

Plötzner, Rolf; Spada, Hans

Inhalt, Struktur und Anwendung von Physikwissen. Eine psychologische Perspektive

Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften : ZfDN 4 (1998) 2, S. 81-100



Quellenangabe/ Reference:

Plötzner, Rolf; Spada, Hans: Inhalt, Struktur und Anwendung von Physikwissen. Eine psychologische Perspektive - In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften : ZfDN 4 (1998) 2, S. 81-100 - URN: urn:nbn:de:0111-pedocs-315098 - DOI: 10.25656/01:31509

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0111-pedocs-315098>

<https://doi.org/10.25656/01:31509>

in Kooperation mit / in cooperation with:



<https://www.leibniz-ipn.de>

Nutzungsbedingungen

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

Mit der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Terms of use

We grant a non-exclusive, non-transferable, individual and limited right to using this document.

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

By using this particular document, you accept the above-stated conditions of use.

Kontakt / Contact:

peDOCS
DIPF | Leibniz-Institut für Bildungsforschung und Bildungsinformation
Informationszentrum (IZ) Bildung
E-Mail: pedocs@dipf.de
Internet: www.pedocs.de

Digitalisiert

Mitglied der



ROLF PLÖTZNER UND HANS SPADA

Inhalt, Struktur und Anwendung von Physikwissen: Eine psychologische Perspektive

Zusammenfassung:

Ausgehend von der Entwicklung der kognitionspsychologischen Problemlöseforschung der letzten 20 Jahre im Gegenstandsbereich der klassischen Mechanik wird ein wissensbasiertes Modell vorgestellt, mit dem empirisch beobachtete Unterschiede im Problemlöseverhalten von unerfahrenen und erfahrenen Personen in der klassischen Mechanik rekonstruiert werden. Darüber hinaus wird mit dem Modell simuliert, wie Alltagsvorstellungen von Schülern und Schülerinnen die Bearbeitung von Problemen scheitern lassen können. Im Mittelpunkt des Modells stehen Mechanismen, mit denen Informationen aus qualitativ-konzeptuellen Problemrepräsentationen genutzt werden, um den Aufbau quantitativ-numerischer Problemrepräsentationen zu lenken und zu vereinfachen. Abschließend wird diskutiert, welche Rolle das Modell bei der Gestaltung didaktischer Maßnahmen spielen kann.

Abstract:

Starting from an overview of how cognitive psychology research on problem solving in classical mechanics developed during the last 20 years, we describe a knowledge-based system that reconstructs empirically observable differences between less skilled and skilled problem solvers in the application domain of classical mechanics. The model also simulates how students' alternative frameworks might come into play during problem solving. In the model, the focus is on how qualitative-conceptual problem representations can be taken advantage of to guide and simplify the construction of quantitative-numerical problem representations. We discuss how the model might be utilized to support the design of didactical measures.

1. Einleitung

Welches Wissen Personen anwenden, um Probleme zu lösen, und wie sie dieses Wissen durch Lernen (um-) strukturieren und erweitern, sind Beispiele für Forschungsfragen der kognitiven Psychologie. Seit den frühen siebziger Jahren ist die Sichtweise, daß es sich bei kognitiven Leistungen, wie dem Problemlösen und Lernen, um Vorgänge der Informationsverarbeitung handelt, zu einer wichtigen theoretischen Rahmenvorstellung innerhalb der kognitiven Psychologie geworden. Ihr liegt die Annahme zugrunde, daß kognitive Leistungen als Berechnungsvorgänge aufgefaßt werden können. Es können zwei Formen von Berechnungsvorgängen unterschieden werden: sub-symbolische und symbolische Berechnungsvorgänge (vgl. zum Beispiel Pylyshyn, 1989).

Im Vordergrund der vorliegenden Arbeit stehen Modelle symbolischer Berechnungsvorgänge. Auf Modelle, in deren Mittelpunkt sub-symbolische Berechnungsvorgänge ste-

hen, wie zum Beispiel in sogenannten neuronalen Netzwerken (vgl. zum Beispiel Zell, 1994), wird in der vorliegenden Arbeit nicht eingegangen.

In Modellen symbolischer Berechnungsvorgänge wird angenommen, daß kognitive Leistungen auf der Fähigkeit beruhen, symbolische Repräsentationen mental zu konstruieren und zu interpretieren. Mental konstruierte Repräsentationen umfassen laut dieser Annahme zweierlei: (1) Strukturen, die Informationen in symbolischer Form repräsentieren, wie semantische Netzwerke und Schemata (vgl. zum Beispiel Opwis & Lüer, 1996), und (2) Prozesse zur Verarbeitung symbolischer Strukturen, wie Regeln zur Vererbung in semantischen Netzwerken und Methoden zum Problemlösen in Schemata.

In Modellen symbolischer Berechnungsvorgänge wird beschrieben, wie durch die Anwendung von Verarbeitungsprozessen auf symbolisch repräsentierte Informationen zusätzliche Informationen berechnet beziehungsweise abgeleitet werden. Mental reprä-

sentierte Informationen werden in diesem Zusammenhang oft als Wissen, mentale Verarbeitungsprozesse als Schlußfolgerungsprozesse bezeichnet. Im folgenden werden wir Modelle symbolischer Berechnungsvorgänge daher als wissensbasierte Modelle bezeichnen. In wissensbasierten Modellen wird weiter angenommen, daß Personen mentale Repräsentationen auf der Grundlage von Vorwissen und Wahrnehmungsvorgängen für Ausschnitte tatsächlicher oder vorgestellter Umgebungen konstruieren. Diese Repräsentationen stellen in der Mehrzahl der Fälle keine bloßen Abbilder der in Frage stehenden Umgebungen beziehungsweise Gegenstandsbereiche dar, sondern mehr oder weniger abstrakte Rekonstruktionen, durch welche die individuellen Erfahrungen strukturiert und organisiert werden.

Angestoßen durch Arbeiten von Newell und Simon (1963) verbreitete sich in den sechziger und siebziger Jahren in der kognitiven Psychologie die Vorstellung, wonach Problemlösen auf der Anwendung allgemeiner, gegenstandsunspezifischer Schlußfolgerungsprozesse beruht. Um diese Prozesse identifizieren zu können, wurde Problemlösen in Gegenstandsbereichen untersucht, die wenig Vorwissen erfordern (vgl. zum Beispiel Newell & Simon, 1972). Das Spiel der Türme von Hanoi stellt ein bekanntes Beispiel eines solchen Gegenstandsbereichs dar.

Spätestens Anfang der achtziger Jahre wurde deutlich, daß viele Problemlöseleistungen nicht ausschließlich auf dieser Grundlage erklärt werden können. Vielmehr schien erfolgreiches Problemlösen in vielen Gegenstandsbereichen auf dem Besitz eines umfangreichen Vorwissens sowie der Anwendung gegenstandsspezifischer Schlußfolgerungsprozesse zu beruhen. Damit rückten Fragen nach Inhalt und Struktur des Vorwissens sowie der Wirkungsweise der gegenstandsspezifischen Schlußfolgerungsprozesse in den Vordergrund.

Wie Personen Probleme lösen wurde daher seit Anfang der achtziger Jahre zunehmend in Gegenstandsbereichen untersucht, die ein umfangreiches und vielschichtiges Vorwissen

erfordern. Dabei wurde in vielen Fällen auf hochstrukturierte Gegenstandsbereiche wie die Physik und die Mathematik zurückgegriffen. Auf der Grundlage dieser Untersuchungen war es möglich, das Wissen von Schülern und Schülerinnen ebenso wie das Wissen von Fachleuten hinsichtlich seiner Inhalte, Struktur und Anwendung zu beschreiben und zu vergleichen.

Im folgenden fassen wir zunächst die Entwicklung der kognitionspsychologischen Problemlöseforschung im Gegenstandsbereich der klassischen Mechanik zusammen. Anschließend stellen wir im Rahmen neuerer Arbeiten ein wissensbasiertes Modell vor, das die Konstruktion und Koordination unterschiedlicher mentaler Repräsentationen für die klassische Mechanik simuliert. Danach vergleichen wir Vorhersagen des Modells darüber, wie sich Alltagsvorstellungen von Schülern und Schülerinnen auf die Bearbeitung bestimmter Probleme auswirken, mit empirisch gewonnenen Beobachtungen. Abschließend diskutieren wir, welche Rolle das Modell bei der Gestaltung didaktischer Maßnahmen spielen kann.

2. Die Entwicklung der kognitionspsychologischen Problemlöseforschung

Im Mittelpunkt kognitionspsychologischer Problemlöseforschung im Gegenstandsbereich der klassischen Mechanik standen zunächst die von Personen angewandten Problemlösestrategien. Simon und Simon (1978) konnten beobachten, daß Schüler und Schülerinnen während der Bearbeitung von Textaufgaben zur klassischen Mechanik (vgl. Tabelle 1) Kraftgesetze und kinematische Gesetze in vielen Fällen in systematisch anderer Reihenfolge anwenden als Fachleute.

Wie Schüler und Schülerinnen vorgehen, beschreiben Simon und Simon (1978) mit Hilfe einer rückwärtsverkettenden Problemlösestrategie. Ausgehend von der gesuchten Größe wird versucht, die in Frage stehenden Gesetze so lange „rückwärts“ zu verketteten, bis die gesuchte Größe auf Grundlage bekannter

<p>Problem 1: Eine Münze der Masse $m = 0,03$ kg wird mit einer Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 7$ m/s senkrecht nach oben geworfen. Nach welcher Strecke s hat sich die Geschwindigkeit auf $v = 3$ m/s verringert?</p> <p>Problem 2: Nach welcher Strecke s kommt ein Wagen der Masse $m = 820$ kg bei einer Vollbremsung auf einer horizontalen Ebene zum Stillstand, wenn seine Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 12$ m/s beträgt? Der Reibungskoeffizient zwischen den Reifen des Wagens und der Straße beträgt $\mu = 0,8$.</p> <p>Problem 3: Ein Block der Masse $m = 10$ kg wird eine um $\alpha = 15^\circ$ geneigte Ebene mit einer Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 5$ m/s hinaufgestoßen. Welche Strecke s legt der Block die Ebene hinauf zurück, wenn der Reibungskoeffizient zwischen Block und Ebene $\mu = 0,3$ beträgt?</p>

Tab. 1: Drei Probleme zur klassischen Mechanik

Größen berechnet werden kann. Dieses Vorgehen entspricht im wesentlichen der Durchführung einer Mittel-Ziel-Analyse, in der ein Problem, ausgehend vom Zielzustand, schrittweise in einfacher zu bearbeitende Teilprobleme zerlegt wird.

