

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik

Band 2

Anregungen für Unterricht und Lehre

ISBN 3 - 7896 - 0100 - 4

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1991

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.
Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.
Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage
www.solstice.de
werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Induktiv - modellierendes Vorgehen mit dem Rechner als Werkzeug

1. Verändertes Anforderungsprofil

Mit dem Einsatz moderner Technologien in allen Lebensbereichen verändern sich innerhalb sehr kurzer Zeitspannen 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 Sek. II der Gymnasien, z.T. auch für Anfangssemester an den Universitäten. Die Betonung des leicht abprüfbareren Wissens zeigt sich u.a. auch darin, wie sehr Standard-Aufgabentypen für den Physikunterricht gefragt sind. Darauf haben H. Dittmann, H. Näpfel, W. B. Schneider in dem Beitrag "Die zerrechnete Physik" in dem 1. Band dieser Reihe [1] aufmerksam gemacht. 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 hierbei eine Besonderheit des Faches, die Quan-

tifizierbarkeit, nicht zum Tragen kommt und Argumentationen schnell ins Vage, Spielerische abgleiten können. 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, s. z.B. McDermott [2]. 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 Physikunterrichts zu beheben

Die aufgezeigten strukturellen Schwächen des Physik-Unterrichts liegen in unzureichenden Möglichkeiten, mentale Repräsentationen des Gelernten aufzubauen und zu erproben. Um dem entgegenzuwirken,

- (1) sollte das Arbeiten mit Wirkungsgefügen sehr viel stärker als bisher im Zentrum des Lernens stehen, da dieses viele Denkanstöße, sowohl zu qualitativen wie zu quantitativen Überlegungen bietet;
- (2) sollen viele Möglichkeiten für aktive und intensive Auseinandersetzung des Lernenden an konkreten Fragestellungen gegeben werden.

Beide 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: in der Analyse von Versuchsabläufen und in der Modellierung solcher Abläufe.

3.1. Erschließen des Wirkungsgefüges von Versuchsabläufen

Entscheidende Hilfen für die Deutung von Versuchsabläufen und das Erkennen ihres Wirkungsgefüges bietet das Erfassen und Aufbereiten der Abläufe mit dem Rechner. Denn durch geeignete graphische Darstellungen können relevante Aussagen leicht qualitativ erkennbar werden und Abhängigkeiten sind leicht prüfbar. Ohne diese Aufbereitung durch den Rechner hat der Lernende kaum Chancen, solche Wirkungszusammenhänge von Versuchsabläufen im Detail zu verfolgen, s.o.(1).

