

## Modellieren – Schlüsselfähigkeit für physikalische Forschungs- und Lernprozesse

Silke Mikelskis-Seifert, Marco Thiele und Thilo Wünsch

IPN Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften, Olshausenstr. 62, 24098 Kiel

(Eingegangen: 20.12.2004; Angenommen: 30.05.2005)

### Kurzfassung

Beim Verstehen von Physik ist die Fähigkeit, in und mit Modellen zu denken, von zentraler Bedeutung. Die empirische Lehr-Lern-Forschung hat aber gerade im Bereich des Modell Denkens bei Schülerinnen und Schülern erhebliche Defizite festgestellt. Eine bewusste Unterscheidung von der konstruierten Welt (Modellwelt) und der erlebbaren Welt (Erfahrungswelt) wird bei den Lernenden kaum vollzogen. Dieser Umstand ist umso beunruhigender, als dass aufgrund rasanter Entwicklungen in der Computertechnologie Computermodelle bei der Erforschung neuer Bereiche eine immer größere Rolle spielen.

Als notwendige Konsequenz aus dieser Situation wird ein Unterricht vorgeschlagen, der explizit den Modellaspekt bei der naturwissenschaftlichen Theoriebildung thematisiert. Ein solcher Unterricht, der ein Lernen über Modelle ermöglicht, hat das Ziel, ein angemessenes naturwissenschaftliches Denken im Sinne metakonzeptueller Denk- und Argumentationsweisen bei Schülerinnen und Schülern zu entwickeln.

Es gibt Ergebnisse, die eine gute Durchführbarkeit eines solchen Unterrichtes im Bereich der Teilchenmodelle aufzeigen. Aufgrund dieser positiven Erfahrungen stellt sich die Frage, in wie weit ein derartiger Ansatz auch bei einem Unterricht funktioniert, bei dem Computermodelle eine zentrale Position einnehmen. Mit diesen ist es möglich, authentische Fragestellungen im Unterricht zu behandeln. Dementsprechend wird die Übertragbarkeit dieser Konzeption an weiteren physikalisch interessanten Themen diskutiert, wie z.B. dynamische Modellierungen von mechanischen Schwingungserscheinungen sowie von ozeanischen Strömungsphänomenen.

### 1. Modelle – Schlüssel für Erkenntnisse in der Physik

**Bedeutsamkeit von Modellierungen im Forschungsprozess.** Schuster bleib' bei deinen Leisten - möchte man meinen, wenn es um die Erkenntnisfähigkeit von uns Menschen geht. Im Bereich der Größenordnungen unseres Körpers fällt es uns besonders leicht, Dinge zu beobachten und zu untersuchen. Das Erkennen von Strukturen auf zu großen Skalen im astronomischen Bereich oder bei zu kleinen Skalen im submikroskopischen Bereich fällt uns

hingegen schwer. Ähnliches gilt auch für die Dimension Zeit. Veränderungen in sehr kurzen Zeitintervallen, wie bei dem Schwingen einer Stimmgabel, oder in sehr langen Intervallen, in denen z.B. die Bewegung der Kontinente stattfindet, können von uns nicht direkt erfasst werden.

Die Welt der anschaulichen, d.h. für uns Menschen direkt zugänglichen, Dinge nennt Gerhard Vollmer (1998) den Mesokosmos. Außerhalb dieses Bereiches ist der Mensch jedoch gezwungen auf Hilfsmittel zur Veranschaulichung, also in erster Linie auf



Abbildung 1: Notwendigkeit von Modellen beim Verstehen von Strukturen in Mikro- und Makrobereichen

Modelle, zurückzugreifen (siehe Abb. 1).

Der Mesokosmos ist aber nicht nur in den beschriebenen Dimensionen Raum und Zeit beschränkt, sondern auch auf anderen Skalen. Eine hohe Abstraktheit schränkt die direkte Erkennbarkeit ebenso ein, wie große Komplexität. Vereinfachende oder veranschaulichende Modelle eröffnen dem Menschen in solchen Fällen, wie auch im vorherigen, die Möglichkeit, die Grenze der direkten Erkennbarkeit zu überschreiten.

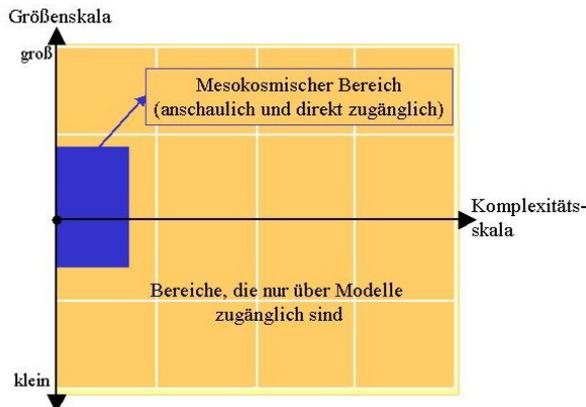


Abbildung 2: Der Mesokosmos, der Bereich der direkten Erfahrbarkeit, wird in verschiedenen Dimensionen begrenzt. Exemplarisch sind hier die Dimensionen Größe und Komplexität angegeben.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Modelle das universelle Werkzeug darstellen, mit welchem der Mensch auf Dinge außerhalb des Mesokosmos zugreifen kann. Die wichtige Rolle der Modelle für das Erkennen beschreibt auch der englische Astrophysiker John Barrow in seinem Buch „Der kosmische Schnitt: die Naturgesetze des Ästhetischen“ (1997). Er ist von der Fruchtbarkeit dieser Vorgehensweise überzeugt. Nach Barrow ist die wissenschaftliche Basis, um das Naturgeschehen zu beschreiben und künftige Ereignisse vorherzusagen oder zu beeinflussen, die Entwicklung eines Modells für einzelne Naturvorgänge.

**Veränderte Rolle der Modelle.** Die Möglichkeiten, mit Modellen den Bereich außerhalb des Mesokosmos handhabbar zu machen, erhalten durch die andauernde Leistungssteigerung in der Computertechnik eine neue Dimension. Durch diese Entwicklung ist es möglich geworden, ganz neue Bereiche in den Fokus von Forschung zu stellen. Dies gilt vor allem für die Vorhersage und Untersuchung von komplexen Systemen, deren Verhalten man mit aufwendigen Computerrechenmodellen untersuchen kann. Aber auch im Bereich von aufwendigen Visualisierungen bis hin zu der schnellen numerischen Approximation beispielweise von Differentialgleichungen bietet die Computernutzung ein vielfältiges Spektrum an neuen Möglichkeiten.

Neben den Experimenten und der Modell- bzw. Theoriebildung sind Computermodelle damit bei der physikalischen Erkenntnisgewinnung zunehmend

von Bedeutung. Wo früher Erkenntnisse in einem iterativen Prozess zwischen Theoretisieren und Experimentieren gewonnen wurden, spielt heute vielfach das Untersuchen und Verändern von Modellen die Rolle des Experimentes. Mitunter ist Kostensparnis ein Argument für den Einsatz von Computermodellen (Buehler, 2004). Die Verwendung von Computermodellen ist jedoch ohne Alternative bei experimentell schwer zugänglichen Systemen außerhalb unseres Mesokosmos, die insbesondere zu groß, zu weit weg oder zu komplex sind. Das Modellieren mit Supercomputern stellt mittlerweile einen wichtigen Zugang zu unserer neuen, komplexen Umwelt dar.

Für die Schule ist das Thema Modelle sowohl aus erkenntnistheoretischen Gründen als auch aufgrund eines vermehrten Einsatzes von Computermodellen wichtig.

**Das Denken in Modellen beim Lernen von Physik.** Schülerinnen und Schüler begegnen in ihrer Schullaufbahn in Physik einer Vielfalt an sich zum Teil auch widersprechenden Modellen. Um mit dieser Modellvielfalt reflektiert sowie sinnvoll umgehen zu können, müssen bereits die Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe I ein angemessenes Verständnis für die Prozesse bei der physikalischen Erkenntnisgewinnung entwickeln. Die Ergebnisse von Untersuchungen (Peuckert et al., 2000; Mikelskis-Seifert, 2002) weisen darauf hin, dass für den Aufbau eines solchen Verständnisses gründliche Diskussionen über Erkennbarkeit, Realität und Modellcharakter im Unterricht notwendig sind. Einfach danach zu streben, Phänomene mit einer Theorie bzw. einem Modell zu beschreiben und zu deuten, ist nicht gleichbedeutend mit dem Verstehen des hypothetischen Charakters der verwendeten Theorie bzw. des Modells. Hierzu erweist sich eine explizite wissenschafts- und erkenntnistheoretische Reflexion als sinnvoll. Damit erhoffen wir uns, dass den Schülerinnen und Schülern der Modellwechsel leichter fällt sowie sich eine Akzeptanz für die angesprochene Modellvielfalt entwickelt. In diesem Sinne würde ein angemessenes Modelldenken eine förderliche Rolle beim Lernen von Physik spielen. Ferner brächte eine Integration moderner und komplexer Themen in den Schulalltag mit sich, dass sich die Lernenden der Natur der jeweils verwendeten Modelle bewusst werden.

Aufgrund der Bedeutsamkeit der Modelle sowohl für das Forschen in der Physik als auch für das Lernen von Physik ist es daher nicht verwunderlich, dass Modellierungen zu einem wichtigen Bestandteil von Lehrplänen, Curricula und Schulbüchern gehören. Ebenso sind in der Geschichte der fachdidaktischen Forschung vielfältige Ansätze zu finden, die das Denken in Modellen bzw. das Unterrichten mit Modellen thematisieren (siehe z.B. Schlichting, 1977; Kuhn, 1977; Children Learning in Science Project -CLIS, 1987; Vollebregt, 1997, 1998; u.a.).

Allerdings offenbart die empirische Lehr-Lern-Forschung gerade im Bereich der Modelle und Modellbildung Schwächen im Physikunterricht (z.B. für den submikroskopischen Bereich: Andersson, 1990, Griffiths & Preston, 1992, Treagust et al., 2002, u.a.). Dies führt dazu, dass ein angemessenes Denken in und mit Modellen bei den Schülerinnen und Schülern selten aufgebaut wird. Das heißt, dass trotz der Bedeutsamkeit der Modelle für das Verstehen von Naturwissenschaften das Modelldenken der Lernenden von Fehlvorstellungen dominiert wird. In den Schülerargumentationen ist oft ein Modell-Realitäts-Gemisch zu finden, bei dem verschiedene Modellvorstellungen mit den aus der Erlebniswelt stammenden Denkweisen vermischt werden (Mikelskis-Seifert, 2002). Ein solches Auftreten von Hybridmodellen kann man z.B. beobachten, wenn Schülerinnen und Schüler Phänomene erklären sollen. Zudem wird nicht zwischen unterschiedlichen Modellvorstellungen und zwischen jeweils erlaubten und unerlaubten Visualisierungen und Sprechweisen unterschieden.

Aus den hier kurz skizzierten Problemen wird ebenso deutlich, dass der Transfer von fachdidaktischen Forschungsergebnissen zum Modelldenken in die Schulpraxis nicht genügend stattgefunden hat. Dementsprechend wurde „best practice“ nicht Alltagspraxis (Mikelskis-Seifert, 2004).

Man kann nun nach den Ursachen fragen, warum gerade Modelle Musterbeispiele für Lernschwierigkeiten im Physikunterricht darstellen. Möglicherweise trägt dazu auch die Bedeutungsvielfalt des Modellbegriffs bei.

## 2. Das Denken in Modellen aus verschiedenen Perspektiven

### Babylonisches Sprachgewirr zum Modellbegriff.

Wenn in den verschiedenen Sprachen dieselben Objekte bzw. Sachverhalte jeweils in einer anderen Form bezeichnet werden, dann spricht man auch oft von einem begriffssprachlichen Babylon. Ein solches Sprachgewirr spiegelt sich ebenfalls in den unterschiedlichen Bedeutungen des Modellbegriffs wider.