Wie Fachleute Kraftgesetze und kinematische Gesetze anwenden, beschreiben Simon und Simon (1978) anhand einer vorwärtsverkettenden Problemlösestrategie. Ausgehend von den bekannten Größen werden die zur Verfügung stehenden Gesetze so lange „vorwärts“ verkettet, bis die gesuchte Größe berechnet ist. Beide von Simon und Simon (1978) beschriebenen Problemlösestrategien wurden von Larkin, McDermott, Simon und Simon (1980) mit Hilfe wissensbasierter Modelle simuliert.

Für sich allein betrachtet bedeuten die Ergebnisse von Simon und Simon (1978), daß Schüler und Schülerinnen sowie Fachleute beim Problemlösen gleiches Wissen lediglich unterschiedlich anwenden. Für die Gestaltung didaktischer Maßnahmen würde dies heißen, daß Schüler und Schülerinnen zu Fachleuten würden, wenn sie vermittelt bekämen, ihr Wissen vorwärts- statt rückwärtsverkettend anzuwenden. Daß ein solches Vorgehen nicht zum Ziel führen kann, ist offensichtlich.

Wodurch kommen die von Simon und Simon (1978) beobachteten Unterschiede zwischen Schülern und Schülerinnen sowie Fachleuten zustande? Chi, Feltovich und Glaser (1981) konnten neben Differenzen in den angewandten Problemlösestrategien weitere Unterschie-

de beobachten. Zum Beispiel betrachten Schüler und Schülerinnen oft solche Probleme zur klassischen Mechanik als einander ähnlich, die viele unmittelbar beobachtbare Merkmale gemeinsam haben.

Fachleute lassen sich im Gegensatz dazu in ihren Urteilen nicht von unmittelbar beobachtbaren Merkmalen leiten. Vielmehr stufen sie solche Probleme als einander ähnlich ein, die einerseits bestimmte abstrakte, nicht beobachtbare Merkmale gemeinsam haben und die andererseits auf Grundlage des gleichen Lösungsansatzes erfolgreich bearbeitet werden können. Darüber hinaus konnten Chi, Feltovich und Glaser (1981) zeigen, daß sowohl die abstrakten Merkmale als auch die Lösungsansätze, die von Fachleuten zur Ähnlichkeitsbestimmung herangezogen wurden, in vielen Fällen qualitative Informationen über die betrachteten Probleme umfassen.

Ausgehend von ihren Beobachtungen stellten Chi, Feltovich und Glaser (1981) die Vermutung an, daß Fachleute bei der Bearbeitung von Problemen zur klassischen Mechanik zwei unterschiedliche mentale Repräsentationen konstruieren und aufeinander beziehen. In einem ersten Schritt bauen Fachleute eine qualitativ-konzeptuelle Repräsentation auf. Sie umfaßt Informationen über qualitative Aspekte eines Problems, wie zum Beispiel Informationen darüber, welche Kräfte auf einen Körper wirken, in welchen Beziehungen die Kräfte zueinander stehen und wie sich die Kräfte auf die Bewegung des Körpers auswirken.

In einem zweiten Schritt machen sich Fachleute die in einer qualitativen Repräsentation enthaltenen Informationen zunutze, um die Konstruktion einer quantitativ-numerischen Repräsentation in bestimmte Richtungen zu lenken und zu vereinfachen. Unter Berücksichtigung aller vorhandenen Informationen werden nun gezielt Kraftgesetze und kinematische Gesetze angewandt, um noch fehlende Informationen abzuleiten.

Schüler und Schülerinnen sind dagegen laut Chi, Feltovich und Glaser (1981) aufgrund ihres unvollständigen Wissens oft nicht in der Lage, eine qualitativ-konzeptuelle Repräsentation zu konstruieren. Ihnen bleibt daher in vielen Fällen gar nichts anderes übrig, als auf allgemeine Strategien, wie zum Beispiel die Mittel-Ziel-Analyse, zurückzugreifen. Durch die Anwendung derartiger Problemlösestrategien versuchen Schüler und Schülerinnen unvermittelt eine quantitative Repräsentation zu konstruieren, ohne qualitative Informationen zur Verfügung zu haben, an der die Konstruktion orientiert werden könnte. Oft führt ein solches Vorgehen dazu, daß Schüler und Schülerinnen in der Menge betrachteter Gesetze und ihrer algebraischen Umformungen die Übersicht verlieren und die Bearbeitung eines Problems erfolglos abbrechen.

Neben den angewandten Problemlösestrategien rückten damit der Inhalt und die Struktur des von Personen genutzten Wissens immer weiter in den Vordergrund der kognitionspsychologischen Problemlöseforschung. So haben zahlreiche Untersuchungen gezeigt, daß Schüler und Schülerinnen nicht nur über unvollständiges Wissen zur klassischen Mechanik verfügen, sondern auch tief in ihren Alltagserfahrungen verankerte Vorstellungen über naturwissenschaftliche Konzepte besitzen, bevor diese im Schulunterricht behandelt werden. Allerdings stimmen diese Alltagsvorstellungen in vielen Fällen in zentralen Aspekten nicht mit den wissenschaftlichen Sichtweisen überein. In den vergangenen zwanzig Jahren wurde in mehreren hundert Untersuchungen dokumentiert, in welchen Aspekten Alltagsvorstellungen insbesondere in der klassischen Mechanik von der wissen-

schaftlichen Sichtweise abweichen. Eine umfassende Bibliographie zu diesen Untersuchungen liegt von Pfundt und Duit (1994) vor.

Die vielleicht am häufigsten untersuchte Alltagsvorstellung zur klassischen Mechanik ist die Annahme, daß in einem bewegten Körper stets eine Kraft in Richtung seiner Bewegung wirkt. Da diese Alltagsvorstellung Parallelen zum Konzept des Impetus aufweist, wie es im Mittelalter von Philoponus und anderen Wissenschaftlern diskutiert wurde (vgl. Szabo, 1976), wird sie im folgenden als Impetusvorstellung bezeichnet. Sie wurde oft im Zusammenhang mit Untersuchungen zum Verständnis von Wurfbewegungen auf der Erde beobachtet (vgl. zum Beispiel Clement, 1982; McCloskey, 1993).

So konnte wiederholt beobachtet werden, daß bei der Beschreibung eines senkrechten Wurfs nach oben neben der Gewichtskraft fälschlicherweise eine weitere, nach oben gerichtete Kraft angenommen wird. Zu Beginn der Wurfbewegung weist die nach oben gerichtete Kraft, der Impetus, einen größeren Betrag auf als die Gewichtskraft. Im Laufe der Bewegung verbraucht sich der Impetus, was dazu führt, daß sich die Bewegung verlangsamt. Schließlich hat sich der Impetus soweit verbraucht, daß sein Betrag dem der Gewichtskraft entspricht. In diesem Moment ist der Umkehrpunkt in der Wurfbewegung erreicht. Einen Moment später ist der Betrag des Impetus kleiner als der Betrag der Gewichtskraft, und der Körper fällt wieder zu Boden.

Neben der Frage, über welche Alltagsvorstellungen Schüler und Schülerinnen in wissenschaftlichen Gegenstandsbereichen verfügen, wurde auch die Frage untersucht, welche Gemeinsamkeiten verschiedene Alltagsvorstellungen aufweisen. Frühe Modellvorstellungen zu dieser Frage gehen auf McCloskey (1983) zurück. McCloskey (1983) nimmt an, daß Alltagsvorstellungen auf Grundlage zahlloser Alltagserfahrungen entstehen. Im Laufe der Zeit werden diese Alltagsvorstellungen in vielfältiger Art und Weise aufeinander bezogen und bilden schließlich eine zusammenhängende Alltagstheorie.

Mit den Modellvorstellungen von McCloskey (1983) geht unter anderem die Annahme einher, daß Schüler und Schülerinnen ihre Alltagsvorstellungen konsistent anwenden, sofern Gelegenheit dazu besteht. Damit eröffnet sich aus der Sicht McCloskeys (1983) eine Möglichkeit, Alltagsvorstellungen im Unterricht durch wissenschaftliche Sichtweisen zu ersetzen. Es könnten gezielt Situationen geschaffen werden, in denen die Vorhersagen von Alltagsvorstellungen im Widerspruch zu den Vorhersagen wissenschaftlicher Sichtweisen stehen. Solche Widersprüche sollten letztlich dazu führen, daß die Alltagsvorstellungen aufgegeben und die wissenschaftlichen Sichtweisen übernommen werden.

Obwohl diSessa (1988, 1993) ebenfalls davon ausgeht, daß Alltagsvorstellungen auf Grundlage vielfältiger Alltagserfahrungen entstehen, nimmt er nicht an, daß sie eine zusammenhängende Alltagstheorie bilden. Vielmehr geht diSessa (1988, 1993) davon aus, daß Alltagserfahrungen zur Konstruktion unvollständiger und nur lose verknüpfter Wissens-elemente führen. DiSessa (1988, 1993) bezeichnet diese Wissens-elemente als „phänomenologische Primitive“. Sie repräsentieren sehr einfache Abstraktionen konkreter Alltagserfahrungen und werden von Schülern und Schülerinnen für so selbstverständlich gehalten, daß sie keiner weiteren Erklärung bedürfen. Die Vorstellung, daß die Bewegung eines Körpers stets die Ausübung von Kraft auf den Körper erfordert, ist ein Beispiel für ein phänomenologisches Primitiv.

DiSessa (1988, 1993) nimmt an, daß phänomenologische Primitive in opportunistischer Art und Weise angewandt werden, um auch Phänomene, wie sie in Unterrichtssituationen betrachtet werden, zu erklären. Alltagsvorstellungen können daher im Unterricht nicht ohne weiteres durch wissenschaftliche Sichtweisen ersetzt werden. Stattdessen sollten Alltagsvorstellungen als Vorläufer wissenschaftlicher Prinzipien aufgefaßt werden. Im Unterricht gilt es daher Möglichkeiten und Grenzen von Alltagsvorstellungen zu beleuchten, von Alltagsvorstellungen ausgehend wissenschaftliche Prinzipien schrittweise zu ent-

wickeln und Bedingungen zu formulieren, unter denen entweder Alltagsvorstellungen oder wissenschaftliche Prinzipien in angemessener Art und Weise angewandt werden können.

