

# Konzepte für System-Software zum Physik-Verstehen

D. Heuer, Würzburg

Aus PdN-Ph 45, Heft 4, S. 2-11, 1996

## Zusammenfassung

Mit dem Rechneinsatz können strukturelle Schwächen des Physikunterrichts ausgeglichen werden: Struktur und Wirkungszusammenhänge werden klarer und mentale Modelle können in realistischen Fragestellungen erprobt werden. Vier Formen des Rechneinsatzes werden eingehend charakterisiert: Computerunterstützte Experimente, Modellierungen physikalischer Vorgänge, Simulationen und virtuelle Experimente, erstellt mit einem Simulationsbaukasten. Abschließend werden bei einem Vergleich die Einsatzschwerpunkte herausgestellt: Computerunterstützte Experimente und Modellierung bieten besondere Chancen, Physik verstehen als Konstruktion eigener mentaler Modelle zu fördern.

## 1. Verändertes Anforderungsprofil

Mit dem Einsatz moderner Technologien in allen Lebensbereichen verändern sich innerhalb sehr kurzer Zeit die inhaltlichen Anforderungen an den Menschen, besonders im Berufsleben. Er wird immer stärker von Routine-Arbeiten und -entscheidungen entlastet, andererseits steigen die Anforderungen an eigenständiges Denken sprunghaft. Statt Wissensdetails nur schematisch einzusetzen, ist ein Denken in Wirkungszusammenhängen, ein Systemdenken, gefragt, das vielseitig anwendbar und transferierbar ist. Dazu ist auch ein offenes, z. T. auch divergentes Denken nötig, ohne das Problemlösen keine Chancen hat.

## 2. Neues Lernen gefragt

Bisherige Ausbildungs- und Lernsituationen sind sehr stark auf traditionelle Wissensvermittlung ausgerichtet. Dies hat viele Gründe, u. a. leichte Überprüfbarkeit, schnelle, aufzeigbare Erfolge, verpflichtender Stoffkanon. Das gilt auch für die SII der Gymnasien, z. T. auch für Anfangssemester an den Universitäten. Alternative, ganzheitliche Formen des Lernens sind zwar seit der Reformpädagogik immer wieder gefordert worden, haben aber den Schulalltag nicht erreicht, wohl auch deswegen, weil kreativeres Lernen auch kreatives Lehren voraussetzt, wozu eine deutlichere Anleitung in der Ausbildung notwendig ist.

Im naturwissenschaftlichen Unterricht, speziell in der Physik, wurde das Aufzeigen qualitativer Zusammenhänge und Beziehungen immer skeptisch beargwöhnt, da hier das Besondere des Faches, die Quantifizierbarkeit, nicht zum Tragen kommt und Argumentationen schnell ins Vage, Spielerische abgleiten. Andererseits zeigen die Ergebnisse vieler Untersuchungen zu Lerndefiziten nach normalem Unterricht weltweit, daß Wirkungszusammenhänge und -gefüge auch einfacher Versuchsabläufe von Schülern nicht angemessen überschaut werden, während quantitative "Formelaufgaben" durchaus adäquat gelöst werden. Es fehlt offenbar an einer geeigneten mentalen Repräsentation des Gelernten.

Diese kann, das zeigen ergänzende Beobachtungen, nur durch eine aktive und intensive Auseinandersetzung des Lernenden mit realen Vorgängen und ihren Deutungen aufgebaut werden. Dazu sind offensichtlich im bisherigen Unterricht keine ausreichenden Gelegenheiten gegeben.

### **3. Rechnereinsatz, um strukturelle Schwächen des Physik-Unterrichts auszugleichen**

Die aufgezeigten strukturellen Schwächen des Physik-Unterrichts liegen mit begründet in unzureichenden Möglichkeiten für den Schüler, angemessene mentale Repräsentationen aufzubauen und zu erproben. Um dem entgegenzuwirken, sind folgende Forderungen wichtig:

- 1) Die Erarbeitung neu einzuführender Begriffsbildungen und grundlegender Strukturzusammenhänge sollte dem Lernenden durch ikonische Repräsentationen erleichtert werden, die möglichst intuitiv erfaßbar sind.
- 2) Das Erarbeiten von Wirkungszusammenhängen, der Umgang mit ihnen und ihren Verkettungen sollte sehr viel stärker als bisher im Zentrum des Lernens stehen. Denn dieses Arbeiten bietet viele Denkanstöße sowohl zu qualitativem Schlußfolgern wie zu quantitativen Überlegungen und Berechnungen.
- 3) Konkrete und realistische Fragestellungen sollten dem Lernenden viele Möglichkeiten geben, sich aktiv und intensiv auch durch experimentelles Vorgehen mit seinen bisher aufgebauten mentalen Repräsentationen auseinanderzusetzen.

Diese Forderungen können heute zum ersten Mal in realistischer Weise dadurch verwirklicht werden, daß der Rechner vom Lernenden als Werkzeug eingesetzt wird. Das ist in zwei Bereichen möglich, der Analyse von Versuchsabläufen und der Modellierung solcher Abläufe.

### **4. Dynamische ikonische Repräsentationen als Hilfen zum Verstehen von Strukturzusammenhängen**

Ein Handicap für das Kennenlernen und Verstehen vieler physikalischer Vorgänge und Sachverhalte ist, daß die zu ihrer angemessenen Beschreibung notwendigen Größen nicht der direkten Beobachtung zugänglich sind. Vielmehr müssen sie aus anderen Größen erst ermittelt werden. Durchschnittsgeschwindigkeiten, Momentangeschwindigkeiten, Beschleunigungen, Impulse, Energie sind typische Beispiele dafür. Wenn Aussagen über solche Größen zu machen sind, können geeignete Notationssysteme helfen, mit ihnen leichter zu operieren, als wenn sie in herkömmlicher Weise durch Grafen repräsentiert werden.

Solche Notationssysteme werden sowohl in der Fachwissenschaft selbst wie auch im Unterricht schon lange genutzt, um Situationen und Zusammenhänge zu kennzeichnen. Typische Beispiele sind Vektoren, Pfeile, Strahlen, Linien. Solche Notationen haben aber einen gravierenden Nachteil, sie sind statisch und Abläufe können nur durch einige ganz wenige Situationsbilder charakterisiert werden. Eine dynamische Entwicklung ist so nicht zu vermitteln. Außerdem beschreiben solche

Darstellungen eine vorliegende Situation im allgemeinen nur prototypisch und nicht den konkret vorliegenden Einzelfall in quantitativer Form.

Mit dem Rechner ist es nun unter Einsatz geeigneter Soft- und Hardware nicht nur möglich, einen realen Versuchsablauf messend zu erfassen und die für die Beschreibung relevanten Größen in Realzeit zu berechnen. Neben dem auf dem Bildschirm schematisch dargestellten Versuchsablauf können zusätzlich die relevanten Größen in geeigneter ikonischer Notation so mit dargestellt werden, daß grundlegende Zusammenhänge für den Lernenden unmittelbar erschließbar werden.

So können z. B. zur Charakterisierung der Bewegung eines Körpers, auf den eine rücktreibende Kraft proportional zur Auslenkung wirkt, wie auch zum Vertrautwerden mit dem Beschleunigungsbegriff nicht nur die Geschwindigkeit  $v$  im letzten gemessenen Zeitintervall am momentanen Ort des Körpers als Vektor eingezeichnet werden. Wird zusätzlich der ein Zeitintervall zurückliegende Geschwindigkeitsvektor  $v_{\text{alt}}$  mit eingezeichnet, wie es Abb. 1 zeigt, so wird die Veränderung und damit die Bedeutung des mit eingezeichneten Zusatzvektors  $dv$  sofort klar. Man kann dann verfolgen, wie sich diese einzelnen Größen verändern, auch, wenn sich z. B. die Richtung der Anfangsgeschwindigkeit umkehrt.

Gegenüber einer herkömmlichen Grafendarstellung haben solche ikonischen Darstellungen, die Animationselemente benutzen, um Größe und Zusammenhänge zu visualisieren, mehrere gewichtige Vorteile, wenn es darum geht, völlig neue Sachverhalte kennenzulernen.

- 1) Durch die Wahl einer geeigneten Notation können Sachverhalte und Beziehungen zwischen unterschiedlichen Größen fast intuitiv vermittelt werden, was mit den Grafen i. allg. nicht möglich ist. So erinnert der Geschwindigkeitsvektor durch seine Form an die Ortsverschiebung, über die er ermittelt wird und für deren Größen er - bezogen auf eine feste Zeiteinheit - auch stehen kann.

