

Forschungszentrum Arbeit und Technik

artec

F. Wilhelm Bruns, Dieter Müller

Lernförderliche Übergänge zwischen gegenständlichen und abstrakten Modellen technischer Systeme

artec-Paper 43, April 1996



Universität Bremen

Forschungszentrum Arbeit und Technik (artec)

Mehrweckhochhaus (MZH)

Postfach 330440 • D-28334 Bremen • Tel: +49 421-218-4206, -4449 (FAX)

E-mail: bruns@artec.uni-bremen.de • mueller@artec.uni-bremen.de

Abstract

Es wird eine rechnergestützte Lernumgebung für den Technikunterricht vorgestellt, die das Modellieren technischer Systeme im Gegenständlichen ermöglichen soll und zugleich den Übergang von realen stofflichen Objekten zu virtuellen abstrakten Rechnermodellen unterstützt. Das heißt, mit gegenständlichen Bausteinen können Modelle technischer Systeme aufgebaut und synchron dazu ähnliche rechnerinterne generiert werden. Der sinnlichen Wahrnehmung und Überprüfung realstofflicher Phänomene wird eine zentrale Bedeutung für das Begreifen und Beurteilen komplexer Zusammenhänge zuerkannt. An Beispielen aus der Steuerungstechnik wird eine schrittweise, nachvollziehbare und überprüfbare Abstraktion, ausgehend von konkret erfahrbaren Zusammenhängen, zu physikalischen, funktionalen und numerischen Modellen demonstriert.

Keywords

action learning, graspable user interfaces, handicraft metaphor, real reality, bridging modelworlds

Motivation für einen *begreifenden* Umgang mit Rechnern im Technikunterricht

Arbeitswissenschaftliche Untersuchungen belegen, daß Fachwissen zu einem nicht unwesentlichen Teil implizit in einer ganzheitlichen Arbeitshandlung erworben wird. Dabei sind sinnliche Wahrnehmungen und konkrete Erfahrungen von grundlegender Bedeutung für die Entwicklung beruflicher Kompetenzen. Entscheidend ist aus dieser Sicht, daß komplexe sinnliche Wahrnehmungen vor allen Dingen unter dem Aspekt des praktischen Erfahrungsmachens zu sehen sind. Darunter fallen im Wesentlichen spezifische Methoden der Auseinandersetzung mit konkret erfahrbaren Artefakten, Situationen und Prozessen, und zwar sowohl was deren Erkenntnis als auch den praktischen Umgang mit ihnen betrifft (Böhle/Milkau 1988, Böhle/Rose 1992).

Nach empirischen Untersuchungen, die im Rahmen des Projektes „Computergestützte erfahrungsgeleitete Arbeit“ (CeA) durchgeführt wurden, weisen die vorherrschenden technischen Konzepte in dieser Hinsicht Defizite auf (vgl. Böhle/Rose 1992). In diesen Studien konnte gezeigt werden, daß im Zuge der Einführung neuer Techniken in den Arbeitsprozeß ein Verlust von *Gegenständlichkeit* beruflichen Lernens und Arbeitens entstanden ist. In einigen Bereichen der Produktion und Fertigung, aber auch in der Wartung und Instandhaltung, ist eine immer größere Abstraktion von bisherigen Arbeitsvollzügen zu verzeichnen, in denen die zugrunde liegenden Prozesse einen fortschreitenden Grad an Komplexität und Entsinnlichung erfahren: Der früher selbstverständlich sichtbare, kontrollierbare und unmittelbare Zugriff auf das Material, das Werkzeug oder auch den Prozeß selbst ist in vielen Fällen nur mittelbar über symbolische Information nachvollziehbar. Diese Forschungsergebnisse, die im Rahmen arbeitspsychologischer Untersuchungen gewonnen wurden, machen darüber hinaus deutlich, daß der Verlust an Anschauung des Gegenstandes und der sinnlichen Wahrnehmung langfristig zu einem nicht kalkulierbaren Risiko in der Nutzung menschlicher Arbeit werden kann. Dies gilt insbesondere in denjenigen Fällen, in denen in komplexen technischen Systemen und Prozessen Störungen, Fehler oder Qualitätsmängel auftreten, die nur mit Hilfe umfangreichen Erfahrungs- und Prozeßwissens behoben werden können. Böhle/Milkau (1988) sprechen in diesem Zusammenhang von erfahrungsgeleitetem Arbeitshandeln, auf welches in solchen 'kritischen' Situation sowohl aus technischen als auch aus wirtschaftlichen Gründen nicht verzichtet werden kann.

