

Peuckert, Jochen

Problemfeld Langzeitwissen - Nutzung kognitiver Lerntheorien bei der Gestaltung von Physikunterricht (Beispiel: Optik)

Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften : ZfDN 3 (1997) 1, S. 21-34



Quellenangabe/ Reference:

Peuckert, Jochen: Problemfeld Langzeitwissen - Nutzung kognitiver Lerntheorien bei der Gestaltung von Physikunterricht (Beispiel: Optik) - In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften : ZfDN 3 (1997) 1, S. 21-34 - URN: urn:nbn:de:0111-pedocs-314885 - DOI: 10.25656/01:31488

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0111-pedocs-314885>

<https://doi.org/10.25656/01:31488>

in Kooperation mit / in cooperation with:



IPN

Leibniz-Institut für die Pädagogik der
Naturwissenschaften und Mathematik

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

Nutzungsbedingungen

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

Mit der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Terms of use

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

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

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

Kontakt / Contact:

peDOCS

DIPF | Leibniz-Institut für Bildungsforschung und Bildungsinformation
Informationszentrum (IZ) Bildung

E-Mail: pedocs@dipf.de

Internet: www.pedocs.de

Digitalisiert

Mitglied der


Leibniz-Gemeinschaft

JOCHEN PEUCKERT

Problemfeld Langzeitwissen - Nutzung kognitiver Lerntheorien bei der Gestaltung von Physikunterricht (Beispiel: Optik)

Zusammenfassung:

In der Schulpraxis ist der Mangel an "Langzeitwissen" Gegenstand zahlreicher Klagen der Lehrerschaft und Inhalt von Aufrufen der Schulverwaltung. Aus zwei Rahmenmodellen der kognitiven Lernpsychologie, der Multi-Speicher-Theorie und dem Modell der Elaboriertheit der Enkodierung lassen sich in Verbindung mit weitergehenden gedächtnispsychologischen Vorstellungen lokale (auf die Einzelstunde bezogene) und globale (auf die Unterrichtseinheit bezogene) Gestaltungsmomente für einen Physikunterricht entwickeln, der den Erwerb von langfristig verfügbarem Wissen zum Ziel hat. In diesem Beitrag wird ein entsprechendes Konzept auszugsweise vorgestellt, welches im Rahmen einer Arbeit zum Zweiten Staatsexamen für den Optik-Anfangsunterricht in Klasse 8 erarbeitet und dokumentiert wurde. Es zeigt sich, daß ein lerntheoriegeleiteter Unterricht mit vertretbarem Aufwand planbar und erfolgreich realisierbar ist sowie von den Schülern gut angenommen wird.

Abstract:

The lack of long-term available knowledge is often lamented by teachers and school boards. New teaching methods trying to lead to long-term retention are developed by using framework concepts of cognitive psychology, the "multistore model" and the concept of "elaborated encoding", and by using further detailed models of human memory. In this study a concrete concept is presented in extracts for introducing 8th-grade students into optics, which has been worked out during the phase of teacher training. It turns out, that lessons guided by learning theory do not require too great effort to be planned, can be carried out successfully and are well accepted by the students.

1. Einleitung

Der Erwerb von Wissen, insbesondere von langfristig verfügbarem deklarativen Wissen, ist erklärtes Ziel der Schulausbildung. Es ist Voraussetzung für ein Voranschreiten des Unterrichts und nicht zuletzt für einen erfolgreichen Schulabschluß. Ob von einer "Wissensrenaissance" (Arbinger, 1991) zu sprechen ist, oder aber die Schulpraxis anderslautende Lernzieltaxonomien unbeschadet überstanden hat, sei dahingestellt.

In jüngerer Zeit ist die Untersuchung von Lernprozessen vor dem Hintergrund eines konstruktivistischen Verständnisses von Lernen zum Gegenstand fachdidaktischer Forschung geworden (unter vielen z. B. Galili, Bendall & Goldberg, 1993; Lichtfeldt, 1992; Niedderer & Goldberg, 1995; Wiesner, 1995). Dabei konzentriert sich die Aufmerksamkeit auf die Beschreibung und Analyse von Schülervorstellungen, deren Berücksichtigung ein unverzichtbarer Aspekt eines lernpsychologisch orientierten Unterrichts ist.

Die Beschäftigung mit Schülervorstellungen ist naturgemäß themenbezogen. Dies hat den Vorteil, daß sich inhaltsbedingte Lernschwierigkeiten aufdecken und in Unterrichtskonzepten einbeziehen lassen, inhaltsübergreifende Momente können von diesen Lernprozessstudien aber nur unzureichend berücksichtigt werden.

Darüber hinaus stehen Fragen der zeitlichen Stabilität von Wissen bisher nur am Rande der Auseinandersetzung mit Schülervorstellungen.

In dieser Arbeit soll daher ergänzend versucht werden, auf der Basis lernpsychologischer Modelle Gestaltungsmomente für einen am Langzeitwissen orientierten Unterricht zu entwickeln sowie für das Fach zu spezifizieren.

Diese richten sich natürlich nur an die ganze Klasse und können nicht alle Schülervorstellungen integrieren. Dennoch scheint mir ein solches pragmatisches Vorgehen eine wichtige Ergänzung in den Bemühungen um schulisches Lernen, zumal die gewöhnliche Größe

der Lerngruppen und nicht zuletzt das Fehlen geeigneter Diagnoseinstrumente bislang die individuelle Auseinandersetzung mit Schüler- vorstellungen nahezu unmöglich macht.

Konkrete und übertragbare Anregungen bekommen umso größeres Gewicht, als gemäß eigener Erfahrung aus Schulkreisen das Thema "Lernen" nicht im Mittelpunkt des Lehrerinteresses steht und ebenso die Referendarausbildung den Schwerpunkt eher auf das Lehren als das Lernen legt.

2. Das Projekt

Was sind die Bedingungen für den Erwerb langfristig verfügbaren Wissens? Wie läßt sich Physikunterricht planen und gestalten, der diesen Bedingungen genügt?

Diese Fragen leiteten ein Unterrichtsprojekt zur Einführung in die Optik (20 Stunden, Klasse 8), das als Staatsexamensarbeit im Rahmen der zweiten Phase der Lehrerausbildung 1995 an einem Berliner Gymnasium durchgeführt und dokumentiert wurde. Die nachfolgenden Ausführungen zeigen unabhängig vom Inhalt zugleich Möglichkeiten und Grenzen der fachdidaktischen Arbeit im Referendariat auf.

So war für dieses Projekt entsprechend den Randbedingungen einer viermonatigen Bearbeitungszeit und parallel laufenden Unterrichtsverpflichtungen nur eine eingeschränkte Evaluation möglich.

Die hier dargestellten Ausschnitte wollen daher weniger eine Antwort darauf geben, ob tatsächlich Langzeitwissen erworben wurde als vielmehr, wie abgeleitete Gestaltungsmomente konsequent in praktischen Unterricht umsetzbar sind. Die Verifizierung lernpsychologischer Modelle konnte nicht Aufgabe des Projekts sein.

