

Physiklernen mit multimedialen Dokumentationen

Jürgen Kirstein

Technische Universität Berlin, Institut für Atomare Physik und Fachdidaktik,
Skr. PN 1-1, Hardenbergstr. 36, 10623 Berlin

Kurzfassung

Der didaktisch sinnvolle Einsatz von Multimedia wird an Lernaufgaben erkennbar, die mit traditionellen technischen Trägersystemen (Buch, Fernsehen) nicht gestaltbar wären. Sie beziehen die spezifischen didaktischen Vorteile neuer Medien ein (didaktischer Mehrwert). Einer dieser Vorteile liegt in der Eigenschaft der Interaktivität. Diese erlaubt es, Handlungen in den Lehr-Lernprozess einzubeziehen, die in der Realität nicht stattfinden könnten. Durch die multimediale Repräsentation realer Experimente („Interaktives Bildschirmexperiment“) lassen sich Situationen für das Physiklernen erschließen, die im Unterricht in der Regel nicht real zugänglich sind - jedenfalls nicht im Rahmen von lernerorientierten, selbststeuerbaren Lernaktivitäten. An Beispielen wird der Nutzen dieses fachspezifischen Medienkonzepts diskutiert.

1. Einleitung

Der Begriff „Dokument“ kennzeichnet einen Beleg oder ein Beweismittel, das zur Belehrung oder Erhellung über etwas dient (lat. docere »lehren«) [1]. Dokumente, die zum Physiklernen und -lehren Anwendung finden, bezeichnen hier Ausschnitte der Realität, die für didaktische Zwecke systematisch ausgewählt, erfasst und gespeichert werden.

Dazu kommen traditionell technische Mittel wie der Film, das Fernsehen sowie Video- und Audiomedien zum Einsatz. Filmische Dokumentationen, etwa über die Prozesse und Ergebnisse physikalischer Forschung, gehören allerdings weniger zum Standard der Ausbildung (Beispiele gibt es aus den 50er Jahren). Jedenfalls bieten sie heute in der Regel weder Gegenstände noch Situationen zum Physiklernen. Heute verwendet man für didaktische Zwecke zunehmend auch digitale Medienformate und Multimedia. Digitale Video- und Audiodokumente von realen Vorgängen lassen sich vielfältig nutzen. Ein Beispiel ist die Analyse von Bewegungen durch die Aufzeichnung im Video und eine Auswertung der Einzelbilder. Damit lassen sich Bewegungsvorgänge quantitativ untersuchen, die mit herkömmlichen unterrichtlichen Mittel experimentell kaum zugänglich sind. Ebenso geben digitale Audiodokumente, die in der Lehrsituation erstellt und ausgewertet werden können, zahlreiche neue Möglichkeiten, zur didaktisch-methodischen Gestaltung von Lehr-Lernprozessen. Diese Dokumente werden - und das gilt allgemein für Medien - erst im Rahmen einer Lernumgebung zusammen mit bestimmten Lernaufgaben in einem didaktischen Kontext wirksam. Dokumentationen sind damit heute weniger Belehrungsinstrumente, sondern vielmehr Mittel zur Unterstützung individuellen Lernens.

Experimente spielen für das Lehren und Lernen von Physik eine zentrale Rolle. Dennoch ist die Repräsentation physikalischer Inhalte in den unterrichtlichen Angeboten von Schule und Hochschule häufig sprachlich und mathematisch geprägt. Die Bedeutung der in den hierbei verwendeten Dokumenten

verwendeten mathematisch-sprachlichen und grafischen Symbole bleibt dem Lernenden oft unklar. Das Experiment, eine didaktische Inszenierung etwa als Praktikums- oder Demonstrationsexperiment, kann hier den fehlenden anschaulichen Hintergrund liefern, der dem Lernenden die Verknüpfung zwischen Symbol und realer Erfahrung ermöglicht. Aber auch die im Experiment verwendeten Instrumente und Anordnungen besitzen hierbei einen symbolhaften Charakter. Das Entschlüsseln ihrer Bedeutung setzt in der Regel einen unmittelbaren Zugang des Lernenden zum Experiment voraus. Das aus der Ferne betrachtete vorgeführte Experiment kann zwar didaktisch durchaus (nachhaltig) wirksam sein - das für den Erfolg des Lernprozesses so notwendige eigene (angeleitete) Umgehen mit dem Experiment kann es allerdings nicht ersetzen.