Dieses Erfahrungs- und Prozeßwissen, wie es traditionell für den Begriff des Handwerkers und Facharbeiters konstitutiv ist, weist Merkmale von Routine, Erfahrung, praktischem Bedienungs- und Ausführungswissen auf, das nur im konkreten, sinnlichen Umgang mit Materialien, Werkzeugen und technischen Systemen erworben werden kann. Zur Generierung von Erfahrungswissen bedarf es also der Möglichkeit, unmittelbare Gegenständlichkeit mit allen Sinnen erfahren zu können. Bezogen auf berufliches Lernen und Arbeitshandeln impliziert dies die Frage, inwieweit und mit welchen Ansätzen die Unmittelbarkeit im Hinblick auf die Mensch-Maschine- bzw. Arbeitsgegenstand-Interaktion zu erhalten oder zurückzugewinnen ist.

Unter berufspädagogischen Gesichtspunkten sind die skizzierten Phänomene und die dargestellten Forschungsergebnisse äußerst bedeutsam, da sie in elementarer Weise die zukünftige Entwicklung und Gestaltung von Arbeit, Technik und Bildung tangieren. In der Berufspädagogik wird die Gefahr des Verlustes von Gegenständlichkeit in beruflichen Lern- und Qualifikationsprozessen und den damit einhergehenden negativen Konsequenzen deshalb heftig diskutiert und nach Konzepten gesucht, wie dem Verlust von Anschaulichkeit und der damit verbundenen Entstehung von Lernbarrieren pädagogisch begegnet werden kann. Im Zentrum der wissenschaftlichen Diskussion steht die Auseinandersetzung mit handlungs- bzw. arbeitsbezogenen Lernkonzepten, die die Bedeutung von Lernen und Handeln, Denken und Tun, Handlungsorientierung und handlungsorientiertem Unterricht entsprechend reflektieren.

Obwohl schon seit langem ausgearbeitete pädagogische Konzepte - auch in der Berufspädagogik - existieren, die die Bedeutung des sinnlichen Handelns in ihrer pädagogischen Theorie berücksichtigen oder gar zum Kern ihres Ansatzes gemacht haben (u. a. Kerschensteiner, Dewey und Kilpatrick, Makarenko), erfahren diese Ansätze in Gestalt des Konzepts des 'Handlungslernens' bzw. des 'Handlungsorientierten Unterrichts' wieder an Bedeutung. Inzwischen gehört 'Handlungsorientierung' zu jenen pädagogischen Leitideen, über die spontanes Einverständnis hergestellt werden kann - auch zwischen Pädagogen und anderen an der beruflichen Bildung Beteiligten, die ansonsten sehr unterschiedliche Vorstellung von Bildung und Erziehung haben. Dies hängt sicherlich in erster Linie mit dem tiefgreifenden Wandel zusammen, der durch die Veränderungen in Arbeit und Technik auf Grund neuer Technologien ausgelöst wurde und dessen Konsequenzen im Hinblick auf berufliches Lernen und Arbeiten oben skizziert wurden. Viele Berufspädagogen sehen deshalb in Konzepten des handlungsorientierten Lernens eine Möglichkeit, den veränderten technischen, arbeitsbedingten, organisatorischen, gesellschaftlichen und sozialen Bedingungen und Anforderungen besser gerecht werden zu können (vgl. z.B. Schulz 1992, Hoppe/Schulz 1995).

