit beginnende DFG-Projekt VINT (DUIT & LEHRKE, 2004), das auf den Ergebnissen der Videostudie im BiQua-Programm (s.o.) (vgl. SEIDEL, 2003) aufbaut. Bei VINT soll mit videogestützten Interventionen das fachdidaktische Denken von Lehrkräften entwickelt werden. Lehrkräfte und Fachdidaktiker, die als Coach fungieren, treffen sich regelmäßig und diskutieren Unterrichtsvideos. In kleinen Gruppen wird ein coaching betrieben, das in erster Linie darauf setzt, sich die ablaufenden Unterrichtshandlungen bewusst zu machen (vgl. RISSMANN, 2004). Während bei VINT explizit Interventionen bzgl. des fachdidaktischen Denkens integriert sind, baut das BMBF-Projekt „Physik im Kontext“ (piko) auf die Kreativität und den Wunsch der beteiligten Lehrkräfte, neue Inhalte in den Unterricht einzubringen oder Altbekanntes methodisch neu umzusetzen.

Hauptziel von piko ist die Entwicklung einer naturwissenschaftlichen Grundbildung von Schülerinnen und Schülern (KOMOREK, 2004; MÜLLER et al., 2005). Der Lehrerbildungsaspekt ist im Projekt aber von eben so großer Bedeutung, weil es eine zentrale Annahme des Projekts ist, dass eine nachhaltige Förderung naturwissenschaftlicher Grundbildung mit der Entwicklung der Expertisen der Lehrkräfte verknüpft ist. Um beides zu verbessern, wird ein symbiotisches Arbeitskonzept (Abb. 4.2) angestrebt: In den Arbeitsgruppen kommen Lehrkräfte und Fachdidaktiker zusammen und entwickeln Unterricht. Dabei ist der Austausch von Informationen in beide Richtungen angestrebt, so dass Lehrpersonen ihr fachdidaktisches Denken erweitern und Fachdidaktiker im Gegenzug mit notwendigem Praxiswissen versorgt werden.

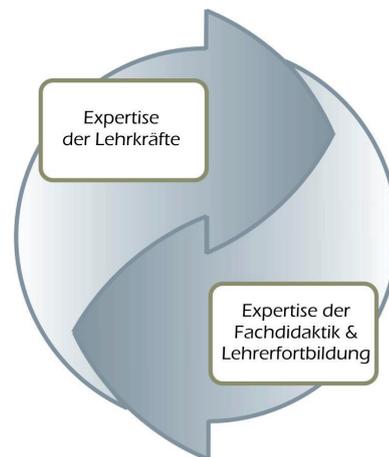


Abb. 4.2 Symbiotisches Arbeitskonzept bei piko

**Qualitätskontrolle und -sicherung.** Die oben angesprochene Videostudie ist Teil des DFG-Schwerpunktprogramms „Bildungsqualität von Schule“ (BiQua) (PRENZEL & DOLL, 2002). Ziel des Programms ist es, das komplexe Geflecht der inner- und außerschulischen Bedingungsfaktoren als System zu untersuchen. Maßnahmen zur Verbesserung der Bildungsqualität im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht werden entworfen und erprobt, u.a. in Form von Projekten zur Entwicklung und Wirksamkeitsprüfung von Lehrerfortbildungen und Trainingsprogrammen. Das BiQua-Programm ist nicht auf die naturwissenschaftlichen Fächer beschränkt und nicht allein auf Lehrerprofessionalisierung konzentriert. Aber die Umsetzung aller Maßnahmen im Programm soll als ein wesentlicher Effekt die Expertisen der beteiligten und weiterer Lehrkräfte entwickeln.

Ähnlich verhält es sich mit den Projekten „SINUS“ und „SINUS transfer“. Anstoß haben auch hier die Ergebnisse der TIMS-Studie gegeben. Zur Verbesserung des naturwissenschaftlichen Verständnisses von Schülerinnen und Schülern haben 180 Schulen an dem Projekt teilgenommen. Zum Konzept hat es gehört, dass Lehrergruppen unter wissenschaftlicher Begleitung ihren Unterricht auf der methodischen Seite eigenverantwortlich weiter entwickelt haben (PRENZEL, 2000). Kooperationen zwischen den Lehrkräften sind unterstützt worden. In Sets aus jeweils sechs Schulen ist in lokalen Netzen kooperiert worden. Die Reflexion und die Evaluation des Lehrerhandelns, z.B. durch gegenseitiges Hospitieren oder Analysieren von Unterricht mittels Videomitschnitten, sind dabei zentrale Arbeitsweisen gewesen; Materialien und Erfahrungen sind regelmäßig ausgetauscht worden. Zwar gab es bei SINUS kein symbiotisches Konzept, wie es bei piko realisiert wird, dennoch hat der Projekträger Fortbildungen und didaktisches Material angeboten, um die Arbeit der Lehrergruppen zu unterstützen. Das Kooperationskonzept (vgl. IPN-Homepage) soll im Transfer-Programm der BLK auf rund 700 Schulen ausgedehnt werden. Es bleibt zu untersuchen, wie weit die Art und Weise, mit Kollegen kooperativ zu arbeiten, und der gewisse Zwang, Unterricht und unterrichtliches Handeln zu reflektieren, zur Professionalisierung der Lehrkräfte beiträgt.

**Moderne Physik und Lehrerprofessionalisierung.** Die Bezeichnung „Moderne Physik“ wird in der Literatur nicht einheitlich verwendet. Vielfach wird sie als Synonym für aktuelle Physik genutzt, als Sammelbegriff für die Physik der Gegenwart. Oder man bezeichnet damit die Physik, die im 20. Jahrhundert betrieben worden ist. Neben diesen zeitlichen Klassifizierungen gibt es auch inhaltliche. Danach kann in der Physik als modern bezeichnet werden, was die Klassische Physik (Newtonsche Mechanik, Maxwellsche Elektrodynamik, klassische Wärme- und Strahlungslehre) nicht zu fassen vermag. Dies sind in erster Linie die Bereiche der mikroskopischen Phänomene, die die Quantenphysik beschreibt, der relativistischen Effekte, die durch spezielle und allgemeine Relativitätstheorie dargestellt werden, und der komplexen, strukturbildenden Systeme, die nichtlineare Physik und Synergetik beschreiben.

Mit der Etablierung dieser Sparten der Physik ist jeweils auch ein Paradigmenwechsel bzgl. der grundlegenden Annahmen der Physik einhergegangen; plakativ gesprochen ist die strikte Trennung von Teilchen und Wellen obsolet geworden, Raum und Zeit haben ihre Absolutheit eingebüßt und das Verhalten eines komplexen Systems lässt sich nicht mehr aus den Eigenschaften seiner Teile ableiten. Die Kopplung der Bezeichnung „Moderne Physik“ an das Merkmal des Paradigmenwechsels wird auch von führenden Lehrbüchern getragen (z.B. WEIDNER et al., 1982, „Elementare moderne Physik“; TIPLER et al., „Moderne Physik“, 2003). In vielen Fällen werden in diesen Lehrbüchern die genannten Themen durch Anwendungsfelder ergänzt; die Quantenphysik durch Festkörperphysik, Atom- und Kernphysik sowie Teilchenphysik, die Relativitätstheorie durch Kosmologie und die nichtlineare Physik durch Theorien zur Selbstorganisation.

Konzepte zur Professionalisierung im Bereich moderner Physik zielen in erster Linie auf eine fachliche Öffnung des Unterrichts ab. Eine Voraussetzung dafür besteht in einer inhaltlichen Weiterbildung der Lehrkräfte. Diese findet in den meisten Fällen in Form klassischer Fortbildungen statt, bei denen Referenten aus der Hochschule und der physikalischen Forschung Grundlagen, neue Forschungsergebnisse oder auch Elementarisierungen und didaktische Überlegungen einer

Gruppe von Lehrpersonen vorstellen. Hochschulinstitute und die Landesinstitute für Lehrerbildung (z.B. das Zentrum für wissenschaftliche Weiterbildung in Mainz) sind die Anbieter solcher Maßnahmen. Fortbildungen zur Quantenphysik werden regelmäßig angeboten, seltener zur Relativitätstheorie. Eine Verknüpfung der fachlichen Öffnung gegenüber moderner Physik mit einer Weiterentwicklung der Unterrichtsmethodik ist bei diesen Fortbildungen meist nicht vorgesehen.

Im Vordergrund des hier dargestellten Projekts steht zwar auch die fachliche Öffnung des Unterrichts und die Planung und Entwicklung von Unterricht im Team; zugleich werden aber Unterrichtsmethoden favorisiert, die die Eigenaktivität der Schülerinnen und Schüler fördern und unterstützen. Dies ist vor allem die Arbeit in Gruppen von zwei bis vier Schülerinnen und Schülern einschließlich der Präsentation von Ergebnissen durch die Gruppen. Diese Gruppenarbeit nimmt in den Erprobungen rund 60% der Gesamtzeit ein. Die beteiligten Lehrkräfte erfahren dabei, dass solche schüler-aktivierenden Arbeitsformen, die nichtsdestoweniger durch klare Arbeitsaufträge strukturiert sein müssen, die Effektivität der Unterrichtsprozesse steigern und gleichzeitig die Lehrkraft entlasten können (vgl. Kap. 7). Insgesamt betrachtet fehlen aber Konzepte, die fachliche und methodische Fortbildungen zusammenbringen und damit die Professionalität von Lehrkräften, was die schüler-orientierte Umsetzung neuer Inhaltsbereiche für den Physikunterricht angeht, steigern.



# 5. Sachstruktur für den Unterricht und empirische Ergebnisse aus Unterrichtserprobungen in Klasse 10

## 5.1 Konzepte der nichtlinearen Physik

In diesem Abschnitt wird ein Vorschlag für eine Sachstruktur zur nichtlinearen Physik für den Unterricht in den Klassen 10 und Physikgrundkursen der gymnasialen Oberstufe gemacht (vgl. Abb. 5.1). Im zweiten Teil des Kapitels wird dargestellt, welcher Teil der Sachstruktur im Unterricht in Klasse 10 thematisiert worden ist und welche empirischen Ergebnisse in den Unterrichtserprobungen gewonnen worden sind. In Kapitel 7 wird eine Reihe von Modulen vorgestellt. Jedes Modul behandelt einen Ausschnitt aus der hier präsentierten Sachstruktur. Die ideengeschichtlichen und physikalischen Hintergründe, die zur Sachstruktur geführt haben, werden im folgenden knapp umrissen. Detaillierte Darstellungen findet man z.B. in MARTIENSSEN & KRÜGER (1991), KÜPPERS (1996), ARGYRIS, FAUST & HAASE (1994), PEITGEN, JÜRGENS & SAUPE (1994) oder SCHUSTER (2005). Informationen über aktuelle Forschungen zur nichtlinearen Physik findet man z.B. in BOCCALETTI et al. (2002).

Wesentliche Einsichten in das Verhalten dynamischer Systeme sind Henri Poincaré bereits am Ende des 19. Jahrhunderts gelungen. Poincaré hat am Beispiel des Sonnensystems nachgewiesen (POINCARÉ, 1899), dass es verschiedene Bahntypen gibt, stabile und instabile, und dass kleine Störungen unter bestimmten Bedingungen ausreichen, um Übergänge zwischen den Bahntypen zu verursachen. Diese Erkenntnis Poincarés bedeutet einen substantiellen Bruch mit dem mechanistischen Weltbild, soweit es die Frage nach der Vorhersagbarkeit betrifft. Denn die Konzepte Determinismus und Vorhersagbarkeit werden durch Poincarés Überlegungen entkoppelt. Die betrachteten Systeme sind zwar durch deterministische Differentialgleichungen adäquat beschrieben, diese Gleichungen sind aber nicht geschlossen lösbar. Das bedeutet, dass die Kenntnis über eine beliebige Lösung keine Aussage über die Divergenz von Lösungen zulässt, die zu benachbarten Anfangswerten gehören. In der Praxis ist damit keine Vorhersage über lange Zeiten möglich.

Vor Poincaré sind Vorhersageprobleme lediglich als menschliche Unzulänglichkeit klassifiziert worden. Sie hatten also epistemischen Charakter und lagen nicht im System begründet. De Laplace abstrahiert deswegen vom menschlichen Beobachter, indem er den „Laplaceschen Dämon“ ersinnt (DE LAPLACE, 1886). Dies ist ein Wesen, das das Weltgeschehen mit absoluter Präzision vorher-sagen kann. In der Idee vom Laplaceschen Dämon findet sich die Kausalitätsvorstellung von Galilei und Descartes wieder, nämlich dass der Zustand der gesamten Welt Ursache für ihren nächst folgenden Zustand ist. Implizit steckt hinter der de Laplaceschen Idee der Gedanke der Mathematisierbarkeit der Realität, der als Ausdruck des mechanistischen Weltbildes schlechthin zu sehen ist.

Poincarés Arbeiten, von Birkhoff fortgesetzt, haben zur Entwicklung des Attraktorkonzepts für komplexe, nichtlineare Systeme (BIRKHOFF, 1935) geführt. Attraktoren stehen für Ordnungsstrukturen auf einer makroskopischen Systemebene und führen auch bei solchen Systemen auf globale Vorhersagemöglichkeiten, die lokal erratisch erscheinen und nicht vorhersagbar sind

(AGYRIS, FAUST & HAASE, 1994). Weitere Arbeiten haben sich mit der Frage nach Instabilität und globalen Systemstrukturen befasst. Kolmogorov, Arnold und Moser haben sich von Seiten der Theoretischen Physik erneut mit der Stabilität des Sonnensystems beschäftigt und sind auf verschiedenen Typen von Lösungen gestoßen (KOLMOGOROV, 1954). Nicht zu vergessen sind schließlich die Arbeiten von Edward Lorenz, der mit Hilfe leistungsfähiger Computer das chaotische Verhalten von Wettermodellen untersucht hat und damit auch Birkhoffs Untersuchungen über chaotische Attraktoren weitergeführt hat (LORENZ, 1993).

Während in der Physik vor allem die komplexen Attraktoren für Aufsehen gesorgt haben, ist aus fachdidaktischer Sicht auch die Einschränkung der Vorhersagbarkeit ein wichtiges Merkmal komplexer Systeme. Die Entkopplung zweier grundlegender Konzepte der klassischen Physik, des Newtonschen bzw. Laplaceschen Determinismus und der Vorhersagbarkeit (vgl. KOMOREK, 1998, S. 54) geht strukturwissenschaftlich gesehen auf die *dynamische Instabilität* komplexer nichtlinearer Systeme zurück (vgl. HEDRICH, 1996). Die globalen Ordnungsstrukturen dieser Systeme, die sich z.B. in chaotischen Attraktoren (zeitliche Ordnung) oder raumzeitlichen Strukturbildungen äußern und auf einer systemischen Ebene angesiedelt sind, repräsentieren die *strukturelle Stabilität* der Systeme.

**Phasenraumkonzept**

Trajektorien und Attraktoren sind Objekte im Phasenraum, einem Parameterraum, der die zeitliche Entwicklung eines Systems veranschaulicht. Der Operator  $\Phi$ , der das System von einem Phasenraumpunkt bei  $t=0$  zum Zeitpunkt  $t$  transportiert, wird Phasenraumfluss genannt.

**Gl 5.1**  $(\vec{p}(t), \vec{q}(t)) = \Phi(\vec{p}(0), \vec{q}(0))$

Dieser Fluss ist festgelegt durch Differentialgleichungen der Form

**Gl 5.2**  $\dot{\vec{p}} = \vec{F}_p(\vec{p}, \vec{q}, t) ; \dot{\vec{q}} = \vec{F}_q(\vec{p}, \vec{q}, t)$

Sie bilden ein Modellsystem für ein reales System und beinhalten alle relevanten Systemparameter und die generalisierten Kräfte. Unter den Lösungen einer Differentialgleichung versteht man Funktionen, in denen die zeitlichen Ableitungen eliminiert worden sind (Gl 5.3).

**Gl 5.3**  $\vec{p} = \vec{p}(\vec{p}_0, \vec{q}_0, t) ; \vec{q} = \vec{q}(\vec{p}_0, \vec{q}_0, t)$

Sie hängen jeweils von speziellen Anfangswerten ( $p_0$  und  $q_0$ ) ab. Der Operator  $\Phi$  ist eine bijektive Abbildung des Phasenraums auf sich selbst. Die Bijektivität folgt aus dem Existenz- und Eindeigkeitssatz (s.u.) für gewöhnliche Differentialgleichungen. Er sagt aus, dass es für stetige und stetig differenzierbare Funktionen  $\vec{F}(\vec{p}, \vec{q}, t)$  bei vorgegebenen Startwerten  $\vec{p}_0$  und  $\vec{q}_0$  eine und genau eine Lösung gibt. Die Lösungen der Differentialgleichungen sind stetige Funktionen, was den deterministischen Charakter physikalischer Systeme zum Ausdruck bringt (vgl. MARTIENSSEN & KRÜGER, 1991). Ein weiterer wichtiger Satz zur Unterscheidung konservativer von dissipativen Systemen ist der Liouvillesche Satz. Er besagt, dass in konservativen Systemen das Volumen eines Phasenraumgebildes mit der zeitlichen Entwicklung erhalten bleibt. Dissipative Systeme sind in kontrollierter Weise an andere Systeme gekoppelt und tauschen in der Regel Energie aus. Diese Kopplung ersetzt bei den dissipativen Systemen die kleinen Störungsterme, die den Beschreibungen konservativer Systeme hinzugefügt werden. Anders ausgedrückt, kann man diese Kopplung als große, aber geordnete Störungen interpretieren. Auch dissipative Systeme sind in vielen Fällen dynamisch instabil.

Die Theorie dynamischer Systeme interessiert sich dabei vorwiegend für

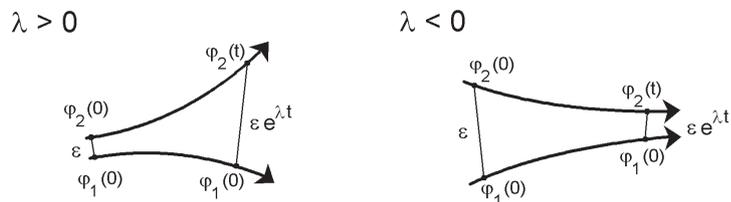


Abb. 5.1 Exponentielle Divergenz bzw. Konvergenz von Phasenraumtrajektorien

Lösungsmannigfaltigkeiten (Trajektorienschar) der beschreibenden Differentialgleichungssysteme und die Divergenz bzw. Konvergenz von Ensembles. Entfernen sich infinitesimal benachbarte Trajektorien mit einer exponentiellen Wachstumsrate voneinander, so sind sie dynamisch instabil (HEDRICH, 1996), (vgl. Abb. 5.1). Das Konzept der Lyapunov-Exponenten hilft dabei, Divergenz und Konvergenz zu quantifizieren.

Dynamische Instabilität zeigt sich dadurch, dass Phasenraumtrajektorien exponentiell divergieren, kleine anfängliche Fehler bei der Bestimmung von Anfangswerten wachsen exponentiell, der entsprechende Lyapunov-Exponent ist größer null (vgl. Abb. 5.2).

$$GI\ 5.4 \quad \varphi_2(t) - \varphi_1(t) = (\varphi_2(0) - \varphi_1(0)) e^{\lambda t} = \epsilon e^{\lambda t}, \quad \lambda > 0$$

Das System ist sensitiv für kleine anfängliche Messfehler. Diese Sensitivität ist auch bei diskreten Systemen wie der logistischen Gleichung (Abb. 5.3) zu finden. In beiden Fällen findet man rückkoppelnde Mechanismen, entweder wird ein begrenztes Phasenraumgebiet oder ein Intervall auf sich selbst abgebildet.

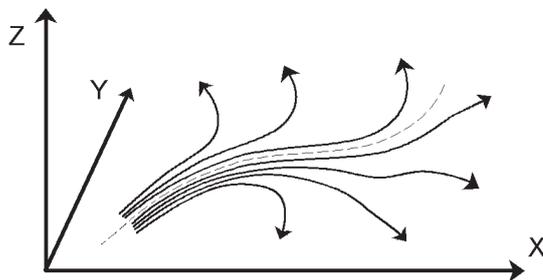


Abb. 5.2 Dynamische instabile Trajektorien im Phasenraum; eine Separatrix (gestrichelte Linie) kennzeichnet Orte labilen Gleichgewichts

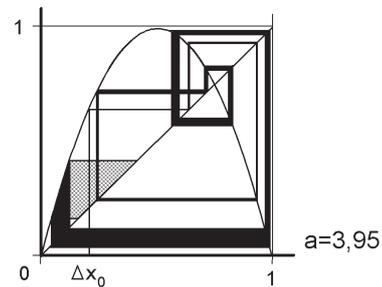


Abb. 5.3 Sensitivität der logistischen Abbildung  $x_{n+1} = a x_n (1 - x_n)$ . Ein kleiner Fehler  $\Delta x$  vergrößert sich im Zuge der Abbildungen dramatisch

**Fachdidaktische Relevanz der dynamischen Instabilität**

Für die klassische und die moderne Physik ist das Konzept der Vorhersagbarkeit und seine Kopplung an Determinismuskonzepte zentral. Gleiches gilt für den Physikunterricht, wird doch die experimentelle Suche nach Naturgesetzen oft damit begründet, dass mit den Gesetzen Vorhersagemöglichkeiten einhergehen, die wissenschaftlich wie gesellschaftlich von Nutzen sind. Die Frage nach der prinzipiellen Einschränkung der Vorhersagbarkeit hat sich in der klassischen Physik u.a. deshalb nicht gestellt, weil die linearen Näherungen vieler Systeme ausgesprochen beschreibungsmächtig sind. Mit nichtlinearen Modellen hat man sich zunächst nicht beschäftigen müssen und aus technischen Gründen meist auch nicht können. Die Begriffe *Vorherbestimmtheit* und *Vorherbestimmbarkeit* sind deswegen synonym verwendet und ihr Zusammenhang nicht hinterfragt worden. Mit den modernen Methoden und Modellen hat sich allerdings die Erkenntnis durchgesetzt, dass aus der Determiniertheit eines Systems nicht notwendigerweise dessen praktische Vorhersagbarkeit folgt. Selbst unter idealen Bedingungen, d.h. unter Abwesenheit von Störungen ist eine detaillierte Vorhersagbarkeit prinzipiell nicht möglich, weil die „unendlich genaue“ Bestimmung von Anfangswerten nicht möglich ist. Zwar kann man auch bei dynamisch instabilen Systemen mit exakten Startwerten Zustände in der Zukunft berechnen. Dieses Rechenergebnis stellt aber ein Ideal dar und trifft je nach Störung des Systems nur mit einer geringen Wahrscheinlichkeit ein. Dies ist aber nicht das, was wir mit dem Begriff der Vorhersagbarkeit beschreiben wollen.

### **Kausalität: schwach und stark**

Im Zusammenhang mit Sensitivität und dynamischer Instabilität trifft man die begriffliche Unterscheidung von „schwacher“ und „starker“ Kausalität. Unter schwacher Kausalität ist zu verstehen, dass eine bestimmte Ursache eindeutig und reproduzierbar mit einer bestimmten Wirkung verknüpft ist. Es ist also das, was man allgemein unter Kausalität versteht. In einem Phasenraumdiagramm ist eine kausale Beziehung durch eine Trajektorie repräsentiert, d.h. durch die eindeutige Abfolge von Systemzuständen. Bei den meisten Systemen geht man zusätzlich von der Annahme aus, dass ähnliche Ursachen zu ähnlichen Wirkungen führen, dass sich also benachbarte Trajektorien höchstens in linearer Weise voneinander entfernen. Diese Systemeigenschaft heißt starke Kausalität. Sie ist bei dynamisch instabilen Systemen nicht gegeben. In der Praxis sind andere als Kurzzeitvorhersagen nicht möglich.

### **Strukturelle Stabilität und Strukturbildungen**

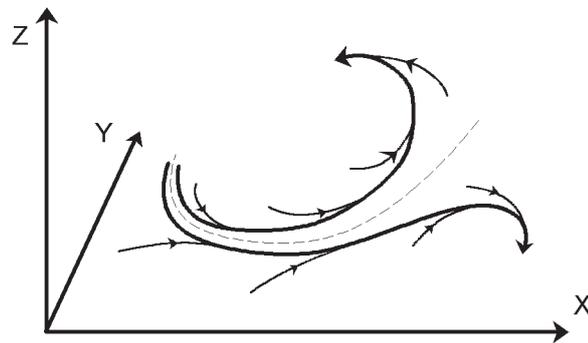
Die Komplexitätsforschung hat des Weiteren das Konzept der strukturalen Stabilität entwickelt. Bei diesem Konzept geht es um die Stabilität der gesamten Phasenraumstruktur unter Variation der Systemparameter. Wichtig ist hier die Frage, ob eine Struktur unter infinitesimal kleinen Variationen der Systemparameter in eine topologisch äquivalente Struktur übergeht, die sich qualitativ gleich verhält. Beim Aspekt der dynamischen Instabilität werden die Systemparameter als konstant angenommen und die Reaktion des Systems auf die Variation von Anfangswerten oder „Sprüngen“ zwischen Trajektorien (Störungen) betrachtet. Beim Aspekt der strukturalen Stabilität bezieht sich die Betrachtung auf das Verhalten von „Systemfamilien“. Dabei zeigt sich, dass nur struktural stabile Modelle geeignet sind, reale Systeme zu beschreiben, denn sie müssen die Stetigkeit realer Systeme widerspiegeln und damit „robust“ genug gegenüber Parametervariationen sein.

Unter Ordnung versteht die Physik stabile Strukturbildungen, die entweder zeitlicher, räumlicher oder zeitlich-räumlicher Natur sind. Eine rein räumliche Strukturbildung ist beispielsweise in einem Kristall verwirklicht, dessen Struktur sich zeitlich nicht wesentlich ändert. Zeitlich-räumliche Strukturbildung findet man bei Konvektionsströmen in heißen Fluiden, die neben einer zeitlichen Periodizität auch eine räumliche Struktur bilden (vgl. Aufarbeitung zur nichtlinearen Hydrodynamik bei KORNECK, 1998, s. Kapitel 4; vgl. auch Abschnitt 8.1). Ein Beispiel ist die Bénardkonvektion, die regelmäßige sechseckige Konvektionszellen ausbildet (AGYRIS, FAUST & HAASE, 1994, S. 418 ff, vgl. Kapitel 8).

Zeitlich-räumliche Strukturbildungen sind auch Gegenstand verschiedener Theorien zur Selbstorganisation, allen voran der Synergetik nach HAKEN (1983, 1989). Die Schwierigkeit dieser Theorien liegt allerdings darin, mathematische Instrumentarien zu entwickeln, die der Komplexität der Systeme angemessen sind. Dennoch sind eine Reihe von Aspekten selbstorganisierender Systeme, insbesondere die Bedeutung zyklischer Prozesse, in den letzten Jahren herausgearbeitet und für das Oberstufenniveau der Schule elementarisiert worden (vgl. Aufarbeitung zur Selbstregulation bei BELL, 2003, 2004a und b, s. Kapitel 4). Als zentrale Strukturprinzipien komplexer, selbstorganisierender Systeme haben sich rückkoppelnde Wirkzusammenhänge und Fließgleichgewichte herausgestellt (vgl. BELL, 2003). Rückkopplungen können zu einer Selbstverstärkung bestimmter Systemparameter oder zur Selbstregulation und damit zur Stabilisierung des Systems führen. Fließgleichgewichte stellen eine geordnete Kopplung an umgebende Systeme dar und sind ein Ausdruck der Systemstabilität.

Eine besondere Rolle für die zeitliche Strukturbildung spielen Attraktoren im Phasenraum. Attraktoren sind Teilräume des Phasenraums, auf die benachbarte Trajektorien zulaufen. In der graphischen Darstellung erscheint es so, als würde der Attraktor die Trajektorien aus seiner Umgebung anziehen. Attraktoren sind Ausdruck der strukturalen Stabilität eines Systems. Besitzt ein System einen Attraktor, so ist es unerheblich, an welchem Punkt des Einzugsbereiches dieses Attraktors ein System „startet“. Nach einer endlichen „Einschwingzeit“ schmiegt sich die Trajek-

torie, die zu den Anfangswerten gehört, asymptotisch an den Attraktor an. Eine zentrale Entdeckung der nichtlinearen Physik ist, dass auch dynamisch instabile Systeme einen Attraktor besitzen können. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass bei ihnen wenigstens ein Lyapunov-Exponent größer als Null ist (vgl. Abb. 5.4) (dies ist eine Voraussetzung für die Abbildung eines begrenzten Phasenraumgebietes auf sich selbst). Wie bei den anderen Attraktoren geht es auch beim chaotischen Attraktor darum, ein höherdimensionales System durch ein niedrigdimensionales Modell, das des Attraktors, darzustellen, das die Vielfalt des Systemverhaltens wiedergibt.



5.4 Prinzipialskizze eines Attraktors eines dynamisch instabilen Systems mit  $(\lambda_1 < 0, \lambda_2 > 0, \dots)$

### Fachdidaktischen Relevanz von Prinzipien der Strukturbildung

Die Existenz chaotischer Attraktoren im Phasenraum steht für eine Ordnung auf einer systemischen Ebene, während das Systemverhalten auf einer lokalen Ebene erratisch erscheint. Bei anderen Strukturbildungsprozessen findet man ein Zusammenspiel von zufälligen und deterministischen Prozessen in der Weise, dass eine räumliche oder räumlich-zeitliche Struktur, ein Muster, entsteht (vgl. die Ergebnisse in Kapitel 8). In allen Fällen muss der Blick auf rückkoppelnde Mechanismen gelenkt werden und die Bedeutung von Zufällen bei der Entstehung von Strukturen in der Natur thematisiert werden. Komplexe Systeme machen deutlich, was komplex bedeuten kann, nämlich dass eine „Mehrebenenbetrachtung“ notwendig wird, um das System adäquat zu beschreiben. Bei chaotischen Systemen stehen dynamische Instabilität auf der lokalen Ebene und strukturelle Stabilität auf der globalen Ebene in einem komplementären Verhältnis zueinander. Hier besteht also eine doppelte Determination, die lokal durch die eindeutige Trajektorie gegeben ist und global durch den chaotischen Attraktor. Ein naives Herangehen an komplexe Systeme könnte zu Fehlschlüssen führen, wenn man lediglich die Ebene des Atomaren und Subatomaren analysiert. Eine Zufallsverteilung auf einer lokalen Ebene kann durchaus im Rahmen deterministischer Randbedingungen stattfinden, so dass lokal indeterminierte Prozesse im Einklang mit langfristig determinierten Prozessen ablaufen können (vgl. ORNSTEIN & WEISS, 1991).

Die doppelte Determination lässt zumindest für chaotische Systeme von einer eigenständigen Form der Determination ausgehen, die nicht einfach die Überlagerung bekannter Determinationsformen darstellt. Diese Form kann als „Chaotischer Determinismus“ (vgl. KOMOREK, 1998, S. 87 ff) bezeichnet werden und reiht sich in das Konzept des Allgemeinen Determinismus (vgl. BUNGE, 1987) ein. Überraschend ist dabei, dass die spezifische Funktion und Bedeutung von Zufallsprozessen jetzt unter der Überschrift einer neuen Determinationskategorie gefasst wird, die nicht einfach mit einer statistischen Determination gleichgesetzt werden kann.

### Zusammenfassung zentraler Aspekte (vgl. Abb. 5.5)

- **Selbstorganisation.** Die Fähigkeit von Systemen, ihre innere Ordnung ohne äußere Steuerung selbständig zu entwickeln und aufrechtzuerhalten, wird als Selbstorganisation bezeichnet. Prozesse der Selbstorganisation findet man in einem weiten Fächer von Phänomenen der unbelebten Natur; komplexes adaptive Verhalten stellt zudem ein zentrales Merkmal biologischer Systeme dar (vgl. EULER, 2000). Somit bilden Konzepte der Selbstorganisation eine Brücke bei

der Analyse und Beschreibung von unbelebter und belebter Natur. Sie können eine Schlüsselrolle beim Verstehen von biologischen Lebensprozessen spielen.

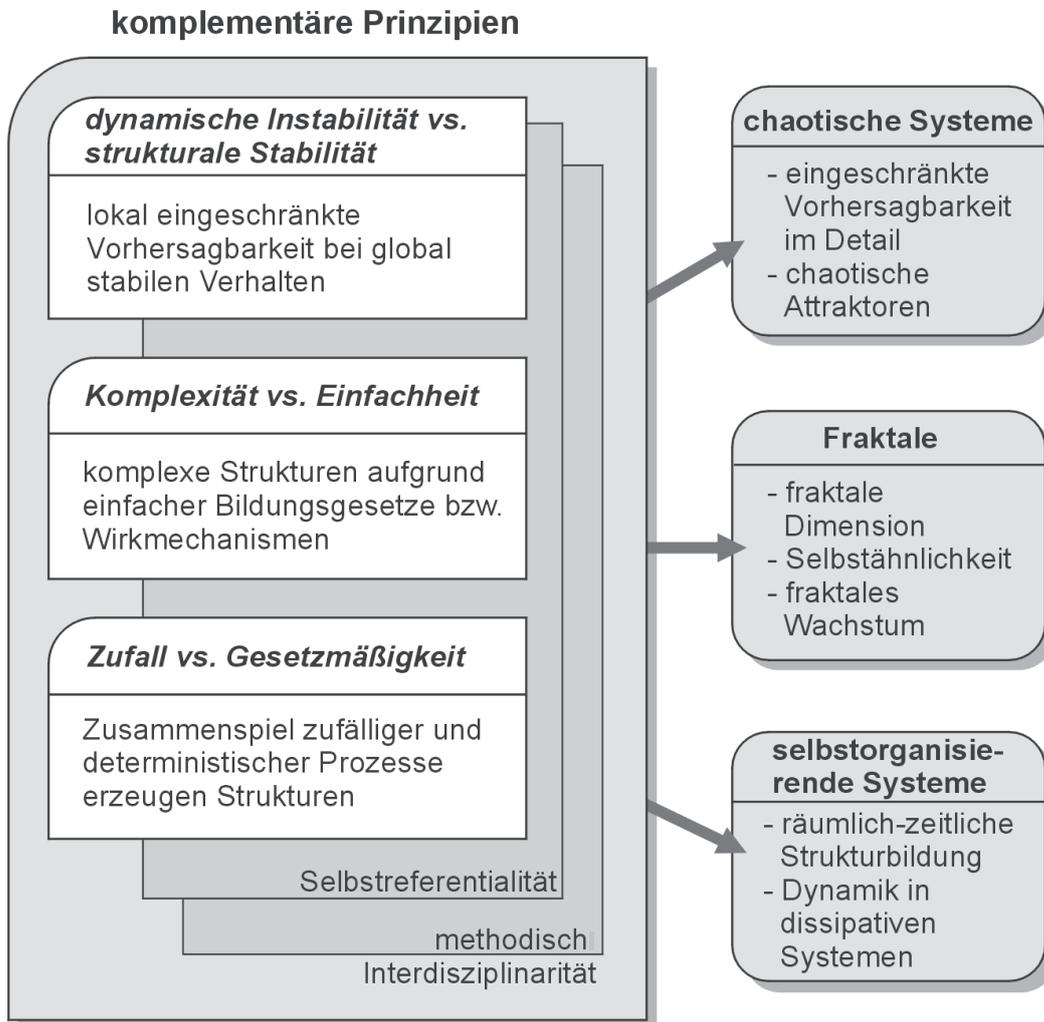


Abb. 5.5 Zentrale Komplementaritäten, die die Beschreibung nichtlinearer, komplexer und strukturbildender Systeme unterstützen

- **Komplementarität von dynamischer Instabilität und struktureller Stabilität.** Wie oben dargestellt, ist eine Reihe komplexer Systeme durch diese Komplementarität gekennzeichnet. Im Detail nicht über lange Zeiträume vorhersagbar, zeigen sich bei diesen Systemen zeitlich oder räumlich-zeitliche Strukturen, die den Ordnungsaspekt verkörpern. Diese Komplementarität kennzeichnet sowohl Systeme aus der unbelebten Natur als auch lebende Systeme.
- **Komplementarität von einfachen Gesetzen oder Regeln und Komplexität.** Nicht immer ist komplexes und dynamisch instabiles Systemverhalten auf komplexe Gesetzmäßigkeiten zurückzuführen. Bei selbstorganisierenden und fraktalen Systemen kann Komplexität auch aufgrund einfacher Gesetze, Wirkmechanismen, Abbildungsregeln entstehen. Die Beschreibbarkeit des Systems vereinfacht sich, Vorhersagen auf globaler Ebene werden möglich. Dies führt auf

eine Erweiterung und Revision des Bildes von Natur (vor allem im Bereich des Mesokosmos) und Naturwissenschaften.

- **Komplementarität von zufälligen und deterministischen Prozessen.** Das Zusammenspiel von Zufall und Gesetzmäßigkeit spielt ebenfalls eine zentrale Rolle beim Verständnis nichtlinearer komplexer Systeme. Strukturbildungen, die z.T. fraktal sind, lassen sich mit Hilfe dieser Komplementarität verstehen. In Kapitel 8 wird diese Komplementarität genauer untersucht.
- **Selbstreferentialität.** Kennzeichen aller Systeme, die chaotische Attraktoren aufweisen oder ihre Ordnungsstrukturen auf andere Weise selbst entwickeln und aufrechterhalten, ist eine gewisse Selbstbezüglichkeit. Diese Selbstreferentialität kann auf verschiedene Weise repräsentiert sein, bei physikalischen Systemen in vielen Fällen durch Rückkopplungen (Selbstverstärkung oder Selbstregulation), in den mathematischen Beschreibungsmodellen durch gekoppelte (nichtlineare) Gleichungen.
- **Interdisziplinarität.** Auf der methodischen Ebene ist das Vorgehen bei der Erforschung nichtlinearer Phänomene durch Interdisziplinarität gekennzeichnet. Dies spiegelt wider, dass es sich bei Selbstorganisation, Chaos etc. um strukturwissenschaftliche Ansätze handelt, bei denen man in unterschiedlichen Phänomenbereichen nach strukturellen Ähnlichkeiten sucht und vereinhheitlich beschreiben möchte. Die Bedeutung von strukturellen Analogien bei der innerwissenschaftlichen Vermittlung ist groß. Im Gegenzug ergeben sich disziplinüberschreitende Anwendungsmöglichkeiten von Erkenntnissen z.B. in der Medizin (z.B. ARNOLD et al., 2000).

### Sachstrukturdiagramm

Im folgenden Sachstrukturdiagramm (Abb. 5.6) sind weite Teile der hier beschriebenen fachlichen Sachstruktur mit ihren zentralen fachlichen Begriffen, Konzepten und Prinzipien in eine *Sachstruktur für den Unterricht* überführt worden. Wie in Kapitel 3 beschrieben, ist die hier dargestellte Sachstruktur als eine *Didaktische Rekonstruktion* zu verstehen, bei der Ziele des Unterrichts (vgl. Kapitel 2), aber auch empirische Ergebnisse zur Vermittelbarkeit (siehe Abschnitt 5.2 sowie Kapitel 6, 7 und 8) eingeflossen sind. Für die Unterrichtserprobungen (Abschnitt 5.2 und Kapitel 7) sind jeweils Teile dieser Sachstruktur herausgeschnitten, in eigenständige Module überführt und erprobt worden.

**Voraussetzungen:**

Kompetenzen in der Analyse von Texten und Videos  
 Physikwissen: Kraft und Bewegung, Magnetfelder, Labilität, Superposition von Kräften, Struktur des Sonnensystems  
 Alltagswissen: 'gleiche Ursache - gleiche Wirkung', Zufallsprozesse

**Berechenbarkeit in der Physik**

- präzise Berechenbarkeit als Erfolg der Physik/Astronomie  
 Beispiele: Berechnung der Neptunposition, exakte Vorhersage von Finsternissen

**Schwierigkeiten der Vorhersage in der Physik**

- eingeschränkte Berechenbarkeit in der Astronomie  
 Beispiele: Stabilität vs. Instabilität des Sonnensystems, Asteroideneinschläge

Auflösung des Widerspruchs: **Widerspruch?**  
 Parameterabhängigkeit der Stabilität/Instabilität

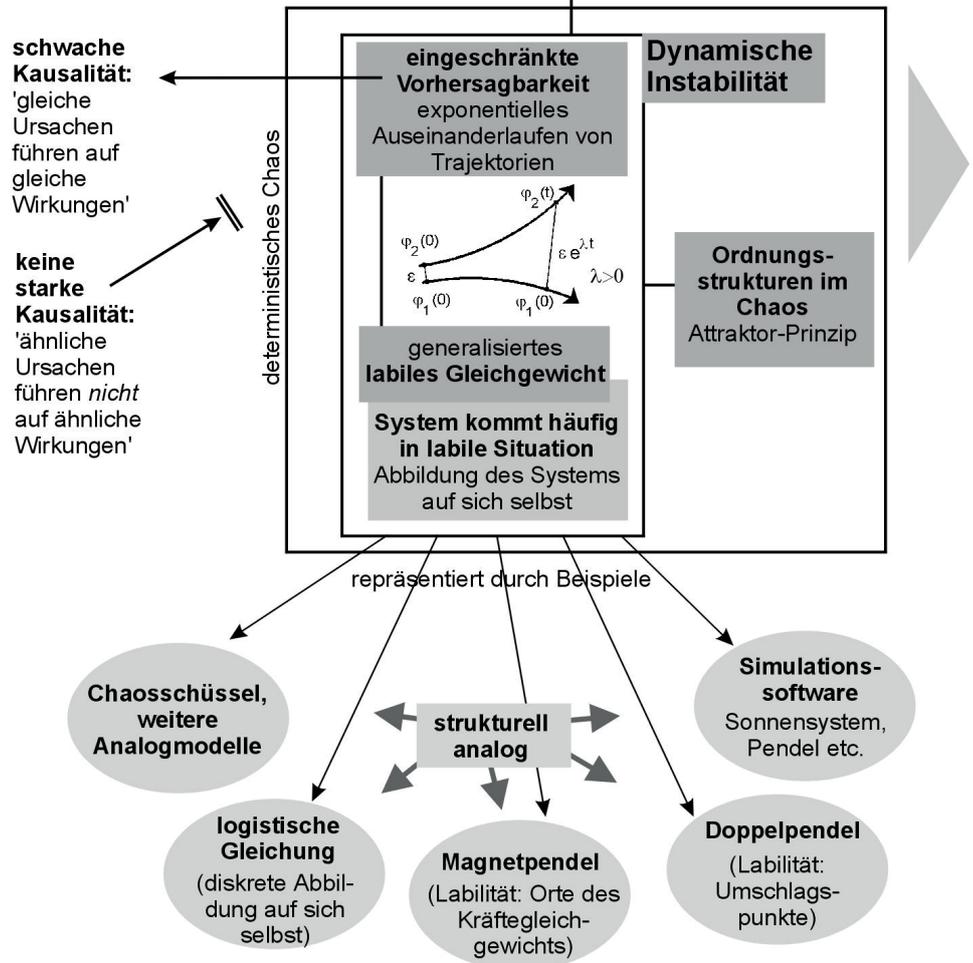
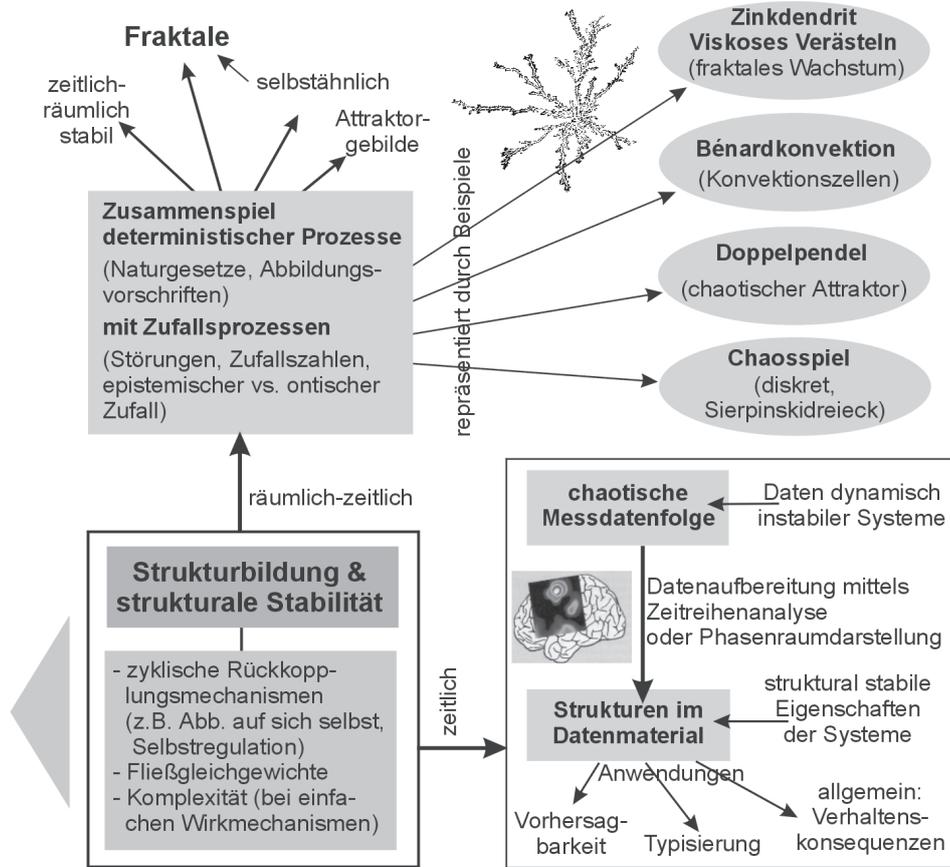
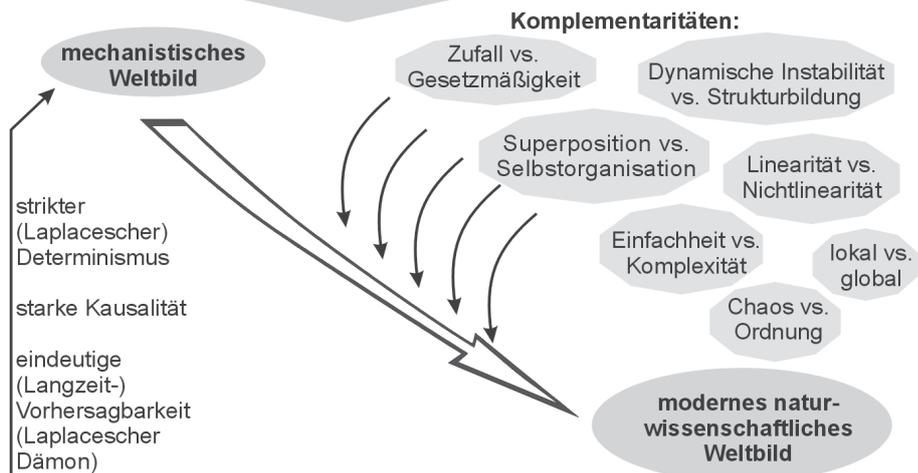


Abb. 5.6 Sachstrukturdiagramm



Diskussion des naturwissenschaftlichen Weltbildes



- Anschluss:**
- epistemologische und philosophische Überlegungen/Recherchen
  - Position des Menschen und seiner Erkenntnisprozesse
  - weitere moderne Themen der Physik: Quanten, Relativität, Materie und Geist, Mikrokosmos vs. Makrokosmos

## 5.2 Empirische Ergebnisse zu Lern- und Unterrichtsprozessen am Ende der Sekundarstufe I

Im achten Kapitel dieser Schrift wird über einen Unterricht für Grundkurse in der Sekundarstufe II berichtet. Eine Basis für dessen Entwicklung sind Ergebnisse, die Unterrichtsstudien zur nicht-linearen Physik in Klasse 10 geliefert haben. Das zentrale Experiment dieser Studien ist das chaotische Magnetpendel (vgl. Abb. 5.8), dessen Verhalten Schülerinnen und Schüler mit Hilfe von Analogmodellen verstehen und generalisieren sollen. Die Experimente und Objekte der Studien führen als Stimuli dazu, dass die Schülerinnen und Schüler über Konzepte wie Kausalität und Determinismus und den Zusammenhang von Gesetzmäßigkeit und Vorhersagbarkeit nachdenken. Über diese Unterrichtsstudien ist an anderer Stelle berichtet worden (vgl. u.a. DUIT, KOMOREK & WILBERS, 1996, 1997a und 1997b; DUIT, KOMOREK, WILBERS & ROTH, 1996 und 1997; DUIT, KOMOREK, WILBERS, ROTH & STADLER, 1997; DUIT, ROTH, KOMOREK & WILBERS, 1998; DUIT, ROTH, KOMOREK & WILBERS, 2001). Hier sollen kurz über die wesentlichen Ergebnisse dieser Studien referiert und mögliche Implikationen für die Sekundarstufe II angesprochen werden.

**Erprobungen, Sachstruktur und Unterrichtsverlauf.** Der Aufbau des Magnetpendels (Abb. 5.8) und die dahinter stehende Physik sind bereits beschrieben worden (vgl. KOMOREK, 1998; DUIT & KOMOREK, 2000; vgl. auch Text im Anhang). Hier sei nur darauf hingewiesen, dass der Aufbau des Magnetpendels von Schülerinnen und Schülern der Klasse 10 gut verstanden wird und dass sein Verhalten auf einer phänomenologischen Ebene von Schülerinnen und Schülern gut erfasst und mit eigenen Worten adäquat beschrieben werden kann (vgl. KOMOREK, 1998; DUIT et al., 1998). Auf der Ebene der physikalischen Mechanismen, auf der Begriffe wie Stabilität und Instabilität angesiedelt sind und die als Erklärungsebene fungiert, bietet das Magnetpendel den Schülerinnen und Schülern einige Herausforderungen. Im Prinzip ist das Magnetpendel ein System, bei dem eine pendelnde Eisenkugel im Einflussbereich mehrerer Magnetfelder in Zonen bzw. Situationen labilen Gleichgewichts gerät, so dass das gesamte System als dynamisch instabil (s.o.) bezeichnet werden kann. Das Magnetpendel dient in der Unterrichtsstudie für Klasse 10 der prototypischen Einführung chaotischer Systeme.

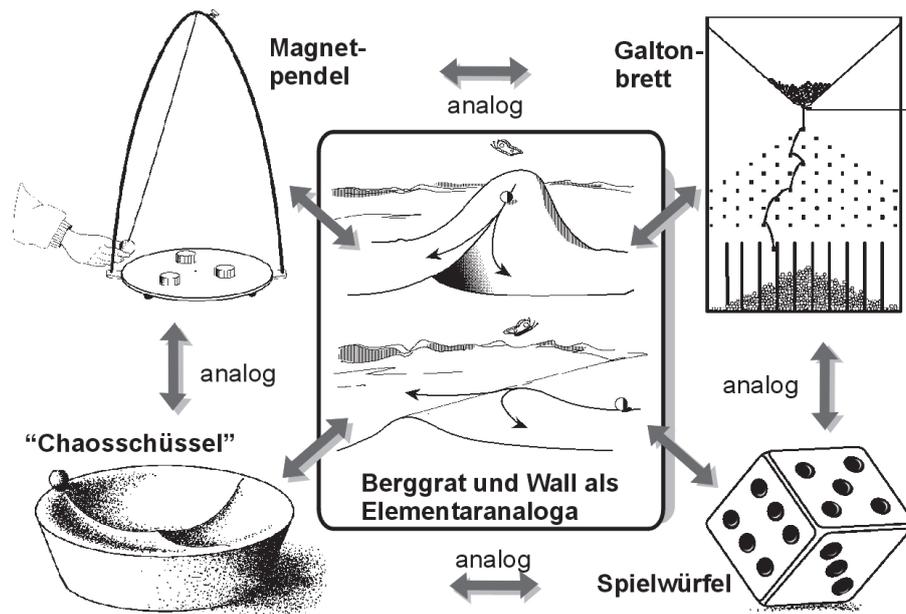
Weitere Objekte, die im Unterricht eingesetzt werden, veranschaulichen dynamische Instabilität auf unterschiedliche Weise, das „Galtonbrett“ z.B. dadurch, dass die Nägel, auf die Kügelchen treffen, Zonen labilen Gleichgewichts darstellen; beim Würfel sorgen die Kanten für Labilität etc. Die verschiedenen Objekte sind auf einer strukturellen Ebene zueinander analog. Im Unterricht geht es darum, dass die Schülerinnen und Schüler diese Analogiebeziehungen entschlüsseln und zur Bildung und Ausschärfung der Begriffe „chaotisches Verhalten“ bzw. „chaotisches System“ nutzen. Außerdem soll das Prinzip „eingeschränkte Vorhersagbarkeit trotz deterministischer Gesetzmäßigkeiten“ vermittelt werden, um die Determinismus-Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler zu entwickeln.

**Erprobungen.** Der Unterricht ist dreimal erprobt worden. Zwei 10. Klassen eines Kieler Gymnasiums haben an der ersten Erprobung teilgenommen. Nach Abschluss des vierstündigen Unterrichts sind 16 Schülerinnen und Schüler interviewt worden, zehn Monate später nochmals sieben von ihnen (Detailergebnisse finden sich in DUIT & KOMOREK, 1997). Bei der zweiten Erprobung - ebenfalls in Kiel - ist das Simulationsprogramm „MagPen“ (THOMAS, 1996; THOMAS et al., 1996, 1997) integriert und die Einheit auf acht Unterrichtsstunden ausgedehnt worden. Auf theoretischer Ebene sind Ansätze zum Lernen als Konzeptwechsel (Kieler Gruppe) mit sozial-konstruktivistischen Sichtweisen (Roth) (s. DUIT, ROTH, KOMOREK & WILBERS, 1998) verbunden worden. Es ist untersucht worden, wie die Schülerinnen und Schüler mit ihrer sozialen wie materialen Lernumgebung wechselwirken. In einer dritten Erprobung in Wien hat die Entwicklung von

Kausalitäts- und Determinismusvorstellungen im Vordergrund gestanden (fünf Unterrichtsstunden) (DUI, KOMOREK, WILBERS, ROTH & STADLER, 1998). Das Sachstrukturdiagramm (Abb. 5.7) bezieht sich auf die dritte Erprobung und stellt einen Ausschnitt aus dem Diagramm 5.6 dar.

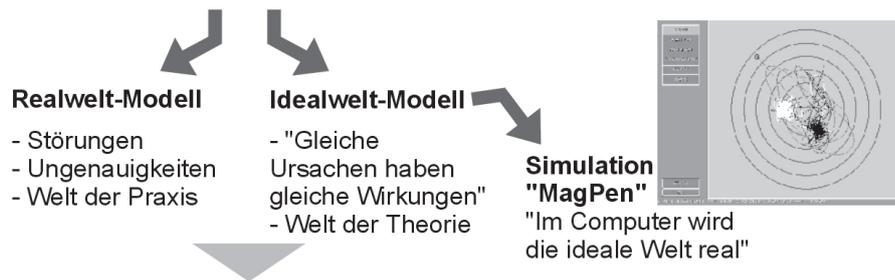
**Unterrichtsverlauf.** Der Unterricht ist methodisch dadurch gekennzeichnet, dass den Schülerinnen und Schülern viel Gelegenheit gegeben wird, das Verhalten der chaotischen Systeme selbstständig in Gruppen aufzuklären. Dies folgt der konstruktivistischen Überzeugung, dass nur jenes

**Voraussetzungen:** Physikwissen: Kraft und Bewegung, Magnetfelder, Labilität  
Alltagswissen: 'gleiche Ursache - gleiche Wirkung'



**Prinzip: Eingeschränkte Vorhersagbarkeit trotz Determiniertheit**

- Verhalten des Systems nur für kurze Zeit vorhersagbar
- kleine Variationen des Starts und kleine Störungen wirken sich drastisch aus
- sensitive Zonen labilen Gleichgewichts werden wiederholt durchlaufen



**Generalisierung und Begriffsbildung:**  
- chaotisches Verhalten, chaotisches System

**Anschluss:** weitere chaotische Systeme, aktuelle Forschung, Anwendungen, philosophische Implikationen, Entwicklung des Weltbildes

„wirklich“ verstanden wird, was sich Lernende in eigener, aktiver Auseinandersetzung erarbeiten. Die Gruppen haben aus vier bis fünf Schülerinnen und Schülern bestanden. Die Lehrkraft lenkt durch eine Reihe von Hilfen wie das Eingeben von Arbeits- und Informationsblätter. Die Unterrichtseinheit gliedert sich in fünf Abschnitte zu je einer Unterrichtsstunde (vgl. DUIT & KOMOREK, 2000).

**(1) Beobachtung und Beschreibung des Pendelverhaltens.** Das Pendel wird der Klasse vorgestellt. Vorhersagen des Verhaltens werden diskutiert und mit der tatsächlichen Pendelbewegung verglichen. Die Frage der Reproduzierbarkeit wird thematisiert. Schülerinnen und Schüler erforschen anschließend in Gruppen, inwieweit Regelmäßigkeit bzgl. der Magneten, über denen das Pendel schließlich stehen bleibt, gegeben ist.

**(2) Untersuchung der Kräfte, die auf die Pendelkugel wirken.** Einflüsse, die auf die Pendelkugel wirken, werden diskutiert. Einflüsse, die bei verschiedenen Pendelvorgängen gleich bleiben, werden von sich ändernden Einflüssen unterschieden. Die Gruppen untersuchen Stärke und Richtung der Kräfte an verschiedenen Stellen des Magnetpendelaufbaus. Eine kleine Eisenkugel an einem Faden wirkt als „Detektor“; Ergebnisse werden auf einer Folie eingetragen. Es zeigen sich Bereiche gleicher Kraft nach links und rechts zu zwei Magneten hin. Ergebnisse werden durch ein Eisenfeilspanbild ergänzt.

**(3) Deutung des chaotischen Verhaltens.** Die Gruppen suchen nach Erklärungen für das chaotische Verhalten des Pendels auf der Basis des entwickelten Wissens über die Struktur von Magnet- und Gravitationsfeld. Die Chaosschüssel wird in die Gruppenarbeit als Hilfe dafür gegeben, das Verhalten des Magnetpendels zu verstehen. Bei der Chaosschüssel sind die Potentialverhältnisse in Höhen und Tiefen übersetzt und damit „begreifbar“. Elementaranalogien (Berggrat und Wall) werden als Bilder vorgelegt. Die Bedeutungen (vor allem kleiner) Störungen und Ungenauigkeiten am Start werden untersucht.

**(4) „MagPen“ stellt idealisierte Welt dar.** Das Verhalten des Pendels in einer „idealen“ Welt ohne Störungen und ohne Ungenauigkeiten bei der Startwiederholung wird mit Hilfe des Simulationsprogramms MagPen untersucht. Mehrere Bahnen können übereinander gezeichnet, Startpunkte können in kleinen Schritten variiert und Störungen können definiert eingegeben werden. Je zwei Schülerinnen und Schüler arbeiten an einem PC. Hypothesen über das Verhalten in der idealen Welt werden entwickelt und untersucht. Vergleiche mit dem realen Magnetpendel werden gezogen.

**(5) Begriffliche Entwicklungen „Chaotisches System“ und „Prinzip der eingeschränkten Vorhersagbarkeit“.** Die gemeinsamen relevanten Struktureigenschaften der behandelten Beispiele werden herausgearbeitet. Hier geht es um die Verallgemeinerung des bisher Erkannten, so dass die Begriffe „chaoti-

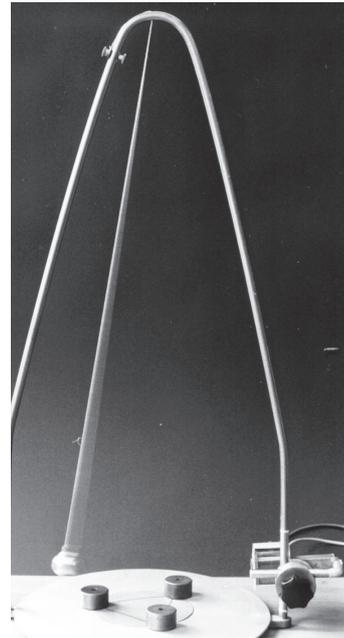
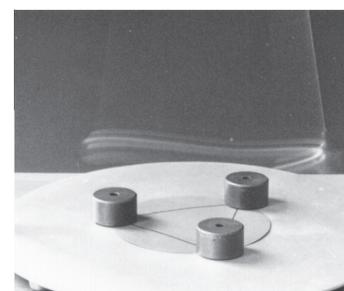
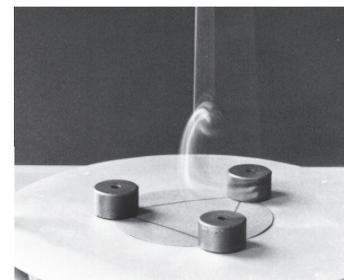
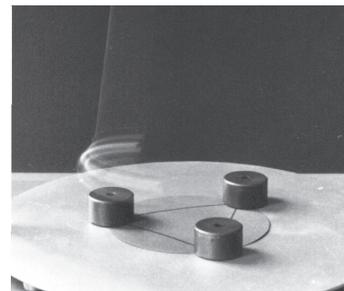


Abb. 5.8 Magnetpendel



ches Verhalten“ bzw. „Chaotisches System“ entwickelt und etabliert werden können. In Gruppen suchen die Schülerinnen und Schüler nach weiteren Beispielen für chaotische Systeme aus dem Alltag oder den Naturwissenschaften bzw. konstruieren eigene Beispiele. Die Beispiele der Gruppen werden im Plenum diskutiert. Das Prinzip, dass Vorhersagbarkeit trotz deterministischer Gesetzmäßigkeiten eingeschränkt sein kann, und seine Konsequenzen werden diskutiert.

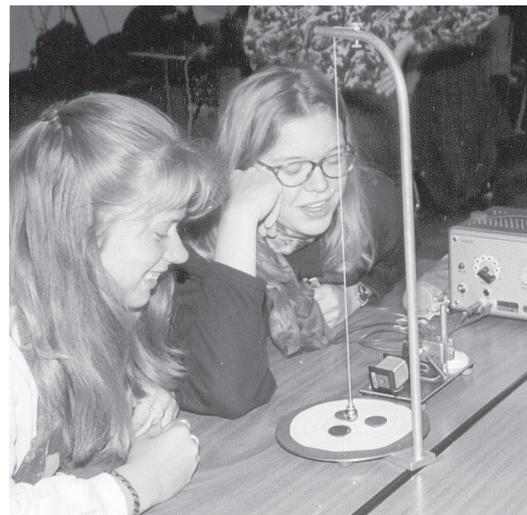
Diese Beispiele können aus Feldern stammen wie „weitere chaotische Systeme“ (z.B., Planetensystem, chaotischer Schwingkreis), „aktuelle Forschungsprojekte zu chaotischen Systemen“ (z.B. Steuerung chaotischer Systeme) (vgl. HAAG, 1996), „Anwendungen von Erkenntnissen der Chaosforschung für Naturwissenschaft, Technik und Alltag“ (z.B. in der Medizin) oder „philosophische und wissenschaftstheoretische Fragen“ (z.B. Entwicklungen im naturwissenschaftlichen Weltbild).

## Ergebnisse

### Zur Struktur der Unterrichtseinheit

Die meisten Schülerinnen und Schüler der drei Erprobungen haben verstanden, dass Systeme, die man wissenschaftlich als chaotisch bezeichnet, zwar deterministischen Gesetzen gehorchen, aber nur eingeschränkt vorhersagbar sind, und dass Labilitäten der Systeme dafür verantwortlich sind (vgl. DUIT & KOMOREK, 1997; DUIT, ROTH KOMOREK & WILBERS, 1998). Das Unterrichtskonzept ist damit offenbar geeignet, Schülerinnen und Schülern der Klasse 10 wichtige Einsichten in das Verhalten chaotischer Systeme zu vermitteln. Das beobachtete Engagement vieler Schülerinnen und Schüler in der Gruppenarbeit ist einerseits auf ein Interesse am Thema zurückzuführen, andererseits auf die Möglichkeit, sich in Gruppen aktiv am nicht zu eng geführten Unterrichtsgeschehen beteiligen zu können. Bemerkenswert viele Mädchen sind - wie ihre Lehrpersonen feststellen - aktiver als sie es sonst im Unterricht sind. Hier kommen also Interesse und die Möglichkeit, sich in der Gruppe zu entfalten, zusammen. Dieser Effekt wird auch im Grundkursunterricht (vgl. Kap. 7) genutzt.

Unterrichtsvideodaten und Interviews zeigen allerdings, dass die Schülerinnen und Schüler auch am Ende des Unterrichts Schwierigkeiten haben, die Mikroprozesse im Bereich der labilen Gleichgewichte darzustellen. Dies ist selbst dann der Fall, wenn sie diese als ursächlich für die Sensitivität der betrachteten Systeme erkennen. Oft wird bei der Erklärung von Detailprozessen eher auf Alltagswissen zurückgegriffen als auf Wissen aus vorangegangenem Unterricht über Kräfte und deren Überlagerung, über Magnetismus und Naturgesetze allgemein. Wie sich kleine Ungenauigkeiten beim Start der untersuchten Prozesse oder Störungen im Detail auswirken, haben deshalb nur wenige Schülerinnen und Schüler in der intendierten Weise verstanden. Hinzu kommt, dass eine Reihe von Schülerinnen und Schülern davon ausgeht, dass nur die Störungen relevant sind, die in der labilen Situation wirken. Dass die „Geschichte“ des Systems eine Bedeutung für sein Verhalten hat, dass sich mithin frühere Störungen zum aktuellen Zeitpunkt auswirken können, wird von diesen Schülerinnen und Schülern nicht verstanden. Für zukünftigen Unterricht sollten daher Grundlagen der Mechanik (bzw. des betreffenden Phänomenbereichs), Fragen nach Labilität



## 5. Sachstruktur für den Unterricht und empirische Ergebnisse aus Unterrichtserprobungen in Klasse 10

und Stabilität sowie nach der Superposition von Kräften oder anderen Einflüssen in das Unterrichtskonzept integriert werden, um die kontrastive Sicht der nichtlinearen Physik verständlich zu machen. Um das hier angesprochene Problem zu illustrieren, sei die Ansicht einiger Schülerinnen und Schüler angeführt. Für sie endet das Kraftfeld des einen Magneten dort, wo das des Nachbarmagneten beginnt - und zwar in der Weise, dass eine kraftfreie Zone in der Mitte zwischen zwei Magneten entsteht (vgl. DUIT & KOMOREK, 2000).

Insgesamt zeigen die Daten aber, dass das Unterrichtskonzept tragfähig ist, um einen ersten Zugang zur nichtlinearen Physik in Klasse 10 zu erreichen. Der Begriff des chaotischen Systems stützt sich hier allerdings nur auf den Aspekt der dynamischen Instabilität. Es bleibt daher eine offene Frage, ob auch Aspekte der zeitlichen oder räumlich-zeitlichen Strukturbildung so in Klasse 10 thematisierbar sind, so dass ein Chaos-Begriff vermittelt werden kann, der mit der nichtlinearen Physik kompatibel ist. In der gymnasialen Oberstufe kann bei einem eingeschränkten Chaos-Begriff nicht stehen geblieben werden. Vielmehr soll die Komplementarität von dynamischer Instabilität und Strukturbildung behandelt werden.

### Der Wert von Analogien und die Entwicklung einer „strukturellen Sicht“

Analogien spielen in den Unterrichtsstudien des Kieler Projekts eine wichtige Rolle (siehe Sachstrukturdiagramm, Abb. 5.7). Das liegt daran, dass sich die Chaostheorie mit strukturell ähnlichen Systemen aus phänomenologisch unterschiedlichen



Bereichen befasst und nach einheitlichen Beschreibungen sucht. Und weil diesem strukturwissenschaftlichen Ansatz analoge Beziehungen inhärent sind, sind Analogiebeziehungen zwischen verschiedenen Objekten explizit eingesetzt worden, um Lernprozesse zu fördern und auch um Schülerinnen und Schüler anzuregen, mentale Analogien zu bilden. Die Daten zeigen, dass Analogien für Schülerinnen und Schüler eine Schlüsselrolle beim Verstehen der Sensitivität der betrachteten Systeme und der daraus folgenden eingeschränkten Vorhersagbarkeit spielen.

In den Erprobungen ist deutlich geworden, dass die Nutzung von Analogien (und Analogmodellen wie der Chaossschüssel) ein komplexer Prozess ist. Er beansprucht mehr Zeit als erwartet und kann Schülerinnen und Schüler in die Irre führen. In vielen Fällen werden Analogmodelle (hier z.B.: Berg, Wall, Chaossschüssel) nicht spontan verstanden. Beispielsweise interpretieren einige Schülerinnen und Schüler den Schmetterling in der Berggratanalogie (vgl. Abb. 5.7) nicht als Symbol für kleine Störungen, sondern als Windanzeiger oder als Dekoration (DUIT & KOMOREK, 2000). Anhand derartiger Beispiele wird deutlich, dass Schülerinnen und Schüler den Experimenten, Modellen und Erklärungen, die in didaktischer Absicht als Hilfen vorgelegt werden, ihren eigenen Sinn geben. Dies ist aus konstruktivistischer Sicht begreifbar, denn Schülerinnen und Schüler verfügen über andere Interpretationsrahmen als ihre Lehrpersonen. Die Konsequenz ist - und dies kann mittels der Unterrichtsstudien belegt werden - dass Analogmodelle nicht unmittelbar genutzt werden können, sondern zunächst entschlüsselt werden müssen. Die Entschlüsselung des vermeintlich Bekannten (z.B. der Berggratanalogie) und die Verstehensprozesse bzgl. des Unbekannten (z.B. des Magnetpendel) gehen Hand in Hand. Die Verknüpfung beider Prozesse ist durch einen häufigen, sukzessiven Perspektivwechsel gekennzeichnet. Das Basisanalogon (Berggrat)

wird im Lichte des Zielanalogons (Pendel) interpretiert und umgekehrt (vgl. WILBERS, 1999). Basis- und Zielbereich einer Analogierelation müssen daher symmetrisch betrachtet werden (vgl. dazu DUIT, ROTH, KOMOREK & WILBERS, 1998; 2001; WILBERS & DUIT, 1997).

Der Einsatz von Analogmodellen hat trotz dieser Probleme zu positiven Effekten geführt. Ein Großteil der Schülerinnen und Schüler ist in der Lage, strukturelle Eigenschaften der betrachteten chaotischen Systeme zu erkennen und einen „strukturellen Blick“ zu entwickeln. Damit ist es ihnen gelungen, vom einzelnen (konkreten) chaotischen System zu abstrahieren und die relevanten Struktureigenschaften zu generalisieren. Diese Abstraktionsleistung ermöglicht es ihnen, weitere Systeme zu analysieren und sie ggf. als chaotische Systeme zu klassifizieren (zum strukturellen Denken vgl. KOMOREK, 1998 und BELL, 2003). Während des Unterrichts hat sich z.B. eine rege Diskussion zwischen Schülerinnen und Schülern über die strukturellen Ähnlichkeiten von Lottomaschine und Magnetpendel entwickelt und darüber, ob ein Stehaufmännchen oder das Wetter die Bedingungen für chaotisches Verhalten erfüllen. Die Analogmodelle haben sich außerdem bei der Rekonstruktion des Erlernten in Nachinterviews als wirkungsvolle Stimuli erwiesen. Die befragten Schülerinnen und Schüler haben mit ihrer Hilfe die zentralen Gedanken des Unterrichts weitgehend rekonstruieren können (vgl. DUIT, KOMOREK & WILBERS, 1997).

#### **Zur Entwicklung von Determinismusvorstellungen und zur Veränderung des Physikbildes**

Mit Hilfe des Unterrichtskonzepts können Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler auf der Ebene allgemeiner naturwissenschaftlicher Konzepte wie „Vorhersagbarkeit“ und „Determinismus“ verändert werden. Die Analysen von Konzeptwechselprozessen kommen allerdings zu dem Ergebnis, dass kein großräumiger Austausch von Konzepten stattgefunden hat, was die Vorstellungen von Gesetzmäßigkeiten in Natur und Physik angeht (vgl. DUIT, KOMOREK, WILBERS, ROTH & STADLER, 1998). Man findet allerdings bei den meisten der interviewten Schülerinnen und Schüler Ausdifferenzierungen ihrer Sicht vom Zusammenhang zwischen Gesetzmäßigkeit und Vorhersagbarkeit. Bei einer Reihe von Schülerinnen und Schülern ist sogar ein Umdenken beobachtet worden, was ihre Vorstellungen von deterministischen Prozessen angeht. Schülerinnen und Schüler nehmen diese Veränderungen teilweise bewusst wahr und führen sie auf den Unterricht zurück. Auf die Frage, was er über Physik gelernt habe, antwortet ein 16-jähriger Schüler: *Letztlich habe ich gelernt, dass man in der Physik nicht alles berechnen kann, nicht alles vorhersagen kann... also das gehört jetzt zu meiner Auffassung vom Leben, das stellt auch ,ne GrundsatzEinstellung dar.*

Im Unterricht wird die Berechenbarkeit in der Physik oft überbetont; durch den Gedanken der „eingeschränkten Vorhersagbarkeit trotz deterministischer Gesetze“ wird diese Sicht in der Unter-

**Entschlüsselung von Analogien.** In dieser Studie (WILBERS, 1999; vgl. auch WILBERS & DUIT, 1997; ROTH, KOMOREK & WILBERS, 1998; 2001) ist die Mikrostruktur der Analogienutzung im Rahmen eines Teaching Experiment (vgl. Kap. 6) untersucht worden. Inwieweit können vorgelegte Analogmodelle Schülerinnen und Schülern helfen, dynamisch instabile chaotische Systeme zu verstehen und zu erklären? Die Studie zeigt, dass dies dann der Fall ist, wenn das Basisanalogon (z.B. die Kugel, die einen Berggrat herunter läuft) im assoziativen Umfeld des Zielanalogons (z.B. dem erklärungsbedürftigen Magnetpendel) liegt. Ansonsten findet keine Analogienutzung statt, selbst wenn das Basisanalogon vertraut ist. Basisbereich und Zielbereich einer Analogierelation müssen zudem symmetrischer gesehen werden als bisher. Denn Schülerinnen und Schüler sehen den Basisbereich im Lichte des Zielbereichs neu, so dass die Entschlüsselung beider Bereiche sukzessiv erfolgt. Die Ergebnisse widersprechen teilweise den akzeptierten Theorien der Kognitionspsychologie vom Lernen durch „analogisches“ Denken und tragen zur Theorieentwicklung in diesem Feld bei.

## 5. Sachstruktur für den Unterricht und empirische Ergebnisse aus Unterrichtserprobungen in Klasse 10

richtsstudie relativiert. Die Anregung, sich mit diesen Fragen auseinander zu setzen, gibt nicht zuletzt das Simulationsprogramm MagPen, das zwischen einer idealen Welt ohne störende Einflüsse und einer realen Welt der Störungen und Ungenauigkeiten unterscheiden lässt. Schülerinnen und Schüler bringen dieses „Zwei-Welt-Modell“ bereits in den Unterricht mit. Das Unterrichtskonzept erlaubt es ihnen, ihre Vorstellungen von Gesetzmäßigkeit und zufälligen Prozessen auszu-schärfen und zu artikulieren (vgl. Kap. 8.2). Insgesamt ist eine Entwicklung von naiven Determinismusvorstellungen hin zu aufgeklärten kritisch-deterministischen Vorstellungen zu erkennen (vgl. KOMOREK, DUIT & STADLER, 2004). Überzeugte „Laplacesche“ Deterministen (vgl. Typisierung in KOMOREK, 1998, S. 251) lassen sich durch den Unterricht aber nicht von ihrer Sichtweise abbringen. Eine bereits bestehende kritische Sichtweise wird dagegen durch die Erkenntnisse des Unterrichts „angereichert“. In zukünftigen Unterrichtserprobungen muss insgesamt darauf geachtet werden, dass Schülerinnen und Schüler nicht in die entgegengesetzte Richtung (verglichen mit üblichem Physikunterricht) übergeneralisieren, d.h. von einer allgemeinen Underterminiertheit ausgehen und so Errungenschaften des allgemeinen Determinismus-Konzepts außer Acht lassen.

### **Fazit**

Das Unterrichtskonzept für Klasse 10 basiert auf einem Ausschnitt der rekonstruierten Sachstruktur zum Thema nichtlineare, strukturbildende Systeme. Im Zentrum des Unterrichtskonzepts steht der Aspekt der dynamischen Instabilität; als Paradigma wird das chaotische Magnetpendel eingesetzt. Es fasziniert Schülerinnen und Schüler und bindet ihre Aufmerksamkeit. Da es vom Aufbau her einfach zu verstehen ist, überrascht es, dass es zu komplexem Verhalten in der Lage ist. Das Pendel erweist sich als Stimulus, mit Schülerinnen und Schülern dieses Jahrgangs nicht nur über chaotische Prozesse zu sprechen, sondern auch allgemeine physikalische Prinzipien zu hinterfragen. Die Frage der Kopplung von Gesetzmäßigkeit und Vorhersagbarkeit gehört dazu. Analogien helfen, die physikalischen Prozesse zu verstehen und strukturelle Gemeinsamkeiten verschiedener chaotischer Beispielsysteme heraus zu arbeiten. Analogien erweisen sich aber auch als zweischneidig, weil sie immer erst entschlüsselt werden müssen. Dies kann allerdings in einer nicht intendierten Weise geschehen. Insgesamt gelingt es Schülerinnen und Schülern in diesem Unterrichtsgang, ihre Determinismusvorstellungen zu differenzieren und in der Folge ihr Bild von der Wissenschaft Physik zu erweitern.

## 6. Fraktale als Zugang zur geordneten Unordnung

Die Didaktische Rekonstruktion des Fraktalkonzepts stellt einen wichtigen Baustein bei der Erschließung moderner naturwissenschaftlicher Themen dar. Fraktale bilden einen Zugang zu Strukturbildungen in der belebten und unbelebten Natur; durch Fraktale wird die Komplementarität von Einfachheit und Komplexität erfahrbar; Bilder von Fraktalen faszinieren Schülerinnen und Schüler und wecken ihr Interesse; dies sind Bedingungen, unter denen ein Unterricht zum Thema als lohnenswert erscheint (vgl. KOMOREK et al., 2004a). Nicht nur in der Physik, sondern auch in der modernen Biologie gibt es Bemühungen, moderne Themen der Naturwissenschaften didaktisch zu rekonstruieren, u. a. um zu klären, welche Bedeutung der Fraktalbereich für das Verständnis von Organismen hat (KATTMANN, 1998). In diesem Kapitel werden Grundideen des Fraktalkonzepts vorgestellt, die Analyse ihres Bildungswertes skizziert und über Beispiele für empirische Studien zum Erlernen des Fraktalkonzepts berichtet.

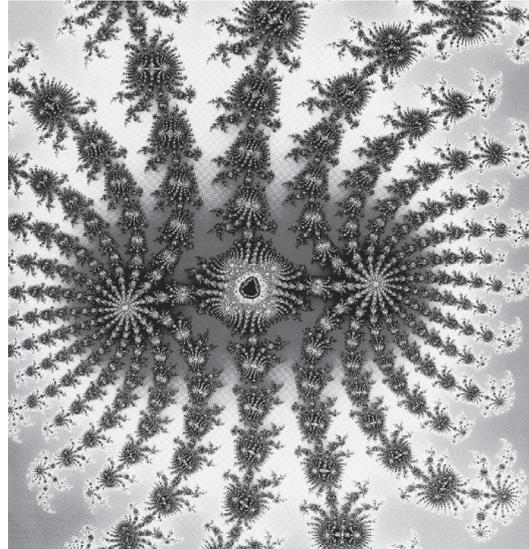


Abb. 6.1 Computergeneriertes Fraktal

Es sei hier daran erinnert, dass im Modell der Didaktischen Rekonstruktion (vgl. KATTMANN, DUIT, GROENGIESSER & KOMOREK, 1997) die drei Komponenten *Analyse der Sachstruktur* (1), *empirische Untersuchungen* zum Lernen und zum Lehren (2) und die *Konstruktion von Unterricht* (3) eng miteinander verzahnt sind. Die Komponente (1) umfasst neben einer fachlichen Klärung auch die didaktische Analyse des betreffenden Inhalts und seine Elementarisierung. Im Projekt ist das Modell der Didaktischen Rekonstruktion auf den Bereich der Fraktale angewendet worden. Bei der ersten Annäherung an das Fraktalkonzept ist deutlich geworden, dass ein Klärungsbedarf bezüglich der Frage besteht, wie die begriffliche Struktur des Konzepts darzustellen ist. In einer fachlichen Analyse ist untersucht worden (KATTSCHER, 1995; KATTSCHER et al., 1996), ob das Fraktalkonzept, wie es in der führenden Fachliteratur thematisiert wird, kohärent ist, d.h. ob die Darstellungen verschiedener Autoren übereinstimmen.

Diese Klärungen sind die Grundlage für empirische Studien dazu, inwieweit Schülerinnen und Schüler wichtige Aspekte der Fraktale verstehen können. Dazu gehören die Selbstähnlichkeit bzw. die Skaleninvarianz geometrischer Gebilde, der Zusammenhang von einfachen Konstruktionsvorschriften und komplexen Strukturen bei „mathematischen“ Fraktalen (NAUJACK, 1997, vgl. Abb. 6.1) sowie Wachstumsprozesse, die mit dem Konzept des Fraktals gefasst werden sollen (BÜCKER, 1998). Auch die Frage, inwieweit Schülerinnen und Schüler das Modell des Fraktals zur Beschreibung natürlicher Strukturen nutzen können, ist untersucht worden (s. KOMOREK et al., 1999, 2001). Die Untersuchungen von Vorstellungen und Lernprozessen wirken auf den Prozess der

fachlichen Klärung insofern zurück, als die genaue Kenntnis der Schülerperspektiven es erlaubt, die fachliche Sachstruktur aus einer zusätzlichen Perspektive zu sehen (vgl. Kap. 2).

### 6.1 Das Fraktal als Beispiel für die Entwicklung naturwissenschaftlicher Modelle

**Fachliche Klärung und didaktische Analyse des Fraktalkonzepts.** Erste Ansätze einer fachlichen Klärung des Fraktalkonzepts sind im Sammelband von KOMOREK, DUIT & SCHNEGELBERGER (1998) dargestellt; die zentralen Fragen einer solchen Klärung sind:

- Welche fachwissenschaftlichen Aussagen liegen zum Fraktalkonzept vor, und wo zeigen sich deren Grenzen?
- Welche Genese, Funktion und Bedeutung haben die Fachbegriffe, die das Fraktalkonzept umreißen, und in welchem Kontext stehen sie?
- Welche wissenschaftlichen und epistemologischen Positionen sind bei Darstellungen des Fraktalkonzepts erkennbar?
- Wo sind beim Fraktalkonzept Grenzüberschreitungen sichtbar, bei denen bereichsspezifische Erkenntnisse auf andere Gebiete übertragen werden?
- Welche ethischen und gesellschaftlichen Implikationen sind mit dem wissenschaftlichen Fraktalkonzept verbunden?
- Welche Bereiche sind von einer Anwendung der Kenntnisse betroffen?

Sind diese Fragen vorläufig geklärt, so wird zu einer ersten *didaktischen Analyse* übergegangen. Dabei wird versucht, die elementaren Grundideen auf der Basis ihres Bildungswertes und auf Grundlage allgemein anerkannter Ziele zu identifizieren. Im Rahmen der Theorien zur nichtlinearen Dynamik in der belebten und unbelebten Natur spielt das Fraktalkonzept eine wichtige Rolle. Ansätze, mit denen Prozesse der Strukturbildung und der Selbstorganisation sowie chaotische Szenarien beschreibbar werden, haben sich in den letzten Jahren stürmisch entwickelt, weil sie faszinierende neue Einblicke in das Naturgeschehen erlauben (MANDELBROT, 1991; BUNDE & HAVLIN, 1994; BUNDE & ROMAN, 1996; PEITGEN, JÜRGENS & SAUPE, 1994) und weil - ganz pragmatisch gesehen - jetzt die Leistung von Großrechnern ausreicht, um numerische Modelle von komplexen Systemen durchzurechnen. Die neuen Sichtweisen, die von den Theorien zur nichtlinearen Dynamik bereitgestellt werden, beeinflussen das naturwissenschaftliche Weltbild tiefgreifend (KANITSCHIEDER, 1994).

Nichtlineare Dynamik ist gekennzeichnet durch die Komplementarität von Ordnung und Unordnung. Zum einen zeigt es sich, wie das erratisch erscheinende Verhalten eines Systems (z.B. eines chaotischen Systems) auf eine verborgene Ordnung zurückgeführt werden kann, zum anderen wird klar, dass sich aus wenigen einfachen Regeln, die iterativ sehr häufig angewendet werden,

eine faszinierende Komplexität ergeben kann. Fraktale sind einer breiten Öffentlichkeit nicht zuletzt durch die Schönheit der publizierten Fraktalbilder (PEITGEN & RICHTER, 1986) bekannt geworden (vgl. Abb. 6.1). Das Reizvolle an diesen Bildern scheint ihre seltsame Mischung aus Regelmäßigkeit und Komplexität zu sein.

Fraktale sind zunächst einmal geometrische Gebilde, die „in allen Größenbereichen denselben Grad an Irregularität und/oder Zersplitterung“ aufweisen (MANDELBROT, 1991). Fraktale Gebilde lassen sich mit den üblichen Dimensionsbegriffen nicht fassen. NORDMEIER (1998) kennzeichnet diesen Aspekt wie folgt (nach VICSEK, 1992): „Man nennt ein physikalisches Objekt fraktal, wenn das Messen seines Volumens, seiner Oberfläche oder seiner Länge es nicht ermöglicht, ein gut konvergierendes Maß für diese Größe zu erhalten“. Anders ausgedrückt, lassen sich fraktale Gebilde nicht mit den gewohnten ganzzahligen Dimensionsexponenten beschreiben, sondern nur mit gebrochenen Exponenten.

**Selbstähnlichkeit und Feinstruktur.** Durch die fortlaufende Anwendung bestimmter Abbildungsregeln entstehen mathematische Fraktale. Ein Standardbeispiel in der Literatur ist die Koch-Kurve (vgl. Abb. 6.2). Sie entsteht dadurch, dass eine Ausgangsstrecke in drei gleiche Teile geteilt wird; die mittlere Strecke wird herausgenommen und durch zwei gleichlange Strecken ersetzt. Beim nächsten Schritt wird mit jeder der nunmehr vier Strecken verfahren wie im ersten Schritt. Bei unendlich häufiger Anwendung dieser Ersetzungsregel, und erst dann, erhält man ein Fraktal, das Koch-Kurve genannt wird und merkwürdige Eigenschaften hat: Die Koch-Kurve hat eine unendliche Länge. Wenn man in sie hineinzoomt, ergeben sich bei jedem Zoomschritt immer wieder die gleichen Bilder, man sagt, die Koch-Kurve sei *selbstähnlich*. *Selbstähnlichkeit* ist eine Art Symmetrie; so wie runde Körper invariant unter Drehungen sind, sind Fraktale (zumindest statistisch) invariant unter Maßstabsveränderungen.

Fraktale Strukturen findet man auch bei natürlichen Gebilden, wie z.B. bei Wolken, Bäumen oder geologischen Formationen, deren Ränder „fraktal“ sind; besser gesagt, findet man verästelte Strukturen, die sich mehr oder weniger gut mit dem Konzept des Fraktals beschreiben lassen (MANDELBROT, 1991). Eine interessante Untergruppe von Fraktalen sind dendritische, d.h. baumartig verzweigte Strukturen, die sich z.B. bei ausgetrockneten Flusssystemen, bei Entladungsercheinungen und nicht zuletzt in der Biologie überall dort zeigen, wo es darauf ankommt, auf möglichst kleinem Raum eine möglichst große Oberfläche für den Stoffaustausch zur Verfügung zu haben. Beispiele sind Lunge oder Niere. Die Verästelung steht für eine weitere Eigenschaft von Fraktalen, für die *Feinstruktur* (vgl. KATSCHER et al., 1996). Man sagt, ein Gebilde besitzt *Feinstruktur*, wenn es Teile enthält, die sich bei beliebiger Vergrößerung an keiner Stelle durch glatte Objekte annähern lassen, sondern in jeder Vergrößerung „Rauhigkeiten“ aufweisen.

Bei mathematisch erzeugten Fraktalen findet man Selbstähnlichkeit und Feinstruktur über unendlich viele Größenordnungen und die einfachen Bildungsgesetze führen bei häufiger Anwendung zu komplexen Strukturen. Bei einem Baum oder einem Blumenkohl dagegen erkennt man Selbstähnlichkeit (vgl. Abb. 6.3) und Feinstruktur nur über vier bis sieben Verzweigungsstufen, ihre Bildungsgesetze sind weitaus komplizierter und teilweise unbekannt oder lassen sich auf Prozesse der Selbstorganisation zurückführen (SANDER, 1989).

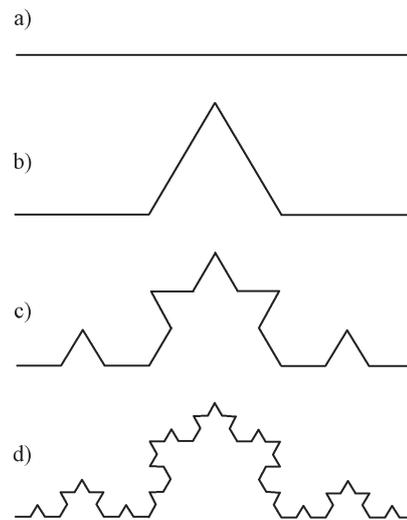


Abb. 6.2 Die ersten vier Konstruktions-schritte der Koch-Kurve. Unendlich häufige Anwendung der Konstruktionsvorschrift führt auf ein selbstähnliches Gebilde.

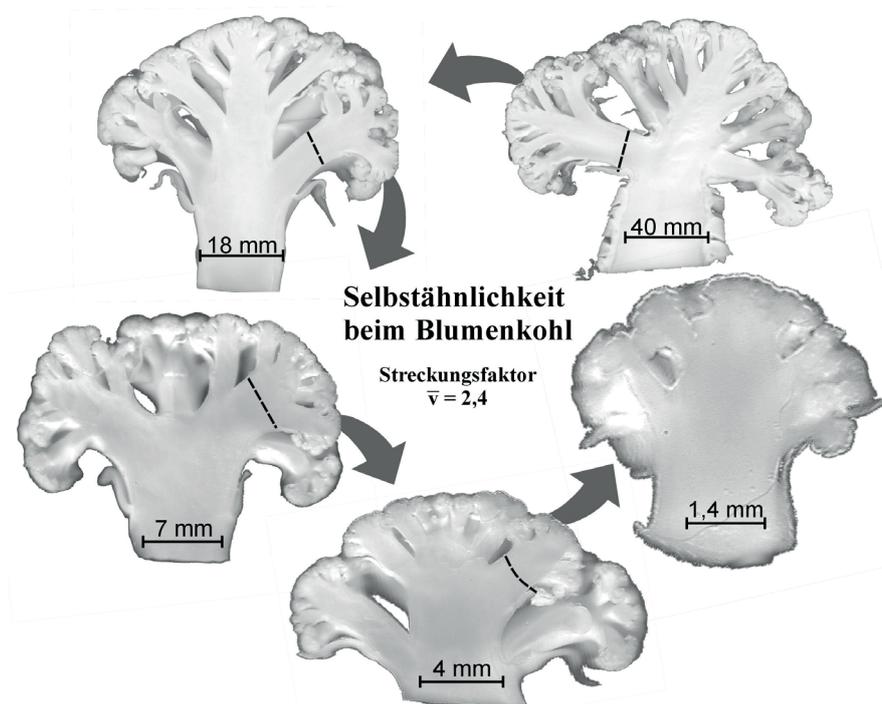


Abb. 6.3 Selbstähnlichkeit und Skaleninvarianz bei natürlichen geometrischen Gebilden, die man mit dem Fraktalbegriff beschreiben kann: ein Blumenkohl, dessen Teile durch eine Streckung mit dem Faktor 2,4 (mehr oder weniger exakt) aufeinander abgebildet werden können.

#### Zur Struktur des Fraktalbegriffs in der Fachliteratur

Der Fraktalbegriff ist ein Beispiel dafür, wie sich wissenschaftliche Begriffe (bzw. Modelle) dadurch entwickeln, dass unterschiedliche Explikationen oder Herangehensweisen an den Begriff konkurrieren. Mit dem Zitat „*Auf intuitive Weise werden wir fraktale Muster erkennen, lange bevor wir sie logisch und mathematisch spezifizieren können.*“ deutet BRIGGS (1993) an, dass sich der Begriff des Fraktals in der Fachwissenschaft noch in der Entwicklung befindet. Eine geschlossene Definition des Fraktals existiert nicht; man kann bezüglich des Fraktalbegriffs lediglich von einem gegenwärtigen Stand seiner Entwicklung sprechen. Kurz zusammengefasst scheint es derzeit so zu sein, dass jede Explikation bestimmte Objekte, die man als Fraktal bezeichnen möchte, auslässt oder andere einschließt, die zweifelfrei nicht als Fraktale angesehen werden sollen (vgl. KATSCHER, 1995; KATSCHER et al., 1996).

