Lernen mit interaktiven Visualisierungen

Joachim Wedekind

erschienen in: P. Baumgartner & G. Reinmann (Hrsg.) (2007). Überwindung von Schranken durch E-Learning. Festschrift für Rolf Schulmeister, Band 1. Innsbruck-Wien-Bozen, StudienVerlag. S. 57-76.

Zusammenfassung

Multimediale Lehr-/Lernanwendungen sind interaktiv: Ohne Aktionen der Lernenden haben diese lediglich einen statischen Bildschirm vor sich; erst durch ihre Eingaben werden Reaktionen des Systems ausgelöst. Gerade deshalb bleibt die Notwendigkeit, den Begriff der Interaktion zu schärfen. Dazu greife ich auf Taxonomien der Interaktivität zurück wie sie in der Literatur zu finden sind und versuche sie mit Lernaktivitäten im Rahmen eines didaktischen Designmodells zu verknüpfen. Eingegrenzt auf interaktive Visualisierungen werden dann deren wichtigste didaktische Funktionen – Veranschaulichung, die Erschliessung neuer Zugänge zu Inhalten und die Erschließung neuer Inhalte – an Beispielen charakterisiert. Abschließend werden notwendige instruktionale Maßnahmen genannt, mit denen das Potenzial interaktiver Visualisierungen in Lehr-/ Lernanwendungen ausgeschöpft werden kann.

Vorbemerkung und thematische Eingrenzung

Mit den digitalen Medien ist es technisch gelungen, alle Repräsentationsformen von Informationen integrativ zu behandeln. Das bedeutet insbesondere für Lehr-/Lernanwendungen, dass Multimedialität, Multicodalität und Multimodalität gegeben sind (vgl. Weidenmann, 2002). Lehrende haben damit zunächst einmal vielfältige Möglichkeiten der Strukturierung und Aufbereitung von Lehrstoffen. Aus Sicht der Lernenden ist neben der multimedialen Aufbereitung der Inhalte entscheidend, wie sie auf das Angebot zugreifen können, das heißt im Wesentlichen wie sie darin navigieren und welche weiteren Interaktionsmöglichkeiten ihnen geboten werden. Vor dem Hintergrund, dass das lernpsychologisch bedeutsamste Hauptmerkmal digitaler Medien darin besteht, dass unterschiedliche Symbolsysteme bzw. Codierungen verschiedene Sinnesmodalitäten der Lernenden ansprechen, haben Niegemann und Wedekind (2000) drei funktionale Merkmale beschrieben, die dieses unterstützen: Visualisierungen, interaktive Elemente und Navigationswerkzeuge.

Interaktivität ist ein Merkmal, das heute praktisch allen digitalen Medienprodukten zugeschrieben wird und das gilt auch wieder insbesondere für Lehr-/Lernanwendungen. Aber obwohl Interaktivität ein konstitutives Merkmal von Lernanwendungen darstellt, bleibt ihre Rolle für Fertigkeits- und Wissenserwerb, für Verstehen und Behalten zu prüfen, da dies konkrete Auswirkungen auf die Gestaltung entsprechender Angebote haben kann.

Im vorliegenden Beitrag soll dies eingeschränkt auf interaktive Visualisierungen versucht werden. Dabei soll über eine Taxonomie der Interaktivität hinausgegangen werden; vielmehr ist ihre Rolle im Kontext konzeptioneller Modelle zur didaktischen Strukturierung von Lehr-/ Lernangeboten zu klären. Die Einschränkung auf interaktive Visualisierungen erfolgt dabei bewusst, da diese innerhalb multimedialer Lernumgebungen einen unbestritten herausgehobenen Stellenwert haben.

Interaktivität

Wenn ich im Folgenden von interaktiven Visualisierungen spreche und damit von der Interaktivität digitaler Lehr-/Lernangebote, dann müssen die Begriffe Interaktion und Interaktivität für diesen Kontext definiert werden, weil dies in der einschlägigen Literatur nicht einheitlich gehandhabt wird. So wird in den Sozialwissenschaften unter Interaktion das wechselseitig aufeinander bezogene Verhalten zweier oder mehrerer Personen verstanden, mit dem Ziel der Kommunikation bzw. Diskussion. Dieses kann unmittelbar zwischen Personen erfolgen, aber auch durch Medien vermittelt werden (etwa Telefon, E-Mail oder Chat). Im Bereich der Computertechnik ist es üblich auch dann von Interaktion zu sprechen, wenn Personen mit Computern interagieren. Interaktivität ist dann die Eigenschaft der Hard-/ Softwarekombination, die den Nutzern Eingriffs- u. Steuerungsmöglichkeiten bieten. Genau in diesem Sinne soll Interaktivität im Folgenden verwendet werden.

Die Begriffe Interaktion und Interaktivität sind für die digitalen Medien spätestens seit der Einführung grafischer Mensch-Maschine Schnittstellen (GUI) zentral. Mit dem von Shneiderman (1983) eingeführten Konzept der direkten Manipulation ist auch bereits die enge Verknüpfung zwischen vielfältigen Visualisierungsformen und darauf bezogenen Operationen der Nutzer angelegt: Alle zu manipulierenden Objekte werden grafisch repräsentiert und alle Aktionen erfolgen durch direkte grafische Aktionen (i.d.R. mit der Maus), auch bei komplexen Abläufen. Die Folgen der Aktionen sind wiederum unmittelbar sichtbar. Zentraler Aspekt ist, dass die Nutzer durch ihre Interaktionen beim Hard-/Software-system Reaktionen auslösen, die weitere Aktionen der Nutzer hervorrufen können und sollen.

Die aktive Rolle der Nutzer und die Freiheitsgrade der Auswahl werden auch im didaktischen Kontext als zentral angesehen. Dennoch gibt es sehr unterschiedliche Ansätze, dies für die Gestaltung von Lehr-/Lernumgebungen zu operationalisieren. Eckert und Hofer (1999) unterscheiden zwischen einem technischen, einem verhaltenswissenschaftlichen und einem intentionalen Interaktivitäts-Begriff. Diese Dreiteilung findet sich auch bei Hanisch (2004) wieder. Er unterscheidet zwischen den Eigenschaften des grafischen Interfaces, wie es sich nach heutigem Stand den Nutzern darbietet, der Sicht der Lehrenden, für die sie als Interaktion zwischen internen und externen Wissensrepräsentationen auf Seiten der Lernenden zu konzipieren ist, sowie die kommunikationstheoretische Sicht.

Im Bildungsbereich standen zunächst technisch geprägte Modelle der Interaktivität im Vordergrund, etwa von Bartolomé (1993) oder Schwier und Misanchuk (1993), dort im Wesentlichen mit Bezug auf die menügesteuerten Zugriffe auf die damals aktuellen Bildplatten-Angebote. In verhaltenstheoretischen Termini sprechen Eckert und Hofer (1999) dann von Interaktivität, wenn das Verhalten einer Person A das Verhalten einer Person B oder eben auch ein digitales Medium beeinflusst, und wenn umgekehrt die Aktionen von B (bzw. Reaktionen des digitalen Mediums) auch die Aktionen von A beeinflussen, und wenn raum-zeitliche Nähe (Kontingenz) zwischen den Verhaltensweisen besteht. Es ist dieser Interaktivitätstyp, der in diesem Beitrag im Mittelpunkt steht (so wie auch bei Schulmeister und anderen). Der intentionale Interaktivitätsbegriff, der bei den Akteuren zusätzlich das Vorhandensein von sozialen Kognitionen wie Zielen, Beeinflussungsabsichten und Mittel-Ziel Überlegungen zur Voraussetzung hat und deshalb bezogen auf digitale Medien den Informationsaustausch zwischen Personen in Computernetzwerken (Kommunikations-funktion) im Auge behält, bleibt hier ausgeklammert.