Alle diese Ansätze erkennen mehr oder weniger in der Ganzheitlichkeit eine zentrale pädagogische Notwendigkeit und betonen dementsprechend den unauflösbaren Zusammenhang von Denken und Tun, Handeln und Lernen, von Theorie und Praxis. Dabei wird davon ausgegangen, daß sich geistige Fähigkeiten aus dem praktischen Tun entfalten und die Entwicklung des Denkens als ein Prozeß zunehmender Abstraktion von der konkreten Handlung über situatives Handlungswissen bis hin zum Begriff erfolgt. Dem Begriff geht also die konkrete Handlung und damit das Begreifen voraus. Dementsprechend hat der Grad an Konkretheit, in dem Lernende die Möglichkeit bekommen, im Kontext beruflicher Arbeits- und Qualifikationsprozesse mit stofflichen Objekten und Situationen umzugehen sowohl einen wichtigen Einfluß auf das Verstehen komplexer technischer Zusammenhänge als auch auf die Fähigkeit, Gelerntes auf reale Arbeitssituationen zu transferieren.

In die Begründung und Entfaltung handlungsorientierter Konzepte fließen Theorien, Modelle und Ansätze aus unterschiedlichen Wissenschaftsbereichen ein, so zum Beispiel:

- Psychologische Theorien (Piagets Entwicklungs- und Kognitionstheorie, Aebli's handlungspsychologischer Ansatz) (vgl. z.B. Aebli 1970, Piaget 1947, 1959)

- Arbeitswissenschaftliche und Arbeitspsychologische Ansätze (z.B. Hackers Handlungsregulationstheorie, Volperts Arbeits- und Handlungspsychologie) (vgl. z.B. Hacker 1986)
- Ansätze und Modelle der Reformpädagogik (z.B. Kerschensteiners Arbeitsschule) (vgl. Kerschensteiner 1926)
- Berufspädagogische Ansätze zur „Herausbildung von Handlungskompetenz“.

Der Verlust an Sinnlichkeit, Unmittelbarkeit und Konkretheit, bedingt durch den Umgang mit symbolischen Informationen und virtuellen, in Rechnern gespeicherten Modellen anstatt mit konkreten Materialien, Werkzeugen, Maschinen und Prozessen, kann, wie oben dargelegt, als ein aktuelles Problem beruflicher Arbeits- und Qualifizierungsprozesse ausgemacht werden (vgl. Böhle 1995).

Vor dem Hintergrund offensichtlicher, wohl kaum vermeidbarer sinnlicher Erfahrungs- und Tätigkeitsverluste in der industriellen Produktion und Fertigung sowie im Bereich handwerklicher Facharbeit muß die Frage gestellt werden, ob berufsschulischem Lernen im Vergleich zum betrieblichen Lernen eine kompensatorische Funktion zukommen sollte. Kompensatorisch in der Weise, daß dort viel stärker als heute üblich gegenständlich gelernt werden muß. Dies impliziert die Frage, wo der Einsatz neuer rechnergestützter Medien im Berufsschulunterricht ein unverzichtbares pädagogisches Hilfsmittel geworden ist und in welchen Fällen dieser Einsatz durch gegenständliche Medien zu ergänzen wäre.

Ein nicht unwesentlicher Teil der in beruflichen Bildungsprozessen eingesetzten Softwaresysteme sind Modellierungs- und Simulationsprogramme, die dazu genutzt werden, den Lernenden komplexe technische Systeme und Prozesse (CNC, Elektronik, Pneumatik, SPS, Mechanik usw.) im Rahmen eines theoriebildenden Fachunterrichts (Experimental- oder Laborunterricht) zu erschließen. Für diese rechnergestützten Lernsysteme kann am Beispiel der Simulationssoftware gezeigt werden, daß sie in vielen Fällen die Auseinandersetzung zwar nicht mit dem realen Objekt selbst, dafür aber mit einem modellhaften Ersatz bieten, da die direkte Konfrontation mit dem Realsystem aus vielerlei Gründen (Unfallgefahr, individuelle Verfügbarkeit, Bereitstellungsaufwand, Kosten) nicht möglich ist. Damit ermöglichen rechnergestützte Simulationen neue pädagogische Zugänge zur Erschließung komplexer Vorgänge im unterrichtlichen Kontext und können dazu beitragen, die komplexe Realität für Lernende verständlicher zu machen. Das qualifikatorische Potential von Simulatoren ist für viele Bereiche beruflicher Bildung (CNC-Technik, Robotik, Steuerungstechnik) deshalb kaum noch umstritten (Kummer 1991).