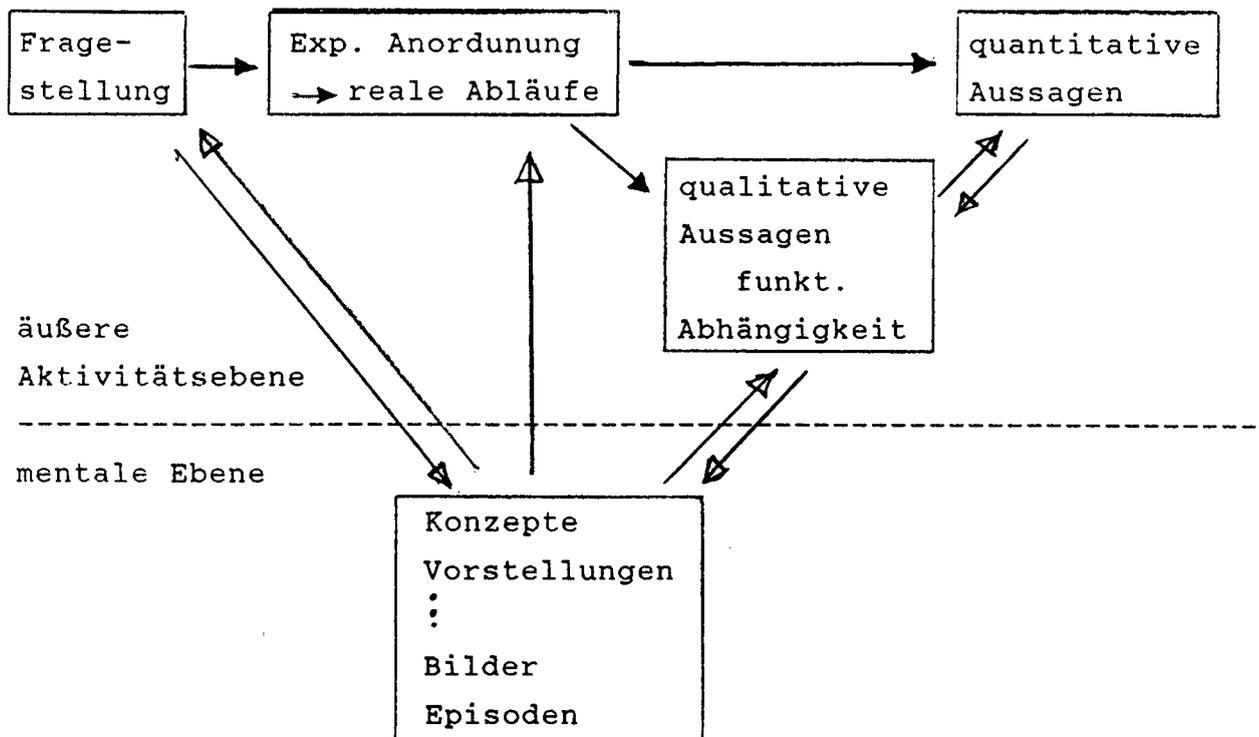


Abb. 1: Schematische Darstellung von Überlegungen und Abläufen zur Experimentalanalyse

Sehr grob läßt sich die Vorgehungsweise bei dieser Experimentalanalyse durch die schematische Darstellung in Abb. 1. verdeutlichen. Ausgehend von Fragestellungen, die entscheidend von den bisher gebildeten Konzepten, Vorstellungen usw. der Schüler bestimmt sind, können mit Hilfe von experimentellen Anordnungen reale Versuchsabläufe erfaßt und weiter auf funktionale Abhängigkeiten hin analysiert werden, was durch geeignete graphische Darstellungen ermöglicht wird. Darauf aufbauend können dann quantitative Aussagen formuliert werden. Das didaktische Potential dieser Experimental-Analyse liegt darin, daß, ausgehend von Fragestellung und Experiment, neue Aussagen direkt empirisch aus Graphen erschlossen werden können. Dabei ist für dieses Vorgehen typisch, daß es punktuell an verschiedensten Fragestellungen ansetzen kann, ohne daß ein großes Voraussetzungswissen aus dem Umfeld erforderlich ist. Da, ausgehend von den Graphen, primär qualitative Zusammenhänge formuliert werden, sind auch qualitative Erklärungsmuster einzusetzen. Die prinzipiellen Grenzen dieser Experimental-Analyse werden dann deutlich, wenn als Ziel strukturelle Vernetzungen von gewonnenen quantitativen Aussagen angestrebt werden. Denn solche Vernetzungen können erst mit stärker theoretisch orientierten Ansätzen erkannt werden (s.u.)

3.2. Modellierung physikalischer Vorgänge anhand von Wirkungsgefügen

Bisher werden Modellierungen physikalischer Situationen im Unterricht im wesentlichen eingesetzt, um physikalische Abläufe zu illustrieren, die im Experiment nur schwer oder gar nicht aufzeigbar sind. Eine sehr viel anspruchsvollere Lernsituation liegt vor, wenn Schüler durch selbst zu gestaltende Modellierungen Wirkungszusammenhänge so weit klären, daß damit quantitative Aussagen über die Abläufe möglich werden. Das zugehörige Vorgehen läßt sich grob durch die schematische Darstellung in Abb. 2 verdeutlichen. In der äußeren Aktivitätsebene geht es darum, zu einer Fragestellung geeignete Lösungselemente zu sammeln, so daß diese, mit einem geeigneten iterativen Algorithmus verbunden, zu einer numerischen Lösung führen. Wiederum sind die Lösungsschritte entscheidend durch die mentale Ebene (Konzepte, Vorstellung, usw.) bestimmt.