So ist der Terminus „Modell“ eine vielfältig verwendete Bezeichnung. In vielen Bereichen des Alltags und der Wissenschaft wird das Wort Modell oder auch Modellbildung bzw. Modellierung verwendet, teilweise mit sehr unterschiedlichen Bedeutungen. Beispiele für das sich damit ergebende breite Spektrum sind: Modell eines Flugzeuges, Modelleisenbahn, Modell einer Blüte, Architekturmodell, Modell als Vorbild für ein künstlerisches Werk, Modell in der Modewelt, Modell in der Mathematik, wirtschaftstheoretisches Modell, statistisches Modell, Modell in der Informatik, dynamisches Modell, Modell Massenpunkt, mentales Modell etc.. Teilweise wird unter einem Modell ein dreidimensionaler Gegenstand verstanden, in anderen Fällen nicht. Ferner kann ein Modell einerseits

ein verallgemeinertes Konstrukt bezeichnen, das viele konkrete Einzelfälle zusammenfassen soll (z.B. Modell einer Blüte). Andererseits wird unter einem Modell umgekehrt eine Veranschaulichung etwas Allgemeinem (z.B. in der Mathematik eine beispielhafte Ausprägung einer allgemeinen Theorie) oder im Sinne einer Vorlage für die Produktion in der Industrie verstanden.

Welches Modell hat eigentlich der Maler von der Frau als sein Modell, wenn er ein Bild malt, wie es in der Abbildung 3 zu sehen ist?



Abbildung 3: Pablo Picassos „Der Künstler und sein Modell“, etwa 1932, Cahiers d'Arts (Barrow, 1997, S. 27)

Mit Hilfe der erwähnten Beispiele für doch sehr unterschiedliche Modelle soll veranschaulicht werden, dass es praktisch unmöglich ist, alle Facetten des Modellbegriffs in unserer Kultur aufzuzeigen. Ein derartiges babylonisches Sprachgewirr zum Modellbegriff wirkt sich natürlich erschwerend auf dessen Explikation aus.

### Das Denken in Modellen aus kognitionspsychologischer Sicht.

Von großer Bedeutung sind beim Denken in und mit Modellen die kognitiven Prozesse im Sinne einer Verarbeitung im menschlichen Gehirn. In Diskussionen um die mentalen Modelle sind ebenfalls verschiedene Begriffsbestimmungen zu finden. Beispielsweise wird bei Anderson (1996) der Begriff „mentales Modell“ anders verwandt als bei Paivio (1978), bei Mayer (1994) oder auch bei Schnotz (1994, 1998, 1999). Allgemein können zwei Richtungen identifiziert werden. Zum einen wird das mentale Modell als eine bildhafte Repräsentation neben der propositionalen Darstellung von Wissen im Gehirn angesehen (z.B. bei Schnotz bzw. bei Mayer). Zum anderen wird der Begriff des mentalen Modells viel weiter gefasst. Bei den Vertretern dieser Richtung werden mentale Modelle als interne semantische Repräsentationen betrachtet, die der Mensch im Rahmen des Wahrnehmens und des Denkens erzeugt und verwendet (siehe Anderson). Wie sind jedoch diese kognitiven Prozesse beim Denken in Modellen zu verstehen? Eine mögliche Deutung des Denkens in Modellen wird in Abbil-

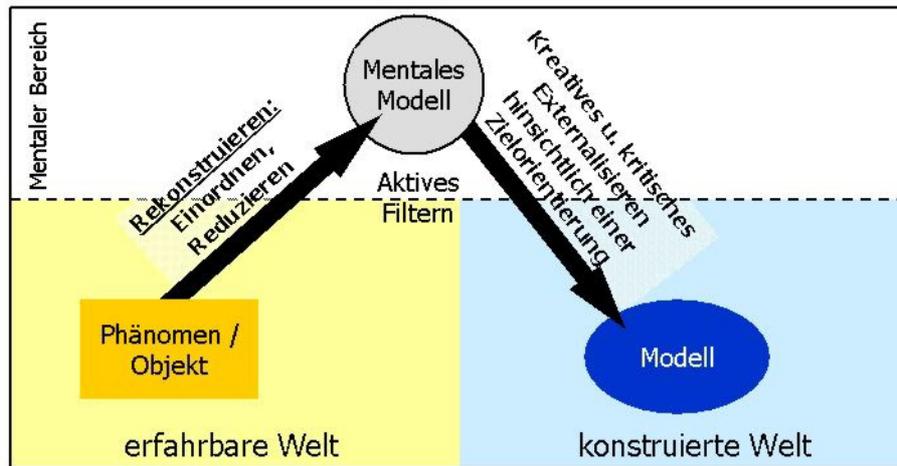


Abbildung 4: Der Weg von der erfahrbaren Welt über das mentale Modell zur konstruierten Welt

Abbildung 4 vorgestellt. Ausgangspunkt ist hierbei die erfahrbare Welt – die Welt der Phänomene. Bei der Wahrnehmung der Phänomene bzw. der Objekte werden im mentalen Bereich des jeweiligen Betrachters Strukturen aufgebaut und verändert. Dabei erfolgt eine unbewusste Rekonstruktion der erfahrbaren Welt, die durch Interpretieren, Einordnen und Reduzieren der Informationen gekennzeichnet ist. Ein mentales Modell (im weiteren Sinne) – ein Modell im Kopf – ist dann das Ergebnis dieses Konstruktionsprozesses.

Ein derartiger Prozess wird stark von dem jeweiligen Erfahrungs- und Erkenntnishintergrund des Betrachters beeinflusst. Dementsprechend kann der Wahrnehmungsprozess als ein aktives Filtern bezeichnet werden.

Ein weiterer aktiver Filterungsprozess findet beim Externalisieren des mentalen Modells statt. Hier wird in einem sowohl kreativen als auch kritischen Prozess ein Modell hinsichtlich einer bestimmten Zielorientierung konstruiert. Dieses ist anschließend kommunizierbar.

Da mentales Modell und konstruiertes Modell unterschiedliche Eigenschaften besitzen, ist es notwendig, zwischen beiden stringent zu unterscheiden. In den weiteren Ausführungen wird sich nur auf das konstruierte Modell bezogen.

**Klassifikation von Modellen aus didaktischer Sicht.** Die Literatur zum Modellbegriff ist, wie es sich schon bei der Diskussion um das babylonische Sprachgewirr zu diesem Begriff andeutet, ausge-

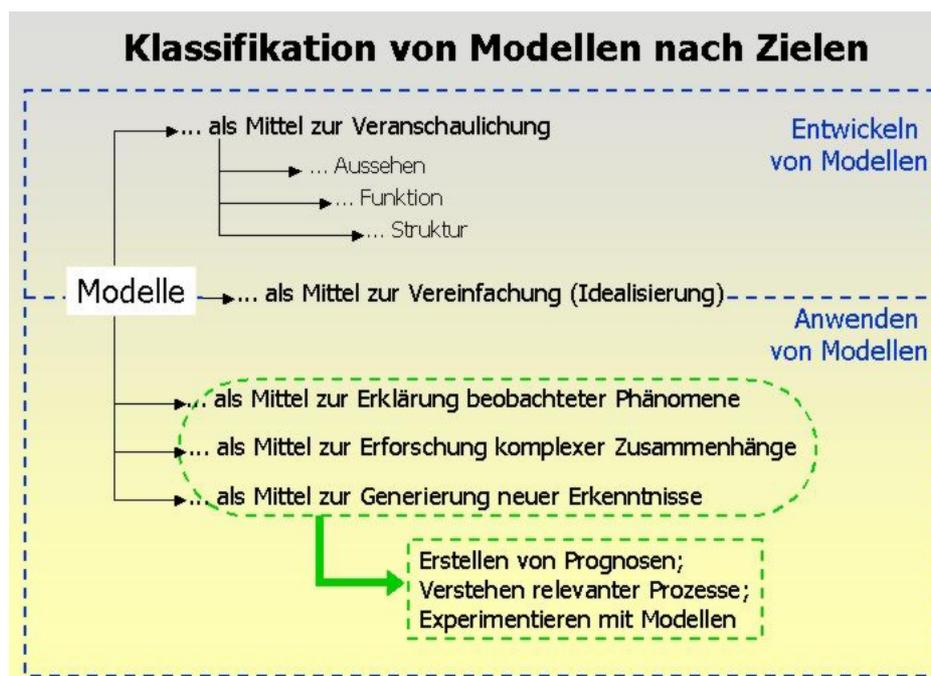


Abbildung 5: Klassifikation von Modellen hinsichtlich der Zielsetzung für deren Erstellung

sprochen vielfältig. Den in der Literatur zu findenden Klassifikationsversuchen liegen sehr unterschiedliche Kriterien zugrunde. Das Kriterium, nach dem hier die Modelle klassifiziert werden, ist der Grund bzw. die Zielsetzung für die Erstellung eines Modells (siehe Abbildung 5).

Das zentrale Ziel beim Einsatz von Modellen ist die *Vereinfachung* oder Idealisierung. Um Phänomene – wie z.B. die Lichtausbreitung – physikalisch beschreiben zu können, ist man auf ein Modell vom Licht, in diesem Falle den Lichtstrahl als symbolisches Modell, angewiesen. Andere Beispiele für Idealisierungen in der Physik sind der Massenpunkt oder der freie Fall als reibungsfreie Bewegung.

Als Zweites dienen Modelle als Mittel zur *Veranschaulichung bestimmter Merkmale eines Körpers*. Dabei werden notwendigerweise Vereinfachungen vorgenommen. Dementsprechend ist das Vereinfachen auf allen hier beschriebenen Ebenen wiederzufinden. Einerseits kann das *Aussehen* eines Körpers in einem Modell veranschaulicht werden: beim Globus oder einem Planetenmodell. Bei besonders großen oder kleinen Gegenständen ist dies von Vorteil. Ein anderes durch Modelle zu veranschaulichendes Merkmal ist die *Funktion* eines Systems. Neben Aussehen und Funktion werden Modelle ebenfalls zur Veranschaulichung von *Strukturen* verwendet. So können z.B. abstrakte Strukturen dargestellt werden, die sich unserer Wahrnehmung entziehen oder zu komplex zur direkten Erfassung sind.

Als Drittes dienen Modelle als Mittel zur *Erklärung beobachteter Phänomene*, als Mittel zur *Erforschung komplexer Zusammenhänge* und als Mittel zur *Generierung neuer Erkenntnisse*. Während bei der Veranschaulichung von Merkmalen und Strukturen der Schwerpunkt auf dem Entwickeln von Modellen liegt, rückt in dieser Ebene das Anwenden in den Fokus der Betrachtung. Dabei verläuft das Spektrum der betrachteten Phänomene von „bekannt und relativ einfach“ über „komplex“ bis „unbekannt“ (siehe Abbildung 5).

Bei der Erklärung beobachteter Phänomene, bei der Erforschung komplexer Zusammenhänge und bei der Generierung neuer Erkenntnisse heißt es, die relevanten physikalischen Prozesse zu verstehen und Prognosen zu erstellen. Vielfach werden auf der letztgenannten Ebene Modelle experimentell verändert und in einem iterativen Prozess weiterentwickelt. Ein derartiges Experimentieren mit Modellen ist in komplexen und experimentell nicht zugänglichen Systemen, in denen man nur mit Hilfe von Modellen die relevanten Prozesse verstehen kann, von großer Bedeutung. Denken wir hier an die vielschichtigen Entwicklungsprozesse der Sternentstehung. Gleiches gilt für den Klimabereich, einem komplexen System mit vielen einander beeinflussenden Prozessen.

### 3. Die Konzeption eines Lernens von und mit Modellen

**Erkenntnistheoretische Aspekte des Denkens in Modellen.** Die in den vorherigen Abschnitten diskutierten Probleme, wie die Lernschwierigkeiten beim Umgang mit Modellierungen im Schulalltag oder den vielen Bedeutungen des Modellbegriff im alltäglichen Leben, können durch die unterschiedlichen erkenntnis- und wissenschaftstheoretischen Vorstellungen der Lehrkräfte verstärkt werden. Die Schlussfolgerung hieraus ist, dass erkenntnis- und wissenschaftstheoretische Aspekte bei einem Lernen von und mit Modellen von großer Bedeutung sind.