Zwei weitere Modelle wurden von Carey (1991) sowie Chi (1992) vorgeschlagen. Im Mittelpunkt dieser Modelle steht die Ontologie von Alltagsvorstellungen. Danach betrachten Schüler und Schülerinnen wissenschaftliche Konzepte oft vor dem Hintergrund ihrer Alltagserfahrungen. Zum Beispiel konnten Chi, Slotta und de Leeuw (1994) beobachten, daß Schüler und Schülerinnen in vielen Fällen annehmen, daß Kräfte gespeichert und verbraucht werden, sowie von einem Körper an einen anderen weitergegeben werden.

Diese Beobachtungen sprechen dafür, daß Schüler und Schülerinnen das Konzept Kraft vor dem Hintergrund der ihnen vertrauten Kategorie Materie betrachten. Demgegenüber setzen viele wissenschaftliche Konzepte die Verfügbarkeit von Kategorien voraus, die nicht Bestandteil des Alltagswissens sind. So wird aus wissenschaftlicher Sicht das Konzept Kraft der Kategorie der Wechselwirkungen zugeordnet. Die Vermittlung wissenschaftlicher Konzepte im Unterricht könnte daher deshalb so schwer fallen, weil die in Frage stehenden Konzepte letztlich nur vor dem Hintergrund neuer Kategoriensysteme erfolgreich vermittelt werden können. Die Aufgabe naturwissenschaftlichen Unterrichts wäre damit die Vermittlung dieser neuen Kategoriensysteme.

3. Eine Modellierung der Konstruktion und Koordination qualitativer und quantitativer Repräsentationen

Die Untersuchungen von Chi, Feltovich und Glaser (1981; vgl. auch Anzai, 1991; Larkin, 1983) führten zu dem Ergebnis, daß Schülerinnen und Schüler sowie Fachleute beim Problemlösen auf Grundlage unterschiedlichen Wissens unterschiedliche Repräsentationen konstruieren. Eine Reihe von Fragen blieb allerdings unbeantwortet:

- Auf Grundlage welchen Wissens können qualitative und quantitative Repräsentationen für die klassische Mechanik aufgebaut werden?
- Welche Probleme können bereits durch die Konstruktion einer ausschließlich qualitativen oder quantitativen Repräsentation erfolgreich bearbeitet werden?
- Welche Probleme erfordern die Konstruktion und Koordination sowohl qualitativer als auch quantitativer Repräsentationen?
- Durch welche Mechanismen können die in einer qualitativen Repräsentation enthaltenen Informationen genutzt werden, um die Konstruktion einer quantitativen Repräsentation in die gewünschte Richtung zu lenken und zu vereinfachen?

Im folgenden wird die Entwicklung wissensbasierter Modelle als eine Methode zur Rekonstruktion kognitiver Leistungen vorgestellt. Anschließend wird ein wissensbasiertes Modell beschrieben, das die Konstruktion und Koordination von qualitativen und quantitativen Repräsentationen für die klassische Mechanik simuliert. Mit der Entwicklung des Modells wurde versucht, Antworten auf die oben genannten Fragen zu geben.

3.1. Der methodische Hintergrund: Modellierung mit Hilfe wissensbasierter Modelle

Die Rekonstruktion kognitiver Leistungen, wie zum Beispiel das Problemlösen und Ler-

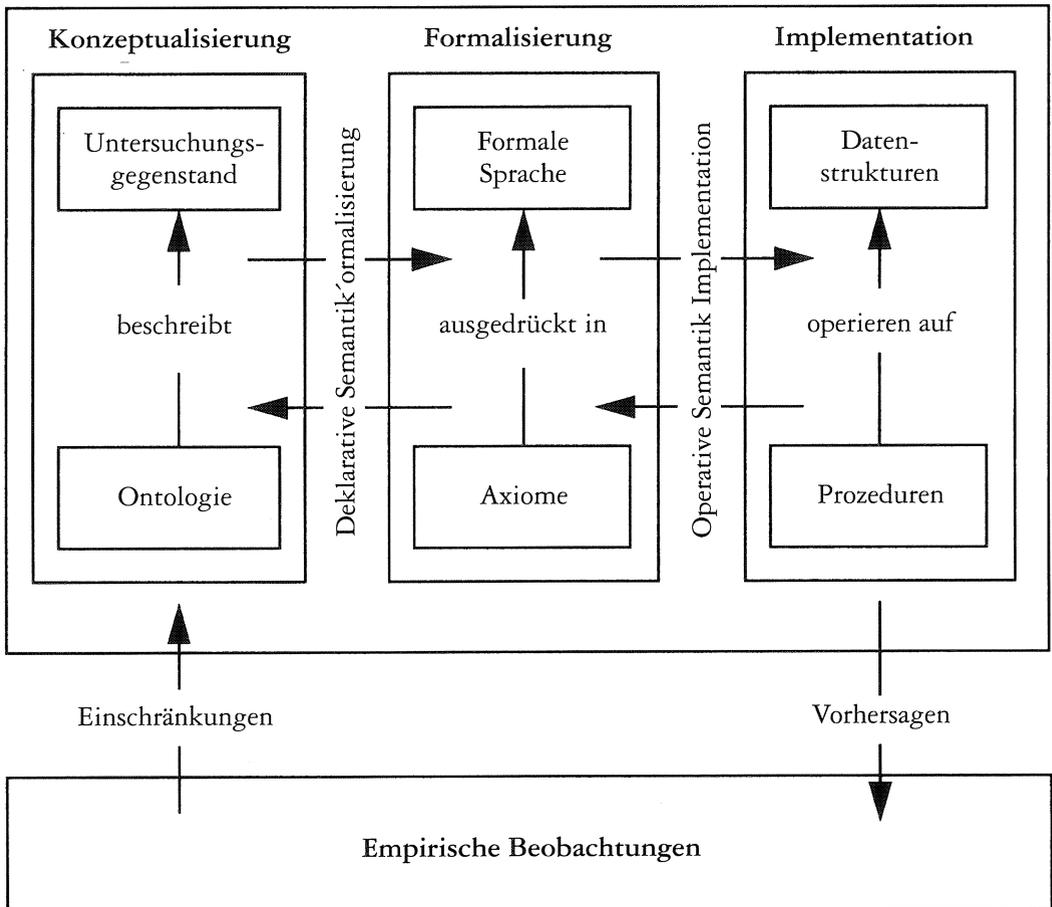


Abb. 1 Die Beziehungen zwischen Konzeptualisierung, Formalisierung, Implementation und empirischen Beobachtungen im Rahmen der Realisierung wissensbasierter Modelle (in Anlehnung an Davis, 1990).

nen, mit Hilfe wissensbasierter Modelle stellt eine Variante der formalen Modellbildung dar (vgl. Opwis, 1992; Opwis & Plötzner, 1996). Ziel der Entwicklung wissensbasierter Modelle ist eine Simulation kognitiver Leistungen von Personen durch symbolische Berechnungsvorgänge. Wissensbasierte Modelle sollen einen Gegenstandsbereich auf die gleiche Weise rekonstruieren, wie Personen dies tun. Die Realisierung eines wissensbasierten Modells erfolgt gewöhnlich in vier Schritten (vgl. Abbildung 1):

1. der Entwicklung einer Konzeptualisierung der in Frage stehenden kognitiven Leistungen,
2. der Formalisierung der Konzeptualisierung,
3. der Implementation und
4. der Bewertung der empirischen Angemessenheit.

Ziel der Entwicklung einer Konzeptualisierung ist es, die Strukturen und Prozesse zu identifizieren und in sprachlich-begrifflicher Form zu beschreiben, die den in Frage stehenden kognitiven Leistungen zugrundeliegen. Dabei können die Ergebnisse empirischer Untersuchungen zur Formulierung von Einschränkungen führen, die bei der Beschreibung der in Frage stehenden Strukturen und Prozesse zu berücksichtigen sind.

Das Ergebnis einer Konzeptualisierung entspricht einer „Papier-und-Bleistift-Theorie“. Weist eine derartige Theorie eine bestimmte Komplexität auf, dann kann praktisch nicht mehr angegeben werden, ob sie die in Frage stehenden kognitiven Leistungen angemessen zu erklären vermag. Nicht formalisierte Theorien bleiben darüber hinaus leicht unvollständig und unstimmig. In vielen Fällen ist es unmöglich, anhand einer derartigen Theorie systematisch die Bedingungen zu identifizieren, unter denen die in Frage stehenden kognitiven Leistungen erbracht werden können.

Häufig führt erst eine Formalisierung zur Identifizierung und anschließenden Schließung konzeptueller Lücken. Eine Formalisierung ist insbesondere dazu geeignet, Unstimmigkeiten einer Konzeptualisierung aufzudecken und zu korrigieren. Eine Formalisie-

rung einer zuvor entwickelten Konzeptualisierung wird häufig mit Hilfe einer prädikatenlogischen Sprache der ersten Stufe (vgl. zum Beispiel Ebbinghaus, Flum & Thomas, 1996) realisiert.

Unvollständigkeit kann aber auch in formalisierten Modellen nicht ausgeschlossen werden. Darüber hinaus kann auch nach einer Formalisierung meist nicht vorhergesagt werden, was aus den im Modell formulierten Annahmen beziehungsweise Axiomen abgeleitet werden kann und was nicht. Können wirklich alle Aussagen, die den empirischen Beobachtungen entsprechen, abgeleitet werden? Und lassen sich keine Ableitungen vornehmen, die den empirischen Beobachtungen widersprechen? Welche Ableitungen sind noch möglich, wenn nur bestimmte Teilmengen der im Modell formulierten Axiome berücksichtigt werden?

Durch die Implementation wird ein formales Modell schließlich zu einem ausführbaren Modell. Mit Hilfe des implementierten Modells können letzte Unvollständigkeiten identifiziert und behoben werden. Anschließend können die im Modell implementierten Annahmen - geleitet durch theoretische Überlegungen - systematisch verändert werden, um zu prüfen, unter welchen Bedingungen welche kognitive Leistungen noch simuliert werden können beziehungsweise ausfallen.

Die Anwendung eines wissensbasierten Modells liefert damit nicht nur statische Beschreibungen der in Frage stehenden kognitiven Leistungen, sondern führt zu beobachtbaren Verhaltenssimulationen. Die Frage, ob ein wissensbasiertes Modell in der Lage ist, die empirisch beobachteten Phänomene zu simulieren und damit eine Erklärung für sie zu liefern, kann auf diese Weise unmittelbar geprüft werden.