3. Modelle der kognitiven Lernpsychologie

Zur Einstimmung und begrifflichen Festlegung seien nachfolgend in Kürze die theoretischen Grundlagen referiert, auf die die späteren Ausführungen rekurren.

3.1 Multi-Speicher-Theorie und Laborierte Enkodierung

Die Erarbeitung konkreter Unterrichtsmaßnahmen stützt sich zunächst auf zwei Modelle der Informationsverarbeitung. Die wesentlich von Atkinson & Shiffrin (1968) geprägte und als Rahmenvorstellung bis heute (vgl. zur Übersicht z. B. Markowitsch, 1992, 1-6) verbreitete Multi-Speicher-Theorie des Gedächtnisses postuliert unter anderem aufgrund sogenannter serialer Positionseffekte zwei (bis drei) separate Speicher. Eine im sogenannten Kurzzeitspeicher kursierende Information kann in ein Langzeitgedächtnis übergehen, wenn nicht zeitlicher Verfall oder Interferenzeffekte entgegenstehen. Diese vornehmlich auf den zeitlichen Ablauf der Informationsverarbeitung ausgerichtete Beschreibung kann jedoch nicht Effekte verschiedenartiger Enkodierung integrieren, die vom Lernangebot sowie vom Lernenden selbst abhängt. Das Modell der Elaboriertheit der Enkodierung, das auf Craik und Lockhart (1972) zurückgeht, löst sich daher von einer festen Sequenz von Verarbeitungsstufen und beschreibt das Erinnerungsvermögen als Funktion der Elaboriertheit ("Reichhaltigkeit") der Informationsverarbeitung (vgl. z. B. auch Tulving, 1985; Lockhart & Craik, 1990; zur Übersicht auch Wessels, 1994). Die Elaboration wiederum ist in dieser Vorstellung durch die Verwendung verschiedener Verarbeitungsebenen (physisch, phonemisch, semantisch) bestimmt, speziell die semantische Elaboration durch den vielfältigen Aufbau von Beziehungen zu Bekanntem.

3.2 Gedächtnissysteme

Die nachstehende Grafik versucht, die beiden vorstehend angedeuteten klassischen Positionen der Informationsverarbeitung zu verbinden und um weitergehende inhaltsorientierte Modelle der Gedächtnisforschung zu ergänzen (zu Gedächtnistaxonomien vgl. z. B. Tulving, 1985; Markowitsch, 1992, 7 f.). Die Grafik bildet gleichzeitig die Basis für die später beschriebenen Gestaltungsmomente des

Unterrichts, die quasi als "Operatoren" zwischen den Gedächtniselementen fungieren.

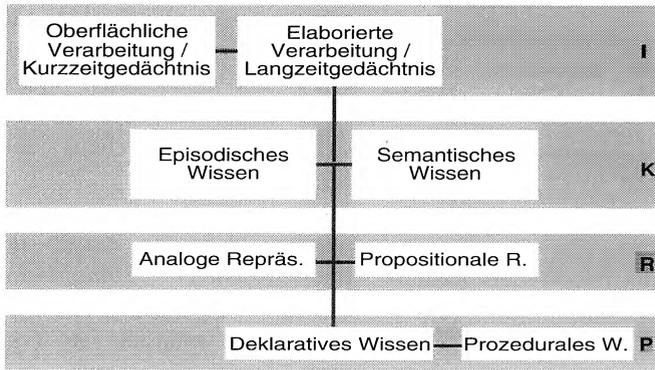


Abb. 1: Einteilungen des Gedächtnisses unter dem Informationsverarbeitungsaspekt (I), dem Kontextaspekt (K), dem Repräsentationsaspekt (R) und dem Prozessaspekt (P).

Zentrale Begriffe der Gedächtnispsychologie können gemäß ihres Anwendungsbereiches unterschiedlichen Ebenen zugeordnet werden. Die oberste Ebene (I) - und dies soll keine Hierarchie implizieren - rekurriert auf die vorstehend genannten Modelle der Informationsverarbeitung. Unter dem Behaltensaspekt wird eine oberflächliche wenig elaborierte Verarbeitung dem Kurzzeitgedächtnis zugeordnet, eine tiefe elaborierte Verarbeitung dem Langzeitgedächtnis.

Um Aufbau und Abrufbarkeit von Langzeitwissen verstehen zu können, ist eine detailliertere Beschreibung der Informationsspeicherung vonnöten. Eine erste Unterscheidung wird in der Ebene K von Abb. 1 vorgenommen. Zum einen werden Lerngegenstände als vorwiegend kontextgebundenes episodisches Wissen gespeichert (Tulving, 1985), zum anderen werden Informationen vorwiegend kontextfrei semantisch gespeichert, i. e. gemäß ihrer Bedeutung für den Lernenden in ein Netzwerk von Begriffen integriert, wobei das Maß der Integration als abhängig von der Elaboriertheit der Enkodierung angesehen wird. In diesem Zusammenhang ist die Abhängigkeit der Erinnerungsleistung von der Elaboration leicht verständlich. Ein Abrufreiz ist nämlich dann mit hoher Wahrscheinlichkeit erfolgreich, wenn das seman-

tische Netzwerk dank hoher Elaboration viele Wege zum Lerngegenstand bietet. Die Verbindungen zwischen den Elementen des semantischen Gedächtnisses sind z. B. von Klix (1976) sowie von Norman und Rumelhart (1978) sehr differenziert betrachtet worden. Im folgenden soll die grobe Unterscheidung von attributiven und relationalen Zuordnungen ausreichen (Hunt u. Einstein, 1981), die das Produkt von Elaboration innerhalb eines Lerngegenstandes sind bzw. einer Elaboration durch Verbindungen zu externen Anhaltspunkten entsprechen.

Weitere Vorstellungen (Ebene R von Abb. 1) betreffen die Repräsentation von Wissen und unterscheiden zwischen der vorstehend schon angedeuteten propositionalen Form und einer analogen Form der Wissensrepräsentation (dual coding theory: vgl. Paivio, 1971 u. 1991).

Wieder andere Modelle (Ebene P), die im Unterrichtskonzept nur eine Nebenrolle spielen sollen, berücksichtigen die Verschiedenartigkeit kognitiver Prozesse und postulieren neben dem bisher beschriebenen deklarativen Wissen ein prozedurales Wissen (Handlungswissen) (Tulving, 1985; Anderson, 1989).

4. Implikationen für den Unterricht und ihre Realisierung

4.1 Lokale Gestaltungsmomente

Hier sollen zunächst die Folgerungen dargelegt werden, die hauptsächlich Verlauf und Form der einzelnen Unterrichtsstunde betreffen. Ihr Ursprung im gedächtnistheoretischen Kontext kann der nachstehenden Grafik entnommen werden, die aus Abb. 1 entwickelt ist.