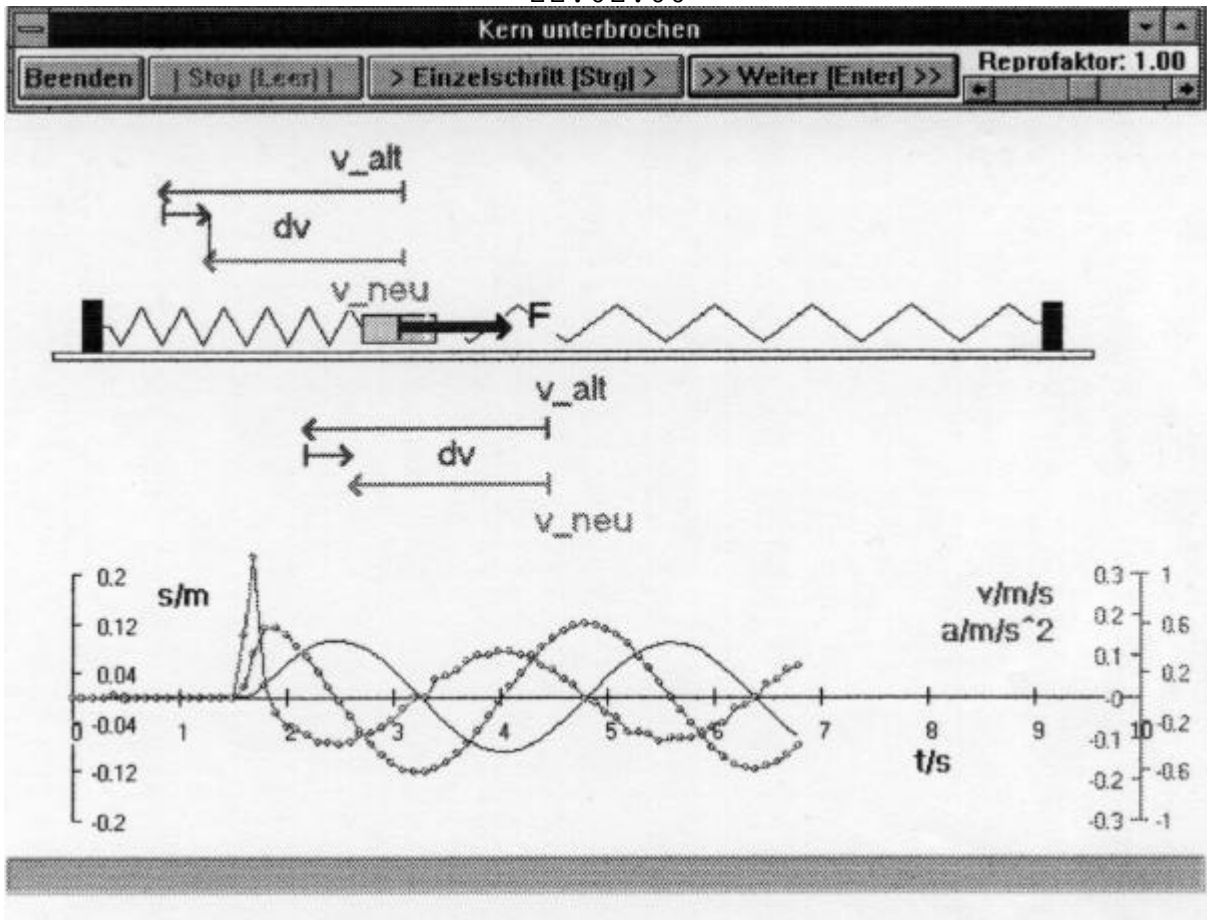


Abb. 1: Federschwingung an einer Luftkissenbahn

Parallel zum sich bewegenden Gleiter werden dargestellt die rücktreibende Kraft  $F$ , die Geschwindigkeiten  $v_{alt}$ ,  $v$  und  $v_{neu}$  und die Beschleunigung. Darunter sind die Graphen  $s(t)$ ,  $v(t)$  und  $a(t)$  gezeichnet.

Vorliegende Summenbildungen können so durch einfaches Hintereinanderlegen erkannt bzw. ausgeführt werden, was einem Hintereinanderausführen zweier Verschiebungsoperationen entspricht.

Der Grund für die größere Aussagekraft solcher Notation liegt offensichtlich darin, daß die Form ihrer Darstellung besser den zu vermittelnden Aussagen angepaßt ist und diese dadurch auch vom Lernenden leichter erfaßt werden, als wenn die abstraktere Form der Grafen gewählt wird.

- 2) Es wird ein zeitlicher Ablauf gezeigt und nicht, wie bei einer grafischen Darstellung, ein statisches Bild, das das Ergebnis wiedergibt und vom Lernenden erst in einen Ablauf zurücktransformiert werden muß.
- 3) Der Rechner erzeugt eine Bildsequenz, die den physikalischen Prozeß unter Einsatz der gewählten Notation strukturiert. Diese Bildsequenz, die die physikalische Struktur heraushebt, kann als Ablauf direkt den inneren Bildern zugeordnet werden, die sich der Lernende vom Versuchsablauf macht.

## 5. Wirkungszusammenhänge als Basis für qualitatives Verstehen

Experten lösen Aufgaben und Problemsituationen ganz anders als Novicen. Untersuchungen belegen, daß sie u. a. viel stärker auf qualitative Vorstellungen zurückgreifen als Lernende, die ein Sachgebiet noch nicht gut beherrschen, Larkin et. al. /1/. Da durch die Verbindung solcher qualitativer Vorstellungen untereinander neue Aussagen erschlossen werden können, ist ein solches qualitatives Schließen viel disponibler einzusetzen als ein isoliertes Faktenwissen.

Mit dem Rechner kann das Arbeiten mit qualitativen und halbquantitativen Argumentationen auf zwei ganz unterschiedliche Weisen unterstützt werden:

1. Rechnerunterstützte Versuche legen viele schnell durchzuführende Versuchsvariationen nahe. Mit Hilfe grafischer Darstellungen können darin funktionale Abhängigkeiten - sehr häufig Proportionalitäten - recht leicht erschlossen werden. Auf der Suche nach Erklärungen können dann Wirkungszusammenhänge hergestellt werden, indem bereits bekannte Sachverhalte herangezogen werden.
2. Die Modellierung physikalischer Vorgänge bietet dem Lernenden die Möglichkeit, Wirkungszusammenhänge systematisch zur Vorhersage von Abläufen einzusetzen. Beim Einsatz gleichungsorientierter Systeme steht der formelmäßig niedergelegte Algorithmus im Vordergrund. Über das dahinter stehende Wirkungsgeflecht muß der Benutzer mehr implizit verfügen. Hingegen haben Systeme mit einem Grafikeditor für den Benutzer den Vorteil, das Wirkungsgefüge sowohl in seinen einzelnen Abhängigkeiten als auch als Ganzes präsent zu machen. Dadurch kann der Lernende unmittelbar seine mentalen Vorstellungen in ein Modell umsetzen und diese dann prüfen, als wenn er Gleichungszusammenhänge erstellen und überblicken muß.

## 6. Mentale Modelle in experimentellen und realistischen Fragestellungen erproben

Eine große Schwierigkeit bei der Erarbeitung neuer, grundlegender Sachverhalte besteht im bisherigen Unterricht für den Schüler darin, daß er am Anfang im allgemeinen wenig Gelegenheit hat, die von ihm aufgebaute mentale Repräsentation so einzusetzen, daß er wichtige Vorstellungen und Grundannahmen erprobt und auf Grund dieser Erfahrungen evtl. auch verändern kann, E. Redish /2/. Besonders gravierend ist das, wenn der Schüler auf Grund seiner zahlreichen Alltagserfahrungen und typischer umgangssprachlicher Ausdrucksweisen solche Präkonzepte gebildet hat, die den zu vermittelnden Konzepten widersprechen. Bisherige Untersuchungen zu Schülervorstellungen zeigen, daß dies insb. für die Mechanik/Dynamik und einführende Sachverhalte zur Elektrik gilt. Um solchen Lernschwierigkeiten zu begegnen, müssen im Laufe des Lernwegs sicher die unterschiedlichen Konzepte thematisiert werden. Es kommt aber genauso darauf an, daß Schüler zu einem breiten Spektrum von Versuchssituationen zugehörige Versuchsaussagen kennenlernen und dabei ihre bisher

aufgebauten Repräsentationen gegebenenfalls auch im Vergleich zu alternativen Modellen erproben können, s. H. Mandl, H. Gruber, A. Renkl /3/. Ohne Rechneinsatz und ohne geeignete Software ist eine solche Unterrichtskonzeption nicht umsetzbar. Erst durch computerunterstützte Versuche, die didaktische Konzeptionen angemessen unterstützen, können wünschenswerte Versuchsvarianten unmittelbar durchgeführt und das Ergebnis als Grafen oder in Form dynamischer Physik-Repräsentation bereits während des Versuchs mit angezeigt werden. Mit solchen Versuchen werden dann folgende Ziele verfolgt:

1. Prüfen, wie adäquat Grundaussagen des eigenen mentalen Modells sind oder inwieweit sie eventuell infrage zu stellen sind.
2. Den Einsatz des mentalen Modells üben und durch Vorhersagen auf Fehler im Umgang aufmerksam werden.
3. Erweitern der Erfahrungen von Spezialfällen auf allgemeinere Situationen.

Ohne Rechneinsatz können im Physikunterricht Fragestellungen, die realistische Situationen betreffen, wie sie auch im Alltag anzutreffen sind, mit vertretbarem Zeitaufwand fast nur qualitativ analysiert werden. So entsteht bei Schülern häufig der Eindruck, die Schulphysik habe wenig mit der Realität zu tun. Das verstärkt bei Schülern die Tendenz, zum Erklären von Sachverhalten im Physikunterricht eine andere mentale Repräsentation einzusetzen bzw. aufzubauen, als zum Erklären von Alltagssituationen.

Mit dem Rechner und geeigneter Soft- und Hardware können hingegen viele realistische Situationen, wie sie auch im Alltag vorkommen, bearbeitet werden. Der Rechner wird dann als Werkzeug eingesetzt. Entweder können dann Abläufe experimentell mit geeigneten Sensoren schnell erfaßt und sofort analysiert werden oder mit Hilfe einer angemessenen Modellierung berechnet und vorhergesagt werden. In experimentell zugänglichen Situationen können dann grundlegende Gesetze wiedererkannt oder auch direkt erschlossen werden. In der mit Hilfe eines Algorithmus durchgeführten Modellierung, die den Ablauf schrittweise berechnet, können störende Einflüsse, wie z. B. Reibungskräfte, relativ leicht berücksichtigt werden. So ergeben sich realistische Abläufe, die zeigen können, wie angemessen die vorgenommene Modellierung ist.

