

LERNTHEORETISCHE KONZEPTE FÜR MULTIMEDIAANWENDUNGEN ZUR PHYSIK

Raimund Girwitz

Pädagogische Hochschule Ludwigsburg, Reuteallee 46, 71634 Ludwigsburg

(Eingegangen: 24.09.2003; Angenommen: 28.04.2004)

Kurzfassung

Die Begriffe Multimodalität (Integration verschiedener Sinnesbereiche), Multicodierung (Darstellung in verschiedenen Codesystemen) und Interaktivität beschreiben besondere Stärken neuer Medien. Aus lernpsychologischen Betrachtungen und Untersuchungen lassen sich Leitlinien ableiten, wie sie in Multimedia-Anwendungen zur Physik lernwirksam werden können. Hierzu gehören: Das Fördern kognitiver Flexibilität, den sachgerechten Aufbau mentaler Modelle, "situated learning", Wissensstrukturierung und Vernetzung, Anpassen der kognitiven Belastung. In diesem Beitrag werden die theoretischen Überlegungen im Überblick vorgestellt und Beispiele für ihre Umsetzung aufgezeigt. Dies soll Hilfen und Anregungen für die theoriegeleitete Entwicklung von Multimedia-Anwendungen bieten.

1 Einleitung:

Neue Medien erschließen bestimmte Informations- und Kommunikationselemente in einer Ausprägung, wie dies andere Medien nicht bieten können. Dazu gehören die *Multimodalität* des Informationsangebotes (d. h. die Integration verschiedener Sinnesbereiche), die *Multicodierung* von Inhalten (d. h. die Darstellung in verschiedenen Codesystemen) und die *Interaktivität*. Aus didaktischer Sicht charakterisiert dies aber eher eine "Oberflächenstruktur" von Lehr-Lern-Umgebungen und noch nicht ihre "Tiefenstruktur", d. h. die tatsächlich lernwirksamen Faktoren. So kann eine Multicodierung hilfreich sein, weil sie verschiedene Beschreibungsformen eines Inhalts anbietet, sie kann aber auch durch die Informationsflut überfordern.

Der Beitrag liefert theoretisch abgeleitete Anregungen, um verschiedenen Forderungen der Lernpsychologie nachzukommen. Die zentralen Ansätze zeigt Abbildung 1.

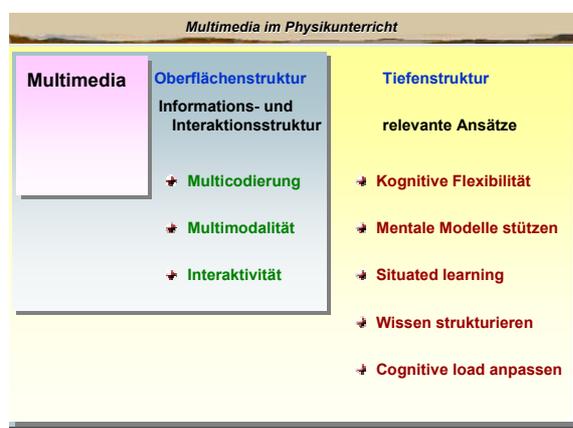


Abb.1: Die zentralen Ansätze in diesem Beitrag

Die Theorie wird jeweils kurz erläutert und dann ihre Umsetzung exemplarisch aufgezeigt. Ziel ist es, Konzepte und Komponenten für die theoriegeleitete Entwicklung von Multimediaanwendungen vorzustellen. Ein zweiter Beitrag berichtet dann über eine Untersuchung von Rahmenfaktoren für eine Multicodierung, geeignete Strukturierung und Vernetzung von Inhalten und die Entwicklung einer kognitiven Flexibilität bei Schülerinnen und Schülern einer neunten Jahrgangsstufe.

2 Multimodalität, Multicodierung, Interaktivität

Multimodalität, Multicodierung und Interaktivität sind aus fachdidaktischer und lernpsychologischer Sicht besondere Qualitäten der Interaktions- und Kommunikationsstruktur. Multimediaanwendungen nutzen verschiedene Sinneskanäle und unterschiedliche Symbolsysteme. Interaktionsangebote aktivieren die Lernenden. Dies lässt Auswirkungen auf die Motivation, die Kausalattribution und vor allem eine tiefer gehende Elaboration der Inhalte erwarten.

2.1 Multimodalität

Multimodale Systeme nutzen mehrere sensorische Systeme. Dies kann unterschiedliche Aspekte eines Inhalts betonen, Zusammenhänge und Wechselbezüge erschließen (z. B. in der Akustik) und die Informationsaufnahme erleichtern.

Mayer (1997) hebt besonders die Kontiguität von gesprochenem Text und Bildpräsentationen als methodisch interessant heraus. Moreno & Mayer (1999) stellen bei Animationen günstigere Effekte fest, wenn Texte akustisch und nicht nur schriftlich angeboten werden. Sie sprechen von zwei Verarbeitungssystemen im Arbeitsgedächtnis (für Bilder und für

Worte). Lernende können verbale und bildorientierte Informationen besser synchron verarbeiten, wenn die Texte akustisch und nicht nur schriftlich angeboten werden (Mayer & Moreno, 1998).

2.2 Multicodierung

Neben der Möglichkeit, verschiedene Sinneskanäle zu nutzen, ist für Weidenmann (1997) vor allem die Vielfalt der Codierungs- und Präsentationsmöglichkeiten ein wesentliches Kennzeichen von "Multimedia". Verschiedene Darstellungsmöglichkeiten sind wichtig, weil zumindest in der Anfangsphase eine Informationsverarbeitung codespezifisch erfolgt. Unterschiede zwischen Text- und Bildverarbeitung lassen sich sogar physiologisch belegen, wie dies beispielsweise Untersuchungen zur Spezialisierung von Gehirnhemisphären zeigen (Springer & Deutsch, 1998). Verschiedene Codes bieten jedenfalls unterschiedliche Ausdrucksmöglichkeiten - sie stellen aber auch spezifische Anforderungen.

Schnotz & Bannert (2003) unterscheiden grundsätzlich zwischen textbasierten und bildlichen Repräsentationen. Sie stellen aber fest, dass auch schon verschiedene Formen der Visualisierung zu unterschiedlichen Wissensstrukturen mit spezifischen Nutzungseigenschaften führen können. Allerdings haben Illustrationen nicht zwangsläufig einen positiven Effekt. Nur Leistungsschwächere scheinen generell von bildlichen Darstellungen in Texten zu profitieren. Demgegenüber scheinen leistungsstarke Lerner in der Lage zu sein, auch ohne bildhafte Darstellungen ein adäquates mentales Modell aufzubauen bzw. zu erweitern. (Für weitere Literatur siehe Schnotz & Bannert, 2003, sowie Mayer, 1997).

Visualisierungen sind dann nützlich, wenn sie den Sachverhalt in einer aufgabenspezifischen Form präsentieren; ansonsten interferieren sie mit den vorhandenen Vorstellungen und können sogar hinderlich werden (Schnotz & Bannert, 2003). Insofern kommt der aufgaben- und zieladäquaten Form der Darstellung eine entscheidende Rolle zu.