Im Kieler Projekt ist die führende Literatur zu Fraktalen analysiert worden (u.a. FALCONER, 1990; MANDELBROT, 1991; BRIGGS, 1993; LAUWERIER, 1992; PEITGEN, JÜRGENS & SAUPE, 1992; ZEITLER & NEIDHARDT, 1993; SCHROEDER, 1994 und SCHUSTER, 1994;). Ein wesentliches Kriterium für die Auswahl dieser Literatur ist der Lehrbuchcharakter eines Werkes gewesen bzw. sein zumindest impliziter Anspruch, den momentanen Stand des Fraktalbegriffs präsentieren zu wollen. Die ausgewählte Literatur ist daraufhin analysiert worden, ob die dort wiedergegebenen Explikationen des Fraktalbegriffs konsistent und kohärent sind. Katschers Analysen (KATSCHER, 1995; KATSCHER et al., 1996) bestätigen die oben formulierte Vermutung, dass die Fachliteratur keinen einheitlichen Fraktalbegriff verwendet, dass sich allerdings zwei „Herangehensweisen“ an den Begriff des Fraktals erkennen lassen.

Es zeigt sich, dass die Fachbuchautoren ihren Fraktalbegriff jeweils auf unterschiedliche Begriffe stützen. Dies sind insbesondere die folgenden vier: Selbstähnlichkeit und Feinstruktur (s.o.), Skaleninvarianz und fraktale Dimension. Skaleninvarianz liegt dann vor, wenn man die betrachtete Struktur mit dem um einen bestimmten Faktor verkleinertes oder vergrößertes Abbild zur Deckung bringen kann. In diesem Fall ist die Struktur gegenüber Maßstabsänderungen invariant: Dies ist gleichbedeutend damit, dass sie auf allen Größenordnungen denselben Grad an Irregularität und Zersplitterung aufweist (MANDELBROT, 1991). Die Kochkurve ist ein Beispiel für Skaleninvarianz, aber auch ein Geradenstück, das man allerdings nicht als Fraktal ansehen möchte. Dieses Gegenbeispiel zeigt, dass Selbstähnlichkeit und Skaleninvarianz allein nicht ausreichen, um ein Fraktal zu charakterisieren; anders als das Geradenstück muss ein Fraktal über eine gewisse Feinstruktur verfügen, d.h. es muss in allen Größenordnungen weiter auflösbare Einzelheiten aufweisen, die nicht mit Geradenstücken angenähert werden können (Aspekt Differenzierbarkeit!).

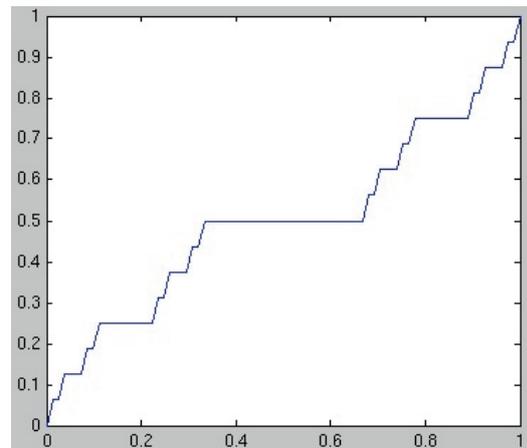


Abb. 6.4 Cantorsche Teufelstreppe, Bei ihr wird das Intervall  $[0;1]$  auf sich selbst abgebildet. Mandelbrot möchte sie als Fraktal verstanden wissen, obwohl es seiner eigenen Definition widerspricht. (Abb.: Uni Stuttgart)

Eine Reihe von Autoren nutzt die Begriffe Feinstruktur, Selbstähnlichkeit und Skaleninvarianz, um Fraktale zu kennzeichnen (z.B. SCHROEDER, 1994), auch wenn die Trennschärfe zwischen den zwei letztgenannten Begriffen gering ist. Mandelbrot beispielsweise hebt deutlich auf die Invarianzeigenschaften von vermeintlich fraktalen Gebilden ab und misst ihnen große Bedeutung bei der Begriffsbildung zu. Mandelbrot unternimmt allerdings auch einen Explikationsversuch über den Begriff der fraktalen Dimension: „*Ein Fraktal ist eine Menge, deren Hausdorff-Besicovitch-Dimension die topologische Dimension übersteigt*“ (MANDELBROT, 1991). Er muss aber erkennen, dass diese Explikation Gebilde wie die Cantorsche Teufelstreppe (Abb. 6.4) als Fraktal ausblendet, weil hier beide Dimensionswerte den gleichen Betrag, nämlich 1, aufweisen. Dennoch möchte er das Beispiel als Fraktal verstanden wissen.

Trotz dieser Probleme misst eine Reihe von Autoren der quantitativen Vermessung von geometrischen Gebilden, für die geklärt werden soll, ob sie als Fraktale angesehen werden sollen, eine größere Bedeutung bei (z.B. MANDELBROT, 1991) als die obigen phänomenologisch-geometrischen Betrachtungen von Ähnlichkeiten. Bei dieser Vermessung wird die fraktale Dimension eines Gebildes berechnet. Der zentrale Begriff ist hierbei die Hausdorff-Besicovitch-Dimension, die in der Literatur vielfach als Synonym für die fraktale Dimension angesehen wird. Die Bestimmung der Hausdorff-Besicovitch-Dimension kann allerdings sehr kompliziert werden, so dass eine Vielzahl von Verfahren (Ersatzdimensionen) entwickelt worden sind, die auf einfacherem Wege auf ein Maß für die fraktale Dimension eines Gebildes führen (vgl. KATSCHER, 1995, und Tabelle 5.1).

Der Vorteil einer Herangehensweise an den Fraktalbegriff über die fraktale Dimension liegt darin, dass der Begriff auf diese Weise mathematisch gut fassbar und beschreibbar wird. Es wird in den meisten Fällen eindeutig entscheidbar, ob ein Gebilde ein Fraktal ist oder nicht. Aber auch bei dieser Herangehensweise hat man das offenbar grundsätzliche Problem, dass es einige geometrische Gebilde gibt, die zwar offensichtlich den Fraktalen zugeordnet werden müssten, nach Mandelbrots eigener Definition (s.o.), aber keine Fraktale sind, weil fraktale und topologische Dimen-

sion sich nicht unterscheiden. (Für unterrichtliche Zwecke besteht zudem die Schwierigkeit, dass Schülerinnen und Schüler evtl. nur in wenigen Beispielfällen eine fraktale Dimension berechnen können.)

FALCONER (1990) spricht sich tendenziell gegen eine (im engen Sinne) Definition des Fraktals aus; er formuliert Kriterien für geometrische Gebilde, die mehr oder weniger vollständig erfüllt sein müssen, um von einem Fraktal sprechen zu dürfen: „Wenn wir eine Menge  $F$  als ein Fraktal bezeichnen, denken wir deswegen typischerweise an folgendes:

(i)  $F$  hat eine Feinstruktur; d.h., es zeigt auch auf beliebig kleinen Skalen noch viele Einzelheiten.

(ii)  $F$  ist zu irregulär; um sowohl lokal als auch global mit traditionellen geometrischen Mitteln beschrieben zu werden.

(iii)  $F$  trägt häufig eine gewisse Form der Selbstähnlichkeit, die vielleicht auch annähernd oder statistisch sein kann.

(iv) Die fraktale Dimension von  $F$  (auf irgendeine Weise definiert) ist gewöhnlich größer als die topologische Dimension von  $F$ .

(v) In den meisten interessanten Fällen ist  $F$  auf eine sehr einfache Weise definiert, evtl. rekursiv.“

Insgesamt erkennt man bei fast allen Darstellungen, dass sie sowohl auf phänomenologisch-geometrische Eigenschaften fraktaler Gebilde wie Feinstruktur und Skaleninvarianz abheben als auch auf die Bestimmung eines (gebrochenzahligen) Dimensionsmaßes. Man erkennt somit zwei unterschiedliche Herangehensweisen an den Begriff des Fraktals, die eher unverbunden nebeneinander stehen (vgl. Abb. 6.5). Jeder Autor setzt bei seiner Explikation des Fraktalbegriffs andere Schwerpunkte, spricht aber immer beide Herangehensweisen an. Offenbar reicht eine der beiden Herangehensweise nicht aus, um den Fraktalbegriff kohärent zu beschreiben und damit in der Fachliteratur bruchlos zu etablieren. Eine simple Kombination beider Herangehensweise bietet heute aber noch keine konsistente Beschreibung der Fraktale; die begriffliche Entwicklung ist noch nicht abgeschlossen.

**Anwendung des Fraktalkonzepts auf natürliche Objekte.** Alle Explikationen des Fraktalbegriffs setzen eine unendlich feine Struktur des betrachteten Objekts voraus. Bei einem natürlichen Objekt ist die Feinheit seiner Struktur durch seine Körnigkeit, die sich zumindest im atomaren Bereich zeigt, begrenzt. Bei natürlichen Wachstumsprozessen besteht zudem eine zeitliche Begrenztheit. Die Grenzen fraktaler Eigenschaften

### Fraktale Dimension

Sie wird durch seine **Hausdorff-Besicovitch-Dimension** dargestellt und ist die Dimension, die infinitesimal kleine Würfel besitzen müssen, um eine Überdeckung aus infinitesimal kleinen Mengen für die zu messende Menge zu überdecken. Bei vielen Mengen ist es ausgesprochen schwierig, die Hausdorff-Besicovitch-Dimension zu berechnen. In der Praxis werden deshalb einfachere Verfahren zur Bestimmung der Dimension verwendet.

Die **Selbstähnlichkeitsdimension** ist auf exakt selbstähnliche Strukturen anwendbar. Sie liefert z.B. bei der Koch-Kurve denselben Wert wie die Hausdorff-Besicovitch-Dimension. Mit der Selbstähnlichkeitsdimension können auch nicht exakt selbstähnliche Gebilde abgeschätzt werden.

Die **Zirkel-Dimension** ist auf Gebilde aus Linienelementen (ohne Kreuzungspunkte) anwendbar. Mit verschiedenen Zirkelweiten wird das zu messende Gebilde abgeschrieben und die ermittelte Länge mit der Zirkelweite in Beziehung gesetzt.

Für die Bestimmung der **Box-Dimension** wird eine zu messende Teilmenge des  $\mathbb{R}^n$  (Körper der reellen Zahlen) mit  $n$ -dimensionalen Würfeln gleicher (später unterschiedlicher) Kantenlänge überdeckt. Aus der Anzahl der benötigten Würfel in Abhängigkeit von der Kantenlänge ergibt sich die Box-Dimension.

Die **Massen-Dimension** eignet sich besonders für Strukturen mit einem Zentrum. Um dieses Zentrum herum werden  $n$ -dimensionale Kugeln konstruiert. Die Anzahl der Elemente der zu messenden Menge, die sich innerhalb der entsprechenden Kugeln befindet, wird bestimmt. In Abhängigkeit vom Radius der Kugeln berechnet sich die Massen-Dimension.

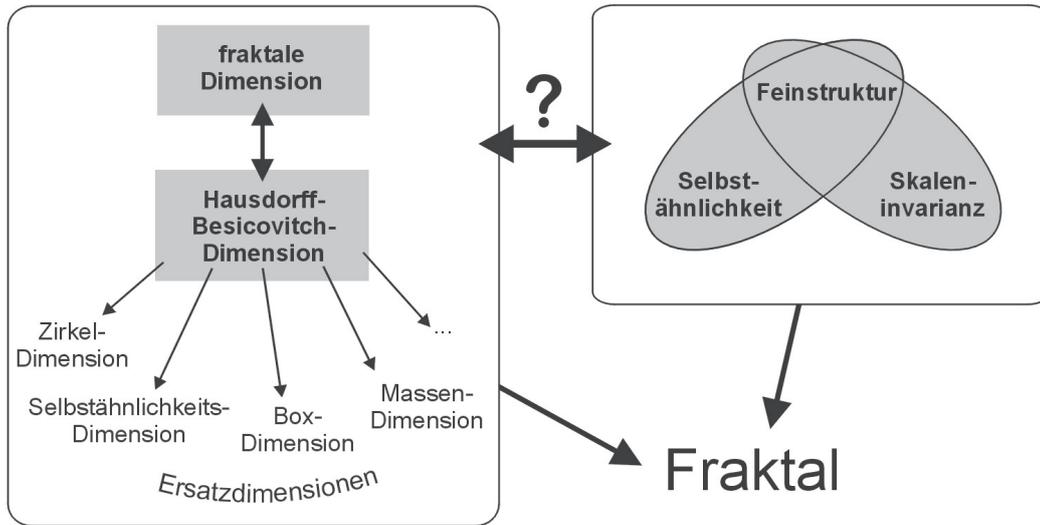


Abb. 6.5 Zwei Herangehensweisen an den Fraktalbegriff in der Literatur: Über phänomenologisch-geometrische Eigenschaften bzw. über das quantitative Maß der fraktalen Dimension

natürlicher Objekte werden auch in der Fachliteratur thematisiert. Mandelbrot spricht bezogen auf natürliche Systeme beispielsweise von einer „*asymptotisch oder anderweitig eingeschränkten Skaleninvarianzeigenschaft*“ (MANDELBROT, 1991, S. 159). Falconer schreibt über die Grenzen der Anwendung des Fraktalkonzepts auf natürliche Systeme: „*Dimensionsabschätzungen mittels Kästchen der Seitenlänge  $\delta$  brechen bei physikalischen Beispielen zwangsläufig zusammen, bevor eine molekulare Größenordnung erreicht wird. [...] Die Theorie der Fraktale hängt von der Bestimmung von Grenzwerten für  $\delta \rightarrow 0$  ab. Dieser Umstand kann in der Realität nicht erreicht werden.*“ (FALCONER, 1990, S. 303). Insgesamt besteht bei den Autoren ein Konsens darüber, dass das Fraktalkonzept für die Beschreibung natürlicher Systeme nur eingeschränkt geeignet ist. Dies folgt daraus, dass natürliche Objekte lediglich über einige wenige Größenordnungen hinweg selbstähnlich, invariant gegenüber Maßstabänderungen oder fein strukturiert sein können bzw. ihre fraktale Dimension nur einen asymptotischen Wert annehmen kann.

Dazu ist zu sagen, dass es nicht um die Frage gehen kann, ob es in der Natur Fraktale „gibt“ oder in welchem Maße ein natürliches Objekt ein Fraktal „ist“. Es scheint aber so zu sein, dass in der Fachliteratur gerade diese Fragen diskutiert werden, wenn es um die Einordnung natürlicher Strukturen geht. Zu wenig wird der Modellcharakter der Fraktale angesprochen, denn das Fraktal ist als ein theoretisches Konstrukt zu verstehen. Bei „mathematischen“ Gebilden wie der Kochkurve kann das Modell sehr gut passen. Bei natürlichen Strukturen kann nur untersucht werden, wie nützlich das Modell des Fraktals für die Beschreibung der betrachteten Strukturen ist. So wie es in der Natur keine Quadrate oder Kugeln gibt, so gibt es auch keine Fraktale. Es gibt aber Strukturen, für deren Beschreibung und für deren Vergleich untereinander das Modell des Fraktals hilfreich sein kann. Gerade am Beispiel des Fraktalmodells, das lediglich eingeschränkt auf natürliche Objekte passt, kann Schülerinnen und Schülern das Modelldenken in den Naturwissenschaften nahegebracht werden.

Insgesamt ist hier die Problematik einer „Wissenschaft im Werden“ berührt; sie drückt sich in erster Linie durch das Ringen um Begriffe und Modelle aus. Im vorliegenden Fall hat die Fachdidaktik gute Chancen, Schülerinnen und Schülern Wissenschaft als Prozess nahe zubringen, denn die einzelnen Aspekte des Fraktalkonzepts erscheinen nachvollziehbar zu sein (s.u.). Die folgenden Abschnitte demonstrieren, welche Schwierigkeiten, aber auch Möglichkeiten für den Unterricht über Fraktale mittels empirischer Studien erkennbar geworden sind.

### **Fraktale im naturwissenschaftlichen Unterricht**

Bislang hat das Fraktalkonzept lediglich in den Mathematikunterricht in nennenswertem Maße Einzug gehalten (BEHR, 1993; PEITGEN et al., 1994; STERNEMANN, 1995). Im naturwissenschaftlichen Unterricht gibt es einige Bemühungen, Lehrpersonen mit dem Fraktalkonzept und seiner Bedeutung für die Erklärung physikalischer Phänomene vertraut zu machen (z.B. NORDMEIER & SCHLICHTING, 1996) sowie eine Reihe von Vorschlägen für Experimente bzw. Simulationen, mit denen Eigenschaften von Fraktalen illustriert werden können (NAINI & BRUHN, 1996; NORDMEIER, 1997). In den Publikationen zum Thema Fraktale (vgl. Bibliographie von KOMOREK, 2004b) findet man zwar Überlegungen zu den Zielen der Vermittlung des Fraktalkonzepts, systematische Analysen seines Bildungswertes und empirische Studien zum Lernen zentraler Aspekte (z.B. NEMIROVSKY, 1993) findet man selten.

Die didaktischen Relevanz des Fraktalkonzepts ergibt sich u.a. aus Erkenntnissen darüber, wie aus einfachen Bildungsgesetzen überaus komplexe Strukturen entstehen können. Das Konzept des Fraktals stellt zudem einen Rahmen bereit, Gemeinsamkeiten von Phänomenen und Strukturen über die Grenzen von Unterrichtsfächern hinweg zu erkennen und zu deuten. Die Experten der oben (Kap. 3) beschriebenen Delphistudie betonen, dass hierin eine didaktisch-pädagogische Relevanz der Fraktale liegt, weil es das strukturwissenschaftliche Anliegen der nichtlinearen Physik an nachvollziehbaren Beispielen demonstriert wird (vgl. KOMOREK, WENDORFF & DUIT, 2002). Die unterschiedlichen Herangehensweisen an den Fraktalbegriff (s.o.) werden auch von den Experten als Chance gesehen, ein adäquates Bild von Wissenschaft zu entwickeln.

Fraktale und fraktales Wachstum sind unter einem weiteren Aspekt interessant. In den meisten natürlichen Systemen, die mit dem Modell des Fraktals beschrieben werden können, liegt ein Wechselspiel zwischen gesetzmäßigen und zufälligen Prozessen vor. Als Resultat dieses Wechselspiels bildet sich eine fraktale Struktur heraus. Beispiele, die man in der Natur findet, sind Flussdeltas, Erosionsprozesse usw., Beispiele, wie man experimentell fraktale Strukturen erzeugen kann, sind Prozesse des viskosen Verästelns oder des elektrolytischen, dendritischen (baumartigen) Abscheidens von Metallen. Letztgenannte Beispiele sind sowohl in einer Unterrichtseinheit für Grundkurse eingesetzt worden (vgl. Kapitel 7) als auch in einer Teaching Experiment-Studie (vgl. Kapitel 8). Darin wird empirisch untersucht, inwieweit Schülerinnen und Schüler bei den genannten Experimenten die Strukturbildung als Zusammenwirken von Zufall und Gesetzmäßigkeit nachvollziehen können. Der generelle Bildungswert der Beschäftigung mit Fraktalen besteht darin, dass Schülerinnen und Schüler ihre Vorstellungen von natürlichen oder naturwissenschaftlichen Strukturen erweitern und differenzieren können.

## **6.2 Die Methode des Teaching Experiment**

Da ab Abschnitt 6.3 über Interviewstudien berichtet wird, sollen hier Informationen über die im Projekt vielfältig eingesetzte Methode des Teaching Experiments eingeschoben werden. Zur Untersuchung von Vorstellungen und Lernprozessen ist in den letzten Jahren ein weites Spektrum von Methoden eingesetzt worden. Diese stammen vorwiegend aus dem Bereich qualitativer Sozialforschung (vgl. FETTERMAN, 1988; GUBA & LINCOLN, 1989; LAMNEK, 2005; MAYRING, 2010). Sie sind für die empirische fachdidaktische Forschung adaptiert worden (insbesondere GROPENGIESSER, 2008) und weisen ein weites Spektrum auf (vgl. die Methoden, die in DUIT, GOLDBERG & NIEDDERER, 1992, präsentiert werden). Multiple-Choice-Tests, Assoziations-tests, Concept Mapping und Techniken, bei denen Schülerinnen und Schüler ihre Vorstellungen graphisch darstellen, sind zu finden (vgl. WHITE & GUNSTONE, 1992). Methoden, die mit Konzeptwechsel-Ansätzen zusammenpassen, sind geeignet, individuelle Konzepte und Lernpro-

zesse zu untersuchen. Methoden, die sozial-konstruktivistische Ansätze berücksichtigen, erlauben es, Prozesse der Bedeutungskonstruktion in sozialen Gruppen zu beschreiben und das Wechselspiel von individuellen und sozial geteilten Kognitionen bzw. Konstruktionsprozessen nachzuzeichnen.

**Charakteristika des Teaching Experiment.** Um vorunterrichtliche Vorstellungen von nichtlinearen Phänomenen zu untersuchen und um zu klären, inwieweit sich diese Vorstellungen in Richtung auf die wissenschaftliche Sichtweise entwickeln lassen, ist eine Untersuchungsmethode notwendig, die individuelle Lernprozesse zu erkunden erlaubt und Interventionen ermöglicht. Im Kieler Projekt ist die Methode des Teaching Experiment verwendet worden (KOMOREK & DUIT, 2004b). Vom Mathematikdidaktiker Steffe entwickelt (STEFFE, 1983; STEFFE & D'AMBROSIO, 1996), ist sie für die fachdidaktische Forschung adaptiert worden (KATU, LUNETTA & VAN DEN BERG, 1993). Das Teaching Experiment umfasst methodologische Elemente des Sokratischen Dialogs (vgl. KROHN, 1998) und des klinischen bzw. kritischen Interviews nach Piaget (vgl. PIAGET, 1969; WHITE & GUNSTONE, 1992, Kapitel 4). STEFFE (1983) betont aber, dass sich das Teaching Experiment dadurch vom „klassischen“ Piaget-Interview unterscheidet, dass es mehrere Sitzungen umfasst und explizit als Lehr-Lern-Situation organisiert ist. Das Teaching Experiment ist von seiner Anlage her mit dem problemzentrierten Interview nach LAMNEK (2005) vergleichbar.

Beim Teaching Experiment handelt es sich um eine Reihe von Interviews, in denen sich Schülerinnen und Schüler frei, aber doch geleitet mit erklärungsbedürftigen Experimenten und Phänomenen auseinandersetzen. Der Versuchsleiter als *Interviewer* hat dabei die Aufgabe, die individuellen Vorstellungsrahmen der Schülerinnen und Schüler nachzuzeichnen. Als *Lehrperson* muss er auf die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler mit Lernanregungen antworten und passende Interventionen zum richtigen Zeitpunkt vornehmen. Diese Strategie unterstützt, dass sich die Schülerinnen und Schüler ihrer eigenen Vorstellungen und auch deren Begrenztheit bewusst werden. Sie werden angeregt, nach alternativen Erklärungen für das Verhalten der diskutierten Phänomene und Objekte zu suchen. Auf einer Metaebene sollen die Schülerinnen und Schüler ein Bewusstsein dafür entwickeln, dass und inwiefern sich ihre Konzepte in der Auseinandersetzung mit der materialen (und ggf. auch sozialen) Lernumgebung verändern.

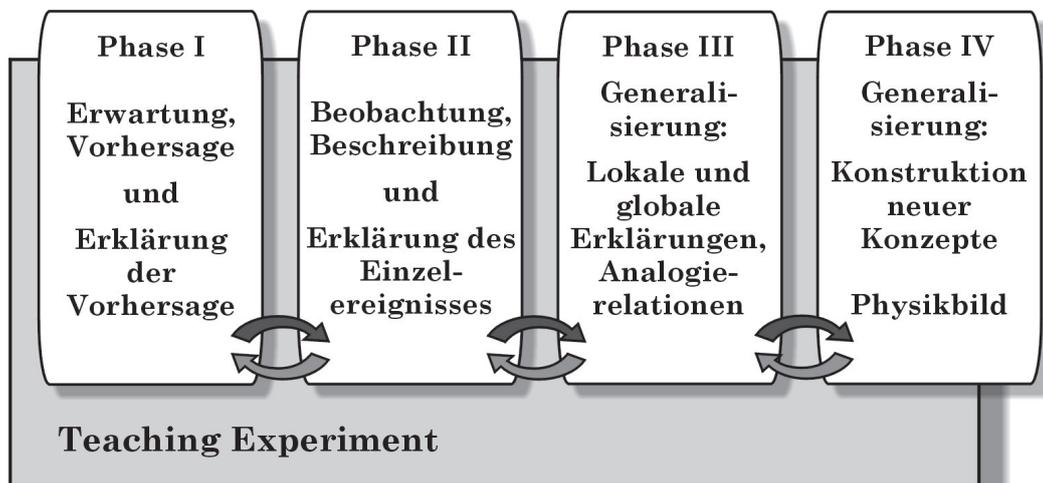


Abb. 6.6 Phasen im teaching experiment. Die Doppelpfeile deuten an, dass die Phasen nicht ausschließlich in einer linearen Abfolge durchlaufen werden müssen.

## 6. Fraktale als Zugang zur geordneten Unordnung

---

Im Ablauf des Teaching Experiment gibt es charakteristische Phasen (vgl. Abb. 6.6; KOMOREK & DUIT, 2004), die bei jeder Einführung eines physikalischen Objekts oder Experiments durchlaufen werden:

- **Erwartung** vor der ersten Durchführung: Welche Erwartung hast du? Wie wird das Experiment ablaufen? Welche Bewegungen (allg. Messwerte, Prozesse) werden zu beobachten sein? Wie kommst du zu deiner Einschätzung?
- **Einzelklärung** nach dem ersten Durchgang: Beschreibe deine Beobachtungen. Kannst du dir das Verhalten erklären? Welche Eigenschaften des Objekts bzw. des Aufbaus sind für sein Verhalten verantwortlich? Welche Kräfte und anderen Einflüsse sind vorhanden? Was passiert bei Wiederholung?
- **Generalisierungsphase I** nach mehrfachem Durchgang: Kannst du das Verhalten allgemein beschreiben? Was passiert lokal, was passiert global? Welche Analogiebeziehungen zu anderen Objekten oder Experimenten kannst du entwickeln?
- **Generalisierungsphase II:** Welche neuen Begriffe kannst du entwickeln? Was bedeuten deine Untersuchungsergebnisse für bestimmte physikalische Konzepte; inwiefern müssen sie verändert, erweitert oder neu festgesetzt werden? Ändert sich etwas an deinem Bild von Physik?

Erwartung, Einzelklärung und Generalisierung sind typische Phasen der Adaption des Teaching Experiment durch die Kieler Gruppe. Die ersten beiden Phasen stimmen weitgehend mit dem Vorgehen überein, das White und Gunstone „POE“ (Prediction - Observation - Explanaton) nennen (vgl. WHITE & GUNSTONE, 1992).

Die Ausrichtung eines Teaching Experiment hängt von bestimmten theoretischen Annahmen ab. Wird z.B. davon ausgegangen, dass Schülerinnen und Schüler feste vorunterrichtliche Vorstellungen ‚besitzen‘, die es gilt ‚hervorzubringen‘, dann kann es angezeigt sein, ein Teaching Experiment mit einem einzelnen Schülerinnen und Schüler durchzuführen. Dies kann sogar notwendig werden, wenn im Interview über vertrauliche persönliche Einstellungen und Überzeugungen gesprochen wird und Tiefeninformationen gesammelt werden sollen (KÖNIG, 1974, 143). Möchte man allerdings, dass sich Schülerinnen und Schüler in einer „community of practice“ (LAVE, 1991) gegenseitig motivieren, ihre Vorstellungen in Frage zu stellen und Erklärungen untereinander auszuhandeln, dann bringen Interviews mit zwei Schülerinnen und Schülern mehr und differenziertere Vorstellungen zu Tage. Eine Reihe der Kieler Studien ist mit Gruppen von je zwei Schülerinnen und Schülern durchgeführt worden, z.B. die unten dargestellten Untersuchungen zum Fraktalkonzept (NAUJACK, 1997; BÜCKER, 1998; KOMOREK et al., 2001). Erhöht man die Anzahl der Schülerinnen und Schüler bis zu einer Gruppengröße von vier, so verstärken sich Effekte, wie sie aus realen Unterrichtssituationen bekannt sind. Hierzu zählt die Bildung von Untergruppen von Schülerinnen und Schülern, die unterschiedliche Hypothesen verfolgen, und das Aushandeln von Bedeutungen. Dies sind Prozesse der „situated cognition“, die unter einer sozial-konstruktivistischen Perspektive beschrieben und unterstützt werden können (vgl. ROTH, 1995a,b).

Die Methode des Teaching Experiment hat sich im Kieler Projekt zur Didaktischen Rekonstruktion bewährt, denn sie erlaubt es, die Sichtweisen der Schülerinnen und Schüler zu erforschen, sie im Rahmen eines Mikrounterrichts zu entwickeln und Wechselwirkungen von Lehrprozessen und Lernprozessen zu untersuchen. Parallel zur Diskussion um physikalische Inhalte können Interviewleiter und Schülerinnen und Schüler beim Teaching Experiment auf einer Metaebene ihren gemeinsamen Lehr-Lern-Prozess betrachten. Im Kieler Projekt ist diese Möglichkeit häufig und absichtsvoll genutzt worden, auch wenn es den Schülerinnen und Schülern zunächst fremd vorgekommen ist.

## 6.3 Schülerinnen und Schüler verstehen Fraktale

Die Untersuchung von vorunterrichtlichen Vorstellungen und Lernprozessen gibt nützliche Hinweise darüber, ob und in welcher Weise didaktisch rekonstruierte Grundideen erlernbar sind, zum anderen erlaubt die Kenntnis der Sichtweisen der Lernenden einen alternativen Blick auf die Sachstruktur. Die empirischen Untersuchungen orientieren sich an den folgenden Leitfragen:

- Wie ist das wissenschaftliche Fraktalkonzept in der Sicht der Schülerinnen und Schüler repräsentiert?
- Welche Vorstellungen und konzeptuellen Rahmen besitzen sie in Bezug auf Fraktale, welche Beziehungen bestehen zwischen ihren Vorstellungen?
- Welche Vorstellungen haben die Schülerinnen und Schüler von der Struktur der Wissenschaft selbst, von ihrer Theoriebildung und ihren Methoden?
- Welche grundsätzlichen Möglichkeiten des Lernens bestimmter wissenschaftlicher Konzepte besitzen sie aus kognitions- und entwicklungspsychologischer Sicht?

Bei der Planung explorativer Studien geht es nicht allein darum, die vorunterrichtlichen Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler von den betreffenden Phänomenen, Konzepten oder Prinzipien zu untersuchen, sondern auch um die Entwickelbarkeit dieser Vorstellungen und die Integration neuer Sichtweisen - also um das Lernen.

### Lernen von Grundideen des Fraktalkonzepts

In einer unserer Studien wurde untersucht, ob Schülerinnen und Schüler die Eigenschaft der *Selbstähnlichkeit* von mathematischen und natürlichen Gebilden spontan entdecken bzw. welche Hilfen nötig sind, sie zum Verständnis dieses Merkmals zu führen (KOMOREK, DUIT, BÜCKER & NAUJACK, 2001). Zudem wurde untersucht, inwieweit Schülerinnen und Schüler nachvollziehen können, dass Komplexität aus einfachen Bildungsgesetzen entstehen kann.

In einem Teaching Experiment (vgl. KOMOREK & DUIT, 2004) sind je zwei Schülerinnen und Schüler gemeinsam interviewt worden, insgesamt neun Gruppen einer 10. Gymnasialklasse. Jedes Interview dauerte ca. 50 min und enthielt drei Teile; eine Aufgabe, bei der Schülerinnen und Schüler Abbildungen und Fotos bestimmten Kategorien zugeordnet haben, die sie zuvor selbst festgelegt hatten (vgl. Abb. 6.7); eine Aufgabe, bei der das Prinzip der „Komplexität aus einfachen Bildungsgesetzen“ nachvollzogen werden sollte; und eine Aufgabe, bei der das Konzept der Selbstähnlichkeit anhand eines Blumenkohls und anhand eines mathematischen Fraktals entwickelt werden sollte.

### Ergebnisse

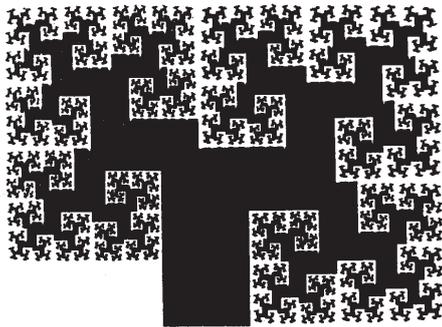
- Die Schülerinnen und Schüler ordneten die 14 Gebilde nicht nach Gesichtspunkten, die dem Konzept der Selbstähnlichkeit entsprachen. Sie bildeten zwar Gruppen, in denen es nur Fraktale bzw. nur Nicht-Fraktale gab, Selbstähnlichkeit fand sich aber nicht unter den angeführten Ordnungskriterien. Vielmehr - und das ist keineswegs überraschend - sind die dominanten Ordnungskriterien auffällige geometrische Formeigenschaften wie *rechter Winkel*, *Quadrat* und *Dreieck*, aber auch *Verzweigkeit*. Anknüpfungspunkte für den Begriff Selbstähnlichkeit ergaben sich allerdings, wenn bei einigen Gebilden darauf verwiesen wurde, dass deren Aufbau

## 6. Fraktale als Zugang zur geordneten Unordnung

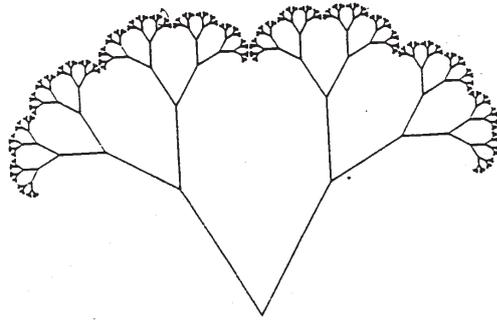
---

im Großen und Kleinen ähnlich sei. Die mehrfache Verzweigung des Blumenkohls wurde von den Schülerinnen und Schülern in der Regel ohne Mühe erkannt. Aber diese Eigenschaft schien für diese Schülerinnen und Schüler nur ein eher unwichtiges Detail unter vielen anderen zu sein.

- Die Aufgabe, den vierten Schritt zur Konstruktion der Kochkurve selbst zu finden, bereitete große Schwierigkeiten. Nur in zwei der sieben Interviews waren die Interviewten dazu in der Lage. Die Schwierigkeiten lagen darin, die Veränderungen zwischen den ersten drei Schritten so zu analysieren, dass das Bildungsgesetz erkannt werden konnte. Die meisten Interviewten waren allerdings in der Lage, den richtigen vierten Schritt zu konstruieren, wenn die Interviewerin mit ihnen zusammen die Veränderungen im Detail herausgearbeitet hatte. Wurden genügend Hilfen gegeben, so erkannten die meisten Schülerinnen und Schüler, wie hier Komplexität aus einfachen Regeln entsteht
- Beim Vergleich des Aufbaus der Koch-Kurve und des Blumenkohls bedurfte es einer Reihe von Hilfestellungen, um zum Konzept der Selbstähnlichkeit zu führen. Bei der Aufgabe, die 14 Abbildungen erneut zu ordnen, sowie bei der Beschreibung des Aufbaus eines Lungenflügels und eines Zinkdendrits (s.u.) konnten die meisten Befragten schließlich Selbstähnlichkeit als Ordnungskriterium einsetzen. Insgesamt tauchten bei der Festlegung von Selbstähnlichkeit ähnliche Fragen auf wie man sie in der Fachliteratur findet: Wie genau müssen vergrößerte Ausschnitte der Gesamtstruktur entsprechen? Können reale Objekte und Konstruktionen überhaupt selbstähnlich sein, wenn doch Ausschnitte über andere Strukturelemente verfügen als das Ganze? Muss die Selbstähnlichkeit an jedem Punkt nachweisbar sein?



(a)



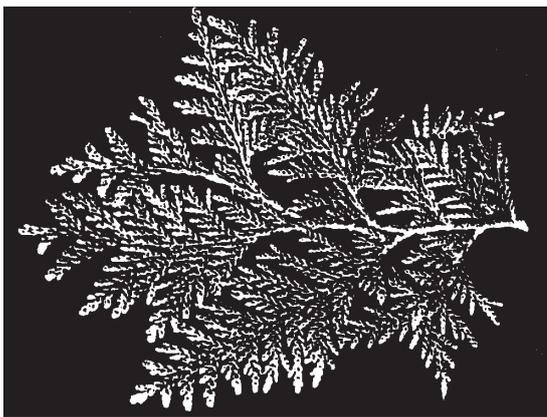
(b)



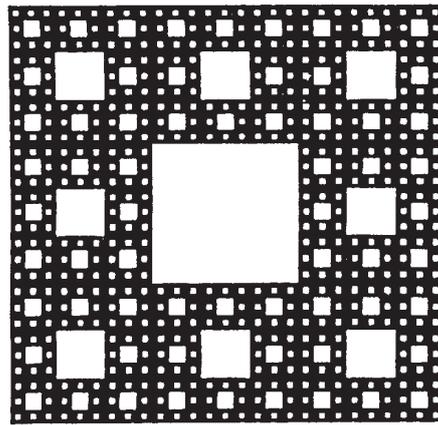
(c)



(d)



(e)



(f)

Abb. 6.7 Einige der 14 Abbildungen aus einem Teaching Experiment (NAUJACK et al., 1998): Dendritische Baumkonstruktionen (a), (b), Zeichnung von M.C. Escher (c), computer-generierter Farn (d), Foto eines Teils eines Lebensbaumes (e) und ein Menger-Teppich (f).

## 6.4 Lernprozesse zum fraktalen Wachstum

Eine Reihe von Wachstumsprozessen in der Natur lassen sich mit dem Konzept des *fraktalen Wachstums* qualitativ wie quantitativ beschreiben (SANDER, 1989). Biologie, Chemie und Physik blicken dabei insbesondere auf Strukturbildungen, bei denen deterministische und zufällige Prozesse gemeinsam wirken und eine faszinierende Komplementarität von Vorhersagbarkeit und Überraschung hervorbringen. Solche Prozesse laufen zum Beispiel wie folgt ab: Grenzfronten, die nach deterministischen Gesetzmäßigkeiten fortschreiten, werden statistischen Gesetzen gehorchend instabil. Zufällige Störungen verstärken sich an der Grenzfront selbst und führen zu einem bevorzugten Wachstum an diesen Stellen. Dadurch entstehen verzweigte, über einige Größenordnungen selbstähnliche Strukturen.

In einer unserer Studien (BÜCKER 1998; BÜCKER et al., 1999; KOMOREK et al., 2001) untersuchten wir, inwieweit Schülerinnen und Schüler fraktale Wachstumsprozesse verstehen können. Methodisch verlief diese Studie ähnlich der zuvor beschriebenen mit dem Unterschied, dass Experimentalaufbauten zum Einsatz kamen. Mit Hilfe eines Teaching Experiment-Design sollte geklärt werden, ob Schülerinnen und Schüler des 12. Gymnasialjahrgangs bei den beiden Experimenten *Zinkdendrit* und *Viskoses Verästeln* (vgl. Abb. 6.8) auf der Basis ihres Vorwissens verzweigte Strukturen erwarten, welche Erklärungsansätze sie für diese Strukturen entwickeln und inwieweit sie zu den wissenschaftlichen Erklärungen geführt werden können. An der Studie nahmen 18 Schülerinnen und Schüler in Zweiergruppen teil.

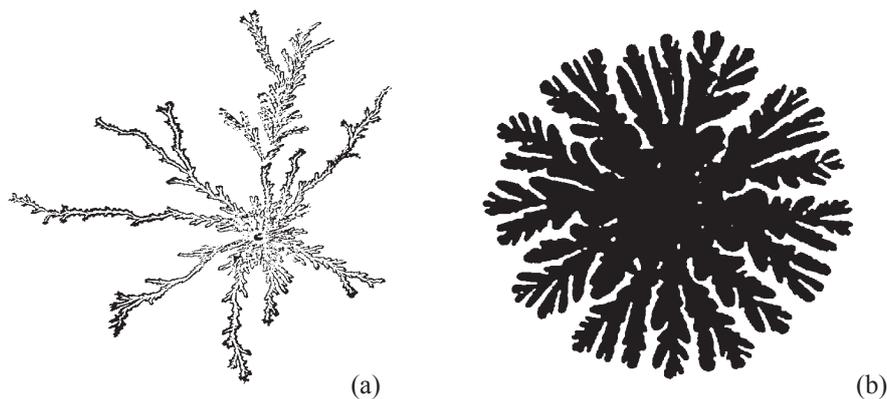


Abb. 6.8 Ein Zinkdendrit (a) und ein "Fettbäumchen"(b) (Abb. aus NORDMEIER, 1998), das durch Viskoses Verästeln zweier unterschiedlich viskoser sich durchdringender Flüssigkeiten entsteht

Im Falle des *Zinkdendrits* handelt es sich um ein elektrolytisches Experiment. Die unter dem Einfluss einer Spannung an der Kathode entstehenden Ablagerungen haben eine baumartig verzweigte Struktur. Beim *Viskosen Verästeln* wird zunächst Flüssigseife, dann Luft durch eine kleine Öffnung zwischen zwei aufeinanderliegende Plexiglasplatten gepresst. Die Luft dringt fingerartig in die Seife ein und bildet verzweigte Muster. Obwohl man bei den Versuchen *Zinkdendrit* und *Viskoses Verästeln* von völlig unterschiedlichen physikalischen Voraussetzungen ausgeht und obwohl die entstehenden Strukturen sich auf den ersten Blick nicht gleichen, weisen die Wachstumsprozesse doch prinzipielle Gemeinsamkeiten auf, denn beide Strukturen entstehen durch das Wechselspiel von Zufall und Gesetzmäßigkeit. Beide Vorgänge lassen sich zudem durch die Laplace-Gleichung beschreiben. Im ersten Fall ist die Wahrscheinlichkeitsfunktion, im zweiten Fall die Druckfunktion eine Lösung dieser Differentialgleichung. Und der *Zinkdendrit* und eine

beim *Viskosen Verästeln* entstandene Figur haben noch eine weitere wichtige Gemeinsamkeit: sie entstehen beide unter energetisch optimalen Bedingungen. Die der Untersuchung zugrundeliegenden Forschungsfragen wurden wie folgt formuliert:

- Erwarten Schülerinnen und Schüler bei den Wachstumsprozessen *Zinkdendrit* und *Viskoses Verästeln* auf der Basis ihres Vorwissens verzweigte Strukturen?
- Welche Erklärungsansätze entwickeln sie zur Frage, warum sich bei diesen Experimenten verzweigte Strukturen gebildet haben?
- Wie können sie zu einer physikalischen Vorstellung geführt werden, das heißt, welche Aspekte können sie relativ problemlos verstehen und wo liegen Hürden auf dem Weg zu einer physikalischen Sichtweise?

### Ergebnisse

Beim Experiment *Zinkdendrit* erwarten die Teilnehmer kaum unregelmäßige oder gar verzweigte Strukturen. Vielmehr wird meist von der Symmetrie des Versuchsaufbaus auf regelmäßige Formen geschlossen. Es herrscht zunächst die Vorstellung vor, dass eventuell entstehende Unregelmäßigkeiten sofort ausgeglichen und nicht verstärkt werden. Nach der Versuchsdurchführung gibt es hinsichtlich der Beurteilung, ob die erste Anlagerung zufällig ist oder nicht, zwei Typen von Teilnehmern, die sich durch unterschiedliche Vorstellungen vom *Zufall* unterscheiden. Für die einen bedeutet Zufall, dass der Prozess zwar determiniert, aber eine genaue Vorhersage nicht möglich ist. Die anderen verbinden Zufall mit Regellosigkeit und halten zufällige Prozesse für grundsätzlich nichtdeterminiert. Diese Teilnehmer sind vornehmlich der Ansicht, dass eine erneute Versuchsdurchführung die gleiche Anzahl von Zweigen zur Folge haben würde. Die Vorstellungen, die Schülerinnen und Schüler von dem Begriff Zufall haben, scheinen also eine Schlüsselstellung auf dem Weg zu einer physikalischen Sichtweise *fraktalen Wachstums* einzunehmen.

Der Aspekt der *Selbstverstärkung* beim Wachsen von Zinkdendriten scheint mit den angebotenen Hilfestellungen vermittelbar zu sein. Die Erklärung des Wachstums der Zweige an den Zweigen gelingt fast allen Teilnehmern; einige benötigen dabei den Hinweis auf die Erklärung des Wachstums der ersten Zweige.

Beim *Viskosen Verästeln* erwartet die Mehrzahl der Teilnehmer eine unregelmäßige Verdrängung. Die Bedeutung des Zufalls scheint für die Schülerinnen und Schüler beim *Viskosen Verästeln* wichtiger zu sein als beim *Zinkdendriten*. Keine Schülerin und kein Schüler erwartet, dass bei einer erneuten Versuchsdurchführung genau die gleiche Struktur entsteht. Eine Hürde bildet beim *Viskosen Verästeln* die Frage, in welcher Größenordnung die Ursachen der Instabilitäten zu suchen sind. Die angebotenen Hilfen scheinen grundsätzlich geeignet, um relevante Faktoren des Wachstumsprozesses herausarbeiten zu können; ein guter Anknüpfungspunkt scheinen die häufig genannten Energie- bzw. Optimierungsargumente zu sein. Fast alle Schülerinnen und Schüler sprechen diesen Aspekt beim *Viskosen Verästeln* selbstständig an, einige von ihnen können ansatzweise sogar begründen, warum der „Energieaufwand“ bei beiden Experimenten minimal ist.

Beide Experimente sind in der Unterrichtsstudie im Grundkursbereich (vgl. Kapitel 7) eingesetzt worden, um für Schülerinnen und Schüler bislang unbekannte Strukturbildungen zu diskutieren. Bereits in der vorliegenden Laborstudie hat sich nämlich gezeigt, dass Schülerinnen und Schüler die physikalischen Prozesse, um die es bei den Experimenten geht, weitgehend verstehen. Die Erprobung in der realen Unterrichtssituation hat aber noch ausgedungen. Anhand des Zinkdendrit-Experiments ist anschließend vertiefend untersucht worden, wie weit Schülerinnen und

Schüler dieses Experiment als Zugang zum Wechselspiel von Zufall und Gesetzmäßigkeiten nutzen können (vgl. Kapitel 8).

### **Diskussion**

Die Arbeiten zur didaktischen Rekonstruktion des Fraktalkonzepts (einschließlich der Ergebnisse aus Kapitel 7 und 8) machen deutlich, dass die diskutierten Beispiele für fraktale Objekte und fraktale Prozesse einen angemessenen Zugang zu diesem Thema darstellen können. Die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler zum Begriff Zufall bilden eine Schlüsselstellung auf dem Weg zu einem physikalischen Verständnis des fraktalen Wachstums. Insofern erscheint es sinnvoll, zunächst eine physikalische Vorstellung des Begriffs Zufall zu etablieren. Die Erklärungen der Schülerinnen und Schüler und die Rekonstruktion ihrer Lernprozesse geben nun Hinweise, wie die Elementarisierungen zu verbessern sind; da manche der Schülerinnen und Schüler beispielsweise mit dem Prinzip der Minimierung der Energie bei fraktalen Wachstumsprozessen argumentieren, muss überlegt werden, dieses Prinzip prominenter in der Elementarisierung zu verankern.

Fraktale Strukturen können einen Zugang zum Verständnis von Strukturbildungen in der belebten und unbelebten Natur eröffnen. Komplexe Strukturbildungen ansatzweise zu verstehen, ist ein Aspekt von naturwissenschaftlicher Grundbildung, die jungen Menschen zugute kommen sollte. Damit dies gelingen kann, müssen Theorien zu Strukturbildungen didaktisch rekonstruiert werden. Die Ergebnisse aus unseren empirischen Studien geben deutliche Hinweise, dass Schülerinnen und Schüler am Ende der Sekundarstufe I und in den Stufen 11 bis 13 (vgl. Kapitel 7) in der Lage sind, die grundlegenden Phänomene von Strukturbildungen zu erfassen und die Grundideen der Strukturbildungstheorien zu verstehen. Es besteht also gute Aussicht, auch weitergehende Ideen wie z.B. Aspekte der Selbstorganisation und der „Emergenz“ für die allgemeinbildende Schule aufzuarbeiten. Damit kann Schülerinnen und Schülern die heutige Sicht der Naturwissenschaften auf Naturprozessen nahegebracht werden - zudem können Schülerinnen und Schüler unterstützt werden, ein adäquates Bild vom Vorgehen der Naturwissenschaften und von ihren Grundannahmen zu entwickeln.

## 7. Ein Unterrichtskonzept zur nichtlinearen Physik in der gymnasialen Oberstufe



In diesem Kapitel wird ein Unterrichtskonzept zur nichtlinearen Physik für Kurse der gymnasialen Oberstufe vorgestellt. Es ist mit einer Gruppe erfahrener Physiklehrpersonen entwickelt und erprobt worden. Im Abschnitt 7.1 werden die Ziele des Unterrichts und die Evaluationsaufgaben des begleitenden Forschungsprozesses beschrieben. Die mitwirkenden Schülerin und Schüler, die Art und Weise der Unterrichtsentwicklung und der Abfolge der Erprobungen werden im Abschnitt 7.2 dargestellt. Im Abschnitt 7.3 wird der Unterrichtsentwurf, der in Form von Modulen strukturiert ist, vorgestellt, bevor im Abschnitt 7.4 die Erhebungs- und Evaluationsinstrumente beschrieben werden. Die Abschnitte 7.5 und 7.6 fassen die Ergebnisse der Erprobung und Evaluation zusammen.

### 7.1 Konzeption, Ziele und Evaluationsaufgaben

In der hier präsentierten Studie (KOMOREK et al., 2002a,b, 2003) ist Unterricht für Kurse (vor allem auf nicht erhöhtem Niveau bzw. für Grundkurse) der gymnasialen Oberstufe entworfen und erprobt worden. Thematisch befasst sich der Unterricht mit zentralen Begriffen und Prinzipien der nichtlinearen Physik, wie sie im fünften Kapitel diskutiert worden sind. Hinter der Entwicklung eines solchen Unterrichts hat die Absicht gestanden, Inhalte der modernen Physik einer breiten Schülerklientel nahe zu bringen. Berufspropädeutische Absichten sind mit dem entwickelten Unterricht nicht verbunden. Angestrebt ist vielmehr die Entwicklung von Orientierungswissen, das Schülerinnen und Schülern die Teilhabe an der wissensbasierten Gesellschaft ermöglicht (vgl. Kapitel 3; vgl. BAUMERT, 1997; OECD, 1999). Wie in Kapitel 3 diskutiert, sind die Konzepte der nichtlinearen Physik als Teile einer naturwissenschaftlichen Grundbildung wünschenswert. Dieses Ziel wirksam umzusetzen, scheint u.a. durch einen Unterricht für Grundkurse zu gelingen. Er erreicht viele Schülerinnen und Schüler eines Jahrgangs, und zwar auf einer Entwicklungsstufe, auf der sie kognitiv die Komplementarität von dynamischer Instabilität und Strukturbildungen nachzuvollziehen können.

Die Entwicklung des fachdidaktischen Denkens der Lehrpersonen (vgl. Abschnitte 2.2 und 4.3) hat in den Erprobungen nicht im Mittelpunkt gestanden. Wenngleich sich durch die Beschäftigung mit den neuen Inhalten Entwicklungen in diesem Bereich abgespielt haben, hat die vorliegende Studie in erster Linie auf eine fachliche Öffnung des Kursunterrichts abgezielt. Damit gekoppelt ist eine methodische Akzentverschiebung hin zu kognitiv anregenden, schülerorientierten Unterrichtsmethoden gewesen. Schülerinnen und Schüler haben in Partner- oder Gruppenarbeit eigenständig das Verhalten nichtlinearer Systeme untersucht und sind eigenen Hypothesen nachgegangen. Wie sich in den Analysen gezeigt hat, hat die methodische Öffnung zu Rückwirkungen auf das fachdidaktische Denken der beteiligten Lehrpersonen geführt.

Bei der Planung des Unterrichts sind folgende Eckpunkte berücksichtigt worden: Die Unterrichtseinheit soll rund 18 Unterrichtsstunden umfassen und in Grundkursen der Oberstufe verschiedener Gymnasien erprobt werden. Die Einheit soll von einem Team aus erfahrenen Lehrper-

sonen unter Beteiligung eines Physikdidaktikers entworfen werden, nachdem die Lehrpersonen die zugrundeliegende Sachstruktur kooperativ und im Sinne des in Kapitel 2 präsentierten Modells didaktisch rekonstruiert haben. Der Unterricht soll durch Eigenaktivität der Schülerinnen und Schüler, durch ausgeprägte Gruppenarbeitsphasen und - dort wo es zwanglos möglich ist - durch eine Orientierung an alltagsweltlichen Kontexten gekennzeichnet sein. Die Einheit soll modular aufgebaut sein, jedes Modul soll zwei bis vier Unterrichtsstunden umfassen. Die Module sollen vielfältig kombinierbar sein, so dass wie in einem Baukastensystem individuelle Unterrichtsgänge entstehen können. Trotz einer variablen Unterrichtsstruktur soll die zugrunde liegende Sachstruktur abgebildet werden.

**Unterrichtsziele.** Im Lehrerarbeitskreis haben sich die Beteiligten darauf verständigt, Klafkis Kriterien für eine Inhaltsauswahl (vgl. KLAFKI, 1969; Tab. 7.1) als eine Grundlage für die Didaktische Rekonstruktion und für die Unterrichtsentwicklung zu übernehmen. Neben der Erfüllung dieser Kriterien sind im Unterricht eine Reihe von spezifischen Zielen, wie sie in Kapitel 3 diskutiert worden sind, zu erreichen gewesen (vgl. Abb. 7.1). Sie sind im Lehrerarbeitskreis diskutiert worden und haben einen Ausgangspunkt bei der Entwicklung von Unterrichtsmodulen gespielt. Im folgenden sind sie zu Zielbereichen zusammengefasst worden.

### **Zielbereich A**

**Spezifische Eigenschaften und konzeptuelle Ausrichtung der nichtlinearen Physik.** Der Unterricht über nichtlineare Systeme und nichtlineare Phänomene soll vermitteln, worin das Spezifische der nichtlinearen Physik gegenüber linearer Physik liegt. Die Schülerinnen und Schüler sollen lernen, ...

- **(A1)** ... welche Phänomenbereiche und einzelnen Phänomene durch nichtlineare Physik erschlossen werden, die mit linearer Physik nicht erschlossen werden können. Dazu gehören komplexe Phänomene mit mesoskopischen Größenordnungen wie das Wetter, physikalische Spielzeuge, hydrodynamische Phänomene wie z.B. Wirbel oder quasi-stochastische Phänomene (vgl. Klafki-Kriterium K2). Dazu gehören auch Phänomene, die eine Anbindung an lebensweltliche Erfahrungen zulassen, also eine lebensweltliche Bedeutung haben (K1, K3).
- **(A2)** ... welches methodische Vorgehen in der nichtlinearen Physik typisch ist (K2). Dazu gehört es zu verstehen, wie nichtlineare Systeme qualitativ und quantitativ beschrieben werden, wie mathematische Modelle entwickelt werden (nichtlineare Modelle, fraktale Beschreibungen) und wie die Komplexität der aufgenommenen Daten nichtlinearer Systeme reduziert werden kann (z.B. Phasenraumdarstellungen).
- **(A3)** ... wie in der nichtlinearen Physik die konzeptuellen Grundlagen anhand elementarer, komplementärer Begriffspaare betont werden (K2):
- Einfachheit und Komplexität; Linearität und Nichtlinearität; Ordnung und Chaos; (dynamische) Instabilität und (strukturelle) Stabilität oder Superposition und Selbstorganisation.
- **(A4)** ... wie nichtlineare Physik in das interdisziplinäre Forschungsprogramm der nichtlinearen Dynamik eingebunden ist und welche Ziele dieses Programm verfolgt. Dazu gehört es, einen Einblick in aktuelle Forschung zu gewinnen (K1), zu verstehen, inwiefern nichtlineare Physik und nichtlineare Dynamik einen strukturwissenschaftlichen Ansatz verfolgen (K2). Dazu gehört auch, Bezüge zu anderen Wissenschaftssparten herzustellen, etwa zu anderen Natur- und Geowissenschaften oder zur Medizin (K2).
- **(A5)** ... wie die nichtlineare Physik zu Diskussionen über einen naturwissenschaftlichen Paradigmenwechsel geführt hat (Stichwort „neue Denkweisen/Sichtweisen“). Dazu gehören auch philosophische und weltanschauliche Überlegungen.

- **Bedeutsamkeit (K1).** Der betreffende Inhalt bzw. die an diesem Thema zu gewinnenden Erfahrungen, Erkenntnisse, Fähigkeiten und Fertigkeiten sollen bereits eine Bedeutung im geistigen Leben des Lernenden besitzen und darüber hinaus auch für seine Zukunft bedeutsam sein.
- **Exemplarische Erschließung (K2).** Der Inhalt vertritt und erschließt einen größeren und allgemeineren Sinn- und Sachzusammenhang. In der Auseinandersetzung mit diesem Inhalt lassen sich Urphänomene und Grundprinzipien, Gesetze, Kriterien und Probleme sowie Methoden, Techniken und Haltungen „exemplarisch“ erfassen.
- **Zugänglichkeit (K3).** Die Struktur des Inhalts lässt diesen an besonderen Fällen, Phänomenen und Situationen dem Lernenden einer bestimmten Bildungsstufe interessant, „frag-würdig“, zugänglich, begreiflich und „anschaulich“ erscheinen.

Tab. 7.1 Kriterien für die Inhaltsauswahl nach KLAFKI (1969)

### Zielbereich B

**Konzepte und Prinzipien der nichtlinearen Physik verstehen.** Der Unterricht soll die wesentlichen modellhaften Überlegungen und Forschungsergebnisse der nichtlinearen Physik vermitteln. Schülerinnen und Schüler sollen dabei lernen, ...

- **(B1)** ... wie es im Gegensatz zu den „linearen“ Systemen zu einer eingeschränkten Vorhersagbarkeit nichtlinearer, insbesondere chaotischer Systeme kommt. Dazu gehört es, den Aspekt der „dynamischen Instabilität“ und den damit einher gehenden Wegfall starker Kausalität zu verstehen. Dazu gehört auch, die Verstärkung kleiner Störungen und Anfangsunsicherheiten und die dafür im System liegenden strukturellen Gründe nachzuvollziehen. Die Schülerin und Schüler sollen hier lernen, dass bei diesen Systemen die Konzepte Determinismus und Vorhersagbarkeit entkoppelt sind (K2), d.h. bestimmte Systeme nur bedingt vorhersagbar sind, obwohl sie vollständig determiniert sind.
- **(B2)** ... wie Ordnung und Chaos zusammenhängen und sich Ordnungsstrukturen in chaotischen Systemen zeigen. Hierbei geht es darum, den Aspekt der „strukturellen Stabilität“, der sich insbesondere in der Existenz chaotischer Attraktoren zeigt, zu verstehen. Ziel ist es, den komplementären Zusammenhang von dynamischer Instabilität und struktureller Stabilität zu verstehen und die Betrachtung auf mehreren Systemebenen nachzuvollziehen. Schülerinnen und Schüler sollen lernen, dass eine Koexistenz von Ordnungsaspekten und Chaos in ein und demselben System möglich ist.
- **(B3)** ... wie Komplexität „fassbar“ geworden ist, wie also Ansätze zur Beschreibung komplexen Systemverhaltens tiefere Einsichten ermöglichen. Verbunden damit ist das Verständnis von nichtlinearen Modellen und der Datenaufbereitung mit Hilfe des Computers.
- **(B4)** ... wie selbstorganisierende Struktur- und Musterbildungsprozesse beschrieben werden. Verbunden damit ist die Einsicht, dass Selbstorganisation mit Prozessen der Verstärkung, der Rückkopplung und der Selbstregulation verknüpft ist.



Abb. 7.1 Zielbereiche des Unterrichtskonzepts

### **Zielbereich C**

**Anwendungssituationen.** Der Unterricht soll vermitteln, welche interdisziplinären Anwendungen theoretische Einsichten und experimentelle Ergebnisse der nichtlinearen Physik hervorgebracht haben (K1). Die Schülerinnen und Schüler sollen lernen, wie in Sparten wie der Medizin, beim Verstehen von Wahrnehmungsprozessen, bei der Beschreibung von Materialeigenschaften oder bei der Steuerung chaotischer Systeme die Methoden und Theorieansätze der nichtlinearen Physik angewendet werden. Sie sollen damit ein Verständnis für die gesellschaftliche Relevanz des Themas entwickeln.

### **Zielbereich D**

**Naturwissenschaftliches Denken und Arbeiten.** Und schließlich sollen die Schülerinnen und Schüler dazu befähigt werden, nichtlineare Phänomene in der Alltags- und Lebenswelt als solche zu erkennen, nichtlineare Laborsysteme zu beschreiben und eigenständig zu erforschen. Sie sollen eigene Hypothesen über das Verhalten dieser Systeme aufstellen und experimentell überprüfen, um durch die Wechselwirkung zwischen Modellieren und Experimentieren ein Verständnis der Systeme zu entwickeln. Darüber hinaus sollen sie Ihr Bild von der Physik und der belebten und unbelebten Natur erweitern, indem sie lernen, wie aus Beobachtungen, Experimenten und Modellbildungen wissenschaftstheoretische und auch weltanschauliche Folgerungen gezogen und diskutiert werden können.

**Evaluationsaufgaben.** In der vorliegenden Evaluation sind alle ablaufenden Prozesse der Unterrichtsplanung, -erprobung und -weiterentwicklung formativ evaluiert worden. Damit ist untersucht worden, ob ein Unterrichtskonzept entwickelt werden kann, das die Komplementarität von dynamischer Instabilität und Strukturbildung adressatengerecht vermittelt. Um diese generelle Frage zu klären, ist im Sinne einer Operationalisierung eine Reihe von Indikatoren untersucht worden. Ein Indikator sind die oben beschriebenen Unterrichtsziele der Bereiche A bis D. Inwieweit sind sie durch das Unterrichtskonzept erreicht worden? Welche Lernprozesse haben die Schülerinnen und Schüler durchlaufen? Auch auf Seiten der Lehrpersonen ist untersucht worden, inwiefern bei ihnen konzeptuelle Entwicklungen festzustellen sind. Ein weiterer Indikator bildet die Wechselwirkung zwischen den Rekonstruktionsprozessen im Lehrerteam, der rekonstruierten Sachstruktur und den Lehr- und Lernprozessen. Und schließlich ist die Praxistauglichkeit und die Variabilität des Unterrichtskonzepts als weiterer Indikator untersucht worden. Die verschiedenen Indikatoren werden im folgenden in Form von Untersuchungsfragen weiter differenziert.

**Rekonstruktionsprozesse und Unterrichtskonstruktion.** Die Prozesse der fachlichen Klärung und Didaktischen Rekonstruktion einschließlich der Entwicklung von Unterricht, die während der Treffen des Lehrerarbeitskreises stattgefunden haben, sind mit Hilfe folgender Fragen untersucht worden (vgl. hierzu die obligatorischen Fragen im Rahmen einer Didaktischen Rekonstruktion in KATTMANN et al., 1997, bzw. in Kapitel 2; vgl. HEIMANN et al., 1969):

- Welche Unterrichtsziele möchte die Gruppe mit dem Unterricht zur nichtlinearen Physik erreichen und warum? (Hierüber geben die Zielbereiche A bis D bereits Auskunft.)
- Welche Auswahl von Inhalten trifft die Gruppe und wie hängen sie mit den Zielen zusammen? Welche Prozesse der Elementarisierung laufen ab?
- In welcher Weise werden die zu vermittelnden Inhalte rekonstruiert? Welche Sachstruktur entwickelt sich?
- Welche einbettenden Bezüge zu gesellschaftlichen Fragen, zur Alltagswelt oder zu historischen Fragen werden hergestellt?
- Welche kooperativen Prozesse laufen im Arbeitskreis ab?

- Wie wird die Sachstruktur in ein Unterrichtskonzept überführt? Welche Entscheidungen über Methoden, Medien und Materialien und über Sequenzierungen werden getroffen?
- Inwiefern fließen die Praxiserfahrungen der Lehrpersonen in die Didaktische Rekonstruktion und die Unterrichtskonstruktion ein?

**Lernprozesse und Einschätzungen der Lehrpersonen.** Bezogen auf die Lernprozesse und Sichtweisen der Lehrpersonen sollen folgende Fragen untersucht werden:

- Von welchem Vorwissen von Determinismus, Zufall und chaotischen Systemen gehen Lehrpersonen aus? Wie erweitert sich ihr Wissensstand während der Rekonstruktionsphase und der Erprobungsphase?
- Welche Änderungen bezüglich der Bedeutung der nichtlinearen Physik für die Physik und für den Unterricht ergeben sich bei den Lehrpersonen? Welchen Einfluss haben die Rekonstruktionsprozesse darauf?
- In welcher Weise verändert sich die Sicht der Lehrpersonen auf die Umsetzbarkeit des Themas in der Schule? Wie ändert sich ihre Einschätzung über Lernmöglichkeiten und Lernschwierigkeiten bei ihren Schülerinnen und Schülern?

**Lernprozesse und Einschätzungen der Schülerinnen und Schüler.** Ein wichtiger Indikator für die Umsetzbarkeit des Themas sind die Lernprozesse der Schülerinnen und Schüler. Da sie zudem als Experten für Unterricht angesehen worden sind, sind auch ihre Änderungsvorschläge zum Unterricht untersucht worden.

- Von welchen vorunterrichtlichen Vorstellungen gehen die Schülerinnen und Schüler im Bereich Zufall, Determinismus und Chaos und Strukturbildung aus?
- Wie ändern sie ihre vorunterrichtlichen Vorstellungen aufgrund des Unterrichts? Werden diese Vorstellungen kontinuierlich ausdifferenziert oder erfolgen großräumige Umstrukturierungen?
- Welchen Einfluss hat die rekonstruierte Sachstruktur und das Unterrichtskonzept auf die Lernprozesse der Schülerinnen und Schüler? Welchen Einfluss haben die Unterrichtsmaterialien und die Experimente auf die Lernprozesse der Schülerinnen und Schüler? Welchen Einfluss haben Prozesse der sozialen Bedeutungskonstruktion in der Gruppe oder in der Klasse?
- Welche Vorschläge machen Schülerinnen und Schüler dazu, wie das Unterrichtskonzept verändert werden sollte? Wie beurteilen Sie die eingesetzten Lernhilfen?

**Praxistauglichkeit und Variabilität des Unterrichtskonzepts.** Ein weiterer wichtiger Indikator für die Umsetzbarkeit eines Unterrichtskonzeptes ist, inwieweit es für den Einsatz im realen Unterricht tauglich ist und inwiefern es an verschiedene Unterrichtsformate angepasst werden kann. Dazu sind folgende Untersuchungsfragen bearbeitet worden:

- Welche Beziehung besteht zwischen der rekonstruierten Sachstruktur, dem Unterrichtskonzept und den Lernprozessen der Schülerinnen und Schüler?
- Inwiefern lässt sich das Unterrichtskonzept im realen Unterricht, in verschiedenen Unterrichtsformaten (Kurs, Klassenunterricht, Projekt) mit unterschiedlichen Schülerpopulationen umsetzen?
- Welche Modifikationen des Unterrichtskonzepts finden zwischen den Unterrichtserprobungen statt? Welche Gründe liegen dafür vor?
- Welche Änderungsvorschläge zum Unterrichtskonzept formulieren die Lehrpersonen? Welche Modifikationen schlagen die Schülerinnen und Schüler vor?

## 7.2 Populationen und Setting

**Aufbau des Lehrerkreis und Sitzungen.** Eine Gruppe von Lehrpersonen für ein neues Projekt zu gewinnen, ist kein einfaches Unterfangen, wenn aktive und zeitintensive Mitarbeit gefordert ist und Ausgleichstunden nicht gewährt werden. Das Interesse am Thema oder an nutzbaren Materialien muss daher hoch sein. Lehrpersonen in den ersten fünf Jahren ihrer eigenverantwortlichen Tätigkeit sind für das vorliegende Projekt nicht in Frage gekommen, weil sie sich noch nicht die notwendigen zeitlichen Ressourcen geschaffen und weil sie kaum die Expertise entwickelt haben, die für das Projekt wichtig ist. Diese Expertise besteht darin, in vielen unterschiedlichen Situationen handelnd tätig gewesen zu sein, viele verschiedene Konzeptionen für Unterricht entwickelt und umgesetzt sowie dabei fachdidaktische Beurteilungskompetenz entwickelt zu haben.

Zu Beginn des Projekts ist Infomaterial an die Physikpersonen von 28 Gymnasien in Kiel und Umland verschickt worden. Aus den Interessierten hat sich ein Arbeitskreis von sechs Lehrpersonen aus vier Gymnasien in Kiel und Bad Bramstedt zusammen gefunden (eine Kollegin und fünf Kollegen, jeweils mindestens Studienrat); das Alter hat zwischen 43 und 60 Jahren gelegen, die Schulerfahrung hat mindestens 15 Jahre betragen. In einer Auftaktveranstaltung sind die Unterrichtsziele und Evaluationsaufgaben besprochen worden. Bereits vorhandene Materialien und Software sind vorgestellt worden und der Projektleiter (der Autor) hat die Lehrpersonen über bisherige Aktivitäten im Feld der Vermittlung nichtlinearer Physik informiert. Die Teilnehmer haben Wünsche und Bedenken bzgl. des Projektes geäußert. Ein Wunsch hat darin bestanden, das der Projektleiter beim zweiten Treffen Basisinformationen über nichtlineare Physik und bisherige Erfahrung mit ihrer Vermittlung darbietet.

Bis zur ersten Unterrichtserprobung haben fünf Sitzungen des Arbeitskreises von je rund 90 Minuten Dauer in den Räumen des IPN in Kiel stattgefunden. Der durchschnittliche Abstand zwischen den Sitzungen hat ca. einen Monat betragen. Zwischen erster und zweiter Erprobung hat es eine weitere Sitzung mit allen Teilnehmern gegeben. Später haben Treffen zwischen Projektleiter und denjenigen Lehrpersonen stattgefunden, die jeweils die nächste Erprobung durchgeführt haben. Abb. 7.2 zeigt die zeitliche Abfolge der Sitzungen und Erprobungen. Der Zeitraum zwischen Auftaktveranstaltung und dem Abschluss der Erprobungen hat 14 Monate betragen.

**Unterrichtsformate der Erprobung.** Das Unterrichtskonzept ist in verschiedenen Unterrichtsformaten erprobt worden (vgl. Abb. 7.2). Drei Physikgrundkurse und zwei Projektkurse aus vier Schulen haben an den Erprobungen teilgenommen. Diese Verteilung ist dadurch begründet, dass den Lehrpersonen des Arbeitskreises genau diese genannten Kurse zur Verfügung gestanden haben.

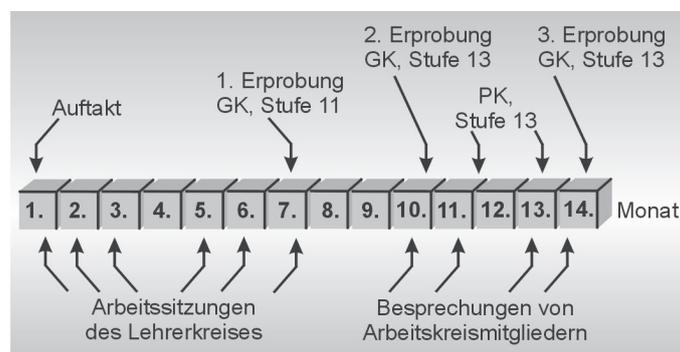


Abb. 7.2 Zeitlicher Verlauf der Erprobungen; die Gesamtdauer der Erprobungen hat 14 Monate betragen. (GK: Grundkurs, PK: Projektkurs)

*Erste Erprobung.* In Schleswig-Holstein gibt es das Format des Vertiefenden Unterrichts (VU) in Klasse 11, durch das insbesondere das Methodenlernen gefördert werden soll. Der hier zur Verfügung stehende VU ist als Kurs angeboten worden, der an drei aufeinander folgenden Tagen mit insgesamt 15 Zeitstunden abgehalten worden ist. Er hat sich aus Teilnehmern von Physikgrundkursen zusammengesetzt und hat folgende Kennzahlen: 16 Teilnehmer, davon 7 Mädchen, das Durchschnittsalter hat 17 Jahre und ein 1 Monat betragen (aus den ganzzahligen Altersangaben bestimmt). Der Unterricht hat teils in regulären Klassenräumen, teils im Physikfachraum, teils im Computerraum stattgefunden. Der gesamte Unterricht ist videographiert worden.

*Zweite Erprobung.* Im Rahmen eines „klassischen“ Physikgrundkurses in der Stufe 13 ist die zweite Erprobung in einer weiteren Schule durchgeführt worden. Sie hat drei Monate nach der ersten Erprobung stattgefunden. Der Kurs hat die folgenden Kennzahlen: 12 Teilnehmer, davon 5 Mädchen; das Durchschnittsalter hat 19 Jahre und 1 Monat betragen. Der Unterricht hat ebenfalls teilweise im regulären Unterrichtsraum und teilweise im Computer- bzw. Physikfachraum stattgefunden. Für die Unterrichtserprobung sind 18 Unterrichtsstunden eingeplant gewesen. Auch dieser Unterricht ist vollständig per Video dokumentiert worden.

*Dritte Erprobung.* Im zweiten Halbjahr einer 11. Jahrgangsstufe ist die dritte Erprobung in einem Physikgrundkurs in einer weiteren Schule durchgeführt worden. Sie hat 6 Monate nach der ersten Erprobung stattgefunden. Die Kennzahlen des Kurses sind: 13 Teilnehmer, davon 7 Mädchen; Durchschnittsalter: 17 Jahre und 9 Monate. Ein regulärer Unterrichtsraum und ein Computerraum haben zur Verfügung gestanden. Für den Unterricht sind 16 Unterrichtsstunden vorgesehen gewesen. Der gesamte Unterricht ist videographiert worden.

*Projektkurse.* Im Stundenumfang eines zweistündigen Kurses (rund 27 Zeitstunden) sollen in einem Projektkurs Schülergruppen der Stufe 13 selbst gewählte oder vorgeschlagene Projekte eigenständig bearbeiten und die Ergebnisse schulöffentlich präsentieren. Die Zeiteinteilung nehmen die Gruppen selbständig vor, die Anwesenheit in der Schule ist nur zu vereinbarten Terminen notwendig. Zwei Projektkurse haben an den Erprobungen teilgenommen (vgl. Abb. 7.2). In einem der Projektkurse haben die Schülerinnen und Schüler von der freien Zeiteinteilung Gebrauch gemacht; dieser Kurs umfasste 12 Schülerinnen und Schüler. Daten von den ablaufenden Prozesse haben nur eingeschränkt gesammelt werden können; Videoaufnahmen haben nicht stattgefunden, ausschließlich Feldnotizen und Interviews sind angefertigt bzw. geführt worden. Der zweite Projektkurs an einer anderen Schule hat im klassischen Kursformat stattgefunden, allerdings mit großen eigenverantwortlichen Arbeitsteilen der Schülerinnen und Schüler, während der Lehrpersonen weitgehend beratende Funktion übernommen hat. Auch an diesem Kurs haben 12 Schülerinnen und Schüler teilgenommen, Daten stammen aus Feldnotizen und Interviews.

### **7.3 Module, Materialien und Ablaufvarianten**

Das vom Arbeitskreis entwickelte Unterrichtskonzept ist modular aufgebaut. Sehr früh hat sich die Überzeugung durchgesetzt, dass eine Strukturierung in Module eine Möglichkeit darstellt, um ein Unterrichtskonzept in unterschiedlichen Kursformaten umzusetzen und um den Lehrpersonen Freiräume zu geben, den Unterricht an ihren individuellen Unterrichtsstil anzupassen. Die grundlegende Ausrichtung der Module hat sich an den Konzepten von dynamischer Instabilität und strukturaler Stabilität orientiert. Der Arbeitskreis hat darüber hinaus Module entwickelt, die beide Konzepte in den Kontext von Weltverständnis und naturwissenschaftlichem Weltbild einordnen.

Die im folgenden beschriebenen Module sind bereits als ein Ergebnis zu verstehen, das im Lehrerarbeitskreis durch das Zusammenkommen der Kompetenzen der beteiligten Lehrpersonen und Fachdidaktiker entwickelt worden ist. Die Module sind zwischen den Erprobungen vom

## 7. Ein Unterrichtskonzept zur nichtlinearen Physik in der gymnasialen Oberstufe

Arbeitskreis modifiziert worden. Die hier gewählte Darstellung gibt den Stand nach der letzten Modifikation wieder. Die eingesetzten Materialien, Arbeitsbögen und Infoblätter werden nachfolgend nur auszugsweise vorgestellt. In ungekürzter Fassung befinden sie sich im Anhang. Gleiches gilt für die Bauanleitungen der verwendeten Objekte (die entsprechenden Dateien sind beim Autor erhältlich). Bei der Beschreibung der Module wird neben den Materialien und Medien auch auf die Zielbereiche A - D und Methoden zur Umsetzung der Ziele Bezug genommen. Die Titel der sechs Module deuten die inhaltlichen Schwerpunkte an und sollen im Unterricht das Interesse der Schülerinnen und Schüler hervorrufen.

### Modul: Himmelsmechanik - Erfolge und Ängste

**Ziele:** Das Modul soll in die Thematik einführen und den Aspekt der Berechenbarkeit in der Physik problematisieren. Als Beispielbereich wird der Kontext „Himmelsmechanik“ gewählt. Sie stellt einerseits ein Paradebeispiel für Berechenbarkeit und Vorhersagbarkeit dar, andererseits kann man über Asteroideneinschläge oder die Stabilität von Planetensystemen nur bedingt Vorhersagen machen. Die Zielbereiche B und C (siehe Abschnitt 7.1) stehen im Mittelpunkt.

**Inhalte und Sachstruktur:** Anfangs Infoblätter mit Begriffen, um die es gehen wird, als Aufmacher. Es werden vier Texte und zwei Videos auf ihre zentralen Aussagen bzgl. der Vorhersagbarkeit von Bewegungen im Planetensystem hin analysiert. Zwei Texte ergänzt durch ein Video stehen für die Erfolge präziser Berechenbarkeit im Sonnensystem. Demgegenüber stehen zwei Texte, die sich mit dem Problem der Langzeitvorhersage im Sonnensystem befassen, ergänzt durch ein Video zu den instabilen Bahnen von Asteroiden. Die Schülerinnen und Schüler sollen zwei gegensätzliche Aspekte des Planetensystems bzgl. Vorhersagbarkeit herausarbeiten und diskutieren. Die Ergebnisse der Text- und Videoanalyse werden in der Klasse zusammengefasst und diskutiert.

☞☞☞ Arbeitsbögen A bzw. AA, Texte T1/T2 und T3/T4, Infoblätter

Im zweiten Teil des Moduls sammeln die Schülerinnen und Schüler Erfahrungen mit der Stabilität bzw. Instabilität eines Mehrkörperproblems. Hier bietet sich die Möglichkeit, die Aufgabe durch Einsatz eines sphärischen Pendels, das von außen durch Magnete gestört wird, zu motivieren. Schülerinnen und Schüler simulieren am Computer ein Sonnensystem; zunächst als Zweikörperproblem, dann als Drei- und Mehrkörperproblem.

☞☞☞ Arbeitsbögen B bzw. BB, Programme xyZET bzw. deepsail, Infoblätter

**Voraussetzungen:** Kompetenzen in der Analyse von Texten und Videos  
Grundwissen über die Struktur des Sonnensystems  
evtl. Modul "Dynamisch instabil - ..."

#### Berechenbarkeit in der Physik

- präzise Berechenbarkeit als Erfolg der Physik/Astronomie  
Beispiel: Berechnung der Neptunposition, T1  
Beispiel: exakte Vorhersage der Sonnenfinsternis von 1999, T1, V1

#### Schwierigkeiten der Vorhersage in der Physik

- eingeschränkte Berechenbarkeit in der Astronomie  
Beispiel: Stabilität vs. Instabilität des Sonnensystems, T4  
- Unsicherheit kann Angst erzeugen  
Beispiel: Asteroideneinschläge T3, V2



Widerspruch?

#### Arbeitsbogen B

- Erfahrungen mit simulierten Planetensystemen:  
xyZET, deepsail

**Auflösung des Widerspruchs:**  
Parameterabhängigkeit der Stabilität/Instabilität

**Anschluss:** Modul "Dynamisch instabil - ...", weitere Module

**Methoden/Formate:** Bei der Bearbeitung der Arbeitsbögen A bzw. AA zunächst Einzelarbeit, dann Partnerarbeit zum Abgleich der individuellen Ergebnisse, danach Klassendiskussion zum Abgleich der Ergebnisse in der Klasse. Partnerarbeit bei der Simulation des Sonnensystems am Computer, danach Klassendiskussion. Arbeit mit dem Computer umfasst in etwa die Hälfte der Unterrichtszeit. Das Modul kann auch später im Unterrichtsgang, insbesondere nach dem Modul zur dynamischen Instabilität eingesetzt werden (dann Arbeitsbogen AA). Weitere Texte T5-T10 können eingesetzt werden.

**Zeitlicher Rahmen:** Erster Teil des Moduls einschließlich der Videoszenen: 70-90 min; Übergang mit Magnetpendel 0-20 min; Simulation am Computer: 70-90 min; Zusammenfassung und Ergebnissicherung: 10-20 min;  $\Sigma = 150-220$  min.

Materialien, Objekte, Arbeitsbögen:

- Infofolie Begriffe
- Text T1 zur Berechnung der Neptunposition (ca. halbe DIN A4 Seite); Text T2 zur exakten Vorhersage der totalen Sonnenfinsternis 1999 (ca. ½ DIN A4-Seite)
- Video V1 zur totalen Sonnenfinsternis 1999 (ca. 7 min)
- Text T3 zur Stabilität des Planetensystems (ca. ¾ DIN A4-Seite); Text T4 zur mangelnden Vorhersagbarkeit von Asteroideneinschlägen (ca. ■ DIN A4-Seite)
- evtl. Texte T6 -T10
- Video V2 zur Instabilität von Asteroidenbahnen (ca. 25 min)
- Arbeitsbogen A, bzw. AA, zur Analyse der Texte und Videos
- Software xyZET (IPN, Springer) zur Simulation eines stabilen Sonnensystems am Computer
- Software „deepsail“ zur Simulation eines Dreikörperproblems am Computer
- Arbeitsbögen B und BB zur Computerarbeit
- Infofolie „Asteroideneinschläge“ zur Unterstützung der Klassendiskussion
- Infofolie „Aufbau des Sonnensystems“ zur Unterstützung der Klassendiskussion
- Infofolie „Stabilität des Sonnensystems“ zur Unterstützung der Klassendiskussion

**Ergebnisse:** Die zentrale Frage lautet, ob es nicht ein Widerspruch ist, dass das Sonnensystem einerseits exakte Berechnungen zulässt, andererseits seine Stabilität in Frage gestellt wird?

- Auch sehr einfache Systeme/Aufbauten zeigen beide Eigenschaften, exakte Periodizität und Berechenbarkeit sowie Instabilität.
- Gruppen finden Parameterkonstellationen für stabile und instabile Planetensysteme.
- Widerspruch wird aufgelöst: exakte Berechenbarkeit bei ungestörten Systemen in bestimmten Parameterbereichen, in anderen Parameterbereichen machen Störungen das System instabil und im Detail nicht-vorhersagbar.

**Modul: Dynamisch instabil - einfache Experimente helfen beim Verstehen**

**Ziele:** In diesem Modul suchen die Schülerinnen und Schüler in Gruppen selbständig nach Ursachen für die eingeschränkte Vorhersagbarkeit eines paradigmatischen Objekts, des Magnetpendels. Sie sollen damit nachvollziehen, wie dynamische Instabilität entsteht (B1). Eigenaktivität und Aushandeln von Bedeutungen in der Gruppe werden unterstützt und gefördert, eigenen Hypothesen soll nachgegangen werden (Zielbereich D). Auch der Zielbereich A ist tangiert (insbesondere A1), indem verdeutlicht wird, mit welchen Phänomenen sich nichtlineare Physik u.a. befasst.

**Inhalte und Sachstruktur:** Unter Einsatz eines (großen) Magnetpendels dreht sich eine lehrergeleitete Klassendiskussion um die Frage, welche Einflüsse auf das Pendel pro Pendeldurchgang konstant bleiben, welche Einflüsse sich jeweils ändern. Erste Hypothesen zu den Gründen eingeschränkter Vorhersagbarkeit werden an der Tafel fixiert. Problematisiert wird, dass die Detailvorhersagbarkeit nicht gegeben ist, obwohl zentrale Einflüsse und die bestimmenden Gesetzmäßigkeiten sich nicht ändern.

☞☞☞ (großer) Magnetpendelaufbau

In der Gruppenphase werden zunächst (kleine) Magnetpendel (mit Startvorrichtungen) sowie Plexiglasscheiben und Eisenfeilspäne eingesetzt, um die Kraftverhältnisse zu untersuchen. Danach werden sukzessive die Infolie „Berg und Wall“, die Elementaranaloga für das Magnetpendel darstellen, ein Würfel, eine Chaosschüssel, die die Potentialverhältnisse beim Magnetpendel in Höhen und Tiefen übersetzt, und evtl. ein Galtonbrett ausgegeben. Eigenständiges Untersuchen von Hypothesen für die Einschränkung der Vorhersagbarkeit im Detail. Analyse der Wirkung labiler Gleichgewichtslagen. Schülerinnen und Schüler stellen durch die wechselseitige Entschlüsselung der Objekte analoge Beziehungen zwischen diesen Objekten her; dadurch erste Generalisierung.

☞☞☞ (kleiner) Magnetpendelaufbau, Infolie „Berg und Wall“, Chaosschüssel, Würfel, evtl. Galtonbrett, Arbeitsbogen C

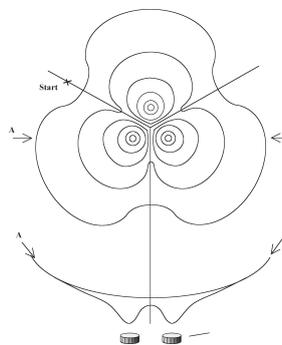
In der Klassendiskussion werden Untersuchungsergebnisse zusammengetragen. Vorschläge der Gruppen für eigene eingeschränkt vorhersagbare Systeme werden diskutiert. Ergebnisse werden an der Tafel festgehalten. Diskussion der Frage, inwiefern sich durch die Ergebnisse Vorstellungen vom Zusammenhang von Determiniertheit und Vorhersagbarkeit bzw. vom Bild von Physik verändern.

☞☞☞ Infolien „Feilspanbild“, „Einzugsgebiete“, „Potentialverhältnisse“

**Methoden/Formate:** In der Problematisierungsphase findet mit dem großen Magnetpendel eine lehrergeleitete Klassendiskussion statt; bei der Bearbeitung des Arbeitsbogens C Gruppenarbeit mit Gruppen von drei bis vier Schülerinnen und Schülern; danach Klassendiskussion zum Abgleich der Ergebnisse der Gruppen. Lehrergeleitete Klassendiskussion zur Interpretation der Gruppenergebnisse (u.a. Diskussion von Beispielen der Gruppen für eigene instabile Systeme).

**Zeitlicher Rahmen:** Erster Teil des Moduls (Klassengespräch zur Problematisierung): 15-25 min; Gruppenarbeit zur Bearbeitung des Bogens C: 50-70 min; Klassendiskussion, Zusammenfassung und Ergebnissicherung: 15-30 min;  $\Sigma = 80 - 125$  min.

zur Sachstruktur:



**Voraussetzungen:** Physikwissen: Kraft und Bewegung, Magnetfelder, Labilität; Alltagswissen: 'gleiche Ursache - gleiche Wirkung'; evtl. Modul "Himmelbeobachtung ..."

---

**Prinzip: Eingeschränkte Vorhersagbarkeit trotz Determiniertheit**

- Verhalten des Systems nur für kurze Zeit vorhersagbar
- Kleine Variationen des Starts und kleine Störungen wirken sich drastisch aus
- sensitive Zonen labilen Gleichgewichts werden wiederholt durchlaufen

---

**Anschluss:** Generalisierung und Begriffsbildung: Chaotisches Verhalten, chaotisches System; Modul zur Begriffsbildung

**Materialien, Objekte, Arbeitsbögen:**

- großes Magnetpendel, kleines Magnetpendel pro Gruppe, Magnete, elektromagnetische Startvorrichtungen
- „Chaosschüssel“ mit Stahlkugel pro Gruppe
- Plexiglasscheiben und Feilspäne aus Eisen, Infofolien „Feilspanbild zum Magnetpendel“
- evtl. Galtonbrett und Würfel je Gruppe
- Infofolien „Berg und Wall“ je Gruppe, evtl. Infotext „...Gleichgewicht...“
- Arbeitsbogen C
- Infofolien „Einzugsgebiete“ und „Potentialverhältnisse“ zur Unterstützung der Klassendiskussion
- Bauanleitung „Magnetpendel (inkl. physikalischer Erläuterungen)“, Bauanleitung „Chaosschüssel“

**Ergebnisse:** Die zentrale Frage lautet, warum das Verhalten des Magnetpendels im Detail nicht vorhersagbar ist, obwohl alle Gesetzmäßigkeiten im Prinzip bekannt sind?

- Formulierung von Gründen für eingeschränkte Vorhersagbarkeit: Es existieren Instabilitätsstellen, aufgrund derer kleine Störungen das Systemverhalten wesentlich beeinflussen, „kleine Ursache - große Wirkung“.
- Es existiert eine „Sensitivität“ gegenüber kleinen Störungen am Start und später.
- Beim Magnetpendel sind die Bereiche der Instabilität durch Bereiche gleicher Kraft zwischen den Magneten gegeben; werden von der Pendelkugel immer wieder durchlaufen.

**Modul: Analogiebildung und Begriffe - chaotische Prozesse generalisieren**

**Ziele:** Das Modul dient der Vertiefung der Erkenntnisse und der Erweiterung der Ziele des Moduls „Dynamisch instabil ...“. Unterschiedliche Objekte und auch Simulationen werden von Schülergruppen eigenständig daraufhin untersucht, wie bei ihnen Instabilitäten repräsentiert sind, die zur Einschränkung der Vorhersagbarkeit führen. Eine Binnendifferenzierung nach Interesse und kognitiven Leistungen ist dadurch möglich. Ziele in den Bereichen A, B und D werden verfolgt (vgl. Abschnitt 7.1). Insbesondere soll die Arbeit mit dem Computer zur Untersuchung nichtlinearer Systeme unterstützt werden. - In diesem Modul werden Begriffe ausgeschärft und den physikalischen Termini zugeordnet: chaotisches Verhalten, chaotisches System. Generalisierung mittels Analogiebildungen anhand phänomenologisch unterschiedlicher Objekte/Phänomene soll stattfinden.

**Inhalte und Sachstruktur:** Mindestens vier Aufträge werden bearbeitet.

a) Untersucht wird am Computer das Verhalten der logistischen Gleichung, einer diskreten Abbildung eines Zahlenintervalls auf sich selbst. Als Motivation dient ein Räuber-Beute-Szenario. Dazu wird ein Tabellenkalkulationsprogramm (z.B. Excel) genutzt. Die Abhängigkeit der Folgenglieder von einem Kontrollparameter wird systematisch analysiert. Die Ergebnisse werden der Klasse präsentiert.

☞☞☞ Tabellenkalkulationsprogramm, Arbeitsbögen E und EE (Hinweise zu Excel)

b) Für eine zweite Gruppe stehen eine Reihe von Objekten zur vergleichenden Analyse zur Verfügung; einige davon sind Alltagsgegenstände: Ein Doppelpendel, ein Galtonbrett, ein Spielwürfel, ein Bleistift. Diese Objekte werden nach Strukturmerkmalen untersucht, die für labile Systemsituationen verantwortlich sind. Auch Vergleiche mit Magnetpendel und Chaosschüssel werden gezogen. Ergebnisse der Analysen werden der Klasse präsentiert.