Ferner werden die erkenntnistheoretischen Sichtweisen der Lehrerinnen und Lehrer, die oft naiv-realistisch sind, implizit den Lernenden vermittelt. Dementsprechend ist eine explizite Diskussion der verschiedenen Richtungen sinnvoll sowie notwendig. An dieser Stelle kann jedoch nicht auf einzelne Positionen, deren Gemeinsamkeiten und Unterschiede eingegangen werden. Deshalb soll nur kurz vorgestellt werden, warum eine hypothetisch realistische Sichtweise diesem Ansatz eines Lernens von und mit Modellen zugrunde liegt.

Unsere Schülerinnen und Schüler sind am Begreifen der realen Welt interessiert. Sie zeichnen sich durch einen Erkenntnisoptimismus aus, dem mit einer modernen realistischen Auffassung entsprochen werden kann. Nicht nur Gründe, die das Lernen von Physik betreffen, sprechen für die Orientierung an einer realistischen Sichtweise. Max Planck zufolge würde ebenfalls ein Wissenschaftler ohne eine realistische Sichtweise seine Suche nach neuen Erscheinungen und Gesetzmäßigkeiten aufgeben, „da man das, was man sucht, auch als vorhanden annehmen muss“ (Planck, 1970, S. 373). In einer ähnlichen Weise argumentiert Falkenburg, die sich ebenfalls für eine moderne realistische Sichtweise ausspricht. Anderenfalls hieße es beispielsweise „anzunehmen, dass man mit einem nichtvorhandenen Hammer Nägel in die Wand klopfen kann“ (Falkenburg, 1995, S. 63).

Damit begründet sich eine realistische Position, welche die Existenz einer realen Welt außerhalb unseres Bewusstseins und die Erkennbarkeit dieser Welt annimmt. Die verschiedenen Deutungen des Abbildungsprozesses der realen Welt führen jedoch zu den unterschiedlichen Ausprägungen des Realismus. Zum Beispiel vertritt der naive Realismus die Auffassung, dass es eine reale Welt gibt und diese so beschaffen ist, wie wir sie wahrnehmen.

Für die wissenschaftliche Forschung ist dies nicht unbedingt problematisch. Ganz im Gegensatz zur Forschung bewirken naiv-realistische Positionen beim Lehren und Lernen von Physik große Lernhindernisse. Eine Folge naiv-realistischer Positionen beim Lehren von Physik ist beispielsweise, dass Schülerinnen und Schüler aus der Lebenswelt stammende Denkweisen in Modellierungen übertragen. Auch die Vielfalt an Modellen im Physikunterricht,

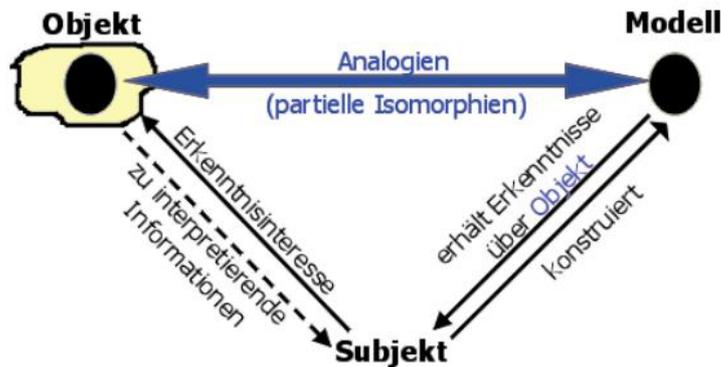


Abbildung 6: Erkenntnisgewinnung mit Hilfe von Modellen

die sich zum Teil widersprechen können, kann mit einer naiv-realistischen Sichtweise nicht verstanden werden. Deshalb ist es sinnvoll, beim Lehren die Unterschiede der realistischen Sichtweisen zu diskutieren, die entstehenden Probleme sowie die Vorteile einer kritisch bzw. hypothetisch realistischen Auffassung, wie z.B. die von Gerhard Vollmer (1988a und b, 1998), aufzuzeigen.

Welche Schlussfolgerungen ergeben sich aus den erkenntnis- und wissenschaftstheoretischen Betrachtungen für die Erkenntnisgewinnung mit Hilfe von Modellen?

**Eine Explikation des Modellbegriffs.** Die zuvor exemplarisch angesprochenen erkenntnis- und wissenschaftstheoretischen Aspekte deuten schon darauf hin, dass es weder eine umfassende Erkenntnistheorie noch eine differenzierte Ontologie der Modelle gibt. Das 20. Jahrhundert zeichnet sich dadurch aus, dass die Abbildrelation von Modellen von der Mehrheit der Philosophen in das Visier genommen wurde. Darauf aufbauend betrachten Wüsteneck (1963) und Stachowiak (1973) die Erkenntnisgewinnung mit Hilfe von Modellen als dreistellige Subjekt-Modell-Objekt-Relation.

Kircher (1995) bereitet diese Sichtweise über das Modell als dreistellige Relation für die Physikdidaktik auf. Dementsprechend ist nach Kircher die Gewinnung von Erkenntnissen durch das Zusammenspiel vom Subjekt, dem jeweiligen Objekt und dem dazugehörigen Modell gekennzeichnet. Dieser Prozess beginnt, indem ein Subjekt – ein Wissenschaftler oder ein Schüler – ein Erkenntnisinteresse besitzt. Beispielsweise liegt es im Interesse eines Astrophysikers, die relevanten physikalischen Prozesse bei der Entstehung von Sternen aus Gaswolken zu verstehen.

Beim Beobachten des Objektes erhält das Subjekt Informationen, Beobachtungsdaten, die es zu interpretieren hat (Abbildung 6). Das Subjekt konstruiert sich dabei ein Modell, um diese Interpretation vorzunehmen. Im Fall der Sternentstehung wird ein Modell erstellt, welches die für die Entwicklung eines Sternes notwendigen Kräfte berücksichtigt. Durch die Analogie, die zwischen dem repräsentier-

ten Objekt und dem dazu konstruierten Modell besteht, erhält das Subjekt die Möglichkeit, Erkenntnisse über das Objekt zu gewinnen. In diesem Falle ist die Analogie als eine partiell isomorphe Abbildung zu verstehen. Das heißt, dass es einerseits Eigenschaften des Objekts gibt, die das Modell nicht besitzt, sonst wäre es ja nicht das Modell. Andererseits kann man einem Modell auch Eigenschaften zuschreiben, die das Objekt nicht aufweist. Beispielsweise besitzen die Kugeln in Modelldarstellungen von Atomen oder Molekülen Form und Farbe, die nicht auf die wirklichen kleinsten Teilchen übertragen werden können.

In der Kennzeichnung der Analogie zwischen Objekt und Modell als partiell isomorphe Abbildung spiegelt sich wiederum die Orientierung des Ansatzes an einen modernen Realismus wider. Ferner lehnt sich der hier dargestellte Modellbegriff an den von Ernst Kircher et al. (2000) an.

Zusammenfassend wird in diesem Ansatz Modell wie folgt definiert: *Ein Modell ist ein Gegenstand oder theoretisches Konstrukt, das von einem Subjekt für einen entsprechenden Zweck geschaffen bzw. verwendet wird. Dabei bestehen zwischen bestimmten Entitäten des Modells und bestimmten Entitäten des präsentierten Objektes Analogien.*

#### **Konsequenzen für eine Unterrichtsumsetzung.**

Das Verstehen des Modells als Konstrukt, das vom Menschen zweckmäßig als Werkzeug eingesetzt wird, ist Teil eines angemessenen Modellverständnisses. Damit kann die Existenz sich widersprechender Modelle, wie zum Beispiel beim Licht oder bei den Atommodellen, mit pragmatischen Ursachen begründet werden. Die Lernenden sollen außerdem zwischen realen und modellierten Phänomenen unterscheiden, Modelle bewerten und über das Problemlösen mit Modellen und das Modellieren reflektieren können.

Die Betonung von ausführlichen Reflexionen über die vorgenommenen Modellierungen kann das Modellverständnis fördern und somit als ein möglicher Ausweg aus den angesprochenen Problemen angesehen werden. Darüber hinaus sollen die Schülerinnen und Schüler in die Lage versetzt werden, eigen-

ständig und situationsunabhängig Modelle zum Problemlösen auswählen, einsetzen und erstellen zu können.

Natürlich stellt eine solche Forderung eine Idealvorstellung für den naturwissenschaftlichen Unterricht dar. Jedoch muss den Schülerinnen und Schülern genügend Raum gegeben werden, damit sie nicht nur das Wissen zu den entsprechenden Modellen erwerben, sondern auch die Fähigkeit, Modelle im Allgemeinen in einem kreativen Prozess anzuwenden

Ein Ziel kann hierbei sein, eine Modellkompetenz aufzubauen, die sich sowohl durch ein angemessenes Modellverständnis als auch durch die Fähigkeit, Modelle anzuwenden, auszeichnet. Für den Unterricht folgen daraus zwei zentrale Tätigkeiten:

- 1) das Formulieren von Hypothesen, das Erstellen von Prognosen mit dem Modell und das Vergleichen der Prognosen mit der Wirklichkeit sowie
- 2) das Hinterfragen der Gültigkeit des Modells, das Aufzeigen der Grenzen des Modells und das Reflektieren über die eigene Vorgehensweise.

Im Detail schließt das eine Diskussion und Reflexion über den Charakter der Modelle und über den Modellierungsprozess ein.

Es soll dabei das bewusste Konstruieren der Modelle für die Beschreibung und Erklärung der zu untersuchenden Phänomene verdeutlicht werden. Hierbei spielt die Suche nach alternativen Modellierungen eine wichtige Rolle. Denn damit wird angestrebt, den Lernenden ein Gefühl dafür zu geben, was ein Modell aussagt bzw. nicht aussagt. Auch sind im Unterrichtsprozess die aufgestellten Modellannahmen auf Tragfähigkeit zu prüfen sowie die Modelle weiterzuentwickeln. Der Vergleich zwischen Modellvorhersagen oder Simulationsergebnissen und den Beobachtungen oder Messdaten spielt eine wichtige Rolle. Eine gute Übereinstimmung ist ein Hinweis darauf, dass man die wesentlichen Elemente im Modell berücksichtigt hat und man damit ein für einen bestimmten Zweck sinnvolles Modell besitzt. Um in der Schule dynamische Modelle erstellen und simulieren zu können, bieten sich Modellierungsumgebungen an, die im Folgenden vorgestellt werden sollen.

#### 4. Dynamisches Modellieren in der Schule

**Konzeption der dynamischen Modellierung.** Dynamische Modelle sind aus den modernen Forschungsbereichen kaum noch wegzudenken. In der Schule sollte man sich dementsprechend bei der Förderung von Modellverständnis und Modellkompetenz nicht nur auf die reinen Anschauungsmodelle beschränken, denen man ein etwas angestaubtes Image zuschreiben kann. Zumal das dynamische Modellieren dank einer Reihe von Softwareprodukten (wie z.B. Dynasys, Stella, Powersim, ...) für Schülerinnen und Schüler keine große Hürde mehr darstellen sollte. Mit diesen graphischen Modellie-

rungsumgebungen ist es möglich, unter Umgehung der mathematischen Schwierigkeiten relativ einfach alltagsnahe Probleme zu modellieren. Dabei werden Differentialgleichungen grafisch durch Symbole repräsentiert. Dies erfolgt in einer Art und Weise, die zwar einerseits die exakte Abbildung beliebiger Differentialgleichungen ermöglicht, andererseits aber auch Schülerinnen und Schülern zugänglich ist, die den Begriff der Ableitung noch nicht kennen gelernt haben. Der Einsatz von Computermodellen im Schulalltag verspricht noch weitere Vorteile. Schülerinnen und Schüler können ihre Modelle eigenständig und individuell erstellen und ihre Modelle selbst überprüfen, indem sie die Simulationen mit den Beobachtungs- oder Messdaten vergleichen.