Die Implementation eines wissensbasierten Modells mit Hilfe geeigneter Datenstrukturen und darauf ablaufender Prozesse zeichnet sich darüber hinaus dadurch aus, daß das zuvor formalisierte Wissen über einen Gegenstandsbereich in expliziter Form repräsentiert wird. Häufig werden in diesem Zusammenhang drei grundlegende Formen von Wissen unterschieden (vgl. Opwis, 1992):

- deklaratives Wissen, das die dem Gegenstandsbereich zugrundeliegenden Strukturen in Form geeigneter Datenstrukturen kodiert,
- prozedurales Wissen, das sowohl allgemeine als auch für den Gegenstandsbereich spezifische Prozesse in Form von Prozeduren implementiert, und
- Kontrollwissen, das Methoden und Heuristiken zur Steuerung des Zusammenwirkens von deklarativem und prozeduralem Wissen umfaßt.

Neben der Konzeptualisierung, Formalisierung und Implementation besteht ein weiterer wichtiger Schritt bei der Realisierung wissenschaftlicher Modelle in der Bewertung ihrer empirischen Angemessenheit (vgl. Opwis & Spada, 1994). Durch theoretische Überlegungen geleitet können die im System implementierten Annahmen systematisch verändert werden, um zu prüfen, ob dies zu den erwarteten Änderungen des Systemverhaltens führt. Insbesondere stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, ob sich Personen unter vergleichbaren Bedingungen ebenfalls in der vom wissensbasierten Modell vorhergesagten Art und Weise verhalten. Eine weitere Möglichkeit, die empirische Angemessenheit wissenschaftlicher Modelle zu bewerten, besteht darin, zu untersuchen, inwieweit ein wissensbasiertes Modell auch zur Erklärung und Vorhersage empirischer Phänomene herangezogen werden kann, zu deren Erklärung und Vorhersage es zunächst gar nicht realisiert wurde.

3.2 Ein Beispiel für ein wissensbasiertes Modell

Die im folgenden betrachteten Probleme beziehen sich auf eindimensionale Bewegungsvorgänge mit konstanter Beschleunigung (vgl. Tabelle 1). Im Vordergrund des Modells stehen zum einen Wissen über qualitative und quantitative Aspekte verschiedener Konzepte der Dynamik (zum Beispiel Wissen über die Konzepte resultierende Kraft, Gewichtskraft, Normal- und Reibungskraft) und Kinematik (zum Beispiel Wissen über die Konzepte Zeit, Weg, Geschwindigkeit und

Beschleunigung) und zum anderen Strategien zur Bearbeitung der betrachteten Probleme unter Nutzung des zur Verfügung stehenden Wissens.

Die Konzeptualisierung von Wissen über qualitative und quantitative Aspekte der klassischen Mechanik wurde auf Grundlage von zwei Analysen durchgeführt (vgl. Plötzner, 1994): einer Sachanalyse der betrachteten Probleme und einer Analyse von Problemlöseprotokollen. Die Protokolle wurden in einer Untersuchung von Chi, Bassok, Lewis, Reimann und Glaser (1989) erhoben.

Anhand der Sachanalyse wurde festgestellt, aufgrund welchen Wissens über qualitative und quantitative Aspekte der klassischen Mechanik die in Frage stehenden Probleme erfolgreich bearbeitet werden können. Obwohl eine derartige Analyse Auskunft darüber gibt, welches Wissen eine erfolgreiche Bearbeitung der betrachteten Probleme erlaubt, zeigt sie nicht, welche Abstraktheit, Ontologie und Genauigkeit das von Schülern zur Problembearbeitung herangezogene Wissen aufweist. Um zu einer in dieser Hinsicht angemessenen Konzeptualisierung zu gelangen, wurden zusätzlich die Problemlöseprotokolle analysiert.

In der entwickelten Konzeptualisierung umfaßt Wissen über qualitative Aspekte der klassischen Mechanik Informationen darüber, welche konkreten Objekte zu welchen Konzepten abstrahiert werden, unter welchen Bedingungen bestimmte Konzepte anwendbar sind, welche Eigenschaften diese Konzepte besitzen und welche Ausprägungen diese Eigenschaften aufweisen können.

Wissen über quantitative Aspekte der klassischen Mechanik beruht auf mathematischen Formalismen, auf deren Grundlage Definitionen von und funktionale Beziehungen zwischen Konzepten durch algebraische Gleichungen beschrieben werden. Zum Beispiel umfaßt Wissen über quantitative Aspekte Informationen über die verschiedenen Kraftgesetze und kinematischen Gesetze der klassischen Mechanik.

Letztlich läßt sich Wissen über qualitative und quantitative Aspekte der klassischen

Mechanik nicht vollständig voneinander abgrenzen. Vielmehr kann Wissen zur klassischen Mechanik Informationen über qualitative und quantitative Aspekte in wechselnden Anteilen umfassen. So kann zum Beispiel Wissen über funktionale Beziehungen zwischen Konzepten der klassischen Mechanik eher qualitativ oder eher quantitativ konzeptualisiert werden (vgl. Plötzner, Spada, Stumpf & Opwis, 1990; White & Frederiksen, 1990).

Formalisiert wurde das Wissen über qualitative und quantitative Aspekte der klassischen Mechanik in Form von Regeln auf der Grundlage einer prädikatenlogischen Sprache der ersten Stufe (vgl. zum Beispiel Ebbinghaus, Flum & Thomas, 1996). Zu diesem Zweck wurde eine gleichungsbasierte Repräsentationssprache, wie sie zuvor bereits von VanLehn, Jones und Chi (1992) verwendet wurde, erweitert, um berücksichtigen zu können, daß sich die Werte bestimmter Variablen über die Zeit verändern können (vgl. Plötzner, 1994).

Jede Regel umfaßt keine, eine oder mehrere Bedingungen und eine Konsequenz. Die Bedingungen bestehen aus Aussagen, die konjunktiv verknüpft sind. Die Konsequenz besteht aus genau einer Aussage, die immer eine Gleichung ist. Die Bedingungen und die Konsequenz einer Regel sind durch die Implikation verbunden: $[Bedingung_1 \wedge \dots \wedge Bedingung_n] \rightarrow [Konsequenz]$.

Daß der Wert einer Variablen von der Zeit abhängt, wird durch die zweistellige Funktion „wert_in(Situation, Parameter)“ zum Ausdruck gebracht. Darin bezeichnet das erste Argument eine Situation, die sich auf einen Zeitpunkt oder auf ein Zeitintervall beziehen kann. Das zweite Argument bezeichnet eine im Gegenstandsbereich definierte Variable oder Funktion oder ein im Gegenstandsbereich definiertes Prädikat.

Richtungen vektorieller Größen werden durch zwei Variablen repräsentiert: Neigung und Orientierung. Die Variable Neigung kann einen beliebigen Wert zwischen 0 und 180 annehmen. Die Variable Orientierung kann nur einen von zwei möglichen Werten annehmen: „oben“ oder „unten“.

Tabelle 2 zeigt am Beispiel der Normalkraft, wie Wissen über qualitative und quantitative Aspekte formalisiert wurde. Im Wissen über qualitative Aspekte werden zwei Arten von Ausdrücken unterschieden. Zum einen Ausdrücke, die angeben, unter welchen Bedingungen ein Konzept anwendbar ist. Zum anderen Ausdrücke, die beschreiben, welche Eigenschaften ein Konzept besitzt und welche Ausprägungen diese Eigenschaften aufweisen. Wissen über quantitative Aspekte wird durch algebraische Gleichungen beschrieben.

Implementiert wurde das wissensbasierte Modell in der Programmiersprache Prolog (vgl. zum Beispiel Sterling & Shapiro, 1994). Auf Grundlage des formalisierten Wissens über qualitative und quantitative Aspekte der klassischen Mechanik wurde eine Wissensbasis implementiert, in der das in Frage stehende Wissen in Form von Prolog-Fakten repräsentiert ist. Darüber hinaus umfaßt die Implementation drei weitere Komponenten: (1) eine Wissensbasis, in der geometrisches Wissen repräsentiert ist, (2) eine Wissensbasis, in der algebraisches und vektoralgebraisches Wissen repräsentiert ist, und (3) einen Interpreter, in dem Kontrollwissen repräsentiert ist.

Im Interpreter ist zum Beispiel Kontrollwissen darüber repräsentiert, wie auf Grundlage einer Folge von sechs Schritten die resultierende Kraft, die auf einen Körper wirkt, bestimmt werden kann (vgl. Reif, 1995):

1. Identifiziere den Körper, dessen Bewegung beschrieben werden soll.
2. Bestimme alle Kräfte, die auf den Körper wirken.
3. Repräsentiere jede Kraft durch einen Pfeil mit Richtung und (zunächst unbekanntem) Betrag.
4. Wähle ein Koordinatensystem mit senkrecht aufeinander stehenden Koordinatenachsen, so daß möglichst viele Pfeile auf den Koordinatenachsen zu liegen kommen.
5. Zerlege jeden Pfeil in Komponenten entlang der Koordinatenachsen.
6. Bestimme die Komponenten der resultierenden Kraft, die auf den Körper wirkt.