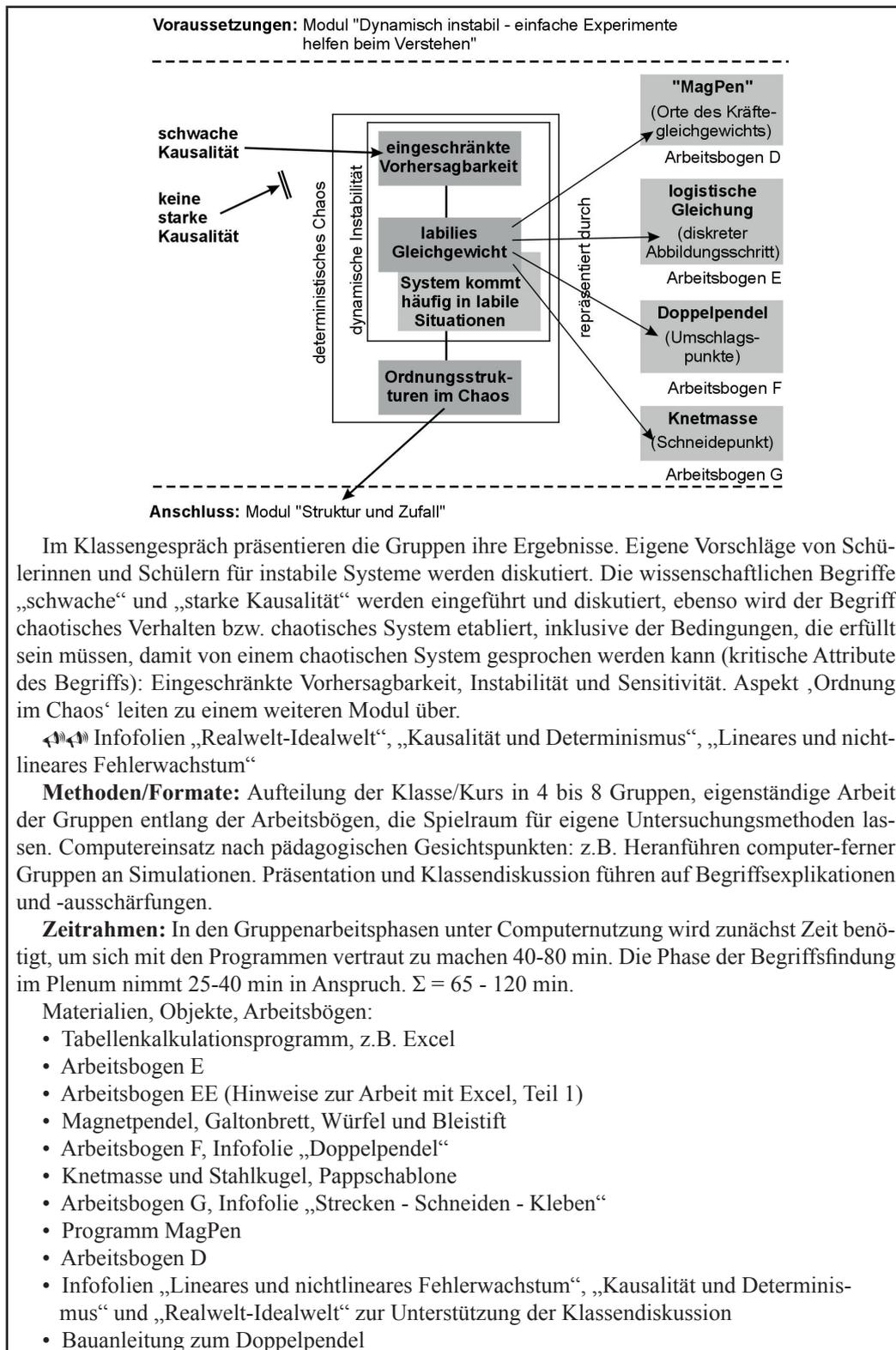
☞☞☞ Doppelpendel (mit Leuchtdioden und Knopfzellen), Galtonbrett, Spielwürfel, Bleistift, Arbeitsbogen F, Infofolie „Doppelpendel“, Bauanleitung Doppelpendel

c) Um haptisch orientierte Schülerinnen und Schüler anzusprechen, wird bei der Aufgabe „Strecken - Schneiden - Kleben“ Knetmasse mit Stahlkugeln eingesetzt. Hierbei wird die Sensitivität von diskreten Abbildungen gegenüber Anfangsfehlern und Abbildungsfehlern untersucht. Parallel zum realen System wird ein mathematisches Modell untersucht.

☞☞☞ Knetmasse (z.B. Modellierwachs), Stahlkugel  $\varnothing$  ca. 3 mm, Lineal, Bogen G

d) Mit dem Programm MagPen kann das Verhalten des Magnetpendels simuliert werden. Die Startbedingungen können reproduziert werden, Fehler können zu selbst festgelegten Zeitpunkten, aber zufällig in Größe und Orientierung, erzeugt werden. Schülerinnen und Schüler untersuchen das idealisierte System. Vergleiche mit dem realen System sind möglich. Eigenen Hypothesen wird nachgegangen. Beziehung zwischen Idealwelt-Modell und Realwelt-Modell werden hergestellt.

☞☞☞ Programm MagPen, evtl. reales Magnetpendel, Arbeitsbogen D



**Ergebnisse:**

- es existiert eine Sensitivität gegenüber Startwerten und Einflüssen von außen
- es existieren Instabilitäten, die sich je nach Objekt/System unterschiedlich repräsentiert sind
- Ausschärfung des Prinzips „eingeschränkte Vorhersagbarkeit trotz deterministischer Gesetzmäßigkeiten“ → „schwache Kausalität“ vorhanden, „starke Kausalität“ ist nicht gegeben
- Begriff „Instabilität“
- Begriff „chaotisches Verhalten“ als konjunktiver Begriff mit den kritischen Attributen:
  - Vorhersage ist eingeschränkt (starke Kausalität nicht gegeben)
  - es existieren Instabilitäten
  - System kommt wiederholt in instabile Situationen

**Modul: Struktur trotz Zufall - Muster spielen mit Zufällen**

**Ziele:** Das Modul zielt darauf, den zur dynamischen Instabilität komplementären Aspekt der Ordnung und der Strukturen zu thematisieren. Damit sind die Ziele A1, A2 und A3 berührt, bei denen die spezifisch neuen Phänomenbereiche der nichtlinearen Physik und die komplementären Beschreibungen im Vordergrund stehen. Das Zusammenspiel von Zufallsprozessen und deterministischen Gesetzen (B2 und B4) wird von den Schülerinnen und Schülern eigenständig untersucht. Die entstehenden Strukturen sollen qualitativ und teilweise quantitativ beschrieben werden (Zielbereich D). Verschiedene Objekte und Systeme werden in Gruppenarbeit untersucht, strukturelle Gemeinsamkeiten werden im Plenum herausgearbeitet. Auch die Komplementarität von Einfachheit und Komplexität wird untersucht (A3).

**Inhalte und Sachstruktur:** Mindestens fünf Aufträge werden in Gruppen bearbeitet. a) Eine Gruppe stellt einen Zinkdendriten her, eine elektrolytische, fraktal wachsende Abscheidung, und untersucht die Abhängigkeit der entstandenen Struktur von verschiedenen Parametern. Die Schülerinnen und Schüler analysieren die fraktale Struktur qualitativ und quantitativ. Eigene Hypothesen über das Zusammenspiel von Zufall und Gesetzmäßigkeiten werden untersucht.

☞☞☞ Aufbau zur Herstellung eines Zinkdendrits, Arbeitsbogen H, evtl. Text mit Erklärungsansatz zum Zinkdendriten, evtl. Folie zur Elektrolyse und zur Brownschen Bewegung

b) Das viskose Verästeln der Grenzfläche zwischen zwei unterschiedlich viskosen Flüssigkeiten (fraktales Wachstum) untersucht eine weitere Gruppe. Auch hier werden die entstehenden Muster qualitativ und quantitativ analysiert und es werden Erklärungshypothesen eigenständig verfolgt.

☞☞☞ Aufbau zur Produktion viskoser Verästelungen, Arbeitsbogen I, evtl. Text mit Erklärungsansatz zum Viskosen Verästeln

c) Das Chaosspiel wird in zwei Teilgruppen „gespielt“; eine Gruppe nutzt Papier, Bleistift und einen Würfel, die andere programmiert das Spiel mit einem Tabellenkalkulationsprogramm. Das Chaosspiel verdeutlicht, wie eine deterministische Konstruktionsvorschrift zusammen mit Zufallsprozessen zu einer definierten Struktur führt, das Sierpinski-dreieck.

☞☞☞ Papier, Bleistift, Lineal und Würfel, Arbeitsbogen J, Tabellenprogramm, z.B. Excel, Arbeitsbögen K und KK (Hilfe zur Arbeit mit Excel, Teil 2), evtl. Infofolie „Lösungsansatz zu Bogen K“

d) Eine vierte Schülergruppe untersucht die Konvektionszellen in einer Schale mit heißem Silikonöl. Diese Bénardzellen repräsentieren auf eine weitere Weise, wie Zufallsprozesse und deterministische Prozesse Muster entstehen lassen. Diese werden qualitativ und quantitativ untersucht.

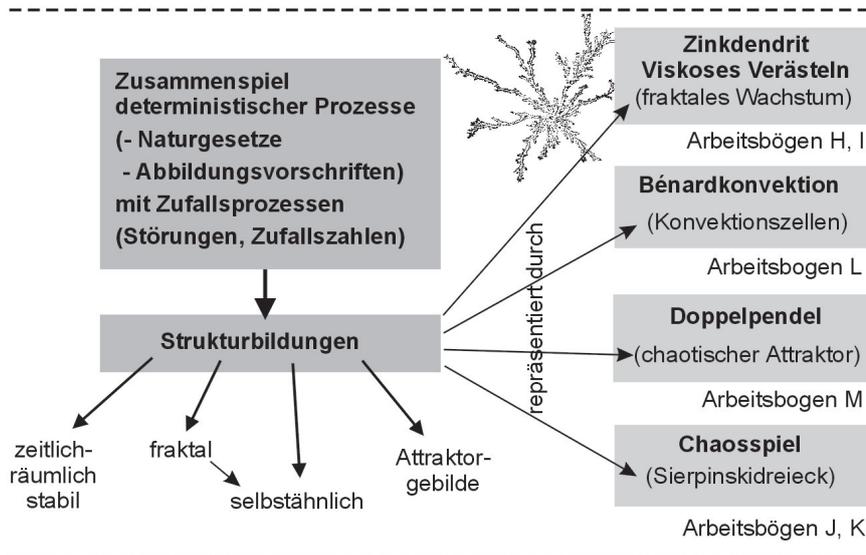
☞☞☞ Aufbau zur Herstellung der Bénardkonvektion, Arbeitsbogen L, evtl. Infofolie zur Konvektion

e) Das Doppelpendel wird erneut, jetzt unter dem Aspekt der Ordnungsstrukturen untersucht. Zwei Teilgruppen befassen sich einerseits mit dem Simulationsprogramm „Doppel“, das ordnung-repräsentierende Phasenraumstrukturen, d.h. chaotische Attraktoren, produziert. Die zweite Teilgruppe stellt Langzeitfotoaufnahmen des Doppelpendels her, an dessen Armen Leuchtdioden befestigt werden. Die digitalen Fotos werden analysiert.

☞☞☞ Doppelpendel, Programm „Doppel“, Leuchtdioden mit Knopfzellen, Bogen M

In der Präsentations- und Diskussionsphase im Plenum stellen die Gruppen ihre Ergebnisse vor. Die Frage wird diskutiert, wie Strukturen aufgrund von Zufallsprozessen entstehen und wie man sie beschreiben kann. Strukturelle Gemeinsamkeiten der untersuchten Objekte/Systeme werden herausgearbeitet. Komplementaritäten (Einfachheit vs. Komplexität, Ordnung vs. Instabilität und Chaos) werden untersucht.

**Voraussetzungen:** Modul zur Generalisierung und Begriffsbildung  
"Chaotisches Verhalten/Chaotisches System"



**Anschluss:** Modul "Anwendungen"

☞☞☞ Infoblätter „Erklärungsansätze zu Zinkdendrit und Viskoses Verästeln“, „Sierpinski dreieck“, „Bénardkonvektion“, „Stabilität, Elektrolyse, Konvektion, Brownsche Bewegung“, „Doppelpendel“, „Selbstähnlichkeit“, „Computergeneriertes Fraktal“, „Fraktale Eigenschaften menschlicher Organe“

**Methoden/Formate:** Aufteilung der Klasse bzw. des Kurses in 5 bis 10 Gruppen, eigenständige Arbeit der Gruppen entlang der Arbeitsbögen, die Spielraum für eigene Untersuchungen lassen. Computereinsatz nach pädagogischen Gesichtspunkten (s.o.). Präsentation und Diskussion im Plenum führen auf zu neuen Begriffen: Ordnung, Struktur (Muster), Zufall. Die in verschiedenen Phänomenbereichen erarbeiteten Ergebnisse werden generalisiert.

**Zeitraumen:** Gruppenarbeitsphasen (teilweise mit Computernutzung, teilweise mit Experimentaufbau) 60-80 min. Die Phasen der Präsentation und Zusammenführung der Ergebnisse sowie der Generalisierung nehmen 30-50 min in Anspruch.  $\Sigma = 90 - 130 \text{ min.}$

**Materialien, Objekte, Arbeitsbögen:**

- Aufbau zur Herstellung eines Zinkdendrits, Arbeitsbogen H
- Aufbau zur Herstellung eines Fettbäumchens (Viskoses Verästeln), Arbeitsbogen I
- Texte „Herstellung und Erklärungsansätze zu ‚Zinkdendrit‘ und ‚Viskoses Verästeln‘“
- Tabellenkalkulationsprogramm, z.B. Excel, Papier, Bleistift, Lineal, Würfel
- Arbeitsbögen J, K und KK (Hinweise zur Arbeit mit Excel, Teil 2)
- Aufbau zur Herstellung der Bénard-Konvektion, Arbeitsbogen L
- Infofolie „... Elektrolyse/Brownsche Bewegung/Konvektion“
- Doppelpendel mit Leuchtdioden, Programm „Doppel“, Arbeitsbogen O
- Infofolien „Zinkdendrit und Viskoses Verästeln“, „Sierpinski-dreieck“ (zu Chaosspiel), „Lösungsansatz zum Bogen K“, „Bénard-Konvektion“, „Doppelpendel“, „Kristalle und Quasikristalle“, „Selbstähnlichkeit“, „Computergeneriertes Fraktal“, „Fraktale Eigenschaften menschlicher Organe“ zur Unterstützung der Diskussion im Plenum

**Ergebnisse:**

- es existiert ein Wechselspiel zwischen deterministischen Gesetzmäßigkeiten (auch deterministischen Abbildungsvorschriften) und Zufallsprozessen
- Zufallsprozesse bestimmen die Ausbildung von Mustern und Strukturen in der Physik mit
- dabei können fraktale Strukturen (Zinkdendrit, Fettbäumchen), Zellenstrukturen (Bénard-Konvektion) oder fraktale Attraktoren (Doppelpendel, Chaosspiel) entstehen
- fraktale Strukturen weisen oft Selbstähnlichkeit auf und sind ein Ausdruck der Ordnung in der Natur
- dynamische Instabilität und Ordnungsstrukturen können bei den gleichen Phänomenen/Systemen auftreten, sie bilden eine Komplementarität
- komplexe Muster können auf Basis einfacher Bildungsgesetze entstehen; sie bilden ebenfalls eine Komplementarität

**Modul: Strukturelle Ordnung - Anwendungen helfen leben**

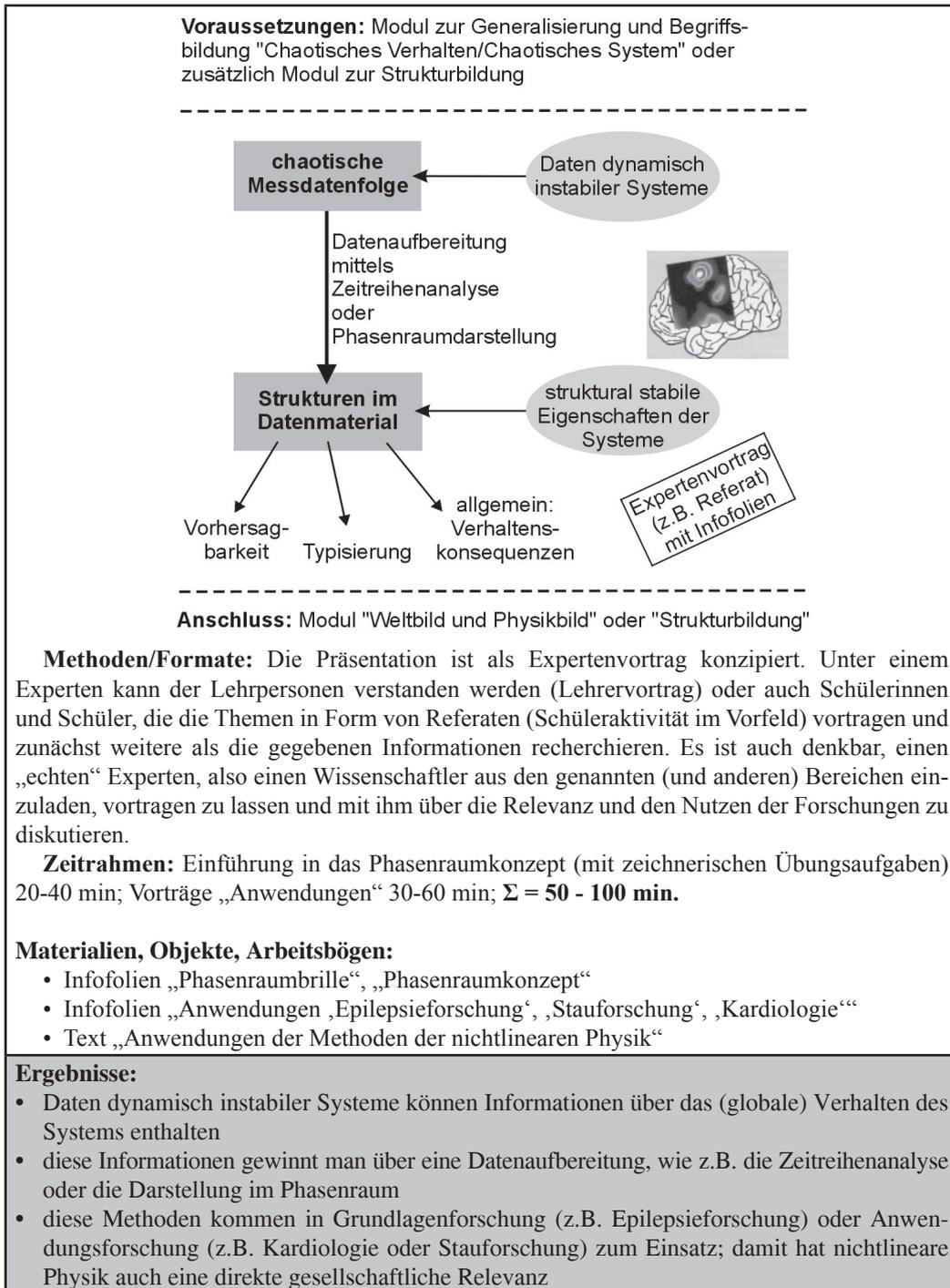
**Ziele:** Mit diesem Modul sollen Schülerinnen und Schüler über die Anwendungsaspekte der Erkenntnisse der nichtlinearen Physik und allgemein der nichtlinearen Dynamik informiert werden. Damit ist in erster Linie der Zielbereich C tangiert, aber auch nachzuvollziehen, welche Aufgaben das interdisziplinäre Forschungsprogramm zur nichtlinearen Dynamik bearbeitet (A4) und wie es gelingt, komplexe Systeme zu analysieren und zu beschreiben (B3). Schülerinnen und Schüler sollen lernen, wie große und scheinbar strukturlose Datenmengen aufbereitet und analysiert werden.

**Inhalte und Sachstruktur:** Das Modul ist als Vortragsmodul konzipiert. Anhand einfacher Beispiele (wie einer Autofahrt oder der Bewegung eines ebenen Pendels) wird zunächst das Phasenraumkonzept eingeführt. Kurvenverläufe, die nicht explizit von der Zeit abhängen, werden diskutiert, z.B.  $\varphi$  ( $d\varphi/dt$ ). Übungsaufgaben, die das Konzept anzuwenden helfen, sind möglich.

☞☞☞ Infofolien „Phasenraumbrille“, „Phasenraumkonzept“

Anschließend werden verschiedene Anwendungen insbesondere der Methoden der nichtlinearen Physik in angewandten Wissenschaften vorgestellt: Die Stauforschung als Beispiel für nutzbringende Anwendungen im Alltag, die Epilepsieforschung und die Kardiologie als Beispiele für Grundlagen- und Anwendungsforschung in der Medizin. Im Vordergrund stehen die Datenaufbereitung und der heutige Nutzen der nichtlinearen Dynamik.

☞☞☞ Infofolien „Anwendungen ‚Epilepsieforschung‘, ‚Stauforschung‘, ‚Kardiologie‘“, Text „Anwendungen der Methoden der nichtlinearen Physik“



**Modul: Weltbilder - unsere Sicht von Welt und Physik im Wandel**

**Ziele:** Im abschließenden Modul sollen die Ergebnisse der anderen Module aufgegriffen werden und in einer Synthese münden. Der Schwerpunkt liegt darin, dass die Schülerinnen und Schüler aus dem in den anderen Modulen Gelernten Implikationen für das naturwissenschaftliche Weltbild und für das Bild von Physik entwickeln. Die Zielfelder A5, B3 und B4 sowie D werden durch die Thematisierung „neuen Denkweisen“ und Sichtweisen der nichtlinearen Physik und durch deren weltanschauliche Konsequenzen angesprochen. Eine graphische Repräsentation des Gelernten soll den Abschluss bilden.

**Inhalte und Sachstruktur:** Anhand eines Textes wird der Bogen zum Astro-Modul geschlagen. Mit einer infolge des Unterrichtsgangs erweiterten Sicht werden Änderungen im Weltbild durch die Erkenntnisse und Modelle der nichtlinearen Dynamik diskutiert. Das mechanistische Weltbild wird in der Diskussion dem heutigen komplexeren Bild gegenüber gestellt (Diskussion um Paradigma-Wechsel). Letzteres ist durch Komplementaritäten geprägt: Dynamische Instabilität vs. Strukturbildung, Einfachheit vs. Komplexität, Linearität vs. Nichtlinearität u.a.. Physik befasst sich mit mehr als mit strikt determinierten Systemen.

☞☞☞ Text T5, Arbeitsbogen N, Infodolien des Unterrichtsganges

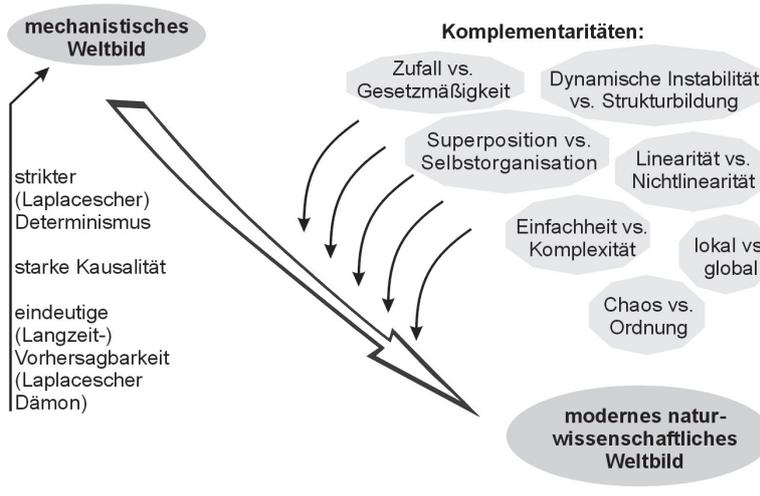
Abschließend stellen die Schülerinnen und Schüler ein Concept Map her. Die Begriffe der Infodolie „Begriffe“ der ersten Unterrichtsstunde werden vorgegeben. Schülerinnen und Schüler sollen Beziehungen zwischen den Begriffen herstellen auf Basis des im Unterrichtsgang Gelernten. Schülerinnen und Schüler vergleichen ihre Concept Maps und gleichen damit die Beziehungen zwischen den Begriffen ab.

☞☞☞ Infodolie Begriffe, Arbeitsbogen O, Papier und Klebstoff

Methoden/Formate: Gruppenphasen und Diskussionen im Plenum wechseln einander ab. Der Schwerpunkt liegt in der Konsensfindung der gesamten Lerngruppe im Plenum.

**Zeitraumen:** Partner- und Gruppenarbeit (inkl. Vertrautmachen mit der Methode des Concept Map 30-60 min, Plenumsdiskussion 35-45 min;  $\Sigma = 65 - 105 \text{ min.}$

**Voraussetzungen:** Module des Unterrichtsganges zu Instabilitäten, Strukturbildungen und Begriffsbildung

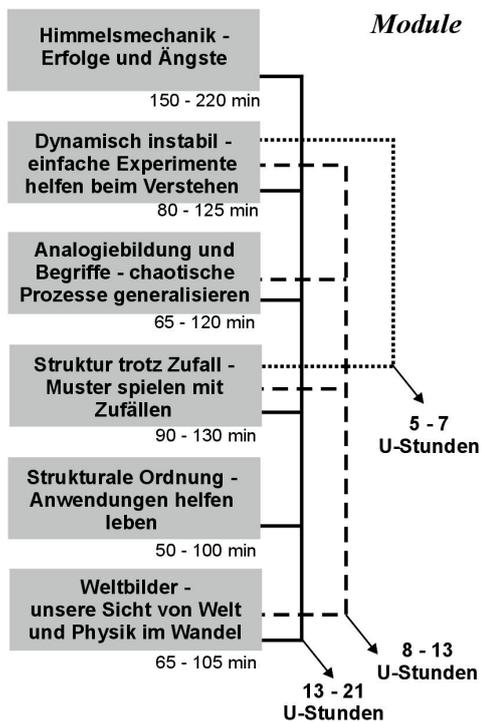


**Anschluss:**

- epistemologische und philosophische Überlegungen/Recherchen
- Position des Menschen und seiner Erkenntnisprozesse
- weitere moderne Themen der Physik: Quanten, Relativität, Materie und Geist, Mikrokosmos vs. Makrokosmos

<p><b>Materialien, Objekte, Arbeitsbögen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Text T5, weitere Texte aus T1 - T10</li> <li>• Arbeitsbogen N</li> <li>• Infofolie „Begriffe für Arbeitsbogen N“, DIN A3-Papier, Klebstoff</li> <li>• Arbeitsbogen O</li> </ul>
<p><b>Ergebnisse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zufall und Gesetzmäßigkeiten arbeiten Hand in Hand und bringen dadurch neue Strukturen hervor</li> <li>• auch das Sonnensystem ist als Struktur zu sehen, die derzeit stabil ist (sicher stabil für die nächsten 100.000 Jahre)</li> <li>• Die Mechanistische Weltansicht hat sich gewandelt; Komplementaritäten beschreiben das moderne naturwissenschaftliche Weltbild angemessener: Dynamische Instabilität vs. Strukturbildung; Chaos vs. Ordnung; Zufall vs. Gesetzmäßigkeit; Einfachheit vs. Komplexität, Linearität vs. Nichtlinearität; Superposition vs. Selbstorganisation.</li> </ul>

Das Unterrichtskonzept ist in Form von Modulen entwickelt worden, damit es an verschiedene unterrichtliche Bedingungen angepasst werden kann. Diese Bedingungen betreffen auch die zur Verfügung stehende Unterrichtszeit oder die Klassenstufe, in der unterrichtet werden soll. Für die Abfolge der Module kann es verschiedene Varianten geben. Allerdings ist nicht jede beliebige Kombination möglich. Mit dem Modul zur Himmelsmechanik beispielweise kann der Unterrichtsgang begonnen werden, aber auch ein Tausch mit dem Modul „Dynamisch instabil - einfache Experimente helfen beim verstehen“ ist möglich. Ebenso ist denkbar, aus Gründen der zeitlichen Reduzierung auf das Modul „Himmelsmechanik“ gänzlich zu verzichten, weil es von seiner Ziel-



setzung mit dem Modul um Magnetpendel und Chaosschüssel in weiten Bereichen deckungsgleich ist. Denkbar ist auch, die Module zur Himmelsmechanik und zum Weltbild zusammenzufassen und als Abschlussmodul einzusetzen.

Das Modul zu den Anwendungen nichtlinearer Physik kann an verschiedenen Stellen im Unterrichtsgang positioniert werden, im Prinzip ist es als „Aufmacher“ oder als Abschluss denkbar. Vor allem ein Tausch mit dem Modul „Struktur trotz Zufall“ kann sinnvoll sein. Die kürzeste Variante besteht aus den Modulen „Dynamisch instabil - einfache Experimente helfen beim verstehen“ und „Struktur trotz Zufall“. Sie bilden den Kern des Unterrichtsganges. Sollten insgesamt weniger als zehn Unterrichtsstunden zur Verfügung stehen, dann sollten zumindest diese Kernmodule eingesetzt werden, allerdings ergänzt um die Aspekte der Begriffsbildung (aus Modul „Analogiebildung und Begriffe“), der Anwendungen und der Veränderung des naturwissenschaftlichen Weltbildes. In Abb. 7.3 sind drei deutlich unterscheidbare Varianten des Unterrichtsganges mit der Zahl der benötigten Unterrichtsstunden dargestellt. Im Abschnitt 7.5

Abb. 7.3 Varianten des Unterrichtsganges (Details siehe Text; für eine Unterrichtsstunde werden netto 38 Minuten angesetzt)

wird untersucht, welche Entscheidungen über die Auswahl der Module und ihre Ausgestaltung die beteiligten Lehrpersonen getroffen haben.

## 7.4 Untersuchungsinstrumente - qualitative und quantitative Methoden

Das empirische Vorgehen in dieser Studie ist durch eine Kombination von qualitativen und quantitativen Instrumenten gekennzeichnet. Fragebögen mit geschlossenen und offenen Antwortformaten, Interviews einschließlich der Methode des Teaching Experiment, Videobeobachtungen, Feldnotizen und Concept Mapping stellen ein breites Instrumentarium dar. Der Schwerpunkt liegt bei den qualitativen Methoden, die der Komplexität der Unterrichtssituationen angemessen und zur Bearbeitung der Evaluationsaufgaben geeignet sind. Lehrpersonen, aber auch Schülerinnen und Schüler werden als Experten für Unterricht angesehen. Ihre Einschätzungen und Bewertungen des Unterrichtsgangs sowie ihre Vorschläge zur Veränderung sind daher zentrale Informationen, die nur mit qualitativen Methoden angemessen erhoben werden können. Zur formativen Evaluation der ablaufenden Prozesse von Entwicklung, Erprobung und Verbesserung des Unterrichtskonzepts sind qualitative Methoden angezeigt. Die schematische Abfolge des Einsatzes der einzelnen Untersuchungsinstrumente ist in Abb. 7.4 dargestellt. Die zeitliche Abfolge ist darin nicht wiedergegeben, denn zwischen den Erprobungen haben auch Sitzungen des Lehrerarbeitskreises stattgefunden. Zwischen den Erprobungen I, II und III hat jeweils ein zeitlicher Abstand von drei Monaten bestanden.

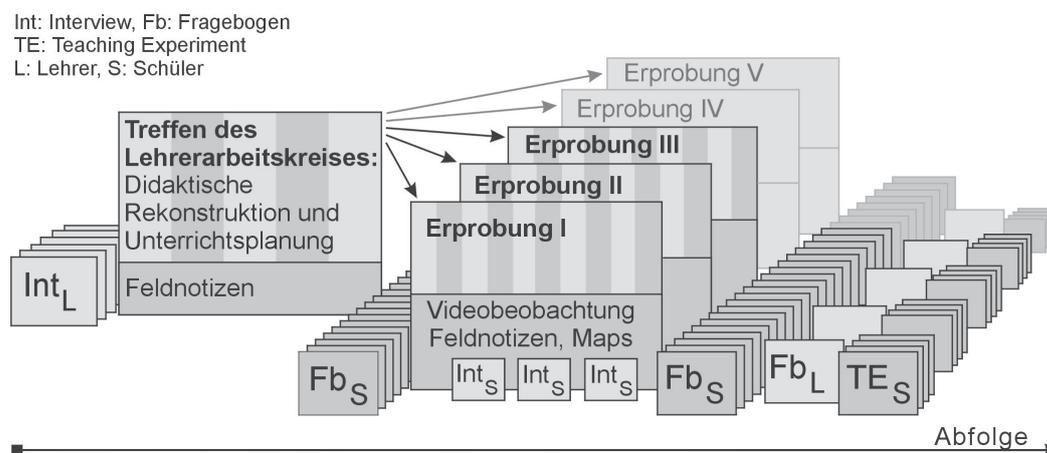


Abb. 7.4 Einsatz der Untersuchungsinstrumente

### 7.4.1 Fragebögen

Drei Fragebögen sind in dieser Studie eingesetzt worden. Auf der Basis einer Vielzahl bekannter Fragebogentypen ist ein Format entwickelt worden, das geschlossene mit offenen Antwortformaten kombiniert, so dass bei bestimmten Fragestellungen vertiefend nachgefragt werden kann. Bei den geschlossenen Items sind Aussagen („Statements“, vgl. BORTZ et al., 2002, S. 255) auf einer sechsstufigen Skala daraufhin einzustufen gewesen, wie weit sie für den Befragten zutreffen. Für die Beantwortung der offenen Fragen haben in der Regel drei Schreibzeilen zur Verfügung gestan-

den. Schülerinnen und Schüler und Lehrpersonen haben die Fragebögen zu Hause bearbeitet und an die Projektleitung geschickt.

Der erste Fragebogen  $Fb_{S1}$  ist von den Schülerinnen und Schülern vor Beginn der Unterrichtsstudie zu bearbeiten gewesen. Er hat die Aufgabe gehabt, ihre Vorstellungen zu den Konzepten *Vorhersagbarkeit, gesetzmäßiges Verhalten von physikalischen Systemen und Zufall* zu erheben. Items zu diesen Fragestellungen hatten offene Antwortformate gehabt. Lediglich die Items, mit denen eine Einordnung der Schülerinnen und Schüler bzgl. internaler vs. externaler Kontrollüberzeugung (vgl. AMELANG & BARTUSSEK, 1990) vorgenommen worden ist, haben ein sechsstufiges geschlossenes Antwortformat. Der Fragebogen  $Fb_{S1}$  hat die Schülerinnen und Schüler auf die Thematik des Unterrichts vorbereitet und bereits vor Beginn der Unterrichtserprobung zum Nachdenken über die genannten Konzepte angeregt. Fragebogen  $Fb_{S1}$  ist in Tabelle 7.2 verkürzt abgedruckt.

### 1 Interesse

- Welche Themen aus der Physik, der Biologie, der Chemie, den Geowissenschaften oder aus dem Bereich der technischen Anwendung naturwissenschaftlicher Ergebnisse interessieren Sie zur Zeit besonders?  
\_\_\_\_\_
- [...]
- Beschäftigen Sie sich in Ihrer Freizeit mit naturwissenschaftlichen Themen oder mit Technik? Falls ja, womit genau? \_\_\_\_\_
- [...]

### 2 Überzeugungen

[Items zur Erhebung des Merkmals von internaler und externaler Kontrollüberzeugung, nach Amelang & Bartussek, 1990; sechsstufiges geschlossenes Antwortformat]

### 3 Vorhersagbarkeit

- Wieso ist es möglich, dass wir Vorgänge im Alltag und in der Physik überhaupt vorhersagen können?  
\_\_\_\_\_
- [...]
- Wodurch wird Ihrer Einschätzung nach ein physikalischer Vorgang prinzipiell bestimmt? Versuchen Sie, grundsätzliche Einflussgrößen zu nennen. Wie wirken diese Einflussgrößen? (Nennen Sie bitte Beispiele) \_\_\_\_\_
- Der französische Mathematiker Pierre Simon Marquis de Laplace (1749-1827) dachte sich in einem Gedankenexperiment den „Laplaceschen Dämon“ aus, ein Wesen mit übermenschlichen Fähigkeiten; er beschrieb diese Fähigkeiten folgendermaßen:  
*„Ein Geist, der alle Kräfte und für einen Zeitpunkt Lage und Geschwindigkeit aller Teilchen im Universum kennt und umfassend genug wäre, alle nötigen Berechnungen durchzuführen, könnte mit derselben Formel die Bewegung der größten Körper und der kleinsten Atome ausdrücken. Nichts wäre für ihn ungewiss, Zukunft und Vergangenheit lägen offen vor seinen Augen.“*  
Nehmen Sie bitte Stellung zur angeblichen oder tatsächlichen Fähigkeit des Dämons, die physikalische Zukunft exakt vorherzusagen. \_\_\_\_\_
- Unabhängig von unserem mangelnden Wissen oder der Fähigkeit des Dämons: Wie weit ist es Ihrer Meinung nach bereits festgelegt, wie sich die physikalische Zukunft entwickelt?  
\_\_\_\_\_

### 4 Zufall

- In der [...] Literatur unterscheidet man zwischen subjektiven und objektiven Zufällen.  
Unter *subjektiven* Zufällen wären Ereignisse zu verstehen, die zwar strikt nach Naturgesetzen ablaufen und die auf physikalische Prozesse zurückführbar sind, über deren Zustandekommen uns aber das Wissen fehlt, so dass sie uns zufällig „erscheinen“.  
Unter *objektiven* Zufällen wären Ereignisse zu verstehen, die sich nicht weiter durch physikalische Prozesse erklären lassen, sondern in gewisser Weise „elementare“ Ereignisse darstellen; es wären Ereignisse, die man mit der Bezeichnung „echte“ Zufälle fassen könnte.

## 7. Ein Unterrichtskonzept zur nichtlinearen Physik in der gymnasialen Oberstufe

- Nehmen Sie bitte Stellung zur Frage, ob es solche objektiven („echten“) Zufälle in der Natur bzw. in der Naturwissenschaft gibt oder ob sich alle scheinbar objektiven Zufälle früher oder später doch als subjektive Zufälle herausstellen? Gibt es Beispiele für objektiven Zufall?  
\_\_\_\_\_
  - [...]
- 5 Naturgesetze**
- [...]
  - Ist es für Sie eine eher unangenehme oder angenehme Vorstellung, dass man viele Vorgänge in der Natur und des täglichen Lebens nicht exakt oder sogar gar nicht vorhersagen kann? Begründen Sie bitte.  
\_\_\_\_\_
  - Sind Ihnen bei der Bearbeitung Fragen gekommen, die Sie gern im Unterricht behandelt haben möchten? Fall ja, welche? \_\_\_\_\_
  - [...]

Tab. 7.2 Schülerfragebogen  $Fb_{s1}$  (verkürzt) vor Beginn der Studie (die ausgegebene Version bot ausreichenden Platz zur Beantwortung der Fragen)

Der zweite Fragebogen  $Fb_{s2}$  ist nach Abschluss jeder Erprobung eingesetzt worden. Mit ihm ist zum einen untersucht worden, welche Einschätzung die Schülerinnen und Schüler vom abgelaufenen Unterricht haben, welche Veränderungsvorschläge sie machen und wie sie die eingesetzten Objekte und Analogmodelle beurteilen. Zum anderen untersucht  $Fb_{s2}$ , inwieweit die Schülerinnen und Schüler die zentralen Konzepte des Unterrichts verstanden haben bzw. rekonstruieren können. Zwischen den einzelnen Erprobungen ist der Fragebogen leicht modifiziert worden. Dies hat daran gelegen, dass erstens das Unterrichtskonzept vom Arbeitskreis verändert worden ist und dass zweitens die Unterrichtsformate variiert haben. Bei der Erprobung I ist der Unterricht an drei aufeinanderfolgenden Tagen abgelaufen, bei den Erprobungen II und III im üblichen Format mit drei Unterrichtsstunden pro Woche. Der in Tabelle 7.3 (verkürzt) dargestellte Fragebogen ist im letztgenannten Unterrichtsformat eingesetzt worden. Items mit geschlossenen Antwortformaten (Skala 0 bis 5) sind in  $Fb_{s2}$  häufiger vertreten als im Eingangsfragebogen.

### 1 Zum Unterrichtsthema

- [...] Diese Aussage ...
- 0 = ... trifft für mich überhaupt nicht zu      1 = ... trifft nur in sehr geringem Maße zu  
 2 = ... trifft im geringen Maße zu      3 = ... trifft für mich im Großen und Ganzen zu  
 4 = ... trifft weitestgehend zu      5 = ... trifft voll und ganz zu
- „Das Thema ‚Chaos, Zufall, Berechenbarkeit, Ordnung‘ hat mich interessiert“      ① ② ③ ④ ⑤
  - [...]
  - „Mit der Behandlung des Themas im Physikunterricht war ich zufrieden.“      ① ② ③ ④ ⑤  
 Meine Kritik: \_\_\_\_\_
  - „Ich habe naturwissenschaftliche Gedanken kennen gelernt, die mir neu waren oder mich überrascht haben.“ Nämlich diese: \_\_\_\_\_      ① ② ③ ④ ⑤
  - „Das Thema ist ein typisches Thema für den Physikunterricht.“      ① ② ③ ④ ⑤
  - [...]
  - „Über Chaos, Ordnung und die Folgen würde ich gern mehr erfahren.“      ① ② ③ ④ ⑤
  - „Ich finde es wichtig, dass das Thema in der Schule behandelt wird.“      ① ② ③ ④ ⑤  
 und zwar deshalb: \_\_\_\_\_
  - „Ich hatte Spaß an diesem Unterricht.“      ① ② ③ ④ ⑤

**2 Zum Ablauf des Unterrichts**

- [...]
- Zu Beginn des Unterrichts vor acht Wochen dachte ich, es geht um folgendes:
 

	⊙ 1 2 3 4 5	
• So waren die Arbeitsbögen für mich zu verstehen: (0 = schlecht zu verstehen oder missverständlich ... 5 = gut zu verstehen und eindeutig)	⊙ 1 2 3 4 5	
• So waren für mich die Arbeitsaufträge zu bearbeiten: (0 = schwierig oder nicht zielführend ... 5 = gut zu bearbeiten und zielgerichtet)	⊙ 1 2 3 4 5	
• So hilfreich waren die folgenden Experimente und Unterrichtsmittel für mich beim Verstehen (sofern ich sie genutzt habe): (0 = wenig hilfreich oder in die Irre leitend ... 5 = sehr hilfreich und anregend)		
Video ⊙ 1 2 3 4 5	Magnetpendel ⊙ 1 2 3 4 5	Chaosschüssel ⊙ 1 2 3 4 5
Texte ⊙ 1 2 3 4 5	Bleistift ⊙ 1 2 3 4 5	Galtonbrett ⊙ 1 2 3 4 5
Würfel ⊙ 1 2 3 4 5	Zinkdendrit ⊙ 1 2 3 4 5	Chaos-Spiel ⊙ 1 2 3 4 5
Zeichnungen (Berggrat und Wall) ⊙ 1 2 3 4 5		Doppelpendel ⊙ 1 2 3 4 5
Folien mit Abbildungen ⊙ 1 2 3 4 5	Computerprogramme	⊙ 1 2 3 4 5
Anfertigen von Begriffsnetzen ⊙ 1 2 3 4 5		
- Dies ist meine Meinung dazu, wie wir den Computer im Unterricht eingesetzt haben:
 

	⊙ 1 2 3 4 5
--	-------------
- [...]
- Am gesamten Unterricht gefiel mir am besten: \_\_\_\_\_
- Nicht so gut gefiel mir insgesamt: \_\_\_\_\_
- Stellen Sie sich vor, der Unterricht würde demnächst noch in anderen Klassen unterrichtet. Was sollte am Unterricht geändert werden? \_\_\_\_\_
- Sollte der Ablauf geändert werden? Wenn ja, wie? \_\_\_\_\_
- Was sollte auf jeden Fall beibehalten werden? \_\_\_\_\_
- [...]

**3 Zu den Inhalten des Unterrichts**

- „Mein Bild vom Sonnensystem und von physikalischen Systemen hat sich erweitert.“ ⊙ 1 2 3 4 5  
Folgendes habe ich dazu gelernt: \_\_\_\_\_
- Was versteht man unter eingeschränkter Vorhersagbarkeit? \_\_\_\_\_
- Im Unterricht wurde oft von der „Stabilität“ bzw. der „Instabilität“ gesprochen. Welche Schwierigkeiten hatten Sie mit diesen Begriffen? Erklären Sie die Begriffe. \_\_\_\_\_
- Geben Sie bitte eine kurze Beschreibung davon, was man unter „chaotischem Verhalten“ versteht: \_\_\_\_\_
- Geben Sie bitte eine kurze Definition für „Zufall“: \_\_\_\_\_
- Erklären Sie bitte, wie Naturgesetze und Zufälle zusammenwirken und was daraus resultiert: \_\_\_\_\_
- Inwiefern hat sich das menschliche Weltbild durch die Erkenntnisse über Chaos, Zufall und Berechenbarkeit gewandelt? \_\_\_\_\_
- Das ist die wesentliche Erkenntnis, die ich aus dem Unterricht mitgenommen habe: \_\_\_\_\_
- Nicht verstanden habe ich nach wie vor: \_\_\_\_\_
- [...]

Tabelle 7.3 Abschließender Schülerfragebogen Fb<sub>s2</sub> (verkürzt) (die ausgegebene Version bot ausreichenden Platz zur Beantwortung der Fragen)

Der dritte Fragebogen **Fb<sub>L1</sub>** ist in Tabelle 7.4 verkürzt abgedruckt. Er hat sich an die Lehrpersonen gerichtet und ist nach Abschluss jeder Erprobung von derjenigen Lehrperson bearbeitet worden, die in der Erprobung unterrichtet hat. Die Fragen von Fb<sub>L1</sub> lehnen sich an die des Schülerfragebogens Fb<sub>s2</sub> an, um die Antworten von Schülerinnen und Schülern und Lehrperson aufeinander beziehen zu können oder direkte Vergleiche ziehen zu können. Fragen die nur aus der Perspektive

## 7. Ein Unterrichtskonzept zur nichtlinearen Physik in der gymnasialen Oberstufe

der Lehrperson zu beantworten sind, sind hinzu gekommen. Am Ende einer Erprobung sind mit dem Fragebogen Fb<sub>L1</sub> die Vorstellungen der Lehrpersonen zum Thema untersucht worden, um sie mit Aussagen im Eingangsinterview (s. 7.4.2) vergleichen zu können.

### 1 Zum Unterrichtsthema

- „Es hat mich inhaltlich interessiert, das Thema ‚Chaos, Zufall, Berechenbarkeit, Ordnung‘ zu unterrichten.“ ① ② ③ ④ ⑤
- [...] ① ② ③ ④ ⑤
- „Ich habe naturwissenschaftliche Gedanken kennen gelernt, die mir neu waren.“ ① ② ③ ④ ⑤
- 

Dabei haben mich folgende Überlegungen der nichtlinearen Physik überrascht: \_\_\_\_\_

- • „Das Thema ist geeignet, um in den regulären Physikunterricht integriert zu werden.“ ① ② ③ ④ ⑤

Problematisch könnte aber sein: \_\_\_\_\_

- • „Über Chaos, Ordnung und die Folgen würde ich gern mehr erfahren.“ ① ② ③ ④ ⑤
- • „Ich finde es wichtig, dass das Thema in der Schule behandelt wird.“ ① ② ③ ④ ⑤
- Warum? \_\_\_\_\_
- • „Ich hatte Spaß daran, diesen neuen Inhalt zu unterrichten.“ ① ② ③ ④ ⑤
- Unerfreulich war: \_\_\_\_\_

### 2 Zu Interesse, Motivation und zum Lernen der Schülerinnen und Schüler

- „Die Schülerinnen und Schüler arbeiteten aktiv und engagiert mit.“ ① ② ③ ④ ⑤
- [...]
- „Die Gruppenarbeit motivierte sie, ihre eigenen Gedanken zu entwickeln.“ ① ② ③ ④ ⑤
- „Die unterrichtlichen Mittel (Experimente, Simulationen, Folien, ...) regten die Schülerinnen und Schüler zur eigenständigen Arbeit an.“ ① ② ③ ④ ⑤
- [...]
- Schätzen Sie bitte, wie viel Prozent Ihrer Schülerinnen und Schüler die folgenden Überlegungen, Begriffe oder Konzepte weitgehend verstanden haben, nämlich...
  - a) ... dass chaotische Systeme nur eingeschränkt vorhersagbar sind, \_\_\_\_\_ %  
Für Schüler kann dieser Gedanke schwierig sein, weil \_\_\_\_\_
  - b) ... dass die Existenz labiler Gleichgewichtslagen, die das System durchläuft, für die Einschränkung von Vorhersagbarkeit verantwortlich ist.  
Für Schüler kann dieser Gedanke schwierig sein, weil \_\_\_\_\_
  - c) ... dass eine größere Rechengenauigkeit und das Fernhalten von Störungen zwar die Vorhersage verbessert, das prinzipielle Problem aber nicht löst.  
Für Schüler kann dieser Gedanke schwierig sein, weil \_\_\_\_\_
  - d) ... dass der Aspekt „Ordnung“ zum wissenschaftlichen beschriebenen Phänomen des Chaos dazugehört.  
Für Schüler kann dieser Gedanke schwierig sein, weil \_\_\_\_\_
  - e) ... wie Gesetzmäßigkeiten und Zufall zusammenwirken und zur Entstehung neuer Muster und Strukturen führen können.  
Für Schüler kann dieser Gedanke schwierig sein, weil \_\_\_\_\_
- Welche generellen Lernmöglichkeiten und Lernschwierigkeiten beim Umgang mit dem Unterrichtsinhalt haben Sie bei Ihren Schülerinnen und Schülern festgestellt? \_\_\_\_\_

**3 Zum Ablauf des Unterrichts**

- „Der Unterricht bot ausreichend Gelegenheit zur Eigenaktivität der Schülerinnen und Schüler.“ ⓪ ① ② ③ ④ ⑤
- [...]
  - Diese Experimente und Unterrichtsmittel waren hilfreich beim Verstehen:
 

Video	⓪ ① ② ③ ④ ⑤	Magnetpendel	⓪ ① ② ③ ④ ⑤	Chaosschüssel	⓪ ① ② ③ ④ ⑤
Texte	⓪ ① ② ③ ④ ⑤	Bleistift	⓪ ① ② ③ ④ ⑤	Galtonbrett	⓪ ① ② ③ ④ ⑤
Würfel	⓪ ① ② ③ ④ ⑤	Zinkdendrit	⓪ ① ② ③ ④ ⑤	Chaos-Spiel	⓪ ① ② ③ ④ ⑤
Zeichnungen (Berggrat und Wall)	⓪ ① ② ③ ④ ⑤	Doppelpendel	⓪ ① ② ③ ④ ⑤		
Folien mit Abbildungen	⓪ ① ② ③ ④ ⑤	Computerprogramme	⓪ ① ② ③ ④ ⑤		
Anfertigen von Begriffsnetzen	⓪ ① ② ③ ④ ⑤				
  - [...]
    - Wie ist Ihre Meinung dazu, wie der Computer im Unterricht eingesetzt wurde; welche Vorteile und welche Probleme sehen Sie nachträglich: \_\_\_\_\_
    - Stellen Sie sich vor, Sie würden den Unterricht demnächst noch einmal unterrichten. Was sollte generell am Unterrichtsgang geändert werden? \_\_\_\_\_
    - Wie sollte der Ablauf geändert werden? \_\_\_\_\_
    - Was sollte auf jeden Fall beibehalten werden? \_\_\_\_\_
    - Welche Erkenntnis über die Durchführbarkeit eines Unterrichts zum Thema „Chaos, Zufall, eingeschränkte und Ordnungsstrukturen“ haben Sie gewonnen? Welche prinzipiellen Möglichkeiten und Schwierigkeiten sehen Sie? \_\_\_\_\_

**4 Zu den Inhalten des Unterrichts**

- Im Unterricht wurde oft von der „Stabilität“ bzw. der „Instabilität“ des Sonnensystems gesprochen. Welche Schwierigkeiten hatten Sie mit diesen Begriffen? Wie sollten sie erklärt werden?  
\_\_\_\_\_
- Geben Sie bitte eine kurze Beschreibung dazu, was man unter „chaotischem Verhalten“ versteht und was an dem Begriff schwierig zu vermitteln ist: \_\_\_\_\_
- Erklären Sie bitte, wie Naturgesetze und Zufälle zusammenwirken und was daraus resultiert:  
\_\_\_\_\_
- Geben Sie bitte eine kurze Definition für Zufall, die unterrichtstauglich wäre: \_\_\_\_\_
- Inwiefern hat sich das menschliche Weltbild durch die Erkenntnisse über Chaos, Zufall und Berechenbarkeit gewandelt und wie sollte man das im Unterricht darstellen? \_\_\_\_\_

Tabelle 7.4 Abschließender Lehrerfragebogen Fb<sub>L1</sub> (verkürzt) (die ausgegebene Version bot ausreichenden Platz zur Beantwortung der Fragen)

Die Auswertung der Fragebögen hat eine wichtige Funktion für die formative und die abschließende summative Evaluation der abgelaufenen Prozesse. Da die Erprobungen zeitversetzt stattgefunden haben, sind die Ergebnisse der Fragebögen Fb<sub>S1</sub>, Fb<sub>S2</sub> und Fb<sub>L1</sub> in die Prozesse der Unterrichtsentwicklung für die jeweils folgenden Erprobungen eingeflossen. In Sitzungen des Arbeitskreises sind die Ergebnisse der bereits vorliegenden Schülerfragebögen diskutiert worden. Modifikationen des Unterrichtskonzeptes sind die Folge gewesen. Auch für die summative Evaluation sind die Fragebogendaten wichtig, weil sie im gewissen Rahmen den Lernerfolg von Schülerinnen und Schülern und Lehrpersonen untersuchen und weil sie die Beurteilung des Unterrichts durch Experten - Lehrpersonen wie Schülerinnen und Schüler - beinhalten. Die geschlossenen Fragen sind zunächst mit Hilfe deskriptiver Statistik ausgewertet, die offenen Fragen sind kategoriengeleitet analysiert worden. Dazu sind Methoden der qualitativen Sozialforschung, insbesondere qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (MAYRING, 2002, 2010; kurze Darstellung auch in BORTZ et al., 2002, S. 332 ff.) eingesetzt worden. Das Ziel hat darin bestanden, die Beurteilungen des Unterrichts aus Schülersicht auf die Beurteilungen aus Lehrersicht zu beziehen. Bei der Analyse des ersten Fragebogens FbS1 ist außerdem untersucht worden, inwiefern Vorstellungen zu den

Konzepten Vorhersagbarkeit, Zufall etc. mit dem Konstrukt der externalen bzw. internalen Kontrollüberzeugung korrelieren. Frühere Studien hatten hier auf einen Zusammenhang hingewiesen (vgl. KOMOREK, 1998), dem aber bislang nicht nachgegangen worden ist.

### 7.4.2 Interviews und Teaching Experiment

Drei Typen von mündlichen Befragungen sind in Form von Einzelinterviews zum Einsatz gekommen. Im ersten Fall handelt es sich um ein teils biographisches, teils konzept-orientiertes Interview (IntL), das vor Beginn der Studie mit den beteiligten Lehrpersonen geführt worden ist. Biographisch ist dieses Interview, weil nach der Ausbildung der Lehrperson, nach ihren ersten Zugängen zum Thema nichtlineare Systeme etc., aber auch nach ihren Vorstellungen bzgl. moderner Themen im Unterricht gefragt worden ist. Auch das Vorwissen zum Thema ist erhoben worden. Methodisch gesehen handelt es sich bei diesem Interview um ein persönliches, direktes Einzelinterview, das fokussierend wenigen Fragestellungen nachgegangen und längs eines teilstrukturierten Leitfadens geführt worden ist (vgl. LAMNEK, 2005, S. 368; BORTZ et al., 2002, Abschnitt 4.4). Der (verkürzte) Interviewleitfaden ist in Tabelle 7.5 dargestellt. Dieses Interview hat jeweils ca. eine Stunde gedauert und ist mit einem Diktiergerät aufgezeichnet und wörtlich transkribiert worden.

#### 1. Zur Ausbildung

- War nichtlineare Physik ein Bestandteil Ihrer Ausbildung?
- [...]
- Inwiefern haben Sie sich bereits über das Thema Chaostheorie und nichtlineare Physik informiert? Was assoziieren Sie mit dem Thema Chaosphysik?

#### 2. Zum Unterricht über Chaostheorie und nichtlineare Physik

- Welche Ziele können mit dem Thema Chaosphysik im Unterricht erreicht werden?
- Welche Aspekte von Chaosphysik/nichtlinearer Physik sollte man in der Schule behandeln? Welche Art von Weltbilddiskussion sollte man in der Schule führen?
- Welche Schwerpunkte sollte man (aus Ihrer jetzigen Sicht) in einem Unterricht zum Thema setzen (Weltbilddiskussion, Experimente, Alltagsphänomene, andere)?
- Welche Schwierigkeiten und Möglichkeiten erwarten sie beim Unterrichten des Themas auf Seiten der Schülerinnen und Schüler und auch der Lehrpersonen?

#### 3. Vorhersagbarkeit

- Wie ist es möglich, dass wir Vorgänge im Alltag und in der Physik überhaupt vorhersagen können?
- [...]
- De Laplace glaubt, dass ein Dämon die Zukunft vorherberechnen könnte, wenn er den Zustand aller Teilchen im Universum und alle Gesetzmäßigkeiten kennt. Nehmen Sie zu dieser Position bitte Stellung?

#### 4. Zufall und Naturgesetze

- Subjektiver Zufall bedeutet, dass man nicht alle Informationen über Vorgänge hat, diese aber schon festgelegt sind. Daneben spricht man vom objektiven, „echten“ Zufall. Gibt es in der Natur bzw. in der Physik so etwas wie echte Zufälle?
- Herr Kenner ist der Laplacescher Determinist und sagt: Wenn man den aktuellen Zustand der Welt exakt wüsste, könnte man auch Vergangenheit und Zukunft exakt vorhersagen. Das ist eine Frage der Genauigkeit.  
Herr Wisser hat die Meinung: Die Naturgesetze legen einen Rahmen für einen physikalischen Vorgang fest, sie beschreiben den Möglichkeitsraum dessen, was erlaubt ist. Innerhalb dieses Rahmens ist das Geschehen aber nicht eindeutig festgelegt. Und deshalb ist eine exakte Vorhersage prinzipiell nicht möglich.  
Nehmen Sie bitte zu den beiden Positionen Stellung.

- Wie wichtig ist es, solche Fragen über Determinismus oder Zufall im Physikunterricht zu unterrichten?
- Man spricht häufig von affektiven Aspekten des Physikunterrichts. Hier geht es ja auch darum, für wie (un-)angenehm Schülerinnen und Schüler die Erkenntnisse halten, dass Vorgänge eingeschränkt vorhersehbar sein können. Wie würden Sie das bei Schülerinnen und Schülern einschätzen?

Tab. 7.5 Fokussierendes Lehrerinterview (IntL) vor Beginn der Studie

Der zweite Interviewtyp ist ein Kurzinterview, das nach einzelnen Unterrichtsstunden mit Schülerinnen und Schülern geführt worden ist und sich mit einer bis zwei Fragestellungen fokussierend auseinander gesetzt hat. Die Fragestellungen haben sich in der vorliegenden Studie aus den Unterrichtsbeobachtungen der betreffenden Stunden ergeben. Damit ist dieses Interview nicht standardisiert. Es hat in der Regel 10 Minuten gedauert, ist ebenfalls mit einem Diktiergerät festgehalten und anschließend wörtlich transkribiert worden. In den meisten Fällen ist eine problematische Äußerung der Lehrperson oder eines Mitschülers Anlass gewesen nachzuhaken, inwiefern der befragte Schülerinnen und Schüler Verständnisprobleme hat oder wahrgenommen hat. Auch Fragen danach, was am Konzept der jeweils vergangenen Stunde verändert werden sollte, sind gestellt worden. Diese Kurzinterviews sind zusammen mit den Feldnotizen (s.u.) und mit dem Videomaterial (s.u.) im Rahmen einer qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet worden. Sie haben Informationen über die Wahrnehmung von Unterrichtsstunden gegeben und die Entwicklung des Unterrichtskonzepts mit beeinflusst.

Der dritte Interviewtyp ist eine Variante des Teaching Experiment Designs (vgl. Abschnitt 6.2). Dieses Interview hat die Funktion gehabt, nach Ablauf einer Erprobung Informationen über Lerneffekte zu sammeln. Dazu sind einige (vgl. Tab. 7.8) der Schülerinnen und Schüler im Abstand von ca. drei Wochen nach der Erprobung eingeladen und entlang einer Reihe von Experimenten zu den Inhalten des Unterrichts befragt worden. Dieses Format hat sich vom Teaching Experiment, wie es im Kieler Projekt vorwiegend angewendet worden ist, dadurch unterschieden, dass zunächst die aus dem Unterricht bekannten Objekte, Systeme und Programme diskutiert worden sind. Damit hat das Interview in erster Linie untersucht, inwieweit die Unterrichtsinhalte von Schülerinnen und Schülern rekonstruiert werden können. Dieser Interviewtyp ist methodisch gesehen ebenfalls den problemzentrierten Interviews zuzurechnen (vgl. LAMNEK, 2005, S. 363; vgl. auch Abschnitt 6.2). Die zentralen Fragestellungen des Interviews und die vorgelegten Objekte sind in Tabelle 7.6 beschrieben (Details im Anhang). In fast allen Fällen ist in der vorliegenden Studie am Ende des Interviews ein Objekt/physikalisches System diskutiert worden, das den Schülerinnen und Schülern unbekannt gewesen ist. Auf diese Weise sind Transferleistungen untersucht worden. Außerdem ist nochmals nach Anmerkungen zum vergangenen Unterricht gefragt worden. Die Interviews sind per Diktiergerät aufgezeichnet und anschließend wörtlich und vollständig transkribiert worden. Bei der Auswertung hat der Schwerpunkt auf den Rekonstruktionsprozessen der Schülerinnen und Schüler gelegen. Hierzu sind wiederum inhaltsanalytische Methoden auf die Transkripte angewendet worden.

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Freie Rekonstruktion des abgelaufenen Unterrichts: Zentrale Begriffe, Konzepte, Experimente, Materialien, Handlungen</li> </ul> <p>„Im Unterricht wurde über Chaos, Zufall, eingeschränkte Vorhersagbarkeit, Instabilität und Ordnung gesprochen. Kannst du bitte mit eigenen Worten sagen, zu welchen Ergebnissen eure Überlegungen und eure Aktivitäten geführt haben?“</p> <p>„Gehe bitte auf den Begriff der Instabilität, ... die verwendeten Experimente, ... auf die Graphiken und Folien ein, ... auf Chaos und Ordnung im Chaos ein“</p>	ca. 20 min
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rekonstruktion zentraler Begriffe und Prinzipien anhand der Experimente (teilweise real vorliegend)</li> </ul>	ca. 20 min
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rekonstruktion der Unterrichtsstruktur und Vorschläge zur Veränderung</li> </ul> <p>„Welche Schwerpunkte gab es im Unterricht? Was würdest Du ändern?“</p>	ca. 10 min

Tab. 7.6 Schwerpunkte des rekonstruierenden teaching experiment

### 7.4.3 Videobasierte Unterrichtsbeobachtung

Formative Evaluationen, die bei der Entwicklung neuer Maßnahmen durchgeführt werden, sind meistens erkundend angelegt und mit dem Ziel verknüpft, die laufenden Interventionen zu modifizieren und zu verbessern (vgl. BORTZ et al., 2002, S. 113). Die vorliegende Unterrichtserprobung entspricht dieser Beschreibung, denn es wird ein Unterrichtskonzept erprobt und zwischen den Erprobungen wird es zusammen mit den beteiligten Lehrpersonen modifiziert. Diese spezielle Form der Erkundung lässt sich als Aktionsforschung klassifizieren (vgl. BORTZ et al., 2002, S. 343 ff.). In der vorliegenden Studie sind alle Unterrichtsstunden videographiert worden. In den meisten Unterrichtsstunden sind zwei Kameras im Einsatz gewesen. PRENZEL et al. (2001) geben Richtlinien für den Einsatz von Kameras zur Unterrichtsbeobachtung. Diese Richtlinien sind bereits für die Beobachtung von Physikunterricht ausgelegt. In der vorliegenden Studie ist allerdings bewusst und aus Erfahrung mit Vorstudien (vgl. KOMOREK, 1998) heraus im Detail von diesen Richtlinien abgewichen worden. Die so genannte „Ü-Kamera“ (vgl. PRENZEL et al., 2001, S. 6), die einen Überblick über das Klassengeschehen geben soll, ist zwar stationär eingerichtet worden, aber im hinteren Teil der Klasse, um sowohl die Aktionen der Schülerinnen und Schüler als auch die Interaktionen zwischen Schülerinnen und Schülern und zwischen Schülerinnen und Schülern und Lehrpersonen dokumentieren zu können (vgl. Abb. 7.5). Sie nimmt damit gleichzeitig die Position einer Schülerin bzw. eines Schülers im hinteren Teil des Klassenraums ein.

Eine weitere Kamera hat sich an der Position befunden, die PRENZEL et al. (2001) als „L-Kamera“-Position bezeichnen. Diese ist von einer Person (Student) bedient worden und hat durch einen mäßigen Einsatz von Schwenk- und Zoombewegungen sowohl die wesentlichen Lehrerhandlungen als auch Lehrer-Schüler-Interaktionen dokumentiert. Zugleich hat sie die Position einer Schülerin bzw. eines Schülers im vorderen Teils des Klassenraums eingenommen. Für die Gruppenarbeitsphasen ist sie flexibel installiert gewesen. Da das Unterrichtskonzept zu 40% seiner Zeit auf Gruppenarbeit ausgelegt gewesen ist, ist mit dieser zweiten Kamera die Arbeit in Gruppen dokumentiert worden. Die Kameras sind mit ausreichend guten Aufsatzmikrophonen ausgerüstet gewesen, die während der Arbeitsphasen von Gruppen problemlos auf den Arbeitstisch gestellt worden sind. Auf aufwendige Funkmikrophone ist hier verzichtet worden, weil nicht die Absicht bestanden hat, alle wörtlichen Äußerungen vollständig zu transkribieren. Die Schulung der Kamerateute hat neben einer technischen Einführung im wesentlichen darin bestanden, dass sie als Studenten in das Forschungsprojekt eingebunden und mit den Untersuchungszielen ausreichend vertraut gewesen sind (vgl. BORTZ et al., 2002, S. 273 zum Thema Beobachtertraining).

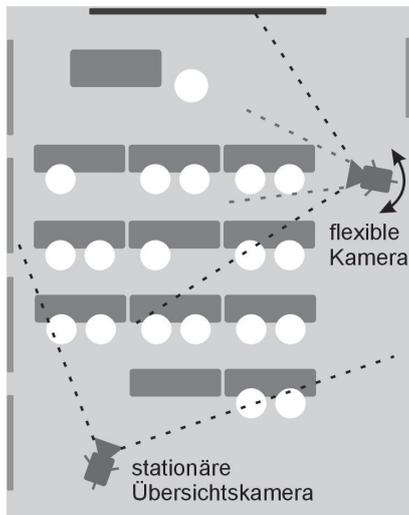


Abb. 7.5 Kamerapositionen

Die **Analyse des Videomaterials** ist kategoriengeleitet durchgeführt worden und hat dabei Methoden der qualitativen Sozialforschung genutzt. Auch wenn nicht das gesamte Videomaterial transkribiert worden ist, so ist die Videoanalyse auch als Textanalyse zu verstehen. Die Methode der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (MAYRING, 2002, 2010; kurze Darstellung auch in BORTZ et al., S. 332 ff.), die sich bereits in verschiedenen Studien des Kieler Projekts zur Didaktischen Rekonstruktion bewährt hat, wird auch hier herangezogen (vgl. DUIT et al., 1997; KOMOREK et al. 2001; STAVROU et al., 2003). Ziel der Inhaltsanalyse ist es, die latenten Inhalte des Videomaterials in ihrem sozialen Kontext und Bedeutungsumfeld zu interpretieren, um zu intersubjektiv nachvollziehbaren und inhaltlich erschöpfenden Interpretationen zu gelangen. Eine Schlüsselstrategie (auch konstruktivistisch begründeter) qualitativer Forschung besteht im „Scannen“ der Daten nach bestätigender Bedeutung,

d.h. es wird geprüft, inwieweit die Eingangshypothesen einen viablen Interpretationsrahmen für die Daten bilden. Charakteristisch für diese Interpretationsstrategie ist die Komplementarität von Verifikation und Induktion. Verifikation bedeutet hierbei, dass bei der Interpretation nach Videopassagen gesucht wird, die Eingangshypothesen bestätigen können. In der Induktionsphase, die jeweils folgt, werden die Daten ohne feste Hypothese betrachtet; man richtet den Blick vorwiegend auf solche Passagen, die bisher nicht erwartete Bedeutungszusammenhänge liefern. Auf diese Weise verläuft der Interpretationsprozess spiralförmig und approximativ.

Methoden, bei denen Videodaten speziell zur Untersuchung von Lehr-Lern-Prozessen genutzt werden, sind bei von Aufschneider beschrieben (VON AUFSCHNAITER & WELZEL, 2001). Hier wird deutlich, dass Unterrichtsvideos geeignete Mittel sind, um alle der direkten Beobachtung zugänglichen Aspekte der Nutzung von Lernangeboten und der Interaktion zwischen Lehrenden und Lernenden zu „konservieren“. Auf diese Weise können sie nachfolgend auch aufwendigeren Analyseverfahren zugeführt werden, die in „Echtzeit“, d.h. während des Unterrichts, nicht angewendet werden könnten.

#### 7.4.4 Field Notes und Concept Maps

Field notes oder Feldnotizen sind ein Instrument der teilnehmenden Beobachtung (vgl. BORTZ et al., 2002, S. 267 ff.) in einer authentischen Situation im Beobachtungsfeld. Die Situationen, um die es hier geht, sind zum einen die Sitzungen des Lehrerarbeitskreises, bei denen keine Videoaufzeichnungen gemacht worden sind. Die Feldnotizen, die gleichzeitig den Charakter von Verlaufsprotokollen haben, sind von Studenten angefertigt worden (76 DIN A4-Seiten aus den Sitzungen des Arbeitskreises). Sie spielen für die formative Evaluation eine zentrale Rolle, weil sie - neben den Produkten der Sitzungen - die einzige Informationsquelle darstellen, mit deren Hilfe sich die Prozesse der Gruppensitzungen rekonstruieren lassen. Aus diesem Grunde sind die von Studenten angefertigten Notizen direkt im Anschluss an die Sitzungen vom Projektleiter (dem Autor) ergänzt und kommentiert worden, um eine weitere Perspektive zu integrieren.

Zum anderen sind auch in den Unterrichtsstunden Feldnotizen (vom Projektleiter) angefertigt worden. Ähnlich den Notizen aus den Gruppensitzungen sind die Feldnotizen zum Unterricht von weiteren Beobachtern (u.a. D. Stavrou) direkt nach dem Unterricht ergänzt worden. Warum aber

## 7. Ein Unterrichtskonzept zur nichtlinearen Physik in der gymnasialen Oberstufe

sind Feldnotizen in einer Situation angefertigt worden, die bereits per Video festgehalten wird? Der Grund liegt darin, dass Eindrücke und Wahrnehmungen fixiert werden können, die dem Video entgehen. Dazu gehören wörtliche Äußerungen von Schülerinnen und Schülern und Lehrpersonen, die nicht vom Video erfasst werden. Dazu gehören auch Anmerkungen der Lehrperson, die dem Versuchsleiter (oder weiteren Beobachtern) so mitgeteilt werden, dass sie nicht vom Video erfasst werden können. Vor allem aber können Kommentare und Bewertungen eines Beobachters aufgenommen werden, die durch die Authentizität der Situationen hervorgerufen werden und beim alleinigen Betrachten des Videos evtl. nicht wiederholbar sind. Dies können Eindrücke zur Stimmung und zum Klima in der Klasse sein oder Bewertungen dazu, wie und aus welchen vermuteten Gründen eine Lehrperson vom besprochenen Konzept abweicht. Das bedeutet zusammengefasst, dass die authentische Situation den Beobachter veranlassen kann, Beziehungen zwischen Äußerungen, Handlungen und theoretischem Konzept herzustellen, zu denen er allein anhand des Videomaterials nicht in der Lage wäre. Für die Feldnotizen ist ein Raster angefertigt worden, das in Tabelle 7.7 dargestellt wird. Dieses Raster verwirklicht eine Systematisierung der Feldnotizen (vgl. dazu das Konzept der *systematischen, aber unstandardisierten teilnehmenden Beobachtung* nach LAMNEK (2005, S. 613, 625 ff.). Die Auswertung der Feldnotizen findet im Rahmen der qualitativen Inhaltsanalyse der vorliegenden Daten (vgl. MAYRING, 2010) statt.

	Beobachter 1		Beobachter 2
<b>Datum, Stunde, Zeit</b>	<b>Ablauf, Notizen, Kommentare</b>	<b>Äußerungen von Schülern oder Lehrern</b>	<b>Notizen Kommentare</b>
Pause 9:10	...	...	
9:25	<ul style="list-style-type: none"> <li>- T3, T4 ausgeteilt, Video 2 gesehen</li> <li>- es fehlt: verbindende Folie sollte öfter aufgelegt werden, damit               <ul style="list-style-type: none"> <li>a) der Zusammenhang klar wird</li> <li>b) damit das Ziel des Unterrichts klar werden kann</li> </ul> </li> <li>- Ziel und Absicht muss zu Beginn klar werden, ist es aber nicht. Eindruck: Schüler wissen nicht genau, wo es hinget</li> <li>- Anfangs wurde einmal kurz gesagt, dass die Begriffe auf der Folie im Unterricht geklärt werden sollen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schüler: T1 und T2 gut lesbar und verständlich, Texte zusammenzufassen ist im Physikunterricht unüblich, sonst üblich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- da bin ich mir nicht so sicher, ob das weitergeholfen hätte</li> </ul>
	...	...	...

Tab. 7.7 Beobachtungsraster für Feldnotizen mit Beispiel

**Concepts Maps.** Unter Concept Maps sollen hier in Anlehnung an NOVAK (1998, Kapitel 4) (graphische) Netzwerke aus Begriffen (als Knoten) und Relationen zwischen den Begriffen (in Form beschrifteter Pfeile) verstanden werden. Eine zentrale Funktion von Concept Maps besteht in der Wissensdiagnose (vgl. STRACKE, 2004, S. 31 ff.) und der Messung der Qualität von Wissen (FRIEGE & LIND, im Druck). In der vorliegenden Studie sind gegen Ende der einzelnen Erpro-



## 7. Ein Unterrichtskonzept zur nichtlinearen Physik in der gymnasialen Oberstufe

	Format	Schülerzahl	Alter /Jahre	Fb. vor	Kurz-interv.	VIDEO	Feld-notiz	Maps/Prod	Fb. nach	TE nach
E1	Vertiefender Unterr., Stufe 11	16	17,2	11	---	durchgängig	durchgängig	4/teilweise	11	4
E2	Physikgrundkurs, Stufe 13	12	19,2	11	10	durchgängig	durchgängig	4/teilweise	11	4
E3	Physikgrundkurs, Stufe 11	13	17,8	9	6	durchgängig	durchgängig	3/teilweise	5	4
E4	Projektkurs, Stufe 13	12	≈ 19	3	---	---	durchgängig	teilweise	---	---
E5	Projektkurs Stufe 13	12	≈ 19	---	4	---	durchgängig	teilweise	---	---

Tab. 7.8 Überblick über die Erprobungsgruppen und die Untersuchungsinstrumente, die in den Erprobungen eingesetzt worden sind (vgl. Abschnitt 7.2): Fragebogen vor der Erprobung, Kurzinterview nach einzelnen Unterrichtsstunden, Unterrichtsvideo, Feldnotizen, Concept Maps und andere Produkte des Unterrichts, Fragebogen nach der Erprobung, Teaching Experiment nach der Erprobung (ggf. ist die Anzahl der bearbeiteten Fragebögen bzw. geführten Interviews angegeben)

### 7.5 Evaluationsergebnisse

Die folgenden Analysen sind in drei Schwerpunkte gegliedert worden. Sie orientieren sich an den unter 7.1 formulierten Evaluationsaufgaben und erlauben eine Fokussierung auf die generellen Fragen: Welche Prozesse der Didaktischen Rekonstruktion sind im Lehrerteam abgelaufen? Inwieweit ist das Unterrichtskonzept im realen Unterricht in verschiedenen Kursen umsetzbar gewesen? Welche Lernprozesse sind bei Schülern (und Lehrern) abgelaufen? Die Analysen sind im Sinne einer qualitativen Inhaltsanalyse (vgl. Mayring, 2002, 2010) kategoriengestützt durchgeführt worden. Dazu sind je nach Evaluationsaufgabe mehrere der Datenquellen zusammen genommen und unter einem bestimmten Blickwinkel analysiert worden. Die Auswertung ist „spiralförmig“ vor sich gegangen. Das bedeutet, dass bei einer ersten Durchsicht des Materials zunächst geprüft worden ist, ob die aufgrund von Vorannahmen oder theoretischen Überlegungen im Vorfeld gebildeten Kategorien anhand des Datenmaterials gestützt werden können. Ist dies nicht der Fall gewesen, sind die entsprechenden Kategorien verworfen worden. Die Durchsicht des Datenmaterial hat aber auch zur Bildung neuer Kategorien geführt, die anfangs nicht erwartet worden waren. Das veränderte System von Kategorien ist bei erneuten Durchsichten des Materials im Rahmen von „Verifikation“ und „Verwerfen“ stabilisiert worden (vgl. GLÄSER & LAUDEL, 2004). Das „Scannen“ des Datenmaterials und die Kategorienbildung ist somit als ein wechselseitiger Prozess zu verstehen (vgl. LAMNEK, 2005). Er wird erst dann beendet, wenn der Abgleich von Kategorisierung und Daten keine Veränderung am Kategoriensystem mehr verlangt.

Kategoriensysteme haben in dieser Untersuchung auf unterschiedlichen Ebenen gelegen. Bezogen auf einzelne Fragebogenitems mit offenem Antwortformaten hat man es jeweils mit einem System von Antwortkategorien zu tun gehabt. Bei der Analyse von qualitativen Interviews (z.B. hinsichtlich der Vorstellungen von Schülern zur Reichweite von Naturgesetzen) beschreiben die

Kategorien bestimmte Vorstellungen oder Konstrukte. Die Datenbasis bilden hier ausgedehnte Textpassagen. Und bei der Evaluation von Planung, Entwicklung und Erprobung von Unterricht beschreiben die Kategorien komplexe Prozesse, z.B. Handlungen, Lernprozesse, Entscheidungsprozesse. Als Datenbasis für solche Kategorisierungen haben alle zur Verfügung stehenden Datenquellen (Protokolle, Videomaterial, Interviews, Fragebögen und Produkte) gedient.

Im folgenden Auswerteschwerpunkt wird untersucht, wie weit sich die Prozesse der Unterrichtsentwicklung im Schülerin und Schülererteam mit Hilfe des Modells der Didaktischen Rekonstruktion beschreiben lassen. Darin liegt die Absicht, Möglichkeiten und Probleme der Entwicklungsprozesse besser erkennen zu können.

### 7.5.1 Schwerpunkt: Prozesse der Didaktischen Rekonstruktion im Schülerin und Schülererteam

*„Ich möchte immer einen Schritt weiter als die Schüler sein.“*  
(Zitat eines Mitglieds des Arbeitskreises)

Bei der Evaluation der Planungs-, Entwicklungs- und Erprobungsprozesse des Arbeitskreises sind die Eingangsinterviews mit den Lehrpersonen und die von studentischen Hilfskräften erstellten Protokolle der Sitzungen des Arbeitskreises (rund 70 DIN A 4-Seiten) ausgewertet worden. Die Studenten sind Mitglieder eines Forschungsseminars gewesen, das sich mit allgemeinen forschungsmethodischen Fragen und mit der vorliegenden Studie befasst hat. Somit sind die Studenten in die Ziele und die Vorgehensweise des Projekts eingedacht gewesen. Feldnotizen (des Autors) nach den Sitzungen des Arbeitskreises und nach Gesprächen mit einzelnen Lehrpersonen sowie Produkte der Sitzungen (Tafelmitschriften, Entwurfsskizzen zur Sachstruktur etc.) haben die Datenbasis ergänzt.

#### **Erwartungen der Lehrpersonen und Ziele**

Die Erwartungen der Lehrpersonen an den zu entwickelnden Unterricht und die Reaktionen ihrer Schüler sind untersucht worden, um sie den tatsächlichen Prozessen gegenüber zu stellen. Insgesamt sind die Erwartungen der Lehrpersonen als „verhalten positiv“ zu bezeichnen gewesen, was den Erfolg eines Unterrichts über nichtlineare Systeme angeht. Die Lehrpersonen sind aktiv in Planung und Umsetzung eingebunden gewesen und haben in die ablaufenden Prozesse steuernd eingegriffen; sie sind daher im Vorfeld davon ausgegangen, dass ein von ihnen entwickeltes Unterrichtskonzept unter realen Bedingungen umgesetzt werden kann. Allerdings haben sie Bedenken geäußert, ob alle mit dem Unterricht verbundenen Ziele erreicht werden können. Einhellig haben sie betont, dass nichtlineare Physik kein Bestandteil ihrer Ausbildung gewesen ist. Die Erwartungen der Lehrpersonen lassen sich zu fünf Punkten zusammenfassen:

- Der Unterricht überfordert die kognitiven (und speziell die mathematischen) Fähigkeiten ihrer Schüler voraussichtlich *nicht*; thematisch geht der Unterricht *nicht* an ihren Interessen vorbei.
- Der Unterricht könnte Anknüpfungspunkte für weitere in der Studienstufe zu unterrichtende Inhalte bieten. Als Beispiel wird „Reibung“ genannt, ein Thema, das in der Schule meist wenig thematisiert wird, für real ablaufende Prozesse aber von großer Bedeutung sei.
- Damit zusammen hängt die Erwartung, dass Schüler durch die Behandlung nichtlinearer Systeme zu einem besseren Verständnis von Beispielsystemen aus ihrer Alltags- und Erfahrungswelt gelangen. Hierbei ist das Problem angesprochen, dass üblicher Physikunterricht meist Systeme betrachtet, die aus ihrem Kontext herauspräpariert worden sind und damit nicht mehr für reali-

## 7. Ein Unterrichtskonzept zur nichtlinearen Physik in der gymnasialen Oberstufe

---

tätsnahe Systeme stehen (vgl. hierzu ANGELL et al., 2004, wonach Themen moderner Physik von Schülern als realitätsnäher angesehen werden als Themen der klassischen Physik).

- Der Unterricht könnte die Diskussion um Weltbilder in der Physik bereichern. Weltbilder seien ein wichtiges Thema in der Oberstufenphysik; der philosophisch-weltanschauliche Aspekt der nichtlinearen Physik bzw. der Chaostheorie kann beim Interesse Jugendlicher, über Weltbilder zu sprechen, ansetzen. (Diese Erwartung hat mit zur Entwicklung des Moduls „Himmelsmechanik - Erfolge und Ängste“ geführt).
- Auch der Nature-of-Science-Aspekt liegt im Bereich der Erwartungen der Lehrpersonen. Es wird ein Beitrag des Unterrichts zum Verstehen der Wechselbeziehung zwischen Experiment, Theorie und Hypothesen erwartet.
- Generell werden zwei Reaktionen der Schüler auf den Unterricht erwartet: Eine Gruppe von Schülern werde das Thema dadurch für interessant und spannend halten, dass realitätsnahe Beispielsysteme diskutiert werden. Bei der anderen Gruppe bestehe die „Gefahr“, dass sie die eingeschränkte Vorhersagbarkeit nichtlinearer Systeme übergeneralisiert und dadurch den Naturwissenschaften eine geringere Bedeutung bei der Welterklärung zubilligt als bisher.
- Die Lehrpersonen möchten, dass Unterricht über nichtlineare Systeme vier Ziele erreicht: Schüler sollen durch den Unterricht lernen, welche spezifischen Merkmale und welche konzeptuelle Ausrichtung die nichtlineare Physik kennzeichnet, welche die wesentlichen Begriffe, Konzepte und Prinzipien sind und welche Anwendungsfelder heute bestehen. Außerdem soll der Unterricht das naturwissenschaftliche Denken und Arbeiten der beteiligten Schüler fördern. Die ausdifferenzierten Ziele sind im Abschnitt 7.1 dargestellt.

### **Fachliche Klärung und Didaktische Strukturierung: Prozesse der Sichtung und Bewertung von Informationen**

Während der ersten Sitzungen hat neben organisatorischen Fragen die fachliche Klärung des neuen Inhalts im Mittelpunkt gestanden. Eine wesentliche Bedingung für die Arbeit ist es aufgrund des knappen Zeitbudgets gewesen, die Aneignung von Fachinformationen und mithin die fachliche Klärung effektiv zu gestalten. Obwohl sich die Lehrpersonen lediglich flüchtig gekannt haben, hat sich auf der organisatorischen Ebene sofort eine „professionelle Vertrautheit“ gezeigt, die zur Gruppendynamik positiv beigetragen hat. Offenbar ist allen beteiligten Lehrpersonen der Umgang mit knappen Zeitressourcen und Planungsunsicherheiten bekannt gewesen. Die Erfahrung der Lehrpersonen mit der Schulpraxis hat während der ersten Sitzungen zu folgenden Vorschlägen, Bedenken und Aufträgen an die Projektleitung geführt:

- Um den Entwicklungsaufwand zu minimieren, soll die Sachstruktur für alle Erprobungen gleich gehalten werden. Das Unterrichtskonzept soll aber so variabel gestaltet sein, dass es an die besonderen Bedingungen der einzelnen Erprobung angepasst werden kann.
- Die Frage nach der Verfügbarkeit von Experimenten ist zentral gewesen. Der Unterricht soll sich an den vorhandenen Materialien orientieren. Der Projektleiter wird beauftragt, vorhandene Experimente, Materialien etc. vorzustellen. Es ist deutlich geworden, dass das Interesse in erster Linie an Demonstrationsexperimenten besteht; Schülerexperimente spielen in dieser sondierenden Phase eine untergeordnete Rolle.
- Zwei Ebenen der Wissensvermittlung sind von den Lehrpersonen unterschieden worden. Dies ist zum einen die Ebene der physikalischen Begriffe und Konzepte der nichtlinearen Physik (wie z.B. deterministisches Chaos, Fraktale), zu deren Entwicklung die Experimente beitragen sollen. Zum anderen ist es die Ebene der grundlegenden naturwissenschaftlichen Prinzipien wie Determinismus, Vorhersagbarkeit, Ordnung etc.

- Tiefer gehende physikalische Informationen sollten vom Projektleiter in Form eines Vortrags vorbereitet werden. Ebenso sollten Informationen über bereits vorhandene Unterrichtskonzeptionen dargeboten werden.
- Als offene Fragen sind diskutiert worden: Wie weit sollen computergestützte Simulationen chaotischer Systeme als Hilfsmittel einbezogen werden; welcher Grad an Mathematisierung soll gewählt werden?
- Bestimmte physikalische Darstellungsmethoden wie insbesondere das Phasenraumkonzept sind als zu schwierig eingestuft worden, weil das konzeptuelle und mathematische Rüstzeug nach Ansicht der Lehrpersonen bei den Schülern fehle und kurzfristig nicht entwickelt werden könne.

Diese Anmerkungen und Aufträge der Lehrpersonen machen deutlich, dass in der Phase der fachlichen Klärung bereits Elemente der Didaktischen Strukturierung (s. Kapitel 2) zu erkennen sind. Fachliche Klärungen und das Herstellen von Beziehungen zwischen Fachwissen und den Kenntnissen und Fähigkeiten der Schüler greifen ineinander. Die Protokolldaten zeigen, dass die Lehrpersonen auch dann bereits über die Umsetzbarkeit bestimmter Inhalte diskutiert haben, wenn noch nicht alle relevanten fachlichen Aspekte geklärt gewesen sind. Die Analyse der Diskussionen im Arbeitskreis (Protokolldaten) macht deutlich, dass die Gruppe häufige Wechsel zwischen fachlicher Klärung und didaktischer Strukturierung vollzieht. Aufgrund der Protokolldaten und der Feldnotizen kann geschlossen werden, dass den Lehrpersonen diese Wechsel in den meisten Fällen nicht bewusst gewesen sind. Dennoch haben sie das Zusammenspiel von fachlicher Klärung und Didaktischer Strukturierung selbst regulieren können. Die Unsicherheit dieser Phase, die aufgrund begrenzten fachlichen Wissens entstanden ist, ist durch die Praxiserfahrung der Lehrpersonen aufgefangen worden. Es scheint zu ihrem Professionswissen zu gehören, dass Planungen auch in noch ungeklärten Situationen (wie im Falle begrenzten Fachwissens) letzten Endes zu einem Ergebnis führen.

Einen gewissen Abschluss der frühen Phase im Arbeitskreis ist durch die Beendigung von Informationseinträgen durch den Projektleiter gekennzeichnet. Dabei werden auch Überlegungen zu allgemeinen Zielen von Physikunterricht vorgestellt sowie Unterrichtskonzeptionen, die vorgeschlagen oder erprobt worden sind (vgl. Kap. 4; KRÜGER, 1995; KORNECK, 1998), vor allem aber fachliche Informationen über dynamische Instabilität und Strukturbildung.

**Probleme in der Phase der fachlichen Klärung.** Die beteiligten Lehrpersonen haben sich im Rahmen der Studie in einer Doppelrolle befunden. Einerseits sind sie „Partner im Forschungsprozess“ gewesen, andererseits sind sie nach ihren Vorstellungen und Ansichten zum Unterricht und nach ihrem Vorwissen befragt worden. Aufgrund der Asymmetrie, die sich durch die Befragungen ergeben hat, haben sie ein gewisses Unbehagen verspürt. Obwohl der Projektleiter durchgängig die Expertenfunktion der Lehrpersonen betont hat, haben sie sich vorwiegend als Novizen bzgl. des Wissens über nichtlineare Physik wahrgenommen. In der ersten Phase der Arbeit im Team ist es nicht gelungen, die Asymmetrie zwischen Fachdidaktiker und Lehrperson gänzlich abzubauen.

Ein weiteres Problem hat darin bestanden, dass bei den Lehrpersonen des Arbeitskreises aufgrund der Belastung des normalen Schulalltags zwischen den Sitzungen wenig Zeit geblieben ist, Informationsmaterial im Selbststudium aufzunehmen. Die eingeplanten Zeiten für eine inhaltliche Vertiefung der physikalischen Zusammenhänge haben nicht zur Verfügung gestanden. Dies hat dazu geführt, dass die Aufarbeitung von fachlichen Informationen komplett in die Gruppensitzungen verlagert worden ist. Die ursprünglich vorgesehene workshopartige Arbeit während der Gruppentreffen (die Anfertigung von Sachstrukturdiagrammen, Ablaufplänen und Unterrichtsmaterialien) ist erst nach einer relativ langen Phase des Darbietens zustande gekommen.

### **Didaktische Analyse und Unterrichtsplanung: Prozesse der Auswahl von Inhalten und Methoden**

In einer zweiten Phase der Teamarbeit sind Überlegungen hinzugekommen, die im Modell der Didaktischen Rekonstruktion (vgl. KATTMANN et al., 1997, vgl. Kapitel 2) als Didaktische Analysen bezeichnet werden. Im Rahmen einer solchen Analyse wird nach der Bedeutung von Inhalten für die Lernenden gefragt und es sind Inhalte exemplarisch ausgewählt worden. Didaktische Strukturierungen, also Überlegungen zu den Leitlinien des Unterrichts, sind damit Hand in Hand gegangen. In vielen Fällen haben die Lehrpersonen eingangs die vorhandenen Materialien, insbesondere die zur Verfügung stehenden Experimente und die vorgestellten Unterrichtsentwürfe (der Kieler Gruppe und anderer) diskutiert. Anschließend ist meist überlegt worden, mit welchen Lerninhalten und mit welchen Handlungssequenzen das betrachtete Experiment oder Objekt in Verbindung gebracht werden kann. Ein „Primat der Ziele“ hat bei diesen Diskussionen nicht bestanden, wenngleich Ziele in den Diskussionen eine wichtige Rolle gespielt haben. Hier hat sich ein Pragmatismus gezeigt, vorhandenes Material nutzen zu wollen; der Umgang mit Zielen ist zu Beginn dieser Phase der Didaktischen Analyse eher ein impliziter Umgang gewesen. Es ist für den Arbeitskreis ein hinreichendes Vermittlungsziel gewesen, die sich herausbildende Sachstruktur auf die Wissensstrukturen der Schüler abzubilden. Auf Anregung des Projektleiters sind Ziele des geplanten Unterrichts explizit diskutiert worden. Als Ergebnis dieser Diskussionen ist eine differenzierte Liste von Zielen (Zielbereiche A bis D) aufgestellt worden (s. Abschnitt 7.1).

Bis zur expliziten Diskussion von Zielen und zur Auswahl von Inhalten für den Unterricht hat der Arbeitskreis mehr als drei Sitzungen á 90 Minuten für Orientierung, Organisation und fachliche Klärung benötigt. Prozesse der fachlichen Klärung können als inhaltliche Fortbildung interpretiert werden und benötigen Zeit. Wenn gleichzeitig die Absicht besteht, Unterricht zu entwickeln, so vergrößert sich der Bedarf an Zeit dadurch, dass zusätzlich methodische Elemente, Experimente und Objekte, Ideen zu Unterrichtszielen und Überlegungen zu den Lernmöglichkeiten der Schüler reflektiert werden müssen. Fragen, die im Arbeitskreis Details der Unterrichtsplanung betroffen haben, sind:

- Soll der Einstieg in die Unterrichtseinheit über das Thema „Schwingungen“ gewählt werden? Soll dabei das Drehpendel verwendet werden? Wie weit sollen Schwingungen dabei physikalisch oder „phänomenologisch“ betrachtet werden? Welches Vorwissen auf Seiten der Schüler kann vorausgesetzt werden?
- Ist ein Einstieg über das Mehrkörperproblem in der Astronomie ein geeigneter Zugang, insbesondere in Stufe 11?
- Welcher zeitliche Umfang ist im Vergleich zur Behandlung anderer Themen im Unterricht angemessen? Wie weit ist Vertiefender Unterricht VU ein geeignetes Format für einen Unterricht über nichtlineare Systeme?