Durch den Einsatz von Modellbildungssoftware sollen die Schülerinnen und Schüler zum einen ein Verständnis für das Wesen von Modellen entwickeln. Zum anderen soll aber auch eine Fähigkeit dazu erworben werden, Modelle für den eigenen Lernprozess produktiv einzusetzen. Dabei wird nicht wie in der Studie von Schecker (1998) erwartet, dass der Einsatz von Modellbildungssoftware einen direkten Einfluss auf das Erlernen der Fachinhalte hat. Vielmehr ist das primäre Ziel, ein Wissen über Modelle und eine Fähigkeit zum Arbeiten mit Modellen zu erwerben, die später dem Lernen von Fachinhalten förderlich sein kann.

**Graphische Benutzeroberflächen und System-Dynamics-Ansatz.** Dynamische Modelle nach dem System-Dynamics-Ansatz stellen eine sehr spezielle Klasse von Modellen dar. Sie wurden ursprünglich von Jay W. Forrester (Forrester 1968) zur Modellierung von betriebswirtschaftlichen Systemen entwickelt. Die Modellierung sozialer, ökonomischer, physikalischer, biologischer und ökologischer Systeme folgte erst später. Dynamische Modelle können in allen Fällen Verwendung finden, in denen es darum geht, die zeitliche Entwicklung gewisser Größen zu berechnen, die sich aus den Startwerten und zeitlichen Änderungen ergeben, die also durch Differential- oder Integralgleichungen darstellbar sind.

Auf der graphischen Benutzeroberfläche (siehe z.B. Abbildung 7) werden Flussdiagramme in Form von Bestandsgrößen und Änderungsraten erstellt. Die Bestandsgrößen, deren Werte aus Startwerten und Änderungen errechnet werden, stellt man als Rechtecke und die Änderungen als Doppelpfeile dar.

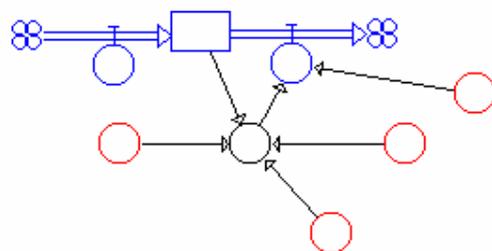


Abbildung 7: Dynasysmodell

Damit werden die Änderungsraten zu den zeitlichen Ableitungen der Bestandsgrößen, so dass die Grundstrukturen der Differentialgleichungen bereits auf der grafischen Ebene festgelegt werden. Nach Eingabe von Formeln verkörpert dieses Modell implizit einen Satz von Differential- bzw. Integralgleichungen, die von der Software numerisch gelöst werden können. Ein solches Modell kann nach einer kurzen Übungsphase von Schülerinnen und Schülern selbstständig erstellt werden, wie es die Ergebnisse einer Pilotstudie nahe legen. Auch die Ergebnisse von Wilhelm (Wilhelm, 2002), der einen Kinematikunterricht mit dem strukturell ähnlichen Modellbildungssystem PAKMA (Gößwein, 2002) erprobt hat, zeigen, dass die Schülerinnen und Schüler den Umgang mit Modellbildungssoftware erlernen und von ihm profitieren können.

In diesem Sinne beinhaltet das erstellte Modell die individuellen Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler über den modellierten Sachverhalt. Ein Vergleich der Prognose, die von der Modellbildungssoftware errechnet wurde, mit den Beobachtungen oder Messreihen konfrontiert diese Vorstellungen direkt mit ihrer Tragfähigkeit in einem Anwendungsfall. Eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Daten ist dabei ein Hinweis auf die Gültigkeit des Modells und damit auch der zugrundeliegenden Annahmen oder Vorstellungen.

Eine solche Modellierung ist kontextfrei und lässt sich in einem großem inhaltlichen Spektrum und mit unterschiedlichen Zielvorstellungen anwenden. Die Übereinstimmung zwischen den Simulationsergebnissen und den Beobachtungen kann dabei von Fall zu Fall sehr unterschiedlich sein.

Man kann mit der Modellierung mechanischer Schwingungen aus der Physik das Ziel verfolgen, das Newtonsche Grundmodell auf verschiedene Situationen anzuwenden sowie die Zusammenhänge zu erlernen, die zu verschiedenen Schwingungsphänomenen führen. Als Newtonsches Grundmodell wird in diesem Fall ein Modell verstanden, das die Änderung der zurückgelegten Strecke durch die Geschwindigkeit, die Änderung der Geschwindigkeit durch die Beschleunigung und die Bestimmung der Beschleunigung aus Kraft und Masse wiedergibt. Schecker (1999) hat bestätigt, dass Schüler diese Strategie zumindest für den Bereich der mechanischen Kräfte nach einem Unterricht mit Modellbildungssoftware anwenden können und auch anwenden. Hier kann man mit einer sehr guten Übereinstimmung von modellierten und gemessenen Daten rechnen.

Beim Modellieren von Klimaphänomenen hingegen ist der Modellierungsgegenstand derart komplex, dass eine solch gute Übereinstimmung zwischen realen und modellierten Daten nicht erzielbar ist. In diesem Falle ist der Aufwand, der auf der Reduktion der Wirklichkeit auf die *wesentlichen* Bestandteile beruht, viel größer als bei der Modellierung der

physikalischen Schwingungsphänomene. Aufgrund des großen Unterschiedes in der Komplexität zwischen Modell und Wirklichkeit ist bei Modellen vom Klima ein Vergleich der zeitlichen Entwicklung nur auf qualitativer Ebene möglich. Dabei ist es vor allem wichtig, dass das Modell besondere Auffälligkeiten des komplexen Vorbildes reproduziert.

### 5. Dynamisches Modellieren traditioneller Physikthemen

**Bestandsaufnahme.** Ein großer Teil der Themen des klassischen Physikunterrichts kann mit Hilfe dynamischer Modellierung behandelt werden. Bereits in der Einführung in die Physik, die sich meist mit gleichförmigen Bewegungen in der Mechanik befasst, werden Integralgleichungen gelöst: Die zurückgelegte Strecke wird ermittelt durch Aufsummieren vieler kleiner Streckenstücke. Letztlich kann man die Formel  $s = v \cdot t$  interpretieren als

$$s = \int_0^t v \, d\tilde{t}, \text{ wobei } v \text{ konstant ist. Während dies noch}$$

ohne besondere mathematische Probleme behandelt werden kann, braucht man für die gleichmäßig beschleunigte Bewegung schon einige Kniffe. So mag hier die Formel für die Geschwindigkeit  $v = a \cdot t$  für die Schülerinnen und Schüler noch verständlich sein. Die Formel für die zurückgelegte Strecke

$$s = \frac{1}{2} a \cdot t^2 \text{ werden wohl viele Lernende nicht vollständig verstehen. Dabei handelt es sich auch hier}$$

um die Integralgleichung  $s = \int_0^t v \, d\tilde{t}$ , nur dass die

Geschwindigkeit  $v$  nicht mehr konstant, sondern zeitabhängig ist ( $v = a \cdot t$ ). Dadurch kommt eine quadratische Funktion zustande. Der Physikunterricht läuft in dieser Situation Gefahr, sich in mathematischen Schwierigkeiten zu verstricken und deren Lösung in den Vordergrund zu stellen. Ähnliches droht später an einer Vielzahl anderer Stellen im Physikunterricht, z.B. wenn es um mechanische Schwingungen oder um Lade- und Entladevorgänge von Kondensatoren geht bzw. in authentischen Kontexten, die nicht so viele Vereinfachungen haben.

Derartige Überlegungen haben mittlerweile auch Eingang in die Lehrpläne gefunden mit dem Ergebnis, dass das dynamische Modellieren als eine naturwissenschaftliche Arbeitsweise in einigen Lehrplänen für die Sekundarstufe II verankert ist (ein Beispiel hierfür ist das Land Brandenburg).

**Modellieren in der Physik.** Dynamisches Modellieren bietet sich in den Bereichen der Schulphysik an, in denen die zeitliche Entwicklung einzelner Größen behandelt wird (Schecker, 1998). In dem im Physikunterricht üblichen Spektrum an Teilgebieten sind das vor allem Mechanik, Elektrodynamik und Thermodynamik.

In der Mechanik sind die Bestandsgrößen meist Strecke und Geschwindigkeit, wobei die Änderungsrate der Strecke die Geschwindigkeit ist und die der Geschwindigkeit die Beschleunigung. Die Beschleunigung hängt ihrerseits wieder von der Strecke (Auslenkung), der Geschwindigkeit und/oder der Zeit ab. Solange die Bewegung nicht beschleunigt ist ( $a=0$ ), ändert sich die Geschwindigkeit nicht und es kommt eine gleichförmige Bewegung zustande. Ist die Beschleunigung konstant, so entsteht eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Ist die Beschleunigung proportional zur Strecke mit einem negativen Vorfaktor, so entsteht eine Schwingung. Wird die Beschleunigung dann durch einen geschwindigkeitsabhängigen Term ergänzt, entsteht ein Modell für einen Schwingungsvorgang mit Reibung.

Anstelle der Geschwindigkeit kann auch der Impuls als Bestandsgröße modelliert werden, denn Impuls und Geschwindigkeit sind zumindest bei Körpern konstanter Masse ohnehin zueinander proportional und können daher in einander umgerechnet werden. Wird der Impuls als Bestandsgröße gewählt, so ist die Änderungsrate nicht mehr die Beschleunigung, sondern der Impulsstrom, also die Kraft. Diese Variante bietet sich für Schüler an, die nach dem Karlsruher Physikkurs unterrichtet werden. Bei der Modellierung eines Fadenpendels kann der Auslenkungswinkel anstelle der Auslenkung (sstrecke) und die Winkelgeschwindigkeit anstelle der Geschwindigkeit modelliert werden. Dadurch entstehen mathematisch äquivalente Modelle. Solche mathematisch äquivalenten Modelle lassen sich in jeder Situation finden.

Die Modelle zu den mechanischen Schwingungen lassen sich erweitern zu gedämpften, periodisch erregten, selbsterregten oder gekoppelten Schwingungen. Schwinger mit nicht linearem Kraftgesetz bieten einen Einstieg in chaotisches Verhalten. Durch Kopplung einer Anzahl von Schwingern findet sich auch ein Zugang zu Wellenphänomenen.

In der Elektrodynamik wird sehr häufig die elektrische Ladung als Bestandsgröße mit dem Strom als Änderungsrate modelliert. Damit lassen sich Lade- und Entladevorgänge an Kondensatoren studieren, aber auch Situationen, in denen eine solche Schaltung an eine Spannungsquelle mit zeitlich veränderlicher Spannung angeschlossen wird, wie es z.B. bei Klangfiltern vorkommt. Zur Modellierung von Spulen wählt man den Strom als Bestandsgröße. Die Änderungsrate ist dann proportional zur an der Spule anliegenden Spannung. Modelliert man Spulen und Kondensatoren, dann lassen sich Schwing- und Sperrkreise verstehen, die u.a. in der Radiotechnik wichtig sind.

In der Wärmelehre geht es um Flüsse von Energie, Entropie und Stoffen sowie den damit verbundenen Bestandsgrößen und Änderungsraten.

Natürlich gibt es auch außerhalb der Physik und außerhalb der Naturwissenschaften vielfältige Anwendungsgebiete für dynamische Modellierungen.

Hier seien exemplarisch zwei Beispiele genannt: In der Chemie werden Stoffumsätze betrachtet. Die Reaktionsgeschwindigkeit hängt dabei sowohl von der Konzentration der Produkte wie der Konzentration der Edukte ab. Man findet Modelle, die eine Situation mit Annäherung an einen Gleichgewichtszustand beschreiben, aber auch solche, die periodische Vorgänge wie die Belousov-Zhabotinsky-Reaktion darstellen.

Ein anderes Beispiel stellen die bereits erwähnten Modelle betriebswirtschaftlicher Systeme dar, für deren Erforschung System-Dynamics-Modelle ursprünglich entwickelt wurden.