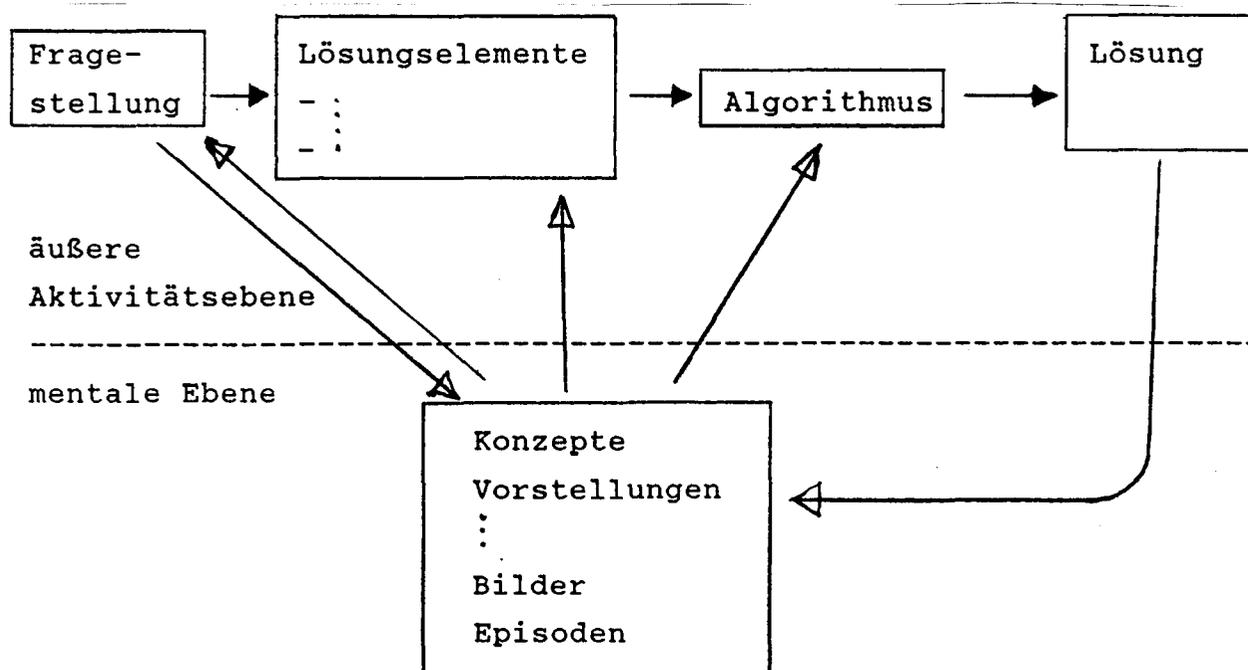


Abb. 2: Schematische Darstellung von Überlegungen und Abläufen zur Modellierung

Beim aktiven Erstellen von Modellierungen liegt das didaktische Potential im Klären des physikalischen Wirkungsgefüges, das der Fragestellung zugrunde liegt, und im Aufsuchen adäquater Lösungselemente, die quantitativ zu formulieren sind. Zusammen mit dem Durchdenken und Anwenden iterativer Algorithmen werden typische deduktive Arbeitsweisen vollzogen, mit denen ein Strukturwissen aufgebaut wird. Wenn zusätzlich die Möglichkeit für eine experimen-

telle Prüfung besteht, ist auch der Rückbezug auf die ursprüngliche Fragestellung oder experimentelle Ausgangssituation gegeben. Dieses Vorgehen hat allerdings auch eine entscheidende Beschränkung. Ergeben sich für den Schüler auf dem Wege zur Lösung entscheidende Schwierigkeiten, so ist er auf Lösungselemente angewiesen, die er von außen erhält, denn auch ein Rückzug auf Teillösungen ist hier i. allg. nicht möglich. Für ein erfolgreiches Arbeiten ist daher i. allg. ein im thematischen Umfeld gutes theoretisches Wissen erforderlich, was die Modellierung häufig zu einer anspruchsvollen Verfahrensweise macht.

3.3 Analytisch-modellierende Verfahrensweise zur Erarbeitung physikalischer Vorgänge mit dem Rechner als Werkzeug

Die beiden dargestellten Verfahrensweisen Experimental-Analyse und Modellierung können beide eingesetzt werden, um physikalische Inhalte kennenzulernen bzw. zu erarbeiten. Entsprechend den obigen Charakterisierungen sind dann damit durchaus unterschiedliche Zielsetzungen verbunden.