Allerdings ist auch zu bedenken, daß der Einsatz rechnergestützter Simulatoren bei denjenigen Unterrichtsinhalten, die traditionell durch praktische Übungen, Versuche und Experimente mit Hilfe gegenständlicher Medien (Real- und Modellmaschinen, technischen Komponenten, Baugruppen, Modellen usw.) erarbeitet wurden, pädagogisch äußerst problematisch sein kann. Die folgenden Beispiele mögen dies illustrieren:

Für den naturwissenschaftlichen Grundlagenunterricht sind heute beispielsweise Modellierungssysteme verfügbar, die es möglich machen, physikalische Phänomene mit Hilfe virtueller Experimente im Rechner zu simulieren, anstatt sie mit realen Experimenten

praktisch erforschen zu müssen. Ähnliches gilt auch für die Elektro- und Steuerungstechnik, in der Schaltungen im Rechner modelliert und getestet werden können und der Aufbau von Schaltungen mit realen Bauelementen als nicht mehr notwendig erscheinen muß. Auch in der Fertigungstechnik ist es heute selbstverständlich, Bearbeitungsprozesse, Fertigungsabläufe usw. in Rechnern zu modellieren und anschließend experimentell zu optimieren. Die Gefahr, daß durch den Einsatz von rechnergestützten Simulationsprogrammen im Unterricht reale Experimente mit konkreten Materialien und Maschinen verdrängt werden könnten, ist offensichtlich.

Wir gehen davon aus, daß in einem theoriegeleiteten Fachunterricht, soweit dies möglich ist, der direkte sinnliche Umgang mit konkreten Objekten, die sich auf die berufliche Realität des Lernenden beziehen, nicht durch den virtuellen Umgang mit symbolischen Rechner-Modellen abgelöst werden sollte. Denn es kann als gesicherte pädagogische Erkenntnis angesehen werden, daß theoretisches Lernen (Umgang mit Symbolen) und praktisches Lernen (Umgang mit dem Materiellen) als eng aufeinander angewiesen betrachtet werden müssen und künstliche Trennungen Lernstörungen hervorrufen. Mentale Konstruktionen (Modelle), müssen gegenständlichen Repräsentationen in der Welt entsprechen, die soweit als möglich sinnlich erfahrbar sein sollten.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes, in dem auf der Basis experimenteller Analysen die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes hypermediagestützter Simulationssysteme in der beruflichen Bildung untersucht wurden, zeigte es sich, daß die rechnergestützte Simulation einen besonderen pädagogischen Beitrag im Sinne der skizzierten Prämissen zu leisten vermag, wenn es gelingt, *Übergänge* zwischen gegenständlichen und rechnerinternen Modellen zu realisieren (Bruns/Müller/Steenbock 1995). Die folgenden Ausführungen zweier Berufspädagogen bezüglich der pädagogischen Eignung rechner-gestützter Simulatoren im Fach Steuerungstechnik veranschaulichen das Defizit und zugleich das didaktische Potential rechnergestützter Lernprogramme:

„Die Umsetzung des abstrakten Stromlaufplans in die konkrete ‘Kabelage’ bereitete fast allen Auszubildenden mehr oder weniger Kopfzerbrechen. Hierbei gibt die Simulation, unter der Berücksichtigung der verfügbaren Systeme, bisher kaum Hilfestellung. Dennoch bleibt zu überlegen, inwieweit geeignete Simulationsprogramme hier integriert werden können. Dieser Aspekt gewinnt dadurch noch an Wichtigkeit, daß durch einen simulierten Schaltungsaufbau als Vorlauf zur realen Schaltung teure Bauteile wie Sensoren geschont werden können. So könnte z.B. die Vorstellung des Reed-Sensors mit seiner Funktion und Beschaltung in der Simulation schon eine Auswirkung auf die Ausfallrate durch Fehlschaltungen haben(...). Der simulierte Kurzschluß kann die sinnliche Erfahrung des Geruchs von verbrannten Kontakten natürlich nicht ersetzen, aber vielleicht läßt sich so im Vorgriff doch der eine oder andere Kurzschluß im praktischen Schaltungsaufbau vermeiden.“ (Gathmann/ Schäfer 1995, S. 108,109).