Natürlich kann die Realisierung dieser Gestaltungsmomente im Rahmen einer solchen Darstellung nur sehr ausschnitthaft illustriert werden.



Abb. 2: Gestaltungsmomente im gedächtnistheoretischen Kontext. Auf diese Abbildung wird in den folgenden Abschnitten Bezug genommen (4.1.1 - 4.1.6 und 4.2.4). Dort werden auch die Abkürzungen erläutert.

4.1.1 Berücksichtigung der Verarbeitungsebenen (VE in Abb.2)

Wenn auch der Lehrer im Gruppenunterricht auf die Einbindung von Information im semantischen Gedächtnis aufgrund der Individualität dieses Prozesses direkt nur geringen Zugriff hat, so können doch die physische wie auch die phonemische (lauthafte) Verarbeitungsebene so breit angeregt werden, daß Anknüpfungspunkte für eine semantische Verarbeitung geschaffen werden. Dazu gehört zum einen, daß verschiedene Arten der physischen Wahrnehmung angesprochen werden. Gerade der Physikunterricht ist geeignet, dem Schüler Möglichkeiten der optischen, haptischen und akustischen Verarbeitung zu bieten.

- Das Unterrichtskonzept versucht folglich, bei jedem Lerngegenstand wenigstens zwei dieser Wahrnehmungskanäle anzusprechen. So wird beispielsweise die Geradlinigkeit der Lichtausbreitung (auch aus einer Vielzahl anderer Gründe heraus) nicht durch den typischen Magnettafel-Versuch des verengten Lichtbündels demonstriert, sondern - als intuitiv bekannt vorausgesetzt - mittels einer Peilaufgabe von allen Schülern eigentätig optisch nachvollzogen und haptisch modelliert (vgl. Abb. 3).

Zum anderen sollte auch die phonemische Verarbeitung angeregt werden. Gerade der mathematisch-naturwissenschaftliche

Unterricht ist häufig durch eine Darstellung der Lerninhalte in abkürzender, schematischer oder graphisch abstrahierender Form gekennzeichnet. Diese hat auch unter später (vgl. 4.1.4) ausgeführten Gesichtspunkten durchaus ihre Berechtigung.

Es darf jedoch nicht vergessen werden, daß der Prozeß der phonemischen Enkodierung nur über eine ausführliche Verbalisierung möglich ist (vgl. zum "writing-to-learn" auch Rivard, 1994).

- Das Unterrichtskonzept betont daher die Formulierung von Lerninhalten in schriftlicher Form, wobei die Texte von Schülern formuliert oder schülernah gestaltet werden, da ein größerer Anreiz zu phonemischer Enkodierung besteht, wenn der altersgemäße Sprachaufbau berücksichtigt wird. Zur regelmäßigen Verbalisierung der Lerninhalte durch die Schüler werden hier Arbeitsbögen mit sogenannten "Gesprächen über Sehen und Licht" genutzt, in denen die Schüler in die Rolle eines Lehrers treten, der gefordert ist, zu vorgegebenen Problemen schriftlich Stellung zu nehmen. Der nachstehende Text zeigt Ausschnitte aus diesen Arbeiten.

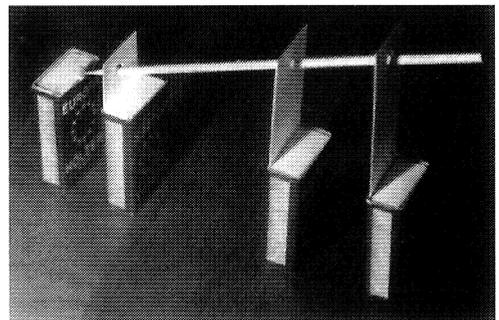


Abb. 3 "Richte die Lochblenden so aus, daß Du den Streichholzkopf (eingesteckt in die Schachtel oben links, Anm. d. Autors) möglichst vollständig sehen kannst. Versuche nun, den Holzspieß durch die Blendenöffnungen zu schieben ..."

Die mit "Schüler: ..." beginnenden Texte sind vorgegeben, die kursiv gedruckten reproduzieren die Ausführungen der Schüler dazu (ohne orthographische Korrekturen).

Schüler: Das werde ich gleich mal probieren. Tatsächlich! Bei der langen Badezimmerlampe klappt es aber nicht so mit dem Schatten. Ich glaube, das Lichtstrahlmodell taugt doch nichts. Ich weiß gar nicht, wo ich loszeichnen soll?

Lehrer: Das ist das zentrale Problem. Die lange Badlampe ist eine ausgedehnte Lichtquelle. Trotzdem kann Dir das Lichtstrahlmodell helfen. Stell' dir vor, ...
die Lampe besteht aus mehreren Punktlichtquellen (wie viele Teelichte). Also kannst du Dir zum Beispiel acht Punkte aus der Lampe suchen. Diese stellen die Teelichte als Reihe dar. Nun zeichnest Du genau wie bei der Punktlichtquelle die Randstrahlen und stellst so einen Übergangsschatten dar.

Schüler: ...
Da bleibe ich doch lieber beim Adventskranz. So beim zweiten Advent vielleicht. Schon bei zwei Kerzen gibt es helle und dunkle Schattenbereiche.

Lehrer: Das liegt daran, daß ...
der Schatten der ersten Kerze vom Licht der zweiten beschienen wird. Das nennt man dann Halbschatten. Den Teil, der gar nicht von Licht beschienen ist, nennt man Kernschatten.

Schüler: ...
Gerichtete Reflexion - ungerichtete Reflexion - was soll dieser Unterschied? In jedem Fall wird doch Licht zurückgeworfen?!

Lehrer: Das ist richtig, aber es macht doch einen Unterschied, ob ein Gegenstand das Licht gerichtet oder ungerichtet reflektiert. Sonst könnte man ...

im Spiegel weder Gegenstände noch Personen sehen.

oder:

Sonst könnte man ...

sich ja in einem Blatt Papier spiegeln, und das geht nur mit Gegenständen, z. B. Glas Porzellan Spiegel die gerichtet reflektieren

oder:

Sonst könnte man ...

nicht mit dem Spiegel eine bestimmte Stelle anleuchten, sich in einem Spiegel spiegeln!

Deutlich wurde dabei, daß es vielen Schülern schwer fällt, den abstrakten Lerninhalt von Konstruktionen und Symbolen oder manch eine "diffuse Einsicht" in einen konkreten, verständlichen oder gar ausführlichen Text zu übertragen. Es erscheint mir daher als wichtiges Anliegen, diese Textarbeit weiter auszubauen, zumal auch das episodische Gedächtnis angesprochen wird und die Schüler eine im Hinblick auf Langzeitwissen wichtige Kompetenz erwerben können - nämlich Physik im Alltagsgespräch darzulegen.

- Neben diesen schriftlichen Verbalisierungen sieht das Unterrichtskonzept auch die mündliche Erläuterung im freien Kurzvortrag vor, z. B. im Rahmen von Hausaufgaben.