Nach den Phasen der fachlichen Klärung und der didaktischen Analyse hat der Arbeitskreis Entscheidungen für die Entwicklung des Unterrichtskonzepts getroffen. In diese Entscheidungen sind die Ergebnisse aus empirischen Studien des Kieler Projekts mit eingeflossen. Aufgrund der Erfahrungen mit Lehr- und Lern-Prozessen in der gymnasialen Oberstufe haben die Lehrpersonen folgende Entscheidungen getroffen:

- Der Unterricht wird in Form von Modulen entwickelt, damit verschiedene Unterrichtsvarianten realisiert werden können und damit die Adaption an die unterschiedlichen Kurse und Unterrichtsstile möglich ist.
- Wissenschaftliche Termini wie „Chaos“ sollten relativ spät vom Lehrpersonen eingebracht werden, damit ungewollte Assoziationen vermieden werden.
- Ein hoher Anteil an selbständigen Gruppenarbeitsphasen soll den Unterricht kennzeichnen.

- Computer sollen zur Simulation und Berechnung in einem Großteil der Gruppenphasen eingesetzt werden.
- Die Gruppe teilt sich auf und verfolgt zwei Unterrichtskonzepte; Konzept A setzt inhaltlich an der Instabilität des Sonnensystems sowie der Nichtvorhersagbarkeit von Meteoriteneinschlägen an und stellt dies den Errungenschaften der Astronomie bei der Vorhersage anderer astronomischer Ereignisse gegenüber; der Einsatz des Magnetpendels und von Experimenten zur Strukturbildung soll folgen; dieser Vorschlag ist in einer dreiköpfigen Teilgruppe verfolgt worden.
- Konzept B setzt auf die Eigenaktivität der Schüler beim Experimentieren mit dem Magnetpendel und verwandten Experimenten; das Konzept der Sensitivität soll auf diskrete Beispiele, wie die logistische Gleichung ausgedehnt werden; nach Möglichkeit soll aus Messung der Herzfrequenz auf Strukturen im Phasenraum geschlossen werden; diesbezügliche Informationen sollen eingeholt werden.

**Sachstruktur für den Unterricht und Unterrichtskonzept.** Der Arbeitskreis hat sechs Module entwickelt, die im Abschnitt 7.3 ausführlich dargestellt worden sind. Die Titel dieser Module sollen das Interesse der Schüler wecken und den Schwerpunkt des jeweiligen Moduls andeuten. Die zwei Konzepte A und B sind im Rahmen detaillierter Planung zu eigenständigen Modulen ausgebaut worden. So ist der Aspekt der eingeschränkten vs. perfekten Vorhersage im Planetensystem zu einem eigenständigen Modul ausgearbeitet worden. Messungen am Herzen von Schülern sind nicht in die Module integriert worden, weil nach Aussage eines führenden Arztes auf dem Gebiet der Kardiologie (Dr. Meesmann, Uni Würzburg) diese Art der Messungen technisch aufwendig ist und die Ergebnisse die Schüler zudem verunsichern könnten. Die Titel der Module sind:

- Himmelsmechanik - Erfolge und Ängste
- Dynamisch instabil - einfache Experimente helfen beim Verstehen
- Analogiebildung und Begriffe - chaotische Prozesse generalisieren
- Struktur trotz Zufall - Muster spielen mit Zufällen
- Strukturelle Ordnung - Anwendungen helfen leben
- Weltbilder - unsere Sicht von Welt und Physik im Wandel

Sachstrukturdiagramme zu den Modulen sind nur sehr rudimentär angefertigt worden. Es scheint so zu sein, dass diese Art der Vorbereitung von den beteiligten Lehrpersonen nicht als zielführend betrachtet worden ist. Eine Verschriftlichung von Zielen, Sachstruktur und Methoden steht trotz der Tatsache, dass man sich fachlich auf Neuland bewegt, einem Pragmatismus bei der Teilnahme an der Studie entgegen. Teilweise ist dieses Vorgehen der Lehrpersonen durch ihre Praxiserfahrung und dem ihr inhärenten Vertrauen in die Umsetzbarkeit aufgefangen worden. Teilweise hat dies aber auch zu Problemen in der Umsetzung des Unterrichts geführt, denn nicht in jedem Fall ist es gelungen, die Kernideen der Module in der von der Gruppe beabsichtigten Weise zu transportieren. Davon wird weiter unten berichtet. Für weitere Studien in diesem Feld bedeutet das, dass auf Verschriftlichungen bei den Planungen bestanden werden sollte, um zentrale Ergebnisse, die der Unterricht erreichen soll, formuliert vorliegen zu haben. Die Sachstrukturen zu den einzelnen Modulen sind ebenfalls in Abschnitt 7.3 dargestellt. Sie sind Ergebnis der Diskussionen des Arbeitskreises gewesen, aber vom Projektleiter graphisch umgesetzt worden und den beteiligten Lehrpersonen zur Kommentierung und Verifizierung vorgelegt worden.

### **Adaption und Modifikation:**

#### **Prozesse der Anpassung an die Schulpraxis**

Die Gesamtgruppe hat ihre Arbeit zunächst da beendet, wo die Adaption beginnt, und erst wieder aufgenommen, als empirische Ergebnisse der Erprobungen diskutiert und generalisiert worden sind. In der Phase der Adaption ist das Unterrichtskonzept an die Bedingungen der einzelnen Erprobungen angepasst worden, d.h. an die jeweilige Schülerpopulation, den Unterrichtsstil des oder der betreffenden Lehrpersonen, an den vorangegangenen Unterrichtsstoff usw. Es haben sich nun Kleingruppen von jeweils zwei bis drei Personen gebildet, um die Adaption vorzunehmen. Bei der Adaption des Unterrichtskonzepts an die Bedingungen des Vertiefenden Unterrichts (erste Erprobung) ist entschieden worden, das Modul „Himmelsmechanik - Erfolge und Ängste“ als Auftaktmodul einzusetzen und den Unterricht mit dem Modul „Weltbilder - unsere Sicht von Welt und Physik im Wandel“ zu beschließen. Die Kleingruppen haben sich um die detaillierte Ausgestaltung der Unterrichtsmodule und -stunden gekümmert. Arbeitsblätter und Informationsmaterial sind entwickelt worden, die Möglichkeiten der Experimente und der Software sind untersucht und vertiefende Analysen der physikalischen Zusammenhänge sind durchgeführt worden. Damit hat die Kleingruppenarbeit die Arbeit der Gesamtgruppe widerspiegelt, insofern Phasen der fachlichen Klärung und Phasen der Konstruktion ineinander verschränkt gewesen sind. Die Kleingruppenarbeit hat nahezu soviel Zeit beansprucht wie die bisherige Arbeit in der Gesamtgruppe, zusammen rund 14 Zeitstunden. Die entwickelten Materialien befinden sich im Anhang.

Die Rolle des Fachdidaktikers in der Kleingruppe ist wie in der Gesamtgruppe die eines Beschaffers von physikalischen und auch von empirischen Informationen und die eines Beraters. Die Rolle der Lehrpersonen hat sich dahin entwickelt, dass sie Informationen gesichtet haben, aufgrund ihrer Unterrichtserfahrung relevante Informationen ausgewählt, unterrichtsmethodisch und didaktisch Strukturierungen vorgenommen haben und damit insgesamt diejenigen sind, die Entscheidungen getroffen haben.

**Modifikationen.** Sitzungen der Gesamtgruppe hat es nach den jeweiligen Erprobungen gegeben. Erfahrungsberichte der Lehrpersonen, die in der Erprobung unterrichtet haben, und ein Bericht des Projektleiters über die Auswertung der Schülerfragebögen haben die Sitzungen eingeleitet. Vom Projektleiter ausgewählte Videoaufzeichnungen mit problematischen Unterrichtssequenzen sind vorgeführt worden. Danach hat die Aussprache über Probleme bei der Umsetzung und über weitere Planungen stattgefunden. Notwendige Änderungen des Unterrichtskonzepts sind diskutiert worden. Viele Details sind angesprochen worden, die hier nicht aufgelistet werden können, die aber in die Modifikation des Unterrichtskonzepts eingeflossen sind.

#### **Diskussion**

Die Prozesse im Arbeitskreis sind durch Zeitknappheit und Pragmatismus geprägt gewesen. Unter diesem Gesichtspunkt kann die Arbeit der Gruppe als praxisnah bezeichnet werden, zumal Unterricht konstruiert worden ist, der tatsächlich gehalten worden ist. Eine eher praxisferne Rahmung hat allerdings dadurch bestanden, dass ein Fachdidaktiker an der Entwicklung mitgewirkt hat. Zudem haben Experimente und Materialien zur Verfügung gestanden oder sind beim Fachdidaktiker in Auftrag gegeben worden. Insgesamt kann die Rolle des Fachdidaktikers als die des Anregenden, des Informationsbeschaffers, des Ausarbeiters von Materialien und des Begleiters im Planungsprozess angesehen werden. Die wesentlichen Entscheidungen hat der Arbeitskreis allerdings ohne den Fachdidaktiker getroffen. Die Interviewdaten zeigen, dass die beteiligten Lehrpersonen in ihrer Berufspraxis durchaus Erfahrungen mit kooperativen Arbeitsformen gesammelt haben, dass sich diese Erfahrungen aber in erster Linie auf organisatorische Problemstellungen auf die Ebenen von Schule und Unterricht beziehen. Kooperationen, bei denen Unterricht gemeinschaftlich geplant, entwickelt oder gar zusammen mit einem Kollegen durchgeführt wird, sind nur ansatzweise bekannt. Deshalb wundert es nicht, dass Lehrpersonen, die sowohl physikalisch-

inhaltlich als auch was die Arbeitsweise angeht Neuland betreten, zunächst eine relativ lange Orientierungsphase benötigen.

Elementarisierungen haben in den meisten Fällen bei den zur Verfügung stehenden Experimenten und Objekten angesetzt. Diese verdeutlichen bestimmte Prinzipien der nichtlinearen Physik, haben also paradigmatischen Charakter. Die Abfolge der Experimente und Objekte und der damit verbundenen Konzepte und Prinzipien hat im Arbeitskreis die elementarisierte Sachstruktur definiert. Lehrbuchtexte oder schriftliche Zusammenfassungen sind zum Zwecke der Elementarisierung kaum herangezogen worden, obwohl sie zur Verfügung gestanden haben. Das wesentliche Mittel der Ausschärfung von Ideen ist die Diskussion innerhalb der Gesamtgruppe oder der Kleingruppe gewesen. Verschriftlichung von Ideen oder graphische Fixierung von Konzepten sind so gut wie nicht verwendet worden. Hierin hat sich offenbar der generelle Arbeitsstil der Lehrpersonen widerspiegelt. Um es vorweg zu nehmen, lassen sich auf diese Arbeitsweise bestimmte Probleme in der Umsetzung zurück führen, z.B. dass Zwischenergebnisse mit den Schülern nicht ausreichend fixiert worden sind (s.u.).

Die ablaufenden Prozesse im Arbeitskreis können im Rahmen des Modells der Didaktischen Rekonstruktion beschrieben werden. Verschiedene Phasen, die ihre Entsprechungen im Modell finden, können unterschieden werden: *Fachliche Klärungen* in Form von Informationsichtung, -bewertung und -auswahl und Phasen der *Didaktischen Analyse* und der *Didaktischen Strukturierung*, in denen sich die Lehrpersonen die Ziele des Unterrichts bewusst machen und Entscheidungen über Inhalte und Begriffe getroffen haben. Diese Phasen des Modells sind durch relative Offenheit gekennzeichnet, die teilweise zu Verunsicherungen geführt haben. Die Didaktische Strukturierung mündet in *Leitlinien für den Unterricht*, die im vorliegenden Fall durch die Grundaussrichtungen der Module repräsentiert sind (s. 7.3). In der Phase der Adaption, in der in Kleingruppen der Unterricht mit seinen Methoden, Materialien und Medien geplant worden ist, hat es neben der *Unterrichtskonstruktion* erneut fachliche Klärungen und Didaktische Strukturierungen gegeben, diesmal aber mit vertieften Fragestellungen. Abb. 7.7 veranschaulicht die Teilprozesse.

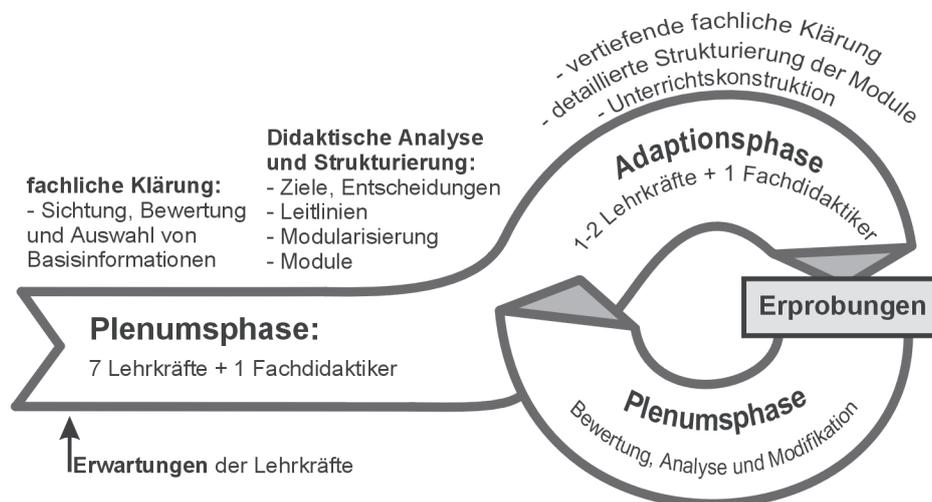


Abb. 7.7 Abgelaufene Prozesse im Lehrerarbeitskreis, modelliert als Teilprozesse einer Didaktischen Rekonstruktion

**Zusammenfassung.** Die im Lehrerarbeitskreis abgelaufenen Prozesse können mit dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion beschrieben werden. Phasen der fachlichen Klärungen, der Didaktischen Analysen und Strukturierungen und der Unterrichtsentwicklung sind deutlich unterscheidbar. Im Plenum sind zunächst fachliche Klärungen vorgenommen worden. Diese Phase hat sich von einer „klassischen“ Lehrerfortbildung dadurch unterschieden, dass bereits didaktische Überlegungen zur Vermittelbarkeit der diskutierten physikalischen Konzepte angestellt worden sind. Ein Unterrichtskonzept ist entwickelt worden, allerdings ohne Verschriftlichungen von Zielen und Methoden oder graphische Darstellungen der zugrunde liegenden Sachstruktur zu nutzen. Darin hat sich der pragmatische Arbeitsstil der Lehrpersonen gezeigt, deren fachdidaktisches Denken eher von den zur Verfügung stehenden Objekten und Experimenten ausgegangen ist als von Zielen und Sachstrukturen. - Die einzelnen Erprobungen sind durch Gruppen aus zwei bis drei Mitgliedern vorbereitet worden. In dieser Phase haben vertiefende fachliche Klärungen und Unterrichtskonstruktion ineinander gegriffen. Die Praxiserfahrung der Lehrpersonen hat sich vor allem darin gezeigt, dass bereits mit vorläufigen Planungs- und Klärungsergebnissen gearbeitet worden ist.

### 7.5.2 Schwerpunkt: Praxistauglichkeit und Variabilität des Unterrichtskonzepts

*„Mehr konkrete Frage stellen. Ich mag es nicht, wenn lange über etwas diskutiert wird.“  
(Änderungswünsche einer Schülerin, 16 Jahre)*

*„Meine Vorstellungen wurden in ganz neue Bahnen gelenkt. [...] Vielen Dank, war eine nette Zeit und besser als VU, Physik oder Schule an sich.“  
(Schülerin, 16 Jahre, zum dreitägigen Vertiefenden Unterricht)*

In diesem Schwerpunkt wird über die Ergebnisse der Erprobungen des Unterrichtskonzepts berichtet. Dazu ist untersucht worden, auf welche Weise die Module im Unterricht umgesetzt worden sind, welche Probleme entstanden sind und wie daraufhin das Unterrichtskonzept modifiziert worden ist. Unter dem Aspekt der Tauglichkeit in der Praxis ist analysiert worden, ob das Konzept variabel genug ist, um es an die Bedingungen unterschiedlicher Kurse und die Stile verschiedener Lehrpersonen anzupassen. Das Videomaterial und die Feldnotizen zum Unterricht bilden hier das zentrale Datenmaterial. Hinzu kommen Interviews mit Schülern, die nach einzelnen Unterrichtsstunden mit dem Ziel geführt worden sind, die Stimmigkeit einzelner Stunden im Konzept der Unterrichtsreihe zu untersuchen. Hinzu kommen auch die Teile der Schüler- und Lehrerfragebögen, in denen nach Änderungen am Konzept, der Reihenfolge der Module, nach dem Einsatz der Experimente etc. gefragt worden ist.

Zunächst werden hier die einzelnen Module diskutiert, bevor generelle Aspekte der Praxistauglichkeit angesprochen werden. Die erste der drei Erprobungen hat eine zentrale Rolle gespielt, denn die größten Veränderungsaufgaben sind danach zu lösen gewesen. Deswegen soll die erste Erprobung in aller Kürze als Fallstudie dargestellt werden. Erfolgreiche und problematische Aspekte der Durchführung mit Bezug zu den Unterrichtszielen und zur Sachstruktur und Abweichungen von den Planungen werden verdeutlicht und zu erklären versucht. Die erste Erprobung hat im Rahmen eines Vertiefenden Unterrichts stattgefunden. In der Phase der Adaption ist der in der Gesamtgruppe entwickelte Unterricht an die Bedingungen des Vertiefenden Unterrichts und die Besonderheit, dass zwei Lehrpersonen unterrichten, angepasst worden. Es ist eine Art Storyboard, also ein Fahrplan für die drei aufeinander folgenden Tage des Vertiefenden Unterrichts entworfen worden, der sich auf 830 min (rund 21 Unterrichtsstunden) bezogen hat. Diese Zeitplanung ist

eingehalten worden, auch wenn es innerhalb der Module zu zeitlichen Abweichungen von der Planung gekommen ist.

### Modul: Himmelsmechanik - Erfolge und Ängste

Dieses Modul (vgl. 7.3, S. 130) soll den Kontrast zwischen der erfolgreichen Berechenbarkeit im mechanistischen Weltbild und eingeschränkter Möglichkeiten bei der Vorhersage komplexer Systeme verdeutlichen. Für beide Aspekte ist der gleiche Kontext, nämlich die Himmelsmechanik herangezogen worden (Zielbereiche B und C, vgl. 7.1). Nach einer Auftaktphase mit Videos und Texten zu beiden Aspekten haben die Schüler in einer Gruppenarbeitsphase mit Hilfe von Simulationsprogrammen (xyZET, deepsail, s. Anhang) versucht, ein stabiles Sonnensystem zu konstruieren. Das Modul ist während der Adaptionphase auf Anregung der beteiligten Lehrpersonen aufgenommen und ausgearbeitet worden.

Bei der Umsetzung des ersten Modulteils haben sich Schwierigkeiten ergeben, denn die generelle Problematik ist den Schülern erst spät klar geworden. Videos und Texte haben zusammen viele Informationen enthalten. Praktisch keinem der Schüler ist deutlich geworden, worauf sie sich bei der Bearbeitung der Texte und beim Betrachten der Filme konzentrieren sollen. Dies kann durch die Befragung von Schülern nach diesem Teil des Moduls und mit Hilfe eines Items aus dem abschließenden Fragebogen belegt werden (Skala von 0 bis 5):

21-E1-FbSnach, n=11 Item 21, Erprobung 1, Fragebogen nach dem Unterricht	Mittelwert	mittlere Abweichung vom Mittelwert
<b>„Mir war schon früh klar, worum es im Unterricht während der drei Tage gehen sollte.“</b>	<b>2,55</b>	<b>0,86</b>

Dieser Wert ist unter dem Blickwinkel, dass der Modulteil der Einstieg in das Thema gewesen ist, klein. Rund die Hälfte der Schüler gibt an (22-E1-FbSnach), zunächst an Themen wie *Astrologie*, an den *Aufbau des Sonnensystems* oder das *Sonnensystem* allgemein gedacht zu haben oder gar *keine Ahnung* gehabt zu haben. Erst in der Klassendiskussion der Texte und Filme ist es den Lehrpersonen gelungen, die Aufmerksamkeit der Schüler auf den Widerspruch zwischen der Berechenbarkeit im Planetensystem einerseits und gewissen Instabilitäten andererseits zu lenken. Die meisten der Schüler haben es letztlich positiv bewertet, dass Stabilität und Instabilität im Planetensystem als Einstieg in die Gesamtproblematik gewählt worden ist:

19-E1-FbSnach, n=11	Mittelwert	mittl. Abw. v. Mittelw.
<b>„Ich fand es gelungen, dass Überlegungen zum Sonnensystem als Einstieg in das Thema dienen.“</b>	<b>3,64</b>	<b>0,69</b>

(Lehrer auf die gleiche Frage (34-E1-FbLnach) gaben im Mittel eine 4,0 an). Die Fragebogendaten zeigen, dass durch den hier gewählten Einstieg in die Thematik auch die Sicht auf die Verhältnisse in unserem Sonnensystem differenzierter geworden ist:

17-E1-FbSnach, n=11	Mittelwert	mittl. Abw. v. Mittelw.
<b>„Mein Bild vom Sonnensystem und von physikalischen Systemen hat sich erweitert.“</b>	<b>3,55</b>	<b>0,94</b>

Schüler haben auch angegeben (18-E1-FbSnach), inwiefern sich ihr diesbezügliches Bild geändert hat. „*Dass sich die Planeten gegenseitig beeinflussen und kleinste Störungen Veränderungen hervorrufen können*“ oder „*wie instabil die Planetenbahnen sind*“ haben zu den Einsichten gehört, die die Schüler mit Hilfe dieses und anderer Module gewonnen haben. Mit dem Simulationsprogramm haben die Schüler keine wesentlichen Probleme gehabt. Probleme haben aber darin bestanden, ein stabiles Planetensystem zu konstruieren. Dies aber ist das Lernziel gewesen. Die Aufgabe,

## 7. Ein Unterrichtskonzept zur nichtlinearen Physik in der gymnasialen Oberstufe

ein Planetensystem zu konstruieren, das für lange Zeiten stabil bleibt, ist von praktisch allen Gruppen gelöst worden.

24-E1-FbSnach, n=11	Mittelwert	mittl. Abw. v. Mittelw.
„Das Computerprogramm zur Simulation eines Sonnensystems war einfach zu bedienen und zu verstehen.“	3,64	0,64

Insgesamt sind die zentralen Konzepte dieses Moduls, die Stabilität, aus der Berechenbarkeit folgt, und die Instabilität, die Vorhersagen teilweise unmöglich macht, diskutiert worden, die entscheidenden Begriffe sind aber zu wenig unter aktiver Schülerbeteiligung entwickelt und ausgeschärft worden. Damit ist die Sachstruktur nur teilweise transparent gemacht worden. Dies kann dazu führen, dass der Nutzen dieses Moduls für die Durchführung weiterer Module eingeschränkt ist (s.u.). Trotz dieser Probleme ist das Modul in der beabsichtigten Weise durchführbar gewesen, eine Überforderung der Schüler hat nicht stattgefunden, vielmehr ist die interaktive Auseinandersetzung mit der Computersimulation von den Schülern als anregend wahrgenommen worden. Von der geplanten inhaltlichen Abfolge der Aktivitäten ist nicht abgewichen worden, lediglich der zeitliche Umfang ist um 15% überschritten worden.

**Fazit:** Das Modul ist in der Schulpraxis einsetzbar und geeignet, die Problematik von Instabilität, Stabilität und deren Parameterabhängigkeit zu veranschaulichen. Schüler werden zur Eigenaktivität angeregt; im Rahmen dieses Moduls gelingt es ihnen, einen Bezug zwischen ihren Tätigkeiten im Unterricht und der Alltagsrelevanz des Themas herzustellen. Das Erreichen von Zielen (vgl. 7.1) hängt kritisch davon ab, ob die Aufgabenstellung klar definiert wird und ob Ergebnisse im Rahmen des Gesamtkontextes des Unterrichts gesichert werden.

### Modul: Dynamisch instabil - einfache Experimente helfen beim Verstehen

Mit diesem Modul (vgl. S. 132) sind bereits in Klasse 10 Erfahrungen gesammelt worden, da es nahezu deckungsgleich mit dem in Kapitel 5 beschriebenen Unterrichtsgang (ab S. 92) ist. Im Zentrum des Moduls steht das Magnetpendel, das aufgrund der sich überlagernden magnetischen Felder in instabile Situationen gerät. Als Verständnishilfen sind die „Chaosschüssel“ und das Galtonbrett eingesetzt worden. Hier soll vor allem auf die Probleme, aber auch die Zweckmäßigkeit bei der Umsetzung des Moduls eingegangen werden.

**Arbeitsziele und Ergebnissicherung.** Problematisch ist zum einen die mangelnde Festlegung von Arbeitszielen in der Gruppenarbeit gewesen. Zwar sind die Arbeitsaufträge auf Arbeitsbögen beschrieben worden, dennoch haben die Gruppen relativ lange Zeiträume wenig zielführend gearbeitet. Ein weiteres Problem hat wie im vorherigen Modul in der Sicherung der Ergebnisse bestanden. Videodaten und Feldnotizen haben deutlich gezeigt, dass beide Probleme durch die relativ freie Arbeit in Gruppen begünstigt worden sind. Die Gruppenarbeit in Verbindung mit teilweise offenen Fragestellungen im Arbeitsbogen („Wie wichtig ist es, dass...? Welche Bedeutung hat...?“) scheinen unpräzise Ergebnisformulierungen in den Gruppen zu provozieren. Dies ist in der Lehrergeführten Diskussion nicht aufgefangen worden: Die Ergebnisse der Schüler bei der Untersuchung der Sensitivität des Pendels sind nicht ausreichend (an der Tafel, im Heft) festgehalten worden. Nach Aussage der Lehrpersonen hat der Grund darin gelegen, die Ergebnissicherung mit der Begriffsbildung im nächsten Modul verbinden zu wollen. Dadurch sind aber Detailkenntnisse der Schüler und Ergebnisse ihrer Hypothesenbildung und -überprüfung verloren gegangen.

**Modulpassung.** Bei der Planetenbewegung ist die Parameterabhängigkeit von stabilen und instabilen Szenarien betont worden. Bei der Untersuchung des Magnetpendels sind Parameter nicht variiert worden, dagegen sind Faktoren untersucht worden, die zwischen zwei Durchgängen gleich bleiben bzw. sich ändern. Die Suche mancher Schüler nach einer Parameterabhängigkeit des Pendelverhaltens ist daher erfolglos geblieben. Auch die Frage, wie lange das Pendel stabil bleibt,

hat wenig Sinn gemacht, weil es sich - anders als das Planetensystem - von Anfang an in der chaotischen Phase befunden hat. Um hier Verwirrungen vorzubeugen, sollte die Reihenfolge der Module vertauscht werden oder die im Detail unterschiedliche Ausrichtung der Module thematisiert werden.

**Variationen.** Für die zweite und dritte Erprobung (in anderen Schulen) haben sich die Lehrpersonen entschieden, mit dem Modul zum Magnetpendel zu beginnen und Elemente aus dem Modul zur Planetenbewegung zu integrieren. Es hat sich gezeigt, dass das Magnetpendel-Modul Tücken aufweist, wenn Elemente variiert werden. Eine der Lehrpersonen hat es z.B. vorgezogen, die chaotische Phase des großen Pendelaufbaus nicht zu zeigen und dafür einen der Magneten an das schwingende Pendel heran zu führen. Die entstehende Ablenkung hat aber, verglichen mit chaotischem Schwingen, nicht den gleichen starken Stimulus, in der Gruppe über die Hintergründe nachzudenken. Die Eingangsphase lebt aber vom kognitiven Konflikt, dass aus Determinismus nur eine eingeschränkte Vorhersagbarkeit folgt. Dieser Konflikt muss überzeugend hergestellt werden, damit die nachfolgenden Aktionen ihre Ziele erreichen können. In allen Erprobungen ist dies nur teilweise realisiert worden, so dass in den Gruppenarbeiten trotz der detailliert ausgearbeiteten Arbeitsbögen nicht alle Schüler verstanden haben, was sie untersuchen sollen.

**Phänomen vs. Konzept.** Ein weiteres Problem ist der schnelle thematische Wechsel des Klasesgesprächs von den beobachteten Phänomenen und deren physikalischen Erklärungen hin zu abstrakten Konzepten wie Determinismus gewesen. Dadurch sind physikalische Aspekte, etwas wie Sensitivität entsteht oder welche Bedeutung Kräftegleichgewichte haben, nicht eingehend diskutiert worden. Die oft zu kurze Diskussion der physikalischen Verhältnisse hat dazu geführt, dass die Lehrpersonen zu schnell von einem Verständnis der physikalischen Gründe für beobachtetes Verhalten ausgehen. Wie die Videomitschnitte, Feldnotizen und Kurzinterviews zeigen, ist dies aber nicht immer der Fall gewesen. In einem Interview mit einem Schüler (16 J.) nach der zweiten Doppelstunde hat dieser angegeben, dass es im Kern um die Existenz von *Zufall* gegangen ist. Tatsächlich sind strukturelle und physikalische Gründe für die Einschränkung von Vorhersagbarkeit besprochen worden.

**Fazit:** Wie bei den Erprobungen in Klasse 10 hat das Modul auch in dieser Studie seine Stärken offenbart: Schüler werden durch das überraschende Verhalten des Magnetpendels dazu angeregt, dieses Verhalten zu untersuchen; Analogmodelle gestatten es ihnen, in der Gruppe eigene Hypothesen aufzustellen und zu verfolgen. Die Gruppenarbeit regt die Bedeutungskonstruktion und das Aushandeln von Erklärungen an. Trotzdem hat es mit diesem Modul Probleme gegeben: Ergebnisse der Gruppenarbeiten und der Klassendiskussionen sind oft nicht ausreichend gesichert worden. Sofern das Modul zur Himmelsmechanik vorgeschaltet gewesen ist, hat es Probleme mit der Passung gegeben. Außerdem ist oft zu schnell von den Phänomenen und physikalischen Detailerklärungen zu den abstrakten naturwissenschaftlichen Konzepten übergegangen worden.

#### **Modul: Analogiebildung und Begriffe - chaotische Prozesse generalisieren**

In diesem Modul (s. S. 135) sind weitere Systeme auf strukturelle Ähnlichkeiten hin untersucht worden, so dass Analogierelationen gebildet und schließlich physikalisch „tragfähige“ Begriffe entwickelt worden sind. Das Modul hat eine Vertiefung und Erweiterung zum vorangegangenen Modul dargestellt.

Im Vertiefenden Unterricht haben sich im Rahmen einer Binnendifferenzierung Gruppen von Schülern mit unterschiedlichen Aufgaben befasst; zwei Gruppen mit der Programmierung der logistischen Gleichung, zwei Gruppen mit der Untersuchung und dem Vergleich von Magnetpendel, Chaosschüssel, Doppelpendel, Würfel und einem auf der Spitze stehenden Bleistift. Die Analyse der Feldnotizen und Videoaufzeichnungen hat ergeben, dass die Bearbeitung der Arbeitsbögen

## 7. Ein Unterrichtskonzept zur nichtlinearen Physik in der gymnasialen Oberstufe

nur geringe Probleme mit sich gebracht hat. Zwar ist gelegentlich beklagt worden, dass die Arbeitsbögen zu viel Text beinhalten, aber die einzelnen zu bearbeitenden Schritte sind offenbar verständlich formuliert gewesen. Dies kann, wie die folgende Tabelle belegt, für alle Arbeitsbögen generalisiert werden:

42-E1E2E3-FbSnach, n=27	Mittelwert	mittl. Abw. v. Mittelw.
<b>„Die Arbeitsbögen waren gut zu verstehen.“</b>	<b>3,93</b>	<b>0,63</b>
43-E1E2E3-FbSnach, n=27		
<b>„Die Arbeitsaufträge waren gut zu bearbeiten.“</b>	<b>3,44</b>	<b>0,80</b>

**Sensitivität in diskreten und kontinuierlichen Systemen.** Ein wichtiges Ziel des Unterrichts ist es, die Sensitivität bestimmter Systeme gegenüber Anfangsbedingungen und Störungen für Schüler verständlich zu machen (Zielbereiche A und B). Deswegen sind in den Gruppen sowohl diskrete Systeme als auch sich kontinuierlich entwickelnde Systeme untersucht worden. Zu den diskreten Systemen haben die Logistische Gleichung und die Strecken-Schneiden-Kleben-Abbildung mit Hilfe von Knetmasse gehört, zu den kontinuierlichen Systemen die oben aufgeführten Objekte (Magnetpendel, Doppelpendel etc.). Die Analyse der Videomitschnitte, Feldnotizen und Kurzinterviews kommt zu folgenden Ergebnissen über die Prozesse in den Gruppen und in der Klasse:

- Die Programmierung der Logistischen Gleichung ist für die Schüler aufwendig gewesen und hat Zeit und Unterstützung durch die Lehrpersonen gekostet. Die Interpretation des Ergebnisses der Programmierung ist den beteiligten Schülern in der beabsichtigten Weise nicht gelungen. Es sind keine Beziehungen zu den mechanischen Beispielen (Magnetpendel, Chaosschüssel, Planetensystem) hergestellt worden.
- Die Repräsentation diskreter Abbildungen durch Strecken, Schneiden und Kleben von Knetmasse ist für die Schüler gut nachvollziehbar gewesen, ebenso der Vergleich mit berechneten Werten. Hier haben die Schüler vielfältige Analogierelationen zu den anderen Objekten diskutiert.
- Vielfältige Diskussionen in den Gruppen haben sich durch die Auseinandersetzung mit verschiedenen mechanischen Objekten ergeben. Analogiebildungsprozesse (KOMOREK, 1998; DUIT et al., 1998; WILBERS, 1999) sind beobachtet worden. Erste Begriffsbildungen sind von den Schülern diskutiert worden, d.h. es sind kritische Attribute auf Basis von Strukturmerkmalen der Objekte definiert worden. „Ist ein Bleistift, der labil auf der Spitze steht, ein chaotisches System?“
- Die Schüler haben angeregt diskutiert; sie sind an den Fragen und Aufgaben des Moduls interessiert und in ihren Vorstellungen herausgefordert gewesen. Die Lehrpersonen haben beratend zur Seite gestanden.
- Die Begriffsbildung hat im Klassengespräch stattgefunden, nachdem die Ergebnisse der Gruppen diskutiert worden sind. Der Abgleich hat alle Gruppen auf den gleichen Informationsstand gebracht. Es sind kritische Attribute für den Begriff „Chaotisches System“ und das Prinzip der eingeschränkten Vorhersagbarkeit entwickelt worden (vgl. Abb. 7.8).
- Eine zu starke Lenkung oder Bewertungen von Schüleräußerungen durch die Lehrkraft kann die Diskussionsfreude, Kreativität und ihre Mitarbeit bei der Begriffsbildung negativ beeinflussen oder sogar zum Erliegen bringen. In einer der Erprobungen sind aufgrund eines solchen Unterrichtsstils Einschränkungen des Lernerfolges (s. 7.5.3) beobachtet worden.

- **Variationen.** Das Modul lässt den Lehrpersonen Raum für eigene Ideen. So ist z.B. ein „Knock-out-Pendel“ eingesetzt worden, um den Aspekt der Vorhersagbarkeit zu demonstrieren, oder es ist nach Möglichkeiten gesucht worden, die Einzugsbereiche beim Magnetpendel zu visualisieren. Somit hat auch eine Anregung auf Seiten der Lehrer bestanden.
- Wie bereits beim vorangegangenen Modul beobachtet, sind auch hier Lehrer sehr schnell von den Phänomenen und ihren physikalischen Erklärungen auf die Ebene der abstrakten Konzepte und der Begriffsbildung geschwenkt.
- Auch bei diesem Modul hat die Begriffsbildung keine zentrale Rolle eingenommen. Begriffsbildung bedeutet die Ausschärfung einer sich entwickelnden, impliziten Theorie, die auf experimentellem Handeln beruht. Wird die Begriffsbildung nur randständig behandelt, erfährt im Sinne einer erwünschten Symmetrie von Experimentieren und Modellieren auch das Experiment eine Abwertung. Als Reaktion darauf, ist vom Arbeitskreis eine Infofolie mit den zentralen Begriffen entwickelt worden, die in der dritten Erprobung eingesetzt worden ist

Die Nützlichkeit der eingesetzten Objekte ist wie folgt eingeschätzt worden. Es handelt sich dabei um Daten aus dem abschließenden Fragebogen.

**MK:** [...] Was würdest du an dem Unterricht der vergangenen Stunden ändern? [...]

**S4:** Ich könnte mir den Unterricht nicht ständig so vorstellen, weil ich das ganz einfach zu unruhig finde. Und es beansprucht ja eben auch einen, weil man sich konzentrieren muss auf das ganze Geschehen. Der normale Unterricht, der ist ... nicht so locker, sondern das ganze ist etwas geordneter, eben dieser Frontalunterricht. [...]

Also ich würde das als fächerübergreifenden Unterricht bezeichnen, denn die Fragestellungen sind oft so philosophisch, würde ich sagen, nicht nur Fragen, die nur in der Physik auftauchen. Und deswegen ist es eben nicht dieser reine Physikunterricht.

**MK:** Fehlt dir auch, dass ihr bis jetzt nicht viel gerechnet habt?

**S4:** Ja, das ist das, was ich in der Physik eben auch ganz gut finde, dass man so ein bisschen Aufgaben ausrechnen muss ...

Tab. 7.9 Interviewausschnitt mit Schülerkritik (zur Halbzeit der Erprobung 2)

"Chaotisches System"	"eingeschränkte Vorhersagbarkeit trotz grundsätzlicher Berechenbarkeit"	
1) eingeschränkte Vorhersagbarkeit	Empfindlichkeit gegenüber den Startbedingungen	Existenz von Instabilitäten (Entscheidungsstellen)
2) Instabilitäten	(kleine Änderungen können zu sehr verschiedenen Abläufen führen, schwache Kausalität)	
3) Instabilitäten müssen durchlaufen werden		

Abb. 7.8 Tafelbild mit Begriffsbildungen

30-E1-FbSnach, n=11	Mittelwert	mittl. Abw. v. Mittelw.
„Die Experimente am zweiten Tag waren anregend.“	4,00	0,55

7. Ein Unterrichtskonzept zur nichtlinearen Physik in der gymnasialen Oberstufe

44a-E1E2E3-FbSnach, n=27	Mittelwert	mittl. Abw. v. Mittelw.
<b>Diese Experimente und Unterrichtsmittel waren hilfreich beim Verstehen: Videos</b>	<b>3,24</b>	<b>0,94</b>
44b... Texte	3,27	0,77
44c... Würfel	3,68	0,89
44d... Computerprogramme allgemein	3,27	1,25
44e... Magnetpendel	4,19	0,75
44f... Bleistift auf der Spitze	3,00	0,85
44g... Abbildungen (z.B. Berggrat, Wall)	3,21	1,09
44h... Chaosschüssel	4,04	0,77
44i... Galtonbrett	3,69	0,87

**Fazit.** Das Modul hat seine Funktion als Vertiefung der vorangegangenen Module mit dem Schwerpunkt der dynamischen Instabilität erfüllt. Darüber hinaus sind neue Aspekte hinzugekommen. Strukturell analoge (diskrete und kontinuierliche) Systeme sind untersucht und sind der Ausgangspunkt für Begriffsbildungen. Die Schüler haben eigene Vorschläge für Systeme daraufhin geprüft, ob sie den selbst aufgestellten Kriterien genügen. Das Modul hat zudem den Lehrern Freiräume für Variationen gegeben. Probleme haben weiterhin darin bestanden, dass Ergebnisse (der Gruppen bzw. der Klasse) nur teilweise gesichert worden sind. Die Arbeit am Computer ist aufgrund des Schwierigkeitsgrades nur teilweise hilfreich.

**Modul: Struktur trotz Zufall - Muster spielen mit Zufällen.**

In diesem Modul ist die Komplementarität von dynamischer Instabilität und Strukturbildung thematisiert worden. Es sind die Experimente „Wachsen eines Zinkdendrits“, „Viskoses Verästeln unterschiedlich viskoser Flüssigkeiten“ sowie das Chaosspiel, als Aufgabe zum Zeichnen und als Programmieraufgabe, zum Einsatz gekommen. Ziel ist es gewesen zu vermitteln, dass bei den hier betrachteten Systemen zufällige Prozesse und deterministische Prozesse zusammenwirken und Strukturen bilden (Zielbereich B). Die Analyse von Videos und Kurzinterviews hat gezeigt, dass die Schüler keine besonderen Probleme haben, die Experimente aufzubauen und durchzuführen. Der hohe Mittelwert beim Zinkdendriten hat deutlich gemacht, dass dieses Objekt das Verstehen gut unterstützen kann. Der geringe Mittelwert beim Chaosspiel hat vor allem am Votum derjenigen gelegen, die das Chaosspiel zeichnerisch umgesetzt haben. Die Prozedur ist langwierig und aufgrund von Ungenauigkeiten ist das entstehende Sierpinski-dreieck nur in Ansätzen zu erkennen, während die Programmieraufgabe mehr Erfolg bringt (s. Abb. 7.9).

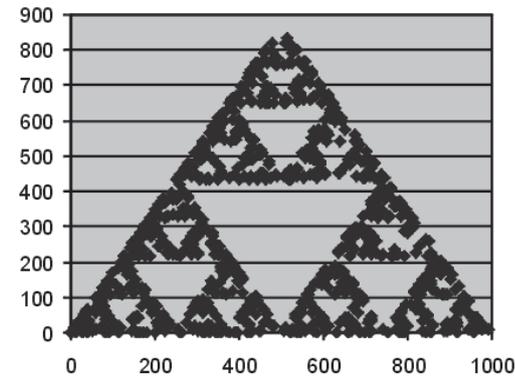


Abb. 7.9 Chaosspiel mit Excel: das Sierpinski-dreieck

44k-E1E2E3-FbSnach, n=27	Mittelwert	mittl. Abw. v. Mittelw.
<b>Diese Experimente und Unterrichtsmittel waren hilfreich beim Verstehen: Chaos-Spiel</b>	<b>2,94</b>	<b>0,91</b>
44j... Zinkdendrit	3,75	0,90

Auch bei diesem Modul hat es Probleme mit der Begriffsbildung gegeben. In der ersten Erprobung ist lediglich der Begriff des Zufalls thematisiert worden; allerdings in einer Weise, wie sie schon aus früheren Studien des Kieler Projekts bekannt ist (vgl. KOMOREK, 1998), nämlich im Sinne einer hervorbringenden Kraft, einer eigenständigen aktiven Größe. So hat eine der Lehrkräfte formuliert: „*Der Zufall erzeugt Strukturen.*“ Nach einer Sitzung des Arbeitskreises sind in der zweiten Erprobung zusätzliche Experimente wie das Doppelpendel und ein Aufbau zur Erzeugung von Konvektionszellen („Bénard-Konvektion“) aufgenommen worden. Auch diese Experimente sind unter dem Aspekt der Ordnung betrachtet worden. Auf die Bildung der Begriffe ist mehr Gewicht gelegt worden, d.h. es ist mehr Zeit dafür eingeplant worden, wobei die Bildung von Begriffen als bedeutender Teil der Erkenntnisprozesse in der Physik dargestellt worden ist.

Doppelpendel (s. Abb. 7.10), Konvektion, Zinkdendrit und Viskoses Verästeln sind seit der zweiten Erprobung von Schülergruppen aufgebaut und untersucht worden. Elementarisierte Erklärungen (aus BÜCKER, 1998, vgl. auch KOMOREK et al., 2001) und eine Folie mit der stichwortartigen Darstellung der elementarisierten Erklärung sind den Schülern an die Hand gegeben worden. Die jeweilige Schülergruppe hat sich mit diesen Hilfen zu Experten gebildet. In der Präsentationsphase im Plenum haben sie die Aufgabe gehabt, ihre Experimente vorzustellen und die Erklä-

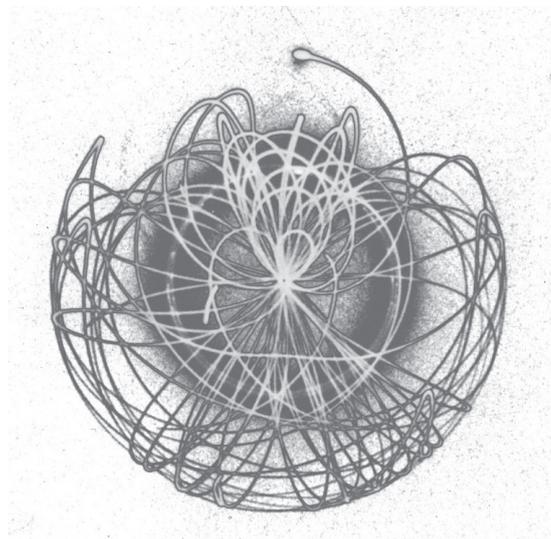


Abb. 7.10 Chaotisches Doppelpendel. Spur der Leuchtdiode, die am äußeren Pendelarm befestigt worden ist. Fotografie einer Schülergruppe unter Lehreranleitung (Erprobung 2)

**MK:** *Inwieweit findest du, dass die beiden Experimente [Zinkdendrit, Viskoses Verästeln] geeignete Experimente für die Gruppenarbeit sind?*

**S5:** *Find ich schon, das ist schon angemessen, das ist halt schwer gewesen, diesen Zinkdendriten aus der Lösung raus zu bekommen, aber man kann es ja auch so lösen, dass man einfach die Petrischale unter den Overheadprojektor legt.*

**MK:** *Ist euer Versuch geeignet, den Zusammenhang von Zufall und Gesetzmäßigkeit darzustellen?*

**S5:** *Ja, denk' ich mal schon.*

**MK:** *Was könnte für andere Schüler problematisch sein an dem Experiment bzw. damit den Gedanken von Zufall und Gesetzmäßigkeit zu zeigen?*

**S5:** *Ich denk' mal, die Durchführung wird nicht auf so viele Probleme stoßen, aber der Text, den wir dann hatten, der war schon nicht mehr ganz so leicht zu verstehen, und sonst wüsste ich nicht, wo da große Probleme auftreten.*

**MK:** *Wie fandest du die Stunde heut' überhaupt?*

**S5:** *Ich fand es interessant.[...]*

Tab. 7.10 Interviewausschnitt aus Erprobung 3

rungsansätze zu präsentieren. Die Strategie scheint aufgegangen zu sein, die Gruppen haben die Erklärungsansätze überzeugend vorstellen können. Eine Klassendiskussion über das Zusammenspiel von zufälligen und deterministischen Prozessen hat sich entwickelt.

Im Klassengespräch ist anschließend der Begriff des Fraktals thematisiert worden; die Eigenschaft der Selbstähnlichkeit ist ange-

sprochen und mit dem Zusammenspiel von Zufall und Determinismus in Verbindung gebracht worden. Unter dem Aspekt der Strukturbildung sind Strukturen im Phasenraum betrachtet worden. Dazu ist mit Hilfe einer Informationsfolie das Konzept des Phasenraums eingeführt worden (s. Anhang). Die Schüler haben in Gruppen mit einem Simulationsprogramm zum Doppelpendel gearbeitet. Das Programm hat chaotische Attraktoren im Phasenraum dargestellt, die wissenschaftlich mit dem Begriff der Ordnung gefasst werden können. Simulation und Arbeitsbogen haben dazu angeregt, sich mit verschiedenen Darstellungsarten von Bewegungen auseinander zu setzen und die Parameterabhängigkeit von Bewegungstypen und deren Darstellung im Phasenraum zu untersuchen.

**Fazit:** Das Modul stellt eine Möglichkeit dar, mit Hilfe von Schülerexperimenten Komplementaritäten der nichtlinearen Dynamik begreifbar zu machen. Zinkdendrit und Viskoses Verästeln stehen für die Komplementarität von Zufall und Gesetzmäßigkeit, aus der komplexe Strukturen entstehen. Das Doppelpendel kann verdeutlichen, wie dynamisch instabile Systeme Strukturen im Phasenraum mit sich bringen. Das Modul hat sich in den Erprobungen bewährt, nachdem weitreichende Modifikationen daran vorgenommen worden sind. Wesentliche Teile der Sachstruktur können mit dem Modul abgebildet werden, aber nur dann, wenn inhaltliche Verbindungen zwischen den verschiedenen Aktivitäten explizit gemacht werden, wenn Experimente und Begrifflichkeiten aufeinander bezogen werden und wenn die Beziehungen zwischen den Modulen herausgestellt werden. Vorstellungen der Schüler zu den Konzepten „Struktur und Ordnung“ bzw. „Zufall und Gesetzmäßigkeit“ müssen in eigenen Untersuchungen geklärt werden.

### **Modul: Strukturelle Ordnung - Anwendungen helfen leben.**

Dieses Modul (s. S. 140) hat der Arbeitskreis erst nach Ende der ersten Erprobung entwickelt, weil bei den Lehrpersonen der Bedarf nach Informationen über Anwendungen und gesellschaftlichen Nutzen der nichtlinearen Physik entstanden ist. Das Modul ist als ein Expertenvortrag konzipiert worden. Als Experten können Schüler fungieren, die Referate halten, aber auch Personen aus der Forschung, die über ihre Untersuchungen berichten (wodurch der Dialog zwischen Schule und Wissenschaft unterstützt werden würde). In zwei Erprobungen ist dieses Modul im Anschluss an das Modul über Strukturbildungen eingesetzt worden. Man kann das Modul als eine Vertiefung des vorangegangenen verstehen. Es können Beispiele präsentiert werden, bei denen aus chaotischen Messdatenfolgen mit Hilfe von Datenaufbereitungsverfahren Strukturen sichtbar werden, die für strukturelle Ordnung auf globaler Systemebene stehen.

In den vorliegenden Erprobungen sind drei Beispiele vorgestellt worden; aus der Medizin die nicht-invasive Untersuchung von Epilepsieherden und die Kategorisierung von Herzrhythmusstörungen mittels Messdatenanalyse auf Basis von Methoden der nichtlinearen Dynamik; aus der Stauforschung die Modellierung eines Staus mit Methoden der nichtlinearen Physik. Als Experte ist jeweils der Projektleiter aufgetreten und hat in rund 25 min über diese Forschungsgebiete berichtet und anschließend mit den Schülern diskutiert.

Die Analysen der Videomitschnitte und Interviewdaten zeigen, dass die Position des Expertenvortrags nach dem Modul über Strukturbildungen passend platziert worden ist. Die Aspekte dynamische Instabilität und Strukturbildung sind durch die vorangegangenen Module herausgearbeitet worden. An dieser Stelle des Unterrichts ist es das Ziel (Zielbereich C), die Komplementarität der beiden Konzepte plastisch darzustellen. Die Schüler haben sich vor allem für die medizinischen Anwendungen nichtlinearer Dynamik interessiert. Die gesellschaftliche Bedeutung und die Bedeutung für den Einzelnen ist verdeutlicht worden. Das Modul kann auch als ein „Aufmacher“ an den Anfang der Einheit gestellt werden. Der Methodenwechsel, der mit dem Expertenvortrag einher-

geht, ist für die Durchführbarkeit der Einheit von Vorteil. Im übrigen gibt das Modul viele Freiheiten für die Ausgestaltung und trägt damit zur Variabilität des Unterrichtskonzepts bei.

**Fazit:** Mit Hilfe dieses Moduls ist demonstriert worden, dass nichtlineare Physik nicht nur philosophischen Wert besitzt, sondern über vielerlei Anwendungen auch eine gesellschaftliche Relevanz. Als Expertenvortrag konzipiert, bietet es vielfältige Ausgestaltungsmöglichkeiten; auch eine Exkursion an einen außerschulischen Lernort, etwa ein Forschungslabor, ist denkbar.

**Modul: Weltbilder - unsere Sicht von Welt und Physik im Wandel.**

Dieses Modul hat die Ergebnisse aller anderen Module aufgreifen, bewerten und in einer Gesamtschau zu einer Synthese führen sollen. Texte, die sich mit dem mechanistischen Weltbild befassen, sind in den Modulen gewonnenen Erkenntnissen gegenüber gestellt worden. Fragen nach einem modernen Bild von Physik sind angesprochen worden. Abschließend haben Schülergruppen Concept Maps angefertigt, deren Begriffe vorgegeben gewesen sind und die mit denen auf einer Folie zu Beginn der Unterrichtsreihe übereingestimmt haben.

In den Erprobungen haben sich verschiedene Schwierigkeiten mit diesem Modul gezeigt. Erstens ist der Synthese der Erkenntnisse über dynamische Instabilität und Strukturbildung zu wenig Bedeutung beigemessen worden. Daten aus Interviews mit Lehrpersonen nach Abschluss der Erprobung zeigen, dass die Lehrer keine Notwendigkeit gesehen haben, die Ergebnisse erneut aufzugreifen. Außerdem haben sie befürchtet, die Schüler damit zu langweilen. Hier hat das Unterrichtskonzept eine Schwäche gehabt, weil es nicht deutlich gemacht hat, dass mit diesem Modul die Betrachtungsebene gewechselt wird. Denn hier hat nicht mehr das einzelne Experiment gezählt, sondern nur das an ihm zu erkennende allgemeine Prinzip, das aufgrund seiner verallgemeinerbaren strukturellen Eigenschaften zum Tragen kommt. Die Entkopplung von Determinismus und Vorhersagbarkeit sowie die Komplementarität von einfachen Bildungsgesetzen und Komplexität, von Zufall und gesetzmäßigen Prozessen haben das naturwissenschaftliche Weltbild erweitert. Sie haben zudem zu neuen Anwendungen geführt und sind somit gesellschaftlich relevant. In den Erprobungen ist diese Einsicht nur rudimentär vermittelt worden.

Zweitens haben die Schüler mehr Zeit benötigt, die Methode des Concept Mapping auf die im Unterricht diskutierten Begriffe anzuwenden, als es das Lehrerteam erwartet hat. Die Schüler haben zwar keine großen Probleme mit der Methode an sich gehabt, zumal der Arbeitsbogen ein Beispielmap bereit gehalten hat (vgl. Anhang). Da aber die vorgegebenen Begriffe komplex und abstrakt zugleich gewesen sind, ist es für die Schüler schwierig gewesen, die Beziehungen der Begriffe in wenigen, eigenen Worten zu formulieren. In einigen Fällen haben die Schüler die Beziehungen zwischen den Begriffen durch die systematische Gruppierung der Begriffe dargestellt, so dass die Beziehungspfeile und deren Beschriftung an Bedeutung verloren haben. Abb. 7.11 zeigt ein Concept Map einer Schülergruppe; es ist stark strukturiert mit relativ spärlichen Beschriftungen an den Beziehungspfeilen (aus Erprobung 1, das Map ist von der Handzeichnung in ein Graphikprogramm übertragen worden).

## 7. Ein Unterrichtskonzept zur nichtlinearen Physik in der gymnasialen Oberstufe

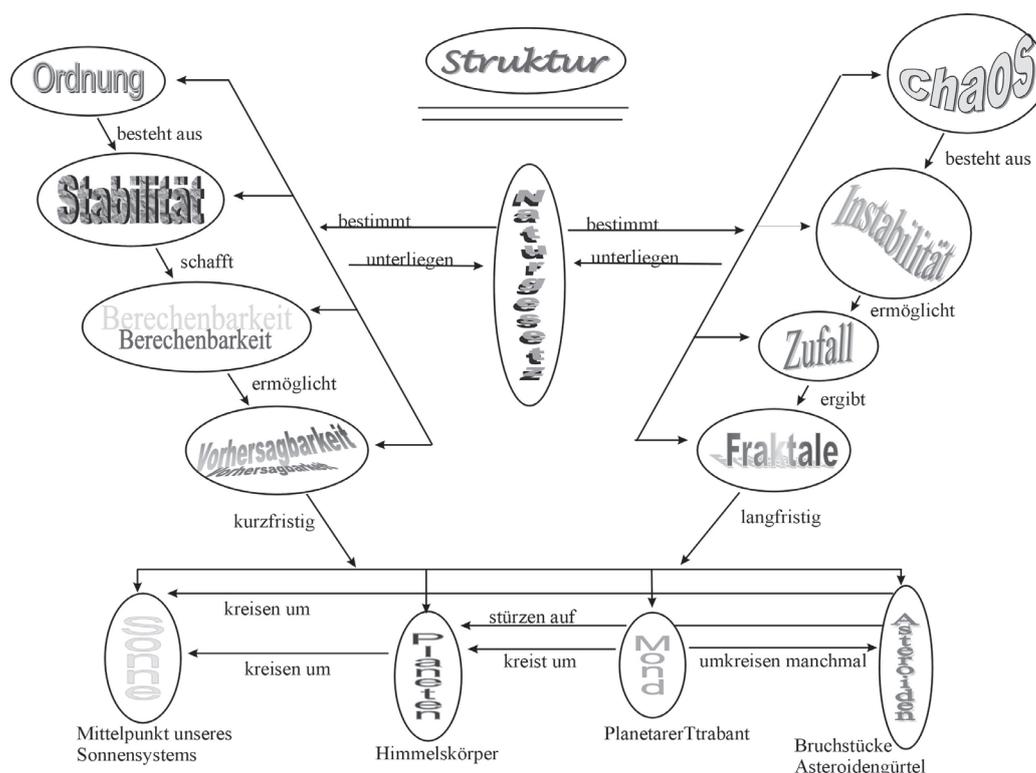


Abb.7.11 Concept Map mit vorgegebenen Begriffen. Die systematische Anordnung der Begriffe ermöglicht, die Beschriftung der Beziehungspfeile sparsam ausfallen zu lassen. Die Information steckt in der Struktur. Schülergruppe aus Klasse 11

**Fazit:** Die wichtige Funktion des Moduls, über nichtlineare Physik in die Diskussion über Weltbilder einzusteigen, ist in den Erprobungen nicht zum Tragen gekommen. Dies mag als Problem des Unterrichtsgangs gesehen werden, auch wenn der Kontext der Weltbilder durch den Einstieg über Planetensysteme nahegelegen hat. Dies kann aber auch mit dem Stellenwert zu tun haben, den Weltbilder im Physikunterricht der hier mitwirkenden Kurse haben. Aufgrund der Erprobungen ist das Modul weiterentwickelt und attraktiver gestaltet worden (vgl. Modulbeschreibung auf S. 142).

### Schülerbeurteilungen im Prozess der Unterrichtsentwicklung

In den abschließenden Fragebögen für Schüler sind jeweils am Ende einer Erprobung ihr Interesse am Thema und Beurteilungen des abgelaufenen Unterrichts erhoben worden. Diese Daten sind bereits in die Modifikationen des Unterrichtskonzepts, wie es sich in Abschnitt 7.3 darstellt, eingeflossen. Um den Prozess der Modifikationen transparenter zu machen, sind einige der Einschätzungen und Beurteilungen im folgenden dargestellt. Hinzu kommen Vorschläge der Schüler dazu, wie das Unterrichtskonzept verändert werden sollte.

1-E1E2E3-FbSnach, n=27 (Item 1, Schülerfragebogen nach Abschluss der Erprobungen 1 bis 3; n = Anzahl der Fragebögen)	Mittelwert	mittl. Abw. v. Mittelw.
<b>„Das Thema ‚Chaos, Zufall, Berechenbarkeit, Ordnung‘ hat mich interessiert“</b>	<b>3,74</b>	<b>0,61</b>
2-E1E2E3-FbSnach, n=27		
<b>„Einige Aspekte, d.h. einige Überlegungen, um die es im Unterricht ging, haben mich interessiert.“</b>	<b>3,79</b>	<b>0,86</b>
3-E1E2E3-FbSnach, n=27		
<b>„Welche?“, Mehrfachnennungen möglich</b>	Anteil	
<b>a) Stabilität des Planetensystems</b>	<b>28%</b>	
<b>b) Konzepte Ordnung, Vorhersagbarkeit, Chaos, Struktur</b>	<b>22%</b>	
<b>c) Anwendungen, z.B. in der Medizin</b>	<b>22%</b>	
<b>d) Experimente</b>	<b>16%</b>	
<b>e) philosophische und weltanschauliche Aspekte</b>	<b>13%</b>	
12-E1E2E3-FbSnach, n=27	Mittelwert	mittl. Abw. v. Mittelw.
<b>„Über Chaos, Ordnung und die Folgen würde ich gern mehr erfahren.“</b>	<b>3,19</b>	<b>0,77</b>
13-E1E2E3-FbSnach, n=27		
<b>„Das Thema hat meine Neugier geweckt.“</b>	<b>3,00</b>	<b>1,04</b>
6-E1E2E3-FbSnach, n=27	Mittelwert	mittl. Abw. v. Mittelw.
<b>„Ich habe naturwissenschaftliche Gedanken kennen gelernt, die mir neu waren oder mich überrascht haben.“</b>	<b>3,12</b>	<b>1,05</b>
8-E1E2E3-FbSnach, n=27	Anteil	
<b>„Überrascht hat mich ...“ Mehrfachnennungen möglich</b>		
<b>a) ... dass es Ordnung im Chaos gibt</b>	<b>33%</b>	
<b>b) ... die mögliche Instabilität des Planetensystems</b>	<b>24%</b>	
<b>c) ... die Problematik von Berechenbarkeit und Vorhersage</b>	<b>24%</b>	
<b>d) ... dass chaotische Prozesse auch im Alltag vorkommen</b>	<b>10%</b>	
<b>e) sonstiges</b>	<b>10%</b>	
10-E1E2E3-FbSnach, n=27		
<b>„Das Thema hat nicht nur mit Physik zu tun, sondern betrifft auch andere Lebensbereiche.“</b>	<b>3,86</b>	<b>0,91</b>
11-E1E2E3-FbSnach, n=27	Anteil	
<b>„Welche?“, Mehrfachnennungen möglich</b>		
<b>a) Philosophie</b>	<b>41%</b>	
<b>b) Mensch, Alltag, Technik</b>	<b>25%</b>	
<b>c) andere Schulfächer außer Physik</b>	<b>19%</b>	
<b>d) Medizin</b>	<b>16%</b>	

## 7. Ein Unterrichtskonzept zur nichtlinearen Physik in der gymnasialen Oberstufe

Diese Ergebnisse zeigen eine relativ positive Einschätzung der Schüler gegenüber dem Thema, obwohl in den Erprobungen eine Reihe von Problemen aufgetreten und nicht alle Ideen der nichtlinearen Physik in der beabsichtigten Weise transportiert worden sind. Werte von über 3,5 sind auf einer Skala von 0 bis 5, deren Mittelwert also bei 2,5 liegt, als hoch einzuschätzen. Das Interesse am Thema ist hoch, es hat Überraschungen geboten, neue Gedanken sind diskutiert worden. Hervorzuheben ist, dass der Aspekt der Komplementarität von Ordnung und Chaos als interessant eingestuft wird und dass Weltbildaspekte, wie etwa die Frage nach der Stabilität des Sonnensystems als interessant eingestuft worden sind. In dieses Bild passt auch, dass 41% der Schüler einen engen Bezug des Themas zu philosophischen Fragen gesehen haben. In der Konsequenz schätzen die Schüler das Thema im Mittel mit einer 3,24 als wichtiges Unterrichtsthema ein.

14-E1E2E3-FbSnach, n=27		
<b>Ich finde es wichtig, dass das Thema in der Schule behandelt wird.</b>	<b>3,24</b>	<b>1,09</b>
15-E1E2E3-FbSnach, n=27	Anteil	
„und zwar deshalb“, Mehrfachnennungen möglich		
<b>a) Interessantheit des Themas, neue Denkrichtung</b>	<b>32%</b>	
<b>b) integraler Teil der Physik</b>	<b>24%</b>	
<b>c) Teil des Allgemeinwissens, realitätsnah</b>	<b>20%</b>	
<b>d) geringe Mathematisierung</b>	<b>4%</b>	
<b>e) sonstige Gründe</b>	<b>20%</b>	

Wichtige Hinweise haben die Schüler, die ebenso wie die Lehrpersonen Experten für Unterricht sind, bzgl. Veränderungen am Unterrichtskonzept gegeben:

39-E1E2E3-FbSnach, n=27, Mehrfachnennungen möglich	Anteil
„Stellen Sie sich vor, der Unterricht würde demnächst noch in anderen Klassen unterrichtet. Was sollte am Unterricht geändert werden?“	
<b>a) mehr Unterrichtsgespräche und Begriffe präzisieren</b>	<b>25%</b>
<b>b) bessere Zeitstruktur</b>	<b>18%</b>
<b>c) konkretere Fragen und Aufträge stellen</b>	<b>14%</b>
<b>d) nichts ändern</b>	<b>14%</b>
<b>e) bessere Materialien (z.B. Filme) einsetzen</b>	<b>11%</b>
<b>f) sonstiges</b>	<b>18%</b>
40-E1E2E3-FbSnach, n=17, Mehrfachnennungen möglich	
„Sollte der Ablauf geändert werden? Wenn ja, wie?“	
<b>a) zeitlich besser strukturieren, Schwerpunkte setzen</b>	<b>35%</b>
<b>b) Hauptthema und roten Faden von Anfang an deutlich machen</b>	<b>6%</b>
<b>c) den Menschen in das Thema einbeziehen</b>	<b>6%</b>
<b>d) nichts ändern am Ablauf</b>	<b>53%</b>

41-E1E2E3-FbSnach, n=27, Mehrfachnennung möglich	
<b>„Was sollte auf jeden Fall beibehalten werden?“</b>	
<b>a) Vielfalt der Experimente</b>	<b>42%</b>
<b>b) Arbeit mit dem Computer</b>	<b>30%</b>
<b>c) Gruppenarbeit und Schülerorientierung</b>	<b>18%</b>
<b>d) historische Aspekte, Planetensystem, Anwendungen</b>	<b>9%</b>

Die Analyse der Schülereinschätzungen zum Unterricht decken sich weitgehend mit den Analysen des Videomaterials und der Feldnotizen. Dem Wunsch nach Veränderungen in der zeitlichen Struktur ist insofern bereits nachgekommen worden, dass zwischen den Erprobungen Veränderungen am Konzept vorgenommen worden sind. Schlüsselte man die Einschätzungen der Schüler nach den einzelnen Erprobungen auf, so erkennt man, dass in der dritten Erprobung an der zeitlichen Struktur der Unterrichtssequenz nur noch wenig moniert worden ist. Die sachlogische Struktur wird hingegen wenig kritisiert. Hier scheint im Unterrichtskonzept eine schlüssige Abfolge der Inhalte vorzuliegen. Bis einschließlich der dritten Erprobung ist allerdings das Problem geblieben, dass Begriffe unzureichend entwickelt worden sind. Dies beklagen rund 25% der Schüler und verweisen auf die wichtige Funktion des Unterrichtsgesprächs.

### Beurteilungen durch die Lehrpersonen

Der abschließende Fragebogen an die Lehrpersonen hat sich an den Schülerfragebogen angelehnt. Hier sollen lediglich die wesentlichen Anmerkungen zur Durchführbarkeit und zu Änderungen am Unterrichtskonzept dargestellt werden. Eine Fragestellung, bei der sich die beteiligten Lehrer untereinander stark unterscheiden, bezieht sich auf die Eignung des Themas im regulären Physikunterricht. Die Werte auf der Skala von 0 bis 5 variieren hier zwischen 2 und 5. Als Argument für eine eher ablehnende Haltung ist die Themenfülle im Lehrplan genannt, mit der das neue Thema konkurrieren muss. Ein zweites Problem sind fehlende Materialien und lehrer- wie auch schülergerechte didaktisch aufbereitete Handreichungen für den Unterricht und seine Planung. Wie in Kapitel 4 beschrieben, besteht hier bislang tatsächlich ein Defizit. Von den Lehrpersonen wird vor allem angemerkt, dass die in den Erprobungen eingesetzten Experimente und Objekte den

**„Das waren für Schüler und Lehrer 3 interessante Tage, die zeigten, dass Schule spannend sein kann - wenn ein großer Aufwand betrieben wird.“**

*(Zitat aus Lehrerfragebogen)*

**„Überraschend war für mich, dass ‚Verstehen‘ enorm von der Vorbereitung des Unterrichts abhängt.“**

*(Zitat aus Lehrerfragebogen)*

Schulen nicht zur Verfügung stehen. Zwar sind die Experimente alle nachbaubar, doch müssen dafür viele Arbeitsstunden angesetzt werden. Schulkonzepte, bei denen Techniker/Handwerker Materialien anfertigen können, wären eine Abhilfe.

**„Es waren andere Schüler als sonst aktiv.“**

*(Zitat aus Lehrerfragebogen)*

Eine zentrale Frage an die Lehrer ist gewesen (43-E1E2E3-FbLnach), was sie am Unterrichtskonzept ändern würden. Eine generelle erste Reaktion auf diese Frage ist gewesen, dass die Grundkonzeption allen beteiligten Lehrpersonen als stimmig erschienen ist und dass der gemeinsam entworfene modularisierte Zugang überzeugt hat. An der Gruppenaktivität, dem Einsatz einer Vielfalt von Experimenten und der Integration des Computers sollte festgehalten werden (45-E1E2E3-FbLnach). Zitate wie *„Ich würde am Ablauf nichts ändern, die Struktur ist sinnvoll und für Schüler und Lehrer nachvollziehbar“* (auf die Frage 44-E1E3E3-FbLnach) illustrieren diese Grundeinschätzung. Die Analyse der Kurzinterviews mit Lehrpersonen kommt zum gleichen

Ergebnis. Änderungsvorschläge der Lehrpersonen, die z.T. in den nachfolgenden Erprobungen bereits berücksichtigt worden sind, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Zielsetzung.** Vor allem zu Beginn der Sequenz, aber auch durchgängig, sollte die Zielsetzung der Aktivitäten den Schülern deutlicher gemacht werden. Die teilweise mangelnde Beschreibung der übergeordneten Ziele der Sequenz und der Teilziele hat nach Sicht der Lehrpersonen das Interesse der Schüler schwinden lassen.
- **Ergebnissicherung.** Dieser Aspekt des Unterrichts sollte ernster genommen werden. Er ist nicht unabhängig von der präzisen Formulierung der Ziele zu sehen, denn ein Ergebnis ist nur vor dem Hintergrund des angestrebten Ziel als solches zu erkennen. Auch der Zeitpunkt der Ergebnissicherung erscheint den Lehrpersonen wichtig, so dass ein strafferer Einstieg in die Einheit zu später nutzbaren Ergebnissen führen kann.
- **Attraktivität von Gruppenarbeit.** Bei arbeitsteiligen Aktivitäten sollte darauf geachtet werden, dass diese für die Schüler das in etwa gleiche Maß an Attraktivität haben, Gegenbeispiel ist das Chaosspiel am Computer versus seiner (wenig befriedigenden) zeichnerischen Umsetzung. In der dritten Erprobung ist deswegen letztere Gruppenarbeit entfallen.
- **Messungen.** Experimente, bei denen dynamische Instabilität quantifiziert und graphisch dargestellt wird (u.a. im Phasenraum), sind wünschenswert und verdeutlichen die physikalische Erkenntnisgewinnung.
- **Mathematisierung.** Der qualitative Zugang ist von den Lehrpersonen insgesamt positiv bewertet worden. Er basierte auf der bewussten Entscheidung, mathematische Zugangsbarrieren abzubauen. Allerdings scheint es nach den Erprobungen denkbar und für eine zur Binnendifferenzierung wünschenswert, mathematische Modelle und Rechenaufgaben zu integrieren. In der dritten Erprobung sind deswegen Rechenaufgaben zum exponentiellen (Fehler-)Wachstum aufgenommen worden.
- **Interdisziplinäre Aspekte.** „*Ausblicke in andere Chaoswelten*“ (Zitat), d.h. Anwendungsbeispiele und interdisziplinäre Forschungsgebiete der nichtlinearen Dynamik kennen zu lernen, ist ebenfalls ein Wunsch der Lehrpersonen. Ab der zweiten Erprobung ist deswegen der „Expertenvortrag“ als eigenständiges Modul aufgenommen worden.
- **Arbeitsformen.** Ein Problembereich sind die Arbeitsmethoden Gruppenarbeit, Präsentation von Ergebnissen sowie die Nutzung von Software. Es ist den Lehrpersonen deutlich geworden, dass die Schüler mit diesen Methoden wenig vertraut sind und sie diese vor der Beschäftigung mit neuen Themen zunächst einüben sollten.

„Problematisch könnte sein, den Schülern ein Weltbild zu vermitteln, das noch gar nicht communis opinio ist. Es darf nicht der Eindruck entstehen, man wolle sie ‚bekehren‘.“

(Zitat aus Lehrerfragebogen)

„Es hat Spaß gemacht, weil es gut durchstrukturiert war, man hat genau gesehen, wo es hinführen soll.“

(Zitat aus Schülerkurzinterview)

**Zusammenfassung.** Das Unterrichtskonzept hat sich in der Praxis bewährt, da es die zentralen Aspekte dynamischer Instabilität, Chaos und Strukturbildung für Schüler transparent gemacht hat; und weil schülerorientierte Methoden und kognitiv anregende Experimente und Objekte eingesetzt worden sind. Auch Schüler und Lehrer halten es von seiner Struktur her für überzeugend. Die Variabilität des Unterrichtskonzepts hat sich darin gezeigt, dass es an verschiedene Bedingungen und Unterrichtsstile der Lehrpersonen angepasst worden ist und die Lehrpersonen Raum für eigene Ideen gehabt haben. Die Lehrer haben die einzelnen Erprobungen analysiert und daraufhin das Konzept modifiziert, u.a. indem zwei neue Module entwickelt worden sind und die zeitliche Struktur der Einheit verändert worden ist. Probleme des Konzepts sind aber weiterhin auszumachen. Die erfolgreiche Beschäftigung mit einfachen Experimenten setzt voraus, dass parallel zu den Untersuchungsaktivitäten eine Struktur von Fragen und Hypothesen aufgebaut wird. Diese muss sich im Verlaufe des Unterrichts in gesicherte Ergebnisse, Begriffe und Konzepte verwandeln, was in den Erprobungen nicht durchgängig geschehen ist. So ist der Wert einzelner Experimente und Objekte für die Erkenntnisgewinnung nicht immer erkannt worden. Trotz dieser Probleme liegt nach vielfältigen Modifikationen ein praxistaugliches Unterrichtskonzept vor.

### 7.5.3 Schwerpunkt: Lerneffekte und Kompetenzentwicklung

*„Das mechanistische Weltbild hat seine Grenzen jetzt auch im makroskopischen Bereich gefunden.“*  
(Zitat aus Lehrerfragebogen)

*„Eingriffe in vorhandene Systeme sind nur gerechtfertigt, wenn man die Folgen des Eingriffs vorhersagen kann (vgl. Hans Jonas: das Prinzip Verantwortung).“*  
(Zitat aus Lehrerfragebogen)

Lernprozesse und Prozesse der Kompetenzentwicklung zu untersuchen, ist Teil der Evaluation in dieser Studie. Diese Prozesse sind eng mit den Prozessen der Didaktischen Rekonstruktion und speziell der Unterrichtsentwicklung verknüpft und können nicht unabhängig davon evaluiert werden. Lernprozesse sind hier nicht nur auf Seiten der Schüler zu untersuchen, sondern auch auf Seiten der Lehrpersonen. Letztere müssen in dieser Studie sowohl neue physikalische Inhalte lernen als auch eine Unterrichtsmethodik erproben, die ihnen teilweise fremd ist. Dabei soll untersucht werden, inwiefern eine Weiterentwicklung des fachdidaktischen Denkens bei ihnen stattgefunden hat.

#### **Vorstellungen der Schüler von Naturgesetzen, Vorhersagbarkeit und Zufall**

Um die durch den Unterricht eingeleiteten Veränderungen von Vorstellungen der Schüler bzgl. der Konzepte Vorhersagbarkeit, Zufall und Determinismus zu erheben, sind diese Vorstellungen zu Beginn, während und nach Abschluss der Studie untersucht worden. Fragebögen und Interviews sind dabei eingesetzt worden (vgl. Abschnitt 7.4, S. 146ff). Die folgenden Kategoriensysteme verdeutlichen die Eingangsvorstellungen der Schüler zum Thema Vorhersagbarkeit. Aus ihrer Sicht sind die Gründe dafür, inwieweit das Verhalten eines physikalischen Systems überhaupt vorhergesagt werden kann, und auch dafür, welche Grenzen der Vorhersage bestehen, zwei Bereichen zuzuordnen. Dies ist zum einen der Bereich des Menschen. Er hat Erfahrungen gesammelt und kann aufgrund dessen Vorhersagen machen. Allerdings hängt es vom Stand seiner Forschung und von seiner Genauigkeit bei Messungen ab, wie weit der Vorhersagehorizont reicht. Und es sind die Systeme selbst, die einerseits unveränderlichen Naturgesetzen gehorchen, deren Verhalten

## 7. Ein Unterrichtskonzept zur nichtlinearen Physik in der gymnasialen Oberstufe

andererseits aufgrund ihrer Komplexität und unter Einfluss von Zufällen nur eingeschränkt vorhergesagt werden können. Das Antwortverhalten der Elftklässler (im Schnitt 17,5 Jahre alt, vgl. Tab. 7.8) unterscheidet sich dabei nicht von dem der 19,2 Jahre alten Schüler aus Stufe 13.

16-E1E2E3-FbSvor, n=31 (Item 16, Schülerfragebogen vor den Erprobungen 1 bis 3; Rückmeldungen: 31)	Anteil
<b>„Wieso ist es möglich, dass wir Vorgänge im Alltag und in der Physik überhaupt vorhersagen können?“</b>	
a) ... weil sie nach unveränderlichen Gesetzmäßigkeiten ablaufen	48%
b) ... weil Menschen durch praktisches Handeln und theoretische Überlegungen Erfahrungen gesammelt haben	35%
c) ... weil Forschungen durch Test, Beobachtungen etc. die Vorhersage ermöglichen	13%
d) ... sonstige Gründe	3%
17-E1E2E3-FbSvor, n=28	
<b>„Wovon hängt es ab, für wie weit in die Zukunft hinein man einen Vorgang in der Natur oder einen physikalischen Vorgang vorhersagen kann?“</b>	
a) Stand der Forschung	46%
b) Eigenschaften des Systems wie Komplexität	25%
c) Genauigkeit der Beobachtung, Messung	14%
d) äußere Einflüsse wie Zufälle	14%
19-E1E2E3-FbSvor, n=28	
<b>„Nehmen Sie bitte Stellung zur angeblichen oder tatsächlichen Fähigkeit des Dämons, die physikalische Zukunft exakt vorherzusagen.“</b> (genaue Formulierung s. Tab. 7.2)	
a) Exakte Vorhersage nicht möglich, da die Welt zu komplex ist	32%
b) Zufallsprozesse machen Gedankenspiel zunichte	29%
c) Exakte Vorhersage ist prinzipiell möglich	21%
d) Exakte Vorhersage unmöglich, da gesetzlose Prozesse existieren	4%
e) sinnlose Überlegung	14%
20-E1E2E3-FbSvor, n=23	
<b>„Unabhängig von unserem mangelnden Wissen oder der Fähigkeit des Dämons: Wie weit ist es Ihrer Meinung nach bereits festgelegt, wie sich die physikalische Zukunft entwickelt?“</b>	
a) Zukunft ist nicht festgelegt, für jede Person anders, Welt ist zu komplex, es gibt den Zufall	57%
b) Zukunft ist für gewisse Zeit festgelegt, z.B. 100 Jahre	30%
c) physikalische Zukunft ist festgelegt bzw. uneingeschränkt festgelegt	13%

Eine Differenzierung in Abhängigkeit vom Alter der Befragten findet man bei der Frage, ob es in der Natur objektive Zufälle gibt oder nicht. Betrachtet man alle Schüler, so findet man gleich große Lager für beide Positionen. Die Schüler aus Klasse 11 sind jedoch zu 63% davon ausgegangen, dass es keine objektiven Zufälle in der Natur gibt, nur zu 38%, dass dies der Fall ist. Bei den

Schülern der Stufe 13 gehen hingegen 60% davon aus, dass objektive Zufälle zum Wesen der Natur dazu gehören. Eine Erklärung dieses deutlichen Unterschieds kann darin liegen, dass die älteren Schüler bereits Kontakt mit Gedanken der Quantenphysik gehabt und deren Vorstellungen zum Thema Zufall übernommen haben.

21-E1E2E3-FbSvor, n=26	Anteil	
„Gibt es objektive Zufälle oder nur subjektive?“ (Formulierung s. Tab. 7.2)		
a) Objektive Zufälle sind Teil der Natur	alle: 46%	
	Stufe 11: 37%	Stufe 13: 60%
b) Letzten Endes sind alle Zufälle nur subjektiver Natur	alle: 54%	
c) Es gibt keine objektiven Zufälle, alles ist göttliche Vorherbestimmung oder anderweitig bereits festgelegt		
	Stufe 11: 63%	Stufe 13: 40%

**Determinismustypen.** Untrennbar verbunden mit Vorstellungen vom Zufall sind Vorstellungen, die Schüler mit Gesetzmäßigkeit und Determinismus verbinden. In KOMOREK (1998) sind Schüler der Klasse 11 mit Hilfe eines nahezu gleichen Fragebogens wie hier untersucht worden. Dabei sind aufgrund von 9 Items vier Typen von Schülern bzgl. ihrer Determinismustypen ausgemacht worden. Die durch die vorliegende Studie vergrößerte Datenbasis (n=41) unterstützt die Typisierung. Offenbar kann von jedem zehnten Schüler angenommen werden, dass er Laplace'schen Determinismustypen (vgl. KOMOREK & GROSSE, 1996) anhängt. Für jeden dritten Schüler im betrachteten Alter spielen auch animistische Vorstellungen und schicksalhafte Fügungen eine Rolle.

Typ I: Laplace'scher Determinist „Gleiche Ursachen haben exakt gleiche Wirkungen; alle Vorgänge in Natur und Alltag sind eindeutig festgelegt, aber aufgrund beschränkter Fähigkeiten des Menschen nicht vorhersagbar“	10%
Typ II: konditionaler Determinist „Gesetze bilden einen Rahmen für die Entwicklung von Systemen, Nebenbedingungen (auch Zufälle) haben großen Einfluss auf die tatsächlich ablaufenden Prozesse; Vorhersage ist deswegen mal mehr, mal weniger eingeschränkt“	29%
Typ II: makroskopischer Determinist undifferenzierte Sicht auf den Zusammenhang von Naturgesetzen, Vorstellungen sind wenig differenziert, aber es gibt bei diesem Typ eine allgemeine Zustimmung dazu, dass Prozesse in der Natur durch Gesetze bestimmt sind	27%
Typ IV: Gesetzes-Indeterminist Objekte und nicht Naturgesetze sind Ursachen für Prozesse; animistische Sicht auf Naturvorgänge; teilweise Vorstellungen schicksalhafter Vorherbestimmung	34%

**Argumentationstiefe.** Mit dem Wesen von Naturgesetzen hat sich ein weiteres Item im Eingangsfragebogen befasst. Die befragten Schüler haben Stellung zu den Aussagen zweier fiktiver Personen beziehen sollen. „Tanja“ vertritt einen Laplace'schen Determinismus, der mit seinen Vorhersagen an Ungenauigkeiten scheitert; „Wiebke“ vertritt eine Sicht auf Naturgesetze, die juristischen Gesetzen gleichkommt. Für sie definieren Naturgesetze einen Möglichkeitsraums, innerhalb dessen sich ein Prozess unterschiedlich entwickeln kann (vgl. Tab. 7.2).

Dieses Item hat geprüft, inwieweit die Schüler wissenschaftstheoretische Positionen beurteilen können. Alle Schüler, die das Item bearbeitet haben (rund 2/3 von allen) haben sich auf die erkenntnistheoretische Fragestellung eingelassen und entweder die beiden Standpunkte gegeneinander abgewogen oder sich für einen davon entschieden. Für die Unterrichtsplanung ist es wichtig gewesen zu wissen, dass Schüler auf diese Art von Überlegungen eingehen können. Die Analyse der Videoaufzeichnungen und der Feldnotizen hat aber gezeigt, dass eine Argumentationstiefe, wie sie im Item angelegt worden und in den Antworten auch zum Vorschein gekommen ist, im Unterricht nicht erreicht worden ist.

**Schüler (17 Jahre):** *Trotz der Kenntnis aller Gesetze kann man die weiteren Abläufe nicht eindeutig festlegen, da andere Faktoren wie die Umgebung, die Zeit oder Einfälle den Ablauf beeinflussen können. Wiebkes Rahmen ist in ihrem Beispiel die Erdanziehung auf den Würfel. Welche Ziffer der Würfel anzeigt, ist durch Zufall bestimmt (innerhalb des Rahmens). Also argumentiert Wiebke naturwissenschaftlich [...].*

**Schülerin (19 Jahre):** *Tanjas Sichtweise schließt den „objektiven“ Zufall aus, den ich für existent halte (ich kann jedoch keine Beispiele, die nicht dem „subjektiven“ Zufall zuordbar sind, geben). Wiebkes Meinung stimme ich nicht zu; mir ist kein Beispiel bekannt, wo Naturgesetze nicht zu einem eindeutigen Ergebnis führen, sie legen nicht den Rahmen, sondern vielmehr den genauen Vorgang fest. Vielleicht gibt es Naturgesetze, die uns unbekannt sind und auf dem „objektiven“ Zufall basieren?*

### Lerneffekte aufgrund des Unterrichts

Der Unterricht hat zu einer Veränderung der vorunterrichtlichen Vorstellungen geführt. Da mit Konzepten wie Gesetzmäßigkeit oder Zufall tiefliegende Überzeugungen berührt worden sind, ist in diesen Feldern nicht mit einem grundlegenden konzeptuellen Wechsel zu rechnen gewesen, wohl aber mit Ausdifferenzierungen. Wie die Ergebnisse in Klasse 10 gezeigt haben (DUIT, KOMOREK & WILBERS, 1997b; vgl. Kap. 5), liegen bei diesen Schülern in diesen Feldern Vorstellungskluster vor, die durch Unterricht differenziert werden können. Diesbezügliche Effekte im Grundkurs werden im folgenden in aller Kürze dargestellt.

**Eingeschränkte Vorhersagbarkeit.** Alle Schüler haben nachvollziehen können, dass das Verhalten bestimmter Systeme nur eingeschränkt vorhersagbar ist, obwohl es deterministischen Gesetzen unterliegt. Überraschende Effekte haben die verschiedenen Erprobungen gezeigt. Nach Abschluss der ersten Erprobung haben sich bei der Erklärung, was unter „eingeschränkt“ zu verstehen ist, sich rund 80% auf eine Verkürzung des Vorhersagezeitraumes, in dem eine Detailvorhersage möglich ist, bezogen. Dagegen haben in der zweiten und dritten Erprobung rund 80% der Schüler betont, dass eine qualitative Vorhersage des Verhaltens erhalten bleibt, dass die Detailvorhersage aber wegfällt. Beide Aspekte gehören zum Begriff der eingeschränkten Vorhersagbarkeit. Insgesamt haben die meisten Schüler das Prinzip der eingeschränkten Vorhersagbarkeit in der intendierten Weise nachvollziehen können. In den Nachinterviews mit 12 Schülern bringen praktisch alle Schüler die eingeschränkte Vorhersagbarkeit in Verbindung mit strukturellen Eigenschaften der betrachteten Objekte und Systeme, fast alle beziehen sich dabei auf die unterschiedlichen Ausprägungen von Instabilität der Systeme.

**Bei der eingeschränkten Vorhersagbarkeit kommt es auf die Instabilitäten an. An diesen Punkten entscheidet sich der Verlauf z. B. des Magnetpendels; für kleine Zeiträume vorhersagbar, langfristig allerdings nicht.**

*(Zitat aus Schülerfragebogen)*

**Stabilität und Instabilität.** Diese Begriffe sind den Schülern teilweise aus der elementaren Statik bekannt gewesen. Eine Erweiterung ihrer Vorstellungen hat stattgefunden, indem sie sie im

Unterricht auf dynamische Systeme bezogen haben. Damit haben die Begriffe eine prozesshafte Komponente bekommen. Der wesentliche Prozess, der durch den Unterricht eingeleitet worden ist, hat darin bestanden, dass die Schüler nach strukturellen Merkmalen der Objekte und Systeme gesucht haben, die für das prozesshaft instabile Verhalten gesorgt haben. Analogiebildungsprozesse haben stattgefunden, weil strukturell ähnliche Systeme aus unterschiedlichen Phänomenbereichen zur Verfügung gestanden haben. Die Schüler haben einen „strukturellen Blick“ entwickelt. Dies hat sie herausgefordert, Hypothesen über die untersuchten Systeme anzustellen, diesen nachzugehen und Ergebnisse in der Gruppe zu diskutieren. Damit ist ein Kompetenzzuwachs, was das naturwissenschaftliche Arbeiten angeht, zu beobachten gewesen. Durch diese Art des Vorgehens sind dann andere Schülerpersönlichkeiten angesprochen worden, was sich wiederum auf die metakonzeptuellen Vorstellungen der Lehrpersonen von ihrem Unterricht ausgewirkt hat.

**Etwas ist stabil, wenn Einwirkungen es nicht stark verändern, etwas ist instabil, wenn ein kleiner Einfluss dieses etwas vollkommen verändert. Keine Probleme.**

*(Zitat aus Schülerfragebogen)*

**Chaotisches Verhalten** und chaotisches System sind die zentralen Begriffe der ersten drei Module im Unterrichtskonzept gewesen. Hierbei ist es darum gegangen, einen neuen Begriff zu erlernen, bei dem - linguistisch gesprochen - kritische Attribute erfüllt sein müssen, damit man beispielsweise von chaotischem Verhalten sprechen darf. Bei einem solchen Verhalten muss Vorhersage eingeschränkt sein und zwar aufgrund von Instabilitäten im System, so dass es sensitiv für kleinste Störungen reagiert. Die Instabilitäten müssen zudem häufig zum Tragen kommen und es müssen bestimmte Ordnungsstrukturen im Phasenraum vorhanden sein. Bis auf wenige Schüler,

**Ja, ich kann ja nur sagen, wenn wir auf keine labile Stelle stoßen, dann können wir auch kein, kein chaotisches Verhalten bekommen.**

*(Zitat aus Schülerfragebogen)*

die chaotisches Verhalten sehr allgemein als in irgend einer Weise irregulär bezeichnen, nennen im abschließenden Fragebogen fast alle Schüler das erste Kriterium, die „eingeschränkten Vorhersagbarkeit“ (s.o.). Alle weiteren Kriterien werden vereinzelt und in unterschiedlichen Kombinationen genannt. 40% der Schüler gehen auf die Instabilitätsstellen, also auf Struktureigenschaften der betrachteten Systeme ein. 20% der Schüler erwähnen, dass diese Instabilitäten zum Tragen kommen müssen, aber kein Schüler hat nachvollzogen, dass das System immer wieder in die instabile Situation kommen muss, damit man von chaotischem Verhalten sprechen kann. Nur 30% der Schüler gehen auf den Aspekt der Ordnung ein, ohne genau auszuführen, was unter Ordnung bei chaotischen Systemen zu verstehen ist.

Auf die Frage, welcher Anteil ihrer Schüler labile Gleichgewichtslagen für die Einschränkung der Vorhersagbarkeit chaotischer Systeme verantwortlich macht, schätzen die Lehrpersonen durchschnittlich, dass dies rund 90% ihrer Schüler können. Tatsächlich sind es nur 40% der Schüler, wenn man sich auf die Daten des Abschlussfragebogens bezieht. In den Nachinterviews (Teaching Experiment) ist es allerdings allen 12 Schülern gelungen, den Zusammenhang zwischen labilem Gleichgewicht, eingeschränkter Vorhersagbarkeit und chaotischem Verhalten in der im Unterricht intendierten Weise zu rekonstruieren. In den Nachinterviews hat es bei den Schülern relativ wenige Schwierigkeiten gegeben, die Begriffe aus dem Unterricht zu rekonstruieren. Beim Begriff des chaotischen Verhaltens haben aber nur wenige dargestellt, dass hier vier kritische Attribute erfüllt sein müssen (konjunktiver Begriff). Dies ist dadurch erklärbar, dass es in keiner der Erprobungen gelungen ist, eine Begriffsbildung wie vorgesehen durchzuführen. Im Teaching Experiment hat sich dann gezeigt, dass diese Begriffsbildung ohne unüberwindliche Schwierigkeiten gelingen kann, wenn stringent darauf hingearbeitet wird. Es scheint nachträglich gesehen sogar so zu sein, dass die Begriffsbildung durch den Unterricht weitgehend vorbereitet worden ist, dass aber der letzte Schritt der Explizierung nicht stattgefunden hat.

**Zufall** kurz und bündig zu definieren, fällt auch der Wissenschaft schwer, wie das folgende Kapitel belegt. Weit über 90% der Schüler kennzeichnen nach dem Unterricht Zufall als ein Ereignis, das nicht vorhergesagt werden kann, das unerwartet auftritt und regellos ist. In diesen Beschreibungen ist kein deutlicher Unterschied zu den Beschreibungen von Zufall im Eingangsfragebogen zu erkennen, aber es ist auch nicht die Aufgabe des Unterrichtskonzepts gewesen, explizit die Vorstellungen von Zufall zu verändern. Allerdings hat der Unterricht die Aufgabe gehabt, das begriffliche Umfeld des Begriffs zu erweitern. Rund 50% der Schüler bringen dann auch Zufall in Verbindung mit chaotischen Prozessen oder mit Strukturbildungen bzw. sind in der Lage, auf einer mikroskopischen Ebene Zufall mit kleinen störenden Einflüssen gleichzusetzen. Vorstellungen von Zufall, die ihn als eine aktive Größe ähnlich einer Newtonschen Kraft interpretieren, sind aus vergangenen Studien bekannt (vgl. BÜCKER, 1998; KOMOREK et al., 2001) und sind auch hier beobachtet worden. Insgesamt wird deutlich, dass die Schüler nach dem Unterricht erweiterte Vorstellungen vom Begriff des Zufalls und seine Beziehung zu Regelmäßigkeiten und Strukturbildungen haben.