2.3 Interaktivität

In der Diskussion neuer Lernformen wird auch die Bedeutung der Steuerung von Lernprozessen durch den Lernenden selbst herausgehoben. Der Computer bietet besondere Vorteile im Rahmen eines interaktiven Lernens (Steppi, 1989). Nach Issing & Strzebowski (1997) kann von einer echten Interaktivität allerdings erst dann gesprochen werden, wenn

- *"die Lernenden kreativ sein dürfen und damit die Inhalte modifizieren bzw. selbst erstellen können;*
- *das Programm dynamisch und adaptiv auf die Aktionen der Lernenden reagiert;*
- *die Lernenden selbst die Lernkontrolle über ihre Lernprozesse übernehmen können;*
- *den Lernenden vom Mediensystem bei Bedarf Hilfe bzw. Führung angeboten wird."*

(Issing & Strzebowski, 1997, S. 60f)

Interaktionsformen und Kommunikationswege dürften in Zukunft noch attraktiver werden, beispiels-

weise durch Lichtgriffel, Spracheingabe, Datenhandschuh und Augenkamera. Der Nutzer muss allerdings die angebotenen Interaktionstechniken erkennen, verstehen und zielgerecht anwenden können. Zwar bieten Multimediasysteme zunehmend Interaktions- und Navigationshilfen an, dennoch sind für die neuen Freiheiten systematisierende und organisatorische Überlegungen und letztlich metakognitive Fähigkeiten verstärkt gefordert.

Resümee: Multimediasysteme erschließen vor allem eine Variabilität in der Darstellung und komplexe Zugriffsmöglichkeiten. Sie können Information zusammenstellen, flexibel verfügbar machen und erleichtern eine Umsetzung des räumlichen und zeitlichen Kontiguitätsprinzips.

3 Theoretische Leitlinien und Konzepte

Nachfolgend werden theoretische Ansätze zur Frage verfolgt, wie multimediale Angebote in Lernprozessen hilfreich sein können. Damit die Ausführungen kompakt bleiben, sind nur die Grundideen skizziert und mit den entsprechenden Literaturhinweisen versehen. Beispiele sollen in jedem Abschnitt eine Brücke zwischen den relativ abstrakten Konzepten und konkreten Umsetzungen aufzeigen.

3.1 Kognitive Flexibilität fördern

3.1.1 Kognitive Flexibilität und Multicodierung

Kognitive Flexibilität beinhaltet die Fähigkeit, Wissen unter verschiedenen Rahmenbedingungen sinnvoll zu verwenden. Dazu gehört die Fertigkeit, als Reaktion auf veränderte Situationen und Anforderungen sein Wissen spontan umorganisieren zu können (Spiro & Jehng, 1990). So lässt sich bei Bedarf ein Ensemble konstruieren, das spezifisch auf die Situation zugeschnitten ist und ein besseres Verständnis neuer Inhalte oder ein erfolgreiches Problemlösen unterstützt (vgl. Spiro et al., 1996). Voraussetzungen sind sowohl angemessene Repräsentationsformen wie auch adäquate Zugriffsoperationen. Wissen, das in vielfältiger Weise nutzbar sein soll, muss in verschiedenen Arten organisiert, gelehrt und repräsentiert werden.

Eine zentrale Annahme der "*Cognitive Flexibility Theory*" ist, dass es für den fortgeschrittenen Wissenserwerb wichtig ist, denselben Inhalt zu verschiedenen Zeiten, in neu konstruierten Zusammenhängen, unter verschiedenen Zielsetzungen und unter verschiedenen konzeptionellen Perspektiven wiederzubetrachten (Spiro et al., 1996). Dies gilt insbesondere für komplexe, schwer strukturierbare Wissensbereiche.

Kozma (2003) stellt einen Unterschied zwischen qualifizierten Wissenschaftlern und Studierenden bei der Verwendung multipler Repräsentationen fest. Während Experten verschiedene Repräsentationen

zieltgerecht einsetzen, haben Studierende Schwierigkeiten, vielfältige Repräsentationen adäquat zu nutzen und zusammenzuführen. Ihre Betrachtungen und Argumentationen sind stark auf oberflächliche Merkmale eingeschränkt. Außerdem scheinen Novizen stets enger auf eine einzelne Darstellung fixiert zu sein, während Experten verschiedene Darstellungen nutzen und scheinbar mühelos zwischen ihnen wechseln können. Allgemein wird durch eine mentale Multicodierung der Inhalte die Verfügbarkeit von Wissen verbessert. Es entwickelt sich eine größere Zahl von Abrufwegen und die Informationen können besser erschlossen werden (Anderson, 1989). Auch aus der Theorie der kognitiven Flexibilität (Spiro et al., 1988, Spiro et al., 1994) ist abzuleiten, dass Wissen in verschiedenen Formen präsentiert werden und in verschiedenen Szenarien eingebunden sein soll. Dies erleichtert später insbesondere Suchprozesse beim Problemlösen.

3.1.2 Umstrukturierungen

Aber nicht nur das Beherrschen verschiedener Symbolsysteme kann für eine flexible Anwendbarkeit günstig sein, auch verschiedene Darstellungen innerhalb eines Symbolsystems können wichtig werden. Beispielsweise lassen sich elektrische Schaltungen oberflächlich verschiedenartig darstellen. Lernende, die sich dem Thema erst nähern, werden nicht sofort erkennen, dass die abgebildeten Schaltungen (Abbildung 2) aus physikalischer Sicht gleichwertig sind.

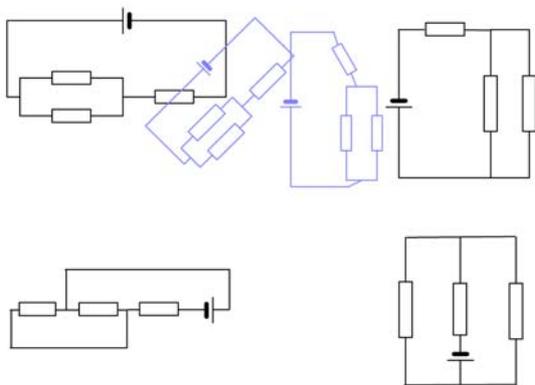


Abb. 2: Ausblendung aus einer Computeranimation

Ein Computerprogramm kann die Schaltskizzen schrittweise umformen und so die Zusammenhänge erkennbar machen (siehe Abb.2). Bereits Härtel (1992) hat einfache Transformationen mit dem Computer veranschaulicht. So genannte "animated gifs" zu diesem Thema finden Sie auch unter <http://www.physikonline.net/multimedia>.

3.1.3 Supplantation

Eine weitere Hilfe ist das Verknüpfen unterschiedlich abstrakter Beschreibungen entsprechend dem Supplantationsprinzip Salomons (1979, 1994). Dies zeigt Abbildung 3. Rechts wird der Ablauf einer

Federschwingung in einer realitätsnahen Darstellung präsentiert und zeitgleich wird links das entsprechende $y(t)$ -Diagramm gezeichnet. Der Pfeil verdeutlicht den Zusammenhang zwischen dem realen Ablauf und der abstrakten Darstellung.

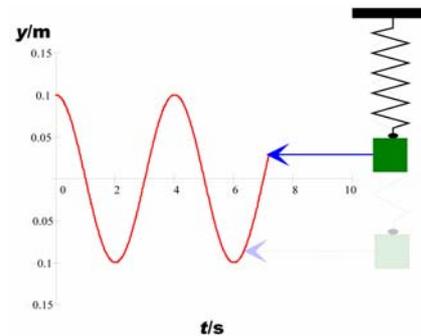


Abb. 3: Ausblendung aus einer Animation: $y(t)$ -Diagramm und realer Ablauf

3.1.4 Vergleichende Zusammenstellungen

Auf höherem Anspruchsniveau können Lernende die Wechselbezüge selbst erschließen, wenn entsprechende Darstellungen simultan angeboten werden. Dazu eine Kopie aus dem Programm "Atomos" aus dem Repetitorium zur Atomphysik von Gößwein (1997, siehe Girwidz et al. 2000). In Abbildung 4 ist bereits eine anspruchsvolle Auswahl von Beschreibungen zur Elektronenaufenthaltswahrscheinlichkeit zusammengestellt. (Selbstverständlich ist die gezeigte Zusammenstellung nicht für eine Einführungsphase gedacht.)