Vergleicht man die beiden Verfahrensweisen, so stellt man fest, daß sich beide in bemerkenswerter Weise ergänzen: Während die Modellierung insbesondere ein angemessenes Strukturwissen aufbaut und fördert, zielt die Experimental-Analyse ohne Rückgriff auf ein umfangreiches Strukturwissen darauf, Aussagen möglichst direkt aus der Beobachtung zu gewinnen. So ermöglicht die Experimental-Analyse ein schrittweises Erschließen neuer physikalischer Aussagen, während eine durchzuführende Modellierung bereits einen größeren prinzipiellen Überblick über zugrundeliegende Gesetzmäßigkeiten erfordert. Eine vergleichbare didaktische Situation, in der sich zwei Vorgehensweisen in typischer Weise ergänzen, gibt es bei der Behandlung technischer Inhalte. Hierfür schlug E. Holla [3] 1963 eine analytisch-synthetische Verfahrensweise vor. Bei diesem methodischen Vorgehen sollen Geräte wie z. B. Klingel oder Projektor in ihre wesentlichen Teile gegliedert, möglichst auch zerlegt und deren Funktion experimentell einzeln erarbeitet werden, ehe dann mit dem Schüler in einem Synthese-Schritt das Zusammenwirken der Teile thematisiert und im Zusammenbau wirklich vollzogen wird.

In Analogie zu dieser analytisch-synthetischen Verfahrensweise, mit der einfache technische Geräte im Unterricht behandelt werden können, bietet sich für die Erarbeitung physikalischer Vorgänge, bei denen der Rechner als Werkzeug eingesetzt werden soll, eine analytisch-modellierende Verfahrensweise an. Bei diesem Vorgehen wird man grundlegende Eigenschaften eines Phänomenbereiches zuerst mit der Experimentalanalyse empirisch induktiv, erarbeiten, wie es in 3.1 dargestellt ist. Man kann das Vorgehen daher auch induktiv - modellierend nennen. So kann z. B. die Phasenverschiebung von Orts-Geschwindigkeits- und Beschleunigungs-Zeit-Grafen eines Federpendels ermittelt und diese in einen Begründungszusammenhang gestellt werden, D.Heuer [4]. Dieses Begründungsgefüge, das häufig qualitativer Art sein wird, kann als wesentliche Basis für eine Modellierung genutzt werden. In dieser 2. Phase kommt es dann darauf an, mit Hilfe bekannter quantitativer Abhängigkeiten das erkannte qualitative Beziehungsgefüge so zu einem quantitativen auszubauen, daß mit einem iterativen Algorithmus die interessierenden Versuchsabläufe vom Rechner ermittelt und dargestellt werden. Der direkte Vergleich Experiment - Modellierung zeigt dann, wie angemessen die Modellierung vollzogen ist und die zugrunde liegenden physikalischen Vorgänge beschrieben sind, z. B. beim zeitlichen Verlauf der Auslenkung einer Federschwingung, s. [4].

3.4. Simultaner Vergleich von Experiment und Modellierung

Der direkte experimentelle Vergleich des Versuchsablaufes mit dem durch die Modellierung ermittelten Ablauf entspricht dem Schlußstein in einem Brückenbogen, der von zwei Pfeilern ausgeht. Will man die Passung der beiden Teilbögen prüfen, ist es am überzeugendsten, parallel zum realen Versuchsablauf und der graphischen Darstellung der relevanten physikalischen Größen durch den Rechner auch die Modellierung in Realzeit durchführen zu lassen. Dann kann man am Bildschirm verfolgen, wie sich beide Abläufe von gleichen Anfangsbedingungen ausgehend weiterentwickeln. Sind mit den Versuchsabläufen auch direkt zu beobachtende Phänomene verbunden wie z. B. Ortsveränderungen, Helligkeitsveränderung oder Meßanzeigen, können diese mit den Darstellungen und Aufbereitungen des Ablaufes am Bildschirm direkt in Beziehung gesetzt werden, was bei einem zeitlichen Nacheinander von Experiment und Modellierung so nicht möglich ist.

Praktisch unabdingbar ist die zeitliche Parallelität von Experiment und Modellierung für den Vergleich, wenn der experimentelle Ablauf nicht allein durch die Anfangsbedingung festgelegt ist, sondern der Experimentierende noch in gezielter Weise in den Ablauf eingreifen will, um die Auswirkungen dieser Eingriffe kennenzulernen. Auf diese Weise können z. B. die Auswirkungen des Anschlusses einer R-C-Schaltung an eine Betriebsspannung U_B aufgezeigt und in der Modellierung auch dann verfolgt werden, wenn Größe und auch Polarität von U_B während des Versuchsablaufs vom Experimentierenden verändert werden. Dazu ist es nur nötig, die augenblickliche Größe von U_B zu messen und in die Modellierung mit einzubeziehen. Durch solch einen Versuch kann dann nicht nur das Wechselspannungsverhalten erfahren und verstanden werden, sondern auch die Gültigkeit der Modellierung für den allg. Fall einer zeitabhängigen Betriebsspannung U_B geprüft werden. Voraussetzung für die simultane Durchführung von Experimental-Analyse und Modellierung ist natürlich ein entsprechendes Werkzeug, das beide Aktionen praktisch gleichzeitig, d.h. im schnellen Wechsel, durchzuführen gestattet.