**Zufall ist das Gegenteil von Chaos, er hat keine Strukturen**  
(Schülerzitat aus Abschlussfragebogen)

**Zufall und Gesetzmäßigkeiten: Strukturbildung.** Mit Experimenten wie dem Viskosen Verästeln (vgl. Abb. 7.12), dem Zinkdendriten oder dem „Chaosspiel“ sind die Schüler der Komple-



Abb. 7.12 Zufall und deterministische Gesetze wirken bei der Entstehung eines „Fettbäumchens“ zusammen

mentarität von Zufall und Gesetzmäßigkeit nahegebracht worden. Den Schülern ist es nicht schwer gefallen, die Experimente durchzuführen. Nach Abschluss des Unterrichts gehen die meisten Schüler auf das konträre Verhältnis von Zufall und Gesetzmäßigkeit ein, wie die folgenden Zitate belegen: Durch die *Naturgesetze können wir Vorhersagen treffen, die durch den Zufall eingeschränkt werden und Zufälle stören die Naturgesetze*. Nur rund 25% der Schüler gehen auf das Zusammenwirken von zufälligen und deterministischen Prozessen ein und thematisieren eine komplexe Strukturbildung. Dies ist ein weit geringerer Anteil als er von den Lehrpersonen geschätzt

**Wirken Zufall und Naturgesetze zusammen, bildet sich Ordnung aus.**

(Zitat aus Schülerfragebogen)

wird, die eine Quote von 40% bzw. 80% erwarten. In den Nachinterviews (Teaching Experiment) hat sich ein etwas anderes Bild gezeigt, denn anhand der vorgelegten Experimente und Abbildungen haben 10 der 12 Interviewten den komplementären Zusammenhang zwischen

zufälligen und deterministischen Prozessen rekonstruieren bzw. zum ersten Mal nachvollziehen können.

**Schülerin (19 Jahre):** *Also man denkt, dass es ein chaotisches System ist, oder es ist ein chaotisches System, aber nach bestimmten Naturgesetzmäßigkeiten und nach dem Zufall sozusagen bilden sich Strukturen dann.*

Es ist in dieser Studie deutlich geworden, dass das Verhältnis zwischen Zufall und Gesetzmäßigkeit im Unterricht nur von wenigen Schülern nachvollzogen worden ist. Obwohl Schüler von Zufall gesprochen haben und sich auf die wissenschaftliche Sprechweise eingelassen haben, geben die Daten kein einheitliches Bild über ihre Vorstellungen zum Zufall und seiner Beziehung zur Gesetzmäßigkeit. Eine Studie, über die im folgenden Kapitel berichtet wird, hat sich mit dieser Fragestellung analytisch und empirisch auseinander gesetzt. - Kompetenzentwicklungen sind beobachtet worden: In den arbeitsteiligen Gruppenarbeiten haben die Schüler gelernt, mit Hilfe der Experimente und zugehöriger Literatur eine Expertise bzgl. eines Phänomenbereichs aufzubauen und Erkenntnisse der restlichen Klasse zu präsentieren.

**Entwicklungen im Bild von der Physik.** Entwicklungen in diesem Bereich sind bei den Schülern vor allem durch überraschende Erkenntnisse bei der Analyse der Experimente eingeleitet worden. Viele der Schüler haben betont, dass es überrascht, chaotische Systeme und chaotisches Verhalten in vielen Dingen des Alltags zu erkennen. Überrascht hat zudem, dass auch bei bekann-

**Man muss akzeptieren, dass nicht alles genau vorhersagbar werden kann, und dass man Berechnungen aktualisieren muss.**

*(aus Schülerfragebogen)*

ten Systemen wie dem Planetensystem, unter neuem Blickwinkel betrachtet, die Vorhersage eingeschränkt ist, dafür aber neue Muster und Strukturen auftreten. Einige wenige Schüler haben das Erlernte übergeneralisiert, indem sie nun glauben, Regellosigkeit und Zufälle haben einen stärkeren oder sogar einen ausschließlichen Einfluss auf das Weltgeschehen. Andere haben eine Tren-

nung zwischen der Welt der Physik und der Alltagswelt vorgenommen. Während sich im Alltag aufgrund der Erkenntnisse der nichtlinearen Physik für sie keine Konsequenzen ergeben, hat sich ihr Bild von der Physik dadurch erweitert, dass neue Phänomenbereiche als für die Physik zugänglich erkannt worden sind und indem sie neue weitere Denk- und Arbeitsweisen der Physik kennen gelernt haben.

**Habe tieferen Einblick in die physikalische Denkweise gewonnen.**

*(Schülerzitat aus Fragebogen)*

**Schüler (17 Jahre):** *Auf jeden Fall hab' ich etwas über Physik gelernt. Wie das mit dem Phasenraum war. Dass es angewendet wird [...] in der Medizin. Oder dass es Strukturen im Chaos gibt, und nicht alles nur chaotisch ist, wie es im ersten Moment aussieht, und dass es doch eine Struktur gibt.*

**Schülerin (19 Jahre):** *Dass auch der Wissenschaft Grenzen gesetzt sind, aber versucht wird, diese zu verschieben. Anscheinend ist menschliches Streben nach Allwissen und Berechenbarkeit sehr groß.*

**Nichtverstanden** sind eine ganze Reihe von Begriffen und Zusammenhängen. Insbesondere die Fragen, was denn Zufall an sich sei, ob es den objektiven Zufall gebe oder nicht, wie sich im Chaos Strukturen und Ordnung ausbilden können oder ob es Chaos im Sinne eines völligen Durcheinanders in der Physik nach den Überlegungen im Unterricht überhaupt noch gibt. Dies zeigt, dass zwar nicht alle Fragen beantwortet worden sind, dass aber die Art zu fragen einen gewissen Kompetenzzuwachs widerspiegelt. Damit sind wesentliche Ziele des Unterrichts erreicht worden.

### Lernprozesse der Lehrpersonen

Die Lernprozesse der Lehrer sind auf fachlicher und auf fachdidaktischer Ebene abgelaufen. Da der Unterricht von seiner Grundintension eine fachliche Öffnung hin zu einem modernen Thema der Physik angezielt hat, hat ein Lernen neuer physikalischer Konzepte stattgefunden. Großräumige Konzeptwechsel sind dabei nicht beobachtet - und auch nicht erwartet - worden. Vielmehr kann man die Lernprozesse der Lehrer im Rahmen konzeptueller Ausdifferenzierung vorhandenen Wissens beschreiben. Allerdings haben sich die Lehrer auch neuen Fragestellungen gegenüber gesehen wie z.B. der Frage nach Stabilität des Sonnensystems und deren Parameterabhängigkeit oder nach der Strukturbildung, wenn Zufallsprozesse mitwirken. Eine Reihe von Parallelen zwischen den Lernprozessen der Schüler und denen der Lehrer ist zu beobachten gewesen. Auch den Lehrpersonen ist es neu, Stabilität und Instabilität als Merkmale dynamischer Prozesse zu verstehen. Neu ist auch das physikalische Konzept des deterministischen Chaos. Da die Lehrpersonen allerdings auf die Konzepte der klassischen Physik zurückgreifen können und sich praktisch alle Phänomene, die im Unterricht behandelt worden sind, in diesem Rahmen erklären lassen, haben keine Schwierigkeiten bestanden, die hier thematisierte Physik nachzuvollziehen und in eigenen Worten zu formulieren, wie folgendes Zitat illustriert:

**Naturgesetze gelten umfassend, können aber keine sicheren Aussagen über beliebig lange Zeiträume machen, da in komplexen Systemen schwache Kausalitäten auftreten können.**

*(Zitat aus Lehrerfragebogen)*

**Lehrer (60 Jahre) (Abschlussfragebogen):** *Ein System zeigt chaotisches Verhalten, wenn es Instabilitäten besitzt, diese vielfach durchlaufen werden, die Vorhersagbarkeit eingeschränkt ist, ein Energiestrom durch das System geht, so dass sich Ordnung ausbilden kann. Schwierig ist die Überwindung der „bürgerlichen“ Vorstellung von Chaos.*

Im Unterricht sind schülerorientierte Methoden wie Gruppenarbeit mit Präsentation, forschendes Lernen in Gruppen mit Hypothesenbildung, Integration von Computerarbeit im Physikunterricht etc. eingesetzt worden. Auf der Ebene fachdidaktischen Denkens (vgl. Abschnitt 2.2) haben die Lehrer dabei gelernt, dass erstens die Vielfalt der Methoden das Unterrichtsgeschehen beflügeln kann und Schüler kognitiv angeregt werden können, ohne dass zielloser Aktionismus die Folge sein muss. Sie haben zweitens gelernt, dass andere Schüler als im üblichen Unterricht aktiv werden und neue Stärken zeigen können. Drittens haben sie gelernt, dass bei derartigen Arbeitsformen der Ergebnissicherung in der Klassendiskussion große Bedeutung zukommt und ihre Aufgabe u.a. darin besteht, einen „Roten Faden“ zu spannen.

**Zusammenfassung:** Durch den Unterricht sind Vorstellungen zum Thema Zufall und Gesetzmäßigkeit ausdifferenziert worden. Dabei hat der Unterricht auf vorunterrichtliche Denkkategorien bzgl. Determinismus aufbauen können. Die Unterrichtsziele der Bereiche A bis D (vgl. Abschnitt 7.1) sind weitgehend erreicht worden. Allerdings haben sich Probleme der Erprobungen auf die Lernprozesse der Schüler ausgewirkt: Da Ergebnisse aus Gruppenarbeit und Klassengespräch unzureichend gesichert worden sind, haben sich zwar in Nachinterviews die zentralen Gedanken des Unterrichtsgangs reproduzieren lassen. Den Schülern ist es aber schwer gefallen, diese Gedanken und Begriffe selbstständig darzustellen. Die Lernprozesse auf Seiten der Lehrer können als Ausdifferenzierung vorhandenen physikalischen Wissens beschrieben werden. Einige Aspekte, wie die Funktion von Zufallsprozessen sind allerdings neu gewesen. Auf fachdidaktischer Ebene haben sie gelernt, schülerorientierte, kognitiv anregende Unterrichtsmethoden einzusetzen, aber auch erkennen müssen, dass dann der Ergebnissicherung und dem Aufrechterhalten eines Roten Fadens, der Aktivitäten mit Zielen verbindet, große Bedeutung zukommt.

## 7.6 Diskussion der Erprobungs- und Evaluationsergebnisse

Zusammen mit einem Arbeitskreis aus erfahrenen Physiklehrern sind Module eines Unterrichts zur nichtlinearen Physik für Grundkurse der gymnasialen Oberstufe entwickelt worden. Die Darstellung der Module im Abschnitt 7.3 gibt ihren Entwicklungsstand nach der dritten Erprobung wieder, d.h. nach einer Reihe von Modifikationen. Die Arbeiten sind in zwei Phasen gegliedert gewesen, in die Phase der Planung und Unterrichtsentwicklung im Lehrerarbeitskreis und in die Phase der Erprobung. Alle ablaufenden Entwicklungs-, Erprobungs- und Lernprozesse sind formativ evaluiert worden. Dazu sind Fragebögen, Interviews, Videoaufzeichnungen und Feldnotizen als Evaluationsinstrumente eingesetzt worden. Quantitative Daten sind mit deskriptiver Statistik ausgewertet worden, die qualitativen Daten im Rahmen einer kategoriengestützten Inhaltsanalyse.

Prozesse, die im Lehrerarbeitskreis abgelaufen sind, können mit dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion beschrieben werden. Das Modell gibt zwar keinen zeitlichen Verlauf vor, sondern setzt auf Wechsel der Perspektiven bei der Entwicklung einer Sachstruktur für den Unterricht (vgl. Abschnitt 2.1). Dieser Wechsel ist im Arbeitskreis durch eine wiederholte Abfolge von fachlichen Klärungen, Didaktischen Analysen und Didaktischen Strukturierungen realisiert worden. Das Produkt dieses Prozesses ist das modulare Unterrichtskonzept für das Grundkursniveau. Unter dem Blickwinkel von Lehrerprofessionalisierung (vgl. Abschnitt 4.3) sind die Prozesse im Arbeitskreis von einer klassischen Lehrerfortbildung zu unterscheiden, weil nicht die physikalischen Konzepte im Mittelpunkt gestanden haben, sondern didaktische Überlegungen zur ihrer Vermittelbarkeit.

Das Vorgehen des Arbeitskreises kann als pragmatisch bezeichnet werden, denn Verschriftlichungen von Zielen und Methoden oder graphische Darstellungen der entwickelten Sachstruktur sind nicht genutzt worden. Das fachdidaktische Denken ist von den zur Verfügung stehenden Objekten und Experimenten ausgegangen und nicht von Zielen und Sachstrukturen. Die Praxiserfahrung der Lehrpersonen hat sich vor allem darin gezeigt, dass bereits mit vorläufigen Planungs- und Klärungsergebnissen gearbeitet worden ist und dass Entscheidungen über die Abfolge der Unterrichtsaktivitäten sehr schnell im Einvernehmen der beteiligten Lehrpersonen getroffen worden sind. Auch unausgesprochen hat an bestimmten Entscheidungsstellen Konsens über die Umsetzbarkeit von Aktivitäten geherrscht. Die einzelnen Erprobungen sind durch Gruppen aus zwei bis drei Mitgliedern vorbereitet worden. Auch während einer Erprobung ist die fachliche Klärung von großer Bedeutung für die Feinplanungen des Unterrichts gewesen.

In der zweiten Phase ist das Unterrichtskonzept in drei Grundkursen (Stufen 11 und 13) erprobt worden. Zusätzlich haben zwei Projektkurse das Material genutzt. Evaluiert worden ist hier die Praxistauglichkeit und die Variabilität des Konzepts, d.h. seine Anpassung an die Rahmenbedingungen der einzelnen Erprobungen und die unterschiedlichen Unterrichtsstile. Lerneffekte, die vom Unterrichtskonzept ausgehen, sind ebenfalls untersucht worden.

In der Unterrichtspraxis hat sich das Konzept bewährt, weil es die zentralen Aspekte der dynamischen Instabilität, des Chaos und der Strukturbildung für Schüler transparent gemacht hat; und weil schülerorientierte Methoden und kognitiv anregende Experimente und Objekte eingesetzt worden sind. Auch Schüler und Lehrer halten es von seiner Struktur her für überzeugend. Die Variabilität des Unterrichtskonzepts hat sich darin gezeigt, dass die Lehrer es an verschiedene Rahmenbedingungen angepasst haben und dass sie es zwischen den einzelnen Erprobungen analysiert und modifiziert haben. Neue Module sind entwickelt worden, die zeitliche Struktur und die Abfolge der Aktivitäten sind variiert worden.

Allerdings sind auch Probleme aufgetreten, die sich auf die Lernprozesse der Schüler auswirken haben: Da Ergebnisse aus Gruppenarbeit und Klassengespräch unzureichend gesichert worden sind, haben sich zwar in Nachinterviews die zentralen Gedanken des Unterrichtsgangs reproduzieren lassen. Den Schülern ist es aber schwer gefallen, diese Gedanken und Begriffe des

## 7. Ein Unterrichtskonzept zur nichtlinearen Physik in der gymnasialen Oberstufe

---

Unterrichts selbstständig darzustellen. Aufgrund des Unterrichts sind Vorstellungen zum Thema Zufall und Gesetzmäßigkeit ausdifferenziert worden. Dabei hat der Unterricht auf vorunterrichtliche Denkkategorien bzgl. Determinismus aufbauen können. Die Ziele der Bereiche A bis D (vgl. Abschnitt 7.1) sind weitgehend erreicht worden. Auch eine Kompetenzentwicklung bezüglich des naturwissenschaftlichen Arbeitens hat festgestellt werden können: Durch die Auswahl der Experimente und die Untersuchungsaufgaben sind das Experimentieren, das Aufstellen und Verfolgen eigener Hypothesen, das Aushandeln von Bedeutungen in der Gruppenarbeit, das Präsentieren von Gruppenergebnissen und die Diskussion relativ abstrakter Konzepte im Klassengespräch gefördert worden.

Die Lernprozesse auf Seiten der Lehrer können als Ausdifferenzierung vorhandenen physikalischen Wissens beschrieben werden. Einige Aspekte wie die Funktion von Zufallsprozessen bei der Strukturbildung oder der Aspekt der Instabilität von Planetensystemen sind allerdings auch ihnen neu gewesen. Auf fachdidaktischer Ebene haben sie gelernt, schülerorientierte, kognitiv anregende Unterrichtsmethoden einzusetzen, aber auch erkennen müssen, dass dann der Ergebnissicherung und dem Aufrechterhalten eines Roten Fadens, der Aktivitäten mit Zielen verbindet, große Bedeutung zukommt. Abschließend sei angemerkt, dass trotz der verbliebenen Probleme ein erprobtes Unterrichtskonzept für die Schulpraxis vorliegt.

## 8. Empirische Studien zu den Konzepten *Ordnung* und *Zufall*

### 8.1 Vorstellungen und Lernprozesse im Bereich *Ordnung*

Ordnungen und Strukturen helfen, sich in der Welt zu orientieren. Was für das Alltagsleben wichtig ist, gilt für die Naturwissenschaften umso mehr. Ordnungen erlauben es, ein Objekt oder System zu beschreiben und seine räumlichen und zeitlichen Eigenschaften vorherzusagen. Paradigma für eine räumliche Ordnung, die unveränderlich und damit statisch ist, ist der Kristall. Er ist durch Translationssymmetrie, die häufige Aneinanderreihung ein und derselben Elementarzelle, gekennzeichnet. *Das* Paradigma für zeitliche Ordnung ist das Pendel, das die Zeit in gleich große Zeitabschnitte einteilt. Die moderne Physik hat diese Konzepte von Ordnung deutlich erweitern können. In der Festkörperphysik wird heute eine Vielzahl kristallographischer Objekte mit den Begriffen Ordnung und Struktur gefasst, seit Methoden der Strukturaufklärung verfeinert worden sind. Die nichtlineare Physik beschreibt die zeitlichen oder räumlich-zeitlichen Strukturbildungen vieler dynamischer Systeme mit Hilfe des Begriffs der Ordnung. Aus der Analyse dieser Systeme können anwendungsrelevante Erkenntnisse auch für Sparten außerhalb der Physik, wie z. B. für die Medizin, gewonnen werden (vgl. Kap. 3). Die Ordnung komplexer Systeme zu erkennen, gelingt oft erst nach geeigneter Aufbereitung von Messdaten und ihrer Darstellung im Phasenraum.

Die Ergebnisse bei der Umsetzung des Unterrichtskonzept für Grundkurse (Kap. 7) führen dazu, die Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern zum Begriff der Ordnung näher zu untersuchen. Es ist dabei zu prüfen, wie weit Schülerinnen und Schüler zu einem Begriff von Ordnung geführt werden können, wie ihn die nichtlineare Physik nutzt. Dazu zählt insbesondere, dass chaotische Attraktoren mit ihren spezifischen Strukturen für Ordnung stehen. Von welchen Vorstellungen von Ordnung gehen Schülerinnen und Schüler aus und wie können sie zu der erweiterten Sicht der Physik geführt werden? Um diese Fragen zu bearbeiten, sind ein Fragebogen und zwei Interviews entwickelt worden (VOGT, 2002; KOMOREK et al., 2003). Die Analyse der Fragebogendaten und des ersten Interviews liefert ein Kategoriensystem mit neun vorunterrichtlichen Schülerkonzepten von Ordnung und Struktur, die teilweise mit wissenschaftlichen Ordnungsvorstellungen übereinstimmen. Im zweiten Interview haben die Schülerinnen und Schüler mit einem Programm gearbeitet, das einen chaotischen Schwinger simuliert und seine Bewegung im Phasenraum darstellen kann. Die Aneignung des Phasenraumkonzepts und die Interpretation chaotischer Attraktoren lässt sich auf Basis der Interviewdaten als ein Prozess mit vier Stufen beschreiben.

#### **Statische und dynamische Ordnung in den Naturwissenschaften**

In der Literatur wird in den meisten Fällen darauf verzichtet, eine explizite Definition für Ordnung anzugeben (vgl. VOGT, 2002), spezifische Ordnungskonzepte werden meist anhand von Beispielen, also paradigmatisch eingeführt.

**Räumliche Ordnung.** Wenn ein Ausschnitt eines räumlich geordneten Systems und die Art der Ordnung bekannt sind, so kann man auf den Aufbau des Systems an einem weit entfernten Raumpunkt schließen. Dies ist z.B. bei einem Kristall der Fall, bei dem man die Elementarzelle kennt. Es treten Translations- und/oder Rotationssymmetrien auf. Die Bestandteile des Kristalls – Atome,

Ionen, Moleküle – besetzen die Punkte eines Gitters. Solche Gitter entstehen durch Translation einer Elementarzelle in alle drei Raumrichtungen. Die Ordnung in einem Kristall spiegelt sich ferner darin wider, dass man ausgehend von einem festgewählten Atom die Lage eines anderen Atoms in einer bestimmten Entfernung vorhersagen kann (Translations-Fernordnung, vgl. KITAIGORODSKY, 1984; NELSON, 1986). Es entstehen im dreidimensionalen Kristall parallele Flächen in unterschiedlicher Richtung, die sogenannten Netzebenen. Sie sind ein wichtiges Kennzeichen für Kristalle und ermöglichen die Bestimmung ihrer Struktur mit Hilfe von Röntgen- oder Elektronenstrahlen, die an den Netzebenen reflektiert werden. Die Kristallstruktur stellt für die betrachteten Festkörper eine Idealisierung dar, denn in der Realität wird die Ordnung häufig durch Fremdatome oder unbesetzte Gitterplätze unterbrochen.

Mit der Entwicklung der Untersuchungsmethoden zur Aufklärung von Kristallstrukturen hat sich der Ordnungsbegriff der Kristallographie bzw. der Festkörperphysik erweitert. Moderne hochauflösende Röntgenbeugungsverfahren ermöglichen es, die Ordnungsstrukturen natürlicher und künstlich hergestellter amorpher und kristalliner Festkörper zu verstehen. Auch in Bezug auf Quasikristalle wird von Ordnung gesprochen, (vgl. NELSON, 1989; BAAKE et al., 2002). Das so genannte Penrose-Muster verdeutlicht eine mögliche Struktur eines Quasikristalls. Ein streng periodisches Muster ist nicht zu erkennen, eine Elementarzelle existiert also nicht. Dennoch kann diese nicht-periodische Parkettierung der Ebene durch zwei Rhombenformen mit dem Begriff der Ordnung gefasst werden. Denn man findet bänderartige Elemente in der Gesamtstruktur, die sich translatorisch wiederholen. Dadurch weisen die röntgenographischen Beugungsmuster eine fünfzählige Symmetrie auf (NELSON, 1989). Außerdem haben die durchgängig zu erkennenden Zehnecke alle die gleiche Ausrichtung, so dass auch eine Orientierungs-Fernordnung besteht (vgl. Abb. 8.1).

Eine statistische Form der Ordnung im Nahbereich eines betrachteten Atoms findet man bei (metallischen) Gläsern. Ein Beispiel ist das statistische Netzwerk der Silizium- und Sauerstoff-Atome in  $\text{SiO}_2$ . Diese Art räumlicher Nahordnung (vgl. Abb. 8.2) wird mit dem Konzept der radialen Dichtefunktion beschrieben (vgl. KITTEL, 1999). In Abhängigkeit von der Entfernung

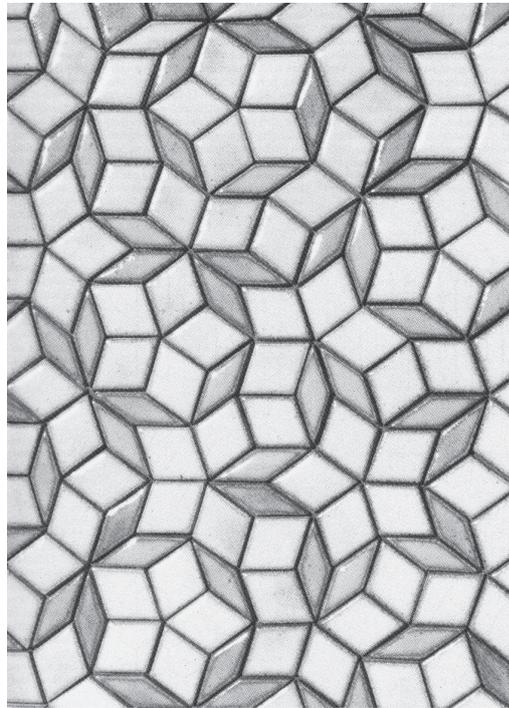


Abb. 8.1 Penroseparkettierung (nach NELSON, 1989)

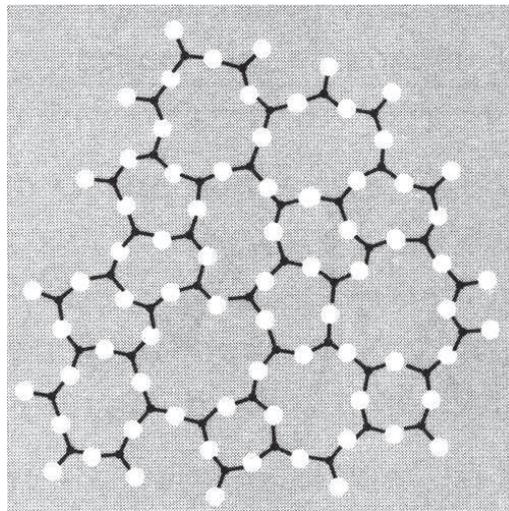


Abb. 8.2 Statistisches Netzwerk eines Glases wird durch eine radiale Dichtefunktion beschrieben (KITTEL, 1999)

zu einem festgehaltenen Atom wird die Verteilung der Nachbaratome angegeben. Man erkennt in der Nähe des betrachteten Atoms eine Modulation der Elektronendichte, aus der sich Informationen über die Nahordnung der Nachbaratome ableiten lassen. Aufgrund der lokalen Bindungswinkel und -längen zu den nächsten Nachbarn entsteht eine statistische Nahordnung.

Während bei den Gläsern die Nahordnung der Atome interessiert, untersucht man bei bestimmten natürlich vorkommenden Mineralien langreichweitige Ordnungsmuster, die sich z. T. makroskopisch beobachten lassen. Bei den Feldspatmineralien wie z. B. beim Labradorit findet man Überstrukturgitter in Form von Lamellen, die z. T. eine Periodizität von 1500 Å aufweisen. Sie überlagern das kristalline Grundgitter, das eine Einheitszelle von rund 14 Å hat. Trotz der relativ einfachen chemischen Zusammensetzung sind die Strukturen dieser Mineralien, die immerhin 60 % der Erdkruste ausmachen, nicht bis in alle Einzelheiten geklärt. Feldspate bestehen aus einem Aluminium-Silikat-Gerüst aus Tetraedern; diese Struktur bildet Hohlräume, in die Natrium oder Kalzium eingelagert ist. Aufgrund der Lamellen der weitgehend lichtdurchlässigen Feldspate kommt es zur Interferenz. Bei einer Periodizität von 1500 Å wie beim Labradorit kann der blauviolette Anteil des Lichtspektrums konstruktiv interferieren und es kommt zu einem Schillereffekt, wenn man das angeschliffene Mineral geeignet zum Licht hält. Röntgenbeugungsuntersuchungen stützen die Erklärung, dass Schwankungen der Elektronendichte durch sich abwechselnde natrium- und kalziumreiche Kristallbereiche in Verbindung mit einer transversalen Verzerrung des Grundgitters die Lamellen im Feldspat erzeugen (KOMOREK, 1992; BURANDT et al., 1992).

Diese Beispiele führen vor Augen, dass die Physik des Festkörpers neben der sich periodisch wiederholenden kristallinen Einheitszelle weitere interessante Beispiele für räumliche Ordnung bereithält; in Schulbüchern werden diese Formen räumlicher Ordnung bislang kaum erwähnt.

**Zeitliche Ordnung.** Sie tritt in Systemen auf, die einer zeitlichen Entwicklung unterliegen und bei denen die periodische oder nichtperiodische Wiederkehr von Prozesselementen Vorhersagen über den zukünftigen Verlauf ermöglicht. Zur Darstellung von zeitlicher Ordnung etwa beim Pendel werden Winkel-Zeit-Diagramme oder Winkelgeschwindigkeits-Zeit-Diagramme benutzt und man erhält periodische Kurven, die im harmonischen Fall sinusförmig sind. Phasenraumdarstellungen erleichtern die Langzeitbetrachtung eines Systems. Periodische Bewegungen erzeugen geschlossene Kurven im Phasenraum, die für eine zeitliche Ordnung stehen. Hierbei von Ordnung zu sprechen, hat sich in Forschungsartikeln und Lehrbüchern zur nichtlinearen Dynamik etabliert. In vielen Fällen werden dem Pendel als simpelster Form zeitlicher Ordnung die komplexeren Ordnungsstrukturen nichtlinearer Systeme gegenüber gestellt (vgl. WORG, 1993; SCHUSTER, 1994; THOMPSON & STEWART, 1986).

Beispiele für die komplexe Ordnung energiedurchflossener Systeme sind oszillierende chemische Reaktionen. EPSTEIN et al. (1989) beschreiben drei Bedingungen, die solche Systeme erfüllen müssen, damit sich eine Oszillation einstellt und erhalten bleibt: Das chemische System muss sich fern vom chemischen Gleichgewicht befinden, es muss eine Rückkopplung existieren, so dass irgendein Produkt eines beliebigen Schrittes in der Reaktionsfolge seine eigene Bildungsgeschwindigkeit beeinflusst und außerdem muss das System bistabil sein. Ein Beispiel aus der Biologie für eine zeitliche Ordnung ist die sogenannte Populationsdynamik von Räuber und Beute (BERGERUD, 1989). Die Berechnung der Größe einer Population in der nächsten Generation erfolgt z. B. mit Hilfe der logistischen Gleichung (vgl. Kap. 7).

Auch komplexe Attraktoren im Phasenraum chaotischer, dissipativer Systeme können zeitliche Ordnung repräsentieren, allerdings liegt ihnen kein einfaches periodisches Systemverhalten zugrunde (SCHUSTER, 1994). Attraktoren sind Gebiete im Phasenraum, auf die Trajektorien aus der Umgebung zustreben. Der einfachste Fall ist ein Fixpunktattraktor, auf den sich nach einer Einschwingphase die Trajektorien der Umgebung hin bewegt haben. Bei periodischem Systemverhalten findet man in der Phasenraumdarstellung eine geschlossene Kurve, den so genannten Grenzzyklus. Quasiperiodisches Verhalten führt auf einen Torus-Attraktor, dessen Phasenbahn nicht

geschlossen ist, sondern die Oberfläche eines Torus ausfüllt. Grenzyklen, Tori oder chaotische Attraktoren nehmen einen bestimmten Bereich des Phasenraums in Anspruch und weisen eine bestimmte innere Struktur auf. Für die Existenz chaotischer Attraktoren müssen zwei Bedingungen erfüllt sein: der Phasenraum muss mindestens dreidimensional sein und der Attraktor muss ein (im mathematischen Sinne) zusammenhängendes Gebilde darstellen. Nach PEITGEN et al. (1994) ergeben sich vier Eigenschaften für chaotische Attraktoren:

- Ein Attraktor füllt ein beschränktes Gebiet im Phasenraum aus.
- Für alle Trajektorien aus dem Einzugsbereich eines Attraktors ist das Grenzgebilde gleich.
- Jede Trajektorie kommt jedem Punkt des Attraktors beliebig nahe.
- Die Struktur des Attraktors ist fraktal und insbesondere selbstähnlich.

Differentialgleichungssystem:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= a(y-x) \\ \dot{y} &= (c-a)x - xz + cy \\ \dot{z} &= xy - bz\end{aligned}$$

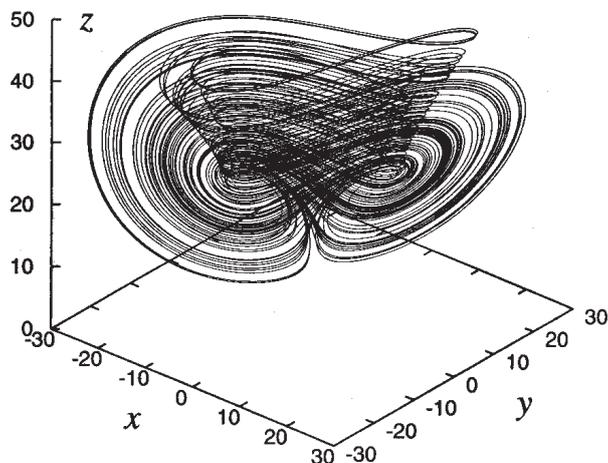


Abb. 8.3 Chaotischer Attraktor (nach CHEN & UETA, 1999)

Alle vier Punkte können als Kriterien für zeitliche Ordnung in nichtlinearen Systemen angesehen werden. Dort ermöglichen diese Eigenschaften der chaotischen Attraktoren globale Vorhersagen über das zukünftige Systemverhalten. Allerdings ist keine Vorhersage auf der lokalen Systemebene möglich. Mittlerweile sind viele Differentialgleichungssysteme bekannt, die zu chaotischem Verhalten führen; Lorenz-, Rössler- und Henon-Attraktor sind in der Literatur häufig zitierte Beispiele. Abb. 8.3 zeigt ein von CHEN und UETA (1999) vorgestelltes System, das bei geeigneter Einstellung der Parameter  $a$ ,  $b$ ,  $c$  chaotisch wird. Deutlich erkennt man in der Abbildung das beschränkte Gebiet im Phasenraum, die charakteristische globale Form und ansatzweise die fraktale Gestalt im Detail.

### Räumlich-zeitliche Ordnung

Die Ordnung als räumlich-zeitliche Ordnung tritt oft bei hydrodynamischen Phänomenen auf. Dabei unterliegt das System lokal einer permanenten Veränderung (damit ist diese Ordnung als dynamisch zu verstehen), während die globale Struktur erhalten bleibt. Die lokalen zeitlichen Schwankungen können periodisch oder nichtperiodisch sein. Ein Beispiel räumlich-zeitlicher Ordnung sind Konvektionszellen in Flüssigkeiten, die Bénard-Zellen (VELARDE & NORMAND, 1989). Erhitzt man eine dünne Flüssigkeitsschicht gleichmäßig von unten, so bilden sich lange walzenförmige Zellen, die der Gestalt des Gefäßes folgen, in diesem Fall ringförmige Strukturen. Diese bleiben in der Regel nur erhalten, wenn die Flüssigkeitsschicht nach oben und unten durch

ebene Platten begrenzt ist. Ist sie, wie bei dem Bénard-Experiment, nach oben offen, so entstehen sechseckige Zellen. Diese verbreiten sich über die gesamte Schicht. In den Zellen steigt die Flüssigkeit in der Mitte auf, kühlt dabei ab und sinkt am Rand wieder nach unten. Es entstehen die beobachteten sechseckigen Zellen (vgl. Abb 8.15). Dieser Vorgang kommt nur in Gang, wenn die ursprünglich gleichmäßig erhitzte Flüssigkeit durch eine zufällige Störung aus dem Gleichgewicht gebracht wird, so dass Konvektionsströme einsetzen. Die einheitliche Theorie der Wärmekonvektion ist in der Entwicklung (AHLERS et al. 2002).

Ein verwandtes Beispiel für das Auftreten von räumlich-zeitlicher Ordnung sind die Granulation der Sonne (GÜRTLER & DORSCHNER, 1993), die eine polygone Struktur ausweisen und zum beobachtbaren Bereich der Konvektionszone der Sonne gehören. Die Granulen haben eine Ausdehnung von rund 1200 km; in ihnen steigen heiße Gasmassen mit einer Geschwindigkeit von 0,4 km/s auf. Am Rand der Zellen sinken sie im intergranularen Bereich wieder in das Sonneninnere ab. Dort werden sie wieder erhitzt und steigen erneut auf. Die mittlere Lebensdauer der Granulen beträgt 10 Minuten. Spezielle chemische Reaktionen führen ebenfalls zu einer räumlich-zeitlichen Ordnung. Ein Beispiel ist die Belousov-Zhabotinsky-Reaktion (Abb. 8.4; vgl. NICOLIS & PRIGOGINE, 1987; EPSTEIN et al., 1989). Auch dieses System ist bistabil und reagiert „autokatalytisch“, so dass die Wirkung kleiner Störungen verstärkt bzw. unterdrückt wird. Die bei der Belousov-Zhabotinsky-Reaktion entstehenden Spiralen und konzentrische Ringe bewegen sich durch das Substrat hindurch. In diesem Sinne liegt eine räumlich-zeitliche Strukturbildung oder Ordnung vor. Um den Prozess der Strukturveränderung aufrecht zu halten, muss Energie durch das System fließen und es muss sich weitab vom thermodynamischen Gleichgewicht befinden (s.o.).



Abb. 8.4 Belousov-Zhabotinsky-Reaktion (aus PRIGOGINE & STENGERS, 1986)

Weitere Beispiele für dissipative Strukturen sind Wirbel. KORNECK (1998) beschreibt Experimente, die sich für den Schulunterricht eignen, bei denen sich zwischen zwei rotierenden Zylindern Wirbel bilden und Strukturen ähnlich der Kármánschen Wirbelstraße (Abb. 8.5) entstehen. Abb. 8.6 gibt einen Überblick über die hier angesprochenen Formen von Ordnung .

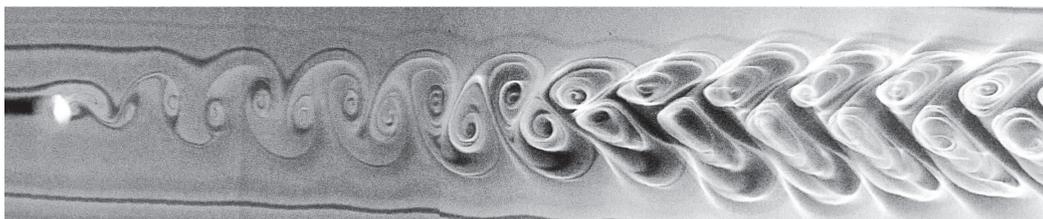


Abb. 8.5 Kármánsche Wirbelstraße (aus GEO Wissen, Gruner + Jahr, 1990)

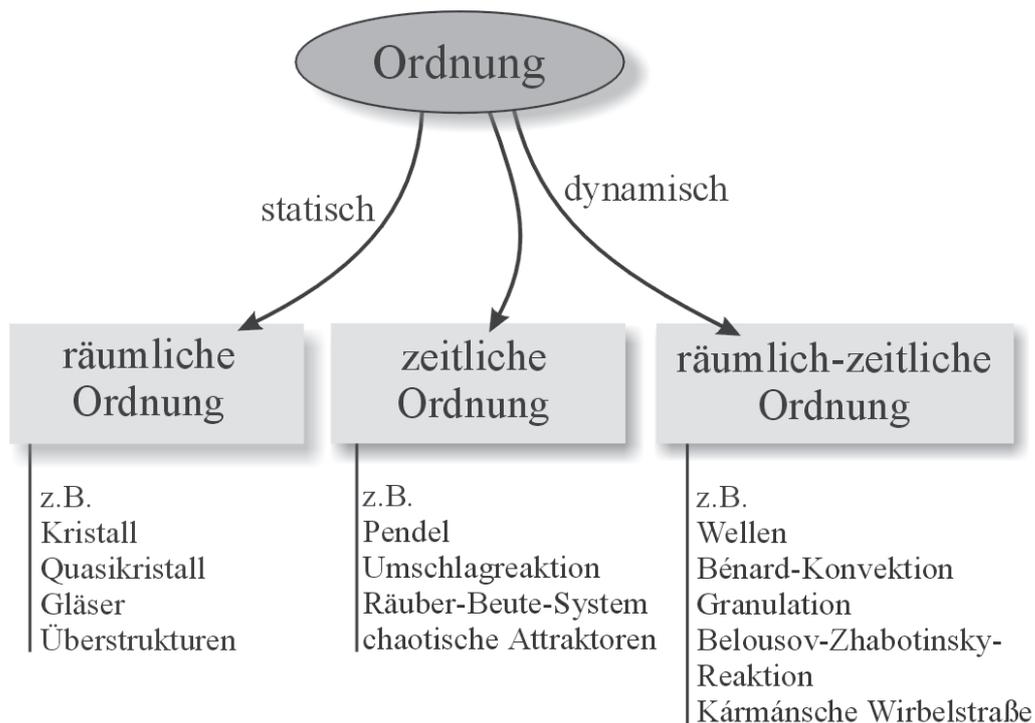


Abb. 8.6 Konzepte von Ordnung

#### Vorunterrichtliche Vorstellungen von den Begriffen „Ordnung“ und „Struktur“

Im empirischen Teil der hier vorgestellten Studie (vgl. Vogt, 2002) ist untersucht worden, welche Vorstellungen Schülerinnen und Schüler des 11. Gymnasialjahrgangs von den Begriffen Ordnung und Struktur haben und inwieweit ihre Denkkategorien in diesem Bereich mit den oben beschriebenen wissenschaftlichen Kategorien übereinstimmen (vgl. zum Thema Ordnung die Ergebnisse von SCHAEFER, 1984 und BELL, 2002). Außerdem ist untersucht worden, inwiefern Schülerinnen und Schüler nachvollziehen können, dass chaotische Attraktoren für eine bestimmte Sichtweise von Ordnung stehen. Mit Hilfe eines Fragebogens und zweier Interviews sind diese Fragen geklärt worden. Die Analyse der Daten des Fragebogens und der ersten Interviewsitzung hat auf die Alltagskategorien der Schülerinnen und Schüler zu den Themen Ordnung und Struktur geführt. Die Analyse der zweiten Sitzung hat gezeigt, wie mit Hilfe eines Simulationsprogramms Ordnungsstrukturen im Phasenraum chaotischer Systeme mit Schülerinnen und Schülern diskutiert worden sind.

**Fragebogen.** Das Ziel des Fragebogens hat darin bestanden, den Begriffsumfang von „Ordnung“ und „Struktur“ aus Sicht der Schülerinnen und Schüler möglichst breit zu erheben. Deswegen sind in den Fragebogen Erhebungselemente eingebunden gewesen, die Assoziationen abfragen, das semantische Umfeld erforschen und graphische Repräsentationen der Schülerinnen und Schüler zu Ordnung und Struktur untersuchen. Anhand verschiedener vorgegebener Bereiche des Lebens, der Natur, der Wissenschaft und speziell der Naturwissenschaften haben die Schülerinnen und Schüler ihre Vorstellungen von Ordnung und Struktur konkretisiert und typische Merkmale und Beispiele genannt (vgl. Tab. 8.1 und VOGT, 2002).

- semantisches Differential zu den Begriffen Ordnung und Struktur bearbeiten
- Wortverbindungen mit den Termini Ordnung und Struktur erstellen
- begriffliche Assoziationen zu beiden Begriffen nennen
- beschreiben, wie Ordnungen und Strukturen im Alltag, in der Natur, der Kunst, der Wissenschaft oder der Religion auftreten
- Beispiele von Ordnungen oder Strukturen in Physik, Biologie, Chemie, Geowissenschaften oder Medizin; Merkmale nennen
- selbst Ordnung und Struktur definieren; Unterschiede zwischen beiden Begriffen herausarbeiten
- graphische Repräsentation von Ordnung und Struktur entwickeln

Tab. 8.1 Inhalte des Fragebogens

Eng verbunden mit dem Fragebogen ist das erste Interview gewesen, mit dem Vorstellungen von Ordnung und Struktur ausdifferenziert worden sind. Dies ist u.a. dadurch geschehen, dass die Schülerinnen und Schüler selbst Kategorien von Ordnung entwickelt und nach typischen Merkmalen der Vertreter dieser Kategorien gesucht haben. Objekte in Form von Abbildungen sind dazu herangezogen worden. Sie stehen für die Kategorien der räumlichen, zeitlichen und räumlich-zeitlichen Ordnung (Details in VOGT, 2002). Abb. 8.7a-h zeigen eine Auswahl der als Stimuli zu verstehenden Abbildungen.



Abb. 8.7a Teilweise geordneter Büchertisch

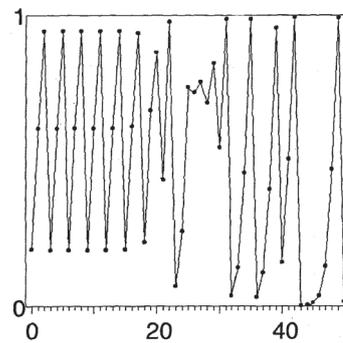


Abb. 8.7b Teilweise periodische Zeitreihe (aus PEITGEN et al., 1994)



Abb. 8.7c Kalifornische Eiche (aus PEITGEN et al., 1992)

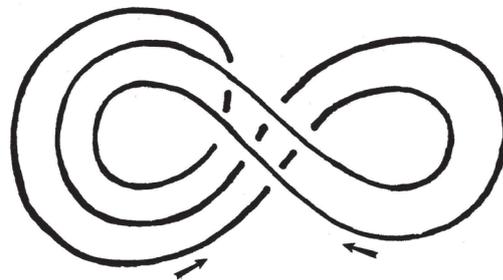


Abb. 8.7d Vereinfachte Darstellung eines periodischen Systemverhaltens (nach LORENZ, 1993)

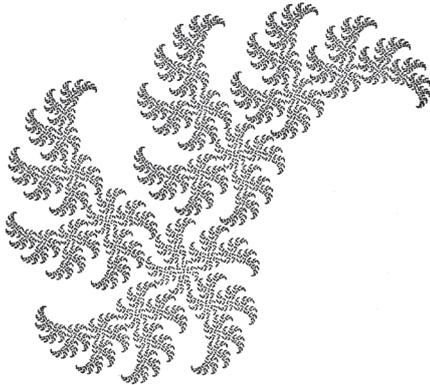


Abb. 8.7e Fraktal (aus Lorenz, 1993)

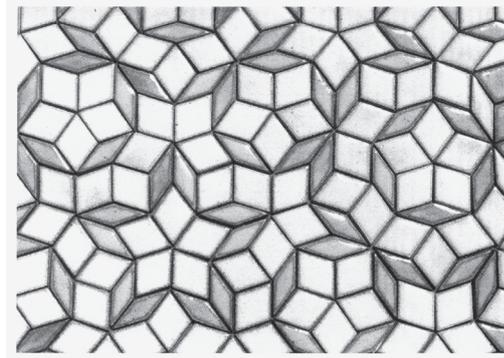


Abb. 8.7f Penrosemuster (Nelson, 1989)



Abb. 8.7g Strukturen im Watt

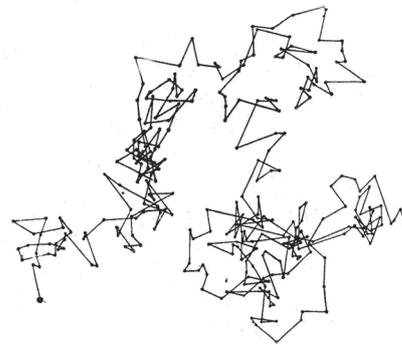


Abb 8.7h Brownsche Molekular-bewegung (nach MANDELBROT, 1991)

**Erstes Interview.** Mit 12 Schülerinnen und Schülern, die den Fragebogen bearbeitet haben, sind Einzelinterviews geführt worden, die in der Regel 40 min gedauert haben. Das Interview ist leitfadengestützt gewesen und hat die folgenden Fragen und Aufgaben umfasst:

- Du hast ein Symbol für Ordnung gezeichnet. Wieso repräsentiert das für dich Ordnung?
- Du hast eine Situation geschildert, in der dir Ordnung begegnet ist. Was war daran geordnet? Nenne charakteristische Eigenschaften von Ordnung. Hat diese Ordnung Auswirkungen auf spätere Ereignisse?

- Welche der vorgelegten Abbildungen steht für Ordnung? Was genau spricht in dieser Abbildung für Ordnung? Woran erkennst Du Ordnung, was ist charakteristisch für Ordnung?
- Erkläre deine Definition von Ordnung, die du im Fragebogen gegeben hast. Inwiefern möchtest du diese Definition jetzt ändern oder erweitern?
- Welche Unterschiede siehst du zwischen den Begriffen Ordnung und Struktur? Nenne Beispiele.
- Wie kann man zeitliche Ordnung beschreiben? Hat diese Pendelbewegung (vorgeführt) für dich etwas mit zeitlicher Ordnung zu tun? Inwiefern?

**Auswertung und Kategorienbildung.** Für die Auswertung haben 28 bearbeitete Fragebögen und die Transkripte der 12 Interviews vorgelegen. Diese Textbasis ist mit Methoden der qualitativen, kategoriengeleiteten Inhaltsanalyse (vgl. BORTZ & DÖRING, 2002; MAYRING, 2002) ausgewertet worden. Bei den Kategorien hat es sich um die Denk- bzw. Vorstellungskategorien der Schülerinnen und Schüler für Ordnung und Struktur gehandelt. Teilweise sind die Kategorien an die oben ausgeführten naturwissenschaftlichen Kategorien für Ordnung angelehnt gewesen, teilweise sind neue Kategorien auf Basis des Datenmaterials hinzu gekommen. Vorläufig aufgestellte Kategorien sind in einem spiralförmigen Prozess bei erneuter Durchsicht der Daten entweder stabilisiert oder verworfen worden.

Ein generelles Ergebnis der Analyse hat darin bestanden, dass meist nur rudimentäre Vorstellungen zum Begriff der Struktur vorgelegen haben. Struktur als Begriff und als Terminus ist von den Schülerinnen und Schülern nicht häufig verwendet worden, um Situationen oder Objekte im Alltag, der Natur oder im naturwissenschaftlichen Bereich zu beschreiben. Demzufolge ist nur eine Kategorie aufgestellt worden, die sich auf den Begriff Struktur bezieht, nämlich Struktur im Sinne von Oberflächengestalt oder Textur. Da der Terminus Struktur im naturwissenschaftlichen Jargon relativ häufig verwendet wird, sollte man sich bewusst machen, dass Schülerinnen und Schüler nur über stark begrenzte Vorstellungen von diesem Begriff verfügen. Im Gegensatz dazu sind die Vorstellungen vom Begriff der Ordnung relativ differenziert gewesen und haben teilweise mit den wissenschaftlichen Kategorien übereingestimmt.

### **K1: Soziale Hierarchiesysteme**

Unter Ordnung als soziales Hierarchiesystem ist ein System sozialer oder gesellschaftlicher Beziehungen zwischen Menschen oder Gruppen von Menschen zu verstehen, bei denen Menschen auf höheren Hierarchieebenen mehr Macht haben oder Menschen auf niedrigeren Stufen etwas befehlen können. Beispiele: Staat, Familie, Schule, Militär.

Folgende Zitate sind Beispiele für Äußerungen, die dieser Kategorie zugeordnet worden sind: „[...] zum Beispiel eine Rangordnung bei Wölfen, [...]“ (Schüler 8); „Ordnung, [...] mir fielen die alten Geschichtsbücher ein, in denen es immer diesen Pharaonen oben und unten das niedere Volk [gibt] irgendwie, da dacht ich, mach ich halt so eine Pyramide.“ (10). Als kennzeichnend für diese Form der Ordnung wird die Existenz eines „Oberhauptes“ (8, 10) gesehen und eine Gliederung „von oben nach unten“ (9).

### **K2: Juristische Gesetzesordnung**

Unter Ordnung als juristische Gesetzesordnung sind Verhaltensregeln zu verstehen, an die sich die Gesellschaft als Ganzes oder ein ausgewählter Teil von ihr halten muss. Beispiele: Straßenverkehrsordnung, Richtlinien, Gesetze.

Zitate aus dem Interview illustrieren diese Kategorie: „[...] wenn man nach Gesetzen lebt [...], dann folgt man einer gewissen Ordnung, [...] die praktisch eine Wunschvorstellung ist.“ (1); „Ich meine, das wäre eine Ordnung, wenn man zum Beispiel im Staat die Gesetze [meint], in der Natur natürlich Naturgesetze.“ (14); Gesetze oder „Richtlinien sind dazu da, befolgt und eingehalten zu werden“ (2).

### **K3: Mathematisch-naturwissenschaftliche Gesetze**

Unter Ordnung als mathematisch-naturwissenschaftliche Gesetze sind gesetzmäßige und damit vorhersagbare und berechenbare, also geordnete Prozesse in der Natur zu verstehen. Diese Ordnung wird durch Formeln, Axiome oder Gleichungen repräsentiert. Beispiele: Gleichungen, Gravitation, Keplersche Gesetze.

Zitate zur Illustration: „Alle physikalischen Gesetze bestimmen doch die Ordnungen der Physik oder eigentlich hat der Mensch doch diese Ordnung geschaffen [...], indem er diese Gesetze halt gefunden hat.“ (4); Eine Schülerin erklärt auf die Frage, wodurch die Ordnung bestimmt wird: „In der Physik ist es vielleicht [...] durch die Schwerkraft.“ (8)

### **K4: Gliederungssysteme**

Unter Ordnung als Gliederungssystem sind Hilfsmittel und Systeme zu verstehen, die es ermöglichen, Dinge in Haushalt und Büro zu sortieren und dadurch aufzuräumen sowie eine innere Struktur zu realisieren. Ziel hinter diesem Gliederungssystem ist in den meisten Fällen der schnelle Zugriff auf Elemente des Systems. Beispiele: Regal, Aktenordner, Ablagesysteme, Schublade.

Im Fragebogen und im Interview hat es viele Äußerungen gegeben, die dieser Kategorie zugeordnet worden sind; das Schaffen von Ordnung ist den Schülerinnen und Schülern als Alltagstätigkeit wohlbekannt gewesen. Die Vorteile der Übersichtlichkeit und des schnellen Zugriffs haben auf der Hand gelegen. Dass durch Ordnung auch gesellschaftliche Ideale berührt werden, hat ein Schüler auf folgende Weise angesprochen: „weil sich in unserer Gesellschaft inzwischen ein paar Ordnungskriterien festgesetzt haben, die hier in diesem Bild befolgt worden sind. Also dass der Stuhl [...] direkt an der Wand steht, die Wand ist gerade, also steht der Stuhl gerade und nicht irgendwie schräg im Raum. Sowieso alles an den Wänden konzentriert, damit alles möglichst gerade ist.“ (1); gemeinsame Merkmale von Objekten stellen das zentrale Kriterium des Ordners dar.

**K5: Geometrische Anordnung (statische Ordnung)**

Unter Ordnung als geometrischer Anordnung werden Objekte verstanden, die aus Elementen bestehen, deren Lage zueinander sich zeitlich nicht ändert und durch Längen, Winkel oder Flächen bestimmt ist. Insbesondere gehören dazu symmetrische Muster. Beispiele: Rechter Winkel, Symmetrie, Kristall, Architektur, Blattstrukturen.

Diese Kategorie deckt sich im wesentlichen mit der wissenschaftlichen Kategorie der räumlich statischen Ordnung. Allerdings hat man die Vorstellung der Translations- oder Rotationssymmetrie bei den Schülerinnen und Schülern nur in der Form wiederkehrender zweidimensionaler Muster gefunden, nicht im Sinne einer raumfüllenden Anordnung. Zwar sind Kristalle als Inbegriff von räumlicher Ordnung angeführt worden, dabei ist aber ausschließlich auf die Ordnung innerhalb der Elementarzelle eingegangen worden, nicht aber auf die Eigenschaften des Gitters. Statistische Formen von räumlicher Ordnung sind nicht genannt worden.

**K6: Ablaufpläne**

Unter Ordnung als Ablaufplan ist die Planung eines zeitlichen Ablaufs von Ereignissen oder Handlungen gemeint. In ihnen wird festgelegt, in welcher Reihenfolge unterschiedliche Dinge erledigt werden sollen. Beispiele: Tagesordnung, Medizineralltag.

„[Ordnung ist] ein Vorgang, ein System, das auf überlegter Planung beruht und durch vorher überdachte, mögliche Änderungen vor ‚Einbrüchen‘ geschützt wird.“ (23) Dieses Zitat hat für eine Reihe weiterer gestanden, bei denen Ordnung mit der Planbarkeit und konkreten Planung von Abläufen im Alltag zusammenhängt. Diese Kategorie ist als nicht unabhängig von der folgenden zu sehen:

**K7: Zeitliche Ordnung**

Ordnung als zeitliche Ordnung wird durch Ereignisse gleicher Art begründet, die in gleichen zeitlichen Abständen wiederkehren, also insbesondere periodische Prozesse. Zeitliche Ordnung erlaubt Aussagen über die zeitliche Reihenfolge von Ereignissen, über „Vorher“ und „Nachher“ und lässt Vorhersagen zu. Auch Kalendersysteme stehen für zeitliche Ordnung. Beispiele: Uhr, Pendel, Zyklus.

Die Kategorie der zeitlichen Ordnung ist nicht bei allen Schülerinnen und Schülern der Befragung zu finden gewesen. Den Begriff Ordnung auf zeitliche Prozesse zu beziehen, ist vielen von ihnen fremd gewesen. Anderen ist dies ganz selbstverständlich gelungen, u.a. indem sie zeitlich-periodische Prozesse mental auf räumlich-periodische Strukturen abgebildet haben und von „gleichmäßiger Auf- und Ab-Bewegung“ (1) oder von einer „Sinuskurve“ (3, 9) gesprochen haben.

Auch über die Konsequenzen zeitlicher Ordnung hat ein Schülerinnen und Schüler Auskunft gegeben: „[Man kann] beliebig nach vorne und hinten theoretisieren“ (1), „Da es wahrscheinlich immer so weiter gehen würde, [...] kann man eben Schlüsse ziehen.“ (4). Einige Schülerinnen und Schüler haben das Problem der Periodizität verbal zu fassen versucht.

Diese Kategorie ist in den Interviews nicht explizit thematisiert worden. Einige der Fragebo-

### **K8: Räumlich-zeitliche Ordnung**

Ordnung als räumlich-zeitliche Ordnung wird durch Phänomene begründet, die sowohl zeitliche Ordnung als auch räumliche Ordnung aufweisen. Diese Phänomene stammen aus den Bereichen einfacher und komplexer Strukturbildung. Beispiele: Wellen, Sonnensystem, Wolken.

genantwortet haben aber erkennen lassen, dass bei einigen Schülerinnen und Schülern Vorstellungen bzgl. Objekten oder Situationen zu finden sind, in denen Ordnung sowohl zeitlichen als auch räumlichen Charakter hat. Beispiele, die genannt worden sind, sind Wellenphänomene, die auch wissenschaftlich in die Kategorie der räumlich-zeitlichen Ordnung fallen, oder kosmische Strukturen wie das Weltall oder das Sonnensystem.

### **K9: Oberflächengestalt**

Unter Struktur als Oberflächeneigenschaft sind fühlbare Höhenunterschiede (Rauhigkeit) in der Beschaffenheit von Flächen und Materialien zu verstehen. Beispiele: Fell, Tapete, Baumrinde.

Typische Äußerungen von relativ wenigen Schülerinnen und Schülern sind gewesen: „[Bei Struktur,] da dacht ich eigentlich mehr an so Tierfell, mit den Haaren oder Zacken“ (4); „[...] Baumrinde hat Struktur.“ (8); „[...] eine Art Oberflächenstruktur [...]“ (15). Wichtiges Kriterium ist die Fühlbarkeit einer Struktur gewesen, dies ist auch bei der Auswertung des semantischen Differentials im Fragebogen zum Thema Struktur deutlich geworden, dort ist z.B. eine deutlich stärkere Zuweisung zum Adjektiv „erhaben“ als zu „flach“ erfolgt.

### **Lerninterview zum Ordnungsaspekt chaotischer Attraktoren**

Das zweite Interview ist als Lerninterview (vgl. Abschnitt 5.3) konzipiert gewesen. Es hat zunächst geklärt, inwieweit Schülerinnen und Schüler des 11. Jahrgangs das Konzept des Phasenraums verstehen können. Dieses Konzept ist im Unterricht der beteiligten Schülerinnen und Schüler nicht behandelt worden. Ferner ist untersucht worden, inwieweit Schülerinnen und Schüler nachvollziehen können, dass angesichts chaotischer Attraktoren im Phasenraum von Ordnung(ssstrukturen) gesprochen wird. Alle Schülerinnen und Schüler, die am zweiten Interview teilgenommen haben, hatten bereits am ersten teilgenommen. Die Lerninterviews mit einzelnen Schülerinnen und Schülern haben in der Regel 60 min gedauert. Das Interview ist in fünf Abschnitte untergliedert.

### Abschnitt 1

Besprochen worden ist zunächst ein reales Fadenpendel in Verbindung mit einer Graphik (Abb. 8.8), die diese Bewegung in verschiedenen Darstellungen präsentiert hat. Um die Schülerinnen und Schüler zur Phasenraumdarstellung zu führen, ist ihnen eine Autofahrt anhand eines Strecke-Zeit-Diagramms, eines Geschwindigkeit-Zeit-Diagramms und eines Geschwindigkeit-Strecke-Diagramms dargestellt worden. Parallel dazu ist die Pendelbewegung anhand eines Winkel-Zeit-Diagramms, eines Winkelgeschwindigkeit-Zeit-Diagramms und eines Winkelgeschwindigkeit-Winkel-Diagramms veranschaulicht worden.

Der Interviewleitfragen hat folgende Fragen beinhaltet:

- Das Pendel durchläuft folgende Punkte: maximale Auslenkung mit positivem Winkel, Gleichgewichtslage, maximale Auslenkung bei negativem Winkel. Zeige bitte, wo du diese Punkte in den Diagrammen wiederfindest.
- Kannst du erklären, wie diese Darstellung [Phasenraumdiagramm des Pendels] gemeint ist?
- Welche Vorteile hat eine solche Darstellung?

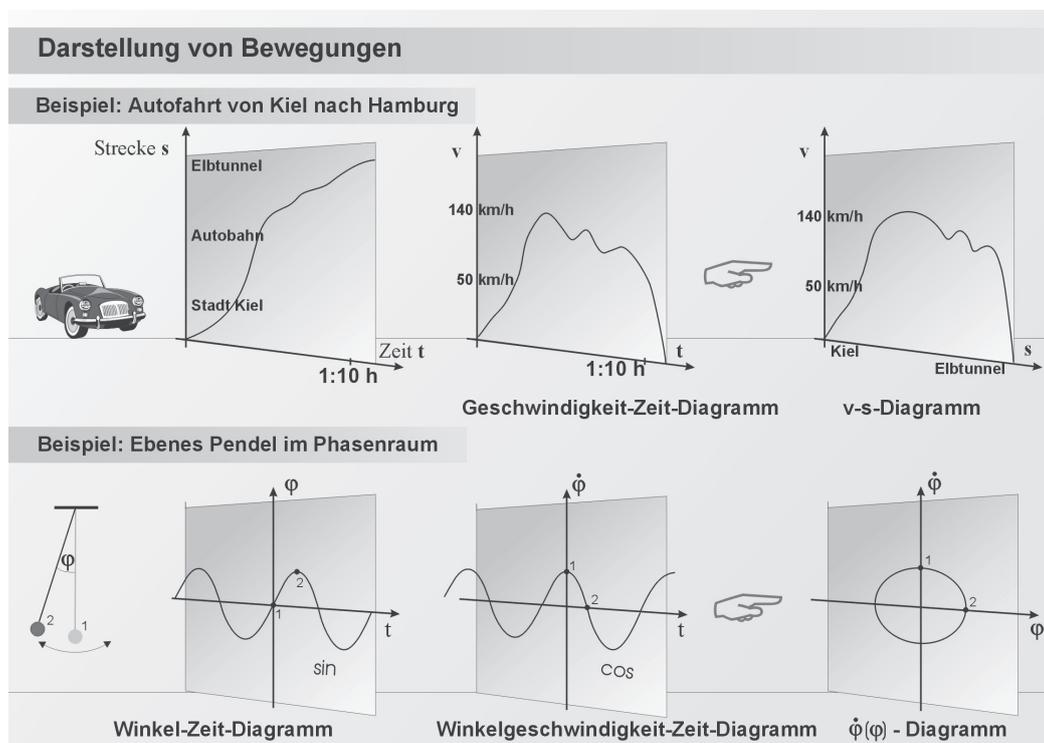


Abb. 8.8 Darstellung von Bewegungen in verschiedenen Diagrammen

### Abschnitt 2

In den Abschnitten 2 bis 5 ist ein weiteres Hilfsmittel zum Einsatz gekommen, ein Programm, mit dem das nichtlineare Verhalten einfacher aufgebauter mechanischer Schwinger simuliert werden kann (BOUNTHONY et al., 1993).



Abb. 8.9: Schematischer Versuchsaufbau des Schwingers

Der Kasten links stellt eine Masse  $m$  dar, die durch eine Feder mit dem Motor ganz rechts verbunden ist. Die nichtlineare Rückstellkraft ist von der Form  $F(x) = -c x - d x^3$ , wobei die Konstanten  $c$  und  $d$  vom Material und der Form der Feder abhängen. Die Dämpfung hat die Gestalt:  $F(x) = b \dot{x}$ . Sie hängt also linear von der Geschwindigkeit  $\dot{x}$  ab und die Konstante  $b$  ist der Dämpfungskoeffizient.

Die äußere anregende zeitabhängige Kraft ist  $F(x) = A \cos(\omega t)$ , wobei  $A$  die Amplitude der Anregung und  $\omega$  die Anregungsfrequenz sind. Nach Newton ergibt sich die Bewegungsgleichung  $m \ddot{x} + b \dot{x} + c x + d x^3 = A \cos(\omega t)$ . Dies ist die sogenannte Duffing-Differentialgleichung; sie ist nichtlinear und kann das beobachtbare chaotische Verhalten des Schwingers beschreiben.

Alle Parameter- und Anfangswerte sind frei wählbar, ebenso die Skalierung der Diagramme und die Dauer ( $t_{\max}$ ) der Simulation.

Die Schülerinnen und Schüler haben verschiedene zeitabhängige Darstellungen und Phasenraumdiagramme untersucht (Details bei VOGT, 2002). Für das Interview ist der Programmteil zur Simulation des getriebenen „Schwingers“ eingesetzt worden. Der Aufbau des Schwingers ist von den interviewten Schülerinnen und Schülern ohne Probleme nachvollzogen worden. Mit dem Programm kann man unter anderem folgende, für das Lerninterview wichtige Einstellungen betrachten:

- die Simulation der Bewegung des Schwingers im Ortraum
- die zeitabhängigen Darstellungen (Ort-Zeit-Diagramm und Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm) zusammen mit der Bewegung des Schwingers
- die Phasenraumdarstellung (Ort-Geschwindigkeit-Diagramm) zusammen mit der Bewegung des Schwingers
- die zeitabhängigen Darstellungen und die Phasenraumdarstellung zusammen mit der Bewegung des Schwingers

Um die Schülerinnen und Schüler mit der Simulation des Schwingers vertraut zu machen, ist eine erste Simulation (vgl. Abb. 8.10) betrachtet worden. Die Parametereinstellungen sind vom Interviewleiter (H. Vogt) vorgenommen worden. Sie haben nach einer kurzen Einschwingphase auf ein einfaches periodisches Verhalten geführt. Das Gewicht ist zwischen genau zwei Umkehrpunkten hin und her geschwungen. Zuerst ist nur die Simulation der Bewegung im Ortraum vorgeführt worden. Folgende Fragen und Aufgaben sind bearbeitet worden:

- Beschreibe den Bewegungsablauf. Inwiefern sind Regelmäßigkeiten zu erkennen?
- Kannst du eine Vorhersage treffen, wann sich der Schwinger an einem bestimmten Ort befindet?
- Wie würde das Ort-Zeit-Diagramm aussehen?

Anschließend sind die zeitabhängigen Darstellungen der Auslenkung aus der Ruhelage und der Geschwindigkeit jeweils in Abhängigkeit von der Zeit zusammen mit der Simulation der Schwingerbewegung betrachtet worden.

- Welche Regelmäßigkeiten erkennst du in diesen Diagrammen?
- Welche Vorhersagen über das zukünftige Verhalten des Schwingers sind möglich?

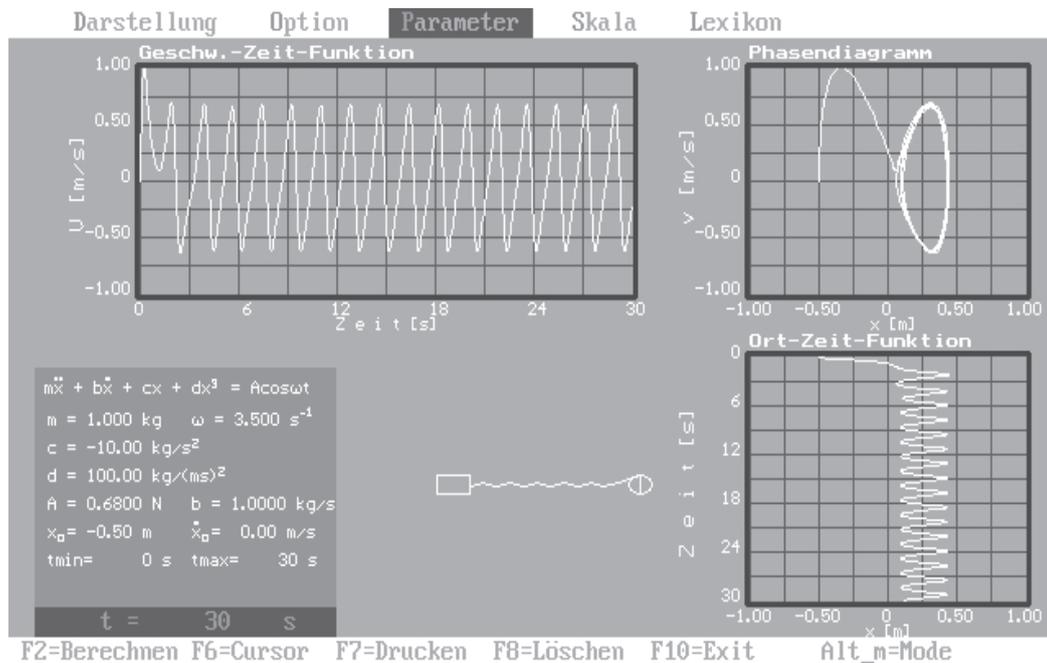


Abb. 8.10 Simulation einer periodischen Bewegung des Schwingers (Parameter im Kasten unten links aufgelistet)

Die Frage nach der Vorhersagbarkeit hat auf das Problem gelenkt, dass man in der chaotischen Phase aus den zeitabhängigen Darstellungen keine Vorhersagen mehr ableiten kann. Anschließend ist die Phasenraumdarstellung des sich periodisch bewegendem Schwingers diskutiert worden. Nachdem die vier Darstellungsformen eingeführt worden sind, sind ihre Vor- und Nachteile besprochen worden.

- Worin unterscheiden sich die Darstellungsformen?
- Welche Vorteile haben die einzelnen Darstellungsformen?
- Welches Diagramm ist für Vorhersagen am ehesten geeignet?
- Würdest du bei einem der Diagramme von Ordnung sprechen? Kannst du Kriterien für Ordnung entwickeln?

Die letzte Frage hat sich auf einen Kernpunkt dieses Untersuchungsteils bezogen, nämlich darauf, ob die Merkmale, die seitens der Physik für zeitliche Ordnung sprechen, auch von Schülerinnen und Schülern spontan als Ordnungsmerkmale gesehen werden. Im vorliegenden Abschnitt ist es dabei um den elliptischen Grenzzyklus gegangen. Die späteren Abschnitte haben sich mit komplexeren geometrischen Eigenschaften des chaotischen Attraktors befasst.

### Abschnitt 3

Hier ist eine periodische Simulation mit einer längeren Einschwingphase betrachtet worden (Abb. 8.11). Im Vergleich zur ersten Simulation ist nur die Anfangskoordinate  $x_0$  geändert worden. Die Simulationen haben sich dadurch unterschieden, dass bei der ersten Simulation der Grenzyklus in der rechten Hälfte des Phasenraums gelegen hat, während die Bewegung des Schwingers bei der zweiten Simulation im zweiten möglichen Grenzyklus in der linken Hälfte des Phasenraums geendet ist. Die obigen Fragen und Aufgaben sind auch in dieser Einstellung der Simulation bearbeitet worden. Zusätzlich ist untersucht worden, ob die Schülerinnen und Schüler die Phasenraumdarstellung vorhersagen können:

- Kannst du dir vorstellen, wie das Phasenraumdiagramm aussieht?

Diese Frage hat klären sollen, inwieweit Schülerinnen und Schüler einen ersten Zugang zum Phasenraumkonzept gefunden und inwieweit sie sich die Begrifflichkeit angeeignet haben. Das Programm hat die Möglichkeit geboten, zwei Simulationen vergleichend übereinander darzustellen, um zu untersuchen, ob es zwei stabile Endzustände für den Schwinger gibt.

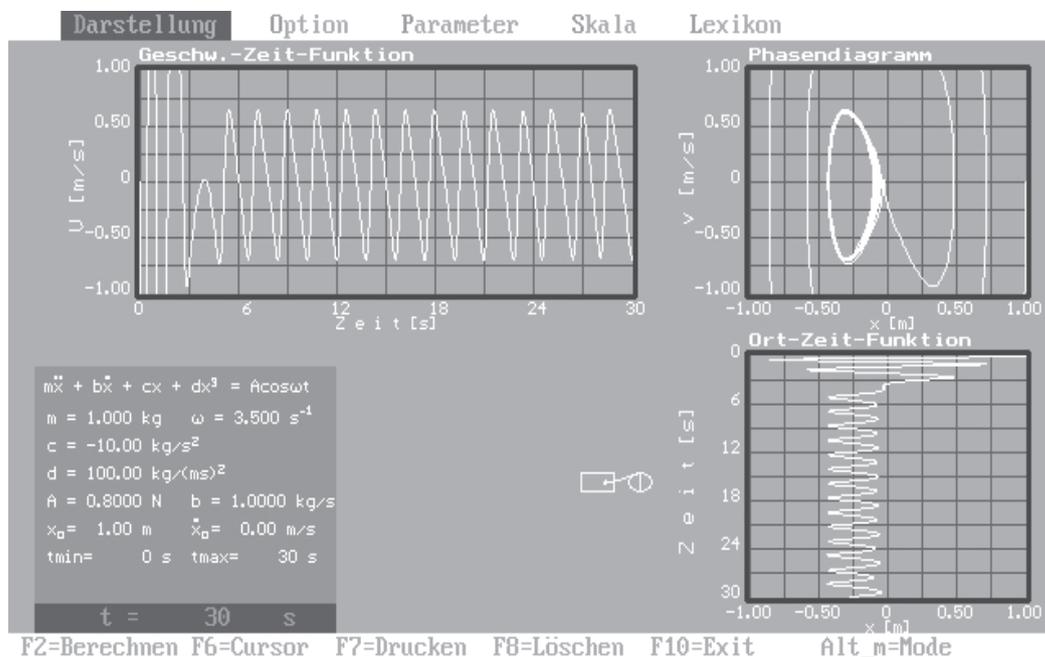


Abb. 8.11 Simulation mit veränderter Startauslenkung

### Abschnitt 4

Ziel der nächsten Einstellung ist es gewesen, die Schülerinnen und Schüler mit einer komplexeren periodischen Simulation zu konfrontieren (Abb. 8.12). Im vorliegenden Fall ist es bereits schwierig gewesen, aus den zeitabhängigen Darstellungen auf das Phasendiagramm zu schließen. Obige Fragen sind auch hier gestellt worden.

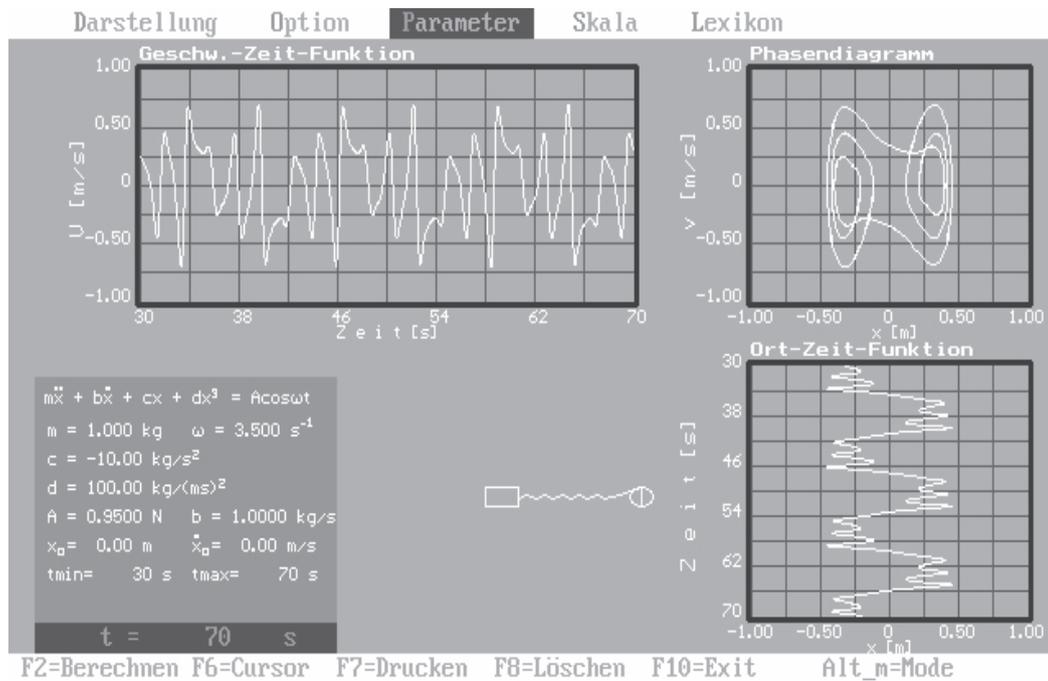


Abb. 8.12 Ausschnitt aus Simulation mit höherer Periodizität

### Abschnitt 5

Abschließend ist die chaotische Phase eingestellt worden. Die zeitabhängigen Diagramme haben nun keine erkennbaren Periodizitäten mehr (Abb. 8.13a) gezeigt. Um den chaotischen Attraktor im Phasenraum (Abb. 8.13b) deutlich erkennen zu können, ist die Dauer der Simulation  $t_{\max}$  der Bewegung auf 200 Sekunden erhöht worden. Bei dieser Simulation haben die zeitabhängigen Darstellungen keine regelmäßige Bewegung mehr gezeigt, sie sind chaotisch gewesen. Die Schülerinnen und Schüler haben hier erkennen sollen, dass Vorhersagen des Attraktors aus den zeitabhängigen Darstellungen nicht mehr möglich ist. Am Ende dieses Abschnitts ist der Begriff des Attraktors eingeführt und dadurch erläutert worden, dass der Startpunkt von  $x_0 = 0,5 \text{ m}$  auf  $x_0 = 1 \text{ m}$  verschoben wird (Abb. 8.14), ohne dass sich der Attraktor in Lage und Form geändert hat. Abschließend ist mit den Schülerinnen und Schülern diskutiert worden, inwiefern ein Attraktor für die Ordnungsaspekte eines Systems steht, dessen zeitabhängige Darstellungen auf völlig regelloses Verhalten schließen lassen.

- Inwiefern würdest du das Gebilde, das der Schwinger im Phasenraum erzeugt, mit dem Begriff der Ordnung beschreiben?
- Welche Merkmale des Attraktors stehen für Ordnung?
- Inwieweit kannst du nachvollziehen, dass in Anbetracht eines chaotischen Attraktors wissenschaftlich von Ordnung gesprochen wird?

8. Empirische Studien zu den Konzepten Ordnung und Zufall

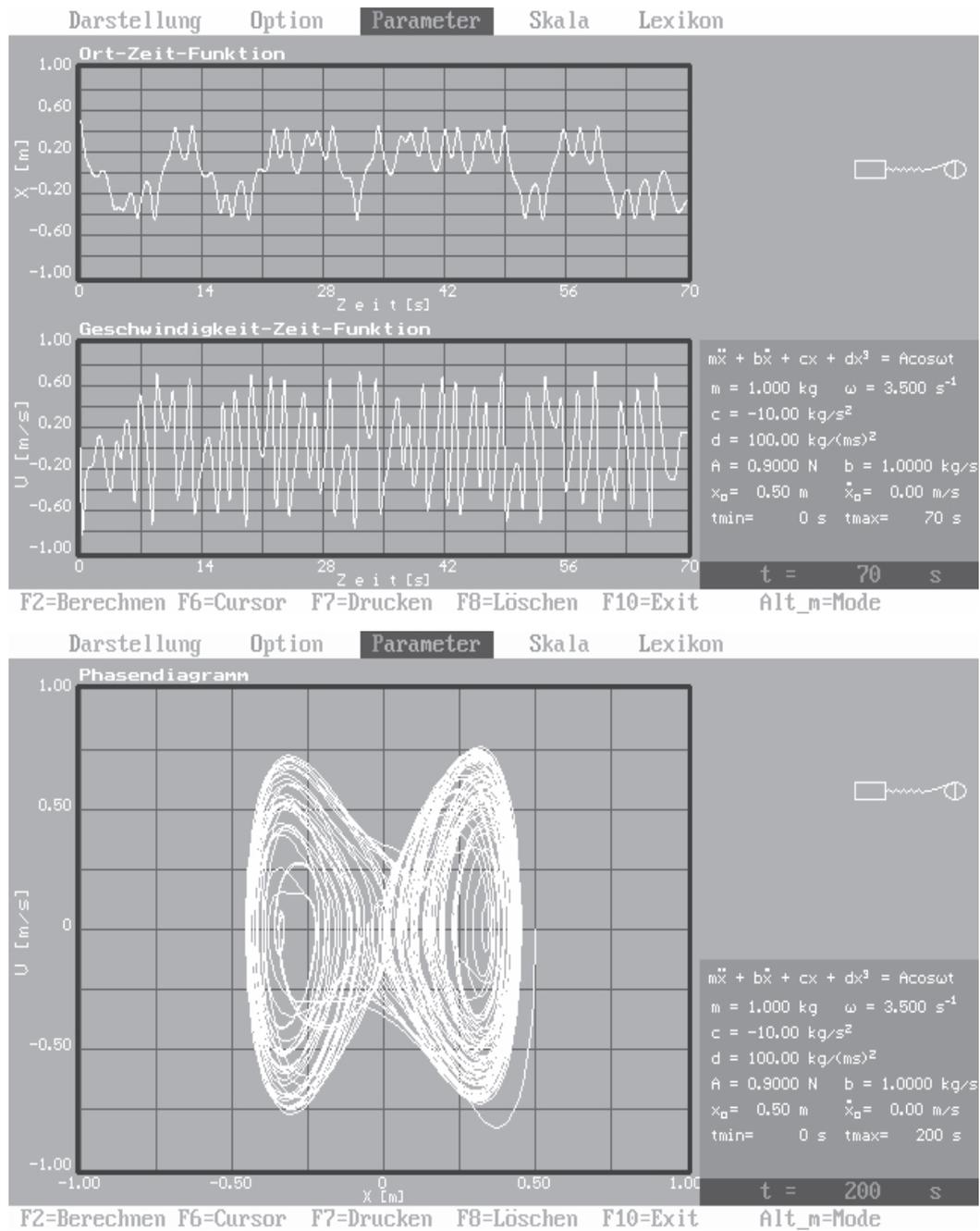


Abb. 8.13 a und 8.13b Chaotische Phase der Schwingung

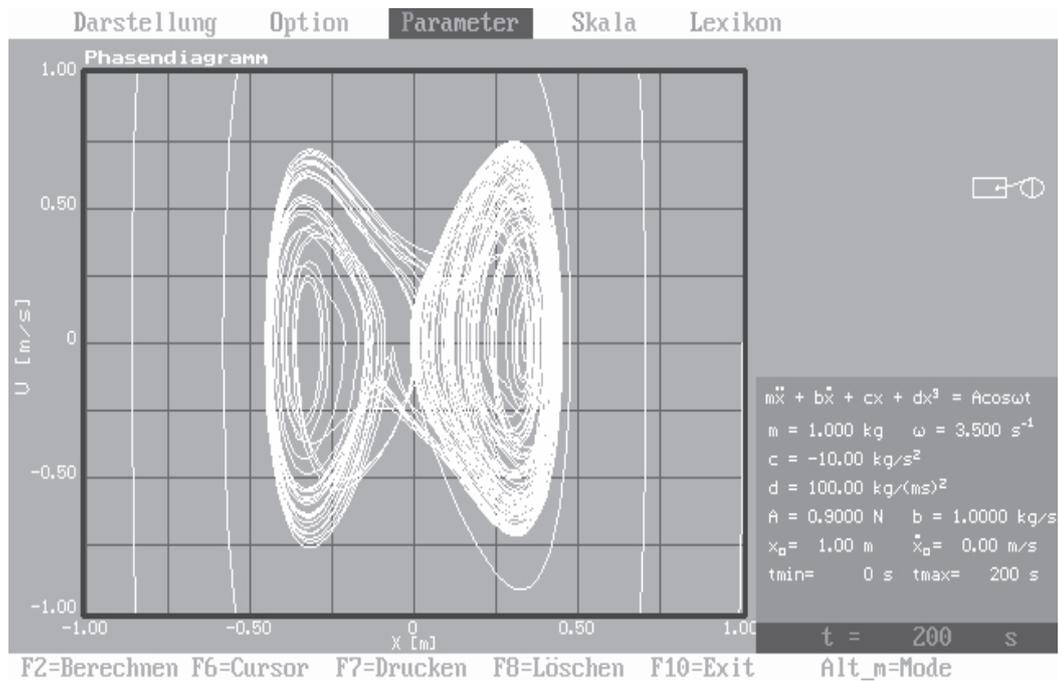


Abb. 8.14 Das Attraktorgebilde ist vom Startpunkt unabhängig

### Verstehensstufen

Bei der Auswertung der Transkriptdaten des zweiten Interviews ist der Schwerpunkt auf die Analyse von Stufen des Verstehens gelegt worden. Vier Stufen sind unterschieden worden. Lernen hat in diesem Zusammenhang bedeutet, von einer Stufe auf die nächst höhere zu wechseln.

#### S1: Fähigkeit zur Beschreibung von Phasenraumdiagrammen

Ein Schüler auf dieser Stufe kann die Phasenraumdarstellung einfacher periodischer Bewegungen zwischen zwei Umkehrpunkten (im Phasenraum ergibt sich oft ein elliptisches Gebilde) mit eigenen Worten beschreiben. Er kann die Achsen der Phasenraumdarstellung interpretieren und die Phasenbahn der realen Bewegung zuordnen. Er kann also z. B. einzelne Punkte der zeitabhängigen Darstellungen oder der Phasenbahn dem Zustand des simulierten Systems zuordnen.

Die Fähigkeit, Diagramme zu beschreiben, ist eine wichtige Basis, um die Ordnungsstrukturen der nichtlinearen Physik verstehen zu können. Die meisten Schülerinnen und Schüler dieser Studie haben keine Probleme gehabt, diese Stufe des Verstehens zu erreichen. Vereinzelt Schwierigkeiten sind überwunden worden, nachdem die betreffenden Schülerinnen und Schüler ausgezeichnete Punkte der Bahn des Fadenpendels in den unterschiedlichen Diagrammen lokalisiert hatten.

### **S2: Fähigkeit zur Vorhersage von Phasendiagrammen**

Ein Schüler auf dieser Stufe kann Vorhersagen darüber machen, wie die Phasenraumdarstellung eines Systems aussieht, nachdem er die simulierte Bewegung und ihre zeitabhängigen Darstellungen interpretiert hat. Er zeigt damit, dass er sich die Begrifflichkeit und das Konzept des Phasenraums angeeignet hat.

Eine Unterstufe wäre erreicht gewesen, wenn eine Schülerin bzw. ein Schüler überhaupt Vorhersagen machen kann, unabhängig davon, ob diese richtig oder falsch gewesen sind. Eine weitere Unterstufe des Verstehens wäre erreicht gewesen, wenn die Vorhersagen der Schülerin bzw. des Schülers zugetroffen hätten. Die folgende Vorhersage eines Schülers im Anschluss an die Diskussion der zeitabhängigen Darstellungen im Abschnitt 4 zeigt, dass er verstanden hat, dass es zwei stabile Endzustände gibt, zwischen denen der Schwinger wechselt: „Es kann vielleicht zwei Kreise haben, wo das dann hin- und herwechselt.“ Es werden aber auch Vorhersagen gemacht: „[...] Und diesmal müsste sie genau in der Mitte liegen, aber ich weiß noch nicht mal, ob es genau 'ne Ellipse ist, weil halt wegen dieser [...] Unregelmäßigkeiten.“ Erkennbar ist hier, dass eine intensive Auseinandersetzung des betreffenden Schülers mit dem Phasenraumkonzept stattgefunden hat. Alle hier teilnehmenden Schülerinnen und Schüler haben auch diese zweite Stufe des Verstehens erreicht.

### **S3: Vergleich und Bewertung verschiedener Darstellungsformen**

Ein Schüler auf dieser Stufe kann die verschiedenen Darstellungen des Systems, die Simulation der Bewegung des Schwingers, die zeitabhängigen Darstellungen und die Phasenraumdarstellung, miteinander vergleichen und daraufhin bewerten, welche Vor- und Nachteile diese einzelnen Darstellungen mit sich bringen.

Diese Stufe hatte eine Schülerin oder ein Schüler erreicht, wenn er die Vor- und Nachteile der verschiedenen Darstellungsformen abgewogen und bewertet hat. Einige Schülerinnen und Schüler haben bereits früh im Interview die drei Diagrammformen verglichen und die Vor- und Nachteile aufgezählt. Zur Unterstützung ist häufig die Frage gestellt worden, aus welchem der Diagramme der Schülerinnen und Schüler besser Vorhersagen über das weitere Verhalten des Schwingers machen kann. Darauf hat ein Schüler nach der Diskussion im Abschnitt 3 geantwortet:

*„Also dann könnte man das am allerbesten aus dem Phasendiagramm, weil man da ja [...] diesen Kreis, diesen Grenzyklus, sieht und man weiß ja, dass er ja aus dem Grenzyklus nicht mehr raus kommt, weil es ja ein Grenzyklus ist. Und bei den anderen beiden Diagrammen, da kann's ja noch weitergehen und wer weiß, vielleicht könnte bei diesen Ausschlägen auch noch mal ein größerer oder ein kleinerer Ausschlag sein. Das kann man ja so nicht sehen, das müsste man ja unendlich weitermachen.“ (2)*

Schülerinnen und Schüler, die diese dritte Stufe des Verstehens erreicht haben, äußern sich dahingehend, dass ihnen für die Beschreibung und die Vorhersage der einfachen periodischen Bewegungen aus den Abschnitten 2 und 3 die zeitabhängigen Darstellungen ausgereicht haben. Bei der komplexeren periodischen und bei der chaotischen Bewegung haben sie die Phasenraumdarstellung als hilfreich erachtet, um Strukturen zu erkennen, wie das folgende Zitat illustriert:

*„Also bei den ersten zwei nicht, weil man das vorhersehen kann. Ich würde sagen, beim dritten und beim vierten, weil man's da eben nicht vorhersehen kann. Also beim ersten und zweiten, da war 's ja einfach nur 'n Zick-Zack. Da wusste man, dass das 'n Kreis wird, aber der dritte und der vierte, da war die Periode zu groß, als dass man sich das hätte vorstellen können.“ (7)*

Die meisten der Schülerinnen und Schüler haben einen Vorteil darin gesehen, dass das Phasenraumgebiet des Attraktors beschränkt ist und man „alles auf einen Blick“ (2), d. h. die gesamte Dynamik des Prozesses sehen kann. Auch die Möglichkeit, bei den chaotischen Simulationen eingeschränkte Vorhersagen aufgrund des Phasendiagramms treffen zu können, ist als Vorteil dargestellt worden.

#### **S4: Verstehen von Ordnung im Phasenraum**

Ein Schüler erreicht diese Stufe, wenn er demonstrieren kann, inwieweit der Begriff Ordnung auf einen Attraktor im Phasenraum angewendet werden kann und dafür Kriterien aufstellt. Und wenn er nachvollziehen kann, nach welchen Kriterien angesichts eines Attraktors wissenschaftlich von Ordnung gesprochen wird.

Alle mitwirkenden Schülerinnen und Schüler haben den Sprachgebrauch, der vom Interviewleiter angeboten worden ist, übernommen. Sie haben die Begriffe Attraktor, Grenzzyklus, Phasenraumbahn, Einschwingvorgang verwendet. Aber nicht allen von ihnen ist es leicht gefallen nachzuvollziehen, inwiefern ein chaotischer Attraktor für Ordnung steht. Der Interviewer hat Kriterien für Ordnung angeboten, nämlich dass die Phasenbahn das beschränkte Phasenraumareal des Attraktors nicht verlässt, jedenfalls nachdem der Einschwingvorgang beendet worden ist. Als weiteres Kriterium ist angeboten worden, dass der Attraktor eine charakteristische Form hat, die über die Zeit stabil bleibt.

Mehr als die Hälfte der Schülerinnen und Schüler hat sich darauf eingelassen, diese Kriterien von Ordnung probeweise zu akzeptieren, auf die betrachteten Attraktoren anzuwenden und sich damit das wissenschaftliche Sprachspiel zu übernehmen.