4.1.2 Elaborierte Enkodierung (AV und BA in Abb. 2; vgl. Text)

Faßt man Lernen nicht als deterministischen Produktionsvorgang auf, sondern eher als Prozeß von Selbstorganisation, so bietet die ausgiebige Elaboration von Lernmaterial neben der Chance zu langfristiger Retention auch die Gelegenheit zur Assimilation unterschiedlicher Vorstellungen innerhalb der Lerngruppe, indem sie quasi als individuelles Korrektiv vor dem Hintergrund sozialer Interaktion wirkt.

Elaborierte Enkodierung kann - wie oben angedeutet - auf zwei Arten erfolgen: itemspezifisch durch Erarbeitung einer Attributvielfalt (AV) und relational durch das Heraus-

stellen von Beziehungen und Abgrenzungen (BA), die Unterschiede, Vereinfachungen, Hierarchien oder Analogien beschreiben. Die Elaboration ermöglicht ein Lösen vom Kontext, in welchem der Lerngegenstand eingeführt wurde, bedeutet die Fähigkeit zum Transfer und stellt somit aus gedächtnispsychologischer Sicht den Übergang vom episodischen zum semantischen Gedächtnis dar: erst durch den Vergleich von Episoden können übergeordnete Merkmale erkannt und einer semantischen Struktur zugeführt werden.

- Das Unterrichtskonzept berücksichtigt daher, daß für die Lerngegenstände eine Vielzahl von Merkmalen und Beispielen gefunden werden, daß Effekte in verschiedenen Anordnungen und Ausprägungen angeboten werden, daß die Relationen untereinander sowie zu Vorerfahrungen und Alltagsbeobachtung aufgezeigt werden. Ziel der Elaboration ist, dem Schüler die optimale Gelegenheit zur Kategorisierung des Materials und damit zur Bildung geeigneter Schemata (vgl. z. B. Abelson, 1981; Alba & Hasher, 1983) zu bieten, die dann so starken "Programmcharakter" (Jung, 1986) besitzen, daß sie neben Alltagsvorstellungen dauerhaft bestehen können.

So treten die zentralen Lerninhalte nicht nur in einer Stunde auf, sondern werden nach ihrer Einführung unter verschiedenen Gesichtspunkten immer wieder thematisiert. Dies kann aus Platzgründen hier nur an einem Beispiel - ich wähle das Reflexionsgesetz - aufgezeigt werden (die Erläuterungen bezüglich der Elaboration stehen jeweils in Klammern).

Zunächst findet eine Einführung auf propädeutischem Niveau durch einen Filmausschnitt - "Die Feuerzangenbowle": Völkerwanderung - als kleiner Teil von Stunde 10 statt, in der die gerichtete Reflexion an glatten Oberflächen in den Kontext anderer Phänomene (Beziehungen, Abgrenzungen) beim Lichteinfall auf verschiedenartige Körper gestellt wird. In Stunde 11 schließt sich ein Feldversuch (vgl. auch 4.2.1) an, bei dem die

Schüler gefordert sind, fest angeordnete Objekte, hier kleine Nummernkärtchen, "in" einem Wandspiegel zu sehen und mehrere mögliche Standorte auf einem Lageplan zu markieren (Vorerfahrung einbetten, Alltagsbezug). Die Ergebnisse dieses Versuches werden in Stunde 12 mit den Vorstellungen zur Lichtwahrnehmung und -ausbreitung in Verbindung gebracht (Beziehungen), mit den vielen Schülern bereits bekannten Fachbegriffen korreliert (neue Attribute) und als Konstruktionsaufgabe in ein weiteres Realproblem (Alltagsbezug) übertragen. Stunde 13 stellt rekurrierend auf die Filmszene mit "Lichtfleck" die für ein Verständnis wichtige Erweiterung auf reflektierte Lichtbündel (neue Merkmale) her und demonstriert so den Wert des Lichtstrahlmodells zur Beschreibung der Reflexion (Programmcharakter stärken). In einer Schüleraufgabe in Stunde 14 wird die zusätzliche "Ebenen-Bedingung" der Reflexion im wahrsten Wortsinn erfaßt, indem die Reflexion durch in Klebwachs gesteckte Holzspieße simuliert wird, und eine entsprechende Prognose wird für ein Realexperiment aufgestellt (Abgrenzung durch Verschärfung). Der Bezug zu Wahrnehmungen aus dem Feldversuch hinsichtlich Körpergröße der Betrachter, Spiegelhöhe und Objekthöhe wird hergestellt (Vorerfahrung einbetten). Die Erarbeitung der Lage des virtuellen Bildes in Stunde 15 greift wiederum auf das Reflexionsgesetz zurück und stellt es in den Zusammenhang mit dem Spiegelbild ("neue" Ausprägung des Phänomens). Anschließend wird die für ein Ganzkörperbild notwendige Spiegelgröße und optimale Aufhängung bei vorgegebenen Maßen durch Konstruktion ermittelt (Beziehung zu latent Bekanntem). Schließlich wird das Phänomen der Reflexion auch im Rahmen der Lichtbrechung wieder aufgegriffen (Totalreflexion als neue Ausprägung, neuer Kontext).

4.1.3 Wiederholung

(WH und EWH in Abb. 2; vgl. Text)

Im Unterricht müssen zwei Arten der Wiederholung berücksichtigt werden: die erhal-

tende und die elaborierte Wiederholung. Die erhaltende Wiederholung (WH) ist gemäß dem Multi-Speicher-Ansatz Voraussetzung dafür, daß Information in das Langzeitgedächtnis aufgenommen werden kann.

- Das Unterrichtskonzept berücksichtigt dies, indem Arbeitsergebnisse mündlich und schriftlich repetiert werden. Speziell für die Fachbegriffe werden Listen angelegt, die ein Memorieren ermöglichen und deren laufende Erweiterung im Unterricht neben den gewöhnlichen Mitschriften das Bewußtsein der Schüler für eine längere Zeit auf die neue Information lenkt, als das durch einmalige mündliche Nennung der Fall sein würde.

Dies gilt umso mehr, als die Auswahl wichtiger Begriffe von den Schülern selbst vorgenommen wird.

Eine elaborierte Wiederholung (EWH) ist mehr als eine Erhaltenswiederholung. Sie ist die Phase, in der die elaborierte Enkodierung von Lernmaterial mit den in 4.1.2 ausgeführten Ansprüchen eigentlich stattfindet. Sie ist zudem Gelegenheit, andere Arten der Wahrnehmung und andere Ebenen der Verarbeitung anzusprechen.

- Das Unterrichtskonzept sieht daher die elaborierte Wiederholung als eigenständige Arbeitsphase. Die "klassische" kurze Erhaltenswiederholung wird durch größere Zeiträume ersetzt, in welchen alter Lernstoff in neuem Zusammenhang dargeboten wird oder erkannt werden soll.