Das Dokument eines physikalischen Experimentes, also etwa eine Fotografie der Anordnung, ist also interpretierbar als Symbolsystem, das einen physikalischen Inhalt repräsentiert. Allerdings kommt derartigen analogen Repräsentationen von Realexperimenten in den geläufigen medialen Angeboten kaum eine tragende Rolle in Lehr-Lernprozessen zu. Erst recht nicht werden die Abbildungen zwischen verschiedenen Symbolsystemen thematisiert, etwa im Vergleich der mathematischen Formelzeichen zu den Messinstrumenten in der experimentellen Anordnung. In dieser Verbindung zwischen Konkretem und Abstraktem liegt ein enormes didaktisches Potenzial, das allerdings kaum genutzt wird. Damit verbunden ist der Aspekt der Anschauung. Im Gegensatz zur „Veranschaulichung“ bei der Visualisierung mathematischer Modelle kennzeichnet dieser Begriff das Zugänglichmachen von realen Situationen, etwa durch fotografische Abbildungen oder durch Bewegtbilder in Filmen und Videos.

Dokumente physikalischer Experimente können auch den Erwerb prozeduralen Wissens unterstützen und bieten damit eine weitere Möglichkeit zur konkreten Verankerung der Bedeutung abstrakter Repräsentationen. So ist es zum Verständnis der Be-

deutung eines mathematisch-formelmäßig dargestellten physikalischen Zusammenhangs notwendig, die dahinter liegenden Handlungen im Experiment zu kennen um diese über die Auswertung der Messdaten mit dem Ergebnis verbinden zu können. Hiermit deutet sich ein grundlegendes Problem an: Häufig stehen die notwendigen Experimente im Lernprozess nicht zur Verfügung oder mindestens dann nicht, wenn sie aktuell benötigt werden. Nachfolgend soll ein Lösungsansatz für dieses fachdidaktische Grundproblem beschrieben werden, der multimediale Dokumente physikalischer Experimente verwendet. In Beispielen wird dann der didaktische Nutzen des Verfahrens erläutert und abschließend ein Ausblick in die Mediennutzung zum Lehren und Lernen von Physik gegeben.

2. Problemstellung

Grob zusammengefasst lassen sich die fachdidaktischen Problemfelder im Zusammenhang mit dem Einsatz von Experimenten so beschreiben:

- Experimente sollen in Lehr-Lernprozessen situationsgerecht verfügbar sein.
- Experimente sollen insbesondere das individuelle Lernen über Präsenzangebote hinaus unterstützen.
- Experimente sollen das Lernen in lebensweltbezogenen Situationen ermöglichen.

Der didaktisch-methodische Rahmen dafür ist einmal die Stärkung des selbstständigen, aktiven Lernens und die unterstützende Begleitung derartiger Lernprozesse, zum Beispiel durch die beratenden und moderierenden Angebote des Lehrenden. Andererseits stellt die Forderung nach der Gestaltung von lebensweltbezogenen Lernsituationen ein weiteres zentrales Element des hier theoretisch zugrundeliegenden moderaten Konstruktivismus dar.