Diese Folge von Schritten entspricht einer Folge von (Zwischen-) Zielen. Im Laufe der

Wissen über qualitative Aspekte der Normalkraft:

FN 1: Wenn sich ein Körper, der nicht masselos ist, auf einer Ebene befindet, dann wirkt auf den Körper eine Normalkraft, die von der Ebene aufgebracht wird.

```
{wert_in(S, instanz(Objektl, körper)) = wahr ^
-(wert_in(S, masselos(Objekt1)) = wahr) ^
wert_in(S, instanz(Objekt2, ebene)) = wahr ^
wert_in(S, auf(Objektl, Objekt2)) = wahr}
{wert_in(S, instanz(kraft(Objektl, Objekt2, fn), normalkraft)) = wahr
```

FN2: Wenn auf einen Körper eine Normalkraft wirkt, die von einer Ebene aufgebracht wird, dann ist die Neigung der Normalkraft senkrecht zur Neigung der Ebene.

```
{wert_in(S, instanz(kraft(Objektl, Objekt2, fn), normalkraft)) = wahr ^
wert_in(S, instanz(Objekt2, ebene)) = wahr}
{wert_in(S, neigung(kraft(Objektl, Objekt2, fn))) = senkrecht_zu(wert_in(S, neigung(Objekt2)))}
```

FN3: Wenn auf einen Körper eine Normalkraft wirkt, die von einer Ebene aufgebracht wird, dann ist die Orientierung der Normalkraft gleich der relativen Position des Körpers im Verhältnis zur Ebene.

```
{wert_in(S, instanz(kraft(Objektl, Objekt2, fn), normalkraft)) = wahr ^
wert_in(S, instanz(Objekt2, ebene)) = wahr}
{wert_in(S, orientierung(kraft(Objekt 1, Objekt2, fn)) = wert_in(S, relative_positi-
on(Objekt 1, Objekt2))}
```

Wissen über quantitative Aspekte der Normalkraft:

FN4: Der Betrag der auf einen Körper wirkenden Normalkraft ist gleich dem Produkt aus dem Betrag der auf den Körper wirkenden Gewichtskraft und dem Cosinus des Winkels, um den die Ebene geneigt ist, welche die Normalkraft aufbringt.

```
{wert_in(S, betrag(kraft(Objektl, Objekt2, fn))) =
wert_in(S, betrag(kraft(Objektl, erde, fg))) *cosinus(wert_in(S, neigung(Objekt2)))}
```

Tab. 2: Wie Wissen über qualitative und quantitative Aspekte der Normalkraft formalisiert wurde

Bearbeitung eines Problems wird versucht, ein Ziel nach dem anderen zu erfüllen. Führen Personen die genannten Schritte aus, geht damit in vielen Fällen die Konstruktion eines Kräfte diagrams einher. In der klassischen Mechanik stellen Kräfte diagrams eine Variante graphischer Repräsentationen dar, die oft verwendet wird, um verschiedene qualitative Aspekte eines Problems zu veranschaulichen. Das Simulationmodell konstruiert im Laufe

der Ausführung der genannten Schritte ebenfalls eine Beschreibung eines Kräfte diagrams. Die Informationen sind darin allerdings nicht in graphischer sondern lediglich in symbolischer Form repräsentiert. Darüber hinaus umfaßt eine vom Modell konstruierte symbolische Beschreibung eines Kräfte diagrams nur einen Teil der Informationen, die Personen einer entsprechenden Graphik entnehmen können.

Beschreibung des Problems:

Ein Block der Masse $m = 10 \text{ kg}$ wird eine um $\alpha = 15^\circ$ geneigte Ebene mit einer Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 5 \text{ m/s}$ hinaufgestoßen. Welche Strecke s legt der Block die Ebene hinauf zurück, wenn der Reibungskoeffizient zwischen Block und Ebene ($\mu = 0,3$) beträgt?

Kodierung der gegebenen Informationen:

```
bekannt(problem_3, {
wert_in(1, instanz(block, körper)) = wahr,
wert_in(1, masse(block)) = 10::kg,
wert_in(1, instanz(schiefe_ebene, ebene)) = wahr,
wert_in(1, neigung(schiefe_ebene)) = 15,
wert_in(1, bewegt_sich_auf(block, schiefe_ebene)) = wahr,
wert_in(1, betrag(geschwindigkeit(block))) = 5::m/s,
wert_in(1, orientierung(geschwindigkeit(block))) = oben,
wert_in(1, reibungskoeffizient(block, schiefe_ebene)) = 0.3}).
```

Kodierung der gesuchten Informationen:

```
gesucht(problem_3, {wert_in(1 ( 2, betrag(weg(block))))}).
```

Tab. 3: Die Kodierung eines Problems

3.3 Arbeitsweise des wissensbasierten Modells

Da das Modell über keine Mechanismen zur Verarbeitung von Texten verfügt, werden Probleme in der gleichen Repräsentationssprache kodiert, die auch zur Formalisierung und Implementation des Wissens über qualitative und quantitative Aspekte der klassischen Mechanik herangezogen wurde. Durch dieses Vorgehen wird im Modell von der Simulation verschiedener kognitiver Prozesse abgesehen, die von Schülern und Schülerinnen bei der Bearbeitung der in Frage stehenden Probleme geleistet werden müssen, wie zum Beispiel das Textverstehen und die Überführung sprachlicher Äußerungen in Konzepte der klassischen Mechanik (für Simulationen dieser Prozesse vgl. zum Beispiel Kintsch & Greeno, 1985; Novak, 1977; Reusser, 1990). Tabelle 3 zeigt am Beispiel von Problem 3 aus Tabelle 1, wie Probleme im Modell auf Grundlage der verwendeten Repräsentationssprache kodiert werden.

Wird das Modell auf ein Problem angewandt, dann wird ausgehend vom gesamten Wissen, das dem Modell zur Verfügung steht, versucht, das Problem zu lösen. Drei wichtige Fälle können in diesem Zusammenhang unterschieden werden:

1. dem Modell wird ausschließlich formalisiertes Wissen über qualitative Aspekte der klassischen Mechanik zur Verfügung gestellt,
2. dem Modell wird ausschließlich formalisiertes Wissen über quantitative Aspekte der klassischen Mechanik zur Verfügung gestellt und
3. dem Modell wird sowohl formalisiertes Wissen über qualitative als auch über quantitative Aspekte der klassischen Mechanik zur Verfügung gestellt.

Im ersten Fall wird durch Anwendung des zur Verfügung gestellten Wissens über qualitative Aspekte der klassischen Mechanik eine quali-

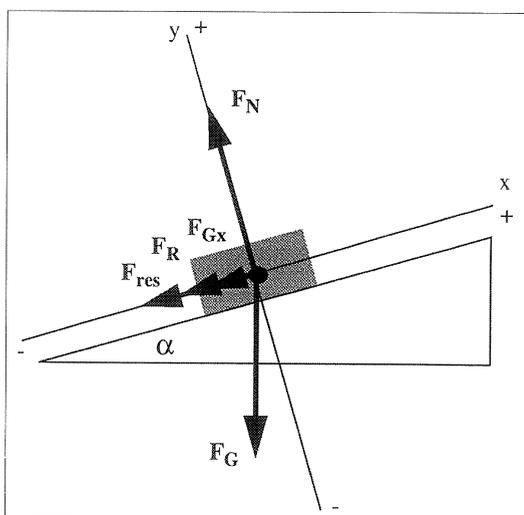


Abb. 2: Die Veranschaulichung qualitativer Aspekte eines Problems durch ein Kräfte- und Vektor-Diagramm.

tativ-konzeptuelle Repräsentation aufgebaut.¹ Ein Teil der Informationen, die in einer solchen Repräsentation enthalten sind, kann graphisch durch ein Kräfte-diagramm veranschaulicht werden (vgl. Abbildung 2). Es umfaßt zum Beispiel Informationen darüber, ob und in welche Richtung eine resultierende Kraft F_{res} auf den in Frage stehenden Block wirkt.

Auf Grundlage dieser Informationen können verschiedene qualitative Schlüsse gezogen werden. Da die resultierende Kraft F_{res} , die auf den Block wirkt, die Beschleunigung a des Blocks verursacht, besitzen resultierende Kraft F_{res} und Beschleunigung a die gleichen Richtungen. Die Geschwindigkeit v des Blocks und die Beschleunigung a des Blocks besitzen entgegengesetzte Richtungen. Dies bewirkt, daß der Block immer langsamer wird. Nach einer gewissen Zeit t ist die (Momentan-) Geschwindigkeit v des Blocks schließlich Null. Nach dieser Zeit t hat der Block die gesuchte Strecke s die Ebene hinauf zurückgelegt.

Auf Grundlage der qualitativen Repräsentation kann allerdings weder die in Frage stehende Zeit t noch die im Laufe dieser Zeit zurück-

gelegte Strecke s genau bestimmt werden. Um diese Größen bestimmen und das Problem lösen zu können, müßte dem Modell zusätzlich Wissen über quantitative Aspekte der klassischen Mechanik zur Verfügung stehen.

Im zweiten Fall wird durch Anwendung des zur Verfügung gestellten Wissens über quantitative Aspekte der klassischen Mechanik eine quantitativ-numerische Repräsentation konstruiert. Dies geschieht auf Grundlage einer rückwärtsverkettenden Problemlösestrategie. Ausgehend von der gesuchten Strecke s wird versucht, die zur Verfügung stehenden Kraft-gesetze und kinematischen Gesetze so lange „rückwärts“ zu verketteten, bis die gesuchte Strecke berechnet werden kann (vgl. Tabelle 4). Da das zur Verfügung stehende Wissen über quantitative Aspekte allerdings weder die Berechnung der resultierenden Kraft F_{res} , die auf den Block wirkt, noch die Berechnung der Endgeschwindigkeit v des Blocks ermöglicht, ist diese Strategie zum Scheitern verurteilt. Um diese Größen bestimmen und das Problem lösen zu können, müßte dem Modell zusätzlich Wissen über qualitative Aspekte der klassischen Mechanik zur Verfügung stehen.

Schritt:	Bekannt:	Gesucht:
1		$s = ?$
2		$s = v_0 t + 1/2 at^2$
3	$v_0 = 5 \text{ m/s}$	$v_0 = ?$
4		$t = ?$
5		$t = (v - v_0)/a$
6		$v = ?$
7	$v_0 = 5 \text{ m/s}$	$v_0 = ?$
8		$a = ?$
9		$a = F_{res}/m$
10		$F_{res} = ?$
11	$m = 10 \text{ kg}$	$m = ?$

Tab. 4: Rückwärtsverkettung von Kraftgesetzen und kinematischen Gesetzen

¹ Aufgrund der vorgenommenen Einschränkungen hinsichtlich der betrachteten Problemlöseprozesse sind die vom Modell konstruierten qualitativ-konzeptuellen Repräsentationen vermutlich in vielen Fällen weniger reichhaltig, als die von Schülern und Schülerinnen konstruierten.

Für sich allein betrachtet handelt es sich bei einer quantitativ-numerischen Repräsentation wie der oben beschriebenen weniger um eine Beschreibung physikalischer Sachverhalte als um eine Beschreibung mathematisch-algebraischer Sachverhalte. Erst dadurch, daß eine quantitativ-numerische Repräsentation auf eine qualitativ-konzeptuelle Repräsentation bezogen wird, wird sie zu einer sinnvollen Beschreibung physikalischer Sachverhalte. Dennoch konstruieren Schüler und Schülerinnen in vielen Fällen eine quantitativ-numerische Repräsentation ohne diese auf eine qualitativ-konzeptuelle Repräsentation zu beziehen (vgl. zum Beispiel Chi, Feltovich & Glaser, 1981; Simon & Simon, 1978).