Daß Schüler intensiver lernen, wenn das Lernen mit gegenständlichen Erfahrungs- und Handlungserlebnissen verbunden ist, daß Begriffe erst verstanden werden, wenn sie sich auf sinnliche Grundlagen stützen können, daß Denken verinnerlichtes Handeln ist, daß praktische Tätigkeiten und ganzheitliche Beanspruchung der Sinnesorgane auch die in-

tellektuelle Entwicklung beeinflussen, das alles sind Tatsachen, die praktisch tätigen Pädagogen und Pädagoginnen mehr oder weniger geläufig sind.

Auch fehlt es nicht an Konzepten, die den Verlust gegenständlichen Lernens und Arbeitens mit ihren negativen Konsequenzen benennen und Vorschläge machen, wie berufliche Lernprozesse gestaltet werden sollen, die eben diese Defizite nicht beinhalten. In der berufspädagogischen Diskussion über die Möglichkeiten der 'Rückgewinnung von Gegenständlichkeit' (sinnlicher Wahrnehmung, Erfahrung, Erfahrungswissen und erfahrungsgeleiteter Arbeit) manifestiert sich die Erkenntnis, daß ein Verlust gegenständlichen Lernens und Arbeitens mit negativen Konsequenzen verbunden ist. Allerdings mangelt es an Vorstellungen, *auf welche Weise* verlorengegangene Gegenständlichkeit in den Lernprozeß zurückgeholt werden könnte. Insbesondere wird kaum der Frage nachgegangen, ob gegenständliches Lernen in Verbindung mit rechnerbasierten Lernsystemen und der Nutzung virtueller, nicht-gegenständlicher Medien (virtuelle symbolische Rechnermodelle) prinzipiell pädagogisch und technisch denkbar ist; ob es neue 'Umgangsformen' mit Rechnern und neue, vielseitig einsetzbare Interfacetechniken geben könnte, die alternative Formen der Rechnernutzung unter Beibehaltung gegenständlich-sinnlicher Erfahrung ermöglichen. Darüber hinaus ist weitgehend ungeklärt, in welchen Zusammenhängen der Einsatz rechnergestützter Systeme den Lernenden und Lehrenden bei der Bewältigung komplexer Aufgaben unterstützen kann und wann der Gebrauch von Rechnern pädagogisch nicht sinnvoll ist. Die Frage der *Komplementarität* stofflicher Lernmedien und symbolischer, auf virtuellen Rechnermodellen basierender Medien ist bis heute nicht ausreichend analysiert worden. Dementsprechend existieren keine entfalteten Ansätze in der Berufspädagogik, die den *direkten* Umgang mit konkreten Lernobjekten im Realen in Verbindung mit der Nutzung rechnerbasierter Modelle untersuchen.

Aus dem Bereich der Informatik, insbesondere der Mensch-Maschine-Kommunikation, sind zwar einige Ansätze bekannt, die beschreiben, wie der Umgang mit Rechnern konkreter und kommunikationsförderlicher gestaltet werden kann. Diese Versuche, Rechnermodelle handhabbarer und intuitiv nutzbar zu machen, konzentrieren sich jedoch darauf, mit neuen Eingabe- und Ausgabegeräten (Datenhandschuh, Datenhelm) in virtuellen, photorealistischen Räumen im Rechner zu operieren.

Zwei Ansätze den Modellierungsvorgang anschaulicher, handhabbarer und diskursiver zu gestalten, können unterschieden werden:

1. Es werden Modellelemente im Rechner angeboten, die in ihrer dreidimensionalen Form und ihren räumlichen Beziehungen zueinander möglichst große Ähnlichkeit zu den realen Objekten aufweisen. Über Interfacetechniken aus dem Bereich der 'Virtuellen Realität', wie Datenhandschuh und Datenbrille (vgl. Warnecke 1994), werden diese Modellelemente so manipuliert, als befände sich der Modellierende zwischen und in ihnen (imersive computing) (vgl. Isdale 1993). Eine Variante dieses Ansatzes ist, die virtuellen Modellelemente in den realen Raum zu projizieren und schattenspielartig mit den Händen zu verändern (vgl. Krueger 1991). Die gegenwärtige Hauptströmung der Simulationsforschung geht in diese Richtung der Virtualisierung.