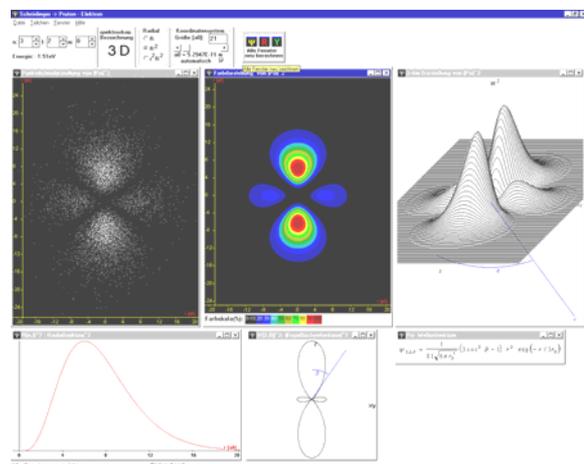


Abb. 4: Abbildung aus dem Programmpaket "Atomos"

3.1.5 Vernetzung und Hypermedia-Systeme

Speziell für komplexe, schwer überschaubare Wissensbereiche, "ill-structured domains" (Spiro et al., 1996), ist das Durchdenken verschiedener Zusammenhänge und Verflechtungen wichtig, wenn das Wissen flexibel einsetzbar sein soll. Es liegt nahe, Hypertext und Hypermedia-Systeme einzusetzen, um die komplexen Abrufwege nachzubauen und damit den Lernenden angemessene Informations-

und Übungsstrukturen anzubieten. *"It appears straightforward that a nonlinear medium like hypertext would be very well suited for the kinds of "landscape criss-crossings" recommended by Cognitive Flexibility Theory"* (Spiro et al., 1996, 9). (Weitere Anregungen im Abschnitt 3.4.)

3.2 Hilfen zum Aufbau mentaler Modelle

3.2.1 Der Begriff "mentale Modelle"

Mentale Modelle sind als Repräsentationsform in der Lernpsychologie von theoretischem und bei der Entwicklung von Multimediaanwendungen von hohem praktischem Interesse. Sie bieten einen Erklärungsrahmen für den theoriegeleiteten Einsatz insbesondere bildhaft-analoger Darstellungen.

Bei mentalen Modellen handelt es sich um *analoge, kognitive Repräsentationsformen* komplexer Zusammenhänge, wie z.B. Vorstellungen zum Bau und zur Funktionsweise eines Oszilloskops. Ein weiteres, klassisches Beispiel von de Kleer & Brown (1983) ist der elektrische Summer (siehe Abbildung 5).

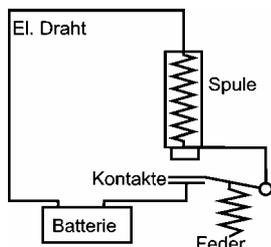


Abb. 5: Modellskizze eines elektrischen Summers

Grundlegend für Ansätze zu mentalen Modellen ist die Annahme einer modellhaften kognitiven Repräsentation von Realitätsausschnitten. Menschen bauen interne Modelle der äußeren und inneren Realität auf. Für die Aspekte, die dem Individuum bedeutsam erscheinen, haben diese *mentalen Modelle* eine übereinstimmende Relationsstruktur mit den entsprechenden Ausschnitten aus der Realität (vgl. Mandl, Friedrich & Hron, 1988).

Die Funktion mentaler Modelle für das Individuum kommt dann zum Tragen, wenn es darum geht, Phänomene zu verstehen, zu analysieren, Vorhersagen zu machen, Ausführungen zu planen und zu überwachen, Entscheidungen zu bestimmten Handlungen zu treffen oder ein Systemverhalten geistig durchzuspielen (Ballstaedt, Molitor & Mandl, 1989). *"Ein typisches Merkmal mentaler Modelle ist, dass man sie in Gedanken dynamisch "durchspielen" kann und dass man sich wie in einer Simulation Auswirkungen von Eingaben vorstellen kann."* (Weidenmann, 1991, S. 32).

Allerdings betont Weidenmann (1994) die Notwendigkeit, zwischen Oberflächenmerkmalen und strukturellen und kausalen Merkmalen zu unterscheiden. Auch Einsiedler (1996) sowie Schnotz & Bannert (1999) trennen die sensorische und mediale Repräsentation eines Themas von der eigentlichen Tiefenstruktur. So können Medien den Auf- und Ausbau

mentaler Modelle nur indirekt durch ihr Informationsangebot unterstützen und nur externe Repräsentationen anbieten. Sie können aber viele Prozesse und Zusammenhänge visualisieren und damit grundlegende Hinweise anbieten. Seel (1986) weist noch auf die Notwendigkeit hin, die Bedingungen der Informationsdarbietung genauer zu spezifizieren und insbesondere zwei Teilbereiche ins Blickfeld zu rücken: Die Kompatibilität des Mediums mit dem jeweiligen Lerninhalt (adäquates Abbildungsverhältnis) und die Kompatibilität mit der mentalen Repräsentation (Verhältnis zwischen externem Modell und mentalem Modell). Nach Issing & Klimsa (1995) bietet Multimedia aufgrund der spezifischen Merkmale die besten Voraussetzungen, um durch eine adäquate Präsentation von Lernkonzepten und -inhalten die Bildung erwünschter mentaler Modelle zu fördern.

Für die Lehr-Lern-Forschung sind mentale Modelle ein schillerndes, hypothetisches Konstrukt. Dies zeigt auch die inflationäre Verwendung des Begriffs, leider ohne einheitliche Bedeutung. *"Es werden unzählige Varianten mentaler Modelle unterschieden, aber bisher gibt es keine integrierende Theorie dieser Wissensform. ... Mentale Modelle bilden sozusagen den theoretischen Alleskleber, der konzeptionelle, anschauliche und prozedurale Wissensformen miteinander verknüpft"* (Ballstaedt, 1997, S. 5). Hier soll der Begriff entsprechend den frühen Ansätzen (siehe insbesondere auch Johnson-Laird, 1980, Forbus & Gentner, 1986, Seel, 1986, Steiner, 1988) bzw. den oben genannten Definitionen von Weidenmann (1991) und Ballstaedt et al. (1989) verstanden werden, also insbesondere als Repräsentation, die eine mentale Simulation physikalischer Prozesse und Abläufe ermöglicht. Entsprechende Beispiele wären Vorstellungen zum Teilchenmodell beim idealen Gas oder zum Verhalten der Ladungsträger am pn-Übergang bzw. beim Transistoreffekt.

3.2.2 Medien beim Aufbau mentaler Modelle

Die Abbildung 6 stammt aus einer Animation zur Teilchenvorstellung.

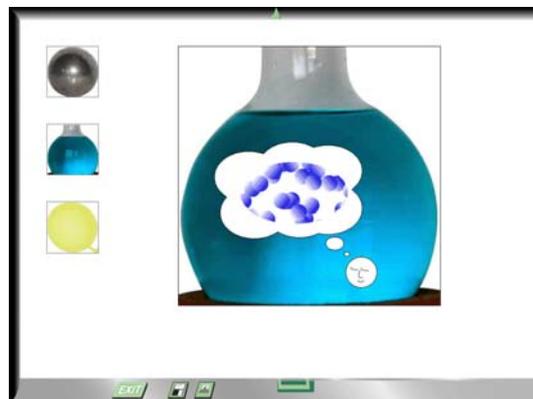


Abb. 6: Eine "Denkblase" eröffnet den Einblick in die Modellvorstellung.

Um der einseitigen Fixierung auf oberflächliche Merkmale einer bestimmten Darstellung entgegenzuarbeiten, können Multimedia-Anwendungen durchaus auch mehrere unterschiedliche Visualisierungen kombiniert darbieten.