Werden dem Modell sowohl Wissen über qualitative als auch Wissen über quantitative Aspekte der klassischen Mechanik zur Verfügung gestellt, kann das in Frage stehende Problem erfolgreich bearbeitet werden. In einem solchen Fall können im Modell zwei Formen der Koordination qualitativer und quantitativer Repräsentationen unterschieden werden:

1. Die in einer qualitativen Repräsentation enthaltenen Informationen können verwendet werden, um eine zunächst unvollständige quantitative Repräsentation zu vervollständigen. In vielen Fällen stellen zusätzliche quantitative Informationen, die durch Anwendung einer qualitativen Repräsentation gewonnen werden können, eine notwendige Voraussetzung für eine erfolgreiche Bearbeitung eines Problems dar. So kann auf Grundlage des Kräfte diagrams in Abbildung 2 und unter Rückgriff auf vektoralgebraisches Wissen zum Beispiel erschlossen werden, daß sich der Betrag der resultierenden Kraft F_{res} aus dem Betrag der Komponente der Gewichtskraft F_{Gx} , die entlang der x-Achse wirkt, und dem Betrag der Reibungskraft F_R zusammensetzt: $F_{res} = -(F_{Gx} + F_R)$. Diese zusätzlichen Informationen ermöglichen anschließend die gezielte Anwendung der verschiedenen Kraftgesetze. Damit kann der Betrag sowohl der resultierenden Kraft F_{res} als auch der Beschleunigung a bestimmt werden.

2. Die in einer qualitativen Repräsentation enthaltenen Informationen können gegebenenfalls verwendet werden, um die Konstruktion einer quantitativen Repräsentation zu vereinfachen. Enthält eine qualitative Repräsentation zum Beispiel Informationen darüber, daß es sich bei der Bewegung eines Körpers um eine beschleunigte Bewegung handelt, können gezielt solche kinematischen Gesetze angewandt werden, in denen die Beschleunigung des Körpers angemessen berücksichtigt wird.

4. Die Auswirkungen von Alltagsvorstellungen

In der Vergangenheit wurden Alltagsvorstellungen zumeist im Zusammenhang mit der Bearbeitung von Problemen beobachtet, die bereits durch die Konstruktion einer ausschließlich qualitativen Repräsentation gelöst werden können (vgl. zum Beispiel Clement, 1982; McCloskey, 1983). Die Frage, wie sich Alltagsvorstellungen auf die Bearbeitungen von Problemen auswirken, die eine Konstruktion und Koordination qualitativer und quantitativer Repräsentationen erfordern, blieb weitgehend ungeklärt. Diese Frage wurde auf der Grundlage des wissensbasierten Modells in drei Schritten empirisch untersucht (vgl. Plötzner, 1995; Plötzner & Spada, 1998):

1. es wurden bestimmte Alltagsvorstellungen, die hier als Impetusvorstellungen bezeichnet werden, formalisiert und im Modell implementiert,
2. das Modell wurde auf die Enkodierungen (vgl. Tabelle 3) der in Tabelle 1 beschriebenen Probleme angewandt, um vorherzusagen, wie sich die implementierten Impetusvorstellungen auf die Bearbeitung dieser Probleme auswirken, und
3. die Probleme wurden 28 Schülern und Schülerinnen zur Bearbeitung vorgelegt, um zu beobachten, wie sich etwaige Impetusvorstellungen dieser Schüler und Schülerinnen auf die Bearbeitung der Probleme auswirkten.

Mit Impetusvorstellungen werden hier häufig beobachtete Alltagsvorstellungen von Schülern und Schülerinnen bezeichnet. Danach wirkt in einem bewegten Körper stets eine Kraft in Richtung seiner Bewegung. Diese Kraft kann dem Körper zum Beispiel durch eine Wurf- oder Anstoßbewegung mitgeteilt werden. Obwohl Impetusvorstellungen von Schülern und Schülerinnen Parallelen zum Konzept des Impetus aufweisen, wie es in der Theorie des Mittelalters diskutiert wurde, stellen sie weniger eng zusammenhängende, eher unreflektierte und interindividuell unterschiedliche Annahmen zu den Bewegungen von Körpern dar (vgl. zum Beispiel McCloskey, 1983).

4.1 Eine Formalisierung von Impetusvorstellungen

Formalisiert wurden Impetusvorstellungen auf Grundlage der Repräsentationssprache,

die auch zur Formalisierung richtigen Wissens über qualitative Aspekte der klassischen Mechanik herangezogen wurde (vgl. Tabelle 2). Empirisch häufig beobachtete Aspekte von Impetusvorstellungen (vgl. zum Beispiel Clement, 1982; McCloskey, 1983) wurden durch drei Ausdrücke formalisiert. Ein Ausdruck beschreibt die Bedingungen, unter denen ein Impetus angenommen wird, zwei weitere Ausdrücke beschreiben die Richtung eines angenommenen Impetus (vgl. Tabelle 5).

4.2 Vorhersagen

Wird das Modell auf eines der in Tabelle 1 beschriebenen Probleme angewandt, wird in einem ersten Schritt eine qualitative Repräsentation konstruiert. Neben richtigen Informationen umfaßt diese Repräsentation auch falsche Informationen: es wird ein Impetus in Form einer zusätzlichen Kraft in Richtung der Bewegung des betrachteten Körpers ange-

- | |
|---|
| <p>I1: Wenn ein Körper eine Geschwindigkeit besitzt und keine Kraft auf den Körper wirkt, die in Richtung der Geschwindigkeit zeigt, dann besitzt der Körper einen Impetus.
 $\{ \text{wert_in}(S, \text{instanz}(\text{Objekt}, \text{körper})) = \text{wahr} \wedge$ $\text{wert_in}(S, \text{instanz}(\text{geschwindigkeit}(\text{Objekt}), \text{Geschwindigkeit})) = \text{wahr} \wedge$ $\neg(\text{wert_in}(S, \text{instanz}(\text{kraft}(\text{Objekt}, _, _), \text{kraft})) \text{ wahr}) \wedge$ $\text{wert_in}(S, \text{neigung}(\text{kraft}(\text{Objekt}, _, _))) = \text{wert_in}(S,$ $\text{neigung}(\text{geschwindigkeit}(\text{Objekt}))) \wedge$ $\text{wert_in}(S, \text{orientierung}(\text{kraft}(\text{Objekt}, _, _))) = \text{wert_in}(S, \text{orientierung}(\text{geschwindigkeit}(\text{Objekt}))) \}$ $\{ \text{wert_in}(S, \text{instanz}(\text{impetus}(\text{Objekt}), \text{Impetus})) = \text{wahr} \}$ </p> <p>I2: Wenn ein Körper einen Impetus besitzt, dann ist die Neigung des Impetus gleich der Neigung der Geschwindigkeit des Körpers.
 $\{ \text{wert_in}(S, \text{instanz}(\text{impetus}(\text{Objekt}), \text{impetus})) = \text{wahr} \}$ $\{ \text{wert_in}(S, \text{neigung}(\text{impetus}(\text{Objekt}))) = \text{wert_in}(S,$ $\text{neigung}(\text{geschwindigkeit}(\text{Objekt}))) \}$ </p> <p>I3: Wenn ein Körper einen Impetus besitzt, dann ist die Orientierung des Impetus gleich der Orientierung der Geschwindigkeit des Körpers.
 $\{ \text{wert_in}(S, \text{instanz}(\text{Impetus}(\text{Objekt}), \text{impetus})) = \text{wahr} \}$ $\{ \text{wert_in}(S, \text{orientierung}(\text{impetus}(\text{Objekt}))) = \text{wert_in}(S, \text{orientierung}(\text{geschwindigkeit}(\text{Objekt}))) \}$ </p> |
|---|

Tab. 5: Wie Wissen über Impetusvorstellungen formalisiert wurde

nommen. Weiter wird beschrieben, aus welchen Kräften sich die resultierende Kraft F_{res} , die auf den betrachteten Körper wirkt, zusammensetzt. Insbesondere wird die zusätzlich angenommene Kraft in Richtung der Bewegung des betrachteten Körpers als eine Kraft identifiziert, die in die resultierende Kraft F_{res} eingeht.

In einem zweiten Schritt wird versucht, die in der qualitativen Repräsentation enthaltenen Informationen zu verwenden, um eine quantitative Repräsentation zu konstruieren und zu vervollständigen. Das Modell scheitert an der Stelle, an der versucht wird, die durch Anwendung von Wissen über qualitative Aspekte gewonnene Beschreibung der resultierenden Kraft F_{res} anhand der zur Verfügung stehenden Kraftgesetze quantitativ zu präzisieren.

Der Grund dafür ist, daß die implementierten Alltagsvorstellungen lediglich Wissen über qualitative Aspekte der betrachteten Phänomene umfassen. Quantitative Aspekte werden nicht berücksichtigt. Die zusätzlich angenommene Kraft in Richtung der Bewegung des betrachteten Körpers kann daher nicht quantitativ beschrieben werden. Da im Modell keine Mechanismen vorgesehen sind, auf deren Grundlage derartige „Sackgassen“ überwunden werden könnten, bricht das Modell die Bearbeitung des Problems an dieser Stelle ab.

Durch das Modell wird somit vorhergesagt, daß sich Impetusvorstellungen bei der Bearbeitung quantitativer Probleme in der Weise auswirken, daß qualitative und quantitative Repräsentationen nicht angemessen koordiniert werden können.

Wenden Personen Impetusvorstellungen auf ein quantitatives Problem an, dessen Lösung die Konstruktion und Koordination sowohl einer qualitativen als auch einer quantitativen Repräsentation erfordert, sollte keine erfolgreiche Bearbeitung des in Frage stehenden Problems zu beobachten sein.