2. Es wird eine direkte Kopplung zwischen abstrakten, im Rechner abgebildeten und konkreten physikalischen Modellen angestrebt. Reinhardt (1988) realisierte die Möglichkeit, ein rechnerinternes SPS-Steuerungsmodell schrittweise in ein physikalisches Modell zu exportieren. Insbesondere bei der Layoutplanung neuer technischer Anlagen, wie zur Schiffsmotorfertigung, zur Expressgutverteilung, zum Transport von Containern und deren Verladung in Terminals hat sich die konkrete Repräsentation der Anlagen in Form gegenständlicher Modelle als förderlich für den Verständigungsprozeß in interdisziplinär zusammengesetzten Gestaltungsteams erwiesen (vgl. Scheel et al 1994). Als unbefriedigend erwies sich hierbei jedoch die Sequentialität des Vorgehens (erst die Erstellung des einen, dann des anderen Modells).

An einer synchronen Kopplung zwischen der Modellierung im Realen und der rechnerinternen Modellgenerierung arbeiten wenige Forschungsgruppen. Kang & Ickeuchi (1994) entwickeln ein Konzept des Roboterprogrammierens durch Vormachen im Realen. Über die Aufzeichnung und Erkennung von Handposen und -gesten wird ein Roboterprogramm zur Montagearbeit generiert. Bruns et al (vgl. Bruns/Müller/ Heimbucher 1993) versuchen in einem allgemeineren Ansatz, diese Technik für den Verständigungsprozeß bei der Modellierung von Materialfluß- und Produktionssystemen einzusetzen und mit existierenden Simulatoren in einem koppelbaren Instrumentarium zu verbinden. Über eine geeignete Interfacetechnik werden die Aktivitäten in der stofflichen Welt vom Rechner aufgezeichnet und zur Veränderung des rechnerinternen Abbildes der Außenwelt genutzt. Auf diese Weise läßt sich eine enge Beziehung zwischen realer Welt und Modellwelt aufbauen. Abb. 1 zeigt einen Prototypen zum synchronen Aufbau einer einfachen Modellwelt im Realen und im Rechner.

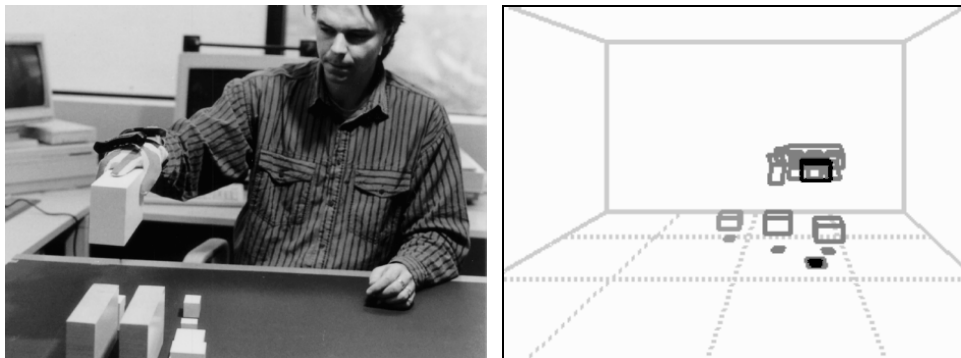


Abb. 1: Synchrone Modellierung im Realen und im Virtuellen

Die Idee, auf diese Weise den direkten Umgang mit der Realität systematisch als Rechner-schnittstelle einzusetzen und didaktisch zu entfalten, ist neu. Dabei ist es ohne weiteres denkbar, daß im Technikunterricht technische Systeme beispielsweise mit Bausteinen eines Mechanik, Elektro- oder Pneumatikbaukastens gegenständlich aufgebaut werden und synchron dazu jeweils ein rechnerinternes Modell generiert wird. Diese *handgreifliche* Modellierung bildet die Grundlage kognitiver Abstraktionsvorgänge, Denkprozesse und