Das Physiklernen mit der Lebenswelt zu verbinden, gehört heute noch nicht zum unterrichtlichen Alltag. Erst recht der Wunsch nach dem Einsatz von Experimenten in diesem Zusammenhang markiert schnell die rein praktische Grenzen. Das gilt auch für den situativen Einsatz von Experimenten durch den Lehrer, der sein Beratungsfunktion wahrnehmen will, oder den Lerner, der ein Experiment individuell nachvollziehen will um einen Fortschritt in seinem Lernprozess zu erzielen. Der Begriff „Blended Learning“ kommt hier ins Spiel, wenn es um Konzepte zur Verbindung von Präsenzangeboten und individuellem Lernen geht. Schnell wird klar, dass es hierbei für den Einsatz von realen Experimenten einen engen Spielraum gibt. Es ist eben nicht möglich, das Vorlesungsexperiment individuelle zu wiederholen, oder im Praktikum solange zu üben, bis man den Gebrauch eines Gerätes wirklich verstanden hat. Derartige Angebote der Präsenzlehre haben nur einen sehr geringen Anteil an der gesamten Lernzeit und orientieren sich eher an praktischen Grenzen als an didaktischen Erfordernissen.

Unter den traditionellen Lösungsansätzen für dieses

Problem der Bereitstellung von Experimenten finden sich die so genannten „Corridor Demonstrations“ [2]. Die Flure der universitären Lehrgebäude wurden dabei genutzt, um die Experimente wiederholbar zu machen. Von der Vorführung auf Wunsch, über das automatisierte „Knopfdruckexperiment“ bis hin zum statischen Display mit Texten und Bildern reichten die teils aufwändigen Installationen, die von den Studierenden nach den Vorlesungen genutzt werden konnten. Diese Angebote waren auch Bestandteil von Lernaufgaben, mit denen Vorlesungsinhalte eingeübt, ergänzt und neue Inhalte auch vorbereitet wurden. Heute finden wir derartige Experimente eher in naturwissenschaftlich-technischen Museen wieder als in den Fluren der Universitäten. Wollte man zu allen wesentlichen Lehrinhalten solche Angebote für die Studierenden bereitstellen, würde das schnell außerhalb des Machbaren liegen.

Wesentlich praktikabler ist hier die Repräsentation der Experimente durch Filme und Videos. Das Fernsehen zeigt Experimente in Sendungen wie dem „Telekolleg Physik“ [3] zur Unterstützung von Fernunterricht mit dem Lehrbuch. Für den universitären Bereich gibt es heute derartige Fernsehsendungen nicht (vor gut 30 Jahren gehörten ganze Sendereihen mit physikalischen Experimenten in den dritten Programmen der ARD noch zu den selbstverständlichen Angeboten [4], [5]). Auch in multimedialen Lernangeboten finden sich reale Experimente in Videos wieder. Allen drei Formaten gemeinsam ist die Darstellung des Experiments als „gefilmtes“ Demonstrationsexperiment: der Lehrende führt das Experiment durch, kommentiert seinen Ablauf und stellt das Ergebnis unter Einbeziehung weiterer Medien, dar. Derartige zeitbasierte Repräsentationen erlauben keinen Eingriff in die dokumentierte experimentelle Anordnung. Möglich ist allenfalls das Anhalten und Wiederholen des Bewegtbilds, jedenfalls im Film und Video. Innerhalb des multimedialen Angebots ist der Komfort hierzu erheblich gesteigert: das Standbild kann beliebig lange gezeigt werden und ist sogar auf Papier per Ausdruck verteilbar. Das digitale Format eröffnet gegenüber Film und Video ein erheblich größere Einsatzvielfalt für den Unterricht. Auch sind digitale Experimentrepräsentationen im Gegensatz zum Film für die Studierenden wesentlich leichter verfügbar. Hat man sich von einigen Jahren noch Gedanken über den Verleih von 16 mm-Filmprojektoren und Filmen machen müssen, stellt man den digitalisierten Film oder das Video über das Internet ohne technischen Aufwand bereit. So sind inzwischen vollständige Experimentalphysikvorlesungen für die jederzeitige Wiederholung multimedial verfügbar.