4.1.4 Strukturen zur Abruferleichterung (AS in Abb. 2)

Die Steigerung der Retentionsfähigkeit durch strukturierte Anordnung oder graphische Kurzdarstellung des Lernmaterials (graphic organizers) ist ein seit den frühen Zeiten der Gestaltpsychologie immer wieder experimentell bestätigter Effekt (vgl. z. B. Bower et al., 1969; im Unterricht z. B. Van Heuvelen, 1991; Griffin et al., 1995; Mayer et al., 1996; zur Übersicht auch Moore, 1984). Eine sehr spezielle Form dieser Anordnungen stellen die an semantische Teilstrukturen ange-

lehnten "concept maps" dar, die in jüngerer Zeit nicht nur zur Wissensdiagnose, sondern auch für Lernzwecke erfolgreich Verwendung finden (vgl. z. B. Al-Kunifed & Wandersee, 1990; Novak, 1990; Willerman, 1991; Jüngst, 1995).

Der positive Effekt strukturierter Anordnungen liegt im Kontext der Gedächtnispsychologie zum einen darin begründet, daß ein Abrufreiz in einer geeignet organisierten Struktur eine Hilfe zur raschen Erschließung der Lerngegenstände findet.

Ein Vorteil gegenüber anderen Lernhilfen ist, daß strukturierte Darstellungen sowohl analog als auch propositional repräsentierbar sind und somit der Inhalt bei Bedarf auf unterschiedliche Weise rekonstruiert werden kann. Unter dem Gesichtspunkt der Multi-Speicher-Theorie stellen strukturierte Anordnungen zum anderen durch ihren Bündelungseffekt eine Entlastung der kognitiven Kapazität dar (vgl. z. B. Lawson & Lawson, 1993), mag man auch heute die frühe Chunk-Theorie (Miller, 1956) als Zirkelschluß betrachten. Ein weiterer positiver Effekt ergibt sich, wenn solche Strukturen zunächst weitgehend leer als Gerüst bereitstehen und im Laufe des Unterrichts gefüllt werden.

Sie erfüllen dann eine Funktion ähnlich der von "advance organizers" (Ausubel, 1978), indem sie den eintreffenden Informationen gleich einen geeigneten Platz in der Gesamtstruktur zuweisen.

- Das Unterrichtskonzept sieht folglich insbesondere zur Zusammenstellung von Detailinformation tabellarische und graphische Übersichten vor.

Solche werden konkret zur Einführung einer Sender-Empfänger-Vorstellung (nach Wiesner, 1992, 1995) entwickelt, bei den Modellen der geradlinigen Lichtausbreitung (vgl. Abb. 6), bei Lichtquellen und Schattenarten, bei den Eigenschaften des Lochkamerabildes in Abhängigkeit von Kenngrößen des Geräts, bei der Untersuchung von Körpern bezüglich Lichtdurchlässigkeit und Oberflächenbeschaffenheit sowie zur Einordnung der Lichtbrechungsphänomene.

rium auskommt, enthält das episodische Gedächtnis kontext-gebundene zumeist autobiographische Information. Die Auffälligkeit oder im wahrsten Sinne die Merkwürdigkeit der Situation ist dabei ein Maß für die Behaltensleistung (vgl. z. B. Erickson & Jemison, 1985).

- Das Unterrichtskonzept berücksichtigt daher, daß zu zentralen Lerninhalten nachhaltige Situationen unter möglichst weitgehender Einbindung der Schüler geschaffen werden. Der Physikunterricht ist aufgrund seiner experimentellen Orientierung per se hervorragend geeignet, diese Art der Langzeitspeicherung zu ermöglichen.

Häufig dokumentierte Schüleräußerungen wie "das war doch damals, als wir ..." oder "können wir das nicht genau so machen wie bei ..." belegen, daß sich das episodische Gedächtnis durch einige situative "Marksteine" ansprechen ließ. Der oben bereits erwähnte Feldversuch zum Reflexionsgesetz war sicher eine solche Gelegenheit, vielleicht auch die Demonstration einer Lochkamera - eben nicht mit der "Leuchteins" auf der optischen Bank, sondern als große Sperrholzkiste mit der Aufnahme einer beleuchteten Kaffeekanne - gefolgt vom Bau entsprechender Modelle durch die Schüler, gewiß die Video-Simulation eines Taucher-Blicks aus dem Wasser nach oben u.v.m.

Auch fiktive Situationen (etwa bei den "Gesprächen über Sehen und Licht", vgl. 4.1.1) regten das episodische Gedächtnis an: Interviews zu einem Abschlußtest ließen erkennen, daß diese mittels Analogiebildung zur Aufgabenlösung herangezogen wurden.

4.1.7 Implikationen für den zeitlichen Aufbau einer Unterrichtsstunde, für Aktions- und Sozialformen

Will man die in den vorstehenden Punkten aufgestellten Forderungen ernst nehmen, so muß der Stundenverlauf die mit ihnen verbundenen zeitlichen Bedürfnisse konsequent berücksichtigen. Erstens kann und soll das Ansprechen mehrerer Verarbeitungsebenen

nicht gleichzeitig realisiert werden. Sinnvoller ist es, Lerngegenstände zu einem späteren Zeitpunkt auf einer Ebene anderer Verarbeitung erneut aufzugreifen. Nicht immer erlauben es jedoch die Randbedingungen, dies zeitsparend im Rahmen neuen Lernstoffes durchzuführen. Zweitens kann der Elaborationscharakter einer Wiederholung nur dann herausgestellt werden, wenn die Inhalte in neuer Form angeboten und durchdacht werden. Dies ist ungleich zeitaufwendiger als eine einfache Reproduktion. Folgt man drittens der Prämisse, daß elaborative Verarbeitung ein individueller aktiver Prozeß ist und kein Produktionsvorgang, so muß den Schülern genügend Gelegenheit gegeben werden, nicht nur kurz "ein-", sondern auch ausgiebig "auszuatmen" in Phasen der Eigenständigkeit und des eigenen Nachdenkens.

- Das Unterrichtskonzept sieht folglich vor, der "klassischen" Erarbeitungsphase, also der ersten Konfrontation mit neuem Lernmaterial, "im Mittel nur ein Drittel" einer Unterrichtsstunde zuzuordnen. Je mehr expressiver Natur sie ist, umso höher kann ihr Anteil an der Gesamtstunde sein. Es berücksichtigt zugleich generell, expressiven Phasen den Vorzug vor rezeptiven zu geben und damit ein starres Angebot der Verarbeitung durch ein flexibles zu ergänzen. Nicht zuletzt aus diesem Grund wird der am Gymnasium traditionell kleine Anteil an Schülerexperimenten (Merzyn, 1994, 242) möglichst erhöht und verstärkt Stillarbeit, Gruppenarbeit und Schülerkurzvortrag durchgeführt.