**Beispiel: Modellieren von mechanischen Schwingungsphänomenen in der Schule.** Durch den Einsatz von Modellbildungssoftware in einer Unterrichtseinheit über mechanische Schwingungen sollen die Schülerinnen und Schüler zum einen ein Verständnis für das Wesen von Modellen erreichen. Zum anderen soll aber auch eine Fähigkeit dazu erworben werden, Modelle für den eigenen Lernprozess sinnvoll zu nutzen. Dazu ist es zunächst jedoch notwendig, dass die Schülerinnen und Schüler an einfacheren Beispielen den Umgang mit Modellen lernen. Hier stehen zwei Aspekte im Vordergrund: Der handwerkliche Umgang mit Bestandsgrößen, Änderungsraten, Zwischengrößen und Abhängigkeiten sowie die Reflexion darüber, welche Eigenschaften Modelle haben.

Mechanische Schwingungen treten in vielen Bereichen der Alltagswelt auf. Zum Teil sind sie gewollt, wie zum Beispiel die Schwingung einer Stimmgabel, einer Geigensaite, in Uhren oder bei einer Kinderschaukel. Andere sind ungewollt und störend. So kann der Lenker eines Fahrrades bei hohen Geschwindigkeiten plötzlich anfangen zu flattern, eine Bremse quietschen, ein Stück Blech am Auto bei bestimmten Geschwindigkeiten dröhnen oder ein Fahrzeug mit defektem Stossdämpfer in Schwingungen geraten. Ein sehr spektakuläres Beispiel ist die Zerstörung der „Tacoma Narrows Bridge“, eine Hängebrücke, deren Fahrbahn in kräftigem Wind in so starke Schwingungen gekommen ist, dass sie gebrochen ist. Die genannten Beispiele lassen sich kategorisieren in freie, periodisch erregte und selbst-erregte Schwingungen oder auch in Schwingungen mit einem (fast) linearen und einem nichtlinearen Kraftgesetz. Diese Beispiele von Schwingungen stellen einen authentischen und alltagsnahen Kontext dar und sollen innerhalb des Unterrichts immer wieder aufgegriffen und erklärt werden.

Bei den meisten Beispielen zu den Schwingungen fällt eine Messwertaufnahme sehr schwer, und es spielen vielfältige Phänomene hinein. Demzufolge werden idealisierte und aus dem herkömmlichen Physikunterricht überwiegend gut bekannte Experimente untersucht, die das jeweils interessante Phänomen möglichst in Reinform zeigen. Diese Experimente dienen also als (Sach-)Modelle für die au-

thentischen Beispiele. Zu den Experimenten werden Dynasysmodelle konstruiert, die ihrerseits wieder Modelle von den Experimenten sind.

Der Unterricht gliedert sich in vier Abschnitte, die mit aufsteigendem Schwierigkeitsgrad aufeinander aufbauen. Allen Abschnitten ist gemeinsam, dass Laborexperimente aus dem Bereich der Mechanik betrachtet werden, deren Daten sich mit Hilfe eines Grafiktablets computergestützt erheben lassen. Ein Grafiktablett ist ein Eingabegerät für den Computer, das gerne von Grafikern benutzt wird. Es besteht aus einem Stift, der über ein Tablett geführt wird und dessen Position direkt in die Position des Mauszeigers umgesetzt wird. Um es als Sensor für Bewegungsvorgänge einzusetzen, wird der Stift an dem Objekt montiert, dessen Bewegung erfasst werden soll, und das Tablett daneben angebracht. Der Stift darf einen Abstand von bis zu 8 Millimetern zum Tablett haben (siehe Abb. 8). Auf dem Computer wird eine Software ([www.grafiktablett.braune.org](http://www.grafiktablett.braune.org)) installiert, welche die Position des Mauszeigers protokolliert, so dass sehr schnell Ort-Zeit-Diagramme erstellt werden können. Die zeitliche Auflösung ist bei dieser Messmethode durch die Geschwindigkeit des Computers bestimmt und liegt typischerweise bei 20 ms, die räumliche Genauigkeit wird mit 0,42mm angegeben. Diese Art der Messwerterfassung ist relativ einfach und, sofern Computer in der Schule vorhanden sind, so preiswert (Gra-

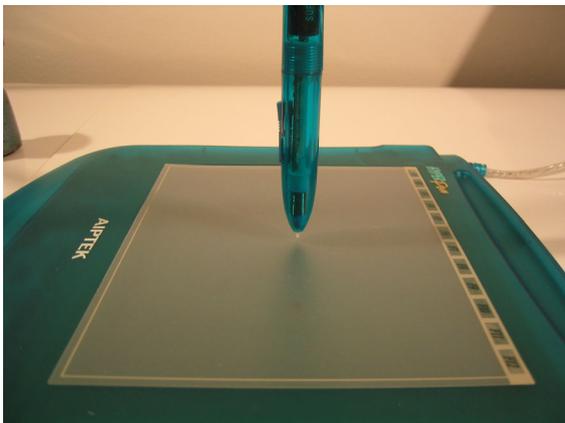


Abbildung 8: Grafiktablett

fiktablett ab ca. 30€ im Computerfachhandel), dass man jede Schülergruppe mit einem Experiment ausstatten und sie damit arbeiten lassen kann.

Diese Art der Messwerterfassung wurde der ebenfalls denkbaren Messwerterfassung über Videoaufzeichnungen vorgezogen. Dadurch verliert man zwar die von Suleder (Suleder, 2004) beschriebene Möglichkeit, die Ergebnisse der Modellierung in einer animierten ikonischen Darstellung über dem Video des Realexperimentes einzublenden, kann im Gegenzug jedoch den Aufwand und damit den Zeitbedarf für die Auswertung gering halten. Der Vergleich zwischen den Ergebnissen der Modellierung und Daten aus den Experimenten erfolgt daher durchgängig, wie von Suleder hauptsächlich für eine

genauere Überprüfung vorgeschlagen, durch Darstellung beider Datensätze in einem gemeinsamen Diagramm. Dazu werden die Daten, die mit dem Grafiktablett gewonnenen wurden, nach Dynasys importiert und können dort gemeinsam mit den Daten, die aus dem Modell errechnet wurden, dargestellt werden.

Die Einführung in die Modellierung erfolgt mit Hilfe von Fahrbahnexperimenten, die zu einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung führen (siehe Abbildung 9). Dieses Beispiel wurde gewählt, um vorerst die Komplexität der Modelle niedrig zu halten. Um die Geschwindigkeitsentwicklung zu modellieren, ist eine Modellierung der Strecke nicht nötig, da die zurückgelegte Strecke keine Auswirkung auf die Beschleunigung hat. Dadurch ist es möglich, ein Modell zu konstruieren, das die Entwicklung der Strecke nicht abbildet, aber dennoch die Geschwindigkeitsentwicklung stringent erklären kann.

Das Modell enthält eine Bestandsgröße, die Geschwindigkeit, deren Änderungsrate die Beschleunigung ist. Im weiteren Verlauf wird das Modell um eine zweite Bestandsgröße, die Strecke, erweitert, womit die Struktur des Newtonschen Grundmodells zum ersten Mal erscheint.

Im zweiten Abschnitt der Unterrichtseinheit wird der Einstieg in mechanische Schwingungen geleistet. Zunächst werden zwei Phänomene vorgeführt, in

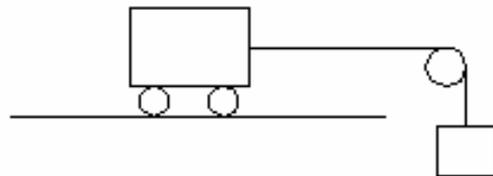


Abbildung 9: Fahrbahnexperiment zur gleichmäßig beschleunigten Bewegung

denen selbsterregte Schwingungen in authentischen Kontexten vorkommen: Eine von einem Bogen gestrichene Geigensaiten sowie die Schwingung und Zerstörung der „Tacoma Narrows Bridge“. Zur Erklärung dieser beiden Phänomene sollen im weiteren Unterrichtsgang Experimente und Modelle erstellt und erprobt werden, deren Verhalten sich dem der authentischen Phänomene, welches eine selbsterregte Schwingung darstellt, mehr und mehr annähert. Als erstes wird ein bifilares Fadenpendel vorgestellt (siehe Abbildung 10). Es ist ein Experiment, das mit den authentischen Situationen zumindest die Tatsache gemein hat, dass es schwingt. Die Bewegung des Fadenpendels wird mit Hilfe des Grafiktablets erfasst und die Daten in Dynasys importiert. Das Dynasysmodell des Fadenpendels hat fast die gleiche Struktur wie das vorhergehende Modell zum Fahrbahnexperiment, nur dass die beschleunigende Kraft von der Auslenkung abhängt. Dadurch entsteht

ein Regelkreis, in den zwei Bestandsgrößen eingebunden sind, was hier (bei einer negativen Rückkopplung) zu einem schwingenden Verhalten führt. Vergleicht man die Ergebnisse von Experiment und Modell in einem gemeinsamen  $s-t$ -Diagramm über wenige Perioden hinweg, so gewinnt man bei geeigneter Wahl der Parameter den Eindruck, dass die Übereinstimmung fast perfekt ist. Erst beim Betrachten einer größeren Anzahl von Perioden fällt auf, dass die Amplitude der Schwingung im Experiment abnimmt, während sie im Modell konstant bleibt. Es zeigen sich hier also die Grenzen des Modells: Das Modell kann nur Schwingungen mit konstanter Amplitude und ohne äußere Einflüsse erklären.

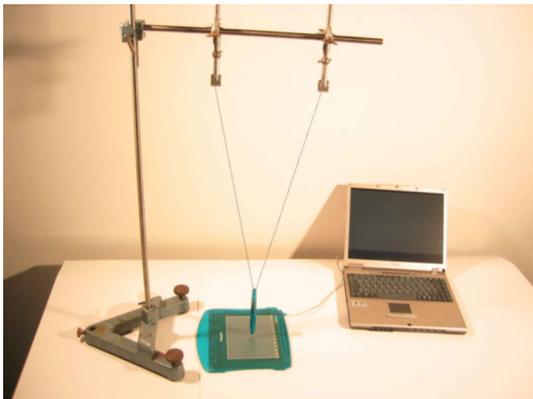


Abbildung 10: Harmonisches Pendel mit dem Grafiktablett

Sobald aber z.B. Reibung eine signifikante Rolle spielt, ist das Modell nicht mehr geeignet. Das Verhalten der meisten im Alltag relevanten Phänomene wird natürlich von Reibungskräften beeinflusst. Auch bei dem Gedankenexperiment, dass im Fall der Tacoma Narrows Bridge der Wind vor dem Einsturz aufgehört hätte zu wehen, erwartet man, dass die Schwingung der Brücke abgeklungen wäre. Im dritten Abschnitt der Unterrichtseinheit wird Dämpfung mit einbezogen. Es wird zunächst überlegt, bei welchen Alltagsphänomenen Dämpfung beobachtet wird, also wo die Schwingung im Laufe der Zeit abklingt.

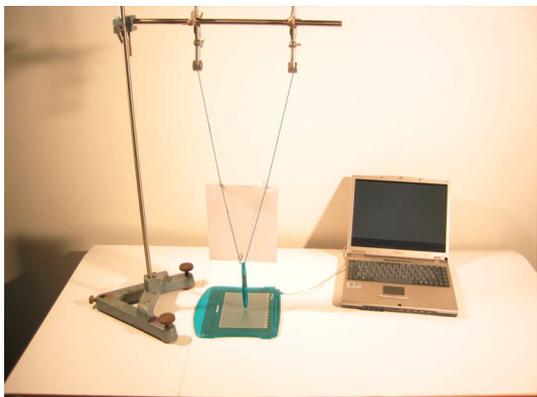


Abbildung 11: Gedämpftes Pendel

Als Laborexperiment wird wiederum ein bifilares Fadenpendel eingesetzt, dessen Luftreibung durch

ein Stück Karton erhöht wird (siehe Abbildung 11). Im Computermodell wird die Dämpfung als eine zusätzliche Kraft eingeführt, die sich ebenso wie die Rückstellkraft auf die Beschleunigung auswirkt, aber von der Geschwindigkeit abhängt.