Es gibt noch eine andere Einsatzform von experimentellen Dokumenten, die oben schon kurz gestreift wurde. So lassen sich experimentell sehr aufwändige Beobachtungen - wie zum Beispiel die Bewegung von Öltröpfchen im millikanschen Experiment zur Bestimmung der Elementarladung - in

Filmen oder Videos dokumentieren und sind dann für quantitative Auswertungen („Videoanalyse“) jederzeit verfügbar. Derartige Aktivitäten könnten durchaus ein sinnvoller Teil von Lernaufgaben sein, der den Lernenden handlungsorientiert zu abstrakten fachlichen Konzepten führt. Praxis ist das allerdings weder an Schulen noch an Hochschulen. Im Beispiel beschränkt man sich in der Regel auf das Zeigen der Apparatur und das Mitteilen der Ergebnisse im Lehrsatz. Nachteile aller traditionellen zeitbasierten Medien liegen im doch recht hohen Aufwand des unterrichtlichen Einsatzes (besonders für individuelles Lernen), in der unzureichenden Kontrolle des experimentellen Ablaufs und besonders auch in der oft geringen Verarbeitungsintensität durch die Lernenden. Hier spielen medienpsychologische Aspekte wie die Steuerung der Aufmerksamkeit und die begrenzte Verarbeitungskapazität des visuellen und auditiven Systems eine wesentliche Rolle.

3. Lösungsansatz

Ein bereits 1996 entwickelter Ansatz [6] zur Lösung des Problems der nur passiven Rezeption, die mit den zeitbasierten Repräsentationen des Experiments verbunden ist, basiert auf dem Konzept der „interaktiven Realanimation“. Dabei wird durch eine spezielle Animationstechnik im Verbund mit multimedialen Bildformaten ein reales Objekt so repräsentiert, dass der Betrachter es über gewöhnliche Eingabegeräte wie die Maus direkt manipulieren kann. Dabei erfolgt über das Multimediasystem eine erwartungskonforme Wiedergabe der animierten Bildfolge entsprechend den Handlungen des Benutzers und nicht zeitbasiert wie beim Film. Diese Technik ermöglicht die Dokumentation physikalischer Experimente mit der Variation zweier Parameter. Fotografiert man entsprechend dieser Parametervariation das Experiment systematisch, so erhält man eine zweidimensionale Matrix von Einzelbildern, die nach einer entsprechenden Bearbeitung das so genannte „Interaktive Bildschirmexperiment“ (IBE) darstellen. Abhängig von den Handlungen des Betrachters reagiert das im IBE repräsentierte Experiment ähnlich wie in der Wirklichkeit. Die Bilder zeigen das fotografisch dokumentierte experimentelle Geschehen und nicht die Visualisierung des mathematisch modellierten Naturvorgangs wie in der Simulation. Somit bildet das IBE auch alle während des Animationsaufnahme erfassten Fehler, besonders die systemischer Art, mit ab. Die Handlungen erfolgen mit den Bildobjekten und nicht mit virtuellen Bedienelementen zur Parametervariation; sie haben didaktische Relevanz für den Erwerb prozeduralen Wissens.

In Zusammenarbeit mit dem Ernst Klett Verlag wurde diese Entwicklung schon kurz danach in einer Anwendung für den Physikunterricht der Schule genutzt. Auf einer CD-ROM steht ein Angebot von Experimenten zur Optik bereit, die eingebettet sind in experimentell bezogene Lernaufgaben. Neben der

Beobachtung von oft im Unterricht nicht zugänglichen Phänomenen sind dies auch Aufgaben, in denen ein Zusammenhang zwischen physikalischen Größen quantitativ untersucht werden soll. So lässt sich etwa die Brechzahl der Luft mittels eines Michelson-Interferometers bestimmen. Das ist ein in der Sekundarstufe II angesiedeltes Experiment, das zwar in jedem Schulbuch beschrieben wird, das aber kaum ein Schüler je selbst durchgeführt hat. Im Verbund von Realexperiment mit der CD-ROM lassen sich viele Lernsituationen gestalten, die auch über den Unterricht hinausgehen können, wenn der Schüler derartige Messungen als Hausaufgabe durchführen soll. Wesentlich zum Bestandteil derartiger Lernangebote gehören auch Selbstkontrollmöglichkeiten, die hier Beispiele der experimentellen Datennahme und zur Auswertung bereitstellen.