Die Dokumentation des durchgeführten Unterrichts zeigt, daß es möglich war, die Erarbeitungsphasen auf etwa 40% der Gesamtunterrichtszeit einzuschränken. Damit ist der Zeitraum für Elaboration tatsächlich geschaffen worden.

4.2 Globale Gestaltungsmomente

Während die in 4.1 dargelegten Implikationen eher "unterrichtstechnischer" Natur sind und damit unter geringer Modifikation auf andere Teilgebiete der Physik übertragen wer-

den können, soll nun auf die spezielle didaktische Herausforderung eingegangen werden, die ein lerntheoriegeleiteter Optikunterricht in Klasse 8 in sich birgt.

Es liegt nahe, daß ein an Langzeitwissen orientierter Unterricht die vorhandenen semantischen Strukturen aufgreift und Möglichkeiten bietet, neue Lerngegenstände attributiv oder distinktiv anzuknüpfen. So läßt er keine disjunkte Physik-Struktur ("träges Wissen", Mandl, 1993) entstehen, die von Abrufreizen zur Umwelterklärung nicht angesprochen würde und somit infolge ihrer Bedeutungslosigkeit auch langfristig nicht zu erhalten wäre. Da die fachdidaktische Literatur der letzten Jahre eine hinreichende Zahl entsprechender Vorschläge anbietet (für den Optikunterricht vor allem Wiesner, 1992 und 1995), sollen hier nur kurz einige zentrale Gedanken dargelegt werden, die für die Unterrichtseinheit richtungsweisend waren.

4.2.1 Optik - vom Sehen aus gesehen

Die Orientierung am Lernenden mündet in den Ansatz, die Optik - ganz im ethymologischen Sinne - konsequent als Lehre vom Sehen aufzufassen. Damit nimmt sie zu den Alltagsphänomenen Stellung, aus denen sich ja die Vorkonzepte ergeben haben und ergänzt, verfeinert oder falsifiziert diese. Das Vorgehen, den Schüler immer wieder Teil der Phänomene sein zu lassen, offenbart sich vorrangig in der Auswahl und Gestaltung der zum Erkenntnisgewinn herangezogenen Experimente. So werden erstens Anordnungen, die reale Seh- und Lichtausbreitungssituationen zeigen, den gewöhnlich präsentierten Magnettafelversuchen vorgezogen (siehe z. B. Abb. 3 und 4.1.2). Je näher zweitens das Experiment am Alltag ist, je vertrauter das Material ist, umso leichter kann es in vorhandene Schemata eingegliedert und später darauf zurückgegriffen werden (Conrad, 1972; Knopf & Neidhardt, 1989; Anderson, 1989). Je einfacher drittens ein Experiment ist, umso geringer sind die Anforderungen an die analoge Repräsentation. In diesem Zusammenhang ist es erwähnenswert, daß anfängliche

Befürchtungen, die häufige Arbeit mit Holzspießen, Klebwachs, Streichholzschachteln etc. könne als kindisch empfunden werden, in keinem Fall bestätigt wurden. Möglicherweise waren das mit diesem Material verbundene Kompetenzgefühl und die Eigentätigkeit Wegbereiter konzentrierter Auseinandersetzung. Berichte von Kollegen über Disziplinprobleme bei der Nachahmung des einen oder anderen Versuches verwundern nicht, wenn man berücksichtigt, daß diese dort nach entsprechenden Magnettafel-Demonstrationen und ohne eigentlichen Auftrag zum Erkenntnisgewinn eingesetzt wurden.

Neben experimentellen Implikationen ergeben sich - damit verbunden - auch Forderungen an die Arbeit mit dem Lichtstrahlmodell. Auf diese soll hier aus Platzgründen nicht eingegangen werden, da die Modellbildung ein eigenes Kapitel darstellen würde. Es möge der Hinweis auf flexible Anwendung verschiedener Realmodelle genügen (vgl. auch Abb. 4).

Eine am Sehen orientierte Optik-Einführung muß sich im besonderen Maße mit dem Prozeß der Lichtwahrnehmung auseinandersetzen. Zu dessen Beschreibung wird eine an Wiesner (1992) orientierte Sender-Empfänger-Vorstellung (SEV) eingeführt.

4.2.2 Feststellen kognitiver Voraussetzungen

Natürlich können bei realistischem Zeitaufwand in der gegenwärtigen Unterrichtsstruktur - im Gegensatz zu Forschungsvorhaben - individuelle Schülervorstellungen weder detailliert erfaßt noch stärker berücksichtigt werden, als dies durch das hier aufgezeigte allgemeine Lernangebot der Fall ist. Dennoch ist auch eine grobe Erfassung kognitiver Voraussetzungen sinnvoll, wie sie das Unterrichtskonzept in Form einer schriftlichen Befragung vorsieht. Zum einen kann nämlich davon ausgegangen werden, daß gewisse Präkonzepte und auch Zwischenzustände vorzugsweise verbreitet sind (vgl. z. B. Anderson, 1983; Brickhouse, 1994; Driver et al., 1994, 128-132; Feher und Rice, 1988;

Fetherstonhaugh & Treagust, 1992; Galili, Bendall & Goldberg, 1993; Reiner, 1991; Niedderer, 1996). Zum anderen ist die Kenntnis von Schülervorstellungen für ein am Sehen orientiertes Vorgehen von umso größerer Bedeutung, als von einer konzeptorientierten analytischen Wahrnehmung ausgegangen werden muß und nicht von einer informationsorientierten synthetischen Wahrnehmung (Palmer, 1975; Wilkening, 1988; Gordon 1989, 124; Kimchi, 1992), daß der Schüler im Experiment das sieht, was er seinen Vorstellungen gemäß sehen zu müssen glaubt.

Im Rahmen der Befragung sind nur zwei Fälle von 30 Schülern dokumentiert, bei denen vorab eine Sehstrahlen-Vorstellung existierte. Eine andere Frage, ob nämlich beleuchtete Körper Lichtquellen seien, wurde von 70% der Schüler negiert. Im Rahmen der oben erwähnten SEV reduzierte sich jedoch diese Schwierigkeit in kurzer Zeit auf ein Nomenklaturproblem. Die Geradlinigkeit der Lichtausbreitung war für alle Schüler intuitiv bekannt. Darauf rekurrierte die unter 4.1.1 dargestellte Vorgehensweise. Die Kurzformel des Reflexionsgesetzes war einigen Schülern geläufig, eine Konstruktionsaufgabe wurde jedoch - wenn überhaupt - mit einem konstanten rechten Winkel zwischen einfallendem und reflektierten Lichtstrahl "gelöst".

4.2.3 Meta-Lernen

Das Bewußtsein der Schüler um den eigenen Lernprozeß und die Kenntnis individuell erfolgreicher Strategien wird seit langem von den kognitiven Theorien als wichtige Unterstützung angesehen (Flavell & Wellman, 1977; Metcalf & Shimamura, 1995). Es sollte also auch Inhalt eines lernpsychologisch orientierten Unterrichts sein, über das Lernen an sich und die Unterrichtsgestaltung zu reflektieren (vgl. z. B. Baird, 1991; Gunstone et al., 1992).