## **7. Charakterisierung der Formen des Computereinsatzes**

Im folgenden soll ausgeführt werden, in wieweit bisher bei den typischen Formen des Computereinsatzes im Physikunterricht das dargelegte didaktische Potential aktiviert wird und wo weitere Möglichkeiten unbedingt genutzt werden sollten, Lernsituationen mit dem Rechner effizienter zu gestalten.

Dabei sollen folgende vier Formen des Computereinsatzes betrachtet werden:

1. Die Durchführung computerunterstützter Experimente, bei denen die Meßdatenerfassung über Sensoren erfolgt und ein eventueller Eingriff (Steuerung) in das Experiment über Aktoren. Häufig werden dabei auch einfache Meßdatenaufbereitungen mit zugehörigen grafischen Repräsentationen der Versuchsaussagen vorgenommen.
2. Die Modellierung physikalischer Vorgänge, bei denen der Benutzer Veränderungen eines Systems iterativ über kleine Schritte berechnen und darstellen kann. Dazu stellt er entweder Differenzgleichungen auf und arbeitet damit anstelle von Differentialgleichungen, die bei einer analytischen Lösung aufzustellen wären. Oder es steht ein Grafikeditor zur Verfügung, der sowohl das Beziehungsgefüge wie auch Änderungs- und Sammelgrößen durch festgelegte Notationen visualisiert.
3. Simulation physikalischer Vorgänge, in denen die Abläufe mit einem internen Modell berechnet und dargestellt werden, das dem Benutzer aber in seiner formalen Struktur nicht zugänglich ist. Da solche Programme für den Benutzer nicht offen sind, können auch sehr komplexe Situationen behandelt werden. Eingriffsmöglichkeiten beschränken sich damit im allgemeinen auf die Wahl von Anfangsbedingungen und das Auslösen vorgesehener Aktionen, die im Programm bereits fest eingeplant sind.
4. Kreieren einer 2-dim 'Welt' aus Standardobjekten am Bildschirm, deren physikalische Gesetze nach Art der Ausgestaltung z. T. frei wählbar sind und die nach diesen Gesetzen abläuft. Mit solchem Simulationsbaukasten können Vorgänge dann in unterschiedlichen Repräsentationen dargestellt werden.

Um das dargelegte didaktische Potential für diese vier Einsatzbereiche aufzuzeigen, soll im weiteren ausgeführt werden, wie durch die Form des Rechnereinsatzes Vorstellungen und Kenntnisse der Schüler beeinflußt werden können. Für die Argumentationen in den folgenden Abschnitten werden folgende Repräsentationsbereiche separat betrachtet:

1. Durch eigenes Handeln oder durch bildhafte Vermittlung erfahrene Abläufe, die zu (ersten) qualitativen Vorstellungen führen,
2. Vorstellungen, die zu grundlegenden strukturierenden Vorstellungen und Aussagen eines kennengelernten Sachbereichs führen,
3. quantitatives Erfassen und Verfügen über funktionale Abhängigkeiten physikalischer Größen zu einem Sachgebiet
4. Kennen, Anwenden physikalischer Gesetze und Definitionen
5. Verbinden von Abhängigkeiten und Gesetzen zu Wirkungsgefügen und neuen Gesetzen

Während die beiden ersten Bereiche qualitatives Aufnehmen und Verarbeiten betreffen, beziehen sich die folgenden Bereiche drei und vier auf quantitatives Vorgehen und der letzte auf übergeordnete Verknüpfungen, die sowohl qualitative wie quantitative Aspekte betreffen.

## 8. Computerunterstütztes Experimentieren

Computerunterstütztes Experimentieren ist im Physikunterricht die Form des Computereinsatzes, die der methodischen Grundintension des prototypischen Physikunterrichts wohl am meisten entspricht, nämlich aufgrund bisher gewonnener Vorstellungen durch geeignet konzipierte Experimente neue Aussagen zu erschließen oder vermutete Aussagen damit zu prüfen.

Schematisch kann man die vorliegende Situation durch Abb. 2 darstellen. Auf der linken Seite ist die durch Physik zu erschließende bzw. zu klärende Realität angeordnet und daneben der Rechner mit Hard-, Software und Interfaces; die rechte Seite stellt das Subjekt dar mit den oben aufgeführten Repräsentationsbereichen. In der Abb. 2 ist zum Thema: gleichmäßig beschleunigte Bewegung eine Standard-Vorgehensweise schematisch angedeutet: Der mit einem Sensor erfaßte Versuchsablauf wird im Rechner so aufbereitet, daß nach entsprechender Wahl der Grafendarstellungen funktionale Abhängigkeiten physikalischer Größen

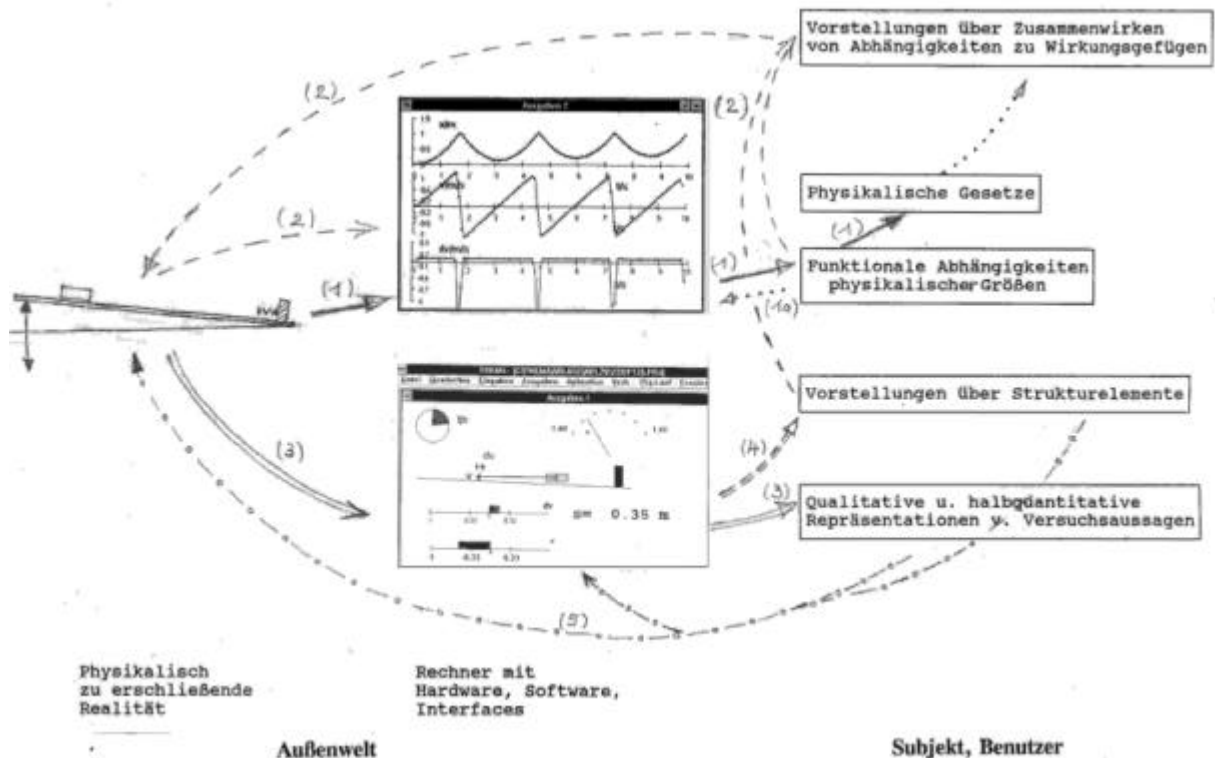


Abb. 2: Computerunterstützte Experimente können mit unterschiedlichen methodisch didaktischen Konzeptionen im Unterricht eingesetzt werden. Pfeile kennzeichnen im Text erklärte Beziehungsstänge zwischen zu erschließender Realität, Rechner und Lernendem.

Beziehungsnetz für *oberen* Bildschirm: Arbeiten mit Grafen

Beziehungsnetz für *unteren* Bildschirm: Arbeiten mit Momentansituationen und



(s. auch Punkt 3) vom Lernenden erschlossen werden können (schwarze durchgezogene Pfeile (1) in Abb. 2). Es bietet sich an, die erkannten Versuchsergebnisse mit bereits gebildeten Vorstellungen und Erfahrungen in Beziehung zu setzen und dies mit veränderten und erweiterten Versuchen zu überprüfen (schwarze gestrichelte Pfeile (2) in Abb. 2). Für das Beispiel der Bewegung an der schiefen Ebene könnte das nach einfachen Varianten die Bewegung entgegen der Neigungsrichtung sein. Im Unterricht scheinen solche Möglichkeiten der Erweiterung und Veränderung viel zu wenig genutzt zu werden. Bereits die Vorhersage eines Grafen z. B.  $a(t)$  aus  $v(t)$  in Abb. 2, wenn nur  $v(t)$  angezeigt wird, ist ein einfaches Beispiel für solche Rückkopplungsprozesse. Diese geben Möglichkeiten zur Bestätigung, Kontrolle oder Überdenken, in dem Beispiel sogar ohne das Experiment erneut einzubeziehen (schwarz punktierte Linie (1a)).