Der vierte Abschnitt der Unterrichtseinheit trägt den im Alltag relevanten Situationen Rechnung, in denen Schwingungen beobachtet werden, die nicht abzuklingen scheinen, obwohl in dem System Reibung zu finden ist, wie das z.B. bei einer Uhr, einer quiet-schenden Bremse oder auch der Tacoma-Narrows-Bridge der Fall ist. Dies liegt daran, dass die durch Reibung „verlorene“ Energie auf einem anderen Weg wieder zugeführt wird. Die Energiezufuhr kann über zwei Mechanismen geschehen, entweder durch eine periodisch wirkende externe Kraft oder durch eine durch den Systemzustand bestimmte externe Kraft.

Der Mechanismus der periodischen Erregung, der in der Schule sehr viel Beachtung findet, bestimmt Resonanzphänomene, wenn beispielsweise ein Blech am Auto bei bestimmten Drehzahlen dröhnt. Diese Art der Energiezufuhr kann aber noch nicht erklären, wie eine kontinuierliche Schwingung z.B. in einer Uhr quasi aus dem Nichts entsteht oder warum eine vom Bogen gestrichene Geigensaite schwingt, obwohl keine periodische Anregung stattfindet. Daher wird hier ein selbsterregtes System betrachtet.

Als Modellexperiment wird dazu ein Reibungspendel eingesetzt. Es ist ein Pendel, dessen Lager aus



Abbildung 12: Selbsterregtes Pendel

einer Walze besteht, die von einem Motor mit konstanter Geschwindigkeit gedreht wird (siehe Abbildung 12).

Dabei wird die Geschwindigkeit der Walze so hoch gestellt, dass sie sich immer schneller als der Ring

bewegt. Im Modell wird der Einfluss der Walze auf das Pendel durch eine zusätzliche Kraft realisiert, die von der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Walze und Pendel abhängt und mit zunehmender Geschwindigkeitsdifferenz abnimmt. So wird das Pendel, solange es sich in Drehrichtung der Walze bewegt, stärker beschleunigt als es beim Zurückschwingen abgebremst wird. Die Kraft, welche die Walze auf das Pendel ausübt, ist also nicht periodisch von außen vorgegeben, sondern wird durch den Schwingungszustand des Pendels selbst geregelt. Nach dem gleichen Mechanismus findet auch die Anregung einer Geigenseite, die vor allem bei niedrigen Geschwindigkeitsdifferenzen vom Bogen mitgenommen wird, oder der Tacoma-Narrows-Bridge statt.

Durch die Abstufung zwischen Alltagsphänomen, Laborexperiment und Computermodell sollen die Schülerinnen und Schüler eine Einsicht in wissenschaftliches Arbeiten und in das Wesen von Modellen erlangen. Insbesondere in den Situationen des Unterrichts, in denen die Grenzen der selbst erstellten Modelle deutlich werden, bietet sich die Möglichkeit, über den Charakter von Modellen zu reflektieren. Andererseits sollen die Schülerinnen und Schüler dazu befähigt werden, Modelle und vor allem dynamische Modelle auf alltagsweltliche und physikalische Sachverhalte anzuwenden.

## 6. Dynamisches Modellieren in komplexen, authentischen Kontexten

### Komplexe Systeme als Modellierungsgegenstand.

Eine andere Art der dynamischen Modellierung, bei der graphische Modellierungssysteme eingesetzt werden, soll in diesem Abschnitt vorgestellt werden. Dabei ist der Modellierungsgegenstand nicht in einem so starken Maße vereinfacht, wie es bei der Modellierung physikalischer Schwingungen der Fall ist. Vielmehr ist der Unterschied zwischen Modell und Wirklichkeit bedeutend größer und ein Vergleich zwischen modellierten und realen Daten nur auf rein qualitativer Ebene möglich. Jedoch lässt es sich mit einem solchen Ansatz realisieren, dass aktuelle Problemfelder aus unserer Umwelt in das Blickfeld von Unterricht rücken.

Die Behandlung komplexer Modellierungsgegenstände ist deswegen relevant, da unsere Lebenswelt immer komplexer wird. Zum einen findet unser Alltag in einer durch neue technische Errungenschaften in einem immer höheren Maße vernetzten Umwelt statt. Man denke dabei an das Internet oder die stetig stärker global werdenden Waren- und Verkehrsströme. Zum anderen geraten in den Naturwissenschaften in zunehmendem Maße komplexe und stark vernetzte Systeme in das Zentrum des Interesses. Ermöglicht wird das durch leistungsfähige Computer, mit denen ausreichend umfangreiche Modelle erstellt und simuliert werden können. Es besteht die Frage, wie man einerseits Schülerinnen und Schülern Einblick in diese Modellierungsprozesse geben

und andererseits ein Verständnis für das Verhalten komplexer Systeme anbahnen kann.

### Arbeiten mit konzeptionellen Minimalmodellen.

Komplexe Systeme zeigen eine Vielzahl von verschiedenen, kontra-intuitiven Verhaltensweisen. Zu diesen zählen Selbstorganisation, chaotisches Verhalten, Strukturentstehung oder Bifurkationen. Es ist nicht möglich, in der Schule all diese Phänomene in ihrer vollen mathematischen Komplexität zu behandeln. Eine exemplarische Thematisierung auf der phänomenologischen Ebene ist jedoch zu wünschen. Schließlich besitzt die Untersuchung komplexer Systeme ein ähnliches Potenzial, unser Weltbild zu verändern, wie es die Relativitätstheorie und die Quantenmechanik am Anfang des letzten Jahrhunderts hatten. Der Vorteil für die Schule ist, dass komplexe Systeme überall, also auch in unserer Alltagswelt, zu finden sind. Im Gegensatz dazu spielen quantenmechanische oder relativistische Phänomene, vereinfacht gesagt, nur bei großen Geschwindigkeiten bzw. bei kleinsten Größenordnungen eine Rolle (Thiele 2001). Bei der Behandlung komplexer Phänomene besteht also die Möglichkeit, ein authentisches Phänomen oder eine Fragestellung aus der Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler als Anlass zur Untersuchung des verursachenden Prinzips zu nehmen.

Um mit den Verhaltensweisen komplexer Systeme vertraut zu werden, können sehr stark vereinfachte Modelle von großer Bedeutung sein. Bei einem Minimalmodell geht es darum, einen bestimmten Verhaltenstyp möglichst einfach, in einem minimalen Modell, zu repräsentieren. Anhand dieses Modells kann ein Phänomen mit dem Ziel studiert werden, es zu verstehen (siehe Klassifizierung von Modellen hinsichtlich der Zielstellung im Abschnitt 2). So gibt es Modelle für chaotische oder selbstregulierende Systeme, für Bifurkationen, für kritische Systeme usw. Die durch die starke Vereinfachung entstandene große Distanz zum beobachteten Phänomen führt auch zu einer weiten Anwendbarkeit. Sie sind damit nicht mehr Modelle für ein spezielles Phänomen, sondern können „wiederverwendet“ werden. „*Selforganized Criticality*“-Modelle (Bak, 1996) sind z.B. nicht nur bei der Modellierung von anfänglich betrachteten, aber vielleicht weniger relevanten Sandhaufen anwendbar, sondern auch beim Verstehen von Erdbeben, Makroevolution oder Verkehrsstaus.

Für die Schule erweist sich ihre Einfachheit aus weiteren, wesentlichen Gründen als sehr nützlich. Die Modelle bestehen aus relativ wenigen Elementen und Beziehungen und können von Schülerinnen und Schülern daher problemlos beispielsweise mit den im Abschnitt 4 angesprochenen graphischen Modellierungsprogrammen selbst modelliert werden. Obendrein sind sie in einem Maße vereinfacht, dass der Unterschied zwischen Modell und Wirklichkeit offensichtlich ist. Letzteres verhindert Fehl-

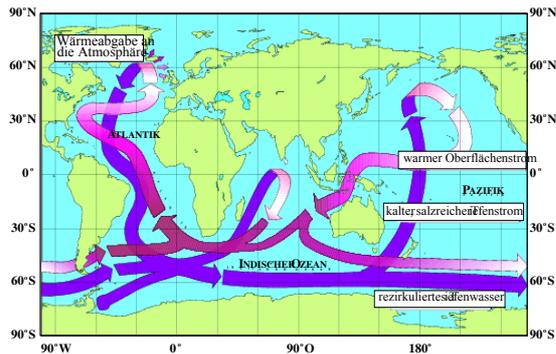


Abbildung 13: Die Thermohaline Zirkulation - warme Oberflächenströmungen sind rot, kalte Tiefenströmungen blau eingezeichnet. Quelle: Noreiks Max-Planck-Institut

konzepte, bei denen die Schülerinnen und Schüler nicht klar zwischen Modellebene und modellierter Wirklichkeit differenzieren, wie dies bei „zu guten“ Modellen aus der Physik oder bei zu umfangreichen Computermodellen geschehen kann.

Im Klimabereich sind Modelle im Allgemeinen so komplex, dass nur Fachleute hineinschauen können. Dementsprechend wird nicht deutlich, dass bei der Erstellung viele, zum Teil recht starke Vereinfachungen vorgenommen worden sind. In vielen Klimamodellen werden Gittergrößen von mehreren 100 Kilometern gewählt oder der Ozean wird als statisch modelliert. Solche Vereinfachungen sind im Bezug auf die Rechenzeit notwendig, beeinträchtigen aber nicht grundsätzlich die Brauchbarkeit der Modelle. Diese Vereinfachungen müssen aber bei der Interpretation von Simulationsergebnissen und bei der Benutzung des Modells in anderen Anwendungsbe- reichen beachtet werden.

Trotz ihrer Unvollkommenheit sind derartige Modelle bei vielen gesellschaftlich und politisch relevanten Entscheidungsfindungen von großer Bedeutung. Eine kritische Betrachtung von Modellen und ihren Simulationsergebnissen ist also wünschenswert. Dabei ist allerdings zu beachten, dass es keine Alternative zur Benutzung von vereinfachten Modellen bei der Vorhersage des Klimas gibt.

Mit Minimalmodellen aus dem Klimabereich ist es möglich, in der Schule dieses komplexe System zu behandeln, die Vorgehensweise bei der Modellierung solcher Systeme zu illustrieren und ein angemessenes Modellverständnis aufzubauen.

Man kann bei diesen Modellen auch von Karikaturlmodellen sprechen, da die Modelle das betrachtete System als Karikatur darstellen, d.h. sehr stark vereinfacht, aber dennoch die wesentlichen Bestandteile beinhaltend. Ein Beispiel für ein solches Modell aus dem Klimabereich wird im nächsten Abschnitt vorgestellt und diskutiert.

**Ein minimales Klimamodell für die Schule.** Das hier betrachtete Minimalmodell ist ein Modell für die Thermohaline Zirkulation (THZ), einem globa-

len Zirkulationssystem, zu dem auch der Golfstrom gehört (siehe Abbildung 13).

Dieses Strömungssystem ist ein wichtiger Bestandteil des globalen Wärmeaustauschs und besitzt somit große Bedeutung für das Klima. Ein Minimalmodell zum Verstehen der Dynamik der Thermohalinen Zirkulation wurde zuerst 1961 von Henry Stommel (Stommel, 1961) vorgeschlagen. In jüngster Zeit wurde es zur Erklärung von Anomalien in den Temperaturverläufen aus der Klimageschichte herangezogen und in verschiedenen Modifikationen weiter untersucht (Marotzke, 2001; Titz, 2001). Dieses und ähnliche Modelle werden darüber hinaus bei der Konstruktion moderner Klimamodelle und der Interpretation der Simulationsergebnisse herangezogen. Damit sind solche konzeptionellen und stark vereinfachten Modelle Glied in einer Hierarchie von Klimamodellen unterschiedlicher Komplexität, wie sie als sinnvolle Herangehensweise zum Verstehen des zukünftigen Klimas vorgeschlagen wird (Ghil et al., 2000; Stocker, 2003). Das heißt, dass Minimalmodelle neben Modellen mittlerer Komplexität und den komplexen Klimarechenmodellen zum Verständnis der Dynamik des Klimas und des durch den Treibhauseffekt verursachten Klimawandels beitragen.