Die Grenzen dieses Ansatzes liegen in der Beschränkung auf zwei Parameter und vor allem in der Gestaltung der Benutzer-Bild-Interaktionen. Es ist nämlich nur möglich, die Bildobjekte über horizontale und vertikale Mausverschiebungen zu manipulieren. In einigen einfachen Fällen (Verschieben eine Linse auf der optischen Bank) für dies zu den vom Benutzer erwarteten Bildreaktionen. Schon beim Drehen eines Objekts kommt es zu einem unerwarteten Verhalten: der Drehknopf an einem Gerät beginnt zu oszillieren, da die Komponenten der kreisförmigen Mausbewegung auf das Bildschirmkoordinatensystem projiziert werden. Diese Mängel führen dann sehr schnell zu einer deutlichen Abnahme der Akzeptanz der IBE bei den Lernenden. Der Lehrende hingegen, etwa der Dozent in einer Experimentalphysikvorlesung, lernt die Eigenheiten dieses medialen Formats schnell kennen und kann den Studierenden die Illusion der direkten Manipulation des abgebildeten Experiments glaubhaft vermitteln [7].

Im nächsten Schritt konnte der zunächst einfache Grundansatz des IBE verfeinert werden. Das so genannten objektorientierten IBE verwendet nicht mehr eine (zweidimensionale) Animationsmatrix, sondern hier setzt sich das Bild zusammen aus verschiedenen Matrizen, die den experimentellen Realobjekten inhaltlich zugeordnet werden. Vor einem statischen Hintergrundbild liegen in verschiedenen Ebenen pixelgenau eingepasste Bildmatrizen für alle veränderlichen Bildbestandteile wie zum Beispiel Eingabeelemente und die davon abhängigen Reaktionen des Experiments in Form etwa der Anzeige von Messwerten auf dem Display eines Messgerätes. Weiterhin erfolgt die Bedienung des IBE über das Eingabegerät (Maus, Tastbildschirm), die möglichen Handlungen des Betrachters lassen sich jedoch frei gestalten. Bei der Gestaltung des IBE wird versucht, die realen Handlungen möglichst konform abzubilden, um die oben genannten Akzeptanzprobleme zu vermeiden. Experimentell relevante Handlungen lassen sich so nicht nur durch den Lehrenden demonstrieren, sondern auch durch den Lernenden

jederzeit nachvollziehen. Hierin liegt ein besonderes didaktisches Potenzial dieses neuen medialen Formats.

Für die Aufnahme des IBE ist zunächst eine sorgfältige Gestaltung des experimentellen Aufbaus notwendig, die in einem speziell ausgestatteten Labor erfolgt. Bei der fotografischen Bildgestaltung spielen didaktische Gesichtspunkte eine besondere Rolle, was teilweise einen erheblichen Aufwand für die experimentelle Vorbereitung bedeutet. Für die Animationsaufnahme werden hochauflösende digitale Fotoapparate eingesetzt, die sich vom Rechner fernsteuern lassen. Nur darüber ist eine genügende Stabilität des Bildes gewährleistet. Die weitere Bearbeitung der Bilder verlangt zunächst eine Separation in die Bildmatrizen, die dann in das zu erstellende Multimedia-System eingebunden werden. Hier besteht ein weiterer Aufwand in der Programmierung der Benutzer-Bild-Interaktionen, denen eine Analyse der Benutzerhandlungen und die dadurch gesteuerte Auswahl der Matrixelemente zugrunde liegt.