Ein ganz anderer Zugang ergibt sich, wenn man zur Repräsentation der Bewegung auf dem Bildschirm nicht primär Graphen benutzt. Denn Ungeübtere haben beim Lesen von Grafen durchaus Schwierigkeiten, wenn es darum geht, daraus entnommene Informationen mit anderen Informationen zu verarbeiten. So bietet sich zur Anzeige der Geschwindigkeit z. B. ein Zeigerinstrument oder eine Bandanzeige oder ein Vektor an. Hier ist die Bewegungsrichtung aus der Form der Darstellung direkter zu entnehmen als aus dem Graphen. Auf dem Bildschirm wird jetzt nur jeweils eine Augenblickssituation dargestellt, der Vorgang muß bewußt aufgenommen, sollte dann aber auch konkreter erinnert werden können, besonders wenn er in Einheit mit dem Realvorgang gesehen und erfaßt wird. Bei solchen Versuchen stehen qualitative Aussagen im Vordergrund, im Beispiel die gleichmäßige Zunahme der Geschwindigkeitsanzeige bzw. der Länge des Geschwindigkeitsvektors. Dieses Vorgehen ist schematisch angedeutet durch die grauen durchgezogenen Pfeile (3) in Abb. 2. Stellt man an dem bewegten Fahrbahnwagen zusätzlich zu dem  $v$ -Vektor den Geschwindigkeitsvektor  $v_{alt}$  dar, der um ein Zeitintervall gegenüber  $v$  zurückliegt, so kann nicht nur die Bedeutung von  $\Delta v$  als Änderungsvektor leicht erkannt werden sondern aus Versuchsvarianten auch der qualitative Zusammenhang von  $\Delta v$  mit der Fahrbahnneigung. Dadurch können wesentliche strukturierende Elemente eines Sachgebietes dem Lernenden deutlich werden, schematisch angedeutet durch die grauen gestrichelten Pfeile (4) in Abb. 2. Solche qualitativen Vorstellungen über Strukturelemente können dann eine entscheidende Hilfe oder sogar Voraussetzung dafür sein, funktionale Abhängigkeiten in ihrer Allgemeinheit, hier z. B. den Zusammenhang von Geschwindigkeit und Beschleunigung bei der Reflexion am Fahrbahnende, zu erfassen und sachgerecht deuten zu können. Wichtig dafür ist, auch hier die Versuchssituationen entsprechend den sich ergebenden Fragen zu verändern, s. Pfeil (5).

Typische Software zum computerunterstützten Experimentieren ist darauf angelegt, daß Standard-Versuchssituationen leicht erfaßt, und die direkt erfaßten Meßgrößen dargestellt werden können. Häufig sind aber in älterer Software physikalische Größen, die erst aus den Meßgrößen zu berechnen sind, nicht während des Programmlaufs mit darstellbar, sondern erst nachträglich über eine Tabellenkalkulation. Ein solches Vorgehen hat deutliche Nachteile, auch wenn dadurch die klassischen Teilschritte bei quantitativen Experimenten: Messen, Auswerten, grafisch Darstellen vom Benutzer bewußt nachvollzogen werden können. Wenn mehrere Versuchsvarianten durchzuführen

sind, kann es lästig sein, die notwendigen Zwischenschritte nicht überspringen zu können. Gravierender ist, daß der Schüler nicht parallel zum Versuch verfolgen kann, wie sich die Größe entwickelt, die erst nach dem Versuchsablauf dargestellt werden kann, besonders, wenn in das System während des Ablaufs eingegriffen wird. Außerdem erscheint die nachträglich ausgegebene Darstellung schlagartig als Bild und wird nicht mehr als Vorgang in der Zeit wiedergegeben. H. Brasell /4/ hat sogar in einer empirischen Studie aufgezeigt, daß beim computerunterstützten Experiment durch eine Zeitverzögerung von 20 - 30 s zwischen Experiment und Graphendarstellung (in der Arbeit für  $s(t)$  und  $v(t)$ ) der zusätzliche Lernerfolg, der sonst durch das Medium Computer erreicht wird, wieder verlorengeht.

In modernen Programmsystemen, wie sie jetzt zu WINDOWS erscheinen, kann der Benutzer die physikalische Größe, die er parallel zum Experiment aus den Meßgrößen berechnen will, sehr viel freier wählen, z. T. selbst definieren, ebenso kann er bestimmen, welche Größe er für eine grafische Darstellung wählen will. Andererseits sind solche Programme wiederum nicht so offen, daß der Benutzer seine physikalische Kernaussage im Programm frei gestalten könnte. Eine andere Einschränkung liegt häufig darin, daß die Anschlußmöglichkeiten für Sensoren nicht vielfältig genug sind. So fehlen z. B. fast immer Zählgänge für zwei Zählräder hoher Auflösung, um Stoßversuche messend zu erfassen oder mehr als drei oder 4 Spannungseingänge, um eine Kette elektrischer Meßpunkte, z. B. an einer Widerstandskette, erfassen zu können. Solche Einschränkungen können die Gestaltung und Durchführung von computerunterstützten Versuchen einengen, insb. bei nicht speziell vorgesehenen Versuchserweiterungen, s. schwarz gestrichelte Pfeile (2) in Abb. 2. Bisher scheint es aber so, daß selbst die vorhandenen Standardmöglichkeiten noch wenig genutzt werden, so daß auch die Einschränkungen bisher wenig als solche empfunden werden.

Beim Einsatz von Animationselementen für dynamische Physik-Repräsentationen liegt im Zusammenhang mit computerunterstützten Experimenten eine völlig andere Situation vor. Es gibt bisher nur das Win-PAKMA (Physik Aktiv, Messen, Modellieren, Analysieren, Animation ausführen) /5a/, mit dem zeitgleich zum Ablauf eines Realversuchs auf dem Bildschirm ein schematischer Ablauf dieses Versuchs gezeigt wird, der ergänzt wird durch Animationselemente, die wichtige Strukturaussagen zum Realversuch visualisieren. Die Animationselemente - es stehen Bitmaps, Linien, Rechtecke, Kreise, Federn, Vektoren, Breitpfeile und Uhren zur Verfügung - können mit einem Grafikeditor plziert werden. Sowohl ihre Bewegung wie ihre Form wird dadurch festgelegt, daß diese durch einen Dialog mit Größen im Kernprogramm gekoppelt werden. Dabei beschreibt das Kernprogramm die Meß- und Auswerteaufgaben und legt die Größen fest, die auf dem Bildschirm in irgendeiner Form ausgegeben werden sollen. Zusätzlich zur Bewegung können die Animationselemente zu bestimmten Zeiten auch in den Bildhintergrund gestempelt werden, so daß ein Stroboskop-Effekt eintritt. Kurz vorgestellt wird das Konzept der Animationselemente in einem separaten Beitrag in diesem Heft, D. Heuer /5/.

Bisher gab es solche Animationselemente zur Gestaltung dynamischer Physik-Repräsentationen für Simulationen, nämlich in dem Simulationsbaukasten 'Interactive Physics' /6/ (s. Abschnitt 11) und in der Simulations-Software 'Explorer' /7/, und in beiden auch nur ansatzweise. Denn in der Interactive

Physics können nur einige Standardgrößen durch Animationselemente repräsentiert werden, während beim Explorer die Gestaltung für den Benutzer schon weitgehend festgelegt ist. Für den Lernenden ist es aber wichtig, seine Vorstellungen zu physikalischen Vorgängen an realen Versuchsabläufen zu bilden, zu prüfen und evtl. zu korrigieren. Denn sonst fehlt es den gebildeten mentalen Modellen leicht an Realitätsbezug. Dann ist die Gefahr groß, nicht zwischen realer und virtueller Welt unterscheiden zu können, da der Übergang am Bildschirm ganz fließend sein kann.

## 9. Modellierung physikalischer Vorgänge

Bevor Rechner im Physikunterricht eingesetzt werden konnten, ließen sich physikalische Systeme dort nur in Ausnahmefällen durch mathematische Modelle angemessen quantitativ so beschreiben, daß daraus ihre zeitlichen Abläufe zu entnehmen waren. Als Folge davon wurden physikalische Gesetzmäßigkeiten auch nur an möglichst einfach beschreibbaren Einsatzsituationen geprüft.

Werden Modellierungen mit Computereinsatz durchgeführt, so hat das für die Schüler, die solche Modellierungen aufstellen, drei bedeutsame Vorteile:

1. Durch die iterative Berechnung der Veränderungen sind sie als Modell-'Konstrukteure' stark involviert, ihre physikalischen Vorstellungen über grundlegende Zusammenhänge und Definitionen zu aktivieren und schrittweise zu einer Wirkungsabfolge zusammenzufügen. Wenn hingegen eine Gleichung aufzustellen wäre, die inhaltlich viel kompakter ist, - im allgemeinen eine Differentialgleichung - ist die Versuchung groß, einfach deklaratives Formelwissen zusammenzubinden, ohne sich die damit verbundenen physikalischen Vorgänge zu vergegenwärtigen.
2. Ein Ansatz kann mit einem Programmlauf sofort erprobt werden. Das ist eine grundlegend neue Lernsituation beim Erproben eigener Ideen: Der Lernende erhält mit dem Programmlauf sofort eine Rückmeldung, die ihn entweder bestätigt, wenn das erhaltene Ergebnis seinen Erwartungen entspricht, oder herausfordert, darüber nachzudenken, warum ihn seine Vorstellungen zu einer anderen Vorhersage geführt haben. Bei einem Vorgehen ohne Rechner wäre eine 'geschlossene' analytische Lösung zu suchen. Das stellt aber eine eigenständige, neue Problemsituation dar, die außerdem für die Schüler nur in Ausnahmefällen lösbar ist.
3. Modellierungen sind nicht auf idealisierte Systeme beschränkt. Es kann sehr einfach zu realistischen Systemen übergegangen werden, z. B. zu Systemen mit Reibung.