Taxonomien der Interaktivität

„Die Aufgabe des Designers von Multimediaumgebungen besteht darin, die Interaktions-semantik des Benutzers mit der Interaktionssyntax des Programms in Deckung zu bringen." (Schulmeister, 1997, S. 144). Es gibt deshalb Bemühungen, Interaktivität einzuschätzen und einzuordnen. Von Schulmeister (2002, 2005) wurde dazu eine Taxonomie der Interaktivität von Multimedia vorgelegt, in der er sechs Stufen unterscheidet:

- *Objekte betrachten und rezipieren*: Benutzer können Multimedia-Komponenten nur betrachten. Die multimedialen Komponenten haben in diesem Fall die Funktion der Illustration oder Information und ihr Inhalt bleibt konstant.
- *Multiple Darstellungen betrachten und rezipieren*: So können beispielsweise mehrere Versionen einer Grafik nacheinander aufgerufen, mehrere Animationen nacheinander abgespielt werden. Auch auf dieser Stufe der Interaktivität können die Benutzer das Ergebnis, die Repräsentation der Komponente, nur betrachten und auch hier haben die Multimedia-Komponenten nur die Funktion der Illustration oder Information.
- *Die Repräsentationsform variieren*: Die Benutzer können durch direkte Manipulation der Komponente beispielsweise zweidimensionale Grafiken skalieren oder die Darstellung dreidimensionaler Animationen rotieren lassen. Diese Stufe der Interaktivität vermittelt den Benutzern zum ersten Mal das Erlebnis, einen aktiven Einfluss auf die Darbietung zu haben, sie aus verschiedenen Perspektiven oder in verschiedenen Größen betrachten bzw. aktiv in ihr navigieren zu können.
- *Den Inhalt der Komponente beeinflussen*: Variation durch Parameter- oder Datenvariation, d.h. die Benutzer können innerhalb eines gesetzten Rahmens durch die freie Eingabe von Daten oder durch Variieren von Parametern neue Darstellungsweisen erzeugen. Auf dieser Stufe der Interaktivität können die Benutzer neue Darstellungen generieren, wodurch die Multimedia-Komponenten neue Relationen visualisieren.
- *Das Objekt bzw. den Inhalt der Repräsentation konstruieren und Prozesse generieren*: Die höchste Stufe der Interaktivität wird erreicht, wenn den Benutzern auf der Seite des Lernprogramms Werkzeuge zur Verfügung stehen, mit denen sie selbst ihre Gedanken visualisieren, MindMaps anfertigen oder Objekte - wie z.B. mathematische Formeln und Berechnungen - kreieren können.
- *Konstruktive und manipulierende Handlungen mit situationsabhängigen Rückmeldungen*: Interaktivität in dieser Stufe bedeutet, dass dem „Partner" Computer oder Programm bedeutungstragende Objekte bzw. Aktionen zugeschickt werden, die das Programm versteht und auf die das Programm mit entsprechend bedeutungsvollen Handlungen antworten kann.

Schulmeisters Ansatz bzw. Kritikpunkt ist, dass Interaktivität im Learning Objects Metadata Entwurf (IEEE Draft Standard for Learning Object Metadata, 2002) nur formal definiert wird und damit keinen praktischen Nutzen für die Konstruktion und die Didaktik von Lernsystemen besitze. Insbesondere das dort genannte Interaktivitätsniveau - skaliert von very low bis very high - ist keine objektive Beschreibung unterschiedlicher Handlungsfreiheiten oder Handlungsformen und differenziert nicht zwischen Häufigkeit, Qualität oder medialem Charakter der Interaktion. Schulmeister selbst versteht unter Interaktivität das Handeln mit den Lernobjekten oder Ressourcen des Programms. Er unterscheidet dies strikt von Navigation, die lediglich zum Steuern des Ablaufs diene.

Bei der von Sims (1997) vorgelegten Taxonomie ist diese mit inbegriffen und eine feinere Differenzierung gegeben:

- *Object Interactivity* refers to the basic concept that when a user clicks on an object, there is some form of audio-visual response.
- *Linear Interactivity* is also often termed electronic page-turning, meaning linear navigation through content.
- *Hierarchical Interactivity* typically refers to a menu which offers access to the underlying content.
- *Support Interactivity* ranges from simple help messages to complex tutorial systems.
- *Update Interactivity* provides users with a computer-generated response to their input and ranges from simple question-and-answer formats to complex conditional responses.
- *Construct Interactivity* requires the learner to manipulate or construct objects to achieve specific goals.
- *Reflective Interactivity* alludes to situations where text responses are to be provided to the users answers.
- *Simulation Interactivity* extends the role of learner to that of controller or operator.
- *Hyperlinked interactivity* lets the user access hyperlinked information.
- *Nonimmersive Contextual Interactivity* transports users into a microworld which models their work environments and has them undertake tasks which reflect those of their work experience.
- *Immersive Virtual Interactivity* provides an interactive environment in which the learner is projected into a complete computer-generated world which responds to individual movement and actions.

Weitere Taxonomien, wie die von El Saddik (2001) oder die „Guerra Scale“ (Guerra & Heffernan, 2004) weisen bei variierenden Stufungszahlen (sieben bei El Saddik, zehn bei der Guerra Scale) die gleiche Orientierung an den Funktionalitäten der Lehr-/Lernumgebung auf. Für Schulmeister (2005) wird mit dem Ansteigen des Interaktivitätsniveaus der Ereignisraum vielfältiger, der Darstellungsraum wird variantenreicher und der Bedeutungsraum wächst. Die höheren Level enthalten alle Aspekte der darunter liegenden Level und sind mit der historischen Abfolge der psychologischen Lerntheorien kompatibel: Die reaktiven unteren Stufen der Interaktivität nehmen leicht behavioristischen Charakter an, während die höheren Interaktivitätsniveaus eher kognitive Lernkonzepte voraussetzen und befördern, wie beispielsweise das Entdeckende Lernen oder konstruktivistische Lernparadigmen (Schulmeister, 1997).

Interessant ist die Sichtweise von Sacher (1996), Interaktivität (der digitalen Medien) sei die Erleichterung von Interaktion, denn *„welche und wieviel Interaktion zustande kommt, hängt nicht nur von der Interaktivität des Multimediasystems ab, sondern auch vom Benutzer, genauer: von dessen Interaktionskompetenz. Die tatsächlich stattfindende Interaktion ist gewissermaßen das Produkt aus der Interaktivität des Systems und der Interaktionskompetenz des Benutzers.“*

Konsequenterweise trennt auch Kerres (1998) strikt zwischen dem technisch definierten interaktiven Medium und dem interaktiven Nutzerverhalten. Wenn nun Interaktivität als Gütekriterium für die Konzeption eines Lernsystems gelten soll, ist eine Gewichtung der einzelnen Interaktionsmöglichkeiten hinsichtlich ihrer didaktischen Funktionen erforderlich, denn nicht jede Interaktionsmöglichkeit fördert den Lernprozess. Die Gestaltung von

Interaktionsoptionen sollte daher ein lern- bzw. kognitionstheoretisch fundiertes didaktisches Designmodell zugrunde liegen.

Didaktisches Designmodell

Für die Entwicklung interaktiver Lehr-/Lernsysteme auf der Basis digitaler Medien lassen sich strukturell und funktional vier Grundkomponenten beschreiben, die in einer integrativen Beziehung zueinander stehen (Tergan, 2000).

- *Lernerkomponente*: Diese betrifft die Art der Lernvoraussetzungen, die für effektives Lernen erforderlich sind. Die Anforderungen können je nach den individuellen psychologischen Kontext, in dem die Auseinandersetzung mit den Lerninhalten erfolgt, unterschiedlich sein (kognitive, motivationale, situative Faktoren).
- *Inhaltskomponente*: Diese betrifft die Lerninhalte, d. h. das Wissen und die Fertigkeiten, die von einem System vermittelt bzw. im Rahmen des Lernprozesses erworben werden können. Die Offenheit der Lerninhalte gegenüber einem freien Zugriff der Lernenden ist abhängig von Komplexität, Strukturierung und Art der Inhalte sowie der didaktischen Aufbereitung, die die kognitive Erschließung durch die Lernenden bestimmt.
- *Pädagogisch-didaktische Komponente*: Grundlegende Anforderungen an diese Komponente betreffen Konzeptionen und Annahmen darüber, welche Formen von Anleitungen, Hilfen und Anpassungen der Lerninhalte für das Erreichen der angestrebten Ziele angemessen sind.
- *Informationstechnologie-Komponente*: Diese betrifft das Vorhandensein adäquater Hard- u. Softwarevoraussetzungen. Darin sollten sich idealerweise der pädagogisch-didaktische Ansatz sowie die Anforderung von Seiten der Lernenden und der Lerninhalte widerspiegeln.