4. Anforderungen an ein Werkzeug zur Experimental-Analyse und Modellierung

Will man die oben dargestellte Konzeption verwirklichen und dem Lernenden viele Möglichkeiten geben, sich mit konkreten physikalischen Fragestellungen aktiv und intensiv unter Einsatz des Rechners als Werkzeug auseinanderzusetzen, so wird dazu allein die Mitwirkung an Unterrichtsgesprächen bzw. Diskussionsgruppen nicht ausreichen. Der Lernende wird auch eigenständig mit dem Rechner arbeiten und selbst Versuchsabläufe erfassen, analysieren und Modellierung durchführen müssen. Um das realisieren zu können sind zwei Forderungen zu erfüllen:

1. Es muß transparente und gestaltbare Software zur Verfügung stehen, mit der der Lernende seine Vorstellung an Experiment, Analyse bzw. Modellierung leicht realisieren kann.
2. Diese Software muß auch auf so preiswerten Rechnern zur Verfügung stehen, daß das Arbeiten in kleinen Schüler- bzw. Studentengruppen auch von der Rechnerbeschaffung her möglich ist.

4.1. PAKMA: eine offene Programmierumgebung - auch zur Experimental-Analyse und Simultan-Modellierung

Wenn der Lernende den Rechner eigenständig als Werkzeug einsetzen soll, um damit physikalische Abläufe zu analysieren und zu modellieren, so muß die Software bzw. die Programme

- offen, d.h. leicht zu verstehen,
- leicht zu modifizieren und
- leicht zu handhaben sein.

Dazu wurde das PAKMA: Physik Aktiv Messen, Modellieren, Analysieren konzipiert und die erste Realisierung für den Rechner C64 1988 fertiggestellt und veröffentlicht, s. D.Heuer, R. Treffer [5]. Ausführlich beschrieben ist das PAKMA mit weiteren Versuchsbeispielen auch in der Praxis Serie: D.Heuer, Effizientes Experimentieren und Analysieren durch universelle Programmierumgebung [6] und im 1. Band dieser Buchreihe, s. Heuer [7].

Das Problem, Offenheit und Transparenz zu erreichen, wird dadurch gelöst, daß die Programmaufgaben in zwei Teile separiert werden:

- den Physikteil - das Kernprogramm -, in dem das speziell vorliegende physikalische Problem zu bearbeiten ist.
- ein universelles "Rahmenprogramm", dessen Programmanweisungen aber für den Benutzer überhaupt nicht aufrufbar sind, so daß es eine Programmierumgebung darstellt. Dadurch entspricht dieser Teil weitgehend einer Standard-Software, die Benutzeroberfläche ist für alle Kernprogramme gleich, und diese haben in Bezug auf die Programmierumgebung automatisch den Programmkomfort von Fertigprogrammen.

Für eine klare, prägnante Form der Kernprogramme, die den Physikteil enthalten, sind die speziell zur Verfügung gestellten Befehle zum Messen und zur Grafikerstellung wichtig. Für weitere Aufgabenstellungen steht stets das gesamte Repertoire der eingesetzten strukturierten Hochsprache zur Verfügung, in der das prägnante Kernprogramm geschrieben ist, hier das COMAL. Dadurch ist es nicht nur möglich, Versuchsabläufe mit ihren Meßdaten zu erfassen und zu analysieren. Ebenso können Modellierungen ausgeführt werden, die separat ablaufen oder auch simultan zum Experiment, s. Abschnitt 3.4. Erfahrungsgemäß zeigt sich, daß für normale Problemstellungen im Kernprogramm ein-

fachste REPEAT-Schleifen evtl. zusammen mit IF-Abfragen als Sprachstruktur völlig ausreichen. So wird in den Kernprogrammen das COMAL wie ein BASIC-Dialekt benutzt. Zusätzlich können über Prozeduren an die Fragestellung angepaßte Spracherweiterungen benutzt werden. Durch Kürze und Prägnanz wird also die aus pädagogischer Sicht erforderliche Offenheit des Systems möglich.