Stellt man diese Lernsituation wiederum schematisch durch Realität und Rechner auf der einen Seite und Subjekt bzw. Benutzer auf der anderen Seite dar, s. Abb. 3, so ist der Vorgang der Modellierung die Beschreibung eines Vorgangs - i. allg. aus der Realität - durch physikalische Gesetze, deren Ergebnis der Rechner im allg. in Graphen ausgibt, s. die gestrichelte (1) und durchgezogene schwarze Linie (2) in Abb. 3. Die wichtigsten Voraussetzungen, um eine Modellierung aufstellen zu können, sind daher

1. Analyse des Vorgangs,
2. Kenntnis der Gesetze, die den zu modellierenden Vorgang bestimmen.

Die Modellierung ist dann die Synthese dieser Elemente, die zu dem aufzustellenden Algorithmus führt, der den Vorgang beschreibt.

Die Analyse des Wirkungszusammenhangs kann deutlich erleichtert werden, wenn die Wirkungszusammenhänge grafisch entworfen werden, so daß ein grafisches Wirkungsgefüge oder Netzwerk entsteht. Denn dann sind zuerst qualitative Vorstellungen zu aktivieren, ehe sie später quantitativ durch Formeln zu spezifizieren sind. Wenn der Entwurf solch eines Wirkungsgefüges nicht mit Papier und Bleistift sondern mit einer geeigneten Software z. B. Stella /8/ oder Dynasys /9/ für Windows oder MODUS /10/ unter DOS vorgenommen wird, kann nicht nur die Abfrage nach den Quantifizierungs- und Startbedingungen automatisiert werden, auch der Schritt der Synthese zu einem vom Rechner abzuarbeitenden Algorithmus kann dem Benutzer weitgehend abgenommen werden. Dadurch können die physikalischen Zusammenhänge für den Benutzer noch stärker in den Vordergrund treten. Dieses Vorgehen ist durch die grauen Pfeile (3) und (4) in Abb. 3 angedeutet. Für die Schüler scheinen allerdings die für die Beschreibung der Wirkungszusammenhänge verwendeten Begriffe der Zustandsgrößen und Änderungsraten und die dafür eingesetzte Symbolik einige Anfangsschwierigkeiten zu bereiten, s. H. Schecker, Th. Bethge, H. Niedderer /11/. Viele unterrichtsrelevante Beispiele für Modellierungen im Physikunterricht sind von P. Goldkuhle /12/ zusammengestellt.

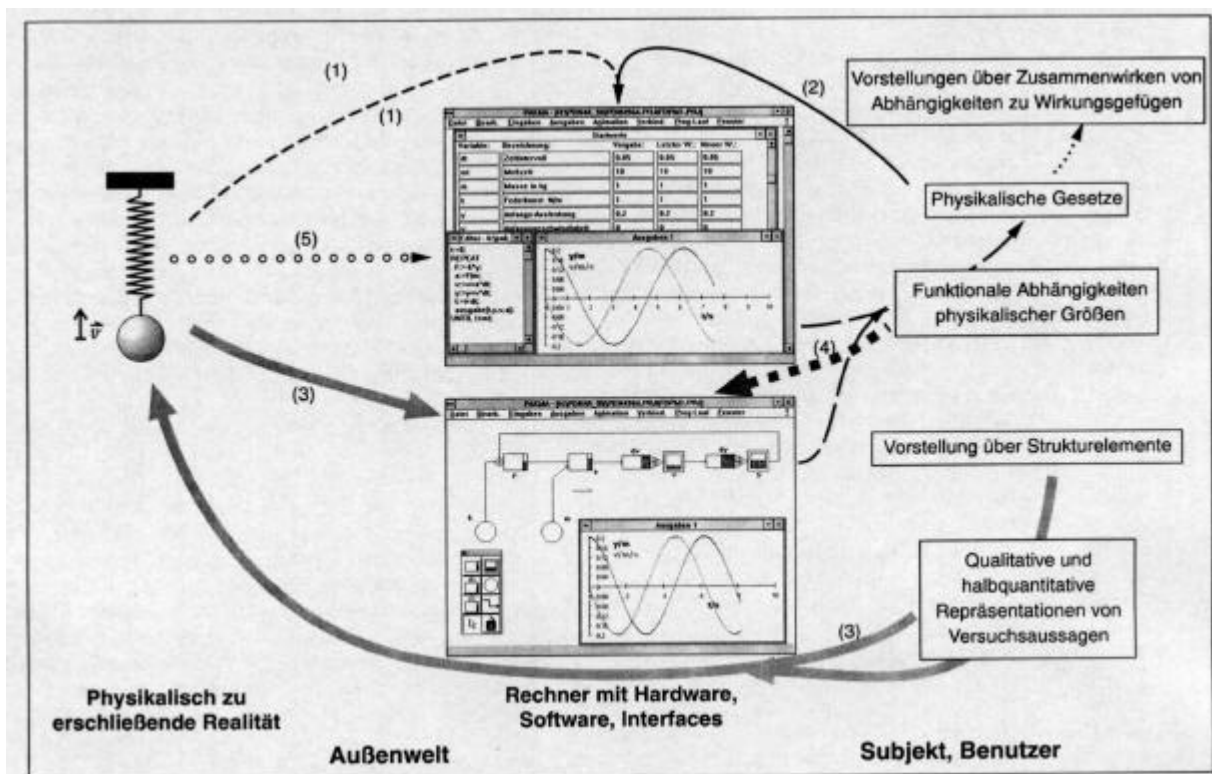


Abb. 3: Für die Modellierung als Form des Computereinsatzes werden entsprechend Abb. 2 wichtige Beziehungsstränge aufgezeigt.

Beziehungsnetz für *oberen* Bildschirm: Arbeiten mit Gleichungsorientiertem System

Beziehungsnetz für *unteren* Bildschirm: Arbeiten mit grafischem Editor

Wenn man die Modellierung eines physikalischen Vorgangs z. B. einer Federpendelschwingung durchgeführt, also die Pfeile (1) und (2) bzw. (3) und (4) in Abb. 3 durchlaufen hat, liegt die Frage

nahe, in wie weit nun das Ergebnis der Modellierung der Realität entspricht. Alle gängigen Modellbildungssysteme geben hier keine weitere Antwort. Der gepunktete Pfeil (5) in Abb. 5 ist mit ihnen nicht gangbar. Man kann dann nur auf Software zum computerunterstützten Experimentieren ausweichen, s. Abb. 2, und entweder simpel die entstandenen Graphen nacheinander auf dem Bildschirm vergleichen oder, was angemessener ist, durch Exportieren der Meß- und Modelldaten beide in einer Grafik darstellen. Die bisher einzige Ausnahme, mit der dann der Pfeil (5) aus Abb. 3 doch realisiert werden kann, stellt das PAKMA für Windows dar. Mit ihm können beide Vorgänge, das Messen wie das Modellieren, gleichzeitig in Realzeit vorgenommen werden, da beide in der gleichen Systemsoftware ablaufen.

Dieser Vergleich ist besonders dann interessant, wenn während des Versuchsablaufs noch fortlaufend in das System eingegriffen wird. Dann kann man 'life' verfolgen, inwieweit die Entwicklung des Modells mit dem Realablauf übereinstimmt, wenn zu einem frei wählbaren Zeitpunkt die Anfangsbedingungen übernommen werden und sonst im Modell nur die Fremdeinwirkung berücksichtigt wird. Interessante Beispiele dafür sind eine Federpendelschwingung, die durch Bewegen des Aufhängepunktes fremderregt wird, s. W. Reusch, D. Heuer /13/, oder die Ladevorgänge am Kondensator bei wechselnder Betriebsspannung, s. D. Heuer /14/.

In dem bisher einzigen Modellversuch mit wissenschaftlicher Begleitung zum Computereinsatz in Deutschland, der von H. Niedderer, H. Schecker und Th. Bethge durchgeführt wurde, stand die Modellbildung im Mittelpunkt. Der Abschlußbericht Bd. I - IV /15/, /16/, /17/, /10/ gibt viele Informationen von Konzeptionen bis zu detailliert wiedergegebenen Unterrichtserfahrungen reichen.

## 10. Simulationen

Während der Benutzer beim Einsatz von Modellbildungssystemen das Modell als Algorithmus oder in Form eines Wirkungsgefüges entwirft, verändert oder erweitert, entfällt bei Simulationsprogrammen diese tiefreichende Gestaltungsmöglichkeit. Sie ist dem Benutzer vom Programmautor abgenommen, mit allen Vor- und Nachteilen, die damit verbunden sind. Simulationsprogramme können daher Aussagen zu physikalischen Sachverhalten in unterschiedlichen Formen, von filmhaften Darstellungen über piktogrammartige und ikonische Repräsentationen bis hin zu den üblichen Graphen, darstellen, ohne daß der Benutzer schon Vorkenntnisse darüber haben muß. Der Informationsfluß läuft, wie es die Pfeile (1) und (1') in Abb. 4 zeigen, primär vom Simulationsprogramm zum Benutzer, ohne daß dieser vorher selbst aktiv werden müßte. So kann in dieser Phase schwerpunktmäßig deklaratives Wissen über makroskopische Vorgänge oder mikroskopische Modelle vermittelt werden.