Hier zeigt sich also, dass die bisherigen Überlegungen zur Interaktivität zunächst nur die Lerner- und die Informationstechnologie-Komponente betrafen und daher im jeweils konkreten Fall um die Überlegungen zu den beiden anderen Komponenten ergänzt werden müssen.

Bei der pädagogisch-didaktischen Komponente unterscheide ich in Anlehnung an Einsiedler (1981) sowie Mellar et al. (1994) folgende Formen, in denen Informationstechnologien für Lehren und Lernen benutzbar sind:

- *Expositorische Lernaktivitäten*, bei denen die Lernenden Informationen durcharbeiten, die von den Lehrenden auf einem angemessenen Niveau angeboten werden. Entsprechende Lehrverfahren haben einen hohen Strukturierungsgrad und die Aufbereitung des Lehrinhalts und die Gestaltung des Lehr-Lern-Prozesses geht weitgehend von den Lehrenden aus.
- *Erarbeitende Lernaktivitäten*, bei denen die Lehrinhalte im Austausch zwischen Lehrenden (bzw. dem Lehrangebot) und Lernenden entwickelt werden. Diese Lehrverfahren weisen mittleren Strukturierungsgrad auf und versuchen, die Lernenden kognitiv zu aktivieren.
- *Explorative Lernaktivitäten*, bei denen die Lernenden Vorstellungen über einen Inhaltsbereich untersuchen, die von jemand anders angeboten werden (Lehrer oder Experte), und wobei diese Vorstellungen durchaus stark von den Vorstellungen der Lernenden abweichen können.

- *Expressive (artikulative) Lerneraktivitäten*, bei denen die Lernenden ihre eigenen Ideen ausdrücken und in den sozialen Austausch einbringen können. Dazu zählt einerseits die Dokumentation eigener Ideen und Überlegungen, insbesondere aber die Umsetzung dieser Ideen mit geeigneten Werkzeugen (z.B. MindMap-Programme, Modellbildungssysteme, geometrische Konstruktionsprogramme u.ä.).

Die Übergänge zwischen den Lernaktivitäten sind sicherlich fließend. Explorative Lernaktivitäten können dabei einer konstruktivistischen Auffassung von Lehren und Lernen zugeordnet werden, die in Lernumgebungen mit authentischen und komplexen Problemsituationen, mit situierten Anwendungskontexten und multiplen Perspektiven die Auseinandersetzung mit dem Lernstoff fördern (vgl. z.B. Mandl et al., 2002). Papert hat diese Sichtweise weiter pointiert und das Lernen als einen aktiven Prozess charakterisiert, in dem Menschen aus ihren Erfahrungen Wissen durch Konstruktion (im Sinne des Wortes, also expressive Lerneraktivitäten) bedeutungsvoller Produkte aufbauen (Harel & Papert, 1991). Er hat dafür geeignete Werkzeuge konzipiert und entwickelt, wie etwa die Programmiersprache Logo mit der Schildkrötengrafik oder LEGO Mindstorms, bei dem mit Hilfe der grafischen Programmiersprache ROBOLAB Lego-Roboter gesteuert werden können.

Für unsere Überlegungen ist die Tatsache bedeutsam, dass die o.g. Interaktivitätsstufen sich diesen Lernaktivitäten nicht direkt zuordnen lassen. Es ist jeweils notwendig, die möglichen didaktischen Funktionen der Visualisierungen zu bestimmen und in diesem Kontext dann den Beitrag des interaktiven Zugangs zu diesen Funktionalitäten zu präzisieren. So sind die interaktiven Komponenten der Lernumgebung für explorative Lernaktivitäten besonders wichtig, weil Exploration ganz auf die von den Lernenden initiierten Aktionen setzt (Erkunden, Experimentieren). Beim Erkunden können statische Systembestände untersucht werden, also vorhandene Strukturen, Zustände oder Verläufe ausgewählt, betrachtet und analysiert werden. Beim experimentierenden Interagieren können Veränderungen vorgenommen, Vermutungen angestellt, Effekte studiert und überprüft werden (Paul & Foks, 1991).

Explorationsunterstützende Lernumgebungen müssen besonders leicht steuerbar und erlernbar sein. Dazu zählt (etwa bei Modellbildungssystemen und mathematischen Werkzeugen) die Verwendung fachspezifischer grafischer Repräsentationen, die keinen weiteren Transformationsprozess erfordern. Des Weiteren ist eine höchstmögliche Flexibilität wünschenswert, die ein „spielerisches“ Vorgehen erlaubt, etwa Undo-Optionen, ein Schulungsmodus mit Musterlösungen und Konfigurierbarkeit, um gegebenenfalls die Komplexität zu reduzieren bzw. dem Erfahrungsstand der Lernenden gemäß zu erweitern.

Für expressive Lernaktivitäten ist bedeutsam, dass in den korrespondierenden Anwendungsformen sich eigene Ideen formulieren, darstellen und austesten lassen. Für die Kommunikation mit Lehrenden und anderen Lernenden ist die Dokumentation der eigenen Arbeit wichtig, unterstützt durch Protokollmöglichkeiten und Export von Ergebnissen in andere Anwendungen. Diese Funktionalitäten sind auch für die Lehrenden wichtig, die damit begleitende Materialien - wie z.B. Arbeitsblätter - erstellen können.

In multimedialen Lernumgebungen handelt es sich in der Regel um interaktive Grafiken, bei denen die Lernenden durch Eingabe von Entscheidungen, Aktionen zur Programmsteuerung, Bestimmung von Zahlenwerten usw. diese Darstellungen individuell bestimmen können und damit expositorische bis explorative Lernaktivitäten durchführen. Darunter fallen zum Beispiel (nach Schüpbach et al., 2003) ganz konkret

- Grafiken, die beim Überfahren mit dem Mauszeiger je nach Lage entsprechende Informationstexte anzeigen
- Grafiken, bei denen einzelne Elemente angeklickt werden können, worauf entweder ein neues Fenster mit Informationen geöffnet wird oder im Rahmen einer Frage eine Rückmeldung gegeben wird.
- Grafische Elemente, die mit dem Mauszeiger angefasst und auf dem Bildschirm bewegt werden können (Drag & Drop)
- Diagramme, in denen per Mauszeiger Linien oder andere Objekte eingezeichnet werden können
- Grafiken, bei denen sich durch Bewegen eines Elements mit dem Mauszeiger das gesamte System verändert (z.B. in Simulationen).
- 3D-Modelle, die mit dem Mauszeiger angefasst, um ihre Achsen bewegt und so aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet bzw. bei denen mit dem Mauszeiger Schalter und Knöpfe bedient werden können.

Während diese Aktionen sich auf einzelne Elemente innerhalb einer Repräsentation beziehen, gibt es auch Aktionen, die sich auf ganze Gruppen grafischer Elemente beziehen können und damit die visuelle Analyse der Gesamtinformation unterstützen. Dies kann etwa die Auswahl und das Hervorheben von Details betreffen, den Wechsel zwischen Repräsentationsarten oder die Auswahl und Umordnung von Daten sowie deren Annotation für Vergleiche und die Überprüfung von Hypothesen.

Im Folgenden kann nun die Rolle interaktiver Visualisierungen bezüglich dreier zentraler didaktischer Zielsetzungen ausführlicher beleuchtet werden:

- Die *Veranschaulichung* von Sachverhalten durch (multiple) grafische Repräsentationen,
- die *Erschließung neuer Zugänge* zu Inhalten (Visualisierung von Zuständen, Verläufen und Strukturen),
- die *Erschließung neuer Inhalte* (Gedankenexperimente, Modellbildung).