Das Stommel-Modell zeigt, dass in einfachen Zirkulationssystemen Bifurkationen auftreten können. In einer einfachen Version dieses Modells (siehe Abbildung 14) wird eine Zirkulation zwischen zwei Wasserreservoirs (Boxen) durch Salzgehalts- und Temperaturunterschiede angetrieben. Eine höhere Dichte in Box 2, die durch einen hohen Salzgehalt oder eine niedrigere Wassertemperatur verursacht sein kann, lässt eine Zirkulation in positiver Richtung (wie eingezeichnet) entstehen.

Die Temperaturen werden als konstant modelliert, nur der Salzgehalt wird durch die dichteabhängige Zirkulation verändert. Ohne weitere Einflüsse würden sich die anfangs unterschiedlichen Salzgehalte ausgleichen, so dass nach einiger Zeit in beiden Behältern die gleiche Salzkonzentration zu finden wäre. Deshalb wird als Parameter ein Süßwasserstrom  $F$  eingeführt. Dieser stellt ein Verdunstungsszenario dar. Dabei werden eine starke Verdunstung

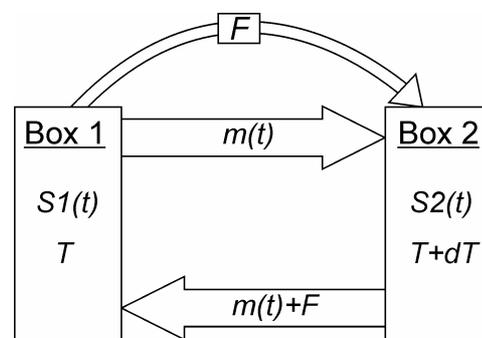


Abbildung 14: Box-Modell für die Thermohaline Zirkulation mit zwei Boxen. Die rechte Box, in der das Wasser mit höherer Dichte absinkt, entspricht dem Nordatlantik.

in Box 1 und hohe Niederschläge in Box 2 modelliert. Auf diese Weise werden unterschiedliche Salzgehalte in beiden Behältern aufrechterhalten. Der Süßwasserstrom bewirkt dabei, dass in der rechten Box die Dichte geringer und somit die Zirkulation geschwächt wird. Ein steigender Süßwassereintrag in Box 2 arbeitet also der Wirkung der niedrigeren Temperatur auf der rechten Seite entgegen.

Variiert man den Parameter  $F$  systematisch, erhält man das in Abbildung 15 dargestellte Bifurkationsdiagramm. Zu sehen ist, dass die Zirkulation bei einem kritischen Süßwasserstrom zusammenbricht, sich hier sogar umkehrt.

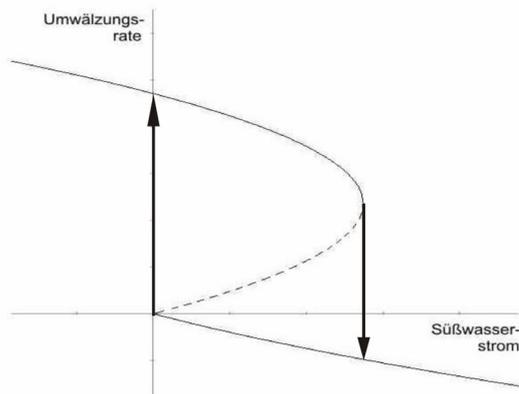


Abbildung 15: In dem Box-Modell aus Abbildung 14 auftretende Bifurkation. Umströmungsrate  $m(t)$  in Abhängigkeit vom Parameter Süßwasserstrom  $F$ . Die Pfeile deuten Übergänge zwischen stabilen Zuständen (durchgezogene Linien) an. Hystereseverhalten ist bei Variation von  $F$  zu beobachten.

Auch die Dynamik der „wirklichen“ Zirkulation wird im Wesentlichen aus einem Zusammenspiel von Einflüssen des Salzgehaltes und niedrigen Temperaturen im Hauptabsinkgebiet, dem Nordatlantik, bestimmt. Des Weiteren spielt der Süßwassereintrag in diesem Gebiet eine große Rolle. Neben diesen ebenfalls im Modell wieder zu findenden Größen haben viele weitere Prozesse und Parameter einen Einfluss. Der Süßwasserstrom wird z.B. durch das Schmelzen von Gletschern oder einen veränderten Wasserhaushalt als Folge des Treibhauseffektes beeinflusst. Zu weiteren Einflussgrößen gehören u.a. Winde, Meereis, Topographie des Ozeans oder die Jahreszeiten.

Dass das hier vorgestellte Minimalmodell der Ozeanströmung die wesentlichen Elemente der Ozeandynamik widerspiegelt, zeigen neuere, hochauflösende Temperaturrekonstruktionen aus Eis- und Sedimentbohrkernen (siehe Abbildung 16). Diese weisen in den letzten 100000 Jahren abrupte Temperaturveränderungen im Bereich von 5-10° innerhalb von 10-50 Jahren auf (Rahmstorf, 2002). Solche Veränderungen gehen zwar wesentlich langsamer vonstatten, als in Roland Emmerichs Katastrophen-

film „The Day after Tomorrow“. Die Einsicht, dass sich ein Klimawandel innerhalb verhältnismäßig kurzer Zeit ereignen kann, ist jedoch relativ neu. Mark Maslin schreibt dazu: "Until a few decades ago it was generally thought that significant large-scale and regional climate changes occurred gradually over a time scale of many centuries or millennia" (Maslin et al., 2001).

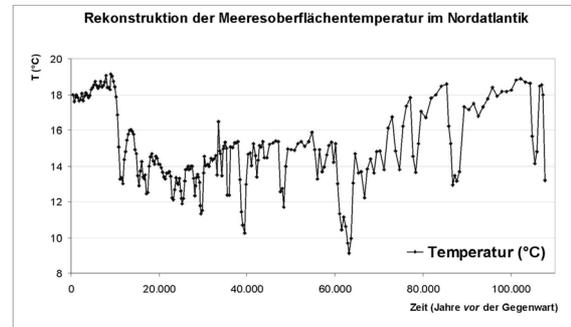


Abbildung 16: Rekonstruktionen der Meeresoberflächentemperaturen der letzten 105000 Jahre im Nordatlantik (37°W, 10°N), nach (Bard, 2003).

Das Minimalmodell mit der darin auftretenden Bifurkation ist also eine mögliche Erklärung für die Temperatursprünge in der Klimageschichte: Eine kleine Veränderung im Süßwasserhaushalt des Nordatlantiks kann nämlich in der Nähe des kritischen Süßwasserstromes einen großen Einfluss auf die Zirkulation haben. Ein plötzlicher Zusammenbruch des Strömungssystems oder eine Verlagerung des Absinkgebietes würde in der Folge in einem weiten Gebiet zu einer schnellen Veränderung der Temperaturen führen. Wenn sich die ozeanische Zirkulation analog verhält, wie die Strömung in diesem Modell, dann können Temperatursprünge auftreten. Umgekehrt ist das Auftreten der Temperatursprünge ein Hinweis darauf, dass in diesem Modell die wesentlichen Faktoren der Ozeanzirkulation modelliert wurden.

**Die Rolle im Unterricht.** Das Hauptziel dieser Unterrichtseinheit besteht darin, neben dem Aufzeigen der Probleme und Möglichkeiten bei der Modellierung komplexer Systeme, durch Reflexion über den Modellcharakter auf einer Metaebene das Modellverständnis zu fördern.

Die Modellierung der vergangenen Temperaturschwankungen im Nordatlantik mittels des vorgestellten Minimalmodells bietet sich aus drei Gründen besonders dafür an. Zum Ersten ist unser Klimasystem ein Thema, bei dem Modelle in vielfacher Weise eine Rolle spielen. In der Wissenschaft werden Modelle ganz unterschiedlicher Komplexität zur Vorhersage herangezogen. Darüber hinaus können in einem Unterricht zum Thema Klima Modelle experimente, schematische Modelldarstellungen und Computermodelle eingesetzt werden. Selbst der Rekonstruktion von vergangenen Temperaturen kann man wegen des hypothetischen Charakters Modelleigenschaften zuschreiben. Die längst ver-

gangenen Temperaturen kann man schließlich nicht mehr messen, so dass man darauf angewiesen ist, sie indirekt aus anderen Messwerten zu erschließen.

Zum Zweiten verdeutlicht die Verwendung eines Minimalmodells eines komplexen Systems durch den besonders großen Komplexitätsunterschied zwischen Modell und modelliertem Objekt insbesondere den Modellcharakter. Und zum Letzten lässt sich dieses Minimalmodell iterativ durch Hinzufügen neuer Elemente entwickeln. In jedem Modellierungsschritt können Hypothesen über das Modellverhalten gebildet, Simulationen des Modells angefertigt und das Modellverhalten kritisch auf sein Erklärungspotenzial untersucht werden. Durch die mehrfache Erweiterung der Modellgrenzen werden die Grenzen als artifizielle Konstruktion des Betrachters offenbar.

Dieses Thema kann problemorientiert anhand der überraschend abrupten Temperaturänderungen in der Klimageschichte unterrichtet werden. Den Bezug zur Gegenwart bildet die Frage, ob uns derartige Ereignisse auch heutzutage, eventuell durch den Treibhauseffekt verursacht, drohen.

Die Thermohaline Zirkulation wird dabei als mögliche Ursache für die abrupten Klimaveränderungen in der Klimageschichte erkannt und weiter untersucht. Ein erster Blick auf die Vielzahl der Einflussfaktoren lässt dieses System als ein sehr komplexes erscheinen. Man muss also, um dieses System zu verstehen, die Komplexität reduzieren. Einfache Experimente zu durch Dichteunterschieden angetriebenen Strömungen können als Einstieg in die Untersuchung des Systems durchgeführt werden. Diese Modellexperimente besitzen kein Erklärungspotenzial im Hinblick auf die Temperatursprünge, so dass eine Erweiterung des Modells sinnvoll erscheint. Aus praktischen Gründen wird das Modell zunächst in ein Computermodell übersetzt und anschließend erweitert. Während der weiteren Veränderung kann man die Lernenden durch provokante Fragen immer wieder zu Diskussionen über den Modellcharakter und die Grenzen und Möglichkeiten der Vorgehensweise anregen. Auch noch das eine Bifurkation zeigende Modell, mit dem die Abruptheit der Temperaturveränderungen erklärbar ist, kann am Ende des Unterrichtes kritisch betrachtet werden. Damit steht am Ende des Unterrichtes kein alles erklärendes Modell, das auswendig gelernt werden muss.

Zu hoffen ist, dass sich mit einem solchen Unterricht angemessenes Modellverständnis fördern lässt und das in diesem Bereich entwickelte Modellverständnis auch in anderen Bereichen aktiviert werden kann.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Fähigkeit zum Denken in Modellen und das damit verbundene Verständnis für Modellierungen im Unterricht als eine Voraussetzung für ein adäquates Verstehen von Physik angesehen werden kann. Er-

hebliche Defizite in diesem Bereich hat hingegen die Lernforschung seit vielen Jahren immer wieder konstatiert.

Offensichtlich kann ein herkömmlicher Unterricht Fehlvorstellungen über naturwissenschaftliche Modelle nicht verhindern. Vielmehr trägt er gar zu ihrer Entstehung infolge eines unreflektierten Umgangs mit den Modellen bei. Um solchen Schwierigkeiten beim Modellieren im Schulalltag entgegenzuwirken, ist ein anderer Unterricht, der sich explizit mit der Modellproblematik auseinandersetzt, notwendig. Ein solcher Unterricht, der das Lernen von und mit Modellen in den Fokus nimmt, wird in diesem Beitrag an zwei Beispielen vorgestellt. Hierbei handelt es sich zum einen um das Modellieren mechanischer Schwingungsphänomene und zum anderen um das Modellieren von Klimaphänomenen.