*„Ja, ich kann schon nachvollziehen, dass man hier von Ordnung spricht, denn dadurch, dass halt diese Linie nicht [...] aus der Abbildung heraustritt, ist es ja 'ne Art von Ordnung, und sich halt nur in diesem Gebilde weiterentwickelt.“ (10)*

*„Ja, vielleicht, weil... es da so gewisse Ähnlichkeiten gibt oder weil es hat immer bestimmte Grenzen und da halt dieser Kreislauf halt immer der gleiche ist.“ (12)*

Als Merkmal, die aus Sicht der Schülerinnen und Schüler für Ordnung stehen, werden genannt:

*„...weil das [der Attraktor] so ganz schön gleichmäßig aussieht. Also wie diese beiden Kreise aneinander liegen, dass sie fast gleiche Form haben [...] und wie sie verbunden sind.“ (2)*

Weitere Kriterien, die von den Schülerinnen und Schülern für Ordnung im Phasenraum genannt worden sind, sind „übersichtlich“ und „ein gesetzmäßiger Verlauf“.

### **Zusammenfassung und Konsequenzen für den Unterricht**

Die Analyse des Fragebogens und des ersten Interviews hat ergeben, dass Schülerinnen und Schüler eine Vielzahl von Vorstellungen zu den Begriffen Ordnung und Struktur haben. Dabei haben sich Kategorien bilden lassen, die mit wissenschaftlichen Kategorien weitgehend übereinstimmen, so die Kategorie „geometrische Anordnung“. Es haben sich auch Vorstellungen gefunden, die für zeitliche Ordnung oder für räumlich-zeitliche Ordnung stehen. Diese Vorstellungen sind bei Schülerinnen und Schülern allerdings wenig differenziert gewesen; insgesamt ist deutlich geworden, dass Schülerinnen und Schüler von selbst vor allem statische Ordnungsvorstellungen heranziehen, um Systeme zu analysieren. Vorstellungen von zeitlicher Ordnung sind im zweiten Interview im Rahmen eines Teaching Experiment ausdifferenziert worden. Nachdem das Phasenraumkonzept eingeführt worden ist, hat ein Simulationsprogramm den chaotischen Attraktor eines einfachen mechanischen Schwingers dargestellt. Vorteile der Phasenraumdarstellung sind diskutiert worden und es ist mit den Schülerinnen und Schülern besprochen worden, aus welchen Gründen und anhand welcher Merkmale ein chaotischer Attraktor wissenschaftlich für Ordnung eines dynamisch instabilen Systems steht. Dabei hat sich gezeigt, dass die Schülerinnen und Schüler bei einem chaotischen Attraktor zwar nicht von sich aus von Ordnung sprechen würden, dass sie aber weitgehend nachvollziehen können, aufgrund welcher charakteristischer Merkmale von Ordnung gesprochen werden kann.

Zu anderen wissenschaftlichen Aspekten von Ordnung bei chaotischen Attraktoren wie Skaleninvarianz, Selbstähnlichkeit, Koexistenz von Einzugsgebieten und fraktaler Dimension müssen weitere empirische Untersuchungen klären, inwiefern Schülerinnen und Schüler auch diese Ordnungsaspekte nachvollziehen können.

Ein Vergleich mit den Ergebnissen von SCHAEFER (1984) zum Thema „Information und Ordnung“ ist nur eingeschränkt möglich, da er seine Untersuchung zum einen mit älteren Schülerinnen und Schülern und Studenten durchgeführt hat, zum anderen den Schwerpunkt auf den Bereich der Thermodynamik gelegt hat. Schaefer beschreibt, wie die Begriffe Ordnung und Information mit Alltagserfahrungen assoziiert sind. Die vorliegende Arbeit ist über Schaefers Untersuchung hinausgegangen, da aus den erhobenen vorunterrichtlichen Vorstellungen relativ stabile Kategorien gebildet worden sind, die zwar auf eine Kontextabhängigkeit und einen relativ geringen Differenzierungsgrad hinweisen, aber nicht von einer Verworrenheit zeugen. Die Untersuchung von BELL (2003) hat sich nicht in erster Linie mit den Vorstellungen zum Thema Ordnung befasst; die Daten über spontane Äußerungen der Schülerinnen und Schüler stützen aber im wesentlichen die hier entwickelten Kategorien. Es deutet vieles darauf hin, dass die Begriffe Ordnung und Struktur im naturwissenschaftlichen Unterricht stärker betont werden sollten, um nicht nur die Vermittlung von Ordnungsstrukturen in nichtlinearen Systemen vorzubereiten, sondern auch eine Grundlage für die Vermittlung von Strukturprinzipien in biologischen Systemen zu schaffen. Aus den vorliegenden Ergebnissen lassen sich die folgenden Leitlinien für Unterricht ableiten:

- **Erweiterung statischer Ordnungsvorstellungen**

Zum Thema Ordnung und Struktur im naturwissenschaftlichen Bereich entwickeln Schülerinnen und Schüler vielfältige Assoziationen, an denen im Unterricht angesetzt werden kann. Die Vorstellungen sind allerdings wenig differenziert. Vorstellungen von statischer Ordnung sind vorherrschend. Allerdings sind moderne Konzepte statischer Ordnung Schülerinnen und Schülern nicht bekannt. Dazu gehören die oben angeführten Ordnungen bei Quasikristallen, Kristallen mit Übergittern oder Gläsern mit den jeweiligen Bedeutungen für die Eigenschaften eines Materials. Schülerinnen und Schülern sollten diese Konzepte von Ordnung als eine Stufe auf dem Weg zur Ordnung nichtlinearer Systeme nahegebracht werden.

- **Dynamische Ordnungsvorstellungen entwickeln**

Um den Ordnungsbegriff der nichtlinearen Physik zu vermitteln, ist es notwendig, dass die Schülerinnen und Schüler ihre ansatzweise vorhandenen Vorstellungen von dynamischen Ordnungskonzepten entwickeln. Die Behandlung von Beispielsystemen, die zeitliche Ordnungsstrukturen aufweisen, können diese Vorstellungen entwickeln helfen. Unterrichtskonzepte, die naturwissenschaftlichen Fächer verbinden, sind hier angezeigt; Umschlagreaktionen, Räuber-Beute-Systeme und andere Beispiele stehen für die Verbindung mit Chemie und Biologie.

- **Einführung des Phasenraumkonzepts**

Phasenraumdarstellungen sind grundlegend, wenn es um das Verstehen struktureller Stabilität von deterministisch chaotischen Systemen geht. Aber auch in der Klassischen Physik stellt der Phasenraum ein Instrument dar, das komplexes Systemverhalten darstellbar macht. Charakteristische Langzeiteigenschaften von Systemen wie Periodizitäten werden erkennbar. Das Phasenraumkonzept sollte als eine zusätzliche Möglichkeit eingeführt werden, die Bewegung von Körpern oder die Entwicklung eines Systems zu betrachten. Es sollte in Beziehung zu zeitabhängigen Darstellungen erarbeitet werden, so dass Vor- und Nachteile einzelner Diagrammformen deutlich werden. (Beispiele für die Einführung sind z. B. das getriebene Pendel oder der Duffing-Oszillator.)

- **Ordnung und Struktur als Makrothema**

Ordnungskonzepte leisten einen wichtigen Beitrag zum naturwissenschaftlichen Verständnis. Unabhängig von einem Unterricht über nichtlineare Systeme und chaotische Attraktoren kann das Thema Ordnung und Struktur als Rahmenthema für einen fächerverbindenden naturwissenschaftlichen Unterricht genutzt werden. Symmetrien, Periodizitäten, die Komplementarität zwischen Element und Anordnung, komplexe räumlich-zeitliche Strukturbildungen in der Natur bieten die Möglichkeit, charakteristische Strukturen der Natur Schülerinnen und Schülern zu vermitteln.

## 8.2 Sachanalyse und Lernprozessstudie zum Thema *Zufall*

Zufall, Determinismus und die mit ihnen verbundenen Konzepte Kausalität, Gesetzmäßigkeit, Notwendigkeit und Vorhersagbarkeit prägen seit jeher unser naturwissenschaftliches Weltbild. Durch theoretische Überlegungen und empirische Befunde des interdisziplinären Forschungsprogramms zur nichtlinearen Dynamik haben die genannten Konzepte in den letzten Jahrzehnten begriffliche Erweiterungen erfahren. Die analytischen Studien im Kieler Projekt zeigen, dass sich die Physik bei der Erklärung von Strukturbildungen und eingeschränkter Vorhersagbarkeit auf das Zusammenspiel von Zufall und Gesetzmäßigkeiten stützt (vgl. z.B. MARTIENSSEN, 1989); empirische Studien haben immer wieder Hinweise geliefert, dass sich auch Schülerinnen und Schüler bei ihren Erklärungsversuchen von z. B. chaotischen Systemen auf das Zusammenwirken zufälliger und gesetzmäßiger Prozesse beziehen (BÜCKER, 1998; KOMOREK et al., 2001).

Auch in der Unterrichtsstudie in Grundkursen der Sekundarstufe II (Kapitel 7) ist das Thema Zufall im Zusammenhang mit Gesetzmäßigkeit und Strukturbildung behandelt worden. Schülerinnen und Schüler verwenden zwar den Begriff des Zufalls, es wird aber nicht immer deutlich, was sie darunter verstehen. Dies hat Anlass gegeben zu einer weiteren vertiefenden Studie (STAVROU, 2004) im Kieler Projekt, die den Zufallsbegriff zum einen analytisch auf Basis führender physikalischer und philosophischer Literatur klären. Zum anderen werden in dieser Studie Schülervorstellungen zum Zusammenhang von Zufall und Gesetzmäßigkeit und die Entwicklung dieser Vorstellungen untersucht.

In die Sachanalyse fließen empirische Ergebnisse, die aus anderen Arbeiten unseres Projekts und aus einer Pilotstudie zu Zufallsvorstellungen von Schülerinnen und Schülern stammen, und Überlegungen zu den Zielen des Physikunterrichts mit ein. Um zu klären, inwiefern Schülerinnen

und Schüler das Zusammenwirken von zufälligen und gesetzmäßigen physikalischen Prozessen erklären können und die physikalische Sichtweise zum Zusammenspiel von Zufall und Gesetzmäßigkeit nachvollziehen, wird eine Lernprozessstudie durchgeführt. Ergebnisse der Sachstrukturanalyse fließen in ihre Planung ein. Aufgrund der Ergebnisse der Lernprozessstudie werden wiederum Resultate der Sachstrukturanalyse modifiziert. In diesem Sinne ist eine didaktische Rekonstruktion als spiralförmiger Prozess zu verstehen (vgl. STAVROU, KOMOREK & DUIT, 2002, 2004).

### **Analyse der Sachstruktur: Zum Begriff Zufall**

Die hier gestellte Aufgabe besteht darin, das beschriebene „Zusammenspiel“ zwischen Zufall und Gesetzmäßigkeit didaktisch zu rekonstruieren. Der erste Schritt liegt nun darin, verschiedene Ebenen, auf denen dieses Zusammenspiel eine Bedeutung hat, auseinander zu halten.

- *Physikalische Ebene*

Auf dieser Ebene bedeutet „Zusammenspiel“ das Zusammenwirken von zufälligen und gesetzmäßigen Teilprozessen in Systemen, die in der nichtlinearen Physik in der Regel komplex sind. Diese können das System Erde sein, ein Organismus oder die mechanischen Beispiele, die im empirischen Teil der Studie eingesetzt werden. Bei der Analyse auf dieser Ebene geht es also um physikalische Wirkmechanismen.

- *Sprachlich-begriffliche Ebene*

Hier geht es um begriffliche Unterscheidungen und Überlappungen, also allgemein um sprachlich-begriffliche Beziehungen zwischen Zufall und Gesetzmäßigkeit.

- *Philosophisch-erkenntnistheoretische Ebene*

Wenn es um die konzeptuelle Differenzierung von Zufall, Determinismus, Kausalität, Vorhersagbarkeit etc. geht, wenn diese Konzepte also als allgemeine Denkkategorien oder erkenntnistheoretische Entitäten gemeint sind, dann ist die philosophisch-wissenschaftstheoretische Ebene angesprochen.

Natürlich gibt es Beziehungen zwischen diesen Ebenen. Lehrbücher wechseln meist zwischen der physikalischen und der erkenntnistheoretischen Ebene. Bei Schüleraussagen besteht oft die Schwierigkeit zu entscheiden, ob sie auf der physikalischen oder auf der sprachlich-begrifflichen Ebene zu interpretieren sind, wenn vorunterrichtliche Vorstellungen mittels Alltagssprache geäußert werden.

Bei näherer Betrachtung bisheriger empirischer Ergebnisse in diesem Feld (BÜCKER, 1998; KOMOREK et al., 2001; STAVROU et al., 2003) wird deutlich, dass Schülerinnen und Schüler aus physikalischer Sicht durchaus akzeptable Vorstellungen entwickeln, was den Aspekt der Gesetzmäßigkeit angeht, dass bei ihnen aber beim Begriff des Zufalls und in Bezug auf den Zusammenhang zwischen Zufall und Gesetzmäßigkeit begriffliche Unschärfen zu beobachten sind. Deswegen gehen die nachfolgenden Analysen zunächst vom Begriff des Zufalls aus, um dann das Wechselspiel von Zufall und Gesetzmäßigkeit aufzuarbeiten. Wie begegnet uns Zufall in der Physik? Welche Wirkungen werden Zufallsprozessen zugeschrieben? Wie haben sich physikalische Kategorien von Zufall gewandelt, insbesondere seit es nichtlineare Physik gibt? Mit diesen Fragen befasst sich die anschließende Analyse. Welche Erklärung haben Schülerinnen und Schüler für physikalische Zufallsprozesse? Welches begriffliche Umfeld gibt es, wenn Schülerinnen und Schüler von Zufall sprechen? Welchen Zusammenhang sehen Schülerinnen und Schüler zwischen Zufall und Gesetzmäßigkeit? Mit Fragen dieser Art befasst sich der empirische Teil dieses Abschnitts.

### Der Begriff Zufall im Alltag und in der Wissenschaft

Zufall ist ein Begriff, der sowohl im Alltag als auch in der Wissenschaft unberechenbare Situationen beschreibt und damit großes Interesse hervorruft. So hat die Initiative „Wissenschaft im Dialog“ des BMBF zum Jahr der Physik 2000 ein Themenheft zur Entdeckung des Zufalls (BMBF, 2000) herausgegeben und man hat einige Wochen in den oberen Rängen der Spiegel-Bestsellerliste ein Sachbuch mit dem Titel „Alles Zufall“ (KLEIN, 2004) gefunden, in dem Forschungsergebnisse zum Thema Zufall populärwissenschaftlich aufbereitet worden sind. Es ist allerdings schwierig, eine einheitliche Definition für Zufall zu geben oder auch nur zufriedenstellende Explikationen zu finden (vgl. STAVROU, 2004). Sowohl im Alltag als auch in den Wissenschaften weist der Begriff Zufall ein breites Spektrum von Bedeutungen auf. STAVROU (2004) führt aus, dass Zufall in den meisten Fällen als Synonym für Regellosigkeit, Unvorhersehbarkeit, Unberechenbarkeit, Gesetzlosigkeit, Ursachenlosigkeit, also Akausalität, Absichtslosigkeit, Zweckwidrigkeit, Erwartungswidrigkeit oder Unbestimmbarkeit verwendet wird. In der Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie (MITTELSTRASS, 1996, S. 855) wird Zufall wie folgt beschrieben: *In der Alltagssprache Bezeichnung für ein Ereignis, das nicht notwendig, oder ohne erkennbaren Grund oder unbeabsichtigt eintritt... In den Naturwissenschaften wird Zufall im Gegensatz zu kausal determinierten und voraussagbaren bzw. berechenbaren Ereignissen verstanden.* Damit wird deutlich, dass Zufall als ein „relativer“ Begriff betrachtet werden muss, so dass bei genauerer Analyse zufälliger Ereignisse anzugeben ist, in welcher Hinsicht ein Vorgang als zufällig charakterisiert wird.

Im Alltag wird zwischen zufälligen Ereignissen meistens ein Bezug zu menschlichen Verhaltensweisen wie z. B. Handlungen, Absichten, Erwartungen hergestellt. Das zufällige Ereignis wird oft als jenes Geschehen verstanden, bei dem jemandem etwas „zu-fällt“. Eine Bewertung des Zufälligen als positiv bzw. negativ wird ebenfalls unternommen, man assoziiert mit dem Begriff „Zufall“ z. B. „Glück“, „Pech“ oder „Schicksal“.

Bei der informationstheoretischen Annäherung an den Zufallsbegriff wird gewöhnlich die Struktur von Zahlenfolgen betrachtet. Aus aneinander gereihten Zahlen, z. B. einer Sequenz von Nullen und Einsen, versucht man auf ihre Zufälligkeit zu schließen. Eine Folge wird dann als zufällig bezeichnet, wenn der kleinste Algorithmus, der notwendig ist, um diese Folge zu erzeugen, dieselbe Informationsmenge (bits) umfasst wie die Folge selbst (CHAITIN, 1975). Die Zufälligkeit bezieht sich demnach auf die Nichtkomprimierbarkeit der in einer Zahlenfolge enthaltenen Information. Diese Charakterisierung von Zufall berücksichtigt aber nicht den Ursprung der Zahlenfolge, sondern bezieht sich lediglich auf das entstandene Zahlenmuster. Zufällige Ereignisse können bei einer großen Zahl von gleichartigen Fällen Regelmäßigkeiten aufweisen. Zufall wird dann Gegenstand der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Meistens wird dabei die Zufälligkeit der Einzelergebnisse als gegeben hingenommen, ohne sich über die Natur des Zufalls Gedanken zu machen, der zu den zufälligen Ereignissen geführt hat. Stochastik und Statistik treten dann in den Vordergrund (SCHLICK 1948, S.93).

Im Alltag wie in der Wissenschaft werden in manchen Fällen begriffliche Überdehnungen vorgenommen. Zufall dient dann als Erklärungsansatz für das Eintreten eines Ereignisses, das *auch anders hätte ausfallen oder ganz unterbleiben können* (WINDELBAND, 1870, S. 4); *„eintreten kann, aber nicht eintreten muss“* (SILL, 1983, S. 86); *„nicht mit Notwendigkeit aus einer Gesamtheit von Bedingungen folgt, weil es so, aber auch anders hätte verlaufen können.“* (BUHR & BUHR, 1975, S. 1331). Zufall kann aber auch als Synonym für das Eintreten eines unwahrscheinlichen Ereignisses verwendet werden. Wenn also ein unwahrscheinliches Ereignis eintritt, dann sei das Zufall, denn erwartet wird es nicht. Die achtjährige Eva liefert hierzu ein griffiges Beispiel: *„Zufall ist zum Beispiel, wenn man Schokolade auspackt zum Geburtstag und da ist ein Kind, das eine Sechs gewürfelt hat; und [...] dann kommt das Kind wieder dran und dann hat es wieder ,ne Sechs und jede Runde hat es ,ne Sechs, das ist ein riesiger Zufall.“* (aus KOMOREK, 1998).

### Ontischer und epistemischer Zufall

Hinsichtlich der Natur von zufälligen Ereignissen lassen sich grundsätzlich zwei Kategorien von Zufällen unterscheiden (vgl. STAVROU, 2004):

- *Ontischer Zufall*

Hierunter werden Prozesse subsumiert, die nicht weiter auf andere (determinierende) Prozesse zurückgeführt werden können. Damit werden diese Prozesse und somit Zufall als Entität, als Teil der Realität aufgefasst. Beispiele dafür sind Zufallsprozesse, wie sie die Kernphysik kennt. Der Alphazerfall eines radioaktiven Kerns ist als Elementarprozess zeitlich nicht vorherzusagen, sondern zufällig. Bei einer großen Anzahl radioaktiver Kerne ist es zufällig, welcher Kern als nächster einen Alphazerfallsprozess durchläuft. Es gibt keine „verborgenen Parameter“, die den Elementarprozess determinieren würden, wenn man der weitgehend akzeptierten Kopenhagener Deutung der Quantenphysik folgen will.

Äquivalent zum ontischen Zufall sind Begriffe wie *objektiver* oder *absoluter* Zufall. Im ersten Fall wird Zufall als eine Eigenschaftskategorie von Objekten verstanden, als Eigenschaft der Dinge „an sich“. Mit absolutem Zufall ist die Unabhängigkeit von anderen Geschehnissen gemeint, insbesondere bedeutet es das Fehlen von Ursachen. Kurz gefasst lässt sich sagen: Ist Zufall ein Aspekt der Realität und somit ontisch, dann ist er objektive Eigenschaft der Dinge an sich und es existieren keine kausalen Verbindungen zu anderen Geschehnissen, so dass er als absolut zu verstehen ist.

- *Epistemischer Zufall*

Der epistemische Zufall spiegelt unseren begrenzten Erkenntnisstand wider und ist damit Ausdruck menschlicher Unwissenheit. Ein Beispiel hierfür ist die Brownsche Bewegung eines Staubteilchens in einer Flüssigkeit. Seine Bewegung erscheint zufällig, weil wir die Wärmebewegung der Flüssigkeitspakete, die das Staubteilchen antreiben, nicht wahrnehmen können. Die Unvorhersagbarkeit der Bewegung des Staubteilchens liegt am Mangel grundsätzlich zugänglicher Informationen (MARTIENSSEN, 1989, S. 78). Äquivalent zum epistemischen Zufall sind Begriffe wie *subjektiver* Zufall oder *scheinbarer* Zufall. Betrifft Zufall unseren Erkenntnisstand, dann bezieht er sich auf das erkennende Subjekt und ist somit subjektiv. Es bestehen außerdem kausale Beziehungen zu anderen Prozessen, so dass im ontischen Sinne kein Zufall vorliegt und man von scheinbarem Zufall sprechen muss.

STAVROU (2004) argumentiert, dass es eng mit Überzeugungen zur Allgemeingültigkeit des Kausalprinzips zusammenhängt, inwiefern einem zufälligen Prozess ein ontischer oder ein epistemischer Status attribuiert wird. Nach dem Kausalprinzip hat jeder Prozess, jedes Ereignis eine Ursache. Da das menschliche Bestreben und auch das der Naturwissenschaft darin besteht, jedem Ereignis eine Ursache zuzuweisen und ihm damit „Sinn“ zu geben, sind Vorstellungen zum ontischen Charakter von Zufall in der Wissenschaftsgeschichte nie wirklich aufgeblüht. Erst mit Etablierung der Quantentheorie in der Physik des 20. Jahrhunderts haben sich Vorstellungen vom Zufall als Teil physikalischer Realität festigen können. Drei erkenntnistheoretische Grundpositionen zur Einordnung des Zufalls in das Konzept des Allgemeinen Kausalprinzips werden in der Literatur (vgl. z. B. HENNING & KUTSCHA, 1984) beschrieben.

- Die erste Position geht von der durchgängigen Gültigkeit des Kausalprinzips aus. Vertreter dieser Position können als *Kausalisten* bezeichnet werden; Zufälle treten für sie nur als scheinbare Zufälle auf.
- Die zweite Position schränkt den Geltungsbereich des Kausalprinzips ein und räumt Zufällen einen Platz im Weltgeschehen ein. Ein Wechselspiel von zufälligen und determinierten Prozessen ist unter dieser Perspektive möglich. Vertreter dieser Sicht darf man als *aufgeklärte Deterministen* bezeichnen. Sie sind Deterministen, weil sie an eine durchgängige Determiniertheit aller bzw. der meisten Prozesse der belebten und unbelebten Welt glauben. Zusätzlich lassen sie

Zufall als eigenständige Determinations-Kategorie (vgl. BUNGE, 1987) zu und sehen zufällige Prozesse neben deterministischen Prozessen als gleichberechtigt. Die Position der aufgeklärten Deterministen ist für die Analyse von Schülererklärungen nichtlinearer Systeme interessant (s.u.).

- Die dritte Position ist die der Positivisten. Diese stellen sich die Frage nach der Allgemeingültigkeit des Kausalprinzips nicht, weil seine Gültigkeit empirisch nicht prüfbar ist. Entsprechend kann auch eine Entscheidung zwischen ontischen und epistemischen Zufällen nicht aus Erfahrungen heraus getroffen werden; eine geeignete Beschreibung von zufälligen oder deterministischen Prozessen ist unter positivistischem Blickwinkel ausreichend.

In der Physik findet man je nach erkenntnistheoretischer Position verschiedene Überzeugungen bzgl. der Natur des Zufalls. Die auf dem Newtonschen Paradigma basierende klassische Physik geht von einem völlig determinierten Weltgeschehen aus. Im Prinzip können danach sogar die Bewegungen einzelner Atome berechnet werden, wenn nicht Wissensbeschränkungen bzgl. der Anfangsbedingungen von Rechnungen bestehen würden. Die Bestimmung der Anfangsbedingungen setzt exakte Messungen voraus, die im Prinzip möglich sind. Schwierig gestaltet es sich, Anfangsbedingungen zu bestimmen, wenn ein System wie z. B. ein Gas aus sehr vielen Teilen besteht. Insgesamt weist die klassische Physik dem Zufall einen epistemischen Charakter zu.

Die Quantentheorie geht in ihrer Kopenhagener Interpretation von einer prinzipiellen Indeterminiertheit der Quantenphänomene aus, verborgene Parameter führen zu Widersprüchen im Gesamtgefüge der Theorie, die sehr erfolgreich beim Erklären und Vorhersagen von Quantenphänomenen ist (HEISENBERG & BOHR, 1963). Zufall wird zu einem Teil der Realität, hat also einen ontischen Charakter. Wie bekannt, löste die Frage um die Unbestimmtheit physikalischer Größen und den Status des Zufalls Jahrzehnte anhaltende, fruchtbare Diskussionen innerhalb der Physik aus.

Wie ist nun zu entscheiden, ob ontischer oder epistemischer Zufall vorliegt? Diese Frage führt auf das äußerst komplexe Problem, wie man zufällige von deterministischen Prozessen unterscheiden kann. Dieses Thema kann hier nur gestreift werden (vgl. hierzu STAVROU, 2004). In der Literatur werden verschiedene Unterscheidungskriterien diskutiert. Ein hinreichend zuverlässiges Kriterium scheint es bislang nicht zu geben (KOCH, 1994; BUNGE, 1987). Interessant für die Analyse nichtlinearer Systeme sind das „komparative Kriterium“ und das „komplexitätstheoretische Kriterium“. Im ersten Fall werden zwei Systeme verglichen, die zu Beginn der Betrachtung im gleichen Zustand sind und die im Verlauf der Zeit gleichen Einflüssen unterliegen. Decken sich zu jedem Zeitpunkt die Zustände dieser Systeme, so wird von deterministischem Verhalten ausgegangen. Im zweiten Fall untersucht man mit mathematischen Methoden die scheinbar zufallsverteilten Messdaten komplexer Systeme. Finden sich z. B. periodische, selbstähnliche oder andere Strukturen in den Daten, so schließt man auf deterministische Prozesse in den betrachteten Systemen. Hier kommt der Aspekt der Ordnung in deterministisch chaotischen Systemen mit ins Spiel.

### **Ontischer oder epistemischer Zufall in der nichtlinearen Dynamik?**

Nichtlineare Systeme unterliegen deterministischen Gesetzmäßigkeiten, auch wenn sie irreguläres und offenbar zufälliges, chaotisches Verhaltens produzieren. Die nichtlineare Dynamik zeigt, wie komplexe Muster und Bewegungsformen auf deterministischen Gesetzmäßigkeiten beruhen können; gleichzeitig aber illustriert sie, wie kleine Variationen der Anfangsbedingungen, minimale Einflüsse aus der Umgebung des betrachteten Systems oder auch Fluktuationen, die das System selbst hervorbringt, seine Entwicklung ganz wesentlich mit steuern. Im allgemeinen werden die kleinen Störungen, Ungenauigkeiten oder Fluktuationen als zufällig angesehen. Da nichtlineare, komplexe Systeme häufig zeitliche oder räumliche Bereiche relativer Instabilität durchlaufen, können kleine Störungen von außerhalb oder Fluktuationen weder vernachlässigt, noch mit einfacher Fehlerabschätzung behandelt werden. Denn Rückkopplungen und exponentielle Verstärkun-

gen im System, die sich mathematisch in Nichtlinearitäten niederschlagen, führen dazu, dass kleine Einflüsse nach kurzer Zeit makroskopische Bedeutung erlangen können (vgl. dazu Kapitel 5).

Prozesse der Selbstorganisation sind meist mit räumlichen oder räumlich-zeitlichen Strukturbildungen verbunden (s.o.). Ein subtiles Wechselspiel zwischen zufälligen und determinierten Teilprozessen, zwischen „Zufall und Notwendigkeit“ (vgl. MONOD, 1971) lässt Strukturen entstehen, wenn das selbstorganisierende System an Verzweigungen gelangt und Instabilitätsschwellen überschreitet. Jede Beschreibung eines Systems, das Verzweigungen aufweist, enthält sowohl deterministische als auch stochastische Elemente (PRIGOGINE, 1985). In der Nähe einer Verzweigung gewinnen zufällige Prozesse eine bedeutende Rolle, wie PRIGOGINE und STENGERS (1993, S. 170) treffend beschreiben: *„[...] Der deterministische Charakter der kinetischen Gleichungen, mit deren Hilfe die Menge der möglichen Zustände und deren jeweilige Stabilität berechnet werden können, und die zufälligen Schwankungen, die zwischen den Zuständen in der Nähe von Verzweigungspunkten ‚wählen‘, sind unauflöslich miteinander verbunden. Was die Geschichte des Systems bestimmt, ist diese Mischung aus Notwendigkeit und Zufall“*.

In der nichtlinearen Dynamik tritt an die Stelle des strikten Determinismus der klassischen Physik die Komplementarität von Zufall und Naturgesetz und damit ein subtiles Wechselspiel zwischen Zufall und Gesetzmäßigkeiten. Ist nun aber der Zufall, mit dem sich die nichtlineare Dynamik befasst, ontischer oder epistemischer Natur? Diese Frage lässt sich nicht eindeutig beantworten, in der Literatur findet man kaum Anmerkungen dazu. Den physikalischen Theorien liegt meist eine positivistische erkenntnistheoretische Position zugrunde. Hier zählt, dass es Zufallsprozesse gibt, die makroskopische Bedeutung erlangen können, dass das exponentielle Anwachsen von Störungen quantitativ gefasst werden kann und dass mit Hilfe von komplexitätsanalytischen Verfahren globale Ordnungsstrukturen in Systemen gefunden werden, die lokal unberechenbar bleiben. Und so findet man in den Theorien zum deterministischen Chaos und zur Selbstorganisation zwar Überlegungen zu den Auswirkungen zufälliger Elementarprozesse, aber nur wenige Annahmen zur Natur des Zufalls.

STAVROU (2004) stellt fest, dass es sich z. B. bei der Theorie des deterministischen Chaos aus Sicht von Kausalisten um eine klassische Theorie mit Trajektorien von Teilchen im Orts- und im Phasenraum handelt. Um exakte Vorhersagen über ein chaotisches System zu einem weit entfernten Zeitpunkt zu machen, benötigt man Angaben über den Ist-Zustand mit ungeheurer Genauigkeit. Diese Forderung stört den Kausalisten, den man auch als strikten Deterministen bezeichnen kann, nicht, denn er zieht sich auf die Position zurück, dass das System einen Ist-Zustand hat! Dieser ist prinzipiell bestimmbar, wenn auch nicht heute und von uns. Konsequenterweise haben für ihn auch Zufallsprozesse einen prinzipiell bestimmbaren Ist-Zustand. Damit ist der Zufall in deterministisch-chaotischen Systemen ein epistemischer und mithin ein scheinbarer.

Wie sehen aufgeklärte Deterministen die Angelegenheit? Anders als Kausalisten glauben sie an ontische Zufallsprozesse, die mit deterministischen Prozessen vereinbar sind. Sie kennen aber auch epistemische Zufälle. Ist nun der Zufall in deterministisch-chaotischen Systemen für sie ontisch oder epistemisch? Man kann hier die Auffassung vertreten (vgl. STAVROU, KOMOREK & DUIT, 2004), dass dieser Zufall als ontisch angesehen werden kann. Auch wenn es zahlreiche Überlegungen dazu gibt, wie exakt Zustände in einem chaotischen System bestimmt werden müssen, um genaue Vorhersagen machen zu können, auch wenn über die Begrenztheit von Messtechnik diskutiert wird, der Kern des Problems liegt darin, dass ein deterministisch-chaotisches System seinen Zufall selbst produziert. Kleine Störungen können von außen kommen oder wie bei den Fluktuationen sogar dem System selbst entstammen. Beide Einflüsse können zufälligen Charakter haben, aber dass daraus ein Zufallsverhalten des gesamten betrachteten Systems wird, dafür ist das System aufgrund seiner Rückkopplungen und Verstärkungsmechanismen selbst verantwortlich. Zufall ist hier eine Eigenschaft des deterministisch-chaotischen Systems („des Dings an sich“). Nach der obigen Explikation liegt hier also ontischer Zufall vor.

Diese Fragen sind nicht abschließend diskutiert, die obigen Überlegungen sollen zur Diskussion gestellt werden. Für die Analyse von Schülervorstellungen und Lernprozessen ist aber ein brauchbares Raster entstanden.

### Eine Lernprozessstudie

Im empirischen Teil der hier beschriebenen Studie befasst sich STAVROU (2004) mit der Frage, ob Schülerinnen und Schüler ein wissenschaftliches Verständnis vom Zusammenspiel zwischen Zufall und Gesetzmäßigkeit bei nichtlinearen Systemen entwickeln können und dabei die bedeutende Rolle zufälliger Prozesse verstehen. Diese Frage spricht einerseits die physikalische Ebene an, sofern es um das Verstehen des Zusammenwirkens von zufälligen und deterministischen Prozessen geht; andererseits die konzeptuelle Ebene, denn es geht darum zu klären, inwieweit Schülerinnen und Schüler Determinismus und Zufall als Denkkategorien für vereinbar halten. Die Lernprozesse auf dem Weg zur naturwissenschaftlichen Sicht sind untersucht worden. Eine Pilotstudie mit Fragebögen und Kurzinterviews (STAVROU, 2004; STAVROU, KOMOREK & DUIT, 2003) hat dabei geholfen, ein erstes Bild von den Schülervorstellungen von Zufall und Gesetzmäßigkeiten zu zeichnen. Sie zeigt zweierlei: Schülerinnen und Schüler entwickeln eher undifferenzierte Zufallsvorstellungen, die je nach Kontext mit unterschiedlichen Ausprägungen zum Ausdruck kommen. Trotz ihrer geringen Differenziertheit und ihrer Inkonsistenz nutzen Schülerinnen und Schüler diese Vorstellungen, um Beispielphänomene aus dem Bereich der nichtlinearen Dynamik zu deuten und deren Verhalten zu erklären.

### Das Untersuchungsdesign

Die empirische Untersuchung ist als qualitative Lernprozessstudie angelegt gewesen. Verschiedene Ausprägungen des Zusammenspiels von Zufall und Gesetzmäßigkeiten sind anhand einer Reihe unterschiedlicher Experimentalaufbauten präsentiert und mit den Schülerinnen und Schülern diskutiert worden. Dabei sind folgende Objekte bzw. Prozesse zum Einsatz gekommen:

- Das chaotische Magnetpendel, das aus anderen Studien des Kieler Projekts gut bekannt ist und damit als „Anker-Experiment“ dient (vgl. Kapitel 5).
- Ein Aufbau, mit dem man heißes Öl zur Konvektion bringen kann, bis sich sogenannte Bénard-Zellen ausbilden, steht exemplarisch für selbstorganisierende Systeme, in denen Fluktuationen die Strukturausbildung mit steuern (Abb. 8.15).
- Ein Aufbau, mit dem sich eine fraktale dendritische Zinkabscheidung erzeugen lässt. Der fraktal wachsende Zinkdendrit ist ein Beispiel für Phänomene, bei denen zufällige und deterministische Teilprozesse gemeinsam eine Strukturbildung bestimmen (Abb. 8.16) (vgl. WITTEN & SANDER, 1981).

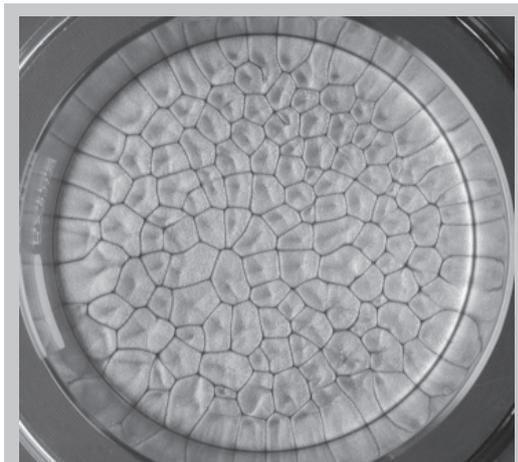


Abb. 8.15 Bénard-Konvektionszellen

Wird eine dünne Ölschicht erhitzt, so reicht Wärmeleitung zum Abtransport der Wärme nach oben nicht mehr aus. Heiße Pakete aus Öl steigen auf, abgekühlte sinken ab. Insgesamt stellt sich eine Struktur aus Konvektionszellen ein. Für Teilchen, die an den Rändern der Zellen aufsteigen, entscheiden Fluktuationen darüber, in welche Zelle sie wandern. Auch die Entstehung erster Zellen beim Anstieg der Temperatur ist durch Fluktuationen bestimmt.

Die Interviewsequenz ist mit der Diskussion über ein ebenes (lineares) Fadenpendel gestartet worden. Schrittweise sind dann das Magnetpendel, die Bénard-Konvektion und der Zinkdendrit hinzu gekommen.

### Untersuchungsmethode, Population und Durchführung

Die explorative Anlage der Studie hat an die Untersuchungsmethode einerseits die Forderung gestellt, den individuellen Lernwegen der Schülerinnen und Schüler Rechnung zu tragen. Andererseits hat sie dem Versuchsleiter Gelegenheit zur Intervention und zur Instruktion bieten sollen. Aus den im Abschnitt 6.2. beschriebenen Gründen hat sich wiederum die Methode des Teaching Experiment angeboten (STEFFE, 1983). Ein teilstrukturierter Interviewleitfaden hat in der hier dargestellten Lernprozessstudie dafür gesorgt, dass die zentralen Phasen des Teaching Experiment durchlaufen wurden (vgl. KOMOREK & DUIT, 2004).

Das Teaching Experiment ist mit Gruppen von zwei bis drei Schülerinnen und Schülern durchgeführt worden. Diese Gruppengröße hat bereits Interaktionen zwischen Schülerinnen und Schülern erlaubt, die ablaufenden Prozesse aber noch steuerbar gehalten. 30 Schülerinnen und Schüler des 11. Schuljahrs aus zwei Kieler Gymnasien haben an den Interviews teilgenommen. Sie sind in 12 Gruppen unterteilt worden (6 Zweier- und 6 Dreiergruppen). Alle haben einen Fragebogen vor dem ersten Interview bearbeitet, 23 von ihnen haben den Abschlussfragebogen zurückgeschickt. Vor den Interviews haben die Schülerinnen und Schüler ein Informationsblatt (s. Anhang) zu zentralen, für die Experimente relevanten Begriffen und Phänomenen bekommen. Stabile, labile und indifferente Gleichgewichtslagen, das Phänomen der Konvektion, Prozesse bei der Elektrolyse und die Brownsche Bewegung sind darin kurz erläutert worden. Die Interviews haben im Durchschnitt vier Unterrichtsstunden umfasst, die auf zwei Doppelstunden an zwei Tagen aufgeteilt worden sind. Zwischen den beiden Sitzungen haben ein bis vier Tage gelegen. Die Interviews sind von D. Stavrou geführt worden. Sämtliche Aktivitäten der Schülerinnen und Schüler sind mit einer stationär eingerichtete Videokamera aufgezeichnet worden.

### Fragebögen und Interviews

Der Eingangsfragebogen hat der Erhebung vorunterrichtlicher Vorstellungen gedient. Gefragt worden ist nach einer Definition des Begriffs Zufall, nach der Möglichkeit einer Erklärung für zufällige Ereignisse und nach bereichsspezifischen Unterscheidungen von Zufall im Alltag bzw. in den Naturwissenschaften. Außerdem ist nach Merkmalen gesetzmäßiger Prozesse und nach dem Zusammenwirken zufälliger und gesetzmäßiger Vorgänge in der Natur gefragt worden.

Die Interviews haben sich an den vier Phasen des Teaching Experiment orientiert (vgl. KOMOREK & DUIT, 2004). Zu Beginn des ersten Interviews haben die Schülerinnen und Schüler

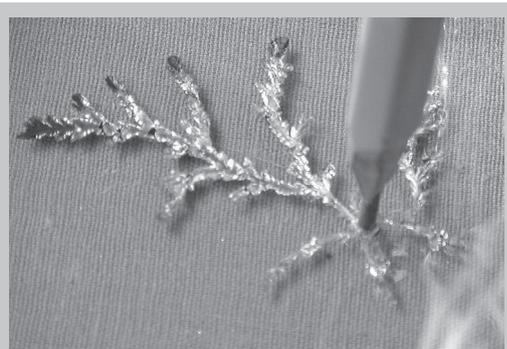


Abb. 8.16 Fraktales Wachsen eines Zinkdendrits

Zinkionen führen in einer Zinksulfatlösung zufällige, Brownsche Bewegungen aus. Sie lagern sich elektrolytisch an einer Kathode ab, hier eine Bleistiftmine. Erste, zufällig entstehende Zinkerhebungen an der Kathode werden bevorzugt für weitere Anlagerungen genutzt. Es entstehen Äste mit zufälligen Verdickungen, an denen sich weitere Äste bilden. Insgesamt entsteht eine dendritische Struktur, die fraktale und selbstähnliche geometrische Eigenschaften aufweist.

bestimmte Antworten aus ihren Fragebögen erläutern sollen. Die Phase des Prognostizierens ist dann jeweils bei der ersten Konfrontation mit einem Experimentalaufbau durchlaufen worden. In der zweiten Phase der Erklärung des Verhaltens einzelner Systeme sind die Experimente meist mehrfach durchgeführt worden. Die dritte Phase der Bildung von Analogiebeziehungen zwischen verschiedenen Experimenten hat selbstredend erst nach der Besprechung weiterer Experimente eingefügt werden können. In die vierte Phase der Generalisierung und Reflexion sind gelegentlich Elemente der vorangegangenen Phasen integriert worden, wenn die Schülerinnen und Schüler eigene Hypothesen untersuchen wollten bzw. sollten (vgl. Tab. 8.2). Im Abschlussfragebogen haben die Schülerinnen und Schüler die angebotenen und diskutierten Erklärungsmöglichkeiten, die auf eine Koexistenz von Zufall und Gesetzmäßigkeiten basieren, zu reproduzieren und anhand von Beispielen darzustellen gehabt. Außerdem sind sie über ihre veränderte oder erweiterte Vorstellungen bzgl. Zufall und Gesetzmäßigkeiten in der Physik befragt worden.

- Schüler beschreiben den Aufbau eines Experiments.
- Schüler äußern Erwartungen über die Entwicklung und den Ausgang des Experiments bzw. machen Vorhersagen über Verhalten bzw. entstehende Muster und Strukturen.
- Erste Durchführung eines Experiments durch Schüler oder Interviewleiter.
- Identifizieren von gesetzmäßigen und zufälligen Einflüssen und Teilprozessen durch die Schülergruppe. Erste schülerseitige Erklärungen des Zusammenwirkens der Teilprozesse.
- (Mehrmalige) Wiederholung des Experiments; Verfeinerung der Erklärungen des Verhaltens eines Systems.
- Herstellen einer Beziehung zwischen den Wirkmechanismen im System und Konsequenzen wie Einschränkung der Vorhersagbarkeit oder Strukturbildung.
- Generalisierung: Analogiebildungsprozesse zwischen zwei oder drei Experimenten.
- Weitere Generalisierung: Entwicklung einer Vorstellung von nichtlinearen Systemen; Konsequenzen für die eigenen Vorstellungen von Zufall, Gesetzmäßigkeit und ihrer Vereinbarkeit; Reflexion der eigenen Sicht von Physik;
- Konsequenzen für die eigene Weltanschauung.

Tab. 8.2 Eckpunkte der Interviews

### Datenanalyse und Ergebnisse

Das Datenmaterial der Untersuchung hat zum einen aus den Antworten der Schülerinnen und Schüler im Eingangs- und Abschlussfragebogen bestanden. Dort sind geschlossene und offene Antwortformate verwendet worden. Zum anderen sind alle Interviews auf Videoband aufgezeichnet und anschließend transkribiert worden. Zur Datenanalyse sind Methoden der qualitativen Sozialforschung (vgl. hierzu LAMNEK, 2005; MAYRING, 2002, 2010) eingesetzt worden. Das Ziel der Analyse hat nicht darin bestanden, Hypothesen abschließend zu testen, sondern in einem weitgehend unbearbeiteten Feld Hypothesen zu generieren bzw. vorhandene auszuscharfen. Einen wichtigen Orientierungsrahmen hat dabei die qualitative Inhaltsanalyse nach MAYRING (1993) gebildet.

### **Eingangskonzepte**

Die Analyse der Eingangsfragebögen und der Startphasen der Interviews hat gezeigt, dass vorunterrichtliche Vorstellungen von Zufall und Gesetzmäßigkeit und der Beziehung zwischen beiden Konzepten wenig differenziert sind. Termini sind nicht trennscharf verwendet worden. Die Verwendung von Begriffen und die Argumentationen der Schülerinnen und Schüler sind oft inkonsistent gewesen. Definitionen, die Schülerinnen und Schüler für den Begriff Zufall formuliert haben (Frage 1 des Fragebogens), haben sich erwartungsgemäß auf Alltagssituationen bezogen.

*S7c (Schüler c aus Gruppe 7): Unter Zufall verstehe ich eine unerwartete, ungeplante Handlung oder Reaktion, für die es keine Erklärung oder Gesetzmäßigkeit gibt.*

Unterschiedliche Explikationen des Begriffs Zufall hinsichtlich der unterschiedlichen Kontexte Alltag und Wissenschaft sind so gut wie nicht zu finden gewesen. Die Frage nach der Erklärbarkeit zufälliger Prozesse (Frage 2 des Fragebogens) ist fast durchweg verneint worden. Was die Natur des Zufalls angeht, haben sich zwei Gruppen von Schülerinnen und Schülern unterscheiden lassen. Schülerinnen und Schüler der einen Gruppe sind von einem durchgehend determinierten Weltgeschehen ausgegangen, bei dem der Zufall nur die menschliche Unwissenheit um Ursachen und Gesetze wiedergibt und daher einen epistemischen Status aufweist. Diese Schülerinnen und Schüler haben als Kausalisten im Sinne der obigen Explikation bezeichnet werden können.

*S1a: Ich denke schon, dass alles sicherlich irgendwelche Ursachen hat, allerdings kann man eben weder alle Gesetze kennen, die dafür zuständig sind, noch alle Faktoren, und deswegen kann man es nicht vorhersagen. Für uns wirkt es dann wie Zufall.*

Schülerinnen und Schüler der anderen Gruppe sind von einem ontischen Status des Zufalls ausgegangen und haben damit zufälligen Prozessen einen Platz im Weltgeschehen eingeräumt. Eine eindeutige Zuordnung dieser Schülerinnen und Schüler zu den Positionen der aufgeklärten Deterministen oder der Positivisten ist schwierig gewesen. Der Grund hat in der Undifferenziertheit ihrer Vorstellungen und ihren inkonsistenten Äußerungen gelegen. Einige von ihnen haben zufällige Prozesse für vereinbar mit gesetzmäßigen Prozessen gehalten, anderen scheint die Natur des Zufalls bei ihren Argumentationen weniger wichtig zu sein. So ist es ungeklärt geblieben, ob diese Schülerinnen und Schüler Zufall als ontisch im Sinne einer absoluten Unabhängigkeit von anderen Geschehnissen verstanden haben oder aus einer positivistischen Grundhaltung heraus lediglich pragmatisch mit Zufall umgegangen sind.

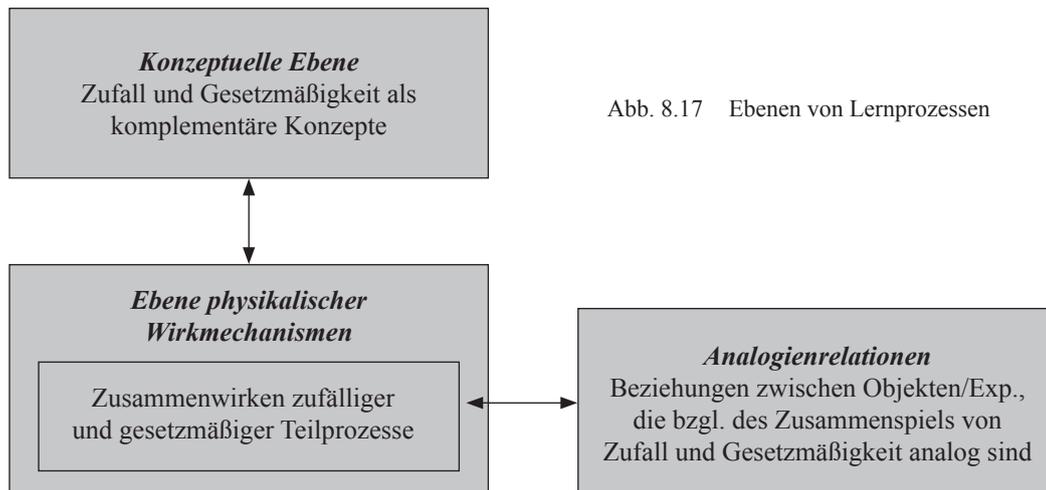
Hinweise auf die Vorstellung, dass zufällige mit gesetzmäßigen Prozessen interagieren können, sind in der ersten Phase des Teaching Experiment nicht gefunden worden. Für die meisten Schülerinnen und Schüler haben zufällige und gesetzmäßige Prozesse in einem unvereinbaren, konträren Verhältnis zueinander gestanden. Andererseits ist von den meisten Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit nicht ausgeschlossen (Frage 5) worden, dass ein Zusammenspiel zwischen Zufall und Gesetzmäßigkeiten der Grund für Muster- und Strukturbildungen in der Natur darstellt.

### **Ebenen von Lernprozessen**

Das Teaching Experiment hat das Ziel verfolgt, Schülerinnen und Schüler zu einem Verständnis des Zusammenspiels zwischen Zufall und Gesetzmäßigkeiten bei bestimmten nichtlinearen Systemen zu führen. Auf der physikalischen Ebene haben sie nachvollziehen sollen, wie bei den drei Beispielsystemen gesetzmäßige Teilprozesse mit zufälligen Teilprozessen zusammenwirken. Die Beispielsysteme haben zwar unterschiedliche Phänomenbereiche repräsentiert. Bezogen auf das Zusammenwirken von zufälligen und gesetzmäßigen Prozessen und auf die entscheidende Rolle des Zufalls sind sie aber analog gewesen. Die Analogiebeziehungen zwischen den drei nichtlinearen Experimenten sind vom Interviewleiter explizit thematisiert. Die Idee dahinter ist gewesen, dass mit der Entwicklung der Analogiebeziehungen die Entschlüsselung der Wirkzusammenhänge

bei jedem einzelnen Beispielsystem einhergegangen ist. Umgekehrt haben die ersten Schülererklärungen der Experimente die Entwicklung der Analogierelationen unterstützt (vgl. Abb. 8.17). Auf der philosophisch-erkenntnistheoretischen Ebene haben die Schülerinnen und Schüler ihre Vorstellungen der vom Zufall und von Gesetzmäßigkeiten in der Physik erweitern sollen. Beide Konzepte haben nicht nur als vereinbar, sondern als komplementär zueinander verstanden werden sollen. Im Teaching Experiment ist dies in vielen Fällen dadurch gelungen, dass die Beziehung zwischen konzeptueller und physikalischer Ebene explizit gemacht wird.

Die Schülerinnen und Schüler haben häufig die Perspektive gewechselt und sich argumentativ zwischen beiden Ebenen hin und her bewegt. Das Verstehen der speziellen Mechanismen, wie beim Magnetpendel, bei der Bénard-Konvektion und beim fraktalen Wachstum zufällige mit gesetzmäßigen physikalischen Prozesse zusammenwirken, hat den Schülerinnen und Schülern geholfen nachzuvollziehen, dass Zufall und Gesetzmäßigkeit als vereinbare Konzepte angesehen werden können. Die Bildung von Analogierelationen hat dies unterstützt, weil Analogien eine Art von Generalisierung darstellen. Insgesamt hat sich die Einsicht entwickelt, dass aus Gesetzmäßigkeit nicht zwangsläufig Vorhersagbarkeit folgen muss, dass diese beiden Konzepte auf andere Weise verbunden sind als in der klassischen Physik. Diese Einsicht auf konzeptueller Ebene hat den Schülerinnen und Schülern wiederum geholfen, das Verhalten der Beispielsysteme im Detail zu entschlüsseln.



Die vielen Einzelergebnisse lassen sich in drei Zusammenfassungen wiedergeben:

- Oberstufenschüler können anhand von Beispielsystemen lernen, wie zufällige und gesetzmäßige Teilprozesse bei nichtlinearen Systemen zusammenwirken und dabei Strukturen bilden oder zur Einschränkung von Vorhersagbarkeit führen.

Die Schülerinnen und Schüler haben ausnahmslos erkannt, dass bei den Beispielsystemen ein Zusammenspiel von zufälligen und gesetzmäßigen Einflüssen stattfindet und dass die zufälligen Prozesse eine entscheidende Rolle für die Entwicklungen der Systeme spielen.

*S2a (MagPen) (Schüler a aus Gruppe 2 zum Magnetpendel): Das ist auf jeden Fall ein Zusammenspiel [von Zufälligem und Gesetzmäßigem].*

*S8c (Bénard): Es ist beides, Zufall und Gesetzmäßigkeiten.*

Wie oben erläutert, ist es wissenschaftlich schwierig, gesetzmäßige von zufälligen Prozessen zu unterscheiden, hinreichende Kriterien dafür existieren nicht. Auch für die Schülerinnen und Schüler ist es nicht leicht gefallen, bei den drei Experimenten zwischen zufälligen und gesetzmäßigen Prozessen zu unterscheiden.

*S3a (MagPen): Das ist jetzt schwierig. Das kann gesetzmäßig sein mit Abweichung, weil Beeinflussung von außen, oder es kann zufällig sein.*

Interessanterweise haben Schülerinnen und Schüler von selbst das „komparative Kriterium“ genutzt (s.o.). Dabei haben sie zwei (hypothetisch) exakt gleiche Systeme mit gleichen Rand- und Anfangsbedingungen verglichen. Systeme verhalten sich entsprechend dem komparativen Kriterium dann gesetzmäßig, wenn die betrachteten Prozesse exakt gleich ablaufen. Die Schülerinnen und Schüler haben anhand mehrerer Durchläufe die Entwicklung und die Endzustände der jeweiligen Systeme verglichen. Sie haben erkannt, dass bestimmte Eigenschaften bei jedem Durchlauf erhalten bleiben (z. B. die Selbstähnlichkeit oder der Grad der Verzweigkeit beim fraktalen Wachstum), andere Eigenschaften aber nicht (z. B. genaue Position der Anlagerung neuer Äste). Daraus haben sie geschlossen (vgl. STAVROU, 2004, S. 139), dass bei den Beispielsystemen sowohl zufällige als auch gesetzmäßige Prozesse auftreten. Dieser Schluss ist nicht allen Schülerinnen und Schülern leicht gefallen. Gewisse vorunterrichtliche Vorstellungen haben dabei im Weg gestanden. Zum einen ist es schwierig gewesen zu akzeptieren, dass zufällige Prozesse und gesetzmäßiges Verhalten in ein und demselben System vereinbar sein können. Zum anderen ist es für manche Schülerinnen und Schüler schwierig gewesen, zufällige Prozesse zu identifizieren, wenn sie bereits gesetzmäßige entdeckt haben und umgekehrt. STAVROU (2004) interpretiert dies so, dass die weitere Suche der Schülerinnen und Schüler nach bestimmenden Faktoren gewissermaßen blockiert ist, wenn sie Hinweise finden, die entweder für ein Zufallsverhalten oder für gesetzmäßiges Verhalten sprechen. Das folgende Zitat illustriert das:

*S12b (MagPen): Also, es widerspricht sich ja an sich. Wenn man sagt Zufall und dann [von] Gesetzmäßigkeit [spricht], das ist ja irgendwo ein Widerspruch in sich, das passt nicht zusammen.*

Den Schülerinnen und Schülern ist es erst dann gelungen, gleichermaßen Zufälle und Gesetzmäßigkeiten herauszuarbeiten, wenn sie dazu angehalten worden sind, die physikalischen Prozesse im Detail zu analysieren. Aus anderen Studien des Kieler Projekts ist bekannt, wie sich Schülerinnen und Schüler das Verhalten des Magnetpendels erklären (vgl. KOMOREK, 1998). Deswegen ist das Magnetpendel als erstes Objekt eingesetzt worden. Die irregulären Bewegungen der Pendelkugel haben für Schülerinnen und Schüler Zufallsbewegungen par excellence dargestellt. Deswegen haben sie zunächst Schwierigkeiten gehabt, gesetzmäßige Prozesse zu „identifizieren“. Dies ist aber gelungen, indem man die Pendelkugel in ihrer Bewegung gestoppt und dann die wirkenden Kräfte analysiert hat (vgl. dazu KOMOREK, 1998). Bei der Diskussion labiler Gleichgewichtslagen und beim Vergleich mit dem einfachen Fadenpendel haben die Schülerinnen und Schüler die Bedeutung kleiner zufälliger Störungen (STAVROU, 2004) erkannt.

Bei der Bénard-Konvektion haben bei den Schülerinnen und Schülern anfangs große Schwierigkeiten bestanden, die Rolle zufälliger Faktoren bei der Entstehung der Konvektionszellen zu verstehen. Der Grund hat darin gelegen, dass die Schülerinnen und Schüler bei diesem Experiment spekulieren müssen, welche mikroskopischen Prozesse in der Flüssigkeit ablaufen. Denn obwohl Metallfitter dem Öl zugegeben worden sind, ist es nicht einfach zu beobachten, was innerhalb des Öls geschieht und was im kurzen Moment der ersten Zellbildungen passiert. Außerdem ist es beim Vergleich zweier Konvektionsmuster nicht einfach gewesen, Unterschiede zu erkennen und Zufallsprozesse als bestimmend anzusehen:

*S8b (zu Bénard): [...] eher eine kleinere Rolle des Zufalls, weil hier sind doch die beiden Ergebnisse sehr ähnlich.*

In dieser Situation ist es darauf angekommen, die mikroskopischen Prozesse zum Zeitpunkt der Zellbildung im Detail zu rekonstruieren. Erst mit Hilfe von Querschnittszeichnungen der Bénard-Zellen (vgl. Infofolie „Bénard-Konvektion“ im Anhang) ist es den meisten Schülerinnen und Schülern gelungen, die Rolle von Fluktuationen nachzuvollziehen. Bei den Dendriten haben die Schülerinnen und Schüler keine nennenswerten Schwierigkeiten gehabt, die zufälligen und gesetzmäßigen Faktoren zu erkennen.

Mit Hilfe der drei Experimente aus unterschiedlichen Phänomenbereichen ist es den meisten Schülerinnen und Schülern gelungen, nach strukturellen Eigenschaften der Objekte und Experimente zu suchen und die Blickrichtung auf zufällige und gesetzmäßige Prozesse zu fokussieren. Letztlich haben sich alle Schülerinnen und Schüler darauf eingelassen, zufällige und gesetzmäßige Prozesse zu unterscheiden. Das Zusammenspiel zufälliger und gesetzmäßiger Teilprozesse ist weitgehend nachvollzogen worden, auch wenn mikroskopische Prozesse nicht direkt beobachtbar gewesen sind. Ein kleiner Teil der Schülerinnen und Schüler (4 Schülerinnen und Schüler) hat sich deutlicher als in den Fragebögen als Kausalisten entpuppt (vgl. Abschnitt 7.5.3). Sie haben sich nur sehr bedingt auf die Sprachregelungen der Interviews eingelassen, zufällige Prozesse als Zufall zu bezeichnen. Sie sind ausschließlich vom epistemischen Zufall ausgegangen und haben sich mit dem Terminus „Zufall“ unwohl gefühlt, weil sie damit ontischen Zufall verbinden, an dessen Existenz sie nicht glauben. Folgende Zitate illustrieren ihre Sicht:

*S10a: [...] es geht jetzt nicht darum, ob wir es heutzutage oder, was weiß ich, in tausend Jahren ausrechnen können, aber im Prinzip ist es berechenbar und vorhersehbar. Im Prinzip schon.*

*S4a (Dendrit): Das läuft darauf hinaus, wie man die Brownsche Bewegung definiert. Wenn man sagt, das ist ein Zufall, dann sind die letzten beiden Versuche ein Zusammenspiel von Zufall und Gesetzmäßigkeiten. Aber wenn man die Brownsche Bewegung als Gesetzmäßigkeit ansieht, dann sind sie gesetzmäßig.*

**Irgendwie kann man den Zufall jetzt ein bisschen besser einschätzen. (S8a)**

- Analogiebildungsprozesse unterstützen das Verstehen nichtlinearer Systeme und ermöglichen eine erweiterte Sicht auf die Beziehung zwischen den Konzepten Zufall und Gesetzmäßigkeit.

Alle Schülerinnen und Schüler haben zwischen den drei Experimenten hinsichtlich des Zusammenspiels von Zufall und Gesetzmäßigkeiten zentrale Ähnlichkeiten erkennen können. Die bedeutende Rolle zufälliger Einflüsse und das Zusammenwirken von zufälligen und gesetzmäßigen Prozessen sind von den meisten Schülerinnen und Schülern als gemeinsame Merkmale der Experimente erkannt worden. Durch die Analogiebildung haben die Experimente eine Klasse von Objekten etabliert.

Die Analogiebildung hat die Prozesse des Verstehens der einzelnen Experimente unterstützt. Bei der Diskussion der Bénard-Konvektion und des fraktalen Wachstums haben die Schülerinnen und Schüler dann die Suchrichtung bereits gekannt. Bei der Konfrontation mit dem Aufbau zur Konvektion haben sie versucht, Analogrelationen zwischen Magnetpendel und Bénard-Konvektion herzustellen. So ist z.B. die „Entscheidung“ des chaotischen Pendels, zum rechten bzw. linken

Magneten zu gehen, aufgegriffen worden, als es um die links-rechts bzw. rechts-links Bewegung der ersten Rolle bei den Bénard-Zellen gegangen ist. In einem anderen Beispiel haben die Schülerinnen und Schüler die ausschlaggebende Rolle der ersten Zellenbildung bei der Bénard-Konvektion mit der Bedeutung der ersten Ionenanlagerung für die dendritische Baumstruktur verglichen. Ziel- und Basisanalogon sind hier gleichermaßen unvertraut gewesen. Dennoch ist es den Schülerinnen und Schülern durch einen permanenten Wechsel der Betrachtung gelungen, beide Experimente nach und nach zu entschlüsseln. Dieses Vorgehen lässt sich durch moderne Theorieansätze zur Analogiebildung (vgl. WILBERS, 2001) gut beschreiben. Im übrigen hat es den Schülerinnen und Schülern geholfen, auch das einfache Pendel als lineares Beispiel beim Entschlüsseln des chaotischen Pendels und teilweise auch der anderen Experimente zu nutzen.

- Zufall wird als Teil der physikalischen Welt und als zur Gesetzmäßigkeit komplementäre Größe verstanden; dadurch wird das Bild von der Physik differenzierter.

Die Frage, ob Zufall in einem bestimmten System ontischen oder epistemischen Status aufweist, ist im Interview in den Hintergrund getreten; ebenso die Frage, ob Zufall überhaupt als ontischer Zufall in der Welt vorkommt (die wenigen Kausalisten fragen dies allerdings weiterhin). Wichtig ist die pragmatische Sichtweise der Physik, die von zufälligen Einflüssen ausgeht und sich über verborgene Parameter keine Gedanken macht, wenn ein System bis zu einem bestimmten Grad verstanden ist. Diese Sicht geht einher mit bestimmten Sprechweisen, die von den Schülerinnen und Schülern im Interview übernommen worden ist. Danach wird der Begriff Zufall oft zur Beschreibung einer globalen Systemeigenschaft verwendet, während gleichzeitig aber klar ist, dass man von zufälligen Prozessen in ansonsten determinierten Systemen spricht.

**Bis jetzt dachte ich eigentlich immer, wenn es gesetzmäßig ist, spielt kein Zufall mit. Also, soweit ich darüber halt nachgedacht hatte. Jetzt sehe ich ja, dass es nicht so ist. (S12b)**

Im Teaching Experiment haben sich die Schülerinnen und Schüler auf das Sprachspiel der Physik in Bezug auf Zufall, Gesetzmäßigkeit und dem Wechselspiel zwischen beiden eingelassen. Selbst die Kausalisten unter ihnen übernehmen probeweise diese Sichtweise der Physik. Das bedeutet allerdings nicht, dass diese Schülerinnen und Schüler aufgrund der drei diskutierten Experimente ihre kausalistische Sicht aufgeben. Für die Zwecke von Unterricht ist es aber vor allem wichtig, dass es gelingt, Schülerinnen und Schüler zumindest probeweise für die Sicht der Physik zu gewinnen. Mit den Entwicklungen auf konzeptueller Ebene haben auch Erweiterungen im Bild von der Physik stattgefunden. Zufall ist anfangs von vielen Schülerinnen und Schülern nicht als Betrachtungsgegenstand der Physik angesehen worden. gemäß der anfänglichen Sicht der Schülerinnen und Schüler verkörpert die Physik eine exakte Wissenschaft, die alles erklären kann und Vorgänge in der Natur vorhersehbar und berechenbar macht:

*S1c: Ich habe nicht gewusst, dass es überhaupt Zufall in der Physik gibt.*

*S7b: Es ist etwas ganz Neues. Ich finde, es ist ein ganz anderer Aspekt von Physik, so insgesamt. Dass Physik nicht immer erklärbar ist und dass nicht immer nur alles nach Gesetzmäßigkeiten läuft, sondern dass ganz viel mit Zufall zusammenhängt.*

Aufgrund der kennen gelernten Auswirkungen zufälliger Prozesse haben die Schülerinnen und Schüler nun auch die Verlässlichkeit von Gesetzmäßigkeiten bei Planungen im Alltagsleben hinter-

fragt. Die Berücksichtigung des Zufalls wird von ihnen als bedeutend für menschliches Handeln betrachtet. Hier ist es wichtig für späteren Unterricht, nicht über das Ziel hinaus zu schießen und den Eindruck zu vermitteln, als sei Zufall der letztlich alles bestimmende Faktor im Weltgeschehen und jede Gesetzmäßigkeit durch ihn aufgehoben:

*S5b: Für den Alltag der Menschen ist, finde ich, wichtig, nicht jede Gesetzmäßigkeit als endgültig und für immer bestehend hinzunehmen, sondern sich darauf einzustellen, dass jede Gesetzmäßigkeit durch einen einzigen Zufall total über den Haufen geworfen werden kann.*

### **Diskussion und Leitlinien für den Unterricht**

Die Sachanalyse hat gezeigt, dass über den Bereich der Physik hinaus philosophische und wissenschaftstheoretische Aspekte von Zufall zu beleuchten sind. Nur dann gelingt es, vorunterrichtliche Vorstellungen von Zufallsprozessen zu kategorisieren und die Ergebnisse der Sachstrukturanalyse auf die empirische Ergebnisse zu Vorstellungen und Lernprozessen zu beziehen. Die empirischen Untersuchung hat ergeben, dass bis auf vier „Kausalisten“ alle Schülerinnen und Schüler nachvollziehen können (und wollen), dass zur Erklärung von Strukturbildungsprozessen die Annahme zufälliger Einflüsse notwendig sein kann. Sie haben verstanden, dass zufällige Prozesse einen Bestandteil der physikalischen Welt darstellen. In der Auseinandersetzung mit den Beispielsystemen dieser Studie haben sie gelernt, wie Zufallsprozesse im Detail mit gesetzmäßigen Prozessen zusammen wirken und die Entwicklung der Systeme beeinflussen. Durch die Bildung analoger Beziehungen zwischen den einzelnen Systemen haben sie erkannt, dass die Systeme auf einer strukturellen Ebene Ähnlichkeiten aufweisen, auch wenn in jedem der betrachteten Systeme zufällige Prozesse anders repräsentiert sind. Im Rahmen der Analogiebildungsprozesse finden Wechsel der Betrachtungsebenen statt. Von der physikalischen Ebene des einzelnen Systems ist auf eine konzeptuelle Ebene gewechselt worden, auf der die Konzepte Zufall und Gesetzmäßigkeit angesiedelt sind. Die Schülerinnen und Schüler haben gelernt, dass Zufall die Existenz zufälliger Teilprozesse in einen deterministischen Systemganzen bedeutet. Dies führt zu einer begrifflichen bzw. konzeptuellen Ausschärfung vorhandener Vorstellungen vom Zufall. Gesetzmäßigkeit und Zufall werden in einem komplementären Verhältnis zueinander gesehen, Vorstellungen von Zufall und Gesetzmäßigkeit werden insgesamt differenzierter.

Die Ergebnisse dieser Studie sind ermutigend gewesen, was die Auseinandersetzung mit Zufall und Gesetzmäßigkeiten in Klasse 11 angeht. Für die Unterrichtskonstruktion sind folgende Leitlinien vorgeschlagen worden:

- **Leitlinie 1: Bewusstmachung von Alltagsvorstellungen von Zufall und Naturgesetzen**

Vorunterrichtliche Vorstellungen von Zufall, Gesetzmäßigkeit, Vorhersagbarkeit oder Kausalität sind undifferenziert. Argumentationen, die sich auf diese Konzepte stützen, sind oft inkonsistent. Eine Bewusstmachung der Schülervorstellungen und ihrer Begrenztheit sollte zumindest in die Einstiegsphase eines Unterrichts eingeflochten sein. Fragen nach Zufall im Alltag und Zufall in den Naturwissenschaften sollten mit den Schülerinnen und Schülern diskutiert werden. Dies dient als Einstieg in die Problematik des Zufalls in nichtlinearen Systemen.

- **Leitlinie 2: Begriffliche Ausschärfungen durch Einbettung fördern**

Die undifferenzierten vorunterrichtlichen Vorstellungen von Zufall und Gesetzmäßigkeiten scheinen sich durch eine Einbettung in physikalische Problemsituationen ausschärfen zu lassen. Allgemeine Ideen vom Konzept Zufall sollten auf physikalische Wirkmechanismen projiziert werden. Das bedeutet, dass Unterricht den Perspektivwechsel zwischen einer „konzeptuellen“, wissenschaftstheoretischen Ebene und der Ebene der physikalischen Wirkzusammenhänge fördern

sollte. Dies kann mit Beispielsystemen gelingen, die zur Eigenaktivität anregen. Unterricht zur Thematik Zufall und Naturgesetze sollte sich zudem nicht im Erlernen naturwissenschaftlicher Prinzipien erschöpfen, sondern alltagsweltliche Aspekte mit dem Ziel integrieren, die Begrifflichkeiten auszuscharfen.

- **Leitlinie 3: Nicht epistemologisch überzeugen, sondern Sprachspiel der Physik vorstellen**

Ob Zufall eine ontische oder eine epistemische Natur zugeschrieben wird, hängt von der erkenntnistheoretischen Grundhaltung ab. Grob betrachtet gibt es zwei Positionen. Nach Sicht der Kausalisten, die auch als strikte Deterministen bezeichnet werden können, gibt es nur epistemische Zufälle. Diejenigen, die ontische Zufälle als gegeben annehmen, kann man als aufgeklärte Deterministen bezeichnen. Unter Schülerinnen und Schülern sind beide Positionen vertreten. Im Unterricht ist es aber nicht notwendig zu versuchen, die erkenntnistheoretische Position der Schülerinnen und Schüler zu verändern, denn die physikalischen Theorien verlangen keine bestimmte Position (sieht man einmal von allen Quanteneffekten ab). Zielführender bei der Vermittlung nichtlinearer Physik ist es, den Schülerinnen und Schülern einen Umgang mit der Sichtweise der Physik probeweise zu ermöglichen. Die obige Untersuchung hat gezeigt, dass sich auch Kausalist unter den Schülerinnen und Schülern auf das Sprachspiel der Physik einlassen und nachvollziehen können, was die Physik unter Zufall versteht und wie er ins Gefüge der Naturgesetze passt.

## 9. Blick zurück nach vorn

Der vorliegende Band stellt die analytischen und empirischen Arbeiten eines Projekts zur Didaktischen Rekonstruktion der nichtlinearen Physik dar. Er gibt Auskunft über Ansätze, wie wesentliche Konzepte der nichtlinearen Physik in der allgemeinbildenden Schule vermittelt werden können. Den fachdidaktischen Rahmen bildet das Forschungs- und Entwicklungsmodell der *Didaktischen Rekonstruktion* (vgl. KATTMANN et al., 1997, KOMOREK & KATTMANN, 2008; vgl. Kapitel 2), das Vorstellungen und Erklärungsversuche von Schülerinnen und Schülern bzgl. naturwissenschaftlicher Zusammenhänge oder Phänomene explizit auf die Konzepte der Naturwissenschaften bezieht. Generelles Ziel des Modells ist es, die Sachstruktur der Wissenschaft in eine Sachstruktur für den Unterricht in der Schule zu überführen. Neben den fachlichen Begriffen und Konzepten sind dann historische und gesellschaftliche Implikationen, die mit dem zu vermittelnden Inhalt verbunden sind, herauszuarbeiten. Ferner sind die Ziele des Unterrichts sowie die Lernmöglichkeiten und -schwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler zu berücksichtigen. Forschungen und Entwicklungen gehen im Projekt Hand in Hand: Hinter der Entwicklung von Unterricht (für die Klasse 10 und für Kurse der gymnasialen Oberstufe) stand die Absicht, Inhalte der modernen Physik einer breiten Schülerklientel nahe zu bringen, damit Schülerinnen und Schüler ein Orientierungswissen und entsprechende Kompetenz aufbauen, die sie für die Teilhabe an einer wissensbasierten Gesellschaft benötigen (vgl. BAUMERT, 1997; OECD, 1999).

### Analyse der Sachstruktur

Forschungen zu selbstorganisierenden, nichtlinearen Systemen ermöglichen seit rund vier Jahrzehnten neue Einsichten in die Dynamik des Naturgeschehens. Diese Systeme entwickeln räumliche und zeitliche Muster und Strukturen. In den meisten Fällen läuft ihre mathematische Beschreibung auf nichtlineare Gleichungen hinaus. Die Methoden, die bei der Analyse nichtlinearer Systeme entwickelt worden sind, werden von angewandten Disziplinen wie der Medizin und der Technik eingesetzt; die Modelle und Theorien der nichtlinearen Dynamik haben darüber hinaus schnell Eingang in philosophische und weltanschauliche Diskussionen gefunden, denn es ist wissenschaftlich kontraintuitiv, dass sich deterministische Systeme nur eingeschränkt vorhersagen lassen. Und es überrascht, dass diese Systeme gewisse Ordnungsstrukturen aufweisen, so dass ihre "Chaotizität" wissenschaftlich interessant geworden ist.

Eine Didaktische Rekonstruktion umfasst drei zentrale Komponenten. Bei der *Analyse der Sachstruktur* werden zunächst die zentralen Begriffe, Konzepte und Prinzipien des betreffenden Inhaltsbereichs herauspräpariert und elementarisiert. Unter dem Begriff *nichtlineare Systeme* etwa wird eine Vielfalt von Phänomenen subsumiert: Deterministisch-chaotische Systeme, die durch *chaotische Attraktoren* im Phasenraum charakterisiert sind, zählen ebenso dazu wie strukturbildende, dissipative Systeme, deren Muster fraktale Eigenschaften haben können. Im ersten Falle steht der Attraktor für Ordnung auf der systemischen Ebene. Bei anderen Strukturbildungsprozessen findet man ein Zusammenspiel von zufälligen und deterministischen Prozessen in der Weise, dass räumliche oder räumlich-zeitliche Strukturen entstehen.

In allen Fällen muss der Blick auf rückkoppelnde Mechanismen gelenkt und die Bedeutung von Zufällen bei der Entstehung von Strukturen in der Natur thematisiert werden. *Komplexe Systeme* machen deutlich, was komplex bedeuten kann, nämlich dass eine *Mehrebenenbetrachtung* notwendig wird, um das System adäquat zu beschreiben. Bei chaotischen Systemen stehen dynamische Instabilität auf einer lokalen Ebene und strukturelle Stabilität auf der globalen Ebene in einem komplementären Verhältnis zueinander. Hier besteht also eine doppelte Determination, die lokal

durch die eindeutige Trajektorie gegeben ist und global durch den chaotischen Attraktor. Eine Zufallsverteilung auf einer lokalen Ebene kann durchaus im Rahmen langfristig determinierter Prozesse ablaufen (vgl. ORNSTEIN & WEISS, 1991).

Die Komplementaritäten von *dynamischer Instabilität bei gleichzeitiger strukturaler Stabilität*, von *Komplexität trotz einfache Bildungsgesetze* und von *deterministischen versus zufälligen Prozessen* bilden ein grundlegendes Raster für die Interpretation nichtlinearer Systeme (vgl. Abb. 9.1).

Den Kern der Elementarisierung bilden die angesprochenen Komplementaritäten. Der Aspekt der dynamischen Instabilität stellte sich dabei schon in Klasse 10 als vermittelbar heraus. Er steht für die Entkopplung der Konzepte *Gesetzmäßigkeit* und *Vorhersagbarkeit*: Dynamisch instabile Systeme unterliegen zwar deterministischen Naturgesetzen, ihr Verhalten lässt sich aber im Detail nicht vorhersagen. Diese Einsicht führt zu einer Akzentverschiebung und einer Erweiterung von *Determinismuskonzeptionen* bei Schülerinnen und Schülern.

Im Projekt wurden einzelne Aspekte der Sachstruktur in vertiefenden Analysen geklärt, insbesondere der Begriff des *Fraktals*. Die Literaturanalyse ergab, dass sich der Begriff des Fraktals wissenschaftlich noch in der Entwicklung befindet und es bislang keinen einheitlichen Fraktalbegriff gibt, wohl aber zwei Zugangsweisen (KATSCHER, 1995; KATSCHER, KOMOREK & DUIT, 1996). Der eine Zugang führt über phänomenologisch-geometrische Betrachtungen und stützt sich auf die Konzepte *Selbstähnlichkeit*, *Skaleninvarianz* und *Feinstruktur*. Die andere Zugangsweise setzt auf die quantitative Vermessung mit Hilfe verschiedener (fraktaler) *Dimensionsmaße*. Aus pädagogisch-didaktischer Sicht stellt die Vorläufigkeit des Fraktalbegriffs die Chance dar, Schülerinnen und Schülern die Wissenschaft als Prozess darzustellen.

Bei der fachlichen Klärung zum Begriff der Ordnung (VOGT, 2002; KOMOREK et al., 2003; vgl. Kapitel 8) zeigte sich, dass räumliche, zeitliche und *räumlich-zeitliche Ordnungen auch phänomenologisch* unterschieden werden müssen. Attraktoren deterministisch-chaotischer Systeme repräsentieren dabei eine Form der zeitlichen Ordnung; Turbulenzen oder selbstorganisierende, z.B. oszillierende chemische Reaktionen, stehen für räumlich-zeitliche Ordnung.

Ebenso wurde eine fachliche Klärung zum Begriff des Zufalls durchgeführt (Stavrou, 2004; Stavrou, Komorek & Duit, 2003), wobei philosophische und physikalische Literatur zum Verhältnis von Determinismus und Zufall herangezogen wurde. Auch hier hatte die fachliche Klärung u.a. die Funktion, Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern zu kategorisieren und zu interpretieren und ihre Erklärung des Verhaltens nichtlinearer Beispielsysteme zu verstehen. Die fachliche Klärung ergab, dass generell zwischen epistemischen und ontischen Zufall unterschieden werden muss. Unter dem Begriff *Ontischer Zufall* werden Prozesse subsumiert, die nicht weiter auf andere (determinierende) Prozesse zurückgeführt werden können. Damit werden diese Prozesse als Entität, als Teil der Realität aufgefasst. Beispiele dafür sind Zufallsprozesse wie der Alphazerfall eines radioaktiven Isotops. *Verborgene Parameter*, die den Elementarprozess determinieren würden, gibt es nicht. Äquivalent zum ontischen Zufall sind Begriffe wie *objektiver* oder *absoluter* Zufall. *Epistemischer Zufall* spiegelt den begrenzten menschlichen Erkenntnisstand wider. Ein Beispiel hierfür ist die Brownsche Bewegung eines Staubteilchens in einer Flüssigkeit. Seine Bewegung

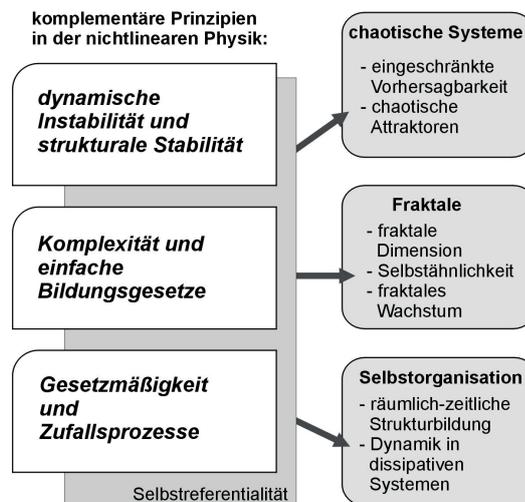


Abb. 9.1 Komplementäre Prinzipien als Kern der Elementarisierung der nichtlinearen Physik

erscheint zufällig, weil man die Wärmebewegung der Flüssigkeitspakete, die das Staubteilchen antreiben, nicht wahrnehmen kann. Die Unvorhersagbarkeit der Bewegung des Staubteilchens liegt aber am Mangel grundsätzlich zugänglicher Informationen. Äquivalent zum epistemischen Zufall sind Begriffe wie *subjektiver Zufall* oder *scheinbarer Zufall*.

### Bildungswert nichtlinearer Physik

Eine Reihe von Überlegungen zum Bildungswert der nichtlinearen Physik bzw. ihrer Teilgebiete wurden im Projekt angestellt (KOMOREK et al., 2002). Um die eigenen Bewertungen abgleichen zu können, wurden im Rahmen einer Delphibefragung Experten zum Bildungswert nichtlinearer Physik befragt (WENDORFF, 2001). Die Bestimmung des Bildungswertes stützte sich auf Ansätze der *Deutschen Bildungstradition*, deren Vertreter wie KLAFKI (1995) oder HEYMANN (1990) auch heute über Allgemeinbildung nachdenken, und sie stützte sich auf aktuelle Überlegungen zur *naturwissenschaftlichen Grundbildung*, einer *Scientific Literacy*.

Personen aus der physikalischen Forschung, der Fortbildung und der Bildungsverwaltung beteiligten sich an der Befragung und betonten drei Aspekte gesellschaftlicher Relevanz des Themas: *Interdisziplinarität* - Rund zwei Drittel der Befragten stellten heraus, dass nichtlineare Dynamik und nichtlineare Physik aufgrund ihrer strukturwissenschaftlichen Ansätze zu Disziplinen außerhalb der Physik substanziell beitrage und dass Erkenntnisse in diesen Gebieten wiederum die Entwicklung der nichtlinearen Physik voranbringe. Die so verstandene Interdisziplinarität fördere demnach die Weiterentwicklung von wissenschaftlichen Disziplinen. *Komplexität* - Rund ein Drittel der Befragten hob hervor, dass nichtlineare Physik und nichtlineare Dynamik die Instrumentarien bereithielten, mit denen komplexe Phänomene und vernetzte Systeme modelliert und aufgeklärt werden könnten. *Anwendungen* - Etwas mehr als die Hälfte der Befragten unterstrich, dass nichtlineare Physik schon heute Erfolge bei der Umsetzung z.B. in der Medizin oder der Technik vorweisen könne. Fünf Thesen ließen sich aus den freien Antworten ableiten (vgl. Abb. 9.2):

*These 1:* Unterricht über nichtlineare Physik trägt zur Entwicklung eines aktuellen naturwissenschaftlichen Weltbildes bei, das Komplexität und systemische Sichtweisen umfasst.

*These 2:* Unterricht über nichtlineare Physik fördert die kognitive Entwicklung, die zur Erarbeitung einer naturwissenschaftlichen Wissensbasis, zur Orientierung in der Wissensgesellschaft und zur Lösefähigkeit komplexer Probleme beiträgt.

*These 3:* Durch Unterricht über nichtlineare Physik können zentrale Konzepte, Denkweisen, Methoden und Prinzipien der modernen Naturwissenschaften exemplarisch vermittelt werden.

*These 4:* Unterricht über nichtlineare Physik verschafft Schülerinnen und Schülern einen Einblick in naturwissenschaftliche Arbeitsweisen, Möglichkeiten und Grenzen und vermittelt damit Wissen über das Wesen der Naturwissenschaft.

*These 5:* Unterricht über nichtlineare Physik ist für fachübergreifenden und fächerverbindenden Unterricht aufgrund seines strukturwissenschaftlichen Ansatzes besonders geeignet und kann interdisziplinäres naturwissenschaftliches Vorgehen und seine Bedeutung aufzeigen.

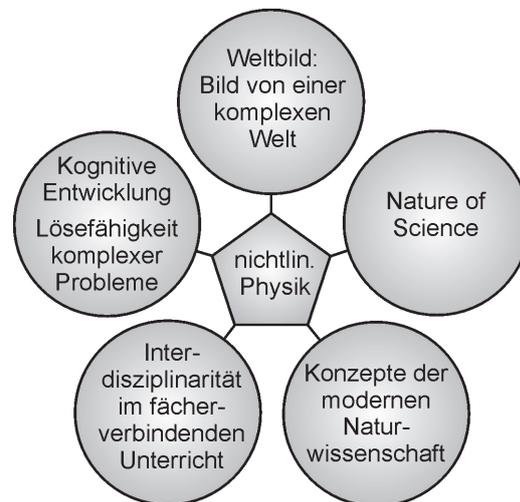


Abb. 9.2 Zielbereiche, zu denen nichtlinearer Physik aus Expertensicht spezifisch beiträgt

### **Empirische Studien zum Lernen von Grundideen nichtlinearer Physik**

In dieser zweiten Komponente der Didaktischen Rekonstruktion wurden die vorunterrichtlichen Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern zu den Themen Chaos, Fraktale und Nichtlinearität und ihre Lernprozesse hin zur wissenschaftlichen Sichtweise untersucht (u.a. KOMOREK, 1998; BÜCKER et al., 1998; NAUJACK et al., 1998; WILBERS, 1999; DUIT, ROTH, KOMOREK & WILBERS, 2001; VOGT, 2002; KOMOREK et al., 2003; STAVROU, 2004). Diese Studien konnten erheben, von welchen Vorstellungen Schülerinnen und Schüler ausgehen, welche Erklärungsansätze sie für das Verhalten nichtlinearer Systeme entwickeln und welche Prozesse sie beim Erlernen der wissenschaftlichen Begriffe, Konzepte und Prinzipien durchlaufen. Als Interviewmethode bewährte sich das *Teaching Experiment* (vgl. STEFFE & D'AMBROSIO, 1996): Entlang einer Reihe von Experimenten wurden die Schülerinnen und Schüler dabei nach ihren Erklärungen für das nichtlineare oder strukturbildende Verhalten der Beispielsysteme (Magnetpendel, "Chaosschüssel", Doppelpendel, chaotischer Schwinger, Zinkdendrit, Viskoses Verästeln etc.) mittels eines halbstrukturierten Leitfadens befragt.

Die entstandenen qualitativen Daten wurden mit Methoden der *qualitativen Sozialforschung* (BORTZ et al. 2002; LAMNEK, 2005) im Sinne einer *qualitativen Inhaltsanalyse* (vgl. Mayring, 2002, 2010) kategoriengestützt analysiert. Zum Verstehen von wichtigen Eigenschaften von Fraktalen etwa wurden zwei Teaching Experiment-Studien durchgeführt (vgl. KOMOREK, DUIT, BÜCKER & NAUJACK, 2001), darunter in einer 10. Gymnasialklasse zur Eigenschaft der *Selbstähnlichkeit* von mathematischen und natürlichen Gebilden und zur Komplementarität *Komplexität* und *einfachen Bildungsgesetzen*. Die Ergebnisse zeigten, dass die Schülerinnen und Schüler die Eigenschaft der Selbstähnlichkeit zwar beschreiben konnten, dass sie aber Selbstähnlichkeit nicht von sich aus als ein Ordnungskriterium für Abbildungen, die ihnen vorgelegt wurden, nutzten.

In einer zweiten Studie (BÜCKER, 1998) wurde untersucht, wie weit Schülerinnen und Schüler der Stufe 12 das *fraktale Wachsen* eines (elektrolytisch abgeschiedenen) Zinkdendrits und andere Beispiele erklären und eine elementarisierte Erklärung der Prozesse nachvollziehen konnten. Bei den untersuchten Objekten spielen deterministische Prozesse und Zufallsprozesse zusammen und führen auf eine fraktale Strukturbildung. Spontane Erklärungen der Strukturentstehung bezogen sich auf Energie- und Optimierungsaspekte, aber auch auf Zufallsprozesse. Diese Arbeiten machten deutlich, dass die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler vom Begriff des Zufalls eine Schlüsselrolle auf ihrem Weg zum physikalischen Verständnis des fraktalen Wachstums spielten.

In einer weiteren Teaching Experiment-Studie (STAVROU, 2004) wurden deswegen die Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern vom Begriff des Zufalls und seiner Beziehung zu gesetzmäßigen Vorgängen genauer untersucht. Jeweils drei Schülerinnen und Schüler wurden mit einer Reihe von erklärungsbedürftigen Experimenten (dem Magnetpendel, dem Zinkdendrit und einem Aufbau zur Erzeugung der *Bénard-Konvektion*) konfrontiert. Die Schülerinnen und Schüler konnten weitgehend nachvollziehen, dass das Verhalten der phänomenologisch unterschiedlichen Systeme auf der Ebene, auf der deterministische Prozesse und Zufälle zusammen spielen, analog ist. *Analogiebildungsprozesse* unterstützten die Entschlüsselung der einzelnen Experimente und ermöglichten es auf einer generellen Ebene, das komplementäre Zusammenspiel von Zufall und Gesetzmäßigkeit als wichtiges Prinzip der Natur zu verstehen.

### **Unterrichtserprobungen in Klasse 10 und in Oberstufenkursen**

Eine vorläufige Sachstruktur für den Unterricht bildete die Basis für die Konstruktion von pilotartigem Unterricht, der erprobt und evaluiert wurde. Die Erfahrungen aus den Erprobungen ermöglichten praxisnahe Modifikationen der rekonstruierten Sachstruktur. Für Klasse 10 wurde ein Unterrichtskonzept entwickelt und mehrfach erprobt (vgl. Kapitel 5; vgl. DUIT, ROTH, KOMOREK & WILBERS, 1998; DUIT, ROTH, KOMOREK & WILBERS, 2001), in dessen Zentrum einfache mechanische Objekte standen, die dynamische Instabilität veranschaulichten

und sich auf struktureller Ebene analog verhielten. Die Schülerinnen und Schüler wurden durch ihre Erforschung kognitiv angeregt und führten eigenständige Untersuchungen an den Objekten durch. Als Paradigma wurde das chaotische Magnetpendel eingesetzt, das die Schülerinnen und Schüler faszinierte und ihre Aufmerksamkeit band. Da es vom Aufbau her einfach zu verstehen ist, überraschte sein komplexes Verhalten. Es stellte sich als fruchtbarer Stimulus heraus, mit Schülerinnen und Schülern dieser Altersstufe nicht nur über chaotische Prozesse zu sprechen, sondern auch allgemeine physikalische Prinzipien zu hinterfragen. Die Frage der Kopplung von Gesetzmäßigkeit und Vorhersagbarkeit gehörte dazu.

Insgesamt gelang es Schülerinnen und Schülern in diesem Unterrichtsgang, ihre Determinismusvorstellungen zu differenzieren und in der Folge ihr Bild von der Wissenschaft Physik zu erweitern. Analogien halfen, die physikalischen Prozesse zu verstehen und strukturelle Gemeinsamkeiten verschiedener chaotischer Beispielsysteme herauszuarbeiten.

Analogien erwiesen sich aber auch als zweischneidig, weil sie immer erst entschlüsselt werden müssen. Eine Laborstudie zur Bedeutung von Analogien im Lernprozess schloss sich an die Unterrichtserprobung an. In dieser Studie (WILBERS, 1999; vgl. auch WILBERS & DUIT, 1997; ROTH, KOMOREK & WILBERS, 1998; 2001) wurde die Mikrostruktur der Analogienutzung im Rahmen eines Teaching Experiment untersucht und der Frage nachgegangen, inwieweit vorgelegte Analogmodelle Schülerinnen und Schülern helfen konnten, dynamisch instabile chaotische Systeme zu verstehen und zu erklären. Die Studie zeigte, dass dies dann der Fall ist, wenn das *Basisanalogon* (z.B. die Kugel, die einen Berggrat herunter läuft) im assoziativen Umfeld des *Zielanalogons* (z.B. dem erklärungsbedürftigen Magnetpendel) liegt. Ansonsten findet keine Analogienutzung statt, selbst wenn das Basisanalogon vertraut ist. Schülerinnen und Schüler sahen den Basisbereich im Lichte des Zielbereichs neu, so dass die Entschlüsselung *beider* Bereiche sukzessiv erfolgte.