Veranschaulichung

Veranschaulichung ist die am häufigsten genannte Funktion, wenn vom didaktischen Nutzen der Visualisierungen gesprochen wird. Was unter "Anschaulichkeit" und "Veranschaulichung" im Einzelfall zu verstehen ist, wird in der Literatur meist nicht näher erläutert. Eigene Erfahrung und unmittelbare Anschauung sind grundlegend für jeden Erkenntnisprozess. Veranschaulichung kann als die durch das Medium vermittelte Anschauung angesehen werden, deren Wert an dem Grad der erreichten Wirklichkeitsnähe zu messen ist. Dieser Form der Veranschaulichung entspricht z.B. bei einer Computersimulation die Funktion des Experimentersatzes (jedenfalls wenn der direkte experimentelle Zugang zu den realen Phänomenen nicht möglich ist).

Als *didaktische Visualisierung* wird dann die zweck- und lernzielbezogene Veranschaulichung durch grafische Reduktion der Komplexität sinnlich wahrnehmbarer Erscheinungen auf die für den intendierten Lernprozess wichtigen Informationen bezeichnet (Armbruster & Hertkorn, 1978). Diese Darstellungen können Zustände, Verläufe und Strukturen beinhalten, d.h. es werden abstrakte Daten oder Zusammenhänge in eine grafische bzw. visuell erfassbare Form gebracht. Dafür haben sich einige Grundformen der Darstellung herausgebildet: Charts, Diagramme, Piktogramme sowie schematische bis realistische Abbildungen (vgl. Ballstaedt, 1997). Diese Grundformen gibt es nicht nur in statischer

sondern auch in dynamischer Form. Die Tatsache, dass es inzwischen eigene Studiengänge zur Computergrafik bzw. Computervisualistik gibt, zeigt – ebenso wie die Verfügbarkeit spezieller Visualisierungsprogramme – den hohen Stellenwert innerhalb der Wissenschaft und damit auch unmittelbar für die Lehre.

Die dabei gegebenen *multiplen Repräsentationen* bieten in Lernumgebungen die Möglichkeit, unterschiedliche Zugänge zu einem Inhaltsbereich zu eröffnen. Sie können sich gegenseitig ergänzen und liefern so insgesamt ein vollständigeres Bild als eine einzelne Informationsquelle (Ainsworth, 1999). Wenn nun diese Repräsentationen mit interaktiven Komponenten versehen sind und dynamische Veränderungen zulassen, können die Lernenden durch die unterschiedlichen Sichtweisen auch multiple mentale Repräsentationen erarbeiten.

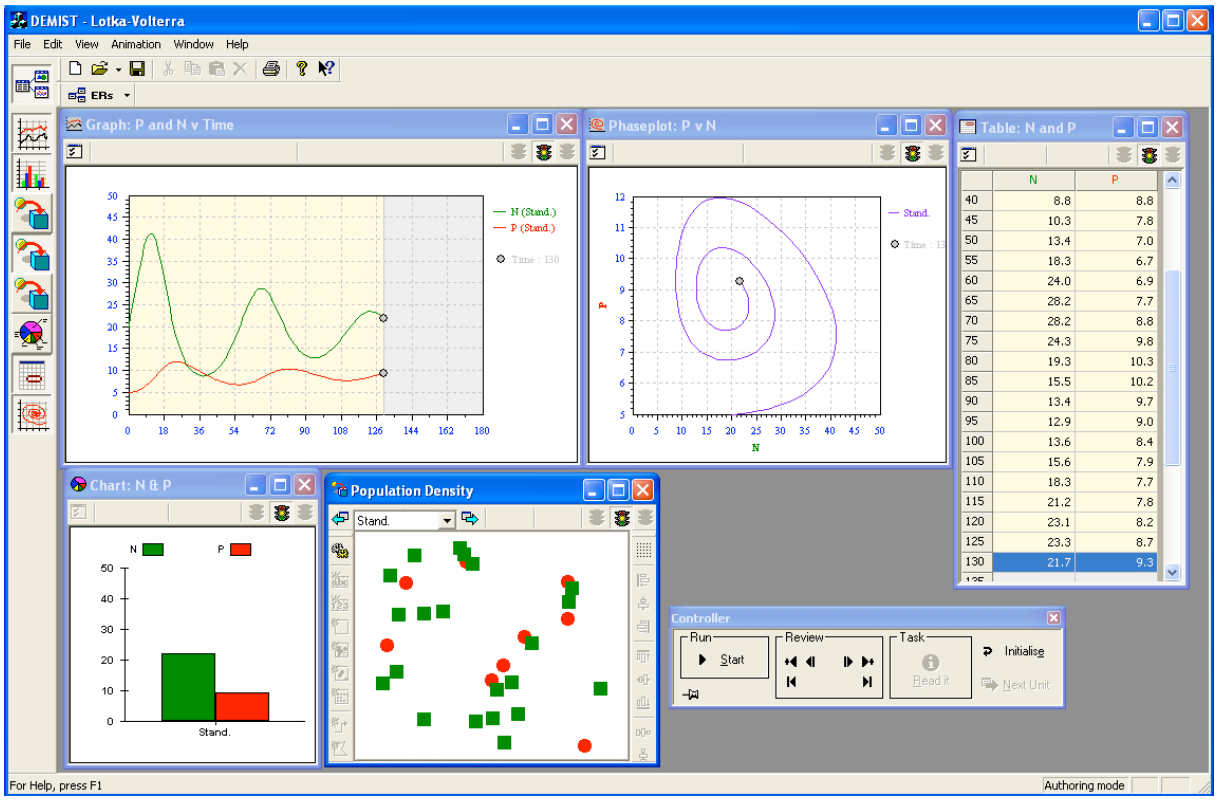

Abb. 1: Multiple Repräsentationen der Ergebnisse einer Simulation des Räuber-Beute-Modells nach Lotka und Volterra. Ausgabe eines Simulationslaufs in tabellarischer Form (rechts), als Zeitdiagramm, d.h. Auftrag der Größe von Populationen gegen die Zeit (links) und als Phasenplot, d.h. Auftrag der Größe einer Population gegen die zweite Population (Mitte), sowie Dichte im Raum (unten rechts). Erstellt mit dem Programm DEMIST (Ainsworth & Van Labeke, 2002).

Das Beispiel in Abbildung 1 zeigt, dass die verschiedenen Darstellungsarten unterschiedliche Qualitäten besitzen und unterschiedliche Informationen liefern können. Der Gewinn an Informationen über das Stabilitätsverhalten beim Phasendiagramm wird mit dem Verlust anderer Informationen erkauft. Beispielsweise geht beim Schritt vom Zeitdiagramm zum Phasendiagramm die Information über die Geschwindigkeit der Gleichgewichtsannäherung verloren. Die genauen Populationsgrößen zu jedem Zeitpunkt lassen sich wiederum nur schwer aus den Zeitdiagrammen ermitteln, werden aber von der Tabelle geliefert. Die verschiedenen Diagramme sind also keineswegs untereinander gleichwertig und können sich nicht gegenseitig ersetzen. Welches zu wählen ist hängt davon ab, welcher Aspekt gerade im Mittelpunkt des Interesses steht.

Für die Lernenden ist es wichtig, die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Repräsentationen zu verstehen. Nur dann können die jeweiligen Charakteristika sachgerecht interpretiert und für die Problemlösung genutzt werden. Die lernerseitige Kontrolle unterstützt dies, wenn damit die animierte Entwicklung mehrerer Graphen zeitgleich steuerbar ist und (wie im obigen Beispiel) Datensätze gezielt abgefragt werden können. Das ist besonders bei komplexen Systemen hilfreich, bei denen die Repräsentationen sich gegenseitig durch die Betonung unterschiedlicher Systemeigenschaften ergänzen können und damit das Verstehen des Gesamtsystems fördern.

Die Erschließung neuer Zugänge

In vielen Fällen, in denen die Vermittlung einer Problemstellung, einer Methodik oder eines spezifischen theoretischen Ansatzes besonders schwierig ist, können mit interaktiven Visualisierungen neue Zugänge erschlossen werden. Das gilt insbesondere für die Darstellung von zeitlichen *Verläufen*, mit denen Systementwicklungen dargestellt werden. Sie erlauben den Lernenden sich schnell einen Überblick über charakteristische Veränderungen in entsprechenden Systemen zu verschaffen. Typische Beispiele dafür sind Simulationen dynamischer Systeme in den Naturwissenschaften (wie das Beispiel in Abb. 1), den Ingenieurwissenschaften, den Wirtschaftswissenschaften und vielen anderen Wissenschaftsbereichen.