4.3 Empirische Beobachtungen

28 Schülern und Schülerinnen zweier 13. Klassen wurden die Probleme aus Tabelle 1 zur Bearbeitung vorgelegt. Eindimensionale Bewegungsvorgänge mit konstanter Beschleunigung waren etwa neun Monate vor der Untersuchung im Physikunterricht der beiden Klassen behandelt worden. Die Lösungshäufigkeiten für die verschiedenen Probleme sind in Tabelle 6 zusammengefaßt. Impetusvorstellungen wurden auf der Grundlage von Protokollanalysen immer dann diagnostiziert, wenn ein Schüler oder eine Schülerin eine „Kraft“ in Richtung der Bewegung des in Frage stehenden Körpers annahm. Dies wurde von den Schülern und Schülerinnen in allen Fällen durch Einzeichnen einer entsprechenden „Kraft“ zum Ausdruck gebracht. Zum Teil wurden die Zeichnungen durch schriftliche Anmerkungen ergänzt, wie zum Beispiel durch die Anmerkung eines Schülers, der im Rahmen der Bearbeitung von Problem 1 (vgl. Tabelle 1) eine „Kraft“ annahm „...“, die die Münze nach oben fliegen läßt ...“. Die Anwendung von Impetusvorstellungen wurde in insgesamt 28 Fällen diagnostiziert: fünf in Zusammenhang mit der Bearbeitung

	Problem 1	Problem 2	Problem 3	Gesamt
Richtige Lösung	7	14	9	30
Falsche Lösung	13	4	14	31
Bearbeitung abgebrochen	8	10	5	23

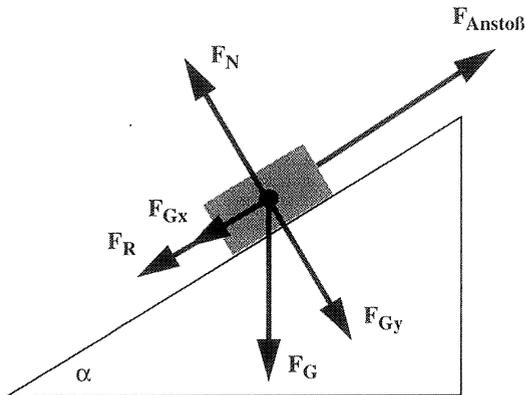
Tab. 6: Die beobachteten Häufigkeiten richtiger und falscher Lösungen

	Richtige Lösung	Falsche Lösung	Bearbeitung abgebrochen	Gesamt
Impetuskorrekturen	3	12	13	28
Keine Impetuskorrekturen	27	19	10	56
Gesamt	30	31	23	84

Tab. 7: Die Auswirkungen von Impetuskorrekturen auf die Lösungsrichtigkeit

von Problem 1, sieben in Zusammenhang mit der Bearbeitung von Problem 2 und 16 in Zusammenhang mit der Bearbeitung von Problem 3. Dieses Ergebnis zeigt deutlich, daß Alltagsvorstellungen auch bei der Bearbeitung von Problemen zur Anwendung kommen, die eine quantitative Lösung erfordern.

Wie sich Impetuskorrekturen auf die Bearbeitung der Probleme auswirkten, ist aus Tabelle 7 ersichtlich. Wie auf Grundlage des



$F_{res} = ?$

In welche Richtung wirkt die Reibkraft?

Wirkt sie immer entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung? Wenn ja, dann:

$$F_{res} = F_{Anstoß} - (F_{Gx} + F_R)$$

Jetzt habe ich wieder die gleichen Probleme wie früher; wie komme ich von F nach v ? Ich versuche nach t !

$$s = \frac{1}{2} a t^2$$

$$v = a t$$

$$t = v/a$$

$$m a = m a_{Anstoß} - (m a_{Gx} + m a_R)$$

$a_{Anstoß}$ and a_{Gx} sind unbekannt. Ich gebe auf!

Abb. 3 Wie ein Schüler aufgrund seiner Impetuskorrekturen scheiterte

Modells vorhergesagt, geht mit der Anwendung von Impetuskorrekturen eine bedeutende Verringerung erfolgreicher Bearbeitungen der in Frage stehenden Probleme einher ($\chi^2(2) = 13.2, p < .01$). Auch die Art der Schwierigkeiten, die sich bei Anwendung von Impetuskorrekturen zeigten, entspricht im wesentlichen der vom Modell vorhergesagten. Viele Schüler und Schülerinnen, die Impetuskorrekturen anwandten, stießen auf Schwierigkeiten, als sie versuchten, bestimmte Aspekte ihrer qualitativen Problemrepräsentationen in quantitative Informationen zu überführen. Abbildung 3 veranschaulicht diese Beobachtung am Beispiel des Versuchs eines Schülers Problem 3 aus Tabelle 1 zu lösen.

In vielen Fällen waren die Schüler und Schülerinnen nicht in der Lage, die Schwierigkeiten, die sich aus der Anwendung von Impetuskorrekturen ergaben, erfolgreich zu überwinden. In einem Fall gab ein Schüler seine Impetuskorrekturen wieder auf und bestimmte anschließend die richtige Lösung. In 14 Fällen behelfen sich die Schüler und Schülerinnen mit verschiedensten Tricks, wie zum Beispiel der Ausführung unzulässiger algebraischer und arithmetischer Operationen, um die Bearbeitung der in Frage stehenden Probleme fortsetzen zu können. In zwei Fällen führten diese Tricks zu richtigen, in allen anderen Fällen zu falschen Lösungen.

6. Diskussion

Die im Mittelpunkt der kognitionspsychologischen Problemlöseforschung stehenden Fragestellungen haben sich in den letzten 20

Jahren wiederholt geändert. Mit dem Ziel, möglichst allgemeine, gegenstandsunspezifische Problemlöseprozesse zu identifizieren, standen in den 70er Jahren Fragen nach solchen Problemlösestrategien im Vordergrund, die vergleichsweise wenig Vorwissen erfordern. Mit der Erkenntnis, daß die Nutzung solcher Problemlöseprozesse eher für unerfahrene als für erfahrene Personen in einem Gegenstandsbereich kennzeichnend ist, rückten in den 80er Jahren zunehmend Fragen nach den Inhalten und Strukturen des Wissens von Personen in den Mittelpunkt.

Da viele Aspekte menschlichen Problemlösens auch auf der Grundlage der Betrachtung isolierter und individueller Wissensstrukturen nicht befriedigend erklärt werden konnten, wurde in den letzten 10 Jahren die Untersuchung weiterer Fragen intensiviert. Dazu gehören zum Beispiel die Fragen nach der Anwendung und Koordination unterschiedlicher Wissensbestände (vgl. zum Beispiel van Someren & Reimann, 1996), nach der Nutzung extern verfügbarer Informationen (vgl. zum Beispiel Zhang, 1997) sowie nach dem kooperativen Problemlösen (vgl. zum Beispiel Dillenbourg, Baker, Blaye & O'Malley, 1996). In der vorliegenden Arbeit wurde ein an die kognitionspsychologische Problemlöseforschung anknüpfendes wissensbasiertes Modell vorgestellt, das Problemlösen in der klassischen Mechanik auf Grundlage der Konstruktion und Koordination qualitativer und quantitativer Repräsentationen simuliert. Dabei standen solche Formen der Koordination im Vordergrund, durch die Informationen einer qualitativen Repräsentation genutzt werden, um angemessene quantitative Repräsentationen zu konstruieren.

Im Idealfall werden qualitative und quantitative Repräsentationen wechselseitig verschränkt konstruiert. Ein derartiges Vorgehen setzt allerdings Wissensstrukturen voraus, in denen Wissen über qualitative und quantitative Aspekte eng aufeinander bezogen ist. Obwohl erste Vorstellungen darüber vorliegen, wie solche Wissensstrukturen erworben werden können (vgl. zum Beispiel Elio & Scharf, 1990), bleibt die Rekonstruktion der

damit verbundenen Lernprozesse in psychologisch angemessener und didaktisch fruchtbarer Form weiter eine Herausforderung.

In Abhängigkeit des Wissens, das dem in dieser Arbeit vorgestellten Modell zur Verfügung gestellt wird, können verschiedene Problemlösestrategien simuliert werden (vgl. Plötzner, 1994). Wird dem Modell ausschließlich Wissen über quantitativ-numerische Aspekte der klassischen Mechanik zur Verfügung gestellt, wird eine Problemlösestrategie simuliert, deren Anwendung in der Vergangenheit häufig bei unerfahrenen Personen beobachtet werden konnte (vgl. Chi, Feltovich & Glaser, 1981; Simon & Simon, 1978). Ausgehend von der gesuchten Größe wird versucht, die zur Verfügung stehenden Kraftgesetze und kinematischen Gesetze so lange „rückwärts“ zu verketteten, bis die gesuchte Größe auf der Grundlage bekannter Größen berechnet werden kann. Obwohl die Anwendung dieser Strategie auf einfache Probleme zum Erfolg führen kann, scheitert sie zumeist im Zusammenhang mit der Bearbeitung komplexer Probleme.

Wird dem Modell sowohl Wissen über quantitativ-numerische als auch Wissen über qualitativ-konzeptuelle Aspekte der klassischen Mechanik zur Verfügung gestellt, wird eine Problemlösestrategie simuliert, deren Anwendung in der Vergangenheit bei erfahrenen Personen beobachtet werden konnte (vgl. Chi, Feltovich & Glaser, 1981; Larkin, 1983). Ausgehend von qualitativen Betrachtungen eines Problems werden fehlende quantitative Informationen abgeleitet und die zur Verfügung stehenden Kraftgesetze und kinematischen Gesetze gezielt genutzt. Durch Anwendung dieser Strategie werden auch komplexe Probleme erfolgreich bearbeitbar.

Das vorgestellte Modell stellt eine Umgebung zur Analyse und Simulation von Problemlöseprozessen bereit. Mit Hilfe des Modells kann analysiert werden, welches Wissen zur Konstruktion einer Repräsentation benötigt wird, welche Probleme auf der Grundlage einer Repräsentation gelöst werden können und welche Probleme die Berücksichtigung mehrerer Repräsentationen erfordern. Darüber

hinaus kann mit Hilfe des Modells simuliert werden, wie unterschiedliche Repräsentationen konstruiert und koordiniert werden können, wie Anwendungen von Alltagsvorstellungen die Bearbeitungen bestimmter Probleme scheitern lassen und auf Grundlage welchen Wissens die Problembearbeitungen erfolgreich fortgesetzt werden können.

Auf der Basis des Modells allein können aber keine Empfehlungen ausgesprochen werden, wie Alltagsvorstellungen im Unterricht behandelt werden sollten. Es kann lediglich simuliert und demonstriert werden, welche Schwierigkeiten beim Problemlösen auftreten, wenn bestimmte Alltagsvorstellungen zur Anwendung gelangen. Die Frage, ob Alltagsvorstellungen eher mit der wissenschaftlichen Sichtweise konfrontiert werden sollten, um sie durch letztere zu ersetzen, oder, wie von di Sessa (1988, 1993) vorgeschlagen, ob Alltagsvorstellungen eher um die wissenschaftliche Sichtweise ergänzt werden sollten, liegt ausserhalb des Erklärungsanspruchs des Modells. Untersuchungen zur Wirksamkeit verschiedener Formen des Umgangs mit Alltagsvorstellungen im Unterricht scheinen aber das zuletzt genannte Vorgehen nahezulegen (vgl. Smith, di Sessa & Roschelle, 1993).