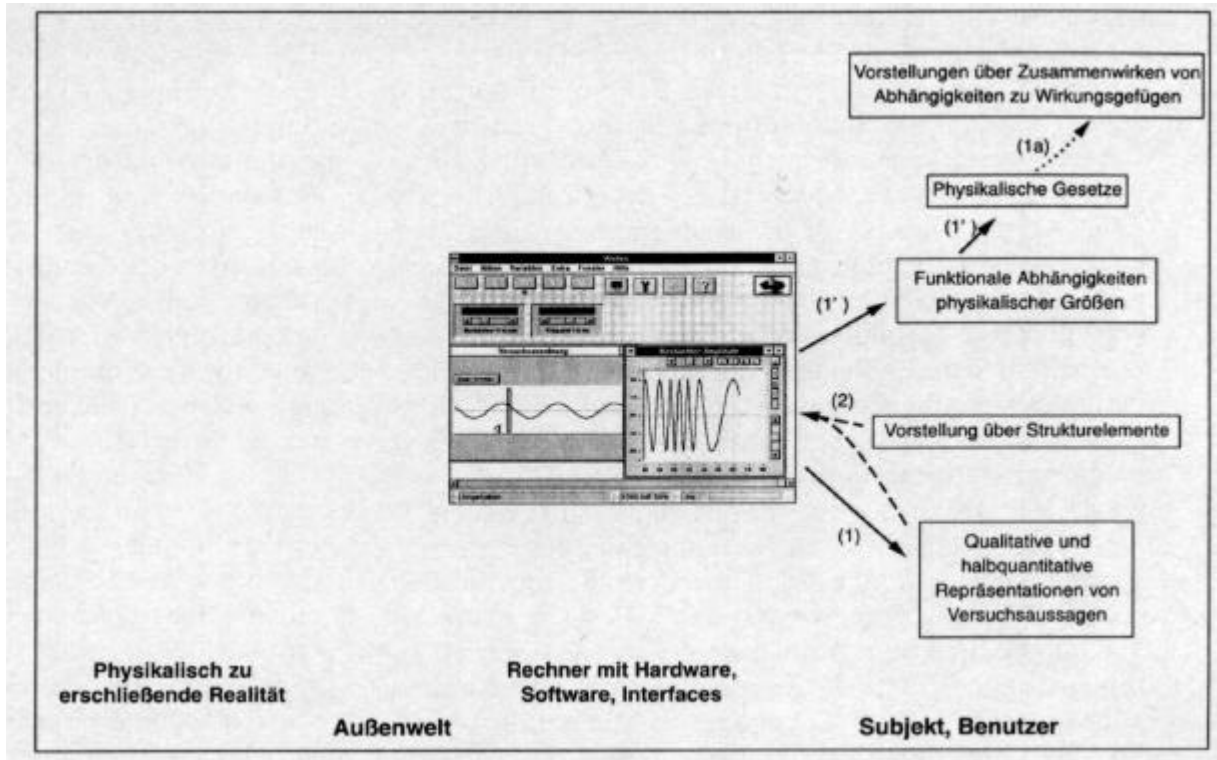


Abb. 4: Für die Simulation als Form des Computereinsatzes sind die im Abschnitt 10 aufgezeigten Beziehungsstränge angegeben.

Durch die Wahl anderer Parameter kann der Benutzer im allg. auf die Simulation in einem eng umrissenen Rahmen einwirken und auch weitere, zusätzliche Informationen erhalten, angedeutet durch den punktierten Pfeil (2) in Abb. 4. Dies ist für das Kennenlernen eines neuen Sachgebietes unbedingt notwendig, um aus einer Anzahl auch gerade unterschiedlicher 'Erfahrungen' Ansätze zu Vorstellungen zu bilden. Allerdings muß man im Auge haben, daß beim Arbeiten mit Simulationsprogrammen die dabei neu aufgebauten mentalen Modelle nicht in direkter Verbindung zur Realität gewonnen werden. In neuen Simulationsprogrammen unter Windows, z. B. 'Albert' /18/, können als zusätzlicher Schritt, der ein aktives Verarbeiten unterstützt, unterschiedliche grafische Darstellungen gewählt werden, wobei auch neue Variable aus den bereits vorgegebenen gebildet werden können. Dadurch können Benutzer dann Vorkenntnisse gezielt einbringen, um mit Hilfe des Programms Antworten auf von ihnen gestellte Fragen zu bekommen, die helfen können, ihre Kenntnisse und Vorstellungen besser auszuschärfen und zu vernetzen.

Der Einsatz von Simulationsprogrammen entspricht im Grundansatz einem informierenden und darbietenden Unterricht. Gegenüber konventionellem Unterricht bietet ein Unterricht mit Simulationsprogrammen dem Schüler trotzdem neue Lernmöglichkeiten:

1. Eine dynamische Visualisierung von Sachverhalten kann strukturelle Zusammenhänge durch Wahl geeigneter Repräsentationsformen aufzeigen und herausheben.

2. Durch interaktives Arbeiten mit der Software können Sachverhalte vertieft und auftretende Fragen evtl. auch geklärt werden, soweit das Programm das zuläßt.
3. Eine Individualisierung von Lernprozessen in Kleingruppen oder Einzelarbeit bietet sich an.

Während bei einer Modellbildung die Aufgabe für den Lernenden darin besteht, die innere Struktur des betrachteten Systems zu klären, liegt der Schwerpunkt bei der Simulation darauf, 'Oberflächen'-Eigenschaften eines dargestellten Systems auf empirischem Wege zu erschließen. Simulation und Modellbildung sind dafür mit gänzlich anderer didaktischer Zielsetzung einzusetzen. Nur da, wo es nicht mit vertretbarem Aufwand möglich ist, Eigenschaften eines Systems an der Realität hinreichend deutlich aufzeigen zu können, und wo die inneren Strukturen wegen ihrer Komplexität nicht induktiv erschlossen werden sollen, ist der unterrichtliche Einsatz von Simulationen gerechtfertigt.

Eine Erweiterung von Simulationsprogrammen zu tutoriellen Systemen ist technisch naheliegend, und besonders in Verbindung mit Multi-Media-Möglichkeiten kann sie als ein attraktives Neuland erscheinen. Heute weiß man zwar einiges über typische Lernschwierigkeiten eines Sachgebiets es fehlen aber sehr weitgehend Kenntnisse, durch welche gezielten Maßnahmen diese Schwierigkeiten angemessen abgebaut werden können. Daher kann man bisher nur einen solchen interaktiven Einsatz tutorieller Software pädagogisch rechtfertigen, der immer wieder unterbrochen wird von Phasen intersubjektiver Aufarbeitung, in denen aufgetretene Fragen und Probleme besonders in Unterrichtsgesprächen zu erörtern und zu klären sind.

## **11. Kreieren und Erproben einer 2-dim Welt am Bildschirm: Virtuelle Experimente**

Wie man ein Experiment nach eigenen Vorstellungen aus Objekten und Versuchsgeräten zusammenbaut und startet, um den Ablauf zu beobachten und zu erfassen, kann man eine entsprechende Anordnung auch am Bildschirm in einer 2-dim Welt aus Objekten frei zusammenstellen. Mit einem geeigneten Programm im Hintergrund ist es dann denkbar, daß sich die zu beobachtenden Objekte auf dem Bildschirm genauso bewegen wie in der Realität. Eine solche Systemsoftware gibt es für das Sachgebiet der Mechanik seit längerem für den Macintosh und seit ca. zwei Jahren auch für den PC unter Windows. Die Interactive Physics ist im Grunde natürlich auch ein Simulationsprogramm. Es hebt sich aber durch zwei Eigenschaften aus der großen Anzahl anderer Simulationsprogramme heraus

1. Die Gestaltungsmöglichkeiten für die Versuchssituation, die beobachtet und analysiert werden soll, ist so vielfältig, daß ihre Grenzen für den Benutzer wenig bewußt werden. Fast alles Denkbare scheint auch umsetzbar.
2. Die Ausgangskonstellation wird wesentlich durch Aufruf und Plazieren von Objekten mit der Maus erreicht. Das ähnelt ganz dem Aufbau eines Realversuchs, bei dem auch Objekte auszuwählen und zu arrangieren sind. Es ist sogar noch einfacher, da es der Vorstufe des Aufbaus entspricht, dem Zeichnen einer Versuchsskizze für den Realversuch.

Dies rechtfertigt es, hier von einem besonderen Typ von Software zu sprechen, mit dem eine 2-dim. Welt am Bildschirm erprobt werden kann. Im Gegensatz zu Realexperimenten, die als computer-

unterstützte Experimente durchgeführt werden, kann man hier von *virtuellen* Experimenten sprechen, da der Benutzer diese nur am Bildschirm konzipiert und sie dort auch ablaufen läßt.

Obwohl virtuelle Experimente im Grunde Simulationen sind, hat ihr Einsatz im Unterricht mehr Ähnlichkeiten mit dem Einsatz von computerunterstützten Experimenten als mit dem von Simulationen. Das liegt daran, daß das virtuelle Experiment, ähnlich wie das Realexperiment zuerst konzipiert werden muß, bevor es gestartet werden kann, d. h. es müssen Fragen gestellt werden, s. Pfeil (1) in Abb. 5, zu denen das virtuelle Experiment Aussagen machen soll, s. Pfeil (2) und (2'). Bei der Simulation verläuft hingegen der erste Informationsfluß in umgekehrter Richtung, s. Pfeil (1) in Abb. 4, denn mit dem Start der Simulation werden zuerst Sachverhalte vorgestellt.