Bei dem Einsatz von Visualisierungen, die den Aufbau mentaler Modelle fördern sollen, lassen sich nach Weidenmann (1991) folgende Intentionen unterscheiden:

- Abruf: Bilder aktivieren ein vorhandenes mentales Modell (und erschließen Anknüpfungspunkte).
- Fokussierung: Bilder heben Teile eines mentalen Modells besonders hervor (und liefern wichtige Detailinformationen).
- Konstruktion: Bilder zeigen, wie einzelne Komponenten in eine neue Gesamtstruktur eingebaut werden (auch Hilfen zur Modularisierung und Strukturierung von Wissensbereichen).
- Ersatz: Bilder können die Komplexität und Dynamik eines Modells verdeutlichen, um das Zusammenwirken verschiedener Komponenten zu zeigen (beispielsweise in einem Trickfilm).

Neben Animationen bieten sich noch Simulationen und Modellierungen an, vor allem um Einflussfaktoren und Abhängigkeiten zu verdeutlichen. Die Abbildung 7 stammt aus einer Simulation zur kinetischen Gastheorie, in der verschiedene Parameter variierbar sind (Wetzstein, 2000). Die Auswirkungen auf Druck und Volumen werden darin verdeutlicht.

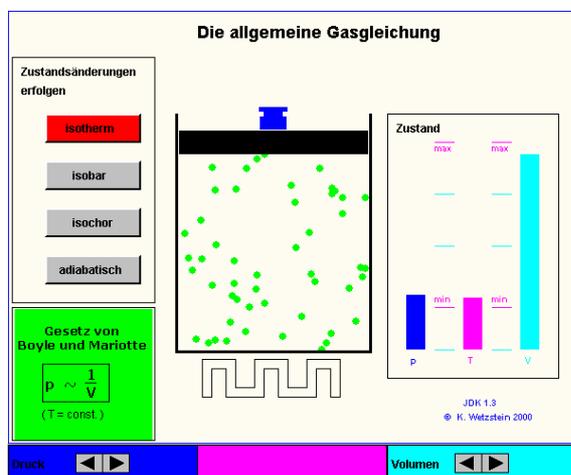


Abb. 7: Zum Teilchenmodell des idealen Gases

Andere Applets zeigen die Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen im Vergleich zur Maxwell-Verteilung an (z. B. Haines et al. 2000). In der Weiterführung lassen sich mit entsprechenden Programmen auch Aufgaben zur Osmose bearbeiten oder das Prinzip der Dialyse verfolgen.

3.3 Situated learning

In der Theorie des situated learning ist Lernen normalerweise eine Funktion der Aktivität, des Kontextes und der kulturellen Umgebung; d. h. Lernen ist situiert (Lave, 1988, Lave & Wenger, 1990). Prinzipien des situated learning sind:

1. Wissen ist in authentischen Kontexten darzustellen, d. h. unter Rahmenbedingungen und in Anwendungen, bei denen das Wissen normalerweise eine Rolle spielt.
2. Lernen verlangt soziale Interaktion und Zusammenarbeit.

3.3.1 Anchored instruction

Anchored instruction ist ein Beispiel für die Umsetzung der theoretischen Postulate des *situated cognition*-Ansatzes (Cognition & Technology Group at Vanderbilt, CTGV, 1993, Bransford et al, 1990). Vermieden werden soll "träges Wissen" (*inert knowledge*), das zwar gelernt, aber nicht in realen Problemsituationen verfügbar ist. Ursprünglich war der Fokus auf die Entwicklung interaktiver Videodisks gerichtet. Sie sollen Schüler (und Lehrer) anregen, komplexe, realitätsnahe Probleme zu behandeln. Das Videomaterial soll interessante, anwendungsnahe "Anker" (Makro-Kontexte) als Kristallisationspunkte für das nachfolgende Lehren und Lernen bereitstellen. Die angebotenen Materialien haben einen narrativen Charakter und sind nicht als straffe Lerneinheiten konzipiert. Sie sollen Interesse wecken, damit die angebotenen Problemsituationen von Lernenden und Lehrenden untersucht werden.

Wesentlich ist, dass der Inhalt (Wissen über Konzepte, Theorien und Prinzipien) eine Bedeutung und einen persönlichen Wert für das Individuum hat. Wissen wird nicht als Endresultat, sondern als Werkzeug für (subjektiv) relevante Fragestellungen angesehen. Die Bedeutung der "Anker" liegt außerdem in den Mustern, die den Zusammenhang für Anwendungswissen bereitstellen und den Rahmen bieten, um Informationen aus verschiedenen Wissensbereichen zu integrieren. Die Verankerung von Wissen an realitätsnahen Rahmenbedingungen soll die Entwicklung spezifischer, aber auch übertragbarer Problemlösefertigkeiten effektiver gestalten (Goldmann et al., 1996).

Videoclips, bei denen man aus gezeigten Abläufen Daten entnehmen und auf relevante physikalische Größen schließen kann und soll, werden z. B. auch unter <http://www.physikonline.net> angeboten. Bei einem Kettenkarussell kann über Umlaufzeiten und Auslenkwinkel auf die Tangentialgeschwindigkeit geschlossen werden; oder die Flughöhe einer Bungee-Kugel auf einem Volksfest lässt sich aus den Flugzeiten abschätzen.

3.3.2 "Nützliche" Physik

Einen attraktiven Anknüpfungspunkt bzw. "Anker" bietet die Akustik. Hier kann physikalisches Wissen auch einen persönlichen Nutzen für Schüler haben,

die sich für Musik interessieren. Die digitale Aufnahme und Weiterverarbeitung von Musikstücken oder der eigenen Stimme und die Ergänzung mit verschiedenen Toneffekten sind heute mit der Standardausstattung eines Multimediacomputers direkt möglich. Die geforderten Einstellungen von Frequenzbereich, Abtasttiefe, Rauschunterdrückung, Lautstärke, usw. in einem Computerprogramm verlangen unmittelbar nach Klärung der Begriffe und der physikalischen Zusammenhänge. Relativ einfach bedienbare Programme wie GOLDWAVE (Craig, 1997), DITON (Geiß, 1996) und GRAM (Horne, 1999) oder auch Audition (2003) stellen akustische Signale in verschiedenen Grafiken dar (Multicodierung) und ermöglichen den direkten Vergleich mit Hörerlebnissen (Multimodalität). Verschiedene Toneffekte durch Überlagerung, Echo oder Nachhall lassen sich leicht erzeugen und wiedergeben. Der Computer liefert direkt einen Vergleich mit den Zielsetzungen (Feedback, Interaktivität). Über die Menüsteuerung kommen auch Schüler problemlos zu eindrucksvollen Effekten. Gleichzeitig bietet die detaillierte Betrachtung physikalischer Parameter vertiefende Einblicke in die Akustik.

Es folgt eine Auswahl von Beispielen, die beispielsweise mit dem Programm GOLDWAVE erstellt werden können und ein Experimentieren mit Klangeffekten erlauben. Die Effekte werden aber auch von anderen Programmen angeboten (siehe obige Hinweise).

- Ein Echo lässt sich einbauen; Intensität und Zeitverzögerung kann man variieren.
- Bei Stereoaufnahmen wird auf einem Kanal die Lautstärke kontinuierlich verringert und gleichzeitig auf dem anderen Kanal vergrößert, um eine quer zum Zuhörer bewegte Schallquelle zu simulieren.
- Über eine kontinuierliche Frequenzverschiebung kombiniert mit einer Zu- bzw. Abnahme der Lautstärke lassen sich bewegte Schallquellen simulieren, die sich scheinbar auf den Hörer zu bzw. von ihm weg bewegen (Dopplereffekt und Abnahme der Lautstärke mit der Entfernung).
- Mit Filtern, z. B. Hochpass- oder Bandpassfilter, lassen sich Stimmen verändern ("Mickymaus-Stimme") oder der Klang eines antequierten Grammophons bzw. von "Schellack-Platten" nachbilden (auch bei modernen Musikstücken).
- Werden Klavierklänge "rückwärts" abgespielt, klingt dies etwa wie ein Harmonium.