Die Zugriffsart und damit die dabei erforderliche Interaktivität kann dann je nach Lehrform sehr unterschiedlich ausfallen. In einem expositorischen Setting kann es reichen, die Informationen in vordefinierter Form anzubieten, d.h. ohne weitere Variationsmöglichkeiten der Lernenden. In einem exploratorischen Setting dagegen könnten die Lernenden selber bestimmen, welche Repräsentationsform(en) sie abrufen möchten, welche Variablen dargestellt werden und mit welchen Parametern (z.B. Skalierung, Farben).

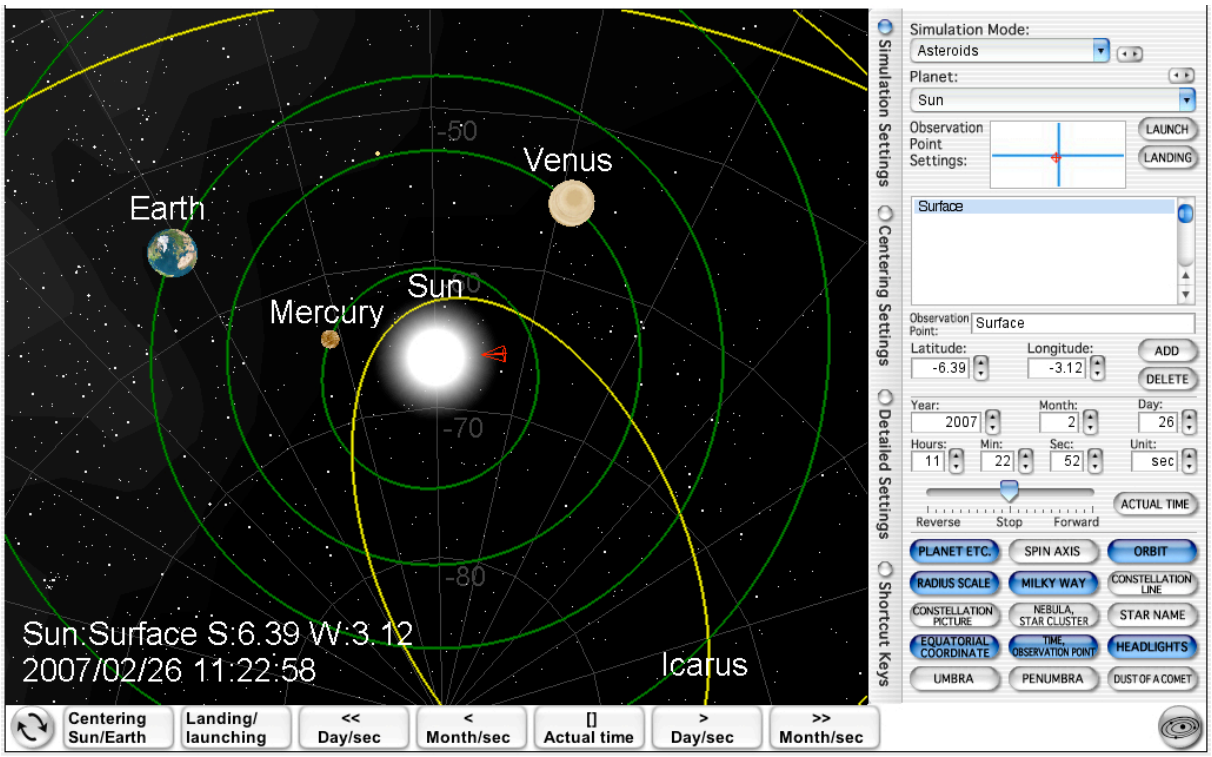

Abb. 2: Simulation des Sonnensystems mit vielfältigen Optionen der Darstellungsform. Die Perspektive kann frei gewählt werden. Über Schalter kann von der statischen Sicht auf eine Animation der Planetenbewegung umgeschaltet werden. Erstellt mit dem Programm Solar System Simulator.

Aber auch *Systemzustände*, also zeitunabhängige Systemeigenschaften lassen sich entsprechend darstellen. Als Beispiel kann die Darstellung der Energiezustände der Elektronenhülle eines Atommodells durch eine Wellenfunktion bzw. durch die räumliche Ausdehnung von „Elektronenwolken“, den Orbitalen, genannt werden. Die interaktive Parametereingabe zur Änderung von Koordinaten, Skalen und Funktionswerten erlaubt dann, ein Modell „von allen Seiten“ zu betrachten. Ein weiteres entsprechendes Beispiel ist ein Simulator des Sonnensystem (vgl. Abb. 2). Dort können beliebige Beobachtungs-positionen im Raum eingenommen und ein gewünschtes Datum gewählt werden, was unterschiedliche Sichten auf unser Sonnensystem erlaubt.

Auch *Strukturen von Systemen* können entsprechend visualisiert werden. Zu ihrer Darstellung gibt es vielfältige Möglichkeiten (Schaltdiagramme, Netzwerke, Flussdiagramme usw.). Verbreitet sind Pfeildiagramme verschiedener Stufen, mit denen die kausale Zuordnung der Elemente (1. Stufe), die Richtung einer Systemveränderung durch Wirkungsparameter (2. Stufe) und die genauen metrischen Beziehungen des Systems (3. Stufe) angegeben werden können. Vertreter der 1. Stufe sind z.B. MindMaps, d.h. die Abbildung der Zusammenhänge zwischen Aspekten eines Wissensbereichs (in Form von Knoten und Verbindungen).

Die Diagramme der 3. Stufe sind unmittelbar für Computersimulationen verwendbar, und zwar dann, wenn sie aus genau definierten Symbolen bestehen, die zu Blockdiagrammen zusammengesetzt werden können, aus denen wiederum die Gleichungssysteme, die das Systemverhalten beschreiben, direkt herzuleiten sind. Es gibt mehrere solcher Symboliken, deren Entwicklung in verschiedenen Wissenschaftsgebieten stattgefunden hat, deren Anwendung aber nicht auf die ursprünglichen Gebiete beschränkt geblieben ist. Vielmehr können mit ihnen dieselben Systeme unterschiedlich dargestellt werden, je nachdem welche Aspekte von besonderem Interesse sind. Drei Klassen solcher Symboliken sind zu unterscheiden: Die Symbolisierung des materiellen Aufbaus (z.B. die Darstellung elektronischer Schaltkreise), die Symbolisierung des Flusses von Größen (z.B. chemische Fluss-Gleichungen) und die Symbolisierung der mathematischen Beziehungen (z.B. Analogrechnerschaltbilder, vgl. Abb. 3).

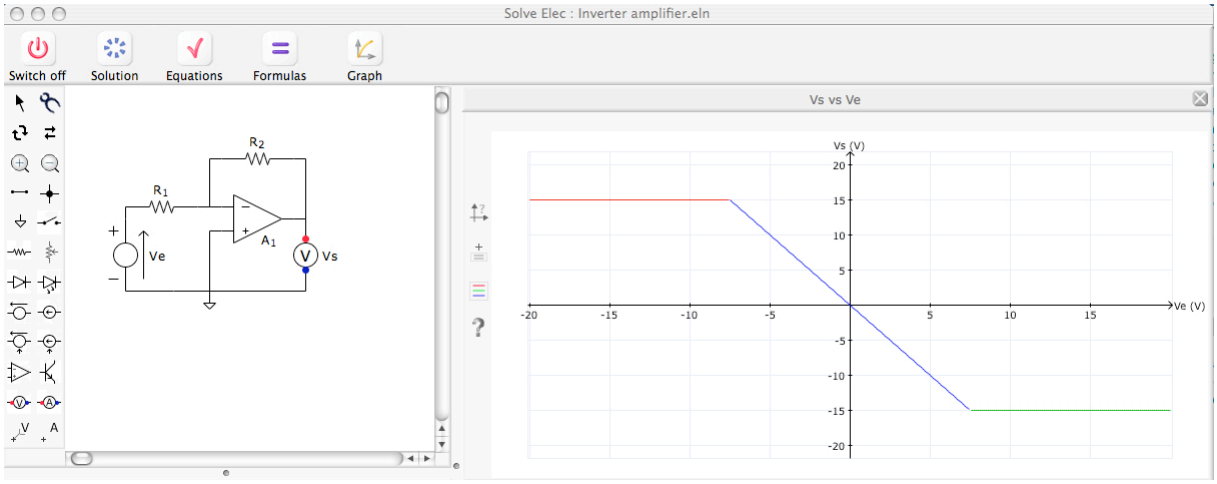

Abb. 3: Analogschaltbild eines Verstärkers als Grundlage einer Simulation. Mit dem Symbolbaukasten sind vielfältige Schaltungen darstellbar. Sie können im Simulationsmodus direkt getestet werden. Erstellt mit dem Programm SolveElec.