Im Projekt erwiesen sich jedoch solche Themen für die Schüler der achten Klasse als neu und gewöhnungsbedürftig. Die Reaktionen reichten von höflicher Aufmerksamkeit über

Befremden bis hin zu offenem Desinteresse an entsprechender Auseinandersetzung, so daß sich die Unterrichtseinheit mit einigen Versuchen begnügen mußte. Den Schülern zu vermitteln, daß sie nicht "Opfer der Lehtërtätigkeit" sind, ist ein Prozeß, der breite Unterstützung und langfristige Anlage erfordert.

4.2.4 Implikationen für Auswahl und Anordnung der Themen

Das Unterrichtskonzept ist inhaltlich an den (Berliner) Rahmenplan gebunden, der 20 Unterrichtsstunden für einen einführenden Lehrgang in die geometrische Optik bis einschließlich Reflexion und Brechung vorsieht. Dieser soll zu einem qualitativen Verständnis führen. Eine übermäßige Mathematisierung wird daher vermieden, ebenso legen die aus den Lerntheorien abgeleiteten Folgerungen nahe, keine über die Minimalanforderungen des Rahmenplans hinausgehenden inhaltlichen Erweiterungen vorzunehmen, sofern sie nicht der Elaboration dienen: der vertiefenden Ergänzung soll der Vorzug gegeben werden gegenüber dem thematischen Neuland, das nur der Befriedigung des Lehrers bezüglich eines angeblichen "Niveaus" dienen könnte.

Von lerntheoretischen Gesichtspunkten geleitet ist auch die Anordnung der Teilthemen. Erstens soll die Abfolge möglichst oft eine Wiederholung des Gelernten in neuem Zusammenhang leisten. Speziell um ein sinnvolles Lernen zu ermöglichen, werden zweitens Begriffe und Konventionen - bisweilen abweichend von der durch den Rahmenplan empfohlenen Reihenfolge - erst dann eingeführt, wenn sie zur Beschreibung von Phänomenen benötigt werden oder sich aus diesen ergeben. So wird beispielsweise die ausgedehnte Lichtquelle erst im Zusammenhang mit der Schattenbildung (Übergangsschatten) thematisiert; durchsichtige, durchscheinende und undurchsichtige Körper finden ihren Platz erst im Kontext von Grenzflächen und Reflexion. Drittens ist die Vermeidung von Interferenzen (IV in Abb. 2) ein Anspruch an die Themenanordnung. Daher wird jeweils

versucht, ein Phänomen zunächst allgemein zu fassen und später erst Ausnahmen und Spezialfälle einzubringen. Die Erweiterung der SEV auf mehrere Zwischensender findet so z. B. erst bei der Beobachtung von Lichtreflexen statt, die ebene Spiegel an der Wand erzeugen, der Übergangsschatten wird erst nach Festigung der Randstrahlkonstruktion diskutiert etc. Ebenso sind Reflexionsgesetz und Lichtbrechung um einige Stunden voneinander entfernt, um begriffliche Ähnlichkeiten zu trennen.

5. Implikationen für die Unterrichtsplanung - ein neues Raster

Um die Berücksichtigung der abgeleiteten Gestaltungsmomente kontrollieren zu können, wurde ein neues Raster zur Planungsübersicht entwickelt. Es enthält in den Spalten Teile klassischer "Schemata", berücksichtigt aber darüber hinaus Angaben über die Funktion der einzelnen Phasen vor lernpsychologischem Hintergrund gemäß den in Abschnitt 4 ausgeführten Punkten. Es enthält explizit eine den Schülern in das Bewußtsein zu rückende Leitfrage oder Zielstellung der Unterrichtsstunde, um der lerntheoretischen Bedeutung einer solchen vorstrukturierenden Information gerecht zu werden. Es läßt erkennen, ob eine Phase eher expressiven oder rezeptiven Charakter besitzt und schützt damit vor dem Rückfall in eine "Produktions-Didaktik". Ein solches Raster zeigte inzwischen seine Brauchbarkeit auch in anderen Einheiten und Fächern (Mathematik, Informatik).

6. Schlußbemerkungen

Wenn man doch ein Wort bezüglich des Erwerbs von Langzeitwissen wagt, so sei zunächst die vergleichsweise große Aufmerksamkeit und Disziplin der Schüler während der Einheit erwähnt, die diesem Ziel gewiß förderlich waren. Auf Befragen hin erklärten sich 75% der Schüler als für einen Abschlußtest gut vorbereitet und daher frei von Prüfungssängsten. Das Testergebnis bestätigte,

daß die Schüler ihre Fähigkeiten realistisch einschätzten. Es ließ zudem nicht erkennen, daß lange zurückliegende Lerninhalte schlechter erinnert wurden.

Rückblickend zeigt sich, daß der Versuch einer lerntheoretischen Orientierung keine Forderungen stellt, die vom "normalen" Unterricht nicht mit realistisch hohem Aufwand bewältigt werden könnten. Lerntheoriegeleiteter Unterricht äußert sich nicht in außergewöhnlichen und aufwendigen Sonderstunden, er ist vielmehr die Summe vieler eher unscheinbarer Maßnahmen vor dem Hintergrund einer weitgehend am Lernprozeß des Schülers orientierten Didaktik.

Gewiß ist der eine oder andere hier vorgestellte Aspekt eines Optikunterrichts seit langem Teil des Unterrichtsrepertoires mancher Lehrerkollegen. Die vorstehenden Ausführungen waren auch weniger darauf bedacht, grundsätzlich Neues zu finden als vielmehr den Versuch einer konsequenten, bewußten und kontinuierlichen Umsetzung lerntheoretischen Gedankenguts in eine Unterrichtspraxis zu dokumentieren sowie Ähnliches anzudeuten.

Literatur

- Abelson, R. P. (1981). Psychological Status of the Script Concept. *American Psychologist* 36, 715-729.
- Alba, J. W. & Hasher, L. (1983). Is Memory Schematic? *Psychological Bulletin* 93, 203-231.
- Al-Kunified, A. & Wandersee, J. H. (1990). One Hundred References Related to Concept Mapping. *Journal of Research in Science Teaching* 27, 1069-1075.
- Anderson, J. R. (1989). *Kognitive Psychologie*. 2. Aufl. Heidelberg: Spektrum.
- Atkinson, R. C. & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In K. W. Spence & J. T. Spence (Eds.), *The psychology of learning and motivation*, Vol. 2, New York: Academic Press, 89-195.
- Arbinger, R. (1991). Wissensdiagnostik. In K. Ingenkamp & R. S. Jäger (Hrsg.), *Tests und Trends 9 - Jahrbuch der pädagogischen Diagnostik*. Weinheim: Beltz, 80-108.