Begriffsbildungen. Erst im zweiten Schritt wird das im Rechner erzeugte virtuelle Modell als Hilfsmittel zur rationalen Analyse (Fehlersuche, Optimierungen, Suche nach alternativen Lösungen) genutzt. Ein solcher Ansatz impliziert nicht nur eine radikale Änderung der Benutzungsoberfläche des Rechners, sondern beinhaltet auch eine Neubestimmung der didaktischen Funktion von rechnergestützten Systemen im Lernzusammenhang, dies im Sinne des 'Rechners im Rücken' (vgl. Bruns 1993, Bruns/Müller/Heimbucher 1993).

Auf dem Gebiet, den *direkten Umgang mit konkreten Objekten im Realen* durch Erkennungs- und Generierungsalgorithmen zu unterstützen und für die Modellierung zu nutzen, existiert ein großes Forschungsdefizit. Dieser direkte Umgang ist möglich, indem entweder die relevanten realen Objekte mit Sensoren ausgestattet und der Menschen „erfaßt“ wird oder der Mensch mit Sensoren ausgestattet und die Objekte „erfaßt“ werden. Das beantragte Vorhaben verfolgt den zweiten Weg. Dadurch werden jedoch Fragen aufgeworfen, die auf tiefgehende kognitionspsychologische und systemtheoretische Dimensionen verweisen. Wie greift der Mensch Werkzeuge und Werkstücke? Welchen Beitrag leistet das Greifen und der gegenständliche Umgang mit Objekten für die Bildung mentaler Modelle? Welche Bedeutung hat das Gegenständliche für die räumliche und funktionale Orientierung? Welche rechnerinterne Wissensrepräsentation erleichtert eine lernförderliche Beziehung zwischen mentalen, konzeptuellen und implementierten Modellen?

MacKenzie & Iberall (1994) analysieren das zweckgerichtete Erfassen von Objekten mit der Hand („Our working definition of prehension is the application of functionally effective forces by the hand to an object for a task, given numerous constraints“, S. 6) und gehen der Frage nach, wie unser Gehirn unsere Hände kontrolliert. Ihre Forschungen zielen darauf ab, einen Rahmen zu schaffen für ein vertieftes Verständnis des Zusammenhanges zwischen Funktionen des Zentralnervensystems und der greifenden Hand. Sie identifizieren unterschiedliche Phasen des Greifens, wie Aufgabenerkennung, Griffstrategiebildung, Grifferebenenwahl, Hand- und Finger-vorbereitung, Objektkontakt, Griffstabilisierung, Grifferhaltung und kommen zu zahlreichen Randbedingungen, die auf verschiedenen Ebenen in den unterschiedlichen Phasen wirken (soziale, motivationale, funktionale, physikalische, neuronale, anatomische, physiologische, evolutions- und entwicklungsabhängige Einflüsse). Diese Arbeiten sind für eine systematische Modellierung natürlicher und künstlicher Hände und Greifvorgänge interessant und hilfreich, liefern jedoch wenig Aufschluß über die umgekehrte Frage: „Wie beeinflussen unsere Hände unsere Konzepte?“.

Gentner & Stevens (1983) behandeln einen für die hier vorgestellte Forschungsrichtung höchst relevanten Fragenkomplex: Welche formalen Repräsentationen physikalischer Phänomene sind für die Herausbildung eines vom Novizen zum Experten schrittweise ausdifferenzierenden Systems konzeptueller und mentaler Modelle besonders geeignet? Sie verweisen auf Anforderungen, die auch in unserer eigenen Forschung zentral sind: Umgang mit unvollständigen, unstabilen, unscharfen, „unwissenschaftlichen“, knausrigen Modellen. Repräsentationen, die diesen Anforderungen entgegenkommen, sind in den

Konzepten der „Naiven Physik“ (Hayes 1979) und der qualitativen Prozeßtheorie (vgl. Kuipers 1994, Forbus 1984 und Iwasaki et al 1994) zu finden.