(Weitere Hinweise bei Girwidz (2002); verschiedene Tonbeispiele als "wav-dateien" gibt es unter <http://www.physikonline.net/multimedia>.)

3.3.3 Simulieren und Modellieren realitätsnaher Fragestellungen

Bei der Verankerung von Wissen an realitätsnahen Fragestellungen können auch Simulationen und Modellierungen helfen und Einflüsse verschiedener Parameter erkennbar machen, z. B. zum Energiebe-

darf einer Zimmerheizung bei verschiedenen Wandstärken, Fenstergrößen, Raumgrößen oder Dämmstoffen. Auch für ein Fächer übergreifendes Lernen bieten sich Fragestellungen wie Wärmeisolierung und Energieumsatz von Lebewesen an. In Simulationen lassen sich verschiedene Parameter wie Außen- und Körpertemperatur, Isolationsschichten, Volumen und Oberflächengröße variieren und Rechnungen zum Nahrungsbedarf sowie zu Überlebensstrategien von Tieren bei verschiedenen klimatischen Verhältnissen anstellen.

3.4 Wissensstrukturierung und Vernetzung

3.4.1 Strukturierung von Wissen

De Jong und Njoo (1992) beobachteten 32 Lernprozesse und stellen zwei wichtige Teilprozesse heraus: Strukturieren von neuem Wissen und die Verknüpfung mit vorhandenen Kenntnissen. Auch für ein Problemlösen ist strukturiertes und organisiertes Wissen notwendig (Reif, 1981, 1983). Vor allem eine *hierarchische Gliederung* beeinflusst die Abrufbarkeit. Leitbegriffe können den Zugriff auf relevante Details steuern. So betont van Heuvelen (1991) die Notwendigkeit, übergeordnete physikalische Prinzipien zu vermitteln und das Wissen um vereinheitlichende Theorien zu formatieren.

Detailwissen muss vernetzt sein, damit Zusammenhänge erschlossen werden können. Clark (1992) unterscheidet prinzipiell *vertikale Verknüpfungen* (beispielsweise die Zuordnung zu einem allgemeinen Prinzip) und *horizontale Verknüpfungen* (Verbindungen zu ähnlichen Wissensstrukturen, z.B. über Analogien). Letztere sind vor allem im Zusammenhang mit Transferleistungen von Interesse. Graphiken, die Zusammenhänge visualisieren, können eine Analyse der Themenbereiche unterstützen und auch ein Wiedererkennen und Behalten der Lerninhalte fördern (Beisser et al., 1994). Effektives Wissensmanagement hält Wissen in organisierter und strukturierter Form bereit. Dazu gehören auch Techniken, die eine Verfeinerung und den Ausbau von deklarativem und prozeduralem Wissen unterstützen.

3.4.2 Netze, Maps und Charts

Mind Maps und *Concept Maps* sind organisierte und strukturierte Darstellungen von Schlüsselbegriffen (auch als Text-Bild-Kombinationen). *Concept maps* repräsentieren eine Wissensdomäne über Kernbegriffe und zentrale Aussagen, die durch Knoten und ihre Verbindungen visuell angezeigt werden. So genannte "*Reference Maps*" haben zum Ziel, Wissensstrukturen abzubilden. Sie sollen quasi ein kognitives Gerüst anbieten und den Zugriff auf das Wissen erleichtern. Canas et al. (1999) sehen hierin die Möglichkeit für eine elegante, intuitive Repräsentation eines Wissensbereichs. Im Gegensatz zu Maps gehen *Charts* weniger stark von einem zentralen Begriff aus. Sie sind eher vertikal organisiert und

können damit gut hierarchische Strukturen aufzeigen.

Die bildhafte Veranschaulichung begrifflicher Strukturen lässt sich mit verschiedenen didaktischen Funktionen verbinden (vgl. auch Ballstaedt, 1997): Aussagen übermitteln, Wissen einprägen, Explorationsmöglichkeiten bieten. Allerdings ist auch hier durchaus eine differenzierte Betrachtung angebracht. Eine direkte Abbildung von externen Strukturdarstellungen auf die interne Repräsentation kann nicht angenommen werden. "Die sensorische und mediale Repräsentation eines Themas haben zwar eine wesentliche Hilfsfunktion, die eigentliche Tiefenstrukturbildung ist jedoch eine abstrakt-symbolische Konstruktion" (Einsiedler, 1996, S. 177). Nach Jonassen & Wang (1993) genügt es nicht, Wissensstrukturen darzustellen, um strukturelles Wissen zu verbessern. Der aktive Umgang mit dem Wissen, angeregt durch Verarbeitungsaufgaben und Zielvorgaben, scheint ganz wesentlich zu sein.

3.4.3 Charts and Maps am Computer

Für moderne Computer- und Multimediaanwendungen sind Netzwerkdarstellungen besonders interessant. Sie entsprechen einerseits modernen Theorien über die mentale Repräsentation von begrifflichem Wissen und andererseits kommt die Struktur den heutigen Programmtechniken besonders gut entgegen. Den Knoten (Wissenselementen) lassen sich Programmmodule zuordnen; die horizontalen Verknüpfungen und die Tiefenstruktur werden durch Vernetzungen (sog. "links") abgedeckt. Ein konkreter Ansatz ist, mittels Hypertexten die semantische Struktur von Begriffen nachzubilden. Die Knoten repräsentieren dabei die Begriffe, die Verknüpfungen die logischen Zusammenhänge.

Auch bildhafte Darstellungen in neuen Medien können hier helfen. Ein Beispiel sind die Übersichten zur Strömungslehre (siehe Abbildungen 8 und 9). Charts und Maps können von Anfang an helfen, Detailwissen strukturell einzuordnen.

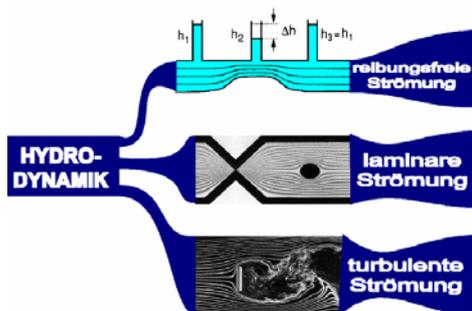


Abb. 8: Grobeinteilung von Strömungen

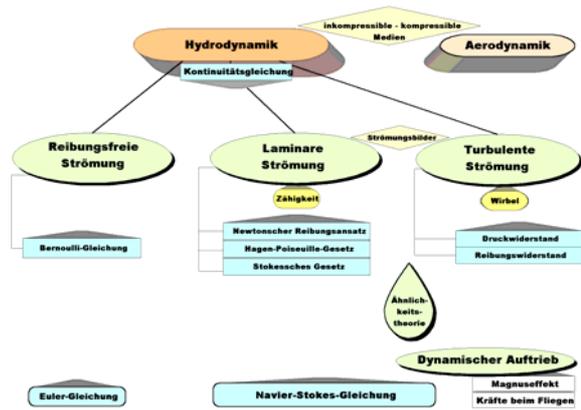


Abb. 9: Übersicht zur Hydrodynamik

Mapping und Chart-Programme bieten eine Plattform, um Begriffsstrukturen und Zusammenhänge implizit in visueller Form darzustellen. Durch die Flexibilität, Veränderbarkeit und vor allem über die Vernetzungsmöglichkeiten bieten neue Medien hier entscheidende Vorteile gegenüber klassischen Medien.