Im IBE lassen sich Experimente dokumentieren, die nicht zum Alltag der Physikausbildung gehören. Es sind dies auch Experimente mit lebensweltlichen Bezügen, die für Schule und Hochschule bisher wenig erschlossen sind, aus fachdidaktischer Perspektive jedoch ein besonders Potenzial zur Gestaltung von Lehr-Lernprozessen bieten. Im Erschließen und Gestalten derartiger Lernangebote liegt heute neben der technischen Weiterentwicklung des Formats ein primäres Arbeitsgebiet der IBE-Forschung.

4. Didaktischer Nutzen und Ausblick

Über die Methoden zur Bestimmung des Erdradius erfährt man in der Regel entweder per verbaler Mitteilung oder liest den entsprechenden Abschnitt im Buch nach. In den seltensten Fällen wird man eine derartige Messung selbst ausgeführt haben. Zwar wird eine geeignete Methode in der Literatur beschrieben [8], ihre Durchführung bedarf aber eines erheblichen Aufwands astronomischer Beobachtungen des Sternhimmels an zwei Orten, der im Unterricht kaum vertretbar ist. Das IBE dazu stellt diese Situation am künstlichen Sternhimmel in einem Projektionsplanetarium dar. Der Benutzer ist hier in der Situation des Vorführers: er bedient den Planetariumsprojektor ähnlich wie in der Realität und kann am Himmel die erforderlichen Messung ausführen. Als Resultat der weiteren Auswertung erhält man somit den Erdradius nicht durch bloßes Ablesen aus einem Tafelwerk, sondern als Ergebnis eigener Handlungen. Natürlich sind diese nur ausschnittthaft im Kontext der Lernaufgabe möglich.

Die didaktisch relevanten Eigenschaften des Mediums IBE liegen in dem flexiblen und bedarfsgerechten Bereitstellen von experimenteller Anschauung durch die Erfassung natürlicher physikalischer Phänomene als einer Synthese von Einzelbild, Bewegtbild und Ton. Eine weitere Eigenschaft mit besonderer Relevanz für das Physiklernen ist die

Möglichkeit der Parametervariation durch experimentell bezogene Handlungen. Im Rahmen aktiv gestalteter Lernprozesse werden besonders im Verbund mit dem Realexperiment didaktisch-methodische Konzepte realisierbar, die mit konventionellen Medien bisher nicht umsetzbar waren. Auch die mit der passiven Medienrezeption verbundenen Probleme der Bildverarbeitung (Aufmerksamkeit, Verarbeitungskapazität) könnten hierdurch gemildert, wenn nicht sogar aufgehoben werden. Hierzu liegen bis jetzt allerdings noch keine empirischen Ergebnisse vor.

Die momentanen Parameterwerte, die Mauskoordinaten und andere relevante Benutzeraktionen werden in der Tiefenstruktur des IBE im so genannten „Zustandsvektor“ repräsentiert. Eine Veränderung seiner Komponenten bedeutet eine unmittelbare Veränderung der Oberfläche des multimedialen Systems, also des Bildinhalts. Damit lässt sich das IBE durch numerische Daten (fern-)steuern, also auch zeitbasiert darstellen. Genauer sind zu einem IBE innerhalb der durch den Darstellungsraum gegebenen Möglichkeiten verschiedene zeitbasierte Repräsentationen eines Experiments möglich. Didaktisch besonders interessant ist dabei die fortlaufende Aufzeichnung des Zustandsvektors in einer Protokolldatei. Nutzt man diese umgekehrt zur Steuerung des IBE lässt sich so jederzeit die Durchführung des Experiments zum Beispiel durch einen Lernenden betrachten und analysieren [9]. Zudem sind auch Demonstrationen denkbar, die sich einfach per Textdatei verteilen lassen, also auch bei kleinen Bandbreiten leicht zu übertragen sind.