Für Kurse der gymnasialen Oberstufe entwickelte ein Arbeitskreis aus erfahrenen Physiklehrpersonen, unterstützt durch den Autor, Module eines Unterrichts zur nichtlinearen Physik (KOMOREK et al., 2003). Das Unterrichtskonzept wurde in drei Physikgrundkursen der Stufen 11 und 13 erprobt, wobei alle ablaufenden Entwicklungs-, Erprobungs- und Lernprozesse formativ evaluiert wurden, teilweise mit Unterstützung von Videoaufzeichnungen.

Die im Lehrerarbeitskreis abgelaufenen Prozesse konnten im Rahmen des Modells der Didaktischen Rekonstruktion beschrieben werden: Das Wechselspiel der verschiedenen Perspektiven und die wiederholte Abfolge von fachlichen Klärungen, didaktischen Analysen und didaktischen Strukturierungen innerhalb der Gruppe bei der Entwicklung einer Sachstruktur für den Unterricht wurden theoretisch modelliert.

Das Produkt dieses Prozesses war das modulare Unterrichtskonzept, das sich anschließend in der Unterrichtspraxis bewährte, indem es die zentralen Aspekte der dynamischen Instabilität, des Chaos und der Strukturbildung sowie deren komplementäre Beziehungen für Schülerinnen und Schüler transparent machte; und indem schülerorientierte Methoden und kognitiv anregende Experimente und Objekte eingesetzt wurden. Die Variabilität des Unterrichtskonzepts zeigte sich zudem darin, dass die Lehrpersonen es an verschiedene Rahmenbedingungen anpassen konnten und dass sie es zwischen den einzelnen Erprobungen analysieren und konzeptuell modifizieren konnten. Neue Module wurden ergänzt, Segmentierung und Sequenzierung wurden variiert.

Allerdings traten auch Probleme auf, die auf die Strukturierungsprozesse zurückzuführen waren. Da das Konzept zu wenige Sicherungsphasen vorhielt, konnten die Schülerinnen und Schüler in Nachinterviews die zentralen Gedanken des Unterrichtsgangs zwar reproduzieren, allerdings waren sie nur sehr eingeschränkt in der Lage, diese Gedanken und Begriffe des Unterrichts selbstständig darzustellen. Dies bezog sich insbesondere auf die Begriffe *Zufall* und *Ordnung*, was erneut empirische Untersuchungen zu diesen Begriffen erforderte (s. o.), ganz im Sinne der Didaktischen Rekonstruktion als iterativer Prozess.

Auch eine *Kompetenzentwicklung* bezüglich des naturwissenschaftlichen Arbeitens konnte festgestellt werden: Durch die Auswahl der Experimente und der Untersuchungsaufgaben wurden das Experimentieren, das Aufstellen und Verfolgen eigener Hypothesen, das Aushandeln von Bedeutungen in der Gruppenarbeit, das Präsentieren von Gruppenergebnissen und die Diskussion relativ abstrakter Konzepte im Klassengespräch gefördert.

Auf Seiten der Lehrpersonen konnten Lernprozesse im Sinne einer Ausdifferenzierung vorhandenen physikalischen Wissens identifiziert werden. Einige Aspekte wie die Funktion von Zufallsprozessen bei der Strukturbildung oder der Aspekt der Instabilität von Planetensystemen waren den Lehrpersonen neu. Auf fachdidaktischer Ebene lernten sie, dass der Ergebnissicherung und dem Aufrechterhalten eines Roten Fadens, der Aktivitäten mit Zielen verbindet, dann große Bedeutung zukommt, wenn schülerorientierte, kognitiv anregende Unterrichtsmethoden eingesetzt werden.

### **Ausblick**

Das Projekt zur Didaktischen Rekonstruktion der nichtlinearen Physik demonstriert, wie neue Themen der Physik für die Sekundarstufe I und die Kurse der gymnasialen Oberstufe aufgearbeitet werden können. Weitere relevante Themen der modernen Physik warten auf eine derartige Bearbeitung. Noch fehlen z.B. Zugänge zur Quantenphysik, die bereits in Klasse 10 ein *bedeutungsvolles* Lernen ermöglichen und dabei auf den Lernmöglichkeiten der Schülerinnen und Schülern aufbauen. Denn die Entwicklung eines modernen naturwissenschaftlichen Weltbildes ist mit der Vermittlung quantenphysikalischen Wissens verbunden. Auch der Bereich der modernen Festkörper- und Materialphysik, der über *Nanoscience* und *neue Materialien* immer mehr technische und damit auch Alltagsrelevanz erfährt, müsste systematisch fachdidaktisch bearbeitet werden.

Das vorliegende Projekt zeigte aber insbesondere in der Zusammenarbeit mit Lehrpersonen, wie wichtig es ist, ihre Strukturierungsprozesse genauer kennenzulernen. In den Projekten *Physik im Kontext* (piko-OL; vgl. NAWRATH, 2010) und vor allem im Oldenburger Promotionsprogramm *ProfaS* (Prozesse fachdidaktischer Strukturierung für Schulpraxis und Lehrerbildung) (KOMOREK, FISCHER & MOSCHNER, 2013) wurde dazu das Modell der Didaktischen Rekonstruktion auf die Ebene der Lehrerbildung transformiert (KOMOREK & KATTMANN, 2008). Damit ist gemeint, dass nun Vorschläge zur Strukturierung von Unterricht, wie sie die Fachdidaktik macht, systematisch auf die Vorstellungen von Lehrpersonen, wie Unterricht zu strukturieren sei, bezogen und miteinander verglichen werden. In der Konsequenz unterstützt dieser Vergleich die Entwicklung von Ausbildungselementen. Als Forschungsmodell auf Ebene der Lehrerbildung lassen sich nun Prozesse der Erstausbildung und der Professionalisierung unter Erweiterung des *pedagogical content knowledge* (SHULMAN, 1987) und die Motive der Unterrichtstrukturierung durch Lehrpersonen begründet empirisch untersuchen.

Das ferne Forschungsziel liegt dann darin zu verstehen, wie Lehrpersonen ihren Unterricht adaptiv an die per Diagnose erkannten individuellen und kollektiven Lernprozesse ihrer Schülerinnen und Schüler systematisch und kontinuierlich anpassen – und wie Lehrerbildung dies unterstützen kann. Ein umfangreiches Programm.

# Literatur

- Ahlers, G., Großmann, S. & Lohse, D. (2002). Hochpräzision im Kochtopf. *Physik Journal*, 1(2), 31-37.
- Amelang, M. & Bartussek, D. (1990). *Differentielle Psychologie und Persönlichkeitsforschung*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Angell, C., Guttersrud, O. & Henriksen, E. K. (2004). *Physics: frightful, but fun. Pupils' and teachers' views of physics and physics teaching*. Wiley periodicals.
- Argyris, J., Faust, G. & Haase, M. (1994). *Die Erforschung des Chaos - eine Einführung für Naturwissenschaftler und Ingenieure*. Braunschweig: Vieweg.
- Arnhold, J., Grassberger, P. & Lehnertz, K. (2000). Chaos im Kopf? Die nichtlineare Dynamik kann helfen, epileptische Anfälle vorherzusagen und das Erregerzentrum zu lokalisieren. *Physikalische Blätter* 56(4), 27-32.
- Aufschnaiter, St. v. & Welzel, M. (Hrsg.) (2001). *Nutzung von Videodaten zur Untersuchung von Lehr-Lern-Prozessen*. Münster: Waxmann.
- Baake, M., Grimm, U. & Moody, R. V. (2002). Die verborgene Ordnung der Quasikristalle. *Spektrum der Wissenschaft*, 2, 64-74.
- Baalman, W., Frerichs, V. & Illner, R. (1996). Educational reconstruction - Examples in the field of genetics and evolution. Paper presented at the first meeting of the European Researchers in Didaktik of Biology (ERIDOB), Kiel.
- Baird, J. R. & Mitchell, I. J. (1986). *Improving the quality of teaching and learning - an Australian case study*. Melbourne: The Monash University.
- Baird, J. R. & Northfield, J. R. (1992). *Learning from the PEEL experience*. Melbourne: The Monash University.
- Baird, J. R. & White, R. T. (1996). Metacognitive strategies on science teacher education. In: D. Treagust, R. Duit & B. Fraser (Eds.), *Improving teaching and learning in science and mathematics*. New York: Teacher College Press, 190-200.
- Baumert, J. & Köller, O. (2001). Unterrichtsgestaltung, verständnisvolles Lernen und multiple Zielerreichung im Mathematik- und Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe. In: J. Baumert, W. Bos & R. Lehmann (Hrsg.), *TIMSS/III. Dritte Internationale Mathematik- und Naturwissenschaftsstudie, Band 2*. Opladen: Leske + Budrich, 271-316.
- Baumert, J. (1997). Scientific Literacy - A German Perspective. In: W. Gräber & C. Bolte (Eds.). *Scientific Literacy - an international symposium*. Kiel: IPN, 167-180.
- Baumert, J., Klieme, E., Neubrandt, M., Prenzel, M., Schiefele, U., Schneider, W., Stanat, P., Tillmann, K. J. & Weiß, M. (Hrsg.) (2001). *PISA 2000. Basiskompetenzen von Schülerinnen und Schülern im internationalen Vergleich*. Opladen: Leske + Budrich.
- Behr, R. (1993). *Fraktale - Formen aus Mathematik und Natur*. Stuttgart: Klett.
- Bell, T. (2003). *Strukturprinzipien der Selbstorganisation*. Berlin: Logos.
- Bell, T. (2004a). Komplexe Systeme und Strukturprinzipien der Selbstregulation im fächerübergreifenden Unterricht - eine Lernprozessstudie in der SII. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 10, 162-180.
- Bell, T. (2004b). Komplexe Systeme und Strukturprinzipien der Selbstregulation - Konstruktion grafischer Darstellungen, Transfer und systemisches Denken. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 10, 182-203.
- Bergerud, A. T. (1989). Die Populationsdynamik von Räuber und Beute. In: *Chaos und Fraktale*. Heidelberg: Spektrum, 82-91.

- Birkhoff, G. D. (1935). Nouvelle recherches sur les systems dynamiques. Mem. Pont. Acad. Sci. Novi Lyncaei 1, 85ff.
- Bleichroth, W. (1991). Elementarisierung, das Kernstück der Unterrichtsvorbereitung. Naturwissenschaften im Unterricht - Physik, 2(6), 4-11.
- BLK-Materialien (1998). Modulare Informationen für Lehrer im BLK-Modellprogramm "Steigerung der Effizienz im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht". <http://blk.mat.uni-bayreuth.de/blk/blk/material/ipn.html>
- BMBF (Hrsg.) (1998a). Abschlussbericht zum "Bildungs-Delphi": Potentiale und Dimensionen der Wissensgesellschaft - Auswirkungen auf Bildungsprozesse und Bildungsstrukturen. München: Infratest Burke Sozialforschung.
- BMBF (Hrsg.) (1998b). Abschlussbericht zum "Wissens-Delphi": Potentiale und Dimensionen der Wissensgesellschaft - Auswirkungen auf Bildungsprozesse und Bildungsstrukturen. München: Prognos AG.
- BMBF (Hrsg.) (2000). Entdeckung des Zufalls. Bonn: BMBF.
- Boccaletti, St., Gluckman, B. J., Kurths, J., Pecora, L. M. & Spano, M. (Hrsg.) (2002). Experimental Chaos - 6th Experimental Chaos Conference in Potsdam, July 2001. New York: American Institute of Physics.
- Borko, H. (2004). Professional development and teacher learning: mapping the terrain. Educational researcher, 33(8), 3-15.
- Bortz, J. & Döring, N., (2002). Forschungsmethoden und Evaluation. 3. Auflage. Berlin: Springer.
- Bounthony, V., Andreef, A. & Weißborth, J. (1993). Nichtlineare Schwingungen - ein computergestütztes Lernprogramm für Ingenieurstudenten des 1. Studienjahres. In: W. B. Schneider: Wege in der Physikdidaktik, Erlangen, 450-457.
- Braun, C., Kowallik, P., Freking, A., Hadelers, D., Kniffki, K. D. & Meesmann, M. (1998). Demonstration of nonlinear components in heart rate variability of healthy persons. American Physiological Society, H1577-1584.
- Briggs, J. (1993). Chaos - Neue Expeditionen in fraktale Welten. München: Hanser.
- Brown, D. E. & Clement, J. (1992). Classroom teaching and experiments in mechanics. In: R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer (Eds.), Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies. Kiel: IPN, 380-397.
- Bücker, N. (1998). Experimente zum fraktalen Wachstum. Hausarbeit im Rahmen der ersten Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien. Kiel: IPN.
- Bücker, N., Komorek, M. & Duit, R. (1999). Experimente, Elementarisierungen und Schülervorstellungen im Bereich Fraktales Wachstum. In: R. Brechel (Hrsg.), Zur Didaktik der Physik und Chemie - Vorträge zur GDCP-Jahrestagung in Essen 1998. Alsbach: Leuchtturm, 229-231.
- Buhr, G. & Buhr, K. (Hrsg.) (1975). Philosophisches Wörterbuch. 11. Auflage. Berlin: DEB.
- Bunde, A. & Havlin, S. (Eds.) (1994). Fractals in science. Berlin: Springer.
- Bunde, A. & Roman, H. E. (1996). Gesetzmäßigkeiten der Unordnung. Physik in unserer Zeit, 27, 246.
- Bunge, M. (1987). Kausalität, Geschichte und Probleme. Tübingen: Mohr.
- Burandt, B., Komorek, M., Schnabel, B., Press, W. & Boysen, H. (1992). High resolution X-ray investigations on the supersatellite reflections of Labradorit. Zeitschrift für Kristallographie, 200, 141-156.
- Chaitin, G. J. (1975). Randomness and mathematical proof. Scientific American, 232(5), 47-52.
- Chen, G & Ueta, T. (1999). Yet another chaotic attractor. International Journal of Bifurcation and Chaos, 9, 1465.
- Dann, H. D. & Humpert, W. (2002). Das Konstanzer Trainingsmodell (KTM) - Grundlagen und neue Entwicklungen. Zeitschrift für Pädagogik, 48(2), 215-226.
- De Jong, O., Korthagen, F. & Wubbels, T. (2003). Research on science teacher education in Euro-

- pe: Teacher thinking and conceptual change. In: B. J. Fraser & K. G. Tobin (Eds.), *International Handbook of Science Education*, part 2. Dordrecht (The Netherlands): Kluwer, 745-760.
- Driel, J. H. & Verloop, N. (1999). Teachers' knowledge of models and modelling in science. *International Journal of Science Education*, 21(11), 1141-1154.
- Duit, R. & Komorek, M. (1997). Understanding the basic ideas of chaos-theory in a study of limited predictability. *International Journal of Science Education*, 19(3), 247-264.
- Duit, R. & Komorek, M. (2000). Die eingeschränkte Vorhersagbarkeit chaotischer Systeme verstehen. *Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht MNU*, 53(2), 94-102.
- Duit, R. & Lehrke, M. (2004). DFG-Antrag zum Thema "Lehrerprofessionalisierung durch eine zielgerichtete videogestützte Intervention".
- Duit, R. (1995). The constructivistic view - a both fashionable and fruitful paradigm for science education research and practice. In: L. Steffe & J. Gale (Eds.), *Constructivism in education*. Erlbaum, Hillsdale (NJ), 271-285.
- Duit, R. (1995). Zur Rolle der konstruktivistischen Sichtweise in der naturwissenschaftsdidaktischen Lehr- und Lernforschung. *Zeitschrift für die Pädagogik*, 41, 905-923.
- Duit, R., Goldberg, F. & Niedderer, H. (Eds.) (1992). *Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies - Proceedings of the International Workshop held in Bremen*. Kiel: IPN.
- Duit, R., Gropengießer, H., Kattmann, U., Komorek, M. & Parchmann, I. (2012). The Model of Educational Reconstruction – A Framework for Improving Teaching and Learning Science. In Jorde, D. & Dillon, J. (Eds.). *Science Education Research and Practice in Europe*. Rotterdam: Sense Publishers, 13-38.
- Duit, R., Häußler, P. & Kircher, E. (1981). *Unterricht Physik*. Köln: Aulis.
- Duit, R., Komorek, M. & Müller, C.T. (2005). *Fachdidaktisches Denken*. Kiel: IPN.
- Duit, R., Komorek, M. & Wilbers, J. (1996). Students investigate the behavior of chaotic systems. In: S. Oblak, M. Hribar & K. Luchner (Eds.), *Proceedings of the conference: New ways of teaching physics*, Ljubljana, Slovenia.
- Duit, R., Komorek, M. & Wilbers, J. (1997a). Studies on educational reconstruction of chaos theory. *Research in Science Education*, 27(3), 339-357.
- Duit, R., Komorek, M. & Wilbers, J. (1997b). Studien zur Didaktischen Rekonstruktion der Chaostheorie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 3(3), 19-34.
- Duit, R., Komorek, M. Wilbers, J. & Roth, W.-M. (1997). Die Krux mit dem Mercedesstern - eine Unterrichtseinheit zum deterministischen Chaos. In: H. Behrendt (Hrsg.), *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Vorträge der GDGP-Tagung in Bremen 1996*. Alsbach: Leuchtturm, 344-346.
- Duit, R., Komorek, M., Wilbers, J. & Roth, W.-M. (1996). Zur Rolle von Analogien bei der Vermittlung von Grundideen der Chaostheorie. Beitrag zum Symposium "Untersuchungen von Schülervorstellungen zu Biologie und Physik", Herbsttagung der Arbeitsgemeinschaft empirisch pädagogischer Forschung (AEPF), Salzburg.
- Duit, R., Komorek, M., Wilbers, J. & Roth, W.-M. (1999). Zur Rolle von Analogien bei der Vermittlung von Grundideen der Chaostheorie. In: R. Duit & J. Mayer (Hrsg.), *Studien zur naturwissenschaftlichen Lern- und Interessenforschung*. Herbsttagung der AEPF in Salzburg 1996, Kiel: IPN, 7-10.
- Duit, R., Komorek, M., Wilbers, J., Roth, W.-M. & Stadler, H. (1998). Konstruktivistische Unterrichtsanalysen. In: H. Behrendt (Hrsg.), *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Vorträge zur GDGP-Jahrestagung 1997 in Potsdam*, Alsbach: Leuchtturm, 304-306.
- Duit, R., Komorek, M., Wilbers, J., Roth, W.-M. & Stadler, H. (1997). Eine Unterrichtseinheit zur eingeschränkten Vorhersagbarkeit chaotischer Systeme für das 10. Schuljahr. Vorträge zur Physikertagung in Berlin 1997. *Deutsche Physikalische Gesellschaft*, 276-281

- Duit, R., Roth, W.-M., Komorek, M. & Wilbers, J. (1998). Conceptual change cum discourse analysis to understand cognition in a unit on chaotic systems: Towards an integrative perspective on learning in science. *International Journal of Science Education* 20(9), 1059-1073.
- Duit, R., Roth, W.-M., Komorek, M. & Wilbers, J. (2001). Fostering conceptual change by analogies - between Scylla and Charybdis. *Learning and Instruction* 11, 283-303.
- Duschl, R. A. & Hamilton, J. R. (2003). Conceptual change in science and in the learning of science. In: B. J. Fraser & K. G. Tobin (Eds.), *International Handbook of Science Education*, Part II. Dordrecht: Kluwer, 1047-1066.
- Epstein, I. R., Kustin, K., De Kepper, P. & Orban, M. (1989). Oszillierende chemische Reaktionen. In: *Chaos und Fraktale*, Heidelberg: Spektrum, 72-81.
- Euler, M. (2000). Selbstorganisation, Strukturbildung und Wahrnehmung - Versuche mit dem singenden Rohr. *Biologie in unserer Zeit* 1(30), 45-53.
- Falconer, K. (1990). *Fraktale Geometrie*. Heidelberg: Spektrum.
- Fetterman, D. M. (Ed.) (1988). *Qualitative approaches to evaluation in education*. New York: Praeger.
- Fischer, H. E., Reyer, T., Bos, W. & Höllrich, N. (2002). Unterrichtsgestaltung und Lernerfolg im Physikunterricht. *Zeitschrift für Pädagogik*, 48, 124-138.
- Fischler, H. (1995). Vorstellungen vom Lehren und Lernen: Entwicklungen und Verformungen. In: H. Kemper & E. Rau (Hrsg.), *Formation und Transformation - Spuren in Bildungsforschung und Bildungspolitik*. Frankfurt a. M.: Peter Lang, 91-119.
- Fischler, H. (2001). Verfahren zur Erfassung von Lehrer-Vorstellungen zum Lehren und Lernen in den Naturwissenschaften, *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 7, 105-120.
- Frey, K. (1975). Rechtfertigung von Bildungsinhalten im elementaren Diskurs: Ein Entwurf für den Bereich der didaktischen Rekonstruktion. In: R. Künzli (Hrsg.), *Curriculumentwicklung - Begründung und Legitimation*. München: Kösel, 103-129.
- Friege, G. & Lind, G. (2005, im Druck). Begriffsnetze und Wissensqualität. *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*.
- Gerstenmaier, J. & Mandl, H. (1995). Wissenserwerb unter konstruktivistischer Perspektive. *Zeitschrift für Pädagogik* 41 (6), 867-888.
- Gläser, J. & Laudel, G. (2004). *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse*. Wiesbaden: VS-Verlag für Sozialwissenschaften.
- Glaserfeld, E. von (1989). Cognition, construction of knowledge, and teaching. *Synthese* 80, 121-140.
- Gräber, W. & Bolte, C. (Eds.) (1997). *Scientific Literacy - an international symposium*. Kiel: IPN.
- Gropengießer, H. & Kattmann, U. (1993). Didaktische Rekonstruktion zentraler biologischer Begriffe am Beispiel "Sehen". In: H. Kühnemund & H. D. Frey (Hrsg.), *Lebenswirklichkeit und Wissenschaft*, Tübingen: DIFF, 60-65.
- Gropengießer, H. & Kattmann, U. (1994). Konzepte zur visuellen Perzeption: Schülervorstellung zum Sehen. In: H. Bayrhuber (Hrsg.), *Interdisziplinäre Themenbereiche und Projekte im Biologieunterricht*, Kiel: IPN, 246-250.
- Gropengießer, H. (1997). Schülervorstellungen zum Sehen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 3(1), 71-87.
- Gropengießer, H. (2001). *Didaktische Rekonstruktion des Sehens*. Oldenburg: Didaktisches Zentrum.
- Gropengießer, H. (2008). Qualitative Inhaltsanalyse in der fachdidaktischen Lehr-Lernforschung. In P. Mayring & M. Glaeser-Zikuda (Hrsg.), *Die Praxis der Qualitativen Inhaltsanalyse*. Weinheim: Beltz, 172-189.
- Gruner + Jahr (Hrsg.) (1990). *Geo Wissen: Chaos und Kreativität*, Hamburg.
- Guba, E. & Lincoln, Y. (1989). *Fourth generation evaluation*. Beverly Hills, CA: Sage.

- 
- Gürtler, J. & Dorschner, J. (1993). Das Sonnensystem, Leipzig.
- Gustafson, B. J. & Rowell, P. M. (1995). Elementary preservice teachers: Constructing conceptions about learning science, teaching science and the nature of science. *International Journal of Science Education*, 17(5), 589-605.
- Haag, G. (1996). Modelle zur Stabilisierung chaotischer Prozesse in der Ökonomie. In: G. Küppers (Hrsg.), *Chaos und Ordnung*, Ludwigsburg: Reclam.
- Haken, H. (1977). *Synergetics - an introduction*. Berlin: Springer.
- Haken, H. (1983). *Synergetik - eine Einführung*. Berlin: Springer.
- Haken, H. (1989). Information and self-organization: A macroscopic approach to complex systems. *American Journal of Physics* 57, 958-959.
- Hand, B. (1996). Diagnosis of teachers' knowledge bases and teaching roles when implementing constructivist teaching/learning approaches. In: D. Treagust, R. Duit & B. Fraser (Eds.), *Improving teaching and learning in science and mathematics*. New York: Teacher College Press, 212-221.
- Harlen, W. (2001). The assessment of Scientific Literacy in the OECD/PISA Project. In: H. Behrendt, H. Dahncke, R. Duit, W. Gräber, M. Komorek, A. Kross & P. Reiska (Eds.), *Research in Science Education - Past, Present, and Future Dordrecht (The Netherlands)*: Kluwer, 49-60.
- Hedrich, R. (1996). Mathematische Stabilitätskonzepte. *Praxis der Naturwissenschaften* 45(1), 18-21.
- Heimann, P., Otto, G. & Schulz, W. (1969). *Unterricht, Analyse und Planung*. Hannover: Schroedel.
- Heisenberg, W & Bohr, N. (1963). *Die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie*. Stuttgart: Battenberg.
- Helmke, A. (2012). *Unterrichtsqualität und Lehrerprofessionalität. Diagnose, Evaluation und Verbesserung des Unterrichts*. Seelze: Klett-Kallmeyer.
- Henning, K. & Kutscha, S. (1984). Mangelnde Ursachen oder mangelndes Wissen? Zum Begriff Zufall in der Philosophie und Naturwissenschaft. *Naturwissenschaften*, 71, 493-499.
- Hewson, P. W. & Hewson, M. G. (1992). The status of students' conceptions. In: R. Duit, F. Goldberg, & H. Niedderer (Eds.), *Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies*. Kiel: IPN, 59-73.
- Heymann, H. W. (1990). Überlegungen zu einem zeitgemäßen Allgemeinbildungskonzept. In: *Materialien und Studien Bd. 37*.
- Huibregtse, I., Korthagen, F. & Wubbels, T. (1994). Physics teachers' conceptions of learning, teaching and professional development. *International Journal of Science Education*, 16(5), 539-561.
- Kanitscheider, B. (1994). Philosophische Reflexionen über Chaos und Ordnung. In: H.-O. Peitgen et al. (Hrsg.), *Chaos - Bausteine der Ordnung*. Stuttgart: Klett-Kotta, 1-33.
- Katscher, T. (1995). *Didaktische Untersuchungen zum Fraktalbegriff. Hausarbeit im Rahmen der ersten Staatsprüfung/LA Gymnasium*, Kiel: IPN.
- Katscher, T., Komorek, M. & Duit, R. (1996). *Didaktische Untersuchungen zum Fraktalbegriff*. In: H. Behrendt (Hrsg.), *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Vorträge der GDGP-Tagung in Dresden 1995*. Alsbach: Leuchtturm, 258-260.
- Kattmann, U (2004). *Unterrichtsreflexion im Rahmen der Didaktischen Rekonstruktion. Seminar - Lehrerbildung und Schule*, 10(3), 40-49.
- Kattmann, U. & Gropengießer, H. (1996). Modellierung der Didaktischen Rekonstruktion. In: R. Duit & Ch. von Rhöneck (Hrsg.), *Lernen in den Naturwissenschaften*. Kiel: IPN, 180-204.
- Kattmann, U. (1998). Was können Fraktale zum Verständnis der Organismen beitragen? In: M. Komorek, R. Duit, & M. Schnegelerberger (Hrsg.), *Fraktale im Unterricht - Zur didaktischen Bedeutung des Fraktalbegriffs*. Kiel: IPN, 309-323.

- Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H. & Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion - Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 3(3), 3-18.
- Katu, N., Lunetta, V. N. & van den Berg, E. (1993). Teaching experiment methodology. Paper presented at the "Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics" Ithaca, New York.
- Kitaigorodsky, A. J. (1984). *Mixed Crystals*. Berlin: Springer.
- Kittel, C. (1999). *Einführung in die Festkörperphysik*, München.
- Klafki, W. (1963). *Das pädagogische Problem des Elementaren und die Theorie der kategorialen Bildung*. Weinheim: Beltz.
- Klafki, W. (1969). Didaktische Analyse als Kern der Unterrichtsvorbereitung. In: H. Roth & A. Blumental (Hrsg.), *Auswahl, Didaktische Analyse*, Hannover: Schroedel, 5-34.
- Klafki, W. (1970). Der Begriff Didaktik und der Satz vom Primat der Didaktik im Verhältnis zur Methodik. In: W. Klafki et al., (Hrsg.), *Funkkolleg Erziehungswissenschaften*, Frankfurt/Main: Fischer, 55 ff.
- Klafki, W. (1995). "Schlüsselprobleme" als thematische Dimension eines zukunftsorientierten Konzepts von "Allgemeinbildung". *Die Deutsche Schule*, 3. Beiheft, 9-14.
- Klafki, W. (1996). *Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik. Zeitgemäße Allgemeinbildung und kritisch-konstruktive Didaktik*. 5. Auflage. Weinheim und Basel: Beltz.
- Klein, S. (2004). *Alles Zufall*. Reinbek: Rowohlt.
- Klieme, E., Avenarius, H., Blum, W., Döbrich, P., Gruber, H., Prenzel, M., Reiss, K., Riquarts, K., Rost, J., Tenorth, H.-E. & Vollmer, H. J. (2003) (Hrsg.). *Zur Entwicklung nationaler Bildungsstandards - Eine Expertise*. Bonn: BMBF.
- KMK (Hrsg.) (2004). *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Bildungsabschluss*. Beschluss der Kultusministerien vom 16.12.2004.
- Koch, G. (1994). *Kausalität, Determinismus und Zufall in der wissenschaftlichen Naturbeschreibung*. Berlin: Duncker und Humboldt.
- Kolmogorov, A. V. (1954). On conservation of conditional-periodic motion for a small change in Hamilton's Function. *Dokl. Akad. Nauk. USSR* 98, S. 525ff.
- Komorek, M. & Duit, R. (2004a). Fraktale als Zugang zur geordneten Unordnung. In: H. Gropengießer, A. Janßen-Bartels & E. Sander (Hrsg.), *Lehren fürs Leben*. Köln: Aulis, 151-162.
- Komorek, M. & Duit, R. (2004b). The teaching experiment as a powerful method to develop and evaluate teaching and learning sequences in the domain of non-linear systems. *International Journal of Science Education* 26(5), 619-633.
- Komorek, M. & Grosse, S. (1996). Schülervorstellungen zum Laplaceschen Dämon. In: H. Behrendt (Hrsg.), *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Vorträge der GDGP-Tagung in Dresden 1995*. Alsbach: Leuchtturm, 255-257.
- Komorek, M. & Kattmann, U. (2008). The Model of Educational Reconstruction. In S. Mikelskis-Seifert, U. Ringelband & M. Brückmann (Hrsg.), *Four Decades of Research in Science Education - from Curriculum Development to Quality Improvement*. Münster: Waxmann, 171-188.
- Komorek, M. & Nentwig, P. (2005). PISA 2006 - Naturwissenschaftliche Kompetenzen und Fertigkeiten im Vergleich. Beitrag zur Jahrestagung der GDGP in Heidelberg, 2004. Münster: Lit.
- Komorek, M. & Prediger, S. (Hrsg.) (2013). *Der lange Weg zum Unterrichtsdisein - Zur Begründung und Umsetzung fachdidaktischer Forschungs- und Entwicklungsprogramme* Münster: Waxmann.
- Komorek, M. (1992). *Hochaufgelöste Röntgenbeugungsuntersuchung der Supersatelliten des Labradorits*. Diplomarbeit, Kiel: Universität Kiel.
- Komorek, M. (1998). *Elementarisierungen und Lernprozesse im Bereich des deterministischen Chaos*. Dissertation. Kiel: IPN.

- 
- Komorek, M. (1999). Lernprozessstudie zum deterministischen Chaos. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 5(3), 3-22.
- Komorek, M. (2004a). "Physik im Kontext" - ein Programm zur Förderung der naturwissenschaftlichen Grundbildung durch Physikunterricht. In: A. Pitton (Hrsg.), *Chemie- und physikdidaktische Forschung und naturwissenschaftliche Bildung*. Münster: Lit, 215-217.
- Komorek, M. (2004b). *Die nichtlineare Physik in der fachdidaktischen Literatur. Eine Bibliographie*. Kiel: IPN.
- Komorek, M., Duit, R. & Schnegelberger, M. (Hrsg.) (1998). *Fraktale im Unterricht - Zur didaktischen Bedeutung des Fraktalbegriffs*. IPN-Materialien. Kiel: IPN.
- Komorek, M., Duit, R. & Stadler, H. (2004). Ein chaotisches System erklären. In: Gropengießer et al. (Hrsg.), *Naturwissenschaftliches Arbeiten*. Seelze-Velber: Friedrich, 100-103.
- Komorek, M., Duit, R., Bücker, N. & Naujack, B. (1999). Learning process studies in the field of fractals. In M. Komorek et al. (Eds.), *Research in Science Education - Past, Present, and Future. Proceedings of the Second International Conference of the European Science Education Research Association (ESERA)*. Vol. 1, 131-133.
- Komorek, M., Duit, R., Bücker, N. & Naujack, B. (2001). Learning process studies in the field of fractals. In: H. Behrendt, H. Dahncke, R. Duit, W. Gräber, M. Komorek, A. Kross & P. Reiska (Eds.), *Research in Science Education - Past, Present, and Future*. Dordrecht (The Netherlands): Kluwer, 95-100.
- Komorek, M., Fischer, A. & Moschner, B. (2013). Fachdidaktische Strukturierung als Grundlage für Unterrichtsdesigns. In M. Komorek & S. Prediger (Hrsg.), *Der lange Weg zum Unterrichtsdesign*, Münster: Waxmann, 43-62.
- Komorek, M., Stavrou, D. & Duit, R. (2002a). Nichtlineare Physik in der Schule: Kooperation von Schulpraxis und fachdidaktischer Forschung. In: R. Brechel (Hrsg.), *Zur Didaktik der Physik und Chemie - Probleme und Perspektiven. Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/ Chemie in Dortmund, September 2001*. Alsbach: Leuchtturm, 269-271.
- Komorek, M., Stavrou, D. & Duit, R. (2002b). Unterricht zur nichtlinearen Physik: Ergebnis einer Kooperation von Schulpraxis und fachdidaktischer Forschung. In: V. Nordmeier (Hrsg.), *Vorträge zur Physikertagung der DPG, CD zur Tagung in Bremen, März 2001*. Berlin: Lehmanns Fachbuchhandlung, o.S.
- Komorek, M., Stavrou, D. & Duit, R. (2003). Nonlinear physics in upper physics classes: Educational Reconstruction as a frame for development and research in a study of teaching and learning basic ideas of non-linearity. In: D. Psillos, P. Kariotoglou, V. Tselfes, E. Hatzikraniotis, G. Fassoulopoulos & M. Kallery (Eds.), *Science Education Research in the Knowledge-Based Society*. Dordrecht (The Netherlands): Kluwer, 269-276.
- Komorek, M., Vogt, H. & Duit, R. (2003). Moderne Konzepte von Ordnung verstehen. In: A. Pitton (Hrsg.), *Außerschulisches Lernen in Physik und Chemie - Jahrestagung der GDGP in Flensburg 2002*, Münster: LIT, 296-298.
- Komorek, M., Wendorff, L. & Duit, R. (2002). Expertenbefragung zum Bildungswert der nichtlinearen Physik. *Zeitschrift für die Didaktik der Naturwissenschaften* 8, 33-51.
- König, R. (1974). *Handbuch der empirischen Sozialforschung*. Stuttgart: Enke.
- Korneck, F. (1998). *Die Strömungsdynamik als Zugang zur nichtlinearen Dynamik - Entwicklung, Erprobung und Evaluation einer Unterrichtsreihe für die gymnasiale Oberstufe und die Lehrerbildung*. Dissertation. Frankfurt am Main: Johann Wolfgang Goethe-Universität.
- Korneck, F. (1999). Konzeption, Erprobung und Evaluation einer Unterrichtsreihe zur Strömungsdynamik und nichtlinearen Dynamik. Ein - vorläufiger - Abschlussbericht. In: R. Brechel (Hrsg.), *Zur Didaktik der Physik und Chemie - Probleme und Perspektiven. Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/ Chemie in Essen, September 1998*. Alsbach: Leuchtturm, 259-261.

- Korneck, F. (2001). Chaos – Fraktale – Strukturen, Von den Schwierigkeiten die nichtlineare Dynamik zu den Schülern zu bringen. In: V. Nordmeier (Hrsg.), Tagungs-CD zur Frühjahrstagung 2001 der DPG, Fachverband Didaktik der Physik, Bremen, o.S.
- Kraynova, A. (2011). Didaktische Rekonstruktion der Nanophysik. BzDR-Reihe. Oldenburg: Didaktisches Zentrum.
- Krohn, D. (1998). Theorie und Praxis des Sokratischen. In: K. R. Lohmann & T. Schmidt (Eds.), Akademische Philosophie zwischen Anspruch und Erwartungen. Frankfurt a.M.: Suhrkamp, 119-132.
- Krüger, A. (1995). Nichtlineare Dynamik im Leistungskurs Physik. In: H. Behrendt (Hrsg.), Zur Didaktik der Physik und Chemie - Beiträge zur Jahrestagung der GDGP in Freiburg, 1994. Alsbach: Leuchtturm, 331-333.
- Krüger, A., Siemsen, F., Reif, U. H. F. & Martienssen, W. (1996). Das getriebene Pendel. Praxis der Naturwissenschaften - Physik, 45(1), 29-35.
- Kuhn, T. S. (1978). Zur Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Küpker, H.-G., Backhaus, U. & Schlichting, H. J. (1989). Experimente mit dem Wasserrad. In: W. Kuhn (Hrsg.), Didaktik der Physik Vorträge. Gießen: Gahmig Druck, 269-274.
- Küppers, G. (Hrsg.) (1996). Chaos und Ordnung, Formen der Selbstorganisation in Natur und Gesellschaft, Ludwigsburg: Reclam.
- Lamnek, S. (2005). Qualitative Sozialforschung. 4. Auflage. Weinheim: Beltz.
- Laplace, P. S. de (1886). Philosophischer Versuch über die Wahrscheinlichkeiten. Übersetzung von Schwaiger. Leipzig: Duncker und Humboldt.
- Lauwerier, H. (1992). Fraktale verstehen und selbst programmieren. Hückelhoven: Rita Wittig Fachbuchverlag.
- Lave, J. (1991). Situated learning in communities of practice. In: L. B. Resnick, J. M. Levine & S. D. Teasley (Eds.), Perspectives on socially shared cognition Washington, DC: American Psychological Association, 63-82.
- Leach, J., Driver, R., Millar, R. & Scott, P. (1997). A study of progression in learning about 'the nature of science': issues of conceptualisation and methodology. International Journal of Science Education, 19(2) 147-166.
- Lederman, N. G. & Zeidler, D. L. (1987). Science teachers' conceptions of science: Do they really influence teaching behavior? Science Education, 71(5), 721-734.
- Lederman, N. G. (1992). Students' and teachers' conceptions of the nature of science: A review of the research. Journal of Research in Science Teaching 29(4), 331-359.
- Lederman, N. G. (1995). The influence of teachers conceptions of the nature of science on classroom practice: The story of five teachers. In: F. Finley, D. Allchin, D. Rhees & S. Fifield (Eds.), Proceedings of the "Third international history, philosophy and science teaching conference", Minneapolis, MN: University of Minnesota, 656-663.
- Leisen, J. (2000). Nichtlineare dynamische Systeme und Chaos. Handreichung zum neunten Lehrplan Physik in der SII, PZ-Information 3/2000, Bad Kreuznach: Pädagogisches Zentrum Rheinland-Pfalz.
- Lorenz, E. N. (1993). The essence of chaos. Seattle: University of Washington.
- Lück, W. van (1994). Lernen: Selbstorganisation und Konstruktion - Chaos und Ordnung. Computer und Unterricht, 14, 28-33.
- Mandelbrot, B. (1991). Die fraktale Geometrie der Natur. Basel: Birkhäuser.
- Martienssen, W. & Krüger, U. (1991). Nichtlineare Dynamik. Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt.
- Martienssen, W. (1989). Gesetz und Zufall in der Natur. In: W. Gerok, H. Haken, H. zur Hausen, W. Nachtigall, H. W. Roesky, H. Nöth & H. Gibian. (Hrsg.), Ordnung und Chaos in der unbelebten und belebten Natur. Verhandlungen der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte.

- 
- Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 77-99.
- Marx, R. W., Freeman, J. G. Krajcik, J. S. & Blumenfeld, P. C (1998). Professional development of science teachers. In: B. J. Fraser & K. B. Tobin (Eds.), *International Handbook of Science Education*, part 2. Dordrecht (The Netherlands): Kluwer, 667-680.
- Mayring, P. (2002). *Einführung in die qualitative Sozialforschung*. Weinheim: Beltz.
- Mayring, P. (2010). *Qualitative Inhaltsanalyse*. Weinheim: Beltz.
- McComas, W., Clough, M., & Almazroa, H. (1998). The role and character of the nature of science. In W. F. McComas (Ed.) *The Nature of Science in Science Education: Rationales and Strategies*, Dordrecht (The Netherlands): Kluwer, 3-39.
- Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg (Hrsg.) (2004). *Bildungspläne der allgemein bildenden Schulen - Bildungsplanreform 2004*. Stuttgart: Land Baden-Württemberg.
- Mittelstraß, J. (Hrsg.) (1996). *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie*, Band 4. Stuttgart: Metzler.
- MNU Deutscher Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts e.V. (2001). *Physikunterricht und naturwissenschaftliche Bildung - aktuelle Anforderungen. Empfehlungen zur Gestaltung von Lehrplänen bzw. Richtlinien für den Physikunterricht*. Köln: Dümmler.
- Monod, J. (1971). *Zufall und Notwendigkeit - Philosophische Fragen der modernen Biologie*. München: Piper.
- Morfill, G. E. & Schmidt, G. (1994). Komplexitätsanalyse in der Kardiologie: Fahndung nach Frühzeichen des plötzlichen Herztodes. *Physikalische Blätter* 50(2), 156-160.
- Müller, C. T. (2004). *Subjektive Theorien und handlungsleitende Kognitionen von Lehrern als Determinanten schulischer Lehr-Lern-Prozesse im Physikunterricht (zugl. Diss.)*. Berlin: Logos.
- Müller, C. T., Mikelskis-Seifert, S., Duit, R., Euler, M., Friege, G. & Komorek, M. (2005). *Physik im Kontext - ein Programm zur Förderung der naturwissenschaftlichen Grundbildung durch Physikunterricht*. DPG-Frühjahrestagung Didaktik der Physik 2004 in Düsseldorf. Tagungs-CD, o.S.
- Naini, A. & Bruhn, J. (1996). Schulversuche zur Selbstorganisation - Musterbildung in der Natur. In: H. Behrendt (Hrsg.), *Didaktik der Physik und Chemie. Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Chemie und Physik in Dresden*. Alsbach: Leuchtturm, 279-284.
- Naujack, B. (1997). *Empirische Untersuchungen zum Unterricht über den Fraktalbegriff. Hausarbeit im Rahmen der ersten Staatsprüfung für das Lehramt am Gymnasium*, Kiel: IPN.
- Naujack, B., Komorek, M. & Duit, R. (1998). Mikrounterricht über Fraktale. In: H. Behrendt (Hrsg.), *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Vorträge zur GDGP-Jahrestagung 1997 in Potsdam*, Alsbach: Leuchtturm, 301-303.
- Nawrath, D. & Komorek, M. (2013) Kontextorientierung aus Sicht von Physiklehrkräften. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 19, 235-259.
- Nawrath, D. (2010). *Kontextorientierung: Rekonstruktion einer fachdidaktischen Konzeption für den Physikunterricht*. BzDR-Reihe. Oldenburg: Didaktisches Zentrum.
- Nelson, D. R. (1989). Quasikristalle. In: *Chaos und Fraktale*, Heidelberg: Spektrum, 154-163.
- Nemirovsky, R. (1993). Students making sense of chaotic behavior. *Interactive Learning Environments*. 3, 151-175.
- Nicolis, G. & Prigogine, I. (1987). *Die Erforschung des Komplexen*, München: Piper.
- Nordmeier, V. & Schlichting, H.-J. (1996). Auf der Suche nach Strukturen komplexer Phänomene. *Praxis der Naturwissenschaften Physik* 45, 294.
- Nordmeier, V. (1994). Examensarbeiten vorgestellt - Teil 1: Fraktale in der Physik. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik* 43 (2), S. 28-32.
- Nordmeier, V. (1998). *Fraktale in der Physik - Einfache Experimente für den Physikunterricht*. In:

- M. Komorek, R. Duit & M. Schnegelberger (Hrsg.), *Fraktale im Unterricht - Zur didaktischen Bedeutung des Fraktalbegriffs*. IPN Materialien. Kiel: IPN, 183-202.
- Northfield, J. R., Gunstone, R. & Erickson, G. (1996). A constructivist perspective on science teacher education. In: D. Treagust, R. Duit & B. Fraser (Eds.), *Improving teaching and learning in science and mathematics*. New York: Teacher College Press. 201-211.
- Novak, J. D. (1998). *Learning, creating, and using knowledge: Concept Maps als facilitative tools in schools and corporations*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- OECD (1999). *Measuring Student Knowledge and Skills: A New Framework for Assessment*. Paris: OECD.
- Ornstein, D. S. & Weiss, B. (1991). Statistical properties of chaotic systems. *Bulletin of the American Mathematical Society* 24, 11-116.
- Oser, F. & Baeriswyl, F. J. (2001). *Choreographies of teaching: Bridging instruction to learning*. In: V. Richardson (Ed.), *AERA's handbook of research on teaching - 4th edition*. Washington: American Educational Research Association (AREA).
- Oser, F. & Patry, J.-L. (1994). Sichtstrukturen und Basismodelle des Unterrichts: Über den Zusammenhang von Lehren und Lernen unter dem Gesichtspunkt psychologischer Lernverläufe. In: R. Olechowski & B. Rollett (Hrsg.), *Theorie und Praxis - Aspekte empirisch-pädagogischer Forschung - quantitative und qualitative Methoden*. Frankfurt a. M.: Lang, 138-146.
- Pahl, E.-M. & Komorek, M. (2013). „Energie“ im Sach- und im Physikunterricht. Vorstellungen von Lehrpersonen vom Konzept der Energie und seiner Vermittlung im Unterricht. In M. Komorek & S. Prediger (Hrsg.) *Der lange Weg zum Unterrichtsdesign*, Münster: Waxmann, 237-256
- Patry, J.-L. & Oder, F. (1994). Untersuchungen zu den Basismodellen des Unterrichts: Erste Ergebnisse. In: R. Olechowski & B. Rollett (Hrsg.), *Theorie und Praxis - Aspekte empirisch-pädagogischer Forschung - quantitative und qualitative Methoden*. Frankfurt a. M.: Lang, 147-154.
- Peitgen, H.-O. & Richter, P. H. (1986). *The beauty of fractals*. Heidelberg: Springer.
- Peitgen, H.-O., Jürgens, H. & Saupe, D. (1992). *Bausteine des Chaos - Fraktale*. Stuttgart: Klett-Kotta.
- Peitgen, H.-O., Jürgens, H. & Saupe, D. (1994). *Chaos - Bausteine der Ordnung*. Stuttgart: Klett-Kotta.
- Piaget, J. (1969) *The Child's Conception of Physical Causality*. Totowa, New Jersey: Littlefield.
- Poincaré, H. (1899). *Les méthodes nouvelle de la mécanique céleste III*. Gauthiers-Villards, Paris.
- Prawat, R. S. (1992). Teacher's beliefs about teaching and learning: A constructivist perspective. *American journal of education*, 5, 354-395.
- Prediger, S., Komorek, M., Fischer, A., Hinz, R., Hußmann, S., Moschner, B. Ralle, B. & Thiele, J. (2013). *Der lange Weg zum Unterrichtsdesign. Zur Begründung und Umsetzung fachdidaktischer Forschungs- und Entwicklungsprogramme*. In M. Komorek & S. Prediger (Hrsg.), *Der lange Weg zum Unterrichtsdesign*, Münster: Waxmann, 9-24.
- Prenzel, M. & Doll, J. (Hrsg.) (2002). *Bildungsqualität von Schule: Schulische und außerschulische Bedingungen mathematischer, naturwissenschaftlicher und überfachlicher Kompetenzen*. 45. Beiheft der Zeitschrift für Pädagogik. Weinheim: Beltz.
- Prenzel, M., Duit, R., Euler, M. & Lehrke, M. (1999). *Lehr-Lernprozesse im Physikunterricht: Eine Videostudie*. Antrag an die DFG im Rahmen des Schwerpunktprogramms BiQua. Kiel: IPN.
- Prenzel, M., Duit, R., Euler, M., Lehrke, M. & Seidel, T. (Hrsg.) (2001). *Erhebungs- und Auswertungsverfahren der DFG-Projekts "Lehr-Lern-Prozesse" im Physikunterricht - eine Videostudie*. Kiel: IPN.
- Prenzel, M., Seidel, T., Lehrke, M., Rimmel, R., Duit, R., Euler, M., Geiser, H., Hoffmann, L., Müller, C. & Widodo, A. (2002). *Lehr-Lern-Prozesse im Physikunterricht - eine Videostudie*.

- 
- Zeitschrift für Pädagogik, 48, 139-156.
- Prenzel, M. (2000). Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts: Ein Modellprogramm von Bund und Ländern. *Unterrichtswissenschaften* 28(2), 103-126.
- Prigogine, I. & Stengers, I. (1993). *Dialog mit der Natur, Neue Wege naturwissenschaftlichen Denkens*, München: Piper.
- Prigogine, I. (1985). *Vom Sein zum Werden, Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften*, München: Piper.
- Rißmann, J. (2004). *Lehrerhandeln verstehen - Ein konstruktivistisches Lehrertraining zum verständnisvollen Lernen*. Jena: IKS Garamond.
- Roth, W.-M. (1995). *Authentic school science: Knowing and learning in open-inquiry laboratories*. Dordrecht (The Netherlands): Kluwer.
- Roth, W.-M. (1995). Ethnographische Studien zum offenen Experimentieren im Physikunterricht. *Unterrichtswissenschaft - Zeitschrift für Lernforschung*, 23, 146-161.
- Russel, T. & Munby, H. (Eds.) (1992). *Teachers and teaching. From classroom to reflection*. London: Falmer Press.
- Russel, T. (1993). Learning to teach science: constructivism, reflection, and learning from experience. In: K. Tobin (Ed.), *The practice of constructivism in science education*. Washington DC: AAAS Press, 274-258.
- Sander, L. M. (1989). Fraktales Wachstum. In: *Chaos und Fraktale*. Heidelberg: Spektrum, 120-127.
- Schaefer, G. (Hrsg.) (1984). *Information und Ordnung*, Köln: Aulis.
- Schecker, H., Bethge, T. (1998). Der Bildungswert der Naturwissenschaften: Über Versuche, mehr als nur Fächer zu unterrichten. *Die Deutsche Schule*, 90(3), 305-320.
- Schecker, H., Bethge, T., Breuer, E., Dwingelo-Lütten, R. von, Langensiepen, B., Graf, H.-U. & Gropengießer, I. (1996). *Naturwissenschaftlicher Unterricht im Kontext allgemeiner Bildung*. [http://www.physik.uni-bremen.de/physics\\_education/download/index.html](http://www.physik.uni-bremen.de/physics_education/download/index.html)
- Schlichting, H.-J., Backhaus, U., & Küpker, H. G. (1991). Chaos beim Wasserrad - ein einfaches Modell für das Lorenz-System. *Physik und Didaktik*, 19(3), 196-219.
- Schlick, M. (1948). *Gesetz, Kausalität und Wahrscheinlichkeit*. Wien: Gerold.
- Schroeder, M. (1994). *Fraktale, Chaos und Selbstähnlichkeit*. Heidelberg: Spektrum.
- Schuster, H. G. & Just, W. (2005). *Deterministisches Chaos - an introduction*. Berlin: Wiley-VHC.
- Schwarzer, R. (1998). Self-Science: Das Trainingsprogramm zur Selbstführung von Lehrern. *Unterrichtswissenschaft*, 26(2), 158-172.
- Scott, P., Asoko, H. & Driver, R. (1992). Teaching for conceptual change: A review of strategies. In: R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer (Eds.), *Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies*. Kiel: IPN, 310-329.
- Seidel, T. (2003). *Lehr-Lernskripte im Unterricht*. Münster: Waxmann.
- Seidel, T., Prenzel, M., Duit, R., Euler, M., Geiser, H., Hoffmann, L., Lehrke, M., Müller, C. T. & Rimmele, R. (2002). "Jetzt bitte ich alle nach vorn zu schauen!" - Lehr-Lernskripts im Physikunterricht und damit verbundene Bedingungen für individuelle Lernprozesse. *Unterrichtswissenschaften*, 30(1), 52-77.
- Shulman, L. S. (1987). Knowledge and Teaching: Foundations of the New Reform. *Harvard Educational Review* 57, 1-22.
- Sill, H.-D. (1993). Zum Zufallsbegriff in der stochastischen Allgemeinbildung. *Zentralblatt für Didaktik der Mathematik*, 25(2), 84-88.
- Smith, J. P., diSessa, A. A. & Roschelle, J. (1992). Misconceptions reconceived: A constructivist analysis of knowledge in transition. *The Journal of the Learning Sciences* 3, 115-163.
- Stavrou, D. (2004). Das Zusammenspiel von Zufall und Gesetzmäßigkeiten in der nichtlinearen

- Dynamik. Didaktische Analyse und Lernprozesse. Berlin: Logos.
- Stavrou, D., Komorek, M. & Duit, R. (2002). Determinism and Chance in a Study on Teaching Nonlinear Systems. Paper presented at the 3rd PanHellenic Conference on Didactics of Science and the Application of New Technologies in Education, Rethymno, Greece, May 2002.
- Stavrou, D., Komorek, M. & Duit, R. (2003). Schülervorstellungen über das Wechselspiel von Determinismus und Zufall. In: A. Pitton (Hrsg.), Außerschulisches Lernen in Physik und Chemie. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Münster: LIT, 299-301.
- Stavrou, D., Komorek, M. & Duit, R. (2004). An empirical study for teaching the interplay of determinism and chance in non-linear systems. In: Tselfes, V., Kariotoglou, P. & Patsadakis, M. (Eds.), Natural Sciences: Teaching, Learning & Education. Proceedings of the 4th National Conference, Athens, Nov. 2004, Vol. 1, Athens: National and Kapodistrian University of Athens, 176-182.
- Stawinski, W. (1993). Problemy dydaktycznej transformacji wiedzy biologicznej. Uniwersitet Gdanski: Zeszyty Naukowe - Biologia 10, 163-180.
- Steffe, L. P. & D'Ambrosio, B. (1996). Using teaching experiments to enhance understanding of students' mathematics. In: D. Treagust, R. Duit & P. Fraser (Eds.), Improving teaching and learning in science and mathematics. New York: Teacher College Press, 65-76.
- 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. Boston: Birkhaeuser, 469-471.
- Stehlik, S. (2005). Empirische Untersuchung von Schülervorstellungen in der nichtlinearen Physik anhand eines Projektes zum chaotischen Wasserrad. Hausarbeit im Rahmen der ersten Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Sternemann, W. (1995). Leistungskurs Diskrete Dynamik. Werkstattbericht 11. Soest: LSW.
- Stracke, I. (2004). Einsatz computerbasierter Concept Maps zur Wissensdiagnose in der Chemie. Münster: Waxmann.
- Tabachnick, B. R. & Zeichner, K. M. (1999). Idea and action: Action research and the development of conceptual change teaching of science. *Science Education*, 83(3), 309-322.
- Taylor, J. A. & Dana, T. M. (2003). Secondary school physics teachers' conceptions of scientific evidence: An exploratory case study. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(8), 721-736.
- Thomas, R. (1996). MagPen - zum didaktischen Potential eines Simulationsprogramms. Erste Staatsexamensarbeit für das höhere Lehramt. Kiel: IPN.
- Thomas, R., Duit, R. & Komorek, M. (1997). MagPen - eine Computersimulation zum chaotischen Magnetpendel. Vorträge zur Physikertagung in Berlin 1997. Deutsche Physikalische Gesellschaft, 300-303.
- 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.
- Thompson, J. M. T. & Stewart, H. B. (1988). *Nonlinear Dynamics and Chaos, Geometrical Methods for Engineers and Scientists*, Chichester: Wiley.
- Tiemann, R., Fischer, H. E., Labusch, S. & Draxler, D. (2003). Strukturierungen von Lehr-Lernprozessen im Physikunterricht. In: A. Pitton (Hrsg.), Außerschulisches Lernen in Physik und Chemie. GDCP, Münster: Lit, 206-208.
- Tipler, P. A. & Llewellyn, R. (2003). *Moderne Physik. Lehrbuch*. München: Oldenbourg.
- Tipler, P. A., Mosca, G. & Pelte, D. (2004). *Physik*. Heidelberg: Spektrum.
- Tobin, K. (1996). Analytical and holistic approaches to research on teacher education. In: D. Treagust, R. Duit & B. Fraser (Eds.), *Improving teaching and learning in science and mathematics*. New York: Teacher College Press. 175-189.
- Tobin, K. (1999). The value of science education of teachers researching their own practice. Re-

- 
- search in *Science Education* 29(2), 159-169.
- Velarde, M. G. & Normand, C. (1989). Konvektion. In: *Chaos und Fraktale*, Heidelberg: Spektrum, 38-51.
- Vicsek, T (1992). *Fractal growth phenomena*. Singapore: World Scientific Publishing.
- Vogt, H. (2002). *Vorstellungen und Lernprozesse zu Ordnungsstrukturen im Phasenraum nichtlinearer Systeme*. Hausarbeit im Rahmen der ersten Staatsprüfung zum Lehramt an Gymnasien, Kiel: IPN.
- Wagenschein, M. (1965). *Die pädagogische Dimension der Physik*. Braunschweig: Westermann.
- Weidner, R. T. & Sells, R. L. (1982). *Elementare moderne Physik*. Wiesbaden: Vieweg.
- Weinberg, J. (1984). Didaktische Reduktion und Rekonstruktion. In: J. Kahlke & F. Kath (Hrsg.), *Didaktische Reduktion und methodische Transformation* (S. 217-247). Alsbach: Leuchtturm.
- Wendorff, L. (2001). *Expertenbefragung zum Bildungswert der nichtlinearen Physik*. Hausarbeit im Rahmen der Ersten Staatsprüfung für das höhere Lehramt Physik. Kiel: IPN.
- Wendorff, L., Komorek, M. & Duit, R. (2002). *Expertenbefragung zum Bildungswert der nichtlinearen Physik*. In: R. Brechel (Hrsg.), *Zur Didaktik der Physik und Chemie - Vorträge zur GD-CP-Jahrestagung 2001 in Dortmund*, Alsbach: Leuchtturm, 120-122.
- White, R. & Gunstone, R. (1992). *Probing understanding*. London: Falmer Press.
- Wilbers, J. & Duit, R. (1997). *Analogien in der Chaostheorie*. Vorträge zur Physikertagung in Berlin 1997. Deutsche Physikalische Gesellschaft, 93-98.
- Wilbers, J. & Duit, R. (2001) *On the micro-structure of analogical reasoning: The case of understanding chaotic systems*. In: H. Behrendt, H. Dahncke, R. Duit, W. Gräber, M. Komorek, A. Kross and P. Reiska (Eds.), *Research in science education - past, present, and future*, Dordrecht (The Netherlands): Kluwer, 205-210.
- Wilbers, J. (1999). *Theorie und Praxis analogiebasierter Lernprozesse im Bereich des deterministischen Chaos*. Dissertation. IPN, Kiel.
- Wilbers, J. (2001). *Heuristische Analogien und Post-festum-Analogien: Analogiebasierte Lernprozesse im Bereich des deterministischen Chaos*. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 7, 83-104.
- Windelband, W. (1870). *Die Lehren vom Zufall*. Berlin: Henschel.
- Witten, T. A. & Sander, L. M. (1981). *Diffusion-Limited Aggregation, a Kinetic Critical Phenomenon*. *Physical Review Letters*, 47(19), 1400-1403.
- Worg, R. (1993). *Deterministisches Chaos, Wege in die nichtlineare Dynamik*, Mannheim: BI-Wissenschaftsverlag.
- Zeitler, H., Neidhart, W. (1993). *Fraktale und Chaos*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.



# Anhang

## Interviewleitfaden für Eingangsinterview mit Lehrern

Themen: Determinismus, nichtlineare Physik und Unterricht dazu

*Hinweise für den Interviewer:* Mit den folgenden Fragen werden Lehrervorstellungen zu den Begriffen »Ursache« und »Wirkung«, »Determinismus«, »Zufall« und »Vorhersagbarkeit« sowie zu den Konzepten der nichtlinearen Physik erhoben.

Das Interview ist auf 60-90 min angelegt. Die Hauptfragen sind vorgegeben; vertiefende Fragen sollen Vorstellungserforschend wirken und sind je nach Situation vom Interviewer zu ergänzen; sie sollen von der folgenden Art sein:

- *Sie haben gerade den Begriff .... verwendet; was verstehen Sie darunter?*
- *Wie sind sie zu ihrer Einschätzung gekommen (eigene Überlegungen/Erfahrung/Literatur/ Berichte anderer)?*
- *Können Sie Beispiele nennen, bei denen dieser Zusammenhang deutlich wird/bei denen dieser Prozess zu beobachten ist/...?*
- *Inwiefern beeinflusst diese Sicht Ihren Physikunterricht? Wieweit thematisieren Sie diesen Zusammenhang im Physikunterricht?*

Die Verfolgung von Vorstellungen und Vertiefung von Fragen soll nur soweit geschehen, dass die Zeit reicht, um zu allen Fragen Daten zu erheben; zu weite Abschweifungen vom Leitfaden sind daher zu vermeiden.

Name (Interviewer):  
Datum/Zeit:

Name (Interviewer):

## 0 Begrüßung - Bitte, das Interview auf Tonband aufzeichnen zu dürfen

### 1 Zu den Konzepten der nichtlinearen Physik

- War nichtlineare Physik oder waren Teile davon Bestandteile ihrer Ausbildung zum Lehrer/Lehrerin? Falls ja, welche Teile?
- Haben Sie an Fortbildungen zum Thema teilgenommen und wenn ja, was waren die zentralen Aspekte?
- Aus welchen anderen Quellen haben Sie sich bislang über (Physik und speziell) nichtlineare Physik informiert?
- Welche Vorstellungen verbinden Sie mit nichtlinearer Physik (assoziiieren Sie bitte)?
- Welche Begriffe oder Konzepte kennen Sie, die man der nichtlinearen Physik zuordnen kann?
  - *Falls ausreichend Zeit vorhanden:* Können sie folgende Begriffe kurz erklären: *chaotisches Verhalten, deterministisches Chaos, Ordnung, Attraktor, Phasenraum, selbstorganisierende Systeme*; (je nach verfügbarer Zeit: *Komplexität, Zeitreihe*; Wie weit sind Sie über *Anwendungen der nichtlinearen Physik* informiert?)

### 2 Zum Unterricht über nichtlineare Physik und zum Lernen der Schüler

- Warum könnte es aus Ihrer jetzigen Sicht (und bei Ihrem jetzigen Kenntnisstand) wichtig sein, Unterricht zum Thema *nichtlineare Physik* durchzuführen? Für wie wichtig halten Sie einen solchen Unterricht?

- Welche Unterrichts-Schwerpunkte würden Sie beim ihrem jetzigen Kenntnisstand setzen? Welche Gedanken halten Sie für vermittelenswert, welche Unterrichtsmethoden für angemessen?
- Welche Schwierigkeiten, aber auch Möglichkeiten erwarten Sie beim Unterrichten des Themas (speziell in Ihrer Klasse)?
- Welche spezifischen Schwierigkeiten (Lernschwierigkeiten, Mangel an Interesse) und spezifischen Möglichkeiten (Motivation und Interesse) erwarten Sie bei der Auseinandersetzung Ihrer Schüler/allgemein von Schülern mit dem Thema?

### 3 Vorhersagbarkeit

- Wie ist es möglich, dass wir Vorgänge im Alltag und in der Physik überhaupt vorhersagen können?
  - Wovon hängt es ab, für wie weit in die Zukunft hinein man das Verhalten eines Systems bzw. einen physikalischen Vorgang vorhersagen kann? (Geben Sie möglichst Beispiele an)
  - Wodurch wird Ihrer Einschätzung nach ein physikalischer Vorgang oder Prozess prinzipiell bestimmt? Versuchen Sie, grundsätzliche Einflussgrößen zu nennen. Wie wirken diese Einflussgrößen? (Nennen Sie bitte Beispiele)
- Der französische Mathematiker Pierre Simon Marquis de Laplace (1749-1827) dachte sich im Rahmen eines Gedankenexperiments den »Laplaceschen Dämon« aus, ein Wesen mit übermenschlichen Fähigkeiten; er beschrieb es folgendermaßen (Text wird vorgelegt):

»Ein Geist, der alle Kräfte und für einen Zeitpunkt Lage und Geschwindigkeit aller Teilchen im Universum kennt und umfassend genug wäre, alle nötigen Berechnungen durchzuführen, könnte mit derselben Formel die Bewegung der größten Körper und der kleinsten Atome ausdrücken. Nichts wäre für ihn ungewiss, Zukunft und Vergangenheit lägen offen vor seinen Augen.«

Nehmen Sie bitte Stellung zur Fähigkeit des Dämons, die physikalische Zukunft exakt vorherzusagen.

  - Laplace dachte sich die Existenz des Dämons in einer mechanistischen, klassisch-physikalischen Welt. Inwiefern würden sich die Möglichkeiten des Dämons in einer Welt ändern, in der es Quantenphänomene gibt?
- Unabhängig von unserem mangelnden Wissen oder der Fähigkeit des Dämons: Wie weit ist es Ihrer Meinung nach bereits festgelegt, wie sich die physikalische Zukunft entwickelt? (Ist die Welt letztlich mechanistisch, klassisch-physikalisch oder nicht?)

### 4 Zufall

- In der Diskussion zum Thema Determinismus spielt der Begriff »Zufall« eine große Rolle; oft unterscheidet man dabei zwischen *subjektiven* und *objektiven* Zufällen.

Unter *subjektiven* Zufällen wären Ereignisse zu verstehen, die zwar strikt deterministisch ablaufen und die auf physikalische Prozesse zurückführbar sind, über deren Zustandekommen uns aber das Wissen fehlt, so dass sie uns zufällig »erscheinen«. Ein Beispiel wäre die Fallbewegung eines welken Blattes von einem Baum im Herbst.

---

Unter *objektiven* Zufällen wären Ereignisse zu verstehen, die sich nicht weiter durch physikalische Prozesse erklären lassen, sondern in gewisser Weise elementare Ereignisse darstellen; es wären Ereignisse, die man mit der Bezeichnung »echte« Zufälle fassen könnte.

Nehmen Sie bitte Stellung zur Frage, ob es die letzte Ebene der objektiven (»echten«) Zufälle in der Natur bzw. in der Naturwissenschaft gibt *oder* ob sich vermeintlich objektiv zufällige Prozesse früher oder später als subjektive Zufälle herausstellen? Gibt es Beispiele für objektiven Zufall?

- Inwiefern hat der Begriff des objektiven Zufalls für Sie etwas mit menschlicher Kreativität und Entscheidungsfreiheit zu tun?

## 5 Naturgesetze (falls Zeit reicht)

- Die beiden folgenden Aussagen stammen aus einem Gespräch im Lehrzimmer über den Zusammenhang zwischen Vorhersagbarkeit und Naturgesetzen (Text wird vorgelegt).

Der Kollege *Kenner* meint zu dem Thema:

»Angenommen man würde alle Gesetze kennen, die einen physikalischen Vorgang oder Naturvorgang bestimmen ... ich denke, dann ist die Vorhersage des weiteren Ablaufs nur eine Frage der Genauigkeit, mit der ich den jetzigen Zustand beobachten kann. Im Prinzip ist der weitere Ablauf aber eindeutig festgelegt.«

Dagegen behauptet Kollegin *Wisser*:

»Die Naturgesetze legen meiner Meinung nach den Rahmen für einen physikalischen Vorgang fest. Sie beschreiben sozusagen die Möglichkeitsraum dessen, was erlaubt ist. Innerhalb dieses Rahmens ist das Geschehen aber nicht eindeutig festgelegt. Und deswegen ist eine exakte Vorhersage prinzipiell nicht möglich - ein Beispiel wäre der Wurf eines Spielwürfels«

Beteiligen Sie sich bitte an der Diskussion und nehmen Sie Stellung. Nennen Sie bitte jeweils Beispiele und die Bedingungen, unter denen die Aussagen gelten.

- Wenn Sie der Meinung sind, dass nur eine Sichtweise richtig ist, so begründen Sie dies bitte!
- Gibt es noch andere Sichtweisen?
- Welche Gefühle, Einschätzungen oder Reaktionen wird die Erkenntnis, dass man viele Vorgänge nicht exakt oder sogar gar nicht vorhersagen kann, bei Ihren Schülern hervorrufen? Wird diese Vorstellung für die Schüler eher angenehm oder eher unangenehm sein? Ist das für Sie eine eher unangenehme oder angenehme Vorstellung?
- Aus welchen Gründen ist es Ihrer Einschätzung nach sinnvoll oder notwendig, Themen wie Determinismus, Zufall und Vorhersagbarkeit im Physikunterricht explizit zu behandeln?
- Haben Sie Fragen? Vielen Dank für Ihre Mitarbeit, Sie haben uns/mir sehr geholfen!

Texte zur Vorlage im Interview

### **Vorhersagbarkeit**

»Ein Geist, der alle Kräfte und für einen Zeitpunkt Lage und Geschwindigkeit aller Teilchen im Universum kennt und umfassend genug wäre, alle nötigen Berechnungen durchzuführen, könnte mit derselben Formel die Bewegung der größten Körper und der kleinsten Atome ausdrücken. Nichts wäre für ihn ungewiss, Zukunft und Vergangenheit lägen offen vor seinen Augen.«

Pierre Simon Marquis de Laplace (1749-1827)

### **Zufall**

Unter **subjektiven Zufällen** wären Ereignisse zu verstehen, die zwar strikt deterministisch ablaufen und die auf physikalische Prozesse zurückführbar sind, über deren Zustandekommen uns aber das Wissen fehlt, so dass sie uns zufällig »erscheinen«. Ein Beispiel wäre die Fallbewegung eines welken Blattes von einem Baum im Herbst.

Unter **objektiven Zufällen** wären Ereignisse zu verstehen, die sich nicht weiter durch physikalische Prozesse erklären lassen, sondern in gewisser Weise elementare Ereignisse darstellen; es wären Ereignisse, die man mit der Bezeichnung »echte« Zufälle fassen könnte.

### **Naturgesetze**

Der Kollege *Kenner* meint zu dem Thema: »Angenommen man würde alle Gesetze kennen, die einen physikalischen Vorgang oder Naturvorgang bestimmen ... ich denke, dann ist die Vorhersage des weiteren Ablaufs nur eine Frage der Genauigkeit, mit der ich den jetzigen Zustand beobachten kann. Im Prinzip ist der weitere Ablauf aber eindeutig festgelegt.«

Dagegen behauptet Kollegin *Wisser*: »Die Naturgesetze legen meiner Meinung nach den Rahmen für einen physikalischen Vorgang fest. Sie beschreiben sozusagen die Möglichkeitsraum dessen, was erlaubt ist. Innerhalb dieses Rahmens ist das Geschehen aber nicht eindeutig festgelegt. Und deswegen ist eine exakte Vorhersage prinzipiell nicht möglich - ein Beispiel wäre der Wurf eines Spielwürfels«

---

## Interviewleitfaden für Schüler

Name: \_\_\_\_\_ Schule/Erprobung: \_\_\_\_\_ Datum: \_\_\_\_\_ Zeit: \_\_\_\_\_

**1 Begrüßung;** die Bitte, das Interview aufzeichnen zu dürfen; Angebot des DU

**2 Im Unterricht wurde über Chaos, Zufall, eingeschränkte Vorhersagbarkeit, Instabilitäten und Ordnung gesprochen. Kannst Du bitte mit eigenen Worten sagen, zu welchen Ergebnissen Eure Überlegungen und Aktivitäten geführt haben?** (Offene Fragestellung zur Wiederholung, Rekonstruktion und als Einstieg; evtl. zeichnen lassen)

- kannst Du diesen Gedanken etwas ausführen?
- kann du das noch etwas genauer erklären
- in welcher Beziehung steht ... zu ...? was hat ... mit ... zu tun?

**3 Es wurden zwei unterschiedliche Aspekte, Verhaltensweisen, Eigenschaften von chaotischen Systemen besprochen, die zunächst etwas widersprüchlich erscheinen. (evtl.: Du hast beide Aspekte eben schon genannt). Kannst Du diese beiden Aspekte beschreiben und gegenüberstellen.**

- wie wurde im Unterricht versucht, diese Gedanken zu verdeutlichen?
- inwieweit haben Dir die Experimente, Aktivitäten und Hilfsmittel dabei geholfen?

**a) Zum Begriff »eingeschränkte Vorhersagbarkeit«** (nennen, falls vom Schüler nicht genannt)

- was ist damit gemeint?
- wie kommt sie zustande? (Verweis auf Beispiele, die vorliegen: Doppelpendel, Magnetpendel, Chaosschüssel, Würfel, Bleistift)
- was sind Instabilitäten, welchen Einfluss haben sie auf das Verhalten (des Systems)?

**b) Zu den Begriffen »Ordnung« und »Struktur«** (nennen, falls nicht genannt)

- was ist damit gemeint?
- wie entsteht diese Ordnung/Struktur allgemein und an den Beispielen (Fraktale Strukturen, viskoses Verästeln, Zinkdendrit)?
- wie kann man diese Strukturen beschreiben? (Selbstähnlichkeit, fraktal...?)
- welche Rolle spielt der Zufall bei der Entstehung?
- wie wirken Zufall und Gesetzmäßigkeit zusammen?
- wie weit ist dieser Zusammenhang im Unterricht klar geworden?
- Ausflug: Ordnungsstrukturen des Doppelpendels im Phasenraum (Computer)

**4 Begriff des »chaotischen Verhaltens«**

- wie kann man chaotisches Verhalten definieren?
- welche Kriterien braucht man?
- wie ist es mit dem Kriterium, dass »Ordnungsstrukturen« zu finden sein müssen?
- teste die Kriterien an Beispielen

**5 Konsequenzen**

- emotional (angenehme/unangenehme Überlegungen, Erkenntnisse)
- philosophisch (Entkopplung von Determinismus und Vorhersagbarkeit, Ordnung »im« Chaos, Weltbild)

**6 Verabschiedung, Bezahlung**

**Arbeitsbogen A**

***Sonnenfinsternis und Asteroiden***

Sie sehen zwei Videoausschnitte, einen über die Sonnenfinsternis im August 1999 und einen über Asteroiden in unserem Sonnensystem. Außerdem lesen Sie Texte, die sich auch mit der Frage befassen, ob unser Sonnensystem für alle Zukunft so stabil ist wie heute und ob die Planeten weiterhin ihre gleichmäßigen Bahnen um die Sonne ziehen werden. Dazu sollen Sie Fragen beantworten.

*Vorführung des ersten Videos*

**a)** Fassen Sie die wesentlichen Aussagen des Videoausschnittes über die Sonnenfinsternis 1999 und die Aussagen der Texte T1 und T2 jeweils zusammen. Machen sie sich dazu schon während der Vorführung des Videos Notizen.



*Vorführung des zweiten Videos*

**b)** Fassen sie auch die wesentlichen Aussagen des zweiten Videos über Asteroiden und die Aussagen der Texte T3 und T4 zusammen. Machen Sie sich während der Vorführung Notizen.

*Vorführung mit Pendel*

**c)** Bilden Sie jetzt Zweiergruppen und gleichen Sie die Ergebnisse ihrer Zusammenfassungen ab.

**d)** In den Videos und in den Texten zeigt unser Planetensystem zwei Verhaltensweisen in Bezug auf die Möglichkeiten der Vorhersage von Vorgängen im Planetensystem. Diese Verhaltensweisen stellen einen gewissen Widerspruch dar.

- Arbeiten Sie schriftlich die beiden Verhaltensweisen heraus. Beschreiben sie die Unterschiede.
- Beschreiben Sie den Widerspruch.
- Inwiefern lässt sich dieser Widerspruch auflösen? Handelt es sich eventuell um einen scheinbaren Widerspruch? Nehmen Sie Stellung und begründen Sie.

Für die Bearbeitung dieses Bogens haben Sie \_\_\_ Minuten Zeit,  
(die Zeit für die Videos nicht mitgerechnet).

---

## Arbeitsbogen AA

### *Sonnenfinsternis und Asteroiden*

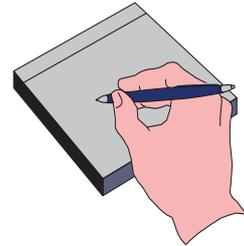
Bitte lesen Sie die vorgelegten Texte, die sich auch mit der Frage befassen, ob unser Sonnensystem für alle Zukunft so stabil ist wie heute und ob die Planeten weiterhin ihre gleichmäßigen Bahnen um die Sonne ziehen werden. Dazu sollen Sie Fragen beantworten.

**a)** Fassen sie auch die wesentlichen Aussagen der Texte T1/T2 und T3/T4 zusammen.

**b)** Bilden Sie jetzt Gruppen und gleichen Sie die Ergebnisse ihrer Zusammenfassungen ab.

**c)** In den Texten T1/T2 und T3/T4 zeigt unser Planetensystem zwei Verhaltensweisen in Bezug auf die Möglichkeiten der Vorhersage von Vorgängen im Planetensystem. Diese Verhaltensweisen stellen einen gewissen Widerspruch dar.

- Arbeiten Sie schriftlich die beiden Verhaltensweisen heraus. Beschreiben sie die Unterschiede.
- Beschreiben Sie den Widerspruch.
- Inwiefern lässt sich dieser Widerspruch auflösen? Handelt es sich eventuell um einen scheinbaren Widerspruch? Nehmen Sie Stellung und begründen Sie.



Für die Bearbeitung dieses Bogens haben Sie \_\_\_ Minuten Zeit.

## Arbeitsbogen B

### Stabilität und Instabilität im Planetensystem

Sie werden jetzt die Stabilität bzw. die Instabilität eines Planetensystems erforschen. Dazu werden Sie das Simulationsprogramm **xyZET** verwenden. Die Ergebnisse ihrer Forschungen sollen Sie nachher den anderen Gruppen vorstellen.



**a)** Nehmen Sie sich zunächst etwas *Zeit*, um das Programm **xyZET** kennenzulernen. Laden Sie dazu die Datei »3-Körper-2dim.exp« unter *Datei* und dann unter *Experiment laden*.

- Lassen Sie sich nicht durch die Vielzahl der Möglichkeiten des Programms verwirren. Sie können nichts falsch oder kaputt machen.

- Starten Sie die vorgegebene Simulation, indem Sie im *xyZET-Kontrollfenster* mit der Maus auf *Start* drücken.

- Probieren Sie die Funktionen *Drehen* und *Zoomen* aus.

- Drücken Sie auf *Stopp* und dann mit der Maus auf eines der Teilchen. Es erscheint ein neues Fenster. Drücken Sie auf *Teilchen-Inspektor öffnen*; Sie können nun einzelne Parameter, d.h. Eigenschaften des Teilchen ändern. Probieren Sie das Ergebnis der Veränderungen aus.

**b)** Wenn Sie das Experiment erkundet haben, laden Sie das Experiment »3Körper.exp«. Probieren Sie auch hier Änderungen aus.

**c) Hier Ihre eigentliche Aufgabe:** Konstruieren Sie ein Planetensystem mit mehr als einem Planeten. Setzen Sie einen neuen Planeten ein. Das geht so:

- Drücken Sie im Fenster *Teilchen setzen und verwalten* auf *n* wie neutrales Teilchen (denn Planeten sind elektrisch nicht geladen).

- Mit den Pfeiltasten im Fenster oben rechts können Sie die Position des neuen Teilchens einstellen. Danach auf *OK* und *Aktion beenden* drücken. Drücken Sie mit der Maus aufs neue Teilchen: Mit dem *Teilchen-Inspektor* können Sie dem Teilchen eine Anfangsgeschwindigkeit geben, so dass es um die zentrale Sonne läuft. Drücken Sie auf *v*, um bei der Einstellung die Richtung seiner Bewegung zu kontrollieren. Achten Sie darauf, dass für die zentrale Sonne *fixiert* angewählt ist.

- Wie verhält sich Ihr neues Planetensystem über längere Zeit? Stört es den ersten Planeten mit dessen Mond?

- Konstruieren Sie das Planetensystem so, dass es über längere Zeit stabil bleibt. Ändern Sie dafür die Einstellungen der einzelnen Teilchen, bis Sie Erfolg haben. Sind weitere Planeten möglich?

- Speichern Sie Ihr neues Planetensystem unter *Datei* und *Experiment speichern* mit einem eigenen Namen ab. Vergessen Sie die Endung *.exp* nicht. Speichern Sie auch ein Planetensystem, das zunächst stabil ist, dann aber instabil wird.

-Präsentieren Sie den anderen Gruppen Ihr Planetensystem.

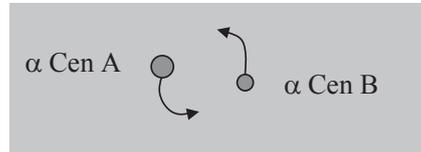
Für die Bearbeitung dieses Bogens haben Sie \_\_\_ Minuten Zeit.

---

## Arbeitsbogen BB

### Stabilität und Instabilität im Planetensystem: Alpha Centauri

Verwöhnt von der Regelmäßigkeit in unserem Planetensystem, hat man Jahrhunderte lang nicht erkannt, dass die Stabilität der Himmelsmechanik nicht selbstverständlich ist.



Ein eindringliches Beispiel für Instabilität ist ein Doppelsternsystem wie Alpha Centauri. Zwei Sterne drehen sich mit einer Periode von 80 Jahren um ihren gemeinsamen Schwerpunkt.  $\alpha$  Cen A hat die 1,1-fache Masse unserer Sonne,  $\alpha$  Cen B die 0,9-fache Masse. Einen Planeten könnte dieses System nicht halten, denn er würde früher oder später aus dem Doppelsternsystem katapultiert.

Das Programm *deepsail* demonstriert die chaotischen Bahnen eines fiktiven Planeten, bis er das Doppelsternsystem verlässt.  $\alpha$  Cen A ist in der Darstellung des Programms festgesetzt.

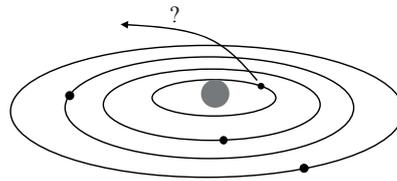
- ◆ starten Sie *deepsail.exe*
- ◆ wählen Sie file → load → tutorial.dsm
- ◆ wählen Sie file → get checkpoint
- ◆ geben Sie '8' ein
- ◆ drücken Sie die Taste 'Q'
- ◆ stellen Sie 'Distance' auf 5.0 ein

Untersuchen Sie die Bewegungen für andere Werte von 'Distance' (4.9 bis 5.3) und 'Speed' (7.0 bis 20.0). Probieren Sie (5.01/13.2) aus. Zur Veränderung immer 'Q' drücken.

Zur Bearbeitung dieses Bogens haben Sie \_\_\_ Minuten Zeit

## Ist das Sonnensystem stabil?

Bleiben die Planeten auf ihren Bahnen oder werden einzelne von ihnen durch die Überlagerung der Gravitationskräfte der anderen Planeten aus dem Sonnensystem geworfen? Diese Fragen überraschen, denn in menschlichen Zeitdimensionen gedacht, gibt es kaum etwas Stabileres als die Bewegung der Erde und der anderen Planeten um die Sonne. Andererseits lassen Newtons Arbeiten zur Gravitation von 1687 die Stabilität anzweifeln.



Die Frage nach der Stabilität des Sonnensystems fand Ende des 19. Jahrhunderts ein starkes wissenschaftliches Interesse und eine große Popularität in der Bevölkerung. Um sie ein für alle Mal zu klären, setzte der schwedische König Oskar II. im Jahre 1885 einen lukrativen Preis aus. Derjenige sollte ihn erhalten, der mit Sicherheit beweisen konnte, dass die Bahnen der Planeten stabil sind oder eben nicht.



König Oskar II.  
von Schweden

Der französische Mathematiker **Henri Poincaré** ging als Sieger des Wettbewerbs hervor. Er wies 1899 nach, dass es verschiedene Typen von Bahnen in unserem Sonnensystem gibt, stabile und instabile, und dass unter bestimmten Bedingungen kleine Störungen ausreichen, um Übergänge zwischen den Bahntypen zu verursachen. Poincaré konnte zwar nicht zeigen, dass sich unser Sonnensystem tatsächlich auflösen wird, aber er konnte mit seiner Arbeit »Über das Dreikörperproblem und die Gleichungen der Dynamik« beweisen, dass schon Systeme aus nur drei Körpern instabil sein können. Poincaré bemerkte zu seinen Ergebnissen:



Henri Poincaré (1854-1912)

»Eine sehr kleine Ursache, die wir nicht bemerken, bewirkt einen beachtlichen Effekt, den wir nicht übersehen können, und dann sagen wir, der Effekt sei zufällig. Wenn die Naturgesetze und der Zustand des Universums zum Anfangszeitpunkt exakt bekannt wären, könnten wir den Zustand dieses Universums zu einem späteren Moment exakt bestimmen. Aber selbst wenn es kein Geheimnis in den Naturgesetzen mehr gäbe, so könnten wir die Anfangsbedingungen doch nur annähernd bestimmen. Wenn uns dies ermöglichen würde, die spätere Situation in der gleichen Näherung vorherzusagen - und dies ist alles, was wir verlangen - so würden wir sagen, daß das Phänomen vorhergesagt worden ist, und daß es Gesetzmäßigkeiten folgt. Aber es ist nicht immer so; es kann vorkommen, daß kleine Abweichungen in den Anfangsbedingungen schließlich große Unterschiede in den Phänomenen erzeugen.[...] Vorhersagen werden unmöglich, und wir haben ein zufälliges Ereignis.«

Poincarés Erkenntnisse bedeuteten einen Bruch mit dem mechanistischen Weltbild, soweit sie die Vorhersagbarkeit betreffen. Sie zeigen zudem, wie komplex sich schon ein einfaches System aus drei Körpern verhalten kann. Poincaré kommentierte seine Erkenntnisse schließlich mit den Worten:

»Die Dinge sind so bizarr, dass ich es nicht aushalte, weiter über sie nachzudenken.«

**Versuchen nun Sie, ein stabiles Sonnensystem zu erschaffen! ( → Arbeitsbogen B)**

## Arbeitsbogen C

### *Magnetpendel*

Das große Magnetpendel zeigt eine unregelmäßige Bewegung. Ist der Ausgang der einzelnen Pendeldurchgänge vorhersagbar?

Sie sollen folgende Fragen jeweils in 4er-Gruppen bearbeiten:

a) Sind die Ergebnisse der einzelnen Pendeldurchgänge zufällig oder gibt es eine Regelmäßigkeit? Führen Sie eine nicht zu kleine Zahl von Pendelvorgängen durch und führen Sie eine Strichliste über die Zielmagneten.

b) Falls Sie zu dem Ergebnis kommen, dass der Magnet, über dem die Kugel zum Stehen kommt, nicht vorhersagbar ist, untersuchen Sie, warum das so ist:

- Verschaffen Sie sich Klarheit über die Kraftverhältnisse, die beim Magnetpendel herrschen. Legen Sie dazu ein Blatt Papier unter die Magneten, halten Sie die Kugel am Faden zwischen zwei Fingern und notieren Sie auf dem Papier, in welche Richtung die Kugel gezogen wird. Wie sieht am Schluss das "Kräftebild" aus?
- Um die Kraftfelder noch zu verdeutlichen, legen Sie eine kleine Plexiglasplatte auf die Magneten und streuen Sie Eisenpulver darauf. Welches Feldlinienbild entsteht? Zeichnen Sie dieses Bild ab.

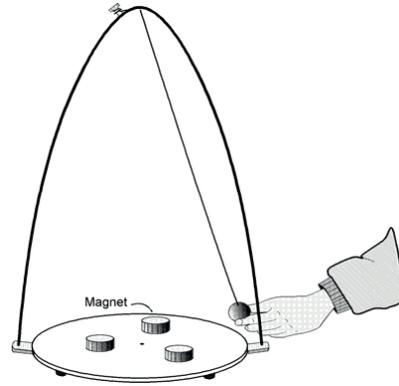
c) Sie wissen nun über die Kräfteverhältnisse beim Magnetpendel Bescheid. Klären Sie jetzt die Frage, die bereits beim großen Magnetpendel aufgetreten ist:

*Warum ist die Bewegung der Pendelkugel und der "Zielmagnet" nicht vorhersagbar, obwohl die wirkenden Kräfte und die wichtigen Gesetzmäßigkeiten im Prinzip bekannt sind?*

Überlegen Sie dabei:

- Wie wichtig ist es, dass der Start exakt wiederholt werden kann, d.h. dass die Position der Kugel beim Start exakt gleich ist? (Versuchen Sie jetzt mit Hilfe der Startvorrichtung möglichst exakt vom gleichen Punkt aus zu starten.)
- Welche Bedeutung haben Störungen während der Bewegung für die Vorhersagbarkeit von Bewegung und Zielmagnet?
- Haben auch sehr kleine Störungen eine Bedeutung? Wenn ja, warum?
- Inwieweit kann man kleine Störungen (und natürlich auch große) ausschalten?
- Nutzen Sie für Ihre Erklärungen die "Chaosschüssel" und die Abbildungen eines Berggrates und eines Walls.

d) Formulieren Sie Ihr Untersuchungsergebnis auf einer Folie (evtl. mit Skizze) und präsentieren Sie es (einer aus der Gruppe) der Klasse.



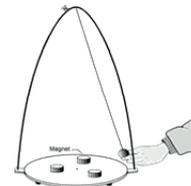
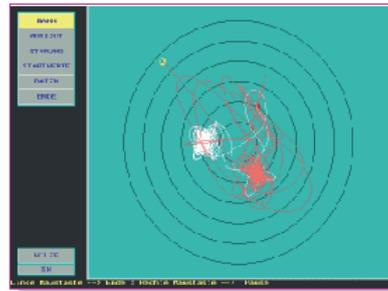
Für die Bearbeitung dieses Bogens haben Sie \_\_\_\_ Minuten Zeit.

## Arbeitsbogen D

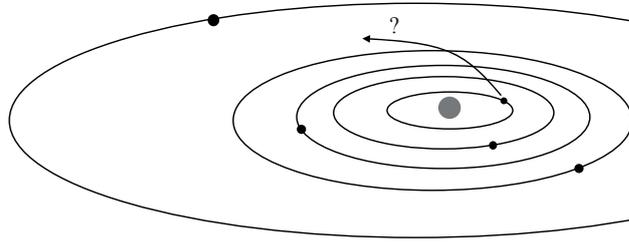
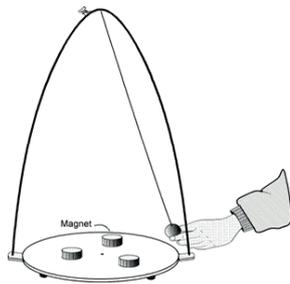
### *Das Programm: MagPen*

Machen Sie sich mit dem Programm *MagPen* vertraut. Es simuliert das Verhalten des Magnetpendels.

- a) Was passiert, wenn Sie das simulierte Pendel zweimal exakt von der gleichen Stelle aus starten?
- b) Was passiert, wenn Sie den Startpunkt für das simulierte Pendel nur so minimal wie möglich ändern? Untersuchen Sie dabei verschiedene Startbereiche.
- c) Gibt es Bereiche, in denen eine kleine Änderung der Startposition keine großen Auswirkung hat? Untersuchen Sie auch dafür verschiedene Startbereiche.
- d) Was passiert, wenn Sie das simulierte Pendel zweimal von der gleichen Startposition aus starten und es während des zweiten Durchgangs ganz leicht stören?
- e) Gibt es auch hierbei Startbereiche für das simulierte Pendel, für die es egal ist, ob das Pendel später noch leicht gestört wird oder nicht? Untersuchen Sie diese Bereiche.
- f) Welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede bestehen zwischen dem Simulationsprogramm und dem realen Magnetpendel?

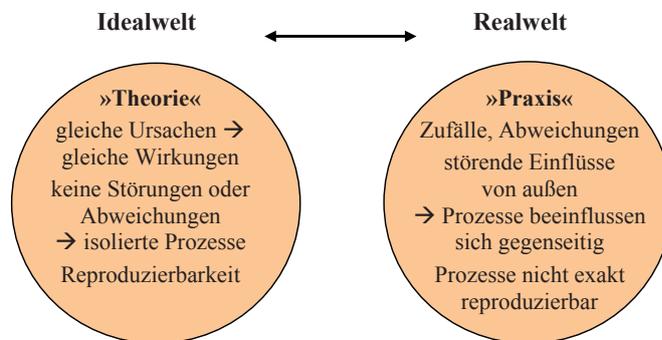


Für die Bearbeitung des Bogens haben Sie \_\_\_ 50 Minuten Zeit.