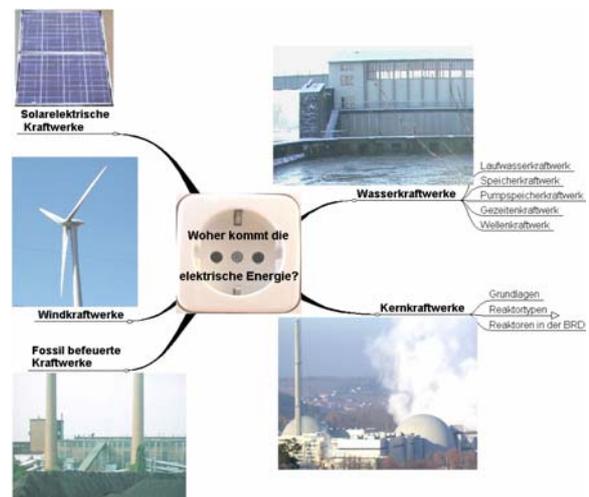


Abb. 10: Kraftwerke für elektrische Energie

Vorbereitete Hypertext- oder Hypermedia-Strukturen lassen sich explorativ durchstreifen (siehe Abb. 10). Daneben ist aber auch das Erstellen eigener Concept- und Mindmaps mit modernen Computerprogrammen problemlos. Selbst das Einfügen verschiedener Ebenen und die Verknüpfung mit Internetadressen sind sehr einfach. (Weitere Anregungen bei Girwidz & Kraher, 2002).

3.5 Cognitive load berücksichtigen

3.5.1 Grenzen des Arbeitsgedächtnisses

Baddeley (1992) betrachtet das Arbeitsgedächtnis (working memory) differenziert nach drei Bereichen:

- die Ausführungszentrale (central executive), die u. a. auch die Aufmerksamkeit steuert
- das visuell-räumliche Skizzenblatt (visuospatial sketch pad)
- einen akustischen Bereich (phonological loop).

Etwa 3 bis 7 subjektiv neue Informationseinheiten, sogenannte chunks, können simultan im Arbeitsgedächtnis verfügbar sein (Miller, 1956, Baddeley, 1990, Glaser, 1994).

3.5.2 Begrenzte Verarbeitungskapazität und "cognitive load"

Die "cognitive load theory" (Sweller, 1994) hebt die Grenzen des Arbeitsgedächtnisses als wichtigen Faktor heraus, der bei der Unterrichtsgestaltung zu berücksichtigen ist. Aufgrund der begrenzten Verarbeitungskapazitäten muss das Informationsangebot so strukturiert werden, dass die Belastung des Arbeitsgedächtnisses nicht zu hoch wird. Jede zusätzliche Belegung kognitiver Ressourcen verringert den Anteil, der für das Lernen zur Verfügung steht. Allein die Art, wie eine Information präsentiert wird, kann eine höhere kognitive Belastung verursachen als das eigentliche inhaltliche Verstehen (Leung et al., 1997). So können ungewohnte Notationen in Gleichungen für einen hohen "cognitive load" sorgen, weil gleichzeitig Symbolik und Inhalt verarbeitet werden müssen. Auch Seel & Winn (1997) betrachten Symbolsystem und verfügbare Verarbeitungskapazitäten als kritische Größen. Zusätzlich sind Interaktionen zwischen den Lernenden untereinander und dem Medium einzubeziehen. So kann die kognitive Belastung bei einem entdeckenden Lernen mit interaktiven Animationen vor allem auch durch die Koordinierungsanforderungen beim kooperativen Lernen mit Partner kritisch werden (Schnotz et al., 1999).

Unterrichtsinhalte können ebenfalls überfordern, wenn viele Details gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis präsent gehalten werden müssen. Hilfreich ist es dann, wenn vorab mehrere Elemente zu größeren Einheiten zusammengefasst werden oder in Schemata eingeordnet werden können, z. B. auch mit grafischen Hilfsmitteln. Marcus et al. (1996) konnten entsprechende Erfahrungen bestätigen. Dabei wurden Diagramme bei Problemstellungen mit Widerstandsschaltungen eingesetzt. Im Allgemeinen verringert die Nutzung verschiedener Sinneskanäle ebenfalls die kognitive Belastung (Tindall-Ford et al., 1997, Mousavi et al., 1995). Diese Aussage gilt aber nicht, wenn das Informationsangebot intensive Suchprozesse fordert, um visuelle und auditive Informationen in Übereinstimmung zu bringen (Jeung et al., 1997). Auch zusätzliche visuelle Anzeigen

können stören, wenn sie viele weitere kognitive Aktionen verlangen.

Kalyuga et al. (1999) stellen nach empirischen Untersuchungen fest, dass verbale Zusatzinformationen in computergestützten Lernmaterialien die kognitive Belastung verringern können. Farbliche Codierungshilfen sind ebenfalls vorteilhaft. Demgegenüber erhöhen geschriebene Zusatztexte eher noch die Belastung, wenn mehrfach zwischen Bildbetrachtung und Texterfassung gewechselt werden muss (vgl. Kalyuga et al., 1999).

"Cognitive load" ist abhängig von Vorwissen, kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten. So kann es bei einem weniger erfahrenen Lerner nötig sein, zu einem Diagramm einen erläuternden Text anzubieten. Andererseits kann der gleiche Text aber für erfahrene Lerner auch eine unnötige Belastung sein, weil redundante Informationen wieder ausgefiltert werden müssen (Kalyuga et al., 1998). Wie streng organisiert ein Informationsangebot sein soll, hängt also auch entscheidend von der Vorerfahrung in einem Wissensbereich ab (Tuovinen et al., 1999).

Auch ein selbstgesteuertes multimediales Lernen kann schnell zu einer kognitiven Überlastung führen. Insbesondere beanspruchen folgende, eher arbeitsorganisatorische Fragen ebenfalls kognitive Kapazitäten: "Welche Informationen brauche ich als nächstes?", "Wo muss ich suchen?", "Welche Relevanz hat eine gefundene Information?" (Mandl & Reinmann-Rothmeier, 1997). Dazu kommen technische Schwierigkeiten oder Bedienungsprobleme (Friedrich & Mandl, 1997).

3.5.3 Verstehen - Einbezug mehrerer Sachverhalte

Sweller (2002, 1994) schlägt vor, Informationen bzw. Informationsstrukturen danach zu klassifizieren, inwieweit sich die Informationselemente wechselseitig aufeinander beziehen. Aus dieser Blickrichtung ist für ihn dann Verstehen begrenzt durch die Fähigkeit, alle Informationselemente, die notwendigerweise zusammenwirken, gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis zu verarbeiten (Sweller, 2002).

3.5.4 Anpassen der Belastung

Methodische Maßnahmen haben selbstverständlich Auswirkungen auf den "cognitive load". Sie lassen sich aber nicht von speziellen inhaltlichen Überlegungen trennen. Deshalb sollen hier drei eher allgemeine Maßnahmen betrachtet werden, die helfen, die Informationsdichte am Multimediacomputer zu begrenzen.

- "single concept principle"

Ein erster Ansatz kann sein, Darstellungen nach dem "single concept principle" zu gestalten. Hierbei wird der Fokus auf einen Sachverhalt, Begriff oder ein physikalisches Konzept ausgerichtet. Dies ist vor allem im Grundlagenunterricht und für die erste Begriffsbildung hilfreich. Ein Beispiel aus der Wellenlehre zeigt die Abbildung 11.



Abb. 11: Einfache Anwendungen zu Wellenlehre

Verschiedene Aspekte lassen sich sequentiell behandeln. In der Fortführung sind auch zunehmend komplexere Sachverhalte aufzugreifen, z. B. in Abbildung 13 die Transmission und Reflexion an Grenzen, mit Änderung der Wellenlänge, Brechung und teilweiser Reflexion. (Die Simulationsprogramme sind unter <http://www.physikonline.net/programme> zu finden.)