Die Aufteilung in ein kurzes, problemspezifisches Kernprogramm und ein allgemeines Rahmenprogramm als Benutzeroberfläche hat auch den Vorteil der einfachen Portabilität einer erstellten Programmlösung auf andere Rechnertypen. Ist eine entsprechende Oberfläche für einen anderen Rechnertyp erst erstellt, kann praktisch das identische Kernprogramm, wenn es als ASCII-File auf den Rechner übertragen wurde, auf diesem Rechner eingesetzt werden. So können z.B. mit der gerade fertig gestellten Amiga-Version des PAKMA (s.u.) alle bisher am C64 erstellten Kernprogramme praktisch ohne Änderungen samt den aufgenommenen Meßdaten auf dem Amiga wieder eingesetzt werden.

4.2. Anforderungen an die Hardware: Eine Rechnerlinie auf der jeweils die gleiche offene Programmierumgebung realisiert ist.

Oben wurde die Forderung begründet, daß Lernende in kleinen Gruppen den Rechner als Werkzeug einsetzen sollten, um so ihr Physik-Lernen zu unterstützen. Allerdings wird man in den nächsten Jahren kaum davon ausgehen können, daß dafür in den Physikräumen aller Schulen ein gleicher Rechnertyp eingesetzt werden kann, der noch dazu mit dem identisch ist, der für andere Fächer, speziell informationstechnische Grundbildung, unter anderen Anforderungssituationen ausgewählt wurde. Wo entsprechende finanzielle Mittel nicht zur Verfügung stehen, wird man fragen müssen, in welcher Weise vorhandene Rechner oder preiswerte modernere Heimcomputer, auch wenn sie nicht dem MS-DOS-Standard entsprechen, für den Einsatz im Physik-Unterricht ebenso oder gar noch besser geeignet sind.

Daß unter diesem Gesichtspunkt die jetzt etwas verschmähten C64-Rechner ein bisher wenig beachtetes didaktisches Medien-Potential darstellen - insbesondere wenn ausgemusterte Exemplare noch an Schulen vorhanden sind - wurde am Beispiel des PAKMA wiederholt herausge-

stellt und von vielen Kollegen auch anerkannt, s. D. Heuer [8]. Zur Möglichkeit von Schülerversuchen schreibt R. Brandenburg [8], daß die Anschaffung eines Klassensatzes von Home-Computern mit einfachen preiswerten Meßinterfaces als sinnvoll und finanziell lohnende Investition angesehen werden kann. Allerdings drückt er am Ende seines Buches die Sorge aus, daß gerade einfache Experimente mit Home-Computern, die die Schüler zu eigenem Experimentieren anregen, durch komfortable Standardprogramme verdrängt werden.

Wenn man Schüler anregen will, im Physik-Unterricht aufgeworfene Probleme zuhause mit ihrem eigenen Rechner weiter zu verfolgen, wird man auch im Unterricht einen Rechner einsetzen müssen, der als moderner Heimcomputer bei Schülern verbreitet ist. Der Amiga 500 ist heute sicher solch ein Rechner, der nicht mehr kostet als ein C64 vor ca. 3 Jahren und gegenüber einem MS-DOS-Rechner preislich sehr viel günstiger ist, wobei er ihn in Grafik und Benutzeroberfläche noch übertreffen kann. Aus diesem Grunde wurde die Programmierumgebung PAKMA auf den Amiga so übertragen, daß mit praktisch gleichen Programmen, vergleichbarer Benutzerführung und, was entscheidend ist, gleichen Hardware-Meßadaptern wie beim C64 gearbeitet wird. (Versuche mit dem Amiga-PAKMA sind in D. Heuer [10], [11] beschrieben). Damit ist für C64-Benutzer gleichzeitig eine interessante Aufwärtskompatibilität gegeben, so daß die Aktivierung vorhandener C64-Rechner keineswegs in eine Sackgasse führt. Denn vorhandene Soft- und auch Hardware ist voll weiter zu benutzen und ein Umlernen entfällt. Da auch PC-Rechner als einzelne Geräte zur Demonstration im Physikunterricht eingesetzt werden, ist es nur konsequent, auch diese Rechner in die dargestellte Konzeption der Rechnerlinie einzubeziehen. Dann können diese gegebenenfalls auch in Kombination mit den anderen oben genannten Rechnertypen mit der Programmierumgebung PAKMA, sowohl für Experimental-Analyse wie für Modellierung eingesetzt werden. Eine entsprechende Implementation ist am Lehrstuhl für Didaktik der Physik der Universität Würzburg in Arbeit.