## Ergebnisse der Arbeit mit den Simulationen

»Im Computer wird die ideale Welt real.«



- ✱ *MagPen* zur Simulation des Magnetpendels, *xyZET* und *deepsail* zur Simulation des Sonnensystems sind Modelle für idealisierte Systeme.
- ✱ Mit den Simulationen kann man zeigen, wie sich Systeme verhalten würden, wenn keine Störungen von außen da wären.
- ✱ Bei *MagPen* erkennt man, wie einzelne kleine Störungen eine große Auswirkung auf die Vorhersagbarkeit haben.
- ✱ Bei *xyZET* und *deepsail* erkennt man, dass stabile Konstellationen für Planetensysteme die Ausnahme darstellen.
- ✱ Bereits Poincaré hat vor rund 100 Jahren Modellrechnungen zur Stabilität des Sonnensystems angestellt, allerdings ohne Computer; sein Ergebnis: Es gibt stabile und instabile Planetenbahnen.
- ✱ Moderne wissenschaftliche Simulationen mit Programmen, die *xyZET* sehr ähnlich sind, zeigen, dass Planeten von stabilen auf instabile Bahnen übergehen können. Für unser Sonnensystem sagen sie voraus, dass es für die nächsten 5 Mio. Jahre stabil bleibt.
- ✱ Berechnungen zur Stabilität des Sonnensystems und Überlegungen, dass aus Gesetzmäßigkeit nicht zwangsläufig Vorhersagbarkeit folgt, haben das wissenschaftliche Weltbild verändert.

**Arbeitsbogen E*****Räuber und Beute: die logistische Gleichung***

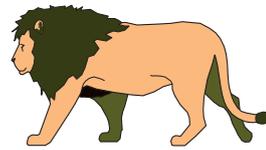
Auch mathematische Gebilde können Verhalten zeigen, das nur eingeschränkt vorhersagbar ist, das in gewisser Weise "chaotisch" ist. Ein Beispiel ist die so genannte logistische Gleichung:

$$x_{n+1} = ax_n(1 - x_n)$$

Sie ist eine Vorschrift zur Berechnung einer Folge von Zahlen. Wenn man mit einem Wert  $x_0$  startet, kann man  $x_1$  ausrechnen. Mit  $x_1$  kann man  $x_2$  ausrechnen, damit dann  $x_3$  und so weiter und so weiter.

**Ein Beispiel für die Anwendung der Gleichung:**

Das Wachsen einer Tierpopulation in einem bestimmten Gebiet lässt sich mit Hilfe der logistischen Gleichung simulieren. Die logistische Gleichung ist ein sehr einfaches Modell für ein eigentlich komplexes Problem.



Die Terme in der Gleichung bedeutet dann:

- $x_n$  dieser Wert kann nur zwischen 0 und 1 liegen. Der Wert 1 bedeutet, dass die maximale Zahl der Tiere, die das Gebiet ernähren kann, erreicht ist.  $x_n$  ist der Anteil an dieser maximalen Zahl; wenn  $x_n$  z.B. 0,3 ist, heißt das, dass in diesem Jahr 30% der maximal ernährbaren Tiere im Gebiet leben.
- $x_{n+1}$  der Anteil an der maximalen Zahl ernährbarer Tiere im nächsten Jahr.
- $a$  der Vermehrungsfaktor, er hängt z.B. vom Nahrungsangebot ab.
- $(1 - x_n)$  dies ist ein Faktor, der die Vermehrung bremst. Wenn  $x_n = 1$  ist, wenn also im Gebiet schon die maximale Zahl der Tiere lebt, so wird die Klammer =0 und damit gibt es keine Vermehrung.

**Aufgabe:**

Die logistische Gleichung zeigt sehr merkwürdiges Verhalten. Manchmal kann man sehr gut vorhersagen, welcher Wert für  $x_{n+1}$  im nächsten Schritt herauskommt, ohne es auszurechnen. In anderen Fällen kann man das nicht. Das hängt irgendwie von dem Faktor  $a$  ab.

- Genau das sollen Sie untersuchen. Schreiben Sie dazu mit Excel ein "Programm", das die Folgenglieder berechnet und graphisch darstellt. Untersuchen Sie die Abhängigkeit vom Faktor  $a$ .

- Stellen Sie die Ergebnisse der Klasse vor.

Zur Bearbeitung dieses Bogens haben Sie \_\_\_ Minuten Zeit.

## Hilfe zum Arbeitsbogen E

### *Hinweise zur Arbeit mit Excel, Teil 1*

Wenn sie die Folgenglieder graphisch darstellen wollen, die durch die logistische Gleichung produziert werden, müssen Sie Bescheid wissen, wie man in Excel mit iterativen Formeln umgeht.

$x_{n+1} = ax_n(1-x_n)$  ist eine solche iterative Formel, denn ein Folgenwert bezieht sich auf den zuvor berechneten. Man programmiert sie mit Hilfe einer »relativen Adressierung«.

#### »Relative Adressierung«

Am besten macht man sich eine relative Adressierung an einem einfachen Beispiel klar. Angenommen, man möchte eine Folge programmieren, bei der ein Folgenglied immer doppelt so groß ist wie das vorangegangene. Dann sehen die Formeln in der ersten Zellen einer Excel-Tabelle so aus:

- |    |      |   |
|----|------|---|
| A1 | 6    | (das ist irgendein Startwert)   |
| A2 | A1*2 | (hier wird verdoppelt, Ergebnis =12)<br>Wenn man den Inhalt der Zelle A2, nämlich A1*2, kopiert und in Zelle A3 einfügt, so sieht die Zelle so aus: |
| A3 | A2*2 | sie bezieht sich auf die vorangegangene Zelle (Ergebnis =24).<br>Kopiert man weiter in die nächsten Zellen, so lauten sie:                          |
| A4 | A3*2 | (Ergebnis =48)  |
| A5 | A4*2 | (Ergebnis =96) usw.   |

...  
Das Kopieren einer Formel verändert die Indices der Adressen! Und das ist sehr hilfreich.

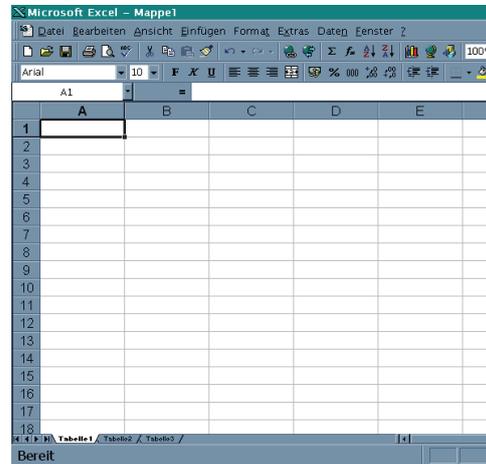
#### »Absolute Adressierung«

Falls man mit Konstanten in einer Formel arbeitet, dann braucht man eine absolute Adressierung. Angenommen man würde bei der obigen Verdopplung immer noch eine konstante Zahl hinzu addieren wollen, die in der Zelle B1 steht, dann sieht die Programmierung wie folgt aus:

- |    |             |  |
|----|-------------|--|
| A1 | 6           |  |
| A2 | A1*2+\$B\$1 | die Adresse der konstanten Zahl wird durch Dollar-Zeichen gekennzeichnet |
| A3 | A2*2+\$B\$1 |  |
| A4 | A3*2+\$B\$1 |  |
| A5 | A4*2+\$B\$1 |  |

...  
Es wird immer wieder der gleiche Wert aus Zelle B1 hinzugezählt.

Beide Arten der Adressierung werden in der Aufgabe zur logistischen Gleichung benötigt.



**Arbeitsbogen F**

***Beispiele für eingeschränkte Vorhersagbarkeit?***

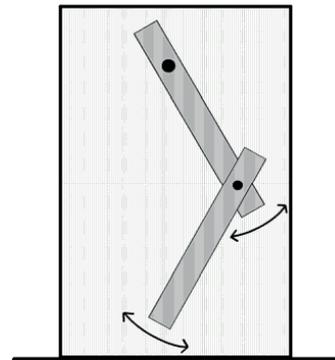
Beim Magnetpendel haben Sie sich ausführlich mit der eingeschränkten Vorhersagbarkeit auseinander gesetzt. Sie haben die Gründe dafür untersucht und Sie haben die Bedeutung der Instabilitäten entdeckt.

a) Suchen Sie Instabilitäten auch bei anderen Objekten

- beim Doppelpendel\*
- beim Galtonbrett
- beim einfachen Spielwürfel
- bei einem Bleistift, der auf der Spitze steht

Vergleichen Sie das Verhalten dieser Objekte mit dem des Magnetpendels und der Chaosschüssel. Welche Unterschiede, welche Gemeinsamkeiten treten auf? Wie zeigt sich die "Sensitivität" gegenüber Ungenauigkeiten beim Starten und Störungen beim Ablauf?

Beantworten Sie schriftlich.



*Doppelpendel*

**b) Eigenes Beispiel:** Finden Sie ein eigenes Beispiel, also ein Objekt, ein Spielzeug, etwas aus dem Alltag oder ein physikalisches Experiment, das auch eingeschränkt vorhersagbar ist und zwar wie beim Magnetpendel ebenfalls aufgrund von Instabilitäten.

Zeichnen Sie dieses Beispiel auf Folie und machen Sie dabei klar, warum es eingeschränkt vorhersagbar ist. Präsentieren Sie Ihr Ergebnis der Klasse.

\* Befestigen Sie Leuchtdioden mit Knopfzellen an den Pendelarmen des Doppelpendels. Fotografieren Sie mit einem digitalen Fotoapparat mit langer Belichtungszeit (z.B. 8 Sekunden). Welche Aufnahmen ergeben sich?

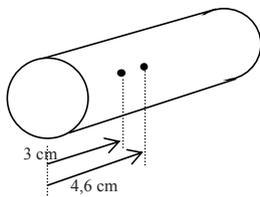
Für die Bearbeitung dieses Bogens haben Sie \_\_\_ Minuten Zeit.

**Arbeitsbogen G**

***Knetmasse strecken - schneiden - kleben***

- a) Bei dieser Aufgabe ist sehr viel Sorgfalt erforderlich! Drücken Sie die beiden Stahlkugeln in die 15 cm lange Knetgummiwurst; die eine 3 cm, die andere 4,6 cm vom linken Rand entfernt. Rollen Sie die Wurst dann ganz gleichmäßig auf die doppelte Länge, schneiden Sie sie in der Mitte durch und legen Sie die rechte Hälfte auf die linke (siehe Zeichnung auf dem Overheadprojektor). Formen Sie daraus wieder eine 15 cm lange, gleichmäßige Wurst.

Messen Sie jetzt den Abstand der Stahlkugeln und tragen Sie ihn in die Tabelle ein. Führen Sie diesen Vorgang bitte zehnmal hintereinander durch.



Durchgang	Abstand der Kugeln
0	1,6 cm
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

Anderen Gruppen haben die gleiche Aufgabe. Theoretisch müssten alle Gruppen nach den zehn Durchgängen die gleichen Kugelabstand messen. Ist das so?

- b) Wie kann man ausrechnen, wie groß der Kugelabstand nach zehn Durchgängen sein müsste, wenn man ganz exakt arbeitet? Einer oder zwei aus der Gruppe sollten sich damit beschäftigen.
- c) Hat dieser Knetversuch irgend etwas mit dem Magnetpendel oder den bisherigen Überlegungen zu tun? Arbeiten Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede zum Magnetpendel heraus!

Zur Bearbeitung dieses Bogens haben Sie \_\_\_ Minuten Zeit.

## Arbeitsbogen H

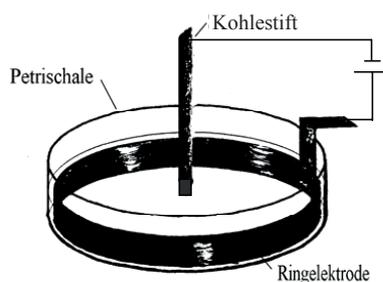
### *Wachsen eines Zinkdendrits*

Dieser Versuch soll verdeutlichen, dass zufällige Einflüsse nicht nur etwas zerstören können. Beim Magnetpendel z.B. zerstören sie die Vorhersagbarkeit im Detail. Beim vorliegenden Versuch zur Bildung eines Zinkdendriten wirken zufällige Einflüsse dagegen konstruktiv. Das sollen Sie jetzt genauer untersuchen.

#### 1. Versuchsaufbau zum Zinkdendrit

Materielliste:

- Netzgerät bis 15 V=, Kabel
- Klemmen, Stativmaterial, Petrischale
- Zinkring
- ZnSO<sub>4</sub>-Lösung (zweimolar: für 100ml Lösung benötigt man 57 g Zinksalz (Chemikalienhandel))
- Kohle-Elektrode als Kathode (z.B. Bleistift)
- Plastikfolie



#### 2. Durchführung

Legen Sie den Zinkring in die Petrischale und befestigen Sie eine der Stromzuführungen daran. Diese Stromzuführung wird an den Pluspol der Spannungsquelle angeschlossen. Positionieren Sie mit Stativmaterial die Kathode über der Petrischale und schließen Sie sie an den Minuspol an. Füllen Sie die Petrischale mit Zinksulfatlösung, so dass ein geschlossener dünner Flüssigkeitsfilm entsteht.

Fahren sie die Kathode so weit herunter, dass das flach-geschliffene Ende gerade die Zinklösung erreicht.

- Stellen sie einen Spannungswert von 10 V ein und lassen Sie den Zinkdendrit wachsen.
- Fischen Sie die entstandenen Gebilde vorsichtig mit einer Kopierfolie auf, um sie auf dem Overheadprojektor zeigen zu können
- Probieren Sie andere Spannungswerte aus und beobachten Sie, wie sich die Muster unterscheiden.

#### 3. Finden Sie in ihrer Gruppe eine Erklärung für das entstandene Muster

überlegen Sie dabei:

- Wie funktioniert der ablaufende elektrolytische Prozess im Detail?
- Wie kann man das entstandene geometrische Muster (schriftlich) beschreiben?
- Welche Erklärung finden Sie für das Entstehen des Musters?

Für die Bearbeitung dieses Bogens haben Sie \_\_\_ Minuten Zeit.

## Arbeitsbogen I

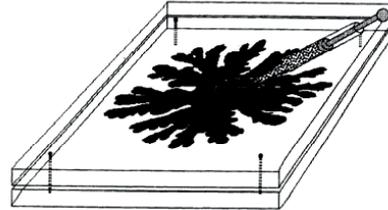
### *Viskoses Verüsteln*

Dieser Versuch möchte verdeutlichen, dass zufällige Einflüsse nicht nur etwas zerstören können. Beim Magnetpendel z.B. zerstören sie die Vorhersagbarkeit im Detail. Beim vorliegenden Versuch zur Bildung eines »Fettbäumchens« wirken zufällige Einflüsse dagegen konstruktiv. Das sollen Sie jetzt genauer untersuchen.

#### 1. Aufbau des Versuchs

Materialliste:

- 2 Plexiglasplatten 50x50 cm<sup>2</sup> (Baumarkt)
- 4 Flügelschrauben
- 1 Ansatzstutzen für Spritzen (Laborbedarf)
- 2 Spritzen Laborbedarf
- gefärbtes Spülmittel



#### 2. Durchführung

Man löse die Befestigungsschrauben der Plexiglasscheiben so weit, dass der Spalt zwischen ihnen gleichmäßig ist und ca. 0,5 mm beträgt. Eine der Spritzen wird mit dem gefärbten Spülmittel gefüllt und an den Füllstutzen der Platten angesetzt. Mit gleichmäßigem Druck wird das Spülmittel zwischen die Platten gepresst. Es entsteht ein gleichmäßig gefüllter Kreis, der nicht mehr als 35 cm Durchmesser haben sollte.

Die zweite Spritze wird nun an den Ansatzstutzen gesetzt, nachdem sie mit Luft gefüllt worden ist. Die Luft wird jetzt gleichmäßig und zwar relativ schnell zwischen die Platten gepresst. Das Spülmittel weicht dabei zurück.

- Wie wird wohl das Muster aussehen, das beim Einpressen der Luft entsteht?
- Zeichnen Sie den Entstehungsprozess auf Video auf fotografieren Sie ihn mit einer Digitalkamera.
- Führen Sie verschiedene Versuche durch, die sich darin unterscheiden, wie schnell sie die Luft einpressen bzw. wie groß der Plattenabstand ist.
- Reinigen Sie die (auseinandergeschraubten) Platten zwischen den Durchgängen gründlich mit Wasser.

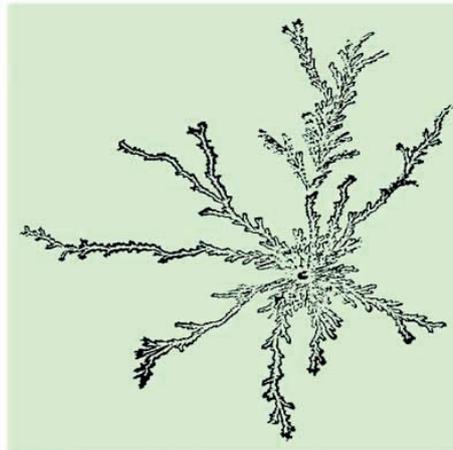
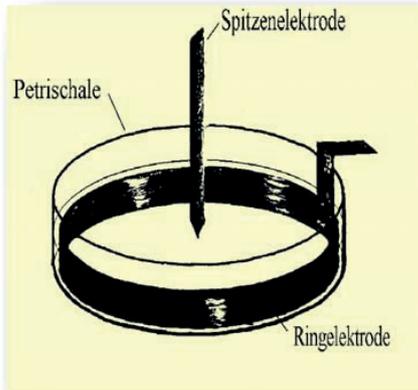
#### 3. Finden Sie in ihrer Gruppe nach einer Erklärung für das entstandene Muster

Überlegen sie dabei:

- Wie lässt sich das Muster (schriftlich oder auch mathematisch) beschreiben, das beim Einpressen der Luft entsteht?
- Was passiert beim Einpressen der Luft im Detail?
- Welche Erklärung für das Entstehen des Musters finden Sie?

Zur Bearbeitung dieses Bogens haben Sie \_\_\_ Minuten Zeit.

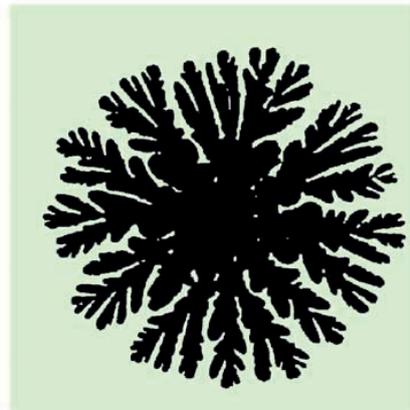
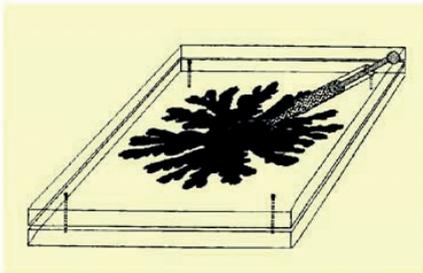
## "Zinkdendrit"



### Erklärungsansatz:

- Zinkionen in der  $ZnSO_4$ -Lösung führen Zufallsbewegungen aus ("Zick-Zack-Bewegungen" aufgrund der Wärme)
- Die el. Spannung treibt die Zn-Ionen in die Mitte zur Kathode
- Die Zinkionen lagern sich wahrscheinlicher an Hügeln an als an Mulden
- Hügel wachsen schneller als Mulden: "Selbstverstärkung" der Hügel

## "Fettbäumchen"



### Erklärungsansatz:

- Beim Einspritzen der Luft in Flüssigseife setzt sich die Grenzfläche langsam in Bewegung
- An der Grenzlinie entstehen minimale Ausbuchtungen dort, wo Schmutzteilchen oder Schwankungen der Seifendichte die Grenze instabil machen
- Die Grenze weicht an diesen Stellen zurück und es entsteht ein Finger aus Luft. Später bilden sich Finger an Fingern.

---

## Eine elementarisierte Erklärung zum Zinkdendriten

Ein Zinkring wird in eine Petrischale gesetzt. Es wird gerade soviel Zinksulfat-Lösung in die Petrischale eingefüllt, dass innerhalb des Zinkrings eine geschlossene Flüssigkeitsoberfläche entsteht. Mit Hilfe von Stativmaterial wird die Kohlelektrode in der Mitte über der Petrischale so befestigt, dass das flachgeschliffene Ende gerade die Oberfläche der Lösung berührt. Nun legt man eine Gleichspannung zwischen Zinkanode und Kohlelektrode. An der Kathode wächst auf der Oberfläche der Lösung eine dendritische Struktur aus elementarem Zink. Wie in jeder Flüssigkeit und jedem Gas, wandern auch die Teilchen in der Zinksulfat-Lösung in einer Folge von Schritten zufälliger Länge und zufälliger Richtung umher. Diese Brownsche Molekularbewegung wird durch die ständigen Zusammenstöße der Teilchen untereinander verursacht.

Legt man nun eine Spannung zwischen Kathode und Anode, so bleibt zwar die Brownsche Molekularbewegung erhalten, aber die positiven  $Zn^{++}$ -Ionen werden langsam zur Kathode gezogen. Es handelt sich also um eine Überlagerung zweier Bewegungen. Die ankommenden  $Zn^{++}$ -Ionen lagern sich an der Kathode unter Aufnahme von zwei Elektronen als elementares Zink an. Dabei bleiben die Teilchen zunächst zufällig aufgrund der elektrischen Anziehungskraft "kleben". Wegen der Zufälligkeit entstehen kleine Unregelmäßigkeiten, es bilden sich Hügel und Mulden.

Was weiter geschieht, kann man sich zunächst am Weg eines einzelnen Teilchens verdeutlichen: Das Teilchen bewegt sich auf einem Zickzackkurs auf die Hügel und Mulden an der Oberfläche der Kathode zu. Bezeichnet man den Weg zwischen zwei Zusammenstößen als Schritt und nimmt man an, dass die Brownsche Molekularbewegung diskret ist, dass die Teilchen also nur in endlich viele vorgegebene Richtungen streben können, so gilt

folgendes: Mit je weniger Schritten es eine Stelle an der Kathodenoberfläche erreichen kann, desto wahrscheinlicher ist, dass es dort hängen bleibt, weil es weniger Möglichkeiten hat, "abzubiegen". Nun gibt es aber für eine beliebige vorgegebene Anzahl von Schritten mehr mögliche Wege zur Spitze oder zur Flanke eines Hügels als in eine Mulde. Oder vereinfacht gesprochen, ein Teilchen gelangt nur sehr selten tief in einen "Fjord", weil es, bedingt durch den Zick-Zack-Weg, meist vorher irgendwo anstößt. Demzufolge ist die Wahrscheinlichkeit, sich irgendwo an einem Hügel anzulagern größer als die Wahrscheinlichkeit, in eine Mulde zu gelangen.

Da die Hügel zunächst sehr klein sind, ist die Wahrscheinlichkeit, an einem Hügel hängen zubleiben nur geringfügig größer als die Wahrscheinlichkeit, in eine Mulde zu gelangen. Trotzdem wächst ein Hügel etwas schneller als eine Mulde. Das wiederum erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Teilchen an einem Hügel anlagert. Es kommt also zu einer *Selbstverstärkung* mit der Folge, dass die Wachstumsgeschwindigkeit der Hügel im Verhältnis zur Wachstumsgeschwindigkeit der Mulden immer größer wird. So wachsen schließlich Zweige. An den Spitzen der Zweige bilden sich erneut zufällig kleine Hügel und Mulden. Es entstehen an den Spitzen der Zweige neue Zweige.

Das Wechselspiel von Zufall und geregelterm Wachstum verursacht die Komplexität diese Anlagerungen. Bei verhältnismäßig niedrigen Spannungen überwiegt die thermische Fluktuation über die gerichtete Bewegung, die durch die elektrische Spannung hervorgerufen wird. Je höher jedoch die Spannung gewählt wird, desto größer wird der Einfluss des elektrischen Feldes, desto "flächiger" wächst die Struktur und desto größer wird die *fraktale Dimension*.

### Eine elementarisierte Erklärung zum Viskosen Verästeln

Zwei Plexiglasscheiben werden mit kleinem Abstand aufeinander geschraubt. Die obere Platte ist in der Mitte durchbohrt. Mit einer auf dieses Loch montierten Spritze kann Flüssigkeit zwischen die Platten gepresst werden. Zunächst wird ein viskoseres Medium (beispielsweise Flüssigseife) zwischen die Platten gespritzt. Um die Einspritzöffnung breitet sich die Flüssigkeit kreisförmig und symmetrisch aus. Sodann wird ein weniger viskoses Medium (beispielsweise Luft) zwischen die Platten gepresst. Statt sich auch kreisförmig auszubreiten, dringt es fingerartig in die viskosere Flüssigkeit ein und bildet verzweigte Muster.

An der Grenzfläche zwischen den beiden Fluiden entsteht beim Einspritzen eine Grenzflächenspannung. Sie sorgt dafür, dass sich die Fluide nicht einfach durchmischen. Durch den beim Einspritzen entstehenden Druck setzt sich die Grenzfläche langsam in Bewegung. Noch sorgt die Grenzflächenspannung für die Stabilität der Grenzfläche. Diese Stabilität kann jedoch nicht lange beibehalten werden. Durch den Druck bilden sich an der Grenzfläche kleine Ausbuchtungen aus. Dies geschieht natürlich an den Stellen, an denen die Grenzflächenspannung etwas kleiner ist als an der übrigen Grenzfläche. Der Grund dafür, dass die Grenzflächenspannung nicht überall ganz genau gleich stark ist, sind beispielsweise kleinste Schmutzteilchen, Unebenheiten der Platten oder zufällige Dichteunterschiede in der Flüssigseife. Genau an den entstandenen Ausbuchtungen dringt das weniger viskose Fluid fingerartig in das zähere Medium ein. Weicht die Grenzfront erst einmal langsam zurück, so wird es für das eindringende Fluid am einfachsten, dort die Flüssigseife wegzudrängen, denn diese ist ja schon in Bewegung. Weil der nach außen gerichtete Druck mit zunehmendem Abstand zur Einspritzstelle abnimmt, gilt: Je weiter die Flüssigkeit ein-

dringt, desto geringer wird der Druck an der Grenzfläche. Die weniger viskose Flüssigkeit dringt nun so tief ein, bis die Grenzflächenspannung dem Druck wieder standhält, dann herrscht erneut Druckgleichgewicht. Mit größer werdender Grenzfront muss nämlich auch mehr Kraft für die Verdrängung, also gegen die zwischenmolekularen Kräfte aufgebracht werden.

Das Wachstum an den Spitzen der entstandenen "Finger" läuft nun analog ab. Die Grenzfläche weicht auch hier dem Druck der nachströmenden Teilchen nicht als Ganzes aus, sondern zunehmende Instabilität führt wieder zur Ausbildung kleinster Ausbuchtungen. Auch hier wachsen einzelne "Finger". Bei genauerer Betrachtung der Strukturen stellt man fest, dass das Wachstum nur an den Spitzen und nicht an den Seiten der "Finger" stattfindet. Der Grund dafür ist, dass die Flüssigkeitsteilchen durch den vom Mittelpunkt radial weggerichteten Druck gegen den geringsten Widerstand durch die Kanäle in die Spitzen gedrückt werden. Vor allem die Tatsache, dass das Wachstum an den Spitzen stattfindet, legt die Vermutung nahe, dass dieser erhöhte Kraftaufwand durch eine "energetisch günstigere", nämlich die verzweigte Verdrängung umgangen wird. Würde die Seife gleichmäßig zurückweichen, so müssten auch Stellen überwunden werden, an denen die Grenzfront stabil ist. Das erfordert offenbar mehr Arbeit, als wenn die Luft die Seife nur an den Stellen des geringsten Widerstands verdrängen würde. Diese Annahme wird auch durch die Beobachtung bestätigt, dass eine größere Differenz der Viskosität der beiden Fluide eine größere Verzweigkeit der Struktur zur Folge hat. Der größere Widerstand wird also durch die Bildung kleiner Kanäle umgangen. Die Dissipation der Energie wäre bei einer flächigen Verdrängung größer als bei der fraktalen Verdrängung.

---

### Vergleich beider Prozesse

Obwohl man bei den Versuchen *Zinkdendrit* und *Viskoses Verästeln* von völlig unterschiedlichen physikalischen Voraussetzungen ausgeht und obwohl die entstehenden Strukturen sich auf den ersten Blick nicht gleichen, weisen die Wachstumsprozesse doch prinzipielle Gemeinsamkeiten auf. Wie bereits erwähnt, entstehen beide Strukturen durch das Wechselspiel von Zufall und Gesetzmäßigkeit. Die prinzipielle Gleichheit der ablaufenden Prozesse wird auch dadurch deutlich, dass sich die Vorgänge in beiden Fällen mit der Laplace-Gleichung beschreiben lassen. Im ersten Fall ist die Wahrscheinlichkeitsfunktion, im zweiten Fall die Druckfunktion eine Lösung dieser Differentialgleichung. Obwohl für beide Versuche eine exakte analytische Lösung nicht möglich ist, kann man sich charakteristische Eigenschaften der Lösungsfunktionen veranschaulichen. Man kann dafür das Bild einer elastischen Decke benutzen, die man am Rand einspannt und die in der Mitte durch eine wachsende Struktur heruntergedrückt wird. Das Höhenprofil der Decke spiegelt nun die Potentialfunktion wieder. Die steilsten Flanken bedeuten die größte Änderung der Wahrscheinlichkeit bzw. des Drucks. An diesen Stellen geht das Wachstum also am schnellsten vonstatten. Die steilsten Flanken treten jedoch genau an den Spitzen der wachsenden Struktur auf. Je spitzer dort die Zweige sind, desto größer ist die Wachstumsrate. Aber der *Zinkdendrit* und eine beim *Viskosen Verästeln* entstandene Figur haben noch eine weitere wichtige Gemeinsamkeit: Sie sind beide unter Minimierung der Energiedissipation entstanden.

## Arbeitsbogen J

*Das Chaos-Spiel*

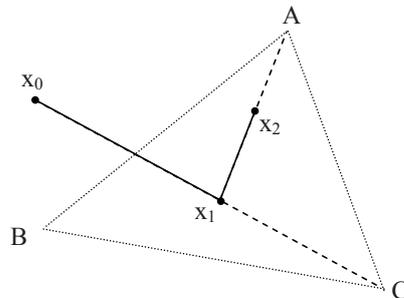
**Materialliste:** Großes Blatt Papier, Farbstifte, Lineal, Würfel

**Arbeitsanweisung:**

Auf einer Arbeitsfläche sind drei Eckpunkte eines Dreiecks A, B, C gezeichnet.

Das Spiel geht so: Zeichnen Sie irgendwo auf der Arbeitsfläche, also innerhalb oder außerhalb des Dreiecks, einen Startpunkt. Bezeichnen Sie ihn mit  $x_0$ . Dieser Punkt »bewegt« sich, indem man würfelt. Die Augenzahlen 1 und 2 sind dem Punkt A, die Zahlen 3 und 4 dem Punkt B und die Zahlen 5 und 6 dem Punkt C zugeordnet.

Würfelt man z.B. eine 2, so wird ein neuer Punkt  $x_1$  in der Mitte der gradlinigen Verbindung zwischen  $x_0$  und dem Punkt A gezeichnet. Danach wird erneut gewürfelt. Die Mitte zwischen dem jetzt erwürfelten Eckpunkt und  $x_1$  ist der neue Punkt  $x_2$  und so weiter.



Beispiel:  
Würfelfolge 5 (=C), 1 (=A),...

Mit dieser Zeichenvorschrift hat man ein einfaches Schema zur Erzeugung einer zufälligen Folge von Punkten. Werden sehr viele Würfeldurchgänge aneinandergesetzt, so sollten man erwarten, dass die gesamte Fläche des Dreiecks und vielleicht darüber hinaus mit Punkten gefüllt ist. Oder?

- a) Was passiert wirklich? Untersuchen Sie die Zeichenvorschrift, indem Sie möglichst viele Punkte erzeugen. Gehen Sie dabei exakt vor. Beschreiben Sie das entstandene Gebilde schriftlich. Welche Eigenschaften hat es?
- b) Haben Sie irgendeine Idee, warum gerade dieses Gebilde entstanden ist? Warum werden bestimmte Bereiche nie getroffen?

Zur Bearbeitung dieses Bogens haben Sie \_\_\_ Minuten Zeit.

## Arbeitsbogen K

### Das Chaos-Spiel auf dem Computer

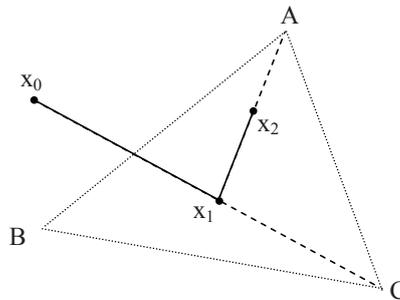
#### Arbeitsanweisung:

Lesen Sie sich die Arbeitsanweisung für die Gruppen durch, die das Chaosspiel real zeichnen und nicht mit dem Computer arbeiten sollen:

*Auf einer Arbeitsfläche sind drei Eckpunkte eines Dreiecks  $A, B, C$  gezeichnet.*

*Das Spiel geht so: Zeichnen Sie irgendwo auf der Arbeitsfläche, also innerhalb oder außerhalb des Dreiecks, einen Startpunkt. Bezeichnen Sie ihn mit  $x_0$ . Dieser Punkt »bewegt« sich, indem man würfelt. Die Augenzahlen 1 und 2 sind dem Punkt  $A$ , die Zahlen 3 und 4 dem Punkt  $B$  und die Zahlen 5 und 6 dem Punkt  $C$  zugeordnet.*

*Würfelt man z.B. eine 2, so wird ein neuer Punkt  $x_1$  in der Mitte der gradlinigen Verbindung zwischen  $x_0$  und dem Punkt  $A$  gezeichnet. Danach wird erneut gewürfelt. Die Mitte zwischen dem jetzt erwürfelten Eckpunkt und  $x_1$  ist der neue Punkt  $x_2$  und so weiter:*



*Beispiel:  
Würfelfolge 5 (=C), 1 (=A),...*

*Mit dieser Zeichenvorschrift hat man ein einfaches Schema zur Erzeugung einer zufälligen Folge von Punkten. Werden sehr viele Würfeldurchgänge aneinandergesetzt, so sollten man erwarten, dass die gesamte Fläche des Dreiecks und vielleicht darüber hinaus mit Punkten gefüllt ist. Oder?*

- Was passiert wirklich? Untersuchen Sie die Zeichenvorschrift, indem Sie möglichst viele Punkte erzeugen. Schreiben Sie dazu mit Excel ein »Programm«, das die Folge der Punkte berechnet und graphisch darstellt. Lassen Sie sich helfen. Beschreiben Sie das entstandene Gebilde schriftlich. Welche Eigenschaften hat es?
- Haben Sie eine Idee, warum gerade dieses Gebilde entstanden ist? Warum werden bestimmte Bereiche nie getroffen?

Zur Bearbeitung dieses Bogens haben Sie \_\_\_ Minuten Zeit.

## zum Arbeitsbogen K

**Arbeiten mit Excel, Teil 2**

Um das Chaosspiel mit Excel zu programmieren, müssen Sie einige Funktionen des Programms kennenlernen. Die Funktion der relativen Adressierung wurde in Teil 1 beschrieben. Sie brauchen Sie bei dieser Aufgabe erneut.

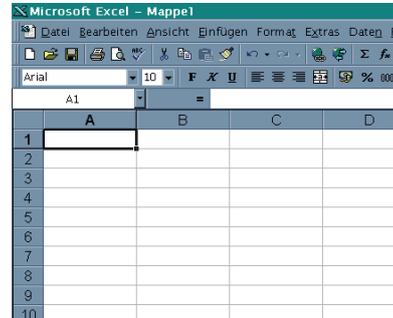
**1. Die WENN-DANN-SONST-Funktion**

Die WENN-DANN-SONST-Funktion prüft zunächst, ob eine bestimmte Aussage wahr ist. Wenn das der Fall ist, wird eine bestimmte Aktion durchgeführt, wenn das nicht der Fall ist, wird eine bestimmte andere Aktion durchgeführt.

Beispiel und Schreibweise: Angenommen in der Zelle B3 steht folgende Formel:

`WENN(A1=150;4;15)`

dann bedeutet das, dass in die Zelle B3 eine 4 eingetragen wird, wenn A1 gleich 150 ist. Wenn A1 irgendeine andere Zahl als 150 ist, wird in die Zelle B3 eine 15 eingetragen.

**2. Die ODER-Funktion**

Die ODER-Funktion liefert als Ergebnis »wahr« oder »falsch«.

Beispiel und Schreibweise: `ODER(A1=2;A1=3)` liefert als Ergebnis »wahr«, wenn A1=2 ist oder auch wenn A1=3 ist. In allen anderen Fällen liefert die Funktion das Ergebnis »falsch«.

Die ODER-Funktion kann gut mit der WENN-DANN-SONST-Funktion verknüpft werden:

Beispiel und Schreibweise: `WENN(ODER(A4=7;A4=9);100;200)`

bedeutet, dass der Zelle, in der diese Formel steht, der Wert 100 zugeordnet wird, wenn A4 gleich 7 oder 9 ist. In allen anderen Fällen wird der Zelle der Wert 200 zugeordnet.

**3. Die Summe-Funktion**

Die Summenfunktion bildet die Addition von Zahlen:

Beispiel und Schreibweise: `SUMME(A1;B5;G9)` bedeutet, dass die Zahlen aus den Zellen A1, B5 und G9 addiert werden und ihre Summe in die Zelle geschrieben wird, in der diese Formel steht.

**4. Zufallszahl**

Diese Funktion erzeugt eine Zufallszahl, nämlich eine Dezimalzahl zwischen 0 und 1.

Beispiel und Schreibweise: `ZUFALLSZAHN()` bedeutet, dass das Programm in diese Zelle eine zufällige Zahl zwischen 0 und 1 setzt.

**5. Die Darstellung von Zahlenpaaren**

Wenn zwei Spalten einer Excel-Tabelle markiert werden und einem Diagramm zugeordnet werden, so wird die erste Spalte als x-Werte und die zweite Spalte als y-Werte interpretiert.

## Lösungsansatz zum Arbeitsbogen K

A2  
Ganzzahl(Zufallszahl()\*6)+1

**x-Koordinate**

B2  
WENN(ODER(A2=1;A2=2);0;0)

D2  
WENN(ODER(A2=3;A2=4);1000;0)

F2  
WENN(ODER(A2=5;A2=6);500;0)

H2  
SUMME(B2,D2,F2,H2)/2

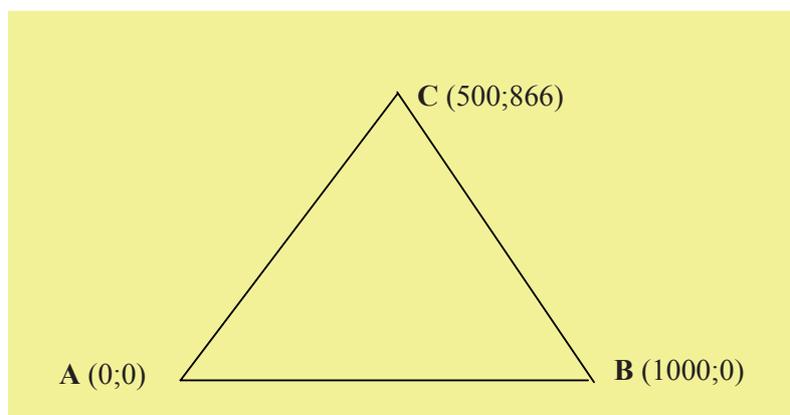
**y-Koordinate**

C2  
WENN(ODER(A2=1;A2=2);0;0)

E2  
WENN(ODER(A2=3;A2=4);0;0)

G2  
WENN(ODER(A2=5;A2=6);866;0)

I2  
SUMME(C2,E2,G2,I2)/2



## Arbeitsbogen L

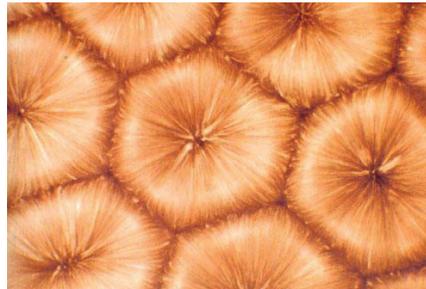
### ***Bénard-Konvektion***

Dieser Versuch soll verdeutlichen, dass zufällige Einflüsse nicht nur etwas zerstören können. Beim Magnetpendel z.B. zerstören sie die Vorhersagbarkeit im Detail. Beim vorliegenden Versuch zur Bénard-Konvektion wirken zufällige Einflüsse dagegen konstruktiv. Das sollen Sie jetzt genauer untersuchen.

#### **1. Aufbau des Versuchs**

Materialliste:

- hitze-unempfindliche Glasschale von ca. 20 cm Durchmesser (Chemiematerial-Handel)
- Silikonöl (aus der Apotheke)
- Aluminiumpulver (Chemikalienhandel)
- elektrische Herdplatte (sie erhitzt flächig)



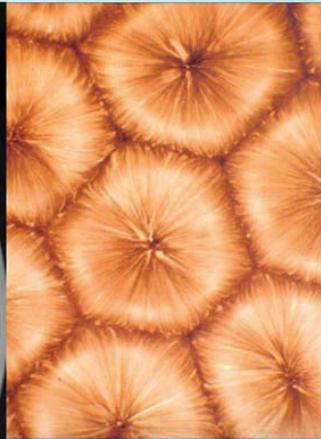
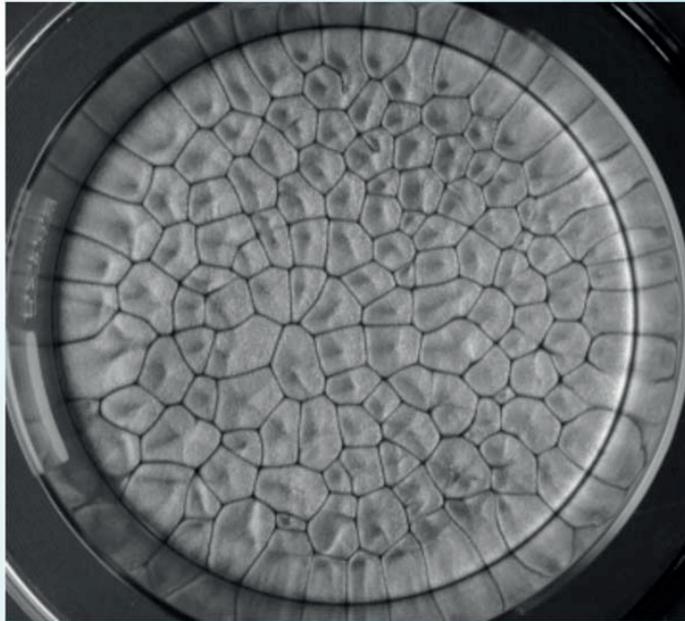
#### **2. Durchführung**

Verteilen Sie das Aluminiumpulver im Silikonöl (anfangs ca. 20 g Aluminium auf 100 ml Öl) in der Glasschale. Erhitzen Sie die Schale langsam (sorgen Sie für gute Lüftung).

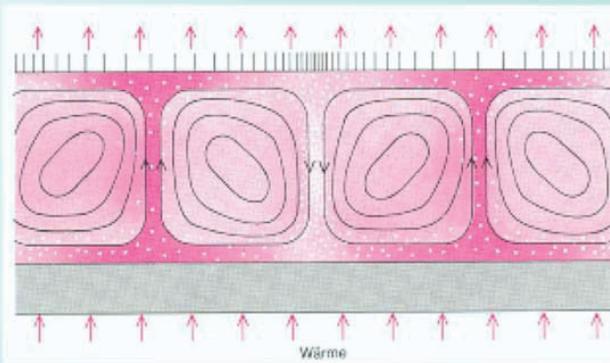
Nutzen Sie vorhandene Informationen über Konvektion.

- Beschreiben Sie, welche Struktur sich bei der Erhitzung des Öls entwickelt.
- Welche Struktur stellt sich ein, nachdem sich ein Temperaturgleichgewicht eingestellt hat?
- Fotografieren Sie die entstandenen Strukturen mit dem Digitalfotoapparat (zwischendurch die Schale mit dem Öl im Wasserbad abkühlen). Vergleichen Sie die entstandenen Strukturen. Was ist gleich, was unterschiedlich?
- Welchen Bedeutung haben Zufallsprozesse für das erste Ausbilden der Struktur und für die voll ausgebildete Struktur?

Zur Bearbeitung dieses Bogens haben Sie \_\_\_ Minuten Zeit.

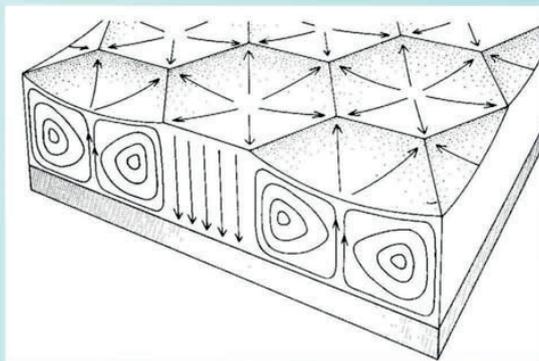


Silikon-Öl mit Aluminiumspänen wird erhitzt



## Bénard-Konvektion

- Beim Erhitzen einer dünnen Flüssigkeitsschicht bilden sich regelmäßige sechseckige Zellen aus: heiße Flüssigkeit steigt auf, kalte steigt ab
- Der Wärmetransport ist bei Konvektion am größten
- Zu Beginn der Konvektion: heiße Bereiche wandern als "Pakete" an zufälligen Stellen von unten nach oben, d.h die Flüssigkeit wird instabil
- Später: es bildet sich eine geordnete Struktur aus, die zeitlich und räumlich stabil ist



## Informationsmaterial

### Gleichgewicht

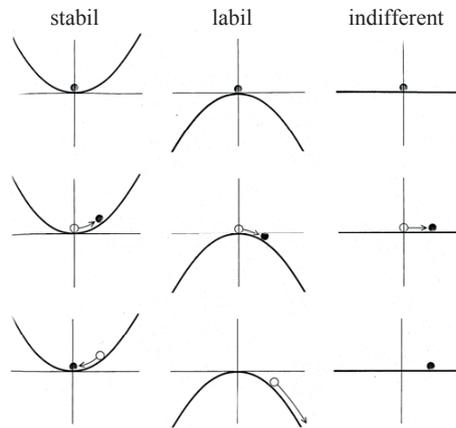
Das Wort Gleichgewicht wird in unterschiedlichen Situationen verwendet. So spricht man z.B. vom Gleichgewicht der Kräfte, thermischem Gleichgewicht, Gleichgewicht chemischer Reaktionen, biologischem Gleichgewicht u.s.w. Man bezeichnet als Gleichgewicht denjenigen Zustand, in dem sich die betrachteten Größen zeitlich nicht ändern.

**Mechanik.** Ein *Gleichgewicht der Kräfte* liegt vor, wenn die resultierende Kraft, die auf einem Gegenstand wirkt, „Null“ ist. D.h. die auf den Gegenstand wirkenden Kräfte heben sich gegenseitig auf.

**Wärmelehre.** Man sagt, dass sich ein System im *thermischen Gleichgewicht* befindet, wenn z.B. der Temperaturunterschied zwischen der unteren und oberen Schicht einer Flüssigkeit „Null“ ist. Gibt es Temperaturunterschiede zwischen der unteren und oberen Schicht der Flüssigkeit, so ist die Flüssigkeit bezüglich der Temperatur im *Nichtgleichgewicht*. Die Prozesse der Wärmeleitung oder der Konvektion (siehe unten) sorgen für einen Ausgleich der Temperatur.

**Arten des Gleichgewichts.** Man unterscheidet drei Arten des Gleichgewichts: *stabil*, *labil* und *indifferent*.

*Stabil* bedeutet, dass der Körper nach einem



kleinen Anstoß von allein in die Gleichgewichtslage zurückkommt.

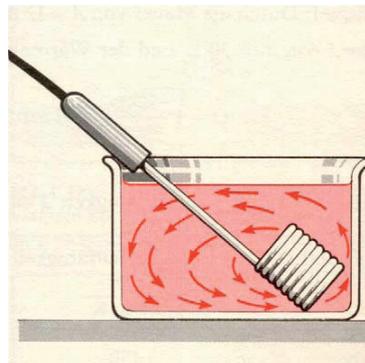
*Labil* bedeutet, dass sich der Körper nach einem kleinen Anstoß von allein immer weiter von der Gleichgewichtslage fortbewegt.

*Indifferent* bedeutet, dass der Körper nach einem kleinen Anstoß weder in seine alte Lage zurückkehrt noch bewegt er sich weiter fort.

### Konvektion

Erhitzt man eine Flüssigkeit (oder ein Gas) an einer Stelle von unten, so passiert folgendes: Die untere Schicht der Flüssigkeit dehnt sich aus, so dass ihre Dichte verringert wird. Infolgedessen kann die untere Schicht nach oben steigen, während die oberen, kälteren und dichteren Schichten nach unten sinken. Beides kann nicht gleichzeitig am gleichen Ort geschehen, denn die Flüssigkeit kann sich nicht an derselben Stelle in zwei entgegengesetzte Richtungen bewegen. Tatsächlich ist es so, dass sie an einer Stelle aufsteigt, sich abkühlt und an einer anderen Stelle wieder hinabsinkt. So entsteht so eine Strömung, die man *Konvektion* nennt.

Die Konvektion setzt aber erst ein, wenn der Temperaturunterschied zwischen den unteren und der oberen Schichten der Flüssigkeit einen bestimmten Wert erreicht, so dass die Auftriebs-



kräfte groß genug sind, um die „Reibung“, die zwischen den Flüssigkeitsteilchen besteht, zu überwinden.

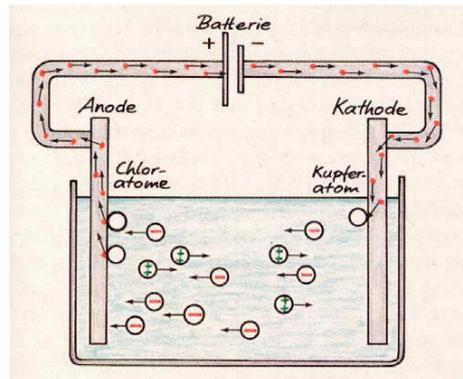
## Elektrolyse

Unter Elektrolyse versteht man die chemischen Vorgänge, die sich ergeben, wenn elektrischer Strom durch eine elektrisch leitende Flüssigkeit fließt.

Die Flüssigkeit, die positive und negative Ionen enthalten muss, um den elektrischen Strom zu leiten, nennt man *Elektrolyt*. Der Elektrolyt kann z.B. eine Säure, eine Lauge oder eine Salzlösung sein. In einer Kupfersalzlösung befinden sich z.B. positiv geladene Kupferionen und negativ geladene Chlorionen.

Die mit der Stromquelle verbundenen Metalle oder Kohlestäbe, die in der Lösung stecken, nennt man *Elektroden*. Die mit dem positiven Pol der Stromquelle verbundene Elektrode heißt *Anode*, die mit dem negativen Pol der Stromquelle verbundene Elektrode nennt man *Kathode*.

Taucht man in eine Lösung, z.B. aus Kupfersalz ( $\text{CuCl}_2$ ) zwei Elektroden und legt eine elektrische Spannung an, so setzen sich die Ionen in Bewegung und zwar werden die positiven Kupferionen von der Kathode und die negativen Chlorionen von der Anode angezogen. Das positiv geladene Kupferion nimmt an der Kathode zwei Elektronen



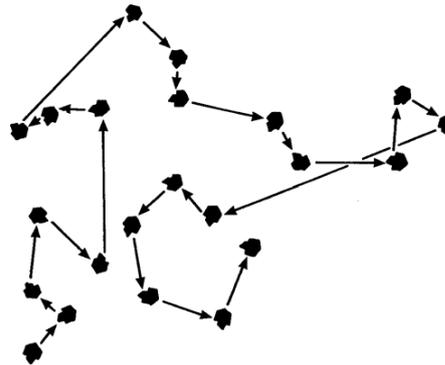
auf und wird zu einem elektrisch neutralen Kupferatom, das sich auf der Kathode abscheidet. Die negativen Chlorionen geben ein Elektron an die Anode ab und bilden Chlorgas, das in Bläschen aufsteigt.

## Brownsche Bewegung

Die Atome und Moleküle einer Flüssigkeit oder eines Gases sind in ständiger regellose Bewegung. Diese Erscheinung wurde zum erstenmal von Robert Brown (1827) beobachtet und man nennt sie deshalb die „*Brownsche Bewegung*“.

Beobachtet man z.B. ein Staubkorn in einem Wassertropfen unter dem Mikroskop, so sieht man, dass es sich regellos hin und herbewegt. Die regellose Bewegung des Staubteilchens wird durch die „Stöße“ der Wassermoleküle, die ebenfalls in Bewegung sind, hervorgerufen. Die Wassermoleküle „stoßen“ das Staubteilchen von allen Seiten an, aber nicht gleichmäßig. Es können zu einem bestimmten Zeitpunkt mehr „Stöße“ von links als aus den anderen Richtungen kommen, und kurz darauf mehr „Stöße“ von oben u.s.w., so dass die Bewegung des Staubteilchens regellos erscheint.

**Temperaturmessung.** Die Regellosigkeit der Teilchenbewegung kann sich sowohl auf die Richtung der Bewegung als auch auf die Geschwindigkeit der Atome oder Moleküle beziehen. D.h. die Geschwindigkeiten der Moleküle können unterschiedlich sein. Zum Beispiel können in einem kleinen Teil einer Flüssigkeit gewisse Teilchen eine höhere Geschwindigkeit besitzen als ihre Nachbarn. Wenn man die Temperatur einer Flüssigkeit bestimmt, dann misst man eigentlich die Geschwin-



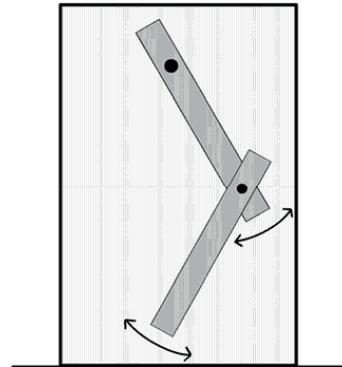
digkeit der Atome oder Moleküle. Da sich die aber unterschiedlich schnell bewegen, misst man im Grunde den Mittelwert ihrer Geschwindigkeiten. Die Abweichungen vom Mittelwert nennt man *Schwankungen* oder auch *Fluktuationen*.

## Arbeitsbogen M

### *Ordnung beim Doppelpendel*

Das Zusammenwirken von Gesetzmäßigkeiten und zufälligen Einflüssen kann geometrische, also räumliche Strukturen hervorbringen. Sie haben das beim Zinkdendriten, beim viskosen Verästeln (Fettbäumchen), beim Sierpinski-Dreieck und bei bestimmten anderen fraktalen und/oder selbstähnlichen Strukturen kennengelernt. Es entstand dabei *räumliche Ordnung*.

Bei instabilen, chaotischen Systemen kann auch *zeitliche Ordnung* entstehen, z.B. beim chaotischen Doppelpendel, das Sie bereits kennen. Untersuchen Sie diese zeitliche Strukturbildung bzw. die zeitliche Ordnung:



#### **1. Machen Sie sich mit dem Simulationsprogramm »Doppel« vertraut.**

- Was wird im Programm dargestellt?
- Probieren Sie die Einstellungen des Programms aus.

#### **2. Untersuchen Sie die zeitlichen Ordnungsstrukturen beim Doppelpendel in Abhängigkeit von den einstellbaren Parametern**

- Wie sind die Abbildungen im Phasenraum des Doppelpendels zu interpretieren, was sieht man?
- Verändern Sie die einstellbaren Parameter und kontrollieren Sie, wie sich das *Phasenraumbild* dadurch verändert.

#### **3. Formulieren Sie ein Ergebnis**

- Schriftliche Bearbeitung: Wie stellt sich zeitliche Ordnung beim chaotischen Doppelpendel im Phasenraum dar?

Zur Bearbeitung dieses Bogens haben Sie \_\_\_ Minuten Zeit.

---

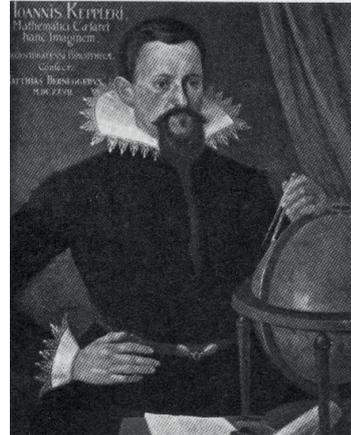
**Arbeitsbogen N**

***Weltbilder***

Lesen Sie den Text T 5.

- a)** Fassen Sie die wesentlichen Gedanken des Textes schriftlich zusammen.
- b)** Welche Entwicklung des naturwissenschaftlichen Weltbildes wird hier in Ansätzen dargestellt?
- c)** Welche Aussagen über die Stabilität des Sonnensystems werden gemacht?
- d)** Wie ordnen sich die Gedanken des Textes in die Überlegungen der vergangenen Unterrichtsstunden ein?

Beantworten Sie schriftlich.



*Johannes Kepler (1571-1630) entdeckte, dass sich die Planeten auf Ellipsen um die Sonne bewegen*

Für die Bearbeitung dieses Bogens haben Sie \_\_\_ Minuten Zeit.

Beteiligen Sie sich an der folgenden Diskussion.

**Arbeitsbogen O**

**Begriffsnetz**

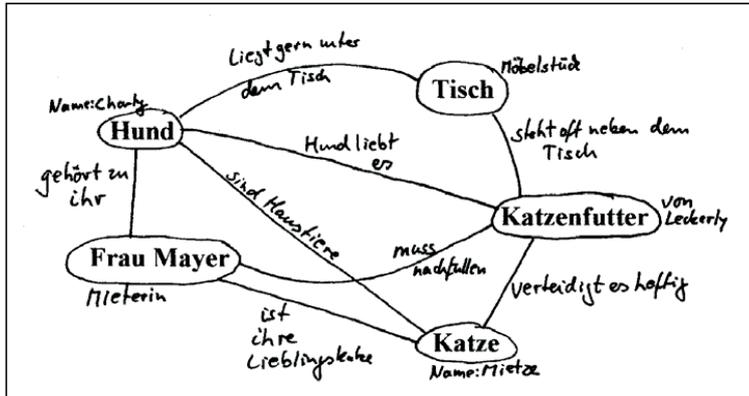
Erinnern Sie sich an die erste Folie zu Beginn des Unterrichtsganges. Dort wurde eine Reihe von Begriffen genannt, um die sich die letzten Physikstunden gedreht haben.

Diese Begriffe sind: *Asteroiden, Berechenbarkeit, Chaos, Fraktale, Instabilität, Mond, Naturgesetz, Ordnung, Planeten, Selbstähnlichkeit, Sonne, Stabilität, Struktur, Vorhersagbarkeit, Zufall.*

Entwickeln Sie in Dreiergruppen ein Netz aus diesen Begriffen:

- a) Sie haben nun Karten vor sich liegen. Kleben Sie die Karten mit etwas Abstand auf Karton und schreiben Sie an die Begriffe mit jeweils ein, zwei Sätzen, was sie bedeuten. Drei freie Karten können Sie mit weiteren wichtigen Begriffen beschriften.
- b) Zeichnen Sie Verbindungslinien zwischen zwei Begriffen, wenn Sie wissen, welche Beziehung zwischen den Begriffen bestehen. Schreiben Sie an die Verbindungslinie, welche Beziehung zwischen den beiden Begriffen besteht.

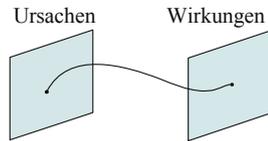
Ein Beispiel für ein Begriffsnetz zu den Begriffen *Frau Mayer, Hund, Katze, Katzenfutter, Tisch*:



Für die Bearbeitung dieses Bogens haben Sie \_\_\_ Minuten Zeit.

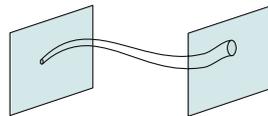
## Begriffserklärungen

### schwache Kausalität - starke Kausalität



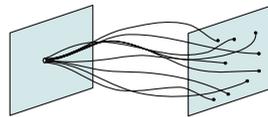
#### schwache Kausalität:

Es ist das, was man gemeinhin als Kausalität bezeichnet: eine Ursache hat eine bestimmte Wirkung; kann man die Ursache exakt reproduzieren, so erhält man immer die gleiche Wirkung.- Dies ist eine Idealisierung, die schon Maxwell ansprach.



#### starke Kausalität:

Es gilt schwache Kausalität und gleichzeitig, dass ähnliche Ursachen zu ähnlichen Wirkungen führen. Fehler wachsen linear an.



#### bei chaotischem Verhalten:

Schwache Kausalität gilt weiterhin, die Annahme der starken Kausalität aber nicht mehr. Fehler wachsen nicht-linear.

#### James C. Maxwell, 1879:

»Es ist eine metaphysische Doktrin, daß gleiche Ursachen gleiche Wirkungen nach sich zögen. Niemand kann sie bestreiten.



Ihr Nutzen ist aber gering in einer Welt wie dieser, in der gleiche Ursachen niemals wieder eintreten und nichts zum zweiten Mal geschieht. Das daran anlehende physikalische Axiom lautet: Ähnliche Ursachen haben ähnliche Wirkungen. Dabei sind wir aber von Gleichheit übergegangen zu Ähnlichkeit, von absoluter Genauigkeit zu mehr oder weniger grober Annäherung«

**Deterministisches Chaos** Ein System verhält sich dann »deterministisch chaotisch«, wenn diese vier Bedingungen erfüllt sind:

#### 1 Gesetzlichkeit

Das Verhalten des Systems ist deterministisch, d.h. es ist durch Naturgesetze bestimmt; schwache Kausalität gilt, es passiert nicht »irgend etwas«.

#### 2 eingeschränkte Vorhersagbarkeit

Das Verhalten ist eingeschränkt vorhersagbar: im Detail ist es nur für sehr kleine Zeiträume vorhersagbar, langfristig ist es nicht vorhersagbar; starke Kausalität ist nicht vorhanden.

#### 3 labiles Gleichgewicht

Es gibt labile Gleichgewichte im Systems, die Anfangsfehler und kleine Störungen nicht-linear vergrößern; diese labilen Gleichgewichte kommen sehr häufig zum Tragen, im reibungsfreien Fall unendlich häufig.

#### 4 Ordnung im Chaos

Bei der Analyse des Verhaltens mit gezielten Methoden (zur Messdatenauswertung und zur Darstellung) erkennt man Strukturen. Sie machen deutlich, dass Chaos kein völliges Durcheinander ist, sondern auch Ordnung beinhaltet, die aber nicht offensichtlich ist.

### Lineares und nichtlineares Fehlerwachstum

Für eine genaue Untersuchung physikalischer Systeme ist es wichtig, ihre "Sensitivität" gegenüber Anfangsfehlern und gegenüber Störungen auch quantitativ zu beschreiben. Bei Systemen, die in der Physik als chaotisch bezeichnet werden, gibt es Situationen, in denen sich kleine Unterschiede in den Anfangsbedin-

gungen mit der Zeit *exponentiell* verstärken. Im Beispiel unten geht es um zwei Stabpendel, die genau gleich gebaut sind: An einer Stange der Länge  $s$  befindet sich als Pendelgewicht eine Masse  $m$ . Am anderen Ende sind die Stangen beider Pendel drehbar gelagert. Nun werden zwei Fälle untersucht:

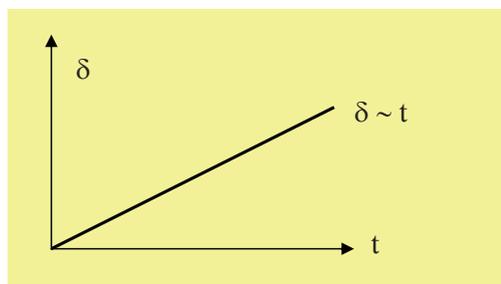
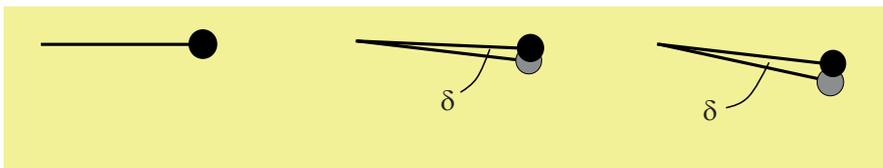
#### Fall 1: Lineares Fehlerwachstum

Beide Stabpendel werden um  $90^\circ$  ausgelenkt und dann mit einem kleinen "Schubs" nach unten angeworfen. Beide Pendel bekommen also eine Anfangs-Winkelgeschwindigkeit mit. Das erste Pendel hat die Anfangs-Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{01}$ , das zweite Pendel die minimal größere Anfangs-Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{02} = \omega_{01} + \varepsilon$ , wobei das  $\varepsilon$  für einen sehr kleinen Wert stehen soll. Das zweite Pendel schwingt also um eine Winzigkeit schneller los als das erste.

Diese Situation wird experimentell untersucht; man will wissen, wie sich der Unterschied in den Winkel-

geschwindigkeiten auf den Unterschied bei den Auslenkungswinkeln auswirkt, wie sich also  $\alpha_1 - \alpha_2$  verändert. Diese Differenz  $\delta = \alpha_1 - \alpha_2$  kann man als "Fehler" interpretieren und man möchte wissen, wie sich dieser Fehler mit der Zeit entwickelt.

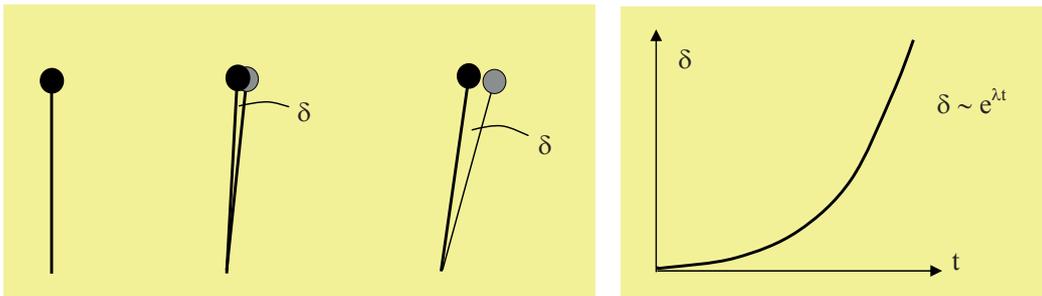
Die ersten drei Abbildungen zeigen, wie sich der Winkel zwischen den beiden Pendeln vergrößert. Wenn man diesen Winkel in einem Diagramm in Abhängigkeit von der Zeit aufträgt, ergibt sich eine Gerade.  $\delta$  wächst proportional mit der Zeit:  $\delta \sim t$ , man sagt der Fehler  $\delta$  wächst *linear*.



## Fall 2: Exponentielles Fehlerwachstum

Im zweiten Fall werden beide Pendel auf den Kopf gestellt. Wieder werden sie leicht angeschubst, so dass ihre Winkelgeschwindigkeiten zu Anfang der Bewegung  $\omega_{01}$  bzw.  $\omega_{02} = \omega_{01} + \varepsilon$  betragen. Auch diesmal wird untersucht, wie sich die Differenz der Winkel mit der Zeit verändert. Trägt man den Fehler  $\delta = \alpha_1 - \alpha_2$  wieder gegenüber der Zeit auf, so ist der Zusammenhang nicht mehr proportional, nicht mehr linear. Statt dessen kann man die entstandene Kurve durch eine Exponentialfunktion beschreiben. Die Beziehung zwischen dem Fehler  $\delta$  und der Zeit ist nun  $\delta \sim e^{\lambda t}$ ,

man sagt der Fehler wächst *exponentiell*, und damit *nicht-linear*. Die Größe  $\lambda$  im Exponenten gibt an, wie stark der Fehler anwächst. In der Chaostheorie ist die Größe  $\lambda$  von großer Bedeutung. Bei den verschiedenen chaotischen Systemen wird immer als erstes versucht,  $\lambda$  zu bestimmen. - Bei den auf dem Kopf stehenden Pendeln wachsen die Fehler deswegen exponentiell, weil sie erst sehr langsam starten, wenn sie auf dem Kopf stehen. Die Beschleunigung durch die Erdanziehung ist zunächst praktisch Null und nimmt dann sehr stark zu.



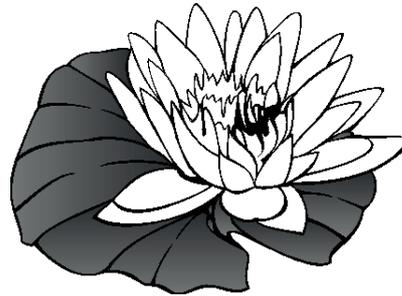
### Konsequenzen für die Vorhersagezeit

Ein Ziel der physikalischen Beschreibung eines Vorgangs ist die Vorhersage. Wenn man bei linearem Fehlerwachstum die Vorhersagezeit verdoppeln möchte, so muss man den Anfangsfehler  $\varepsilon$  linear verkleinern. Der Aufwand für die Erhöhung der Vorhersagezeit wächst linear. Anders bei exponentiellem Fehlerwachstum, wie es z.B. beim Wettergeschehen vorliegt. Möchte man hier die Vorhersagezeit z.B. um einen Tag verlängern,

muss der Anfangsfehler  $\varepsilon$  halbiert werden. Möchte man die Vorhersagezeit wieder um einen Tag verlängern, so muss  $\varepsilon$  wieder halbiert werden usw. Der Aufwand zur Erhöhung der Vorhersagezeit wächst exponentiell; bei der Wettervorhersage stößt man daher sehr schnell an technische Grenzen was das Netz an weltweiten Wetterstationen und die Computer zur Bearbeitung der Messdaten angeht.

### Aufgabe

Ein Gedankenversuch: In zwei Seen von jeweils  $15000 \text{ m}^2$  Wasseroberfläche wird je eine Seerose von  $0,125 \text{ m}^2$  Blattfläche gepflanzt. Bei der Pflanze im ersten See wächst jeden Tag ein neues Blatt mit einer Fläche von  $0,125 \text{ m}^2$ . Bei der Pflanzensorte im zweiten See verdoppelt sich jeden Tag die Zahl der  $0,125 \text{ m}^2$  großen Blätter.



a) Nach wie vielen Tagen sind die Seen jeweils vollständig mit Blättern bedeckt? Berechne mit dem Taschenrechner.

b) Wie lange dauert es bei vierfacher Größe der Seen? Stellen Sie die Ergebnisse graphisch dar:

---

## Texte zum Thema »Berechenbarkeit, Stabilität und Instabilität im Planetensystem«

### T 1

#### Die Entdeckung der Planeten jenseits des Uranus

Die Entdeckung der Planeten Neptun (1846) und Pluto (1930) zählt zu den spannendsten Kapiteln der neueren Astronomiegeschichte. Planvolles Denken, Rechnen und Beobachten [...] führten schließlich zur Erweiterung unseres Bildes vom Sonnensystem. Jahrzehntelanges beharrliches Bemühen und eine nie erlahmende Geduld der beteiligten Forscher waren die Voraussetzung für glänzende Erfolge.

Neptun ist buchstäblich am Schreibtisch entdeckt worden. Und das kam so: Nach der Entdeckung des Planeten Uranus durch *F. W. Herschel* am 17. März 1781 bemühten sich die Astronomen intensiv um die genaue

Bestimmung seiner Bahn. Dabei kam ihnen der Umstand zustatten, dass man in älteren Sternkarten diverse Beobachtungen des Planeten nachweisen konnte, bei denen er allerdings immer für einen Fixstern gehalten worden war. Doch die zahlreichen Beobachtungen einschließlich der neueren Beobachtungen ließen sich nicht zu einem widerspruchsfreien theoretischen Bild der Bahn zusammenfügen.

Allmählich verdichtete sich die Auffassung, dass die Abweichung zwischen Theorie und Beobachtung möglicherweise in einem weiteren noch nicht beobachteten Planeten zu suchen seien, der durch seine Massenanziehung die Bewegung des Uranus stört. Da die Störungen nach

dem Newtonschen Gravitationsgesetz erfolgen mussten, machte sich der deutsche Astronom *F. W. Bessel* (1784-1846) daran, den noch unbekannteren »Störenfried« in mühsamer Rechenarbeit aufzuspüren. [...] Der Berliner Astronom *J. G. Galle* (1812-1910) suchte schließlich nach dem Planeten und fand ihn tatsächlich nur 55 Bogenminuten vom vorausberechneten Ort entfernt. Zwar zweifelte zu jener Zeit niemand mehr an der Gültigkeit des Newtonschen Gravitationsgesetzes, dennoch war die Entdeckung eines zuvor berechneten Planeten, der Neptun genannt wurde, ein beachtlicher Triumph für die Wissenschaft. [...]

(aus »Astronomie I«, Peatec-Verlag, 1994)

### T 2

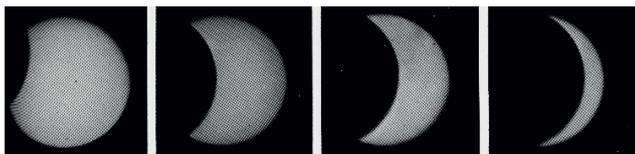
#### Sonnenfinsternis am 11. August 1999

[...] Der Punkt auf der Erdoberfläche, der zuerst vom Kernschatten des Mondes getroffen wird, liegt im Atlantik bei den geographischen Koordinaten 65°05' westlicher Länge und 41°02' nördlicher Breite, ca. 300 km südlich von Neufundland und Neuschottland. Hier beginnt mit Sonnenaufgang um 11 Uhr 30 und 50

Sekunden mitteleuropäischer Sommerzeit die totale Sonnenfinsternis. Die Totalität dauert hier nur 47 Sekunden. [...] Wenige Kilometer südöstlich der rumänischen Stadt Rimnicu-Vilcea, genau an einem Ort mit den Koordinaten 24°18' östlicher Länge und 45°04' nördlicher Breite, etwa 140 km nordwestlich von Bukarest gelegen, erreicht die totale Sonnenfinsternis um 13 Uhr 03 und 4 Sekunden MESZ ihr Maximum. Hier

ist die Totalitätszone 112 km breit, der Mondschaten ist mit 2450 km/h an dieser Stelle am langsamsten. Genau 2 Minuten und 22,4 Sekunden lang wird an diesem Ort die Sonne vom Mond verdeckt. [...]

(aus: homepage des Deutschen Wetterdienstes ([www.dwd.de](http://www.dwd.de)) im Mai 1999)



Der Mond schiebt sich vor die Sonne

## T 3

**Aufbruch im Sonnensystem, Teil 1**

Ist das Kreisen der Planeten wirklich ewiglich? Seit über vier Milliarden Jahren ziehen die Planeten ihre Bahnen um die Sonne. Wie ein Uhrwerk schnurrt die himmlische Maschinerie verlässlich und unvergänglich. Doch der Schein trügt: Das Planetensystem drohte schon häufig ins Chaos abzurutschen.

Bis 1983 war es niemandem gelungen, die Bewegung der Planeten über mehr als fünf Millionen Jahre weit in die Zukunft zu berechnen. Die Planeten zerren sich gegenseitig ständig mit ihrer Schwerkraft aus der geometrisch vorgeschriebenen Bahn. Bedrohen solche Störungen vielleicht gar die Stabilität des ganzen Systems?

Von dem komplizierten Problem fasziniert, machten sich *Jack Wisdom* und *Gerald Jay Sussman* in den achtziger Jahren am Massachusetts Institute of Technology intensiv an die Untersuchung von Planetenbahnen. Mit einem extra hierfür gebauten Spezialrechner waren die beiden Theoretiker erstmals in der Lage, mehrere hundert Millionen Jahre weit vorzustoßen.

Fünf Monate brauchte der Computer damals schon, um die Bahnen der fünf äußeren Planeten über 845 Millionen Jahre hinweg zu berechnen. Die vier großen Planeten zeigten dabei keine ungewöhnlichen Schwankungen der Bahnform. Lediglich bei Pluto stießen die Forscher auf ein chaotisches Verhalten. Was aber bedeutet chaotisch in diesem Zusammenhang?

Plaziert man einen Planeten an einer beliebigen Position auf seiner Bahn und läßt ihn loslaufen, so wird man ihn am Ende der Rechnung nach vielen Umläufen an einem anderen Ort wiederfinden. Wiederholt man die Rechnung, indem man den Startpunkt nur ganz geringfügig verschiebt, wird man diesen Planeten am Schluss fast an derselben Stelle wiederfinden wie beim ersten Lauf.

Bei einer »chaotischen Bewegung« wirken die anderen Planeten auf den Körper so stark ein, dass dieser sich beim zweiten Rechenlauf nach einer bestimmten Zeit sehr weit von den Positionen des ersten Rechenlaufs entfernt. [...]

Bald zeigte sich, dass auch die inneren Planeten chaotisch um die Sonne

laufen. Schon nach fünf Millionen Jahren lässt sich ihre Position nicht mehr vorhersagen. [...]

Noch drastischer sind die Einwirkungen der Schwerkraftfelder auf die Bahnform. Während die meisten Planetenbahnen nahezu kreisförmig sind, läuft Merkur auf einer stärker elliptischen Bahn. Nur Plutos Orbit ist noch langgestreckter. Man fand heraus, dass es sogenannte chaotische Zonen gibt: Gerät ein Planet dort hinein, schaukeln sich die äußeren Störungen durch Resonanzeffekte stark auf.

Beim Merkur kann das soweit führen, dass seine Bahn extrem elliptisch wird und kurzzeitig sogar die von Venus schneiden kann. Dieser bedrohliche Zustand dauert einige Jahrtausende an, bis sich die Merkurbahn ähnlich wie heute wieder der Kreisbahn annähert. Kommt es aber in dieser Zeitspanne zu einer nahen Begegnung der beiden Planeten, kann Merkur aus dem Sonnensystem herausgeschleudert werden - oder die beiden Körper stoßen gar zusammen. [...]

(aus Bild der Wissenschaft, Heft 1, 1997)

## T 4

**Aufbruch im Sonnensystem, Teil 2**

[...] Der amerikanische Astrophysiker *Jack Wisdom* sah sich genötigt, bei seinen Simulationen die Umlaufberechnungen für die Asteroiden des Asteroidengürtels zwischen Mars und Jupiter auf 300.000 Jahre auszu dehnen, bis plötzlich interessante Effekte auftauchten: Körper, die 100.000 Jahre lang gleichmäßig die Sonne umkreisten, wechselten auf einmal in eine chaotische Bahn über. Mehr noch: »Wir fanden«, erzählt *Wisdom*, »dass alle chaotischen Asteroiden die Marsbahn überqueren.«

Als der Astrophysiker seine Berechnungen weiter verfeinerte, gerieten einige der Asteroiden sogar bis in die Nähe der Erdbahn. Und hier können, wie riesige Einschlagkrater aus der Erdgeschichte mahnen, solche Himmelskörper als Meteoriten herabstürzen. [...]

Auch *Poincarés* Befürchtungen, die Planetenbahnen könnten chaotisch sein, bekamen neue Nahrung. Mit einem aufwendigen Rechenmodell, das neben allen großen Planeten auch die Langzeitwirkung des Erdmondes [...] berücksichtigt, hat *Jaques Laskar* das Schicksal des Sonnensystems über

einen riesigen Zeitraum simuliert: [...] Resultat: »Das Sonnensystem ist chaotisch; besonders für die inneren Planeten (Merkur, Venus, Erde, Mars) geht die Vorhersagbarkeit nach zig Millionen Jahren verloren - zwei Jahrhunderte haben Himmelsmechaniker versucht, das Gegenteil zu beweisen, nämlich dass das Sonnensystem stabil ist, vermutlich motiviert durch die simple Tatsache, das wir Menschen existieren.«

(aus GEO-Sonderheft »Chaos und Kreativität«, 1990)

## T 5

### Stabilität des Sonnensystems

Neben der Erforschung der physikalischen Beschaffenheit der Planeten hat auch die Himmelsmechanik in den letzten vierzig Jahren eine wahre Renaissance erfahren. Das liegt zum Teil natürlich daran, dass wegen der Notwendigkeit, die komplizierten Raumfahrtmanöver rechnerisch vor auszuplanen, die Methoden der Bahnberechnung [...] große Fortschritte gemacht haben. [...] Die Planetenbahnen am Himmel sind zwar kompliziert, weisen aber doch so viele Regelmäßigkeiten auf, dass zuerst die Babylonier und später dann die Griechen Methoden zur Vorhersage charakteristischer Planetenkonstellationen entwickeln konnten, die schließlich in das Ptolemäische System mündeten, bei dem die Erde im Mittelpunkt des Sonnensystems steht und die anderen Planeten und die Sonne sich um die Erde drehen.

Dies war eine echte Himmelsmechanik, die auch noch galt, als *Kopernikus* den Bau des Himmels revolutionierte, die Erde aus dem Mittelpunkt der Welt verbannte und die Sonne an ihre Stelle setzte. Die Planetenbahnen blieben himmlische Kreisbewegungen. Auch als *Kepler* sie durch Ellipsen ersetzte, änderte sich an ihrer Dauerhaftigkeit und Unveränderlichkeit nichts. [...]

Die Newtonsche Gravitationstheorie (»Philosophiae naturalis principia mathematica«, 1687) lieferte Ellipsen als stabile, unveränderliche Bahnen der Planeten, solange nur die Sonne und ein einzelner Planet betrachtet wurden. Wenn aber die Anziehungskräfte der anderen Planeten berücksichtigt wurden, dann ergaben sich Störungen für die geordneten Bahnen, und ihre Dauerhaftigkeit und Unveränderlichkeit wurde fraglich. Schon *Newton* berechnete dies und konnte so bestimmte Eigenheiten der

Bahnbewegung des Mondes deuten. [...] In der Newtonschen Theorie stören sich die Planeten gegenseitig, und es war nicht sicher, ob die heute gültige Ordnung erhalten bleiben würde. Da *Newton* aber glaubte, die Welt sei nur einige tausend Jahre alt, war die Frage nicht so dringend, auch konnte er sich das Eingreifen Gottes zur Wiederherstellung der verlorenen Ordnung vorstellen. [...]

Diese Gedanken waren für den Franzosen *Pierre Simon de Laplace* (1749-1827) nicht akzeptabel und er versuchte die Stabilität des Sonnensystems zu beweisen. Gerade *de Laplace* hatte die Gesetzmäßigkeit aller kosmischen Bewegungen herausgestellt: Wenn die Orte und die Geschwindigkeiten aller Massenpunkte auch nur für einen einzigen Augenblick bekannt waren, dann, so argumentierte er, reicht das Newtonsche Gravitationsgesetz aus, um die Struktur und Bewegung für alle Zeiten zu berechnen, wenn man nur die Differentialgleichungen rechnerisch bewältigen könnte. *Laplace* sprach damals davon, dass hierfür ein Dämon nötig wäre; heute würden wir eher an einen riesigen Computer denken.

Dieses Bild vom Laplaceschen Dämon, der die zeitliche Entwicklung der Welt für alle Zeiten vorausrechnet, so dass sie wie ein gut geregeltes Uhrwerk abschnurrt, hat für die geistesgeschichtliche Einordnung der Naturwissenschaft im 19. Jahrhundert eine große Rolle gespielt. [...]

Da die Störung, die ein Planet auf die Bahn eines anderen Planeten ausübt, nur sehr gering ist, reichen im allgemeinen kleine Korrekturen an den Newtonschen Gleichungen aus, um die tatsächliche Bahn vor auszuberechnen. Solche Korrekturrechnungen wurden in den 3000 Jahren nach *Newton* mit immer größerer Genauigkeit durchgeführt. Sie weisen

allerdings einen Nachteil auf: Sie gelten immer nur für ein begrenztes Zeitintervall. Für Zeiten, die darüber hinausgehen, stimmen die berechneten Positionen der Planeten nicht mehr mit den gemessenen überein. [...] Einerseits sind die Eingangsgrößen des Planetensystems nur mit einer endlichen Genauigkeit bekannt. Dies betrifft nicht nur die Bahnparameter, sondern z.B. auch die Massen der Planeten. Und andererseits können die Rechnungen nur mit einer endlichen Stellenzahl durchgeführt werden. Nach einiger Zeit erreichen die Rundungsfehler und die Unsicherheiten eine solche Größe, dass die Berechnungen nichts mehr mit dem zu tun haben, was wirklich passiert. [...]

Natürlich hat es nicht an Versuchen gefehlt, die Stabilität des Sonnensystems zu beweisen. Der schwedische König *Oskar II.* setzte sogar einen Preis für den unumstößlichen Beweis dafür aus, dass das Sonnensystem stabil ist. Der Mathematiker *Poincaré* gewann diesen Preis; allerdings konnte er mit einer weit entwickelten mathematischen Methode nur, aber immerhin zeigen, dass die Planetenbahnen immer kreisähnlich bleiben, und die Ausdehnung der Bahnen unserer Planeten endlich bleiben, d.h. dass keiner der Planeten aus dem Sonnensystem entweichen kann. Außerdem konnte er für Körper im Sonnensystem die möglichen Bewegungstypen, die sehr komplex sein können, beschreiben. *Poincaré* kommentierte 1899 seine Entdeckungen mit den Worten »Die Dinge sind so bizarr, dass ich es nicht aushalte, weiter über sie nachzudenken«.

Die Frage nach der endgültigen Stabilität des Planetensystems ist daher nach wie vor offen. [...]

(nach »Die Ordnung des Universums« von *Kirsten Rohlf*s, Birkhäuser-Verlag, 1992)

**weitere Texte zum Thema Berechenbarkeit, Stabilität und Instabilität im Planetensystem**

**T 6 (zum Aspekt »Instabilität im Asteroidengürtel«)**

**Asteroiden (Kleinplaneten)**

In der Neujahrsnacht 1800/1801 entdeckte *G. Piazzi* einen kleinen Planeten, der zwischen Jupiter und Mars läuft und mit dem Namen Ceres (Durchmesser 1003 km) belegt wurde. Es folgten die Entdeckungen von Palas (Durchmesser 608 km) im Jahre 1802, Juno (Durchmesser 247 km) 1804 und Vesta (Durchmesser 538 km) 1807. [...] Seither verging kein einziges Jahr, in dem nicht neue Kleinplaneten entdeckt wurden. Heute sind über 5000 Asteroiden so gut bekannt, dass ihre Bahnen im wesentlichen gesichert sind. [...] Aufgefunden wurden aber schon weit mehr, es dürften etwa 40.000 Objekte existieren. Die Schätzungen für die Gesamtmasse dieser Asteroiden schwanken zwischen 1/1000 und 1/2 der Masse der Erde. [...]

Die Asteroiden bestehen aus Materie, die sich zur Zeit der Planetenbildung durch die große Nähe zum Jupiter

nicht zu einem großen Körper verbinden konnte. Die kleinsten unter ihnen haben Durchmesser von nur wenigen Metern.

Zeichnet man ein Diagramm, das die Häufigkeit der Asteroiden für bestimmte mittlere Entfernungen von der Sonne zu erkennen gibt, so stellt sich keine zufällige Verteilung heraus. Vielmehr sind ganz bestimmte Entfernungszonen deutlich ausgespart. Dabei stehen die Umlaufzeiten, die ein Körper in diesen Lücken haben würde, in einem einfachen ganzzahligen Verhältnis zur Umlaufzeit des Jupiter. Eine besonders ausgeprägte Lücke befindet sich bei 1:2. Weitere Aussparungen sind bei 1:3, 2:5, 3:7, 2:3 und 3:4 zu finden. Die Lücken erklären sich durch die Störungswirkung des Jupiter: diese Störungen führen zu einer fast vollständigen Verdrängung von Körpern, die sich ursprünglich in diesen



*Foto des 30 km x 15 km x 15 km großen Asteroiden Ida, 1997 aufgenommen von der Sonde Galileo*

Lücken bewegt haben mögen. Die stärkste Störung wäre für den Fall zu erwarten, dass ein Asteroid eine Umlaufzeit hat, die genau mit der Umlaufzeit des Jupiter übereinstimmt (1:1). [...]

(aus dtv-Atlas zur Astronomie, dtv, 1993)

**T 7 (zum Aspekt der »Gefahr unberechenbarer Asteroiden«)**

**Asteroid flog knapp an der Erde vorbei**

**Wien.** Ein Asteroid mit einem Durchmesser von rund 100 Metern ist knapp an der Erde vorbeigeflogen. Österreichische Astronomen teilten gestern mit, in der Nacht zum 30. September 2000 habe der Himmelskörper in nur 1,5 Millionen Kilometern Entfernung unseren Planeten passiert. Dass entspreche etwa der vierfachen Entfernung zwischen Erde und Mond und sei in astronomischen Dimensionen als »Streifschuss« zu werten. Ein derartiger Fall werde nur alle paar Jahre registriert, sagte der Astronom Franz Kerschbaum von der

Universität Wien. Der Asteroid mit der Bezeichnung 2000 SM10 raste nach Angaben der Linzer Astronomischen Gemeinschaft, die sich auf die Beobachtung solcher Himmelskörper spezialisiert hat, mit einer Geschwindigkeit von 45000 Kilometern pro Stunde an der Erde vorbei.

(Internet, 4. 10. 2000)



*Französische Karikatur aus dem 19. Jahrhundert verdeutlicht die Angst vor Asteroiden- und Kometeneinschlägen*

## T 8 (zum Aspekt »Instabilität in der Oortschen Wolke«)

### Oortsche Wolke

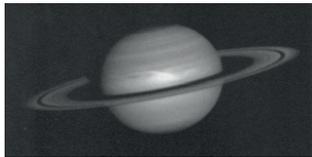
Kometen, Objekte aus Eis und gänzlich verschieden von Asteroiden, sind schon von ihrer Entstehung her Mitglieder des Sonnensystems. Sie sind nach heutiger Vorstellung unversehrte Relikte [...] aus der Zeit der Planetenentstehung vor rund 4,5 Milliarden Jahren. Nach *J. Oort*

bewegt sich die ganz überwiegende Mehrzahl der  $10^{11}$  Kometenkerne unter der Gravitationseinwirkung der Sonne in Bahnen, die weit außerhalb unseres Sonnensystems liegen, etwa 20.000 bis 40.000 Erdradien von der Sonne entfernt. [...] Die Kometenwolke ist weder optisch noch durch ihre Gravitation nachweisbar. Durch

kleine Gravitationsstörungen, z.B. durch nahe vorbeiziehende Sterne, gelangen gelegentlich einzelne Objekte aus dieser »Oortschen Wolke« auf stark exzentrischen Bahnen in den inneren Bereich des Sonnensystems. [...]

(aus Meyers Handbuch Weltall, Meyers Lexikonverlag, 1994)

## T 9 (zum Aspekt der »Strukturbildung des Ringsystems des Saturn als Zusammenspiel von stabilisierenden und destabilisierenden Mechanismen«)



*Saturn (Foto des Hubble-Teleskop)*

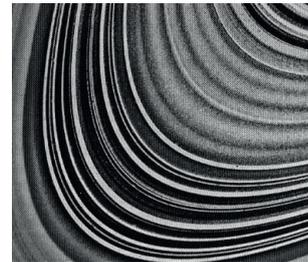
Die großen Planeten unseres Sonnensystems sind alle von Ringen umgeben. Man vermutet, dass die Ursache im Massereichtum dieser Planeten zu suchen ist. Gerät ein Himmelskörper in das Gravitationsfeld eines anderen, dann beginnen deformierende Gezeitenkräfte auf ihn zu wirken. Zum Glück befindet sich die Erde lediglich im relativ harmlosen Gravitationsfeld des Mondes, welcher nur die Flutberge der Ozeane auslösen kann. Das Meerwasser verbleibt aber auf der Erde, weil die irdische Anziehungskraft die des Mondes bei weitem überwiegt.

In der Nähe der großen Planeten

können sich kleinere Objekte allerdings nicht mehr entgegen den Gezeitenkräften stabilisieren; sie werden regelrecht auseinandergerissen. Die Trümmer bilden Baumaterial für die Ringe. Außerdem ist es möglich, dass sich in der Nähe großer Planeten erst gar keine Monde entwickeln, weil sich kleinere Materiebrocken nicht zu größeren zusammenfinden können.

Eines der wichtigsten Resultate der Voyagersonden war die Untersuchung des außerordentlichen Strukturreichtums der Saturnringe. Tausende von schmalen Ringen und Lücken fügen sich zu dem Anblick zusammen, den man von der Erde aus als zusammenhängendes Ringgebilde registrieren kann.

Zwischen den mit Materie besetzten Ringen befinden sich nahezu leergefegte Lückenregionen. Ein Gesteinsbrocken, der sich in dieser Region um den Saturn bewegt, kann aus seiner Bahn geschleudert werden, wenn ein massereicher Mond etwas



*Struktur der Saturnringe*

weiter draußen mit der doppelten, dreifachen, vierfachen,... Umlaufzeit ebenfalls um den Saturn läuft. Der schwere Körper zieht den leichten Brocken in periodischen Abständen an, so dass der Brocken in eine Schlingerbewegung kommt, die ihn schließlich aus seiner Bahn wirft hinein in eine stabile Region der Ringe.

(aus »Astronomie II«, Peatec-Verlag, 1995)

## T 10 (zum Aspekt der »Instabilität des Sonnensystems«)

[...] Neuere computergestützte Untersuchungen zeigen, dass das Verhalten unseres Planetensystems jenseits eines Vorhersagehorizontes von einigen hundert Millionen Jahren alles andere als stabil und vorhersagbar ist. Kometen, Asteroiden und selbst Planeten führen chaotische Bewegungen aus. Damit läßt sich begründen, dass das Planetensystem in der derzeitigen Konstellation als Ergebnis einer von Katastrophen gekennzeichneten Entwicklung anzusehen ist. Aus der Perspektive des Lebens auf der Erde

mag der Vorhersagehorizont groß genug erscheinen. Im kosmologischen Maßstab nimmt er sich eher bescheiden aus. [...]

(aus H.-J. Schlichting, unveröffentlichtes Manuskript, 1996)