Bisherige Vorarbeiten

In einem Projekt mit Studenten wurde ein modularer Mehrachsensimulator entwickelt, der es erlaubt, kinematisch gekoppelte dreidimensionale Geometrieobjekte, die in einer STEP-ähnlichen IGES-ESP-Beschreibung vorliegen, zu modellieren, über eine ver-änderbare, einfach definierbare Sprache zu steuern, zu simulieren und zu visualisieren (vgl. ROBSIM 1989). Der Simulator kann mit einer für didaktische Zwecke besonders geeigneten Roboterbenutzungsoberfläche und einer realen Robotersteuerung verbunden werden (vgl. Müller 1990).

In einem laufenden BMBW-Forschungsprojekt (HYSIM) wird an der Kombination verschiedener Prozeß- und Materialflußsimulatoren auf der Basis eines hypermediagestützten Mehrebenensimulationssystems gearbeitet (vgl. Bruns/Müller/ Steenbock 1993,1994, 1995). Ziel dieses Forschungsprojektes ist die experimentelle Analyse der Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes hypermediagestützter Simulationssysteme in der beruflichen Bildung. Theoretisch interessieren dabei besonders Fragen zur Abbildung komplexer Systeme in Modellen und zum Beitrag, den Simulation zum besseren Verständnis und zur besseren Beherrschung realer Systeme leisten kann. Im Rahmen verschiedener Unterrichtsversuche wurden hypermediagestützte Simulatoren entwickelt, unterrichtlich eingesetzt und erprobt. Ein Teil der implementierten Simulationssysteme (unter anderem Pumpenstand, Pneumatik) bietet die Möglichkeit der Ankopplung an die entsprechenden realen technische Prozesse. Auf diese Weise konnte empirisch geprüft werden, inwieweit die Kombination von Simulatoren mit anderen - z.T. gegenständlichen - Lernmedien geeignet ist, um Unterrichtsinhalte von verschiedenen Perspektiven und unterschiedlichen Ebenen der Sachbegegnung aus zu vermitteln. Im Zuge diverser Unterrichtsreihen konnte die These bestätigt werden, daß die rechnergestützte Simulation dann besonders effektiv genutzt werden kann, wenn es gelingt, die Ankopplung an reale Prozesse zu realisieren. Insgesamt zeigte sich in den Fällen, in denen rechnergestützte Simulatoren in Kombination mit anderen Medien eingesetzt wurden, eine höhere Motivation und Aktivität bei den Lernenden (vgl. Bruns/Müller/Steenbock 1995).

Im Rahmen eines *Arbeit und Technik* - Forschungsprojektes (Bruns & Heimbucher 1992) wurden verschiedene diskrete, ereignisorientierte Simulationswerkzeuge in betrieblichen Anwendungen eingesetzt (Hochregallager-Transportband-Getriebeprüfungs-System, Fließherstellung von Nahrungsmitteln, Ladebrücken-Transtainer-Systeme eines Containerterminals, Frachtumschlag eines Expressgutflughafens, Flexible Fertigungszelle, Strangguß-Walzwerk-Logistik u.a., vgl. Scheel et al 1994). Hierbei wurden positive Erfahrungen mit anschaulichen, stofflichen Vormodellen bezüglich einer kommunikativen und kreativen Systementwicklung gemacht. Daraus entstand das Bedürfnis, einen einfachen Übergang zwischen stofflichem und rechnerinternem Modell zu realisieren. Das

eingesetzte Simulationswerkzeug SLAM (vgl. Pritsker 1986) wurde zunächst im Sinne einer größeren konventionellen Interaktivität weiterentwickelt.

Aus der Begrenztheit auch dieses Ansatzes entstand ein grundsätzlich neues Konzept für den Umgang mit Rechnern (Bruns 1993). Grundidee dieses Konzeptes ist es, die Handhabung realer stofflicher Objekte der Umwelt direkt im Rechner aufzuzeichnen und zu verarbeiten. Der Schreibtisch kann real genutzt werden und muß nicht als virtueller Desktop, der über kleine zweidimensionale Ein- und Ausgabegeräte (