Um virtuelle Experimente mit dem Rechner durchzuführen, sind keine realen experimentellen Versuchsaufbauten nötig. Darin kann man einen großen Vorteil sehen, denn alles, was den eigenen Intensionen entspricht, kann man - zumindest im Prinzip - auch ausführen, unabhängig vom sonst notwendigen Experimentier-Material und den Fähigkeiten, damit sachgerecht umzugehen. Das kann eine verlockende Vorstellung für Schülerversuche im Physikunterricht sein. So können die Erfahrungen durch den Einsatz virtueller Experimente schnell erweitert werden, ohne daß der Lehrer mit den Tücken von Experimenten, insb. bei Schüler-Experimenten, zu kämpfen hat.

Mit solchem Vorgehen können aber auch Schwierigkeiten verbunden sein. So kann z. B. die Einordnung und Zuordnung von Neuem Schwierigkeiten machen, wenn Schüler, beeindruckt von den offenen Möglichkeiten, zu sprunghaft vorgehen und oberflächlich 'schöne' Effekte suchen. Gravierender ist es, wenn durch das fehlende Realexperiment der Bezug zur Wirklichkeit abgebaut wird. So ist die Frage berechtigt: Sieht der Schüler das, was auf dem Bildschirm zu sehen ist, noch als Bild der Wirklichkeit an? Hier können Schülermeinungen schnell so weit gehen, alles für nicht gegeben anzunehmen, was den eigenen Vorstellungen zuwider läuft. Im Zweifelsfall, so zeigen Unterrichtserfahrungen immer wieder, messen in solchen Fällen dann sogar Rechner und Meßinstrument nach Meinung der Schüler falsch, weil sie eben defekt sind. In solchen Fällen können virtuelle Experimente sicher keine 'Beweiskraft' beanspruchen. Nur real durchgeführte Experimente können dann noch helfen, den Schüler von anderen Ansichten zu überzeugen, indem Schlupflöcher in den Argumentationen der Schüler durch variierte Experimente immer wieder neu gestopft werden können.



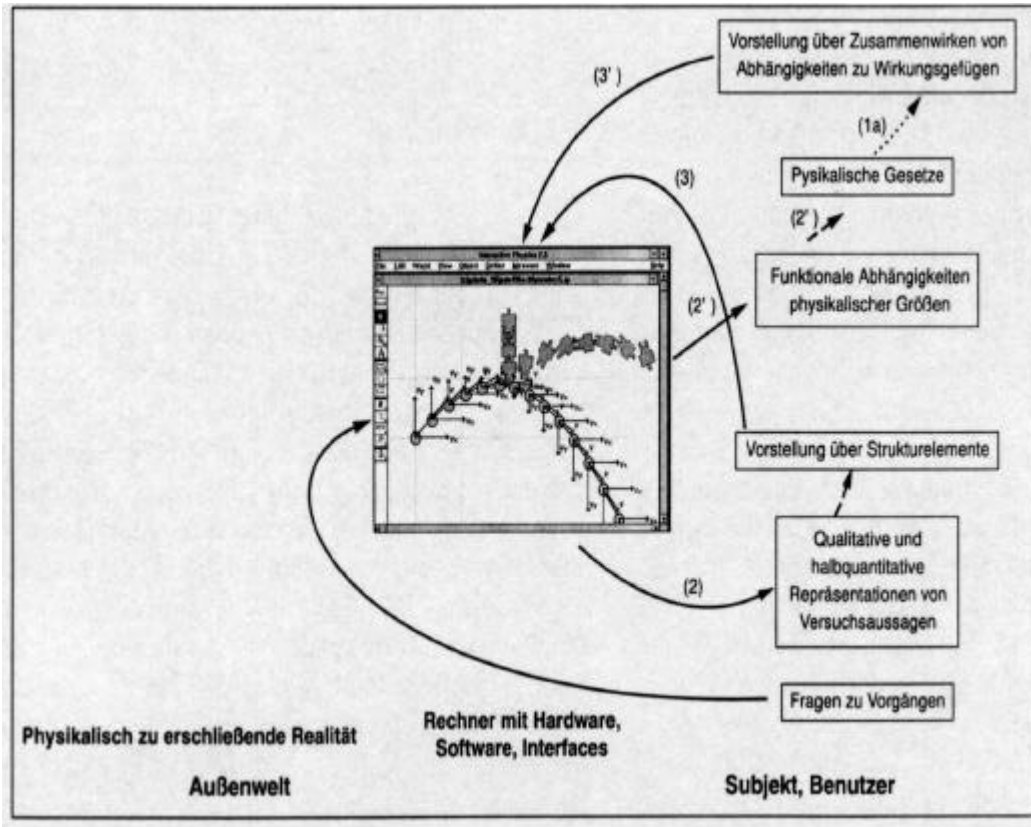


Abb. 5: Für die virtuellen Experimente als Form des Computereinsatzes sind die in Abschnitt 11 aufgezeigten Beziehungsstränge aufgezeichnet.

Da sich im Ablauf der virtuellen Experimente die Gesetze der Physik widerspiegeln, können mit virtuellen Experimenten auch die Konsequenzen veränderter physikalischer Gesetzmäßigkeiten leicht aufgezeigt werden, s. Pfeil (3) und (3'). So können im 'Interactive Physics' nicht nur Konstanten verändert werden wie Reibungszahlen, Erdbeschleunigung oder Gravitationskonstante; es können z. B. auch unterschiedliche Reibungsgesetze gewählt werden, von konstanter Reibung, über geschwindigkeitsproportionale Reibung zu Reibung  $\sim v^2$ . Mit solchen virtuellen Experimenten am Bildschirm lassen sich auch die Aussagen computerunterstützter Real-Experimente so erweitern, daß dadurch wichtige Unterschiede deutlicher werden. Natürlich können solche Aussagen auch durch Modellierungen oder Simulationen aufgezeigt werden: Die virtuellen Experimente bieten sich hier aber als direkte Extrapolation der Realexperimente besonders an.

Wenn man die möglichen Schwierigkeiten beim Einsatz virtueller Experimente bedenkt, so ist klar, diese Schwierigkeiten ergeben sich im wesentlichen aus der fehlenden Verankerung dieser Experimente in der Realität. Daher wird die didaktische Funktion virtueller Experimente nicht schwerpunktmäßig darin liegen, Grundlagen für neue Phänomenbereiche zu erschließen. Vielmehr wird die Erweiterung und Vertiefung von Erkenntnissen im Vordergrund stehen, die an Realexperimenten gewonnen wurden. So ist die Domäne didaktisch sinnvoll eingesetzter virtueller Experimente der

Bereich der Anwendungs- und Transfersituationen, die auf diese Weise leicht in Einzel- und Gruppenarbeit angegangen werden können.

## 12. Zusammenfassender Vergleich der vorgestellten vier Formen des Computereinsatzes

Anhand der schematischen Darstellung in Abb. 6 sollen die vorgestellten vier Formen des Computereinsatzes im Physikunterricht abschließend kurz verglichen werden. Ziel des Physikunterrichts ist es, daß der Schüler ein mentales Modell entwickelt, mit dem er physikalische Vorgänge angemessen erfassen, beschreiben und deuten kann. Basis für den Aufbau dieses mentalen Modells sind allgemeine Vorstellungen und Erfahrungen aber auch gezielt ausgeführte Experimente, s. Doppelpfeil (1') in Abb. 6. Wie in Abschnitt 8 ausgeführt, können computerunterstützte Experimente die zugrundeliegenden strukturellen Aussagen besonders präsent machen. Der Doppelpfeil (1) zwischen computerunterstützten Experimenten und mentalen Modellen soll verdeutlichen, daß sich der Auf- und Ausbau des mentalen Modells durch Wechselwirkung mit Experimenten vollzieht.