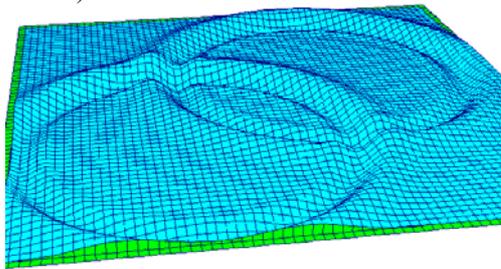


Abb. 12: Ungestörtes Durchdringen zweier Kreiswellen

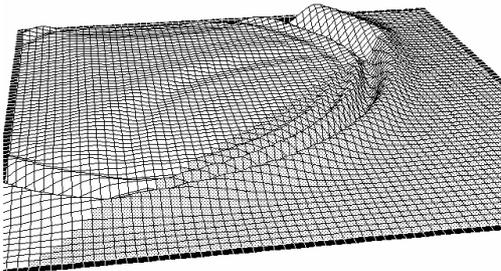


Abb. 13: Wellen an der Grenze zweier Medien

- Individuelle Ablaufsteuerung

Bei Einzelprogrammen und erst recht bei Hypermedia-Anwendungen ist die Ablaufsteuerung durch den Nutzer in der Regel gegeben (oder ist leicht einzurichten). Damit wird auch die Informationsdichte und die kognitive Belastung individuell steuerbar.

- Multimodalität

Durch multimodale Angebote (z.B. Visualisierungen kombiniert mit gesprochenem Text) lassen sich verschiedene Aufnahmekanäle nutzen. Das zeitliche Kontiguitätsprinzip, nach dem zusammengehörende

Informationen möglichst gleichzeitig präsent sein sollen, wird so mit einer geringeren kognitiven Belastung realisierbar.

4 Abrundung

Auch wenn der Blick auf Multimediaanwendungen gerichtet war, soll keinesfalls der Eindruck entstehen, dass dieses Medium allein das Erreichen von Lernzielen sicherstellt. Der Einsatz von Medien als Mittler im Lehr-Lern-Prozess hat einen optionalen Charakter. Das Anliegen des Beitrags ist aber, Ansätze für eine theoriegeleitete Entwicklung und Anwendung von neuen Medien vorzustellen, um so einen zielgerechten und effektiven Einsatz zu unterstützen, der mit anderen Mitteln schwieriger zu erreichen ist.

5 Literatur:

- Anderson J. R. (1989). Kognitive Psychologie. [Dt. Übersetzung]. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft GmbH & Co.
- Audition (2003). <http://www.adobe.de/products/audition/main.html> (20.12.2003).
- Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science*, Vol. 255, 556-559.
- Baddeley, A. D. (1990). Human memory. Theory and practice. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Ballstaedt, S. P. (1997). Wissensvermittlung. Weinheim: Psychologie Verlags Union.
- Ballstaedt, S.-P., Molitor, S., Mandl, H. (1989). Wissen aus Text und Bild. In J. Groebel, P. Winterhoff-Spurk (Hrsg.), Empirische Medienpsychologie. München: Psychologie Verlags Union.
- Beisser, K. L., Jonassen, D. H., Grabowski, B. L. (1994). Using and selecting graphic techniques to acquire structural knowledge. *Performance Improvement Quarterly*, 7(4), 20-38.
- Bransford, J. D., Sherwood, R. D., Hasselbring, T. S., Kinzer, Ch., K., Williams, S. M. (1990). Anchored instruction: Why we need it and how technology can help. In D. Nix & R. Spiro (Eds.), *Cognition, education and multimedia*. Hillsdale, NJ: Erlbaum Associates.
- Cañas, A. J., Leake, D. B., & Wilson, D. C. (1999). Managing, Mapping, and Manipulating Conceptual Knowledge. *Proceedings of the AAAI-99 Workshop on Exploring Synergies of Knowledge Management and Case-Based Reasoning*. Menlo Park: AAAI Press.
- Clark, R. E. (1992). Facilitating Domain-General Problem Solving: Computers, Cognitive Processes and Instruction. In E. De Corte, M. C. Linn et al. (Eds.), *Computer-Based Learning Environments and Problem Solving (NATO ASI Series. Series F: Computer and Systems Sciences; 84)* (pp. 265-285). Berlin: Springer.

- Craig, Ch. S. (1997). Computerprogramm Goldwave. Version 3. <http://www.goldwave.com> (20.11.2001)
- CTGV (1993). Anchored instruction and situated cognition revisited. *Educational Technology*, 33 (3), 52-70.
- De Jong, T., Njoo, M. (1992). Learning and Instruction with Computer Simulations: Learning Processes Involved. In E. De Corte, M. C. Linn et al. (Eds.), *Computer-Based Learning Environments and Problem Solving* (NATO ASI Series. Series F: Computer and Systems Sciences; 84) (S. 411-427). Berlin: Springer.
- De Kleer, J. & Brown, J. S. (1983). Assumptions and ambiguities in mechanistic mental models. In D. Gentner & A. L. Stevens (Eds.), *Mental models* (pp. 155-190). Hillsdale, N. J.: Erlbaum.
- Einsiedler, W. (1996). Wissensstrukturierung im Unterricht. *Zeitschrift für Pädagogik*, 42, Nr. 2, 167-192.
- Forbus K. D. & Gentner D. (1986). Learning physical domains: Toward a theoretical framework. In R. S. Michalski, J. G. Carbonell & T. M. Mitchell (Eds.), *Machine learning, An artificial intelligence approach* (Vol. 2) (pp. 311-348). Los Altos: Morgan Kaufmann Publishers.
- Friedrich, H. F. & Mandl, H. (1997). Analyse und Förderung selbstgesteuerten Lernens. In F. E. Weinert & H. Mandl (Hrsg.), *Psychologie der Erwachsenenbildung. Enzyklopädie der Psychologie, D/I/4* (S. 237-293). Göttingen: Hogrefe.
- Geiß, U. (1996). Computerprogramm DITON. <http://www.physik.uni-erlangen.de/Didaktik/download/windown.htm> (20.11.2001)
- Girwidz, R. & Kraher, P. (2002). Lernpfade durch das WWW mit Mapping-Programmen. *Unterricht Physik*, 13, Nr. 69, S. 11-13.
- Glaser W. R. (1994). Menschliche Informationsverarbeitung. In E. Eberle, H. Oberquelle, R. Oppermann (Hrsg.), *Einführung in die Software-Ergonomie* (S. 7-51). Berlin: Walter de Gruyter.
- Goldmann, S. R., Petrosino, A. J., Sherwood, R. D., Garrison, S., Hickey, D., Bransford, J. D., Pellegrino, J. W. (1996). Anchoring science instruction in multimedia learning environments. In S. Vosniadou, E. De Corte, R. Glaser, H. Mandl (Eds.), *International perspectives on the design of technology-supported learning environments* (pp. 257-284). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Härtel, H. (1992). Neue Ansätze zur Darstellung und Behandlung von Grundbegriffen und Grundgrößen der Elektrizitätslehre. In K. Dette, P. J. Pahl (Hrsg.), *Multimedia, Vernetzung und Software für die Lehre* (S. 423 – 428). Berlin: Springer.
- Haines et al. 2000, <http://intro.chem.okstate.edu/1314F00/Laboratory/GLP.htm>, (20.9.2003).
- van Heuvelen, A. (1991). Learning to think like a physicist: A review of research-based instructional strategies. *American Journal of Physics* 59 (19), 891-897.
- Horne R. S. (1999). Computerprogramm Spektrogram. <http://www.visualizationsoftware.com/gram.html> (20.11.2001)
- Issing, L. J. & Strzebowski, R. (1997). Lernen mit Multimedia aus psychologisch-didaktischer Sicht. In DPG - Fachverband Didaktik der Physik (Hrsg.), *Didaktik der Physik – Vorträge Physikertagung 1997*, Berlin. Bad Honnef: DPG GmbH.
- Issing, L. J., Klimsa, P. (1995). Multimedia - Eine Chance für Information und Lernen. In L. J. Issing, P. Klimsa (Hrsg.), *Information und Lernen mit Multimedia*. Weinheim: Psychologie Verlags Union.
- Jeung, H.-J., Chandler, P., Sweller, J. (1997). The role of visual indicators in dual sensory mode instruction. *Educational Psychology*, 17(3), 329-343.
- Johnson-Laird P. N. (1980). *Mental Models in Cognitive Science*. *Cognitive Science*, 4, 71-115.
- Jonassen, D. & Wang, S. (1993). Acquiring structural knowledge from semantically structured hypertext. *Journal of Computer-Based Instruction*, 20(1), 1-8.
- Kalyuga, S., Chandler, P., Sweller, J. (1998). Levels of expertise and instructional design. *Human Factors*, 40(1), 1-17.
- Kalyuga, S., Chandler, P., Sweller, J. (1999). Managing split-attention and redundancy in multimedia instruction. *Applied-Cognitive-Psychology*, 13(4), 351-371.
- Kozma, R. (2003). The material features of multiple representations and their cognitive and social affordances for science understanding. *Learning and Instruction* 13, 205-226. (K7)
- Lave, J. (1988). *Cognition in Practice: Mind, mathematics, and culture in everyday life*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Lave, J. & Wenger, E. (1990). *Situated Learning: Legitimate Peripheral Participation*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Leung, M., Low, R., Sweller, J. (1997). Learning from equations or words. *Instructional Science*, 25(1), 37-70.
- Mandl, H., Friedrich, H. F., Hron A. (1988). Theoretische Ansätze zum Wissenserwerb. In H. Mandl, H. Spada (Hrsg.), *Wissenspsychologie* (S. 123-160). München: Psychologie Verlags Union.
- Mandl, H., Reinmann-Rothmeier, G. (1997). Wenn neue Medien neue Fragen aufwerfen: Ernüchterung und Ermutigung aus der Multimedia-Forschung. *Institut für Pädagogische Psychologie und Empirische Pädagogik, Forschungsbericht Nr. 85*, Universität München.
- Marcus, N., Cooper, M., Sweller, J. (1996). Understanding instructions. *Journal of Educational Psychology*, 88(1), 49-63.