Die Erschließung neuer Inhalte

Gedankenexperimente sind (wie ja auch Computersimulationen) ganz dem Theoriebereich zuzuordnen. Es werden bei ihnen *"gedanklich konstruierte Vorstellungen über einen Untersuchungsgegenstand entsprechend den Grundsätzen der experimentellen Methodik variiert und die Konsequenzen dieser Manipulation ebenfalls rein spekulativ abgeleitet"* (Koller, 1969). Schränken wir nun die "gedanklich konstruierten Vorstellungen" auf mathematisch formulierte Modelle ein und ersetzen die "spekulativen Ableitungen" durch die numerische Berechnung, erhalten wir genau die Charakterisierung der Computersimulation, weshalb diese auch als "materialisiertes Gedankenexperiment" bezeichnet werden kann. Beim Gedankenexperiment wird bewusst von allen hinderlichen Nebeneffekten (den Experimentierfehlern des Realexperiments) abstrahiert, um das untersuchte Phänomen in "Reinkultur" zu erhalten. Sieht man einmal von den durch die numerischen Verfahren gegebenen Schritt- und Rundungsfehlern ab, die außerdem mit entsprechendem Aufwand nahezu beliebig klein gemacht werden können, bietet die Computersimulation alle Möglichkeiten des Gedankenexperiments mit dem Gewinn zusätzlicher Präzision. Die Computersimulation ist deshalb geeignet, Funktionen des Gedankenexperiments zu übernehmen.

Gedankenexperimente leiten ihre Ergebnisse vollständig aus der Theorie ab und sind deshalb in vielen Fällen von den Lernenden nur schwer nachvollziehbar. Mit interaktiven Visualisierungen in entsprechenden Computersimulationen bietet sich hier faszinierende Möglichkeiten, mit lernergesteuerten Aktivitäten konkrete Vorstellungen über theoretische Modelle zu entwickeln. Ihr didaktischer Zweck besteht darin, Vorerfahrungen bei solchen Effekten zu schaffen, die das normale, klassisch geprägte Vorstellungsvermögen übersteigen. Ein inzwischen mehrfach umgesetztes Beispiel sind die relativistischen Effekte (z.B. die veränderte Formwahrnehmung) bei Reisen mit annähernd Lichtgeschwindigkeit. Wie relativistische, das heißt schnell bewegte, Objekte dem Betrachter erscheinen, kann gemäß den Gesetzen der Speziellen Relativitätstheorie mittels des so genannten relativistischen Rendering berechnet werden (vgl. Abb. 4).

Abb. 4: Tempolimit Lichtgeschwindigkeit: Die Marktgasse in Tübingen bei Schrittgeschwindigkeit (links), bei 80% der Lichtgeschwindigkeit (Mitte) und bei 99% der Lichtgeschwindigkeit (rechts). Am Max-Planck- Institut für biologische Kybernetik Tübingen (im Rahmen des Projekts Virtual Tübingen) ist mit einem speziell umgebauten Trimm-Fahrrad eine entsprechend schnelle interaktive Fahrt durch ein dreidimensionales Modell der Tübinger Innenstadt möglich.

Modellbildung bzw. die Modellmethode ist ein zentraler Inhalt, der in der Lehre kaum entsprechende Berücksichtigung findet. Modelle werden ständig in Forschung und Lehre eingesetzt. Modelle sind für die Erkenntnisgewinnung zentral und die Modellmethode hat einen entsprechend hohen Stellenwert innerhalb des wissenschaftlichen Erkenntnisprozesses. Zur Erschließung der Modellmethode als Unterrichtsgegenstand sind Simulationsprogramme mit vorgegebenen Modellen nur bedingt geeignet. Mit ihnen ist zwar all das möglich, was wir im Rahmen der Modellmethode als Modellverwendung bezeichnen, d.h. die Durchführung von Modellexperimenten und das Erkennen der Eigenschaften und Grenzen der Modelle. Mit ihrer Beschränkung auf ein bestimmtes, nicht veränderbares Modell bleibt aber die wichtige Phase der Modellrevision, ebenso wie alle anderen Phasen des Modellaufbaus, ausgeklammert. Annahmen über sinnvolle Erweiterungen oder Änderungen der Modelle müssen hypothetisch bleiben und alternative Modelle können nicht miteinander verglichen werden.

Daraus ist ersichtlich, dass dies in der Praxis vom Lernenden eine Menge Kenntnisse erfordert, die mit seinem eigentlichen Problem nichts zu tun haben. Es genügt nicht die Kenntnis einer gängigen höheren Programmiersprache, sondern es ist zusätzlich das Beherrschen gewisser Kommandos für den jeweiligen Rechner, des Editors (zur Eingabe des Programms), der Grafiksoftware usw. erforderlich. In der Regel sind diese Kenntnisse nicht vorauszusetzen. Ihre Vermittlung kann nicht Aufgabe einer Lehrveranstaltung sein und wäre meist schon zeitlich nicht zu leisten. Die Codierung wäre sehr fehleranfällig, so dass das codierte Modell nicht dem mentalen Modell der Lernenden entsprechen muss, wobei derartige Diskrepanzen den Lernenden nicht rückgemeldet und damit nicht bewusst werden.

Sollen veränderte oder neue Modelle auf dem Computer simuliert werden, so müssen sie zuallererst auf dem Computer implementiert werden. Der Einsatz interaktiver Simulationssysteme umgeht diese Schwierigkeiten. Ihre Nutzung setzt keine speziellen EDV-Kenntnisse voraus. Es handelt sich um abgeschlossene, lauffähige Programme, bei denen der Modellaufbau nur die Kenntnis der verwendeten Symbolik (bei grafischen Systemen) voraussetzt. Diese sind leicht und schnell zu erlernen, zumal dann, wenn sie mit der Symbolik des jeweiligen Fachgebiets übereinstimmen. Die gesamte Implementation verkürzt sich dadurch auf den interaktiven Aufbau der Modellstruktur.

In den entsprechenden interaktiven Simulationssystemen werden solche Diagramme auf dem Bildschirm von den Benutzern aufgebaut. Das Diagramm erscheint als Rückmeldung auf die Eingaben der Nutzer und ist die Kontrolle dafür, dass das zu behandelnde System vom Rechner richtig interpretiert worden ist. Der Isomorphismus zwischen Diagramm und mathematischen Gleichungen erlaubt eine Schnittstelle Mensch-Maschine, bei der die Übersetzungsarbeit ganz auf die Seite des Rechners verlagert werden kann.

Da der Benutzer nur das Diagramm, die Parameter und die Anfangswerte des Systems für die Simulationsläufe einzugeben braucht, ist er in wesentlich kürzerer Zeit als bei einer vollständigen Eigenprogrammierung in der Lage, sein Modell zu untersuchen. Andererseits erlauben die grafischen Simulationssysteme ein phänomenorientiertes Vorgehen. Der Benutzer kann den mathematischen Formalismus zunächst ausklammern und sich auf die funktionalen und strukturellen Zusammenhänge konzentrieren, die von den Diagrammen wesentlich übersichtlicher wiedergegeben werden als die zugehörigen Gleichungen.