Viele deduktive Konsequenzen, die aus Vorstellungen des mentalen Modells des Lernenden zu ziehen sind, ließen sich im Physikunterricht bisher nicht nachvollziehen, obwohl alle einzelnen Schritte einfach und elementar waren; sie hätten immens viel Rechenarbeit erfordert. Durch den Einsatz des Rechners eröffnet sich für die Modellierung eines Vorgangs ein neuer Weg. Das

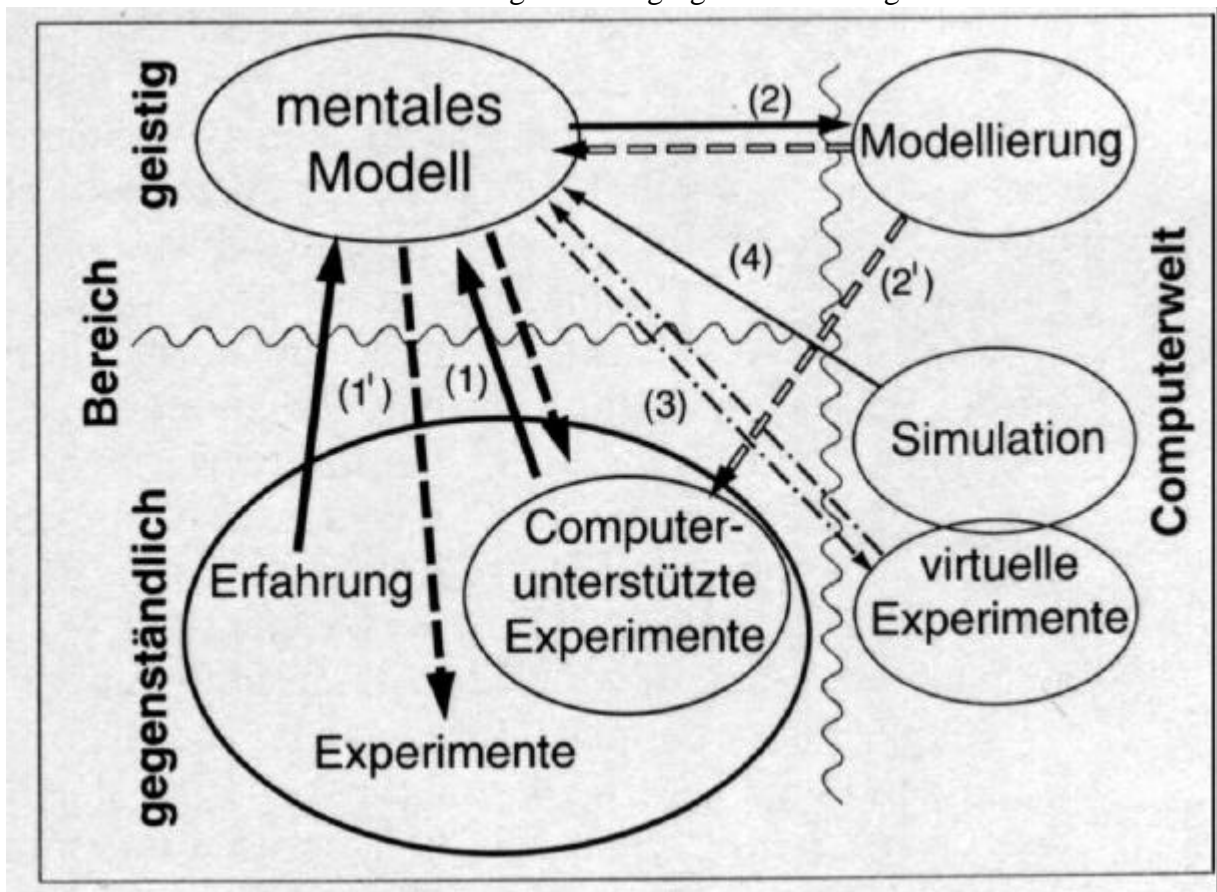


Abb. 6: Darstellung, in der für die vier vorgestellten Formen des Computereinsatzes die jeweiligen Beziehungsstränge zur Realität und zum mentalen Modell des Lernenden schematisch wiedergegeben werden, nämlich

- (1) für computerunterstützte Experimente,
- (2) für Modellierung,
- (3) für Simulation,
- (4) für virtuelle Experimente

grundsätzliche Lösen des Problems, nämlich das Aufschreiben eines Algorithmus, wird von der Rechenarbeit getrennt, die der Rechner automatisch ausführt. Damit ist das mentale Modell in einen neuen Rückwirkungskreis einbezogen, s. Doppelpfeil (2), mit dem das bisher gebildete mentale Modell getestet und korrigiert werden kann. Noch aussagekräftiger sind solche Tests, wenn computerunterstützte Experimente in diesen Regelkreis über (2a) und (1) mit einbezogen werden.

Virtuelle Experimente am Bildschirm kann man als rekonstruierte Spiegelbilder computerunterstützter Experimente ansehen - angedeutet durch die punktierte Beziehungslinie (5) - wobei durch die Rekonstruktion aus verschiedenen Gründen bewußt oder auch unbewußt Veränderungen vorgenommen sein können. Dadurch fehlt dieser Form von Computereinsätzen die Authentizität realer Experimente. So ist ihre Stärke, ohne Experimentiergeräte frei zu planende Versuchssituationen, die auf den Bildschirm zu arrangieren sind, ablaufen lassen und verändern zu können (s. Doppelpfeil 3), gleichzeitig ihre Schwäche. Sie können daher nur zur Ergänzung von Realexperimenten dienen, mit dem didaktischen Vorteil, daß sie sich besonders für die Einzel- und Gruppenarbeit anbieten.

Die älteste und bisher wohl auch die verbreitetste Form des Computereinsatzes im Physikunterricht sind Simulationen. Sie können den Physikunterricht durch Repräsentationsformen bereichern, die sonst nicht zur Verfügung stehen, und durch die Möglichkeit interaktiv mit der Software umgehen zu können. Durch den in eine Richtung verlaufenden Pfeil (4) wird allerdings angedeutet, daß hier für den Lernenden das Sammeln von Informationen im Vordergrund steht. Denn bisher gibt es nur recht begrenzte Möglichkeiten, auf Simulationen einzuwirken und sie so zu verändern, daß es zu einer Rückwirkungsschleife wie in (1) bzw. (1'), (2) und (3) kommen kann und damit zu einem konstruktiven Physik-Verstehen. Daher stellen Simulationen didaktisch die konservativste Form des Computereinsatzes dar. Denn durch den Einsatz von Simulationen werden die neuen didaktischen Möglichkeiten, insb. das Erproben eigener mentaler Modelle, im Vergleich zu den drei anderen vorgestellten Formen am wenigsten erschlossen. Andererseits stellen virtuelle Experimente, Modellierungen und computerunterstützte Experimente die bei weitem größere Herausforderung an den Lehrer dar. Hier bieten neue, insbesondere auch offenere, Unterrichtskonzeptionen eine Chance, Lernen als Konstruktion eigener mentaler Modelle stärker zu fördern als es konventioneller Unterricht vermag.

**Literatur:**

- /1/ Larkin, J. H., McDermott, J., Simon, D. P. & Simon, H. A. Models of Competence in solving physics problems. Cognitive Science, 4, 317-345, (1980).
- /2/ E. Redish: Implications of cognitive studies for teaching physics; Am J Phys. 62, S. 796 ff '94
- /3/ H. Mandl, H. Gruber, A. Renkl: Lernen im Physikunterricht - Brückenschlag zwischen wissenschaftlicher Theorie und menschlichen Erfahrungen, in DPG Fachverband Didaktik der Physik [Hrsg.] Didaktik der Physik, Vorträge Frühjahrstagung 1993, Esslingen; Verlag DPG, Bad Honnef 1993,
- /4/ Brasell H.: The effect of realtime laboratory graphing on learning graphic representations of distance and velocity. In Journal of Research in Science Teaching 24 (4), S. 385-395, (1987).
- /5/ D. Heuer, Dynamische Physik-Repräsentation - Hilfe zum Physik-Verstehen PdN, 45 Heft 4, '95 (Beitrag in diesem Heft)
- /5a/ Win-PAKMA wird unter der Projektleitung des Lehrstuhls für Didaktik der Physik, Uni Würzburg, konzipiert, erstellt und erprobt; am Projekt beteiligt sind weiterhin die Bereiche Informatik II, Uni Würzburg; Technische Informatik, Uni Erlangen und Didaktik Physik, Uni Leipzig
- /6/ Interactive Physics V. 2.5; Knowledge Revolution, San Mateo, CA 94402, USA
- /7/ Explorer Physik  
Physikalische Lern- und Simulationswerkstatt, diverse Module; Autoren: Dov Levin et. al; Comet-Verlag
- /8/ Stella 2.0 - Software for Education, Dartmouth, NH: High Performance Systems
- /9/ Dynasys, Autor: W. Hupfeld, Bankenheide 2, 59065 Hamm
- /10/ Modus  
Grafisch interaktives Modellbildungssystem, Autoren: W. Walser, J. Wedekind; Comet-Verlag
- /11/ H. Schecker, T. Bethge, H. Niedderer: Ergebnisse der wissenschaftlichen Begleitung des Modellversuchs CPU. Abschlußbericht Bd. IV, Universität Bremen, Institut für Didaktik der Physik 1992.

- /12/ P. Goldkuhle: Modellbildung und Simulation im Physikunterricht. Landesinstitut für Schule und Weiterbildung (Hrsg.): Soester Verlagskontor 1993, ISBN 3-8165-1756-0.
  
- /13/ W. Reusch, D. Heuer: Harmonische Federschwingung - exakter Realzeitvergleich: Experiment-Modell. Erscheint in PdN 45 Heft 2, '96.
  
- /14/ D. Heuer: Ladungsvorgänge am Kondenstor. Messungen und Modellierung mit computergestütztem Schüler- bzw. Praktikumsversuch. PdN-Ph. 43, Heft 3, S. 410, 1994.
  
- /15/ H. Niedderer, T. Bethge, H. Schecker: Didaktische Rahmenkonzeption. Abschlußbericht Bd. I, Universität Bremen Institut für Didaktik der Physik 1991.
  
- /16/ Th. Bethge, H. Schecker: Materialien zur Modellbildung und Simulation im Physikunterricht. Universität Bremen, Fachbereich Physik/Elektrotechnik, Institut für Didaktik der Physik 1992. ISBN: 3-88722-258-X
  
- /17/ H. Schecker, (Hrsg.) Th. Bethge, (Hrsg.) R. v. Dwingelo-Lütten, (Hrsg.) H. Weißgerber, L. Koch: Das Bremer Interface-System. In Wis-Materialien 5/93, Universität Bremen 1993.
  
- /18/ Albert, Programm-Pakete zur Physik, Springer-Verlag