- Mayer, R. E. (1997). Multimedia learning: are we asking the right question? *Educational Psychologist*, 32, 1-19.
- Mayer, R. E., Moreno, R. (1998). A split-attention effect in multimedia learning: Evidence for dual processing systems in working memory. *Journal of Educational Psychology*, 90(2), 312-320.
- Miller, G. A. (1956). The magic number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63, 81-97.
- Mousavi, S.-Y., Low, R., Sweller, J. (1995). Reducing cognitive load by mixing auditory and visual presentation modes. *Journal of Educational Psychology*, 87(2), 319-334.
- Reif, F. (1981). Teaching problem solving – A scientific approach. *The Physics Teacher*, 19, 310-316.
- Reif, F. (1983). Wie kann man Problemlösen lehren? – Ein wissenschaftlich begründeter Ansatz -. *Der Physikunterricht* 17, 1, 51-66.
- Salomon, G. (1979). Interaction of media, cognition and learning. San Francisco: Jossey-Bass.
- Salomon, G. (1994). Interaction of Media, Cognition, and Learning. Hillsdale, New Jersey: Erlbaum.
- Schnotz, W., & Bannert, M. (1999). Strukturaufbau und Strukturinterferenz bei der multimedial angeleiteten Konstruktion mentaler Modelle. In I. Wachsmuth & B. Jung (Hrsg.), *KogWis99. Proceedings der 4. Fachtagung der Gesellschaft für Kognitionswissenschaft*, Bielefeld, 28. September – 1. Oktober 1999 (S. 79- S. 85). Sankt Augustin: Infix.
- Schnotz, W. & Bannert, M. (2003). Construction and interference in learning from multiple representation. *Learning and Instruction* 13, 141–156. (K7)
- Schnotz, W., Böckheler, J., Grzondziel, H. (1999). Individual and co-operative learning with interactive animated pictures. *European Journal of Psychology of Education*, 14 (2), 245-265.
- Seel N. M. (1986). Wissenserwerb durch Medien und "mentale Modelle". *Unterrichtswissenschaft*, 1986, 4, 384-401.
- Seel N. M., Winn, W. D. (1997). Research on media and learning: Distributed cognition and semiotics. In R. D. Tennyson, F. Schott (Eds.), *Instructional design: International perspectives*, Vol. 1: Theory, research, and models, (pp. 293-326). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Spiro, R. J., Coulson, R. L. et al. (1988). Cognitive Flexibility Theory: Advanced Knowledge Acquisition in Ill-Structured Domains. In V. Patel (Ed.), *Tenth Annual Conference of the Cognitive Science Society (375-383)*. Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum Ass..
- Spiro, R. J., Coulson, R. L., Feltovich, P. J., Anderson, D. K. (1994). Cognitive flexibility theory: Advanced knowledge acquisition in ill-structured domains. In R. B. Ruddell, M. R. Ruddell (Eds.); et al., *Theoretical models and processes of reading (4th ed.)* (pp. 602-615). Newark: International Reading Association.
- Spiro, R. J., Feltovich, P. J., Jacobson, M. J., Coulson, R. L. (1996). Cognitive Flexibility, Constructivism, and Hypertext: Random Access Instruction for Advanced Knowledge Acquisition in Ill-Structured Domains. *Simpósio Investigação e Desenvolvimento de Software Educativo, Convento dos Capuchos, Costa da Caparica, 7, 8 e 9 de Outubro de 1996.* http://phoenix.sce.fct.unl.pt/simposio/Rand_Spiro.htm (30.7.2003)
- Spiro, R. J. & Jehng, J. (1990). Cognitive flexibility and hypertext: Theory and technology for the non-linear and multidimensional traversal of complex subject matter. In D. Nix & R. Spiro (Eds.), *Cognition, Education, and Multimedia*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Springer, S. P. & Deutsch, G. (1998). *Linkes – rechtes Gehirn*. Heidelberg: Spektrum.
- Steiner, G. (1988). Analoge Repräsentationen. In H. Mandl, H. Spada (Hrsg.), *Wissenspsychologie (S. 99-119)*. München: Psychologie Verlags Union.
- Steppi, H. (1989). *CBT. Computer Based Training. Planung, Design und Entwicklung interaktiver Lernprogramme*. Stuttgart: Klett.
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty and instructional design. *Learning and Instruction*, 4, 295-312.
- Sweller, J. (2002). Visualisation and Instructional Design. In R. Ploetzner (Ed.), *Proceedings of the International Workshop on Dynamic Visualizations and Learning. 1501-1510*. Tübingen: Knowledge Media Research Center.
- Tindall-Ford, S., Chandler, P., Sweller, J. (1997). When two sensory modes are better than one. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 3(4), 257-287.
- Tuovinen, J.-E., Sweller, J. (1999). A comparison of cognitive load associated with discovery learning and worked examples. *Journal of Educational Psychology*, 91(2), 334-341.
- Weidenmann, B. (1988). *Psychische Prozesse beim Verstehen von Bildern*. Bern: Huber.
- Weidenmann, B. (1991). *Lernen mit Bildmedien: Psychologische und didaktische Grundlagen*. Weinheim: Beltz.
- Weidenmann, B. (1994). Informierende Bilder. In B. Weidenmann (Hrsg.), *Wissenserwerb mit Bildern (S. 9-58)*. Bern: Verlag Hans Huber.
- Wetzstein, K. (2000). <http://www.kwz.de/physik/gasgleichung.html> (20.9.2003).