Durch die interaktive Grafik dieser Modellierungssysteme wird neben der Veranschaulichung der abstrakten Zusammenhänge (ikonische Komponente) und der Hinführung zu formalen

Darstellungen (symbolische Komponente) in mathematischen Gleichungen bzw. formal-logischen Beziehungen einen hohe Eigenaktivität der Lernenden initiiert (enaktive Komponente), weil mit ihr die vollständige Modellimplementation, Simulation und Programmsteuerung erreicht wird.

Nicht zufällig haben entsprechende Werkzeuge in den Ingenieurwissenschaften Verbreitung gefunden. Mit der „Visuellen Programmierung“ gibt es einen eigenen Zweig der Software-Entwicklung, der visuelle Sprachen zur Umsetzung von Algorithmen nutzt. Die grafische Umsetzung komplexer Algorithmen stößt allerdings ihrerseits an eine Grenze, die „Deutsch Limit“ genannt wird (nach dem Informatiker L. Peter Deutsch): Mehr als 50 visuelle Elemente auf dem Bildschirm sind schwer darstellbar und zu verarbeiten. Das gilt natürlich auch für Modellbildungssysteme und die Repräsentation großer Modelle. Manchmal wird dies durch Container umgangen, die Unterstrukturen der Modelle enthalten und dadurch die Komplexität temporär reduzieren.

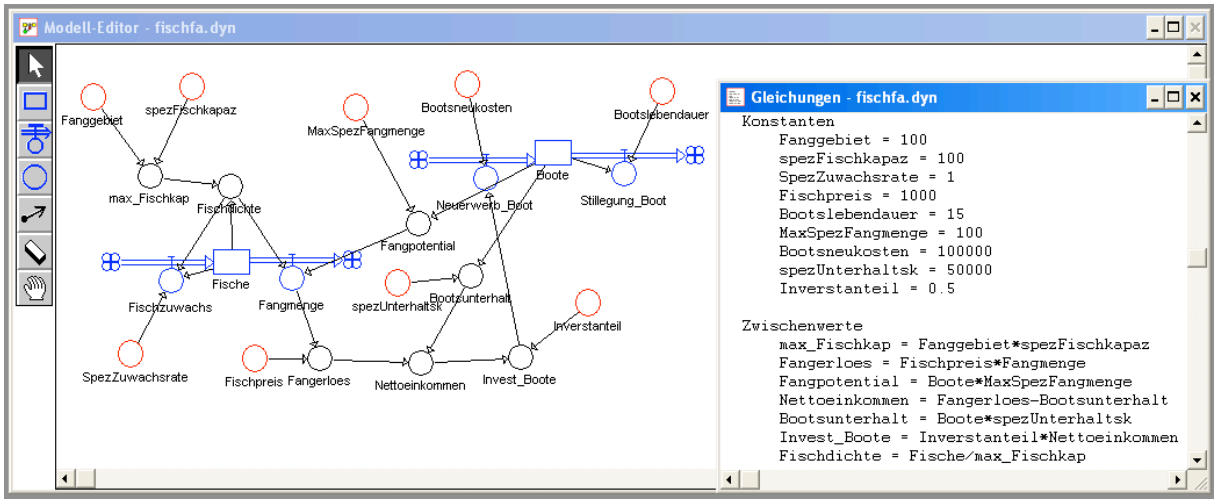

Abb. 5: Räuber-Beute-Modell in der Symbolik des System Dynamic Ansatzes. Die Modellimplementation besteht im Aufbau der Grafik, sowie in der Festlegung der mathematischen Verknüpfungen bzw. der Rechenwerte in Dialogboxen. Erstellt mit dem Programm DYNASYS.

Lernen mit interaktiven Visualisierungen

In den vorherigen Abschnitten habe ich versucht, die Merkmale interaktiver Visualisierungen heraus zu arbeiten und mit didaktischen Funktionen in Beziehung zu setzen. Allerdings, das Angebot multipler Repräsentationen, die Animation zeitlicher Phänomene und räumlicher Strukturen sowie die interaktive Steuerung des Zugriffs auf diese Angebote und die Manipulation ihrer Eigenschaften alleine sichern noch keine Lerneffekte. Wir sprechen also zunächst von Potenzialen, die in geeigneten Lernumgebungen ausgeschöpft werden müssen. Es ist hier nicht der Raum, eine Übersicht über relevante Untersuchungen und Erkenntnisse zusammen zu stellen. Ich möchte aber auf exemplarische Untersuchungen hinweisen, die verdeutlichen, dass interaktive Visualisierungen immer erst im inhaltlichen und methodischen Kontext ihr Potenzial entfalten können.

Die gemeinsame Darbietung multipler Repräsentationen bietet für die Lernenden den Vorteil, Informationen hinsichtlich ihrer jeweiligen inhaltlichen und funktionalen Stärken und Schwächen zu nutzen und unvertraute Repräsentationen mit Hilfe vertrauter Repräsentationen zu verstehen (vgl. Ainsworth, 1999). Kognitive Modelle des Text und

Bildverstehens stützen zwar die Bedeutung einer kombinierten Präsentation unterschiedlicher Darstellungsformen, zeigen aber auch, dass diese nicht zwangsläufig zu besserem Wissenserwerb führen. Erst wenn die Lernenden die unterschiedlichen Repräsentationen auf einander beziehen und mental kohärent integrieren können, führt dies zu einem Verständnis des Sachverhalts. Allerdings haben Lernende genau damit häufig Probleme, weil die Bedeutung der jeweiligen Repräsentationen nicht erkannt wird. Entsprechende Unterstützungsmaßnahmen sind die räumliche Integration der Repräsentationen zur Verminderung visueller Suchprozesse und damit die Reduzierung lernirrelevanter kognitiver Belastungen (Prinzip der räumlichen Kontiguität, Mayer, 2001). Des Weiteren kann das wechselseitige aufeinander Beziehen multipler Darstellungen erleichtert werden, wenn die Lernenden aufgefordert werden, bekannte Repräsentationen den unbekannten Repräsentationen interaktiv zuzuordnen (aktives Integrieren; Bodemer, 2004).

Die dynamische Repräsentation von Informationen (durch Animationen) kann die Aufmerksamkeit der Lernenden fokusieren und steuern, andererseits können die Lernenden dadurch davon abgehalten werden mentale Simulationen selbstständig und konstruktiv zu vollziehen. Rieber (1990) hat darauf hingewiesen, dass die Lernenden darauf vorbereitet werden müssen, worauf bei den Animationen zu achten ist. Als lernförderlich hat sich deshalb auch erwiesen, wenn über interaktive Elemente der Ablauf der dynamischen Visualisierung gesteuert werden kann (bezüglich Geschwindigkeit, Wiederholung). Hinführungen und begleitende Instruktionen haben sich auch für die Arbeit mit Simulationen und Modellbildungssystemen bewährt. Zwar bieten diese die Möglichkeit, sich mit realitätsnahen komplexen Problemen auseinander zu setzen, aber häufig sind die Lernenden mit dem am Experiment orientierten Vorgehen (Formulierung von Hypothesen, systematische Veränderung von Variablen, Sammlung und Interpretation der Ergebnisse) überfordert. Statt systematischer und zielführender Planung wird dann eher zufällig und spielerisch agiert (vgl. de Jong & van Jolingen, 1998). Geeignete instruktionale Maßnahmen sind der angeleitete Übergang von statischen Formen der Informationsrepräsentation zu dynamischen und die Einschränkung der Suchräume der Lernenden für mögliche Hypothesen und Experimente (van Jolingen & de Jong, 1997; Swaak et al., 1998).

Dasselbe gilt für die Nutzung interaktiver Funktionen. Die Freiheit zum Explorieren wird von Lernern nicht unbedingt genutzt, um neue Dinge auszuprobieren, sondern häufig nur zur Variation und Wiederholung von bereits Bekanntem (z. B. Eysink et al., 2001). Die Freiheit der Lernenden interaktive Visualisierungen zu untersuchen, wird nur dann effektiv, wenn die Möglichkeit der Interaktion gekoppelt wird mit der Anregung zur Interaktion, d. h. einer Hinführung zum Problemlösen mit Visualisierungen.