5. Ausblick

Es ist klar, daß man mit den genannten größeren Rechnern eine größere Geschwindigkeit, eine feinere Grafik und evtl. eine noch einfachere

Benutzerführung erreichen und dies beim Einsatz nutzen kann. Im Sinne des Physiklernens kann man auch fragen, ob sich die größere Rechnerkapazität dazu nutzen läßt, die Umsetzung von Vorstellungen über Wirkungszusammenhänge in korrespondierende Aktionen des Rechners noch effizienter zu gestalten. Hier kann man daran denken, das zu erstellende Beziehungsgeflecht mit dem Rechner grafisch zu repräsentieren und die Ergebnisse möglichst in direkte Beziehung damit zu setzen. Dann ist es wichtig, auch Versuchsabläufe in diesen Vergleich mit einzubeziehen. Das soll in einem Studienvertragsprojekt verfolgt werden. Dabei ist allerdings zu bedenken, daß die sehr begrenzte Fläche des Bildschirms die Gesamtübersicht je nach Größe des Projektes erschwert. Gegenüber dem Arbeiten mit gleichungsorientierten Kernprogrammen wird hier aber für manche Schüler eine noch bessere Strukturierung erreicht werden können, insbesondere wenn Schüler bisher nicht mit Modellierungen gearbeitet haben.

Anmerkung:

Überarbeiteter Aufsatz, der zuerst als Beitrag in Th. Bethge, H. Schecker [Hsrg.] Software - Werkzeuge zur Modellbildung im Physikunterricht, Bremen 1990, Universitäts-Schriftenreihe, erschien.

Literatur:

- [1] V. Dittmann, H. Näpfel, W. B. Schneider: Die zerrechnete Physik in W. B. Schneider [Hrsg]: Wege in die Physikdidaktik, Erlangen, 1989
- [2] L.C. McDermett: Research on conceptual understanding in mechanics. Physics Today. S. 24 July 1984
- [3] E.Holla, Das monographisch-synthetische und das analytisch-synthetische Lehrverfahren im Naturlehreunterricht, in: Pädagogische Rundschau 1963, 670ff.
- [4] D. Heuer, Das Sonarmeter als Bewegungsmeßwandler im Physikunterricht. PdN-Ph 38, Heft 8, S.2-9, 1989.
- [5] D.Heuer, R.Treffer: Physik erfahren durch Computer-Experimente. Bd.2: Computer-Versuchsanalyse - Messen, Auswerten, Darstellen; incl. Programm- und Meßdatendiskette. ISBN 3-9801796-2-1 Würzburg, 1988
- Mitarbeit an der PAKMA-Programmierungsumgebung: D.Heuer, S. Huxohl, H. Sand, R. Treffer, M. Vaeth.
- [6] D.Heuer, Serie: Effizientes Experimentieren und Analysieren durch universelle Programmierungsumgebung PAKMA: Teil 1 - Teil 5 in PdN-Ph 38, Heft 7, S. 37-43, 1989, bis PdN-Ph 39, Heft 3, S. 35 - 41, 1990.
- [7] D. Heuer: Physik aktiv erlernen durch Messen, Modellieren, Analysieren mit der Programmierungsumgebung PAKMA, in W. B. Schneider [Hrsg.], Wege in der Physikdidaktik, Erlangen, 1989
- [8] D.Heuer, Didaktische Überlegungen zum Einsatz der Programmierungsumgebung PAKMA: PdN-Ph 39, Heft 3, S. 35 - 41, 1990, insbesondere Abschnitt 8.3
- [9] R. Brandenburg: Computer im Physikunterricht, Bd. 3A, Ankopplung des Computers an Realexperimente Basistext, Studienbrief, DIFF [Hrsg.], Tübingen, 1990
- [10] D. Heuer: Der Kraftstoß als Verbindung zwischen $F=ma$ und Impuls - erfaßt durch elektronische Kraftmessung, PdN-Ph. 39, Heft 8, 1990
- [11] D. Heuer: Zum 300. Jahrestag der Hugens'schen Elementarwellentheorie, erscheint in PdN-Ph. 40, Heft 8, 1991. Optische Beugungsbilder: Excellente Bestätigung im Schulversuch.