- Ausubel, D. P. (1978). In defense of advance organizers: A reply to the critics. *Rewiev of Educational Research* 48, 251-257.
- Bower, G. et al. (1969). Hierarchical retrieval schemes in recall of categorized word lists. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 8, 323-343.
- Conrad, C. (1972) Cognitive economy in semantic memory. *Journal of Experimental Psychology* 92, 149-154.
- Craik, F. I. M. & Lockhart, R. S. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 11, 179-195.
- Driver, R. (1995). Konstruktivist Approaches to Science Teaching. In L. P. Steffe & J. Gale (Eds.), *Constructivism in Education*. Hillsdale, N.J.: Erlbaum, 385-400.
- Driver, R. et al. (1994). *Making Sense of Secondary Science*. London, Routledge.
- Erickson, J. R. & Jemison, C. R. (1991). Relations among measures of autobiographical memory. *Bulletin of the Psychosomatic Society* 29, 233-236.
- Fetherstonhaugh, T. & Treagust, D. T. (1992). Students' understanding of Light and Its Properties. *Science Education* 76, 653-672.
- Galili, I., Bendall, S. & Goldberg, F. (1993). The Effects of Prior Knowledge and Instruction on Understanding Image Formation. *Journal of Research in Science Teaching* 30, 271-301.
- Gordon, I. E. (1989). *Theories of Visual Perception*. Chichester (UK): Wiley.
- Griffin, C. C. et al. (1995). Effects of Graphic Organizer Intruction on Fifth-Grade Students. *The Journal of Educational Research* 89, 98-107.
- Gunstone et al. (1992). Some Long-Term Effects of Uninformed Conceptual Change. *Science Education* 76, 175-197.
- Van Heuvelen, A. (1991). Overview, Case Study Physics. *American Journal of Physics* 59, 898-907.
- Hunt, R. R. & Einstein, G. O. (1981). Relational and item-specific information in memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 20, 497-514.
- Jüngst, K. L. (1995). Studien zur didaktischen Nutzung von Concept Maps. *Unterrichtswissenschaft* 23, 229-250.
- Jung, W. (1986). Alltagsvorstellungen und das Lernen von Physik und Chemie. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie* 34, 100-104.
- Kimchi, R. (1992). Primacy of Wholistic Processing and Global/Local Paradigm: A Critical Review. *Psychol. Bulletin* 112, 24-38.
- Klix, F. et al. (1976). Die Unterscheidbarkeit von Klassen semantischer Relationen im menschlichen Gedächtnis. In F. Klix (Hrsg.), *Psychologische Beiträge zur Analyse kognitiver Prozesse*. Berlin: 1976, 302-314.
- Knopf, M. & Neidhardt, E. (1989). Gedächtnis für Handlungen unterschiedlicher Vertrautheit. *Sprache und Kognition* 8, 203-215.
- Lawson, D. I. & Lawson, A. E. (1993). Neural Principles of Memory and a Neural Theory of Analogical Insight. *Journal of Research in Science Teaching* 30, 1327-1348.
- Lichtfeldt, M. (1992). Schülervorstellungen in der Quantenphysik und ihre möglichen Veränderungen durch Unterricht. Essen: Westarp Wiss.
- Lockhart, R. S. & Craik, F. I. M. (1990). Levels of processing. *Canadian Journal of Psychology* 44, 87-112.
- Mandl. H. et al. (1993). Das träge Wissen. *Psychologie heute*, 64-69.
- Markowitsch, H. J. (1992). *Neuropsychologie des Gedächtnisses*. Göttingen: Hogrefe.
- Mayer, R. E. et al. (1996). When Less Is More: Meaningful Learning From Visual and Verbal Summaries of Science Textbook Lessons. *Journal of Educational Psychology* 88, 64-73.
- Merzyn, G. (1994). *Physikschulbücher, Physiklehrer und Physikunterricht*. Kiel: IPN.
- Metcalf, J. & Shimamura, A. P. (Eds.) (1995). *Metacognition: knowing about knowing*. Massachusetts: MIT.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two. Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Rewiev* 63, 81-97.
- Moore, D. W. & Readence, J. E. (1984). A Quantitative and Qualitative Review of Graphic Organizer Research. *Journal of Educational Research* 78, 11-17.
- Niedderer, H. (1996). Überblick über Lernprozessstudien in Physik. In R. Duit, Ch. v. Rhöneck (Hrsg.), *Lernen in den Naturwissenschaften*. Kiel: IPN, 119-144.
- Niedderer, H. & Goldberg, F. (1995). Lernprozesse beim elektrischen Stromkreis. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 1, 73-86.
- Norman, D. A. & Rumelhart, D. E. (1978). *Strukturen des Wissens*. Stuttgart: Klett-Cotta.

- Novak, J. D. (1990). Concept Mapping: A Useful Tool for Science Education. *Journal of Research in Science Teaching* 27, 937-949.
- Paivio, A. (1971). *Imagery And Verbal Processes*. New York: Holt, Rinehart & Winston
- Paivio, A. (1991). Dual coding theory. *Canadian Journal of Psychology* 45, 255-287.
- Palmer, S. E. (1978). Visuelle Wahrnehmung und Wissen. In D. A. Norman & D. E. Rumelhart, *Strukturen des Wissens*. Stuttgart: Klett-Cotta, 281-307.
- Reiner, M. (1991). Patterns of Thought on Light and Underlying Commitments. In R. Duit, F. Goldberg u. H. Niedderer (Eds.), *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies*. Kiel: IPN, 99-109.
- Rivard, L. P. (1994). A Review of Writing to Learn in Science: Implications for Practice and Research. *Journal of Research in Science Teaching* 31, 969-983.
- Tulving, E. (1983). *Elements of Episodic Memory*. London: Oxford University Press.
- Tulving, E. (1985). How many memory systems are there? *American Psychologist* 40, 385-398.
- Wessels, M. G. (1994). *Kognitive Psychologie*. 3. Aufl. München: Reinhardt.
- Wiesner, H. (1992). Verbesserung des Lernerfolgs im Unterricht über Optik I-IV. *Physik in der Schule* 30, 286-290, 326-331, 365-368, 410-413.
- Wiesner, H. (1995). Physikunterricht - an Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten orientiert. *Unterrichtswissenschaft* 23, 127-145.
- Wilkening, F (1988). Zur Rolle des Wissens in der Wahrnehmung. In H. Mandl u. H. Spada (Hrsg.), *Wissenspsychologie*. München: Psychologie-Verlags-Union, 203-211.
- Willermann, M. (1991). The Concept Map as an Advance Organizer. *Journal of Research in Science Teaching* 28, 705-711.

Jochen Peuckert ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentralinstitut für Fachdidaktiken der Freien Universität Berlin.

Jochen Peuckert
Freie Universität Berlin
ZI Fachdidaktiken
Habelschwerdter Allee 45
14195 Berlin
E-mail: peuckert@zedat.fu-berlin.de