Fazit

In diesem Beitrag habe ich versucht Anregungen zu bieten, wie interaktive Visualisierungen, die zu den wichtigsten Elementen multimedialer Lehr-/Lernangebote gehören, didaktisch begründet eingesetzt werden können. Richtlinien für die Gestaltung von Lernsystemen sind bei Entwicklern sehr beliebt. Dia Analyse hat aber gezeigt, dass es so einfach nicht ist. Untersuchungen zur Lernwirksamkeit multipler Repräsentationen, dynamischer Visualisierungen und interaktiver Funktionalitäten machen deutlich, dass es immer sorgfältig geplanter didaktischer Arrangements bedarf, wenn die Angebote von den Lernenden angenommen werden und zu den erwünschten Lerneffekten führen sollen.

Taxonomien der Interaktivität und der Repräsentationsformen von Informationen sind dabei geeignete Systematisierungen, denn Autoren und Entwickler von Lehr-Lernumgebungen müssen gegebene technische Möglichkeiten kennen, damit sie mit didaktischer Phantasie deren Potenziale ausschöpfen können. Für konkrete Umsetzungen sind allerdings der jeweilige fachlich-inhaltliche Kontext und methodische Anforderungen mitentscheidend und der Rückgriff auf vorliegende Untersuchungen hilfreich, wenn Enttäuschung über die ausbleibende Wirksamkeit aufwändig erstellter Lernangebote vermieden werden soll.

Literatur

Ainsworth, S.E (1999). The functions of multiple representations, Computers & Education, 33(2/3), p. 131-152.

Ainsworth, S. & Van Labeke, N. (2002). Using a multi-representational design framework to develop and evaluate a dynamic simulation environment. http://www.iwm-kmrc.de/workshops/visualization/ainsworth.pdf

Armbruster, B. & Hertkorn. O. (1978). Allgemeine Mediendidaktik. Köln: Greven.

Ballstaedt, S. (1997). Wissensvermittlung. Weinheim: Beltz.

Bartolomé, A.R. (1993). Learning Styles: Interactivity Levels and Path Control. In: Maurer, H. (ed): Educational Multimedia and Hypermedia Annual, Proceedings of ED-MEDIA 93, S. 52-59. Charlottesville, VA: AACE.

Bodemer,D. (2004). Unterstützung multimedialen Lernens. Dissertation, Universität Freiburg.

de Jong, T., & van Joolingen, W. R. (1998). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. Review of Educational Research, 68(2), 179-201.

Eckert, A. & Hofer; M. (1999). Wissenserwerb durch "interaktive" neue Medien. In: Hrsg.: Berghaus, M. (Hg.): Interaktive Medien - Interdisziplinär vernetzt, S. 105-128. Opladen/Wiesbaden: Westdeutscher Verlag.

Einsiedler, W. (1981). Lehrmethoden. München: Urban & Schwarzenberg.

El Saddik, A. (2001). Interactive Multimedia Learning. Berlin: Springer.

Eysink, T.H.S., Dijkstra, S., & Kuper, J. (2002). The role of guidance in computer-based problem solving for the development of concepts of logic. Instructional Science, 30, 307-333.

Guerra, T. & Heffernan, D. (2004). The Guerra Scale. http://www.learningcircuits.org/2004/mar2004/guerra.htm

Hanisch, F. (2004). Highly Interactive Web-Based Courseware. Dissertation, Universität Tübingen.

Harel,I. & Papert, P. (1991). Constructionism. Greenwich (US): Ablex Publishing.

IEEE (2002). IEEE Draft Standard for Learning Object Metadata. IEEE 1484.12.1-2002. http://grouper.ieee.org/groups/ltsc/wg12/files/LOM_1484_12_1_v1_Final_Draft.pdf

Kerres, M. (1998). Multimediale und telemediale Lernumgebungen. München: Oldenbourg.

Koller, H. (1969). Simulation und Planspieltechnik. Wiesbaden: Gabler.

Mandl, H., Gruber, H. & Renkl, A. (2002). Situiertes Lernen in multimedialen Lernumgebungen. In: Issing, L.J. & Klimsa, P. (Hrsg.): Information und Lernen mit Multimedia und Internet, S. 139-148. Weinheim: Beltz.

Mayer, R. E. (2001). Multimedia learning. New York, NY: Cambridge University Press.

Mellar, H., Bliss, J., Boohan, R., Ogborn, J. & Tompsett, C. (ed.) (1994). Learning With Artificial Worlds: Computer Based Modelling In The Curriculum. London: The Falmer Press.

Niegemann, H.M. & Wedekind, J. (1999). Referenzmodelle für die Entwicklung von interaktiven Lernsystemen. Praxis der Wirtschaftsinformatik, 36 (205), S. 54-64.

Paul, H. & Foks, T. (1991). Exploratives Agieren in interaktiven Systemen. Projektbericht EXPLORE – IAT PT-02. Gelsenkirchen: Institut Arbeit und Technik.

Rieber, L. P. (1990). Animation in computer-based instruction. Educational Technology Research & Development, 38(1), 77-86.

Sacher, W. (1996). Dimensionen und Komponenten der Interaktivität von Multimedia-Systemen. In: FWU-Magazin, Nr. 5-6, 1996, S. 7–10.

Schüpbach, E., Guggenbühl, U., Krehl, C., Siegenthaler, H. & Kaufmann-Hayoz, R (2003). Didaktischer Leitfaden für E-Learning. Bern: Universität Bern und innovex ag

Schwier, R.A. & Misanchuk, E.R. (1993): Interactive Multimedia Instruction. Englewood Cliffs, NJ: Educational

Technology Publications.

Schulmeister, R. (1997). Grundlagen hypermedialer Lernsysteme. Theorie — Didaktik — Design. Bonn, Paris u.a.: Addison-Wesley

Schulmeister, R. (2002). Taxonomie der Interaktivitat von Multimedia – Ein Beitrag zur aktuellen Metadaten-Diskussion. Informationstechnik und Technische Informatik, 44. Jg., H. 4, S. 193-199.

Schulmeister, R. (2005). Interaktivität in Multimedia-Anwendungen. Portal e-teaching.org: http://www.e-teaching.org/didaktik/gestaltung/interaktiv/InteraktivitaetSchulmeister.pdf

Shneiderman, B. (1983). Direct Manipulation: A Step Beyond Programming Languages. IEEE Computer, 16. Jg., H. 8, S. 57-69

Sims, R. (1997). Interactivity: A Forgotten Art? Computers in Human Behavior, Vol. 13, No. 2, pp. 157–180.

Swaak, J., van Joolingen, W. R. & de Jong, T. (1998). Supporting simulation-based learning: The effects of model progression and assignments on definitional and intuitive knowledge. Learning and Instruction, 8(3), 235-252.

Tergan, S.-O. (2000). Wie geeignet sind computerbasierte Lernsysteme für das Offene Lernen in der beruflichen Weiterbildung? In: Achtenhagen, F. & John, E.G. (Hrsg.): Mehrdimensionale Lehr-Lern-Arrangements, S. 460-472. Wiesbaden: Gabler.

van Joolingen, W. R. & de Jong, T. (1997). An extended dual search space model of scientific discovery learning. Instructional Science, 25, 307-346.

Weidenmann, B. (2002). Multicodierung und Multimodalität im Lernprozess. In: Issing, L.J. & Klimsa, P. (Hrsg.): Information und Lernen mit Multimedia, S. 45-61. Weinheim: Beltz.

Links

DEMIST: http://www.psychology.nottingham.ac.uk/research/credit/projects/multiple_representations/

DYNASYS: http://www.hupfeld-software.de/dynasys.php

Solar System Simulator: http://www.sssim.com/en/index.html

SolveElec: http://www.physicsbox.com/indexsolveelec2en.html

Virtual Tübingen: http://www.kyb.mpg.de/bu/projects/vrtueb/ctuebindex.html

sowie http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/tuebingen/tue1.html

Alle Links zuletzt überprüft am 10.04.2008.