Aus didaktischer Sicht stellt das Modell in erster Linie ein (analytisches) Hilfsmittel dar, mit dem die Identifikation von Wissen, das im Unterricht vermittelt werden soll, und die Formulierung von Problemen, die im Unterricht bearbeitet werden sollen, unterstützt werden können. Gegeben eine Formalisierung der im Unterricht präsentierten Informationen über qualitative und quantitative Aspekte der klassischen Mechanik, kann mit Hilfe des Modells entschieden werden, welche Probleme durch Nutzung dieser Informationen bereits erfolgreich bearbeitet werden können. Dies unterstützt einerseits eine an den Lernzielen orientierte Auswahl der im Unterricht behandelten Informationen. Andererseits ist es möglich, systematisch Probleme vorzulegen, die es gestatten, bestimmte Wissensselemente durch Anwendung zu üben beziehungsweise ihre Verfügbarkeit zu prüfen. In der Verschränkung von Wissensvermittlung

und Wissensanwendung anhand von Übungsaufgaben kann gezielt ein Wissensselement nach dem anderen eingeführt und eingeübt werden. Durch die Vorlage von Problemen, die zusätzliche Wissensselemente erfordern, die noch nicht im Unterricht vermittelt wurden, kann ein Schüler gezielt in Situationen gebracht werden, in denen er versuchen muß, selbständig neues Wissen zu erarbeiten.

Das Modell gibt auch Hinweise darauf, wie eine Vermittlung von Wissen über qualitative und quantitative Aspekte der klassischen Mechanik sequenziert werden sollte. In einer experimentellen Untersuchung (vgl. Plötzner, Fehse, Spada, Vodermaier & Wolber, 1996) wurde Schülerinnen anhand zweier Lehreinheiten, die auf Grundlage des Modells konstruiert wurden, gezielt Anfangswissen entweder über qualitative oder quantitative Aspekte der klassischen Mechanik vermittelt. Anschließend erhielten Paare von Schülerinnen, denen zuvor systematisch unterschiedliches Wissen vermittelt worden war, Gelegenheit, Informationen auszutauschen. Dabei waren kooperativ Probleme zu bearbeiten, deren Lösungen eine koordinierte Anwendung von Wissen über qualitative und quantitative Aspekte erforderten. Die Vermittlung von Wissen über qualitative Aspekte vor einer Betrachtung quantitativer Aspekte erwies sich in der Untersuchung als überlegen gegenüber der umgekehrten Abfolge.

Soll im Unterricht die Fähigkeit zu einem möglichst flexiblen Problemlösen vermittelt werden, folgt aus dem Modell hinsichtlich der Gestaltung didaktischer Maßnahmen, daß, nach einer Vermittlung entsprechenden Grundlagenwissens, vor allem solche Probleme im Unterricht bearbeitet werden sollten, die eine Konstruktion und Koordination mehrerer Repräsentationen erfordern. Ein derartiges Vorgehen wird aber vermutlich erst dann zum Erfolg führen, wenn es angemessen in einen größeren didaktischen Rahmen eingebettet wird, der eine systematische Konstruktion und Koordination qualitativer und quantitativer Repräsentationen durch Schüler und Schülerinnen anregt, unterstützt und fördert.

Literatur

- Anzai, Y. (1991). Learning and use of representations for physics expertise. In K. A. Ericsson & J. Smith (Eds.), *Toward a general theory of expertise* (pp. 64-92). Cambridge, NY: Cambridge University Press.
- Carey, S. (1991). *Conceptual change in childhood*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Chi, M. T. H. (1992). Conceptual change across ontological categories: Examples from learning and discovery in science. In R. Giere (Ed.), *Cognitive models of science: Minnesota studies in the philosophy of science* (pp. 129-186). Minneapolis, MN: University of Minnesota Press.
- Chi, M. T. H., Bassok, M., Lewis, M. W., Reimann, P. & Glaser, R. (1989). Self-explanations: How students study and use examples in learning to solve problems. *Cognitive Science*, 13, 145-182.
- Chi, M. T. H., Feltovich, P. J. & Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5, 121-152.
- Chi, M. T. H., Slotta, J. D. & de Leeuw, N. (1994). From things to processes: A theory of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, 27-43.
- Clement, J. (1982). Students' preconceptions in introductory mechanics. *American Journal of Physics*, 50, 66-71.
- Dillenbourg, P., Baker, M., Blaye, A. & O'Malley, C. (1996). The evolution of research on collaborative learning. In P. Reimann & H. Spada (Eds.), *Learning in humans and machines: Towards an interdisciplinary learning science* (pp. 189-211). Oxford: Elsevier.
- diSessa, A. A. (1988). Knowledge in pieces. In G. Forman & P. B. Pufall (Eds.), *Constructivism in the computer age* (pp. 49-70). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- diSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10, 105-225.
- Ebbinghaus, H.-D., Flum, J. & Thomas, W. (1996). *Einführung in die mathematische Logik* (4. Aufl.). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Elio, R. & Scharf, P. B. (1990). Modeling novice-to-expert shifts in problem-solving strategy and knowledge organization. *Cognitive Science*, 14, 579-639.
- Kintsch, W. & Greeno, J. G. (1985). Understanding and solving word arithmetic problems. *Psychological Review*, 92, 109-129.
- Larkin, J. H. (1983). The role of problem representation in physics. In D. Gentner & A. L. Stevens (Eds.), *Mental models* (pp. 75-98). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Larkin, J. H., McDermott, J., Simon, D. P. & Simon, H. A. (1980). Models of competence in solving physics problems. *Cognitive Science*, 4, 317-345.
- McCloskey, M. (1983). Naive theories of motion. In D. Gentner & A. L. Stevens (Eds.), *Mental models* (pp. 299-324). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Newell, A. & Simon, H. A. (1963). GPS, a program that simulates human thought. In E. A. Feigenbaum & J. Feldman (Eds.), *Computers and thought* (pp. 279-293). New York, NY: McGraw Hill.
- Newell, A. & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Novak, G. S. (1977). Representation of knowledge in a program for solving physics problems. *Proceedings of the 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence* (pp. 286-291). Los Altos, CA: Morgan Kaufmann.
- Opwis, K. (1992). *Kognitive Modellierung - Zur Verwendung wissensbasierter Systeme in der psychologischen Theoriebildung*. Bern: Huber.
- Opwis, K. & Plötzner, R. (1996). *Kognitive Psychologie mit dem Computer - Ein Einführungskurs zur Simulation geistiger Leistungen mit Prolog*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Opwis, K. & Lüer, G. (1996). Modelle der Repräsentation von Wissen. In D. Albert, & K.-H. Stapf (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich C: Theorie und Forschung, Serie II: Kognition, Band 4: Gedächtnis* (S. 337-431). Göttingen: Hogrefe.
- Opwis, K. & Spada, H. (1994). Modellierung mit Hilfe wissensbasierter Systeme. In T. Herrmann & W. Tack (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich B: Methodologie und Methoden, Serie I: Forschungsmethoden der Psychologie, Band 1: Methodologische Grundlagen der Psychologie* (S. 199-248). Göttingen: Hogrefe.
- Pfundt, H. & Duit, R. (1994). *Bibliography: Students' alternative frameworks and science education* (4th ed.). Kiel: Institute for Science Education.

- Plötzner, R. (1994). The integrative use of qualitative and quantitative knowledge in physics problem solving. Frankfurt/Main: Peter Lang Verlag.
- Plötzner, R. (1995). How misconceptions affect formal physics problem solving: Model-based predictions and empirical observations. In J. D. Moore & J. F. Lehman (Eds.), *Proceedings of the Seventeenth Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 248-252). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Plötzner, R., Fehse, E., Spada, H., Vodermaier, A. & Wolber, D. (1996). Physiklernen mit modellgestützt konstruierten Begriffsnetzen und durch Problemlösen zu zweit. *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie*, 28, 270-293.
- Plötzner, R. & Spada, H. (1998). Constructing quantitative problem representations on the basis of qualitative reasoning. *Interactive Learning Environments*, 5, 95-107.
- Plötzner, R., Spada, H., Stumpf, M. & Opwis, K. (1990). Learning qualitative and quantitative reasoning in a microworld for elastic impacts. *European Journal of Psychology of Education*, 4, 501-516.
- Pylyshyn, Z. W. (1989). Computing in cognitive science. In M. I. Posner (Ed.), *Foundations of cognitive science* (pp. 51-91). Cambridge, MA: MIT Press.
- Reif, F. (1995). *Understanding basic mechanics - Text*. New York, NY: Wiley.
- Reusser, K. (1990). From text to situation to equation: Cognitive simulation of understanding and solving mathematical word problems. In H. Mandl, E. De Corte, N. Bennett & H. F. Friedrich (Eds.), *Learning and instruction* (pp. 477-498). Oxford: Pergamon Press.
- Simon, D. P. & Simon, H. A. (1978). Individual differences in solving physics problems. In R. S. Siegler (Ed.), *Children's thinking: What develops?* (pp. 325-348). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Smith, J. P., di Sessa A. A. & Roschelle, J. (1993). Misconceptions reconceived: A constructivist analysis of knowledge in transition. *The Journal of the Learning Sciences*, 3, 115-163.
- Sterling, L. & Shapiro, E. (1994). *The art of prolog* (2nd ed.). Cambridge, MA: MIT Press.
- Szabo, I. (1976). *Geschichte der mechanischen Prinzipien und ihrer wichtigsten Anwendungen*. Basel: Birkhäuser.
- VanLehn, K., Jones, R. M. & Chi, M. T. H. (1992). A model of the self-explanation effect. *The Journal of the Learning Sciences*, 2, 1-59.
- Van Someren, M. W. & Reimann, P. (1996). Multi-objective learning with multiple representations. In P. Reimann & H. Spada (Eds.), *Learning in humans and machines: Towards an interdisciplinary learning science* (pp. 130-153). Oxford: Elsevier.
- White, B. Y. & Frederiksen, J. R. (1990). Causal model progressions as a foundation for intelligent learning environments. *Artificial Intelligence*, 42, 99-15.
- Zell, A. (1994). *Simulation neuronaler Netze*. Bonn: Addison-Wesley.
- Zhang, J. (1997). The nature of external representations in problem solving. *Cognitive Science*, 21, 179-217.
- Dr. Rolf Plötzner ist als Wissenschaftlicher Assistent am Psychologischen Institut der Universität Freiburg beschäftigt.
- Dr. Hans Spada ist Professor für Allgemeine Psychologie an der Universität Freiburg.
- Dr. Rolf Plötzner
Universität Freiburg
Psychologisches Institut
Niemensstraße 10
79085 Freiburg