Das Gemeinsame beider Einheiten ist es, dass authentische Kontexte und lebensweltliche Problemstellungen im Unterricht aufgegriffen und mit Hilfe des dynamischen Modellierens bearbeitet werden. Eine weitere Gemeinsamkeit beider Ansätze stellt die explizite Förderung des Denkens in und mit Modellen bei den Schülerinnen und Schülern dar.

Insofern wird es interessant sein, inwieweit es mit beiden Ansätzen gelingt, dass die Schülerinnen und Schülern ein tragfähiges und nachhaltiges Modellverständnis bzw. eine Modellkompetenz entwickeln. Nachdem beide Unterrichtseinheiten mit einer kleinen Stichprobe pilotiert wurden, sollen diese im Rahmen der Kooperation zwischen Schulen (Gymnasien) und der Physikdidaktik des IPN erprobt sowie empirisch evaluiert werden. Die Untersuchung soll in der 11. und 12. Jahrgangsstufe durchgeführt werden.

Beide Untersuchungen sind in einem Vortest-Nachtest-Design mit explorativem Charakter angelegt. Da beide Einheiten für den Schulalltag neue und ungewohnte Themen ansprechen, dies gilt besonders für das Unterrichten der Thermohalinen Zirkulation, bietet sich eine explorative Studie an. Das heißt, für die Untersuchungen ist die Umsetzbarkeit der Ansätze sowie die Fokussierung auf nur wenige zentrale Fragestellungen wie zum Beispiel das Modelldenken relevant.

Bei der Entwicklung eines angemessenen Modelldenkens wird den stattfindenden Metareflexionen die Schlüsselrolle zugesprochen. Auch dies ist eine Fragestellung, die in Studien beantwortet werden soll. Damit erhoffen wir uns, die weitere Evidenzen für die Förderung des Modelldenkens bei den Schülerinnen und Schülern zu erhalten sowie eine erfolgversprechende Umsetzung eines Lernens von und mit Modellen in der Praxis aufzuzeigen.

## 8. Literatur

Andersson, B. R. (1990) : Pupils' conceptions of matter and its transformations (age 12-16). In: Lijnse, P. L.; Licht, P.; Vos, W. de Waarlo, A. J.: Relating macroscopic phenomena to micro-scopic

- particles: a central problem in secondary science education. Utrecht: CD-ss Press, S. 12-35
- Anderson, J. R. (1996): Kognitive Psychologie. Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag
- Bak, P. (1996): How nature works. New York: Springer
- Bard, E. (2003): North-Atlantic Sea Surface Temperature Reconstruction. IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series, 2003-026.
- Barrow, J. D. (1993): Die Natur der Natur. Wissen an den Grenzen von Raum und Zeit. Dt. Übers. hrsg. und mit einem Vorw. vers. von Wolfgang Neuser. Aus dem Engl. übers. von Anita Ehlers. Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag
- Barrow, J. D. (1997): Der kosmische Schnitt: die Naturgesetze des Ästhetischen / John D. Barrow. Aus dem Engl. übers. von Anita Ehlers. Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag
- Buehler, M.J.G., H. (2004): Biegen und Brechen im Supercomputer. Physik in unserer Zeit, 35 (1): S. 30-37
- CLIS (1987): Approaches to Teaching the Particulate Theory of Matter. Leeds: Centre of Studies in Science and Mathematics Education
- Falkenburg, B. (1995): Teilchenmetaphysik: Zur Realitätsauffassung in Wissenschaftsphilosophie und Mikrophysik. 2.Auflage, Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag
- Forrester, J. (1968): Market Growth as Influenced by Capital Investment. in Industrial Management Review, MIT Sloan School, Vol. 9, No. 2
- Ghil, M.R., A.W.(2000): Solving Problems with GCMs: General Circulation Models and Their Role in the Climate Modeling Hierarchy, in General Circulation Model Development: Past, Present, and Future (Arakawa Festschrift), D. Randall, Editor. Academic Press. S. 285-325
- Gößwein, O.; Heuer, D.; Suleder, M. (2002): Modellbildung und Präsentation mit JPAKMA. DPG-Tagung Leipzig, CD 2002
- Griffith, A., Preston, K. (1992): Grade-12 Students' Misconceptions Relating to Fundamental Characteristics of Atoms and Molecules. In Journal of Research in Science Teaching 29, S. 611-628
- Kircher, E. (1995): Studien zur Physikdidaktik: erkenntnis- und wissenschaftstheoretische Grundlagen / Ernst Kircher. Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel
- Kircher, E.; Girwidz, R.; Häußler, P. (2000): Physikdidaktik. Eine Einführung in Theorie und Praxis. Braunschweig, Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn
- Kuhn, W. (1977): Modelle in der Physik. In: G. Schaefer, G. Trommer & K. Wenk (Hrsg.): Denken in Modellen. 1. Aufl., Georg Westermann Verlag, Braunschweig
- Marotzke, J. (1990): Instabilities and Multiple Equilibria of the Thermohaline Circulation. Christian-Albrechts-Universität Kiel: Kiel.
- Maslin, M., Seidov, D. & Lowe, J. (2002): Synthesis of the nature and causes of rapid climate transitions during the Quaternary, in The Oceans and Rapid Climatic Change: Past, Present and Future, D. Seidov, Maslin, M. & Haupt, B.J., Editor. 2001, American Geophysical Union, Geophysical Monograph. S. 9-52.
- Mayer, R. E. (1994): Visual aids to knowledge construction: Building mental representations from pictures and words. In: W. Schnotz & R. W. Kuhlavy (Eds.): Comprehension of graphics, Amsterdam: Elsevier, S. 125-138
- Mikelskis-Seifert, S. (2002): Die Entwicklung von Metakzepten zur Teilchenvorstellung bei Schülern. Untersuchung eines Unterrichts über Modelle mit Hilfe eines Systems multipler Repräsentationsebenen. Dissertation, Freie Universität Berlin.
- Mikelskis-Seifert, S. (2004): Über Modelle lernen - Empirische Erforschung einer theoriegeleiteten Konzeption und Konsequenzen für die Unterrichtspraxis. In A. Pitton (Hrsg.), Chemie- und physikdidaktische Forschung und naturwissenschaftliche Bildung. Jahrestagung der GDCP in Berlin 2003 (Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Bd. 24). Münster: LIT Verlag, 2004, S. 14-29
- Paivio, A. (1978): A dual coding approach to perception and cognition. In: H. L. Pick & E. Satzmann (Eds.): Modes of perceiving and processing information. Hillsdale, NJ: Erlbaum, S. 39-52
- Paivio, A. (1986): Mental Representations: A Dual-Coding Approach. New York, Oxford: Oxford University Press
- Peuckert, J.; Seifert, S.; Sylvester, U.; Fischler, H. (2000): Probleme mit der Mikrowelt – was tun? In: Brechel, R. (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie – Vorträge auf der Tagung der Physik / Chemie in München. Alsbach/Bergstraße: LTV, S. 291-299
- Planck, M. (1970): Vorträge und Erinnerungen. WB
- Rahmstorf, S. (1996) On the freshwater forcing and transport of the Atlantic thermohaline circulation. Climate Dynamics, 12: S. 799-811
- Rahmstorf, S. (2002): Ocean circulation and climate during the past 120000 years. Nature, 419: S. 207-214
- Schecker, H.P. (1998): Physik-Modellieren: Graphikorientierte Modellbildungssysteme im Unterricht. Stuttgart, Düsseldorf, Leipzig: Ernst Klett Verlag
- Schlichting, H. J. (1977): Konstruktive Modellfindung im Unterricht – ein Unterrichtsversuch. In: G. Schaefer, G. Trommer & K. Wenk (Hrsg.): Denken in Modellen. 1. Aufl., Georg Westermann Verlag, Braunschweig

- Schnotz, W. (1998): Conceptual Change. In: D. H. Rost (Hrsg.): Handwörterbuch Pädagogische Psychologie, Weinheim: PVU, S. 55-59
- Schnotz, W. (1998): Visuelles Lernen. In: D. H. Rost (Hrsg.): Handwörterbuch Pädagogische Psychologie, Weinheim: PVU, S. 556-560
- Schnotz, W. (1994): Aufbau von Wissensstrukturen. Weinheim: Psychologie Verlags Union
- Schnotz, W. (1999): Sprach- und Bildkommunikation beim Lernen in den Naturwissenschaften. In: Brechel, R. (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie – Vorträge auf der Tagung der Physik / Chemie in Essen. Alsbach/Bergstraße: LTV, S. 31-46
- Stachowiak, H. (1973): Allgemeine Modelltheorie. Berlin: Springer
- Stocker, T.F.K., R. (2003): Do simplified climate models have any useful skill? CLIVAR Exchanges, 8 (1): S. 7-10
- Stommel, H. (1961): Thermohaline convection with two stable regimes of flow. Tellus, 13: S. 224-230.
- Suleder, M.; Wilhelm, T.; Heuer, D. (2004): Neue Möglichkeiten durch Kombination von Videoanalyse und Modellbildung. DPG-Tagung Düsseldorf, CD 2004
- Thiele, M (2001): Diskrete dynamische Systeme: einfache Modelle für komplexe Systeme. Kiel: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
- Thiele, M.; Mikelskis-Seifert, S.; Euler, M. (2004): Modellieren von konzeptionellen Minimalmodellen zur Förderung des Modellverständnisses. DPG-Tagung Düsseldorf, CD 2004
- Titz, S.; Kuhlbrodt, T.; Rahmstorf, S.; Feudel, U.; (2001): On freshwater-dependent bifurcations in box models of the interhemispheric thermohaline circulation. Tellus, 54 (A): S. 89-98.
- Treagust, D. F., Chittleborough, G., Maniala, T. L. (2002): Students' understanding of the role of scientific models in learning science. In International Journal of Science Education 24, S. 357-368
- Vollebregt, M., Klaassen, K., Ljinse, P., Genseberger, R. (1997). Einführung des Teilchenmodells. Ein problemaufwerfender Unterricht. In Naturwissenschaften im Unterricht – Physik 41, 8, S. 16-21
- Vollebregt, M. J. (1998). A Problem Posing Approach to Teaching an Initial Particle Model. Utrecht: CD-β Press, Centrum voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen, Universiteit Utrecht
- Vollmer, G. (1988a): Was können wir wissen? Bd. 1. Die Natur der Erkenntnis: Beiträge zur evolutionären Erkenntnistheorie / mit e. Gleitw. von Konrad Lorenz.- 2., durchgesehene Auflage, Stuttgart: S. Hirzel Verlag
- Vollmer, G. (1988b): Was können wir wissen? Bd. 2. Die Natur der Erkenntnis: Beiträge zur modernen Naturphilosophie / mit e. Gleitw. von Hans Sachsse.- 2., durchgesehene Auflage, Stuttgart: S. Hirzel Verlag
- Vollmer, G. (1998): Evolutionäre Erkenntnistheorie. Angeborene Erkenntnisstrukturen im Kontext von Biologie, Psychologie, Linguistik, Philosophie und Wissenschaftstheorie. 7., unveränderte Auflage, Stuttgart, Leipzig: S. Hirzel Verlag
- Wilhelm, T.; Heuer, D. (2002): Förderung von Verständnis in der Mechanik durch den Einsatz neuer Darstellungen physikalischen Wissens am Computer. DPG-Tagung Leipzig, CD 2002
- Wünscher, T.; Euler, M.; Mikelskis-Seifert, S.; Schlichting, T. (2004): Mechanische Schwingungen - Modellieren und Experimentieren. DPG-Tagung Düsseldorf, CD 2004
- Wüsteneck, K.-D. (1963): Zur philosophischen Verallgemeinerung und Bestimmung des Modellbegriffs. Deutsche Zeitschrift für Philosophie, Heft 12