Besonders in der Verknüpfung experimenteller Angebote der Präsenzveranstaltungen mit der individuellen Wiederholung und Nachbereitung liegen die ausgezeichneten didaktischen Vorteile des IBE-Einsatzes. IBE sind so ein Bestandteil von Übungsgruppen, in denen Studierende Inhalte der Experimentalphysikvorlesungen in der Gruppe konsolidieren, sie lassen sich aber auch jederzeit und überall individuell nutzen. Ein weiterer Nutzen liegt in der Einbeziehung von Experimenten in virtuelle Lerngruppen - einer denkbaren Erweiterung bisheriger universitärer Lernangebote. In dieser synchronen Kommunikationssituation übernimmt ein Gruppenmitglied die Kontrolle über das für alle sichtbare Experiment und steuert dies. Über Video- und Audio-Kommunikation lässt sich so in der Gruppe gemeinsam über die Reaktionen des Experiments diskutieren. Auch hier ist ein Vorteil gegenüber einer entsprechenden zeitbasierten Darstellung zu erwarten, die lediglich das gemeinsame Betrachten des vorgeführten Experiments erlaubt. Jedoch liegen auch hierzu noch keine gesicherten Erkenntnisse vor.

In naher Zukunft werden Konzepte mobilen Lernens durch nutzungsgerechte Hardware wie den „Slate-PC“ und den Ausbau der WLAN-Infrastruktur in den Bildungseinrichtungen und an öffentlichen Plätzen

zum Alltag des lebensbegleitenden Lernens gehören. Hierbei könnten Medien wie das IBE neben vielen anderen Formaten zu den für die das Physiklernen wesentlichen Angeboten gehören. Multimediale Dokumente wie das IBE sollen (und können) dabei die reale Erfahrung mit dem Experiment nicht ersetzen. Sie stellen aber eine Ergänzung und Erweiterung der Ansätze konstruktiven und situativen Lernens mit Experimenten in Präsenzangeboten dar [10] und sollen damit helfen, das Physiklernen interessanter, vielfältiger, effektiver und damit bedarfsgerechter zu gestalten. „Effektivität“ zielt dabei besonders auf die Anwendbarkeit des erworbenen Wissens; eines der Defizite rezeptiv orientierter Lehrmethoden.

5. Referenzen

- [1] Brockhaus Enzyklopädie. Mannheim 1992
- [2] Hafner, E. M.: Corridor Demonstrations. In: Meiners, H.F.: Physics Demonstration Experiments, Vol. II. New York 1970
- [3] www.telekolleg.de (Stand 6/2003)
- [4] Bersch, H.-J.; Wiederkehr, K. H.: Klassische Experimente der Physik. Hamburg 1970
- [5] Schönfeld, W. H.: Hochfrequenztechnik. Hamburg 1970.
- [6] Kirstein, J.; Rass, R.: Interaktive Bildschirmexperimente - eine neue Möglichkeit zum individuellen Lernen mit Multimedia. In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 50 (1997), 27-28.
- [7] Kirstein, J.: Interaktive Bildschirmexperimente - Technik und Didaktik eines neuartigen Verfahrens zur multimedialen Abbildung physikalischer Experimente. Dissertation, Technische Universität Berlin 1999.
- [8] Schlosser, W.: Astronomische Musterversuche für die sekundarstufe II. Frankfurt 1981.
- [9] Zastrow, M.: Interaktive Experimentieranleitungen. Berlin (Logos) 2001.
- [10] Kirstein, J.; Rothenhagen, A.: Bildschirmexperimente – Beispiele für die Einbettung neuer Medien in den experimentellen Unterricht. In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik 13 (2002) Heft 69, 20-23.

6. Anschrift des Verfassers:

Dr. Jürgen Kirstein
 Technische Universität Berlin
 Institut für Atomare Physik und Fachdidaktik
 Sekr. PN 1-1, Hardenbergstr. 36, 10623 Berlin
 Tel.: 030-314-23053/56
 Fax: 030-314-23057
 E-Mail:juergen.kirstein@physik.tu-berlin.de
 Web: www.ibe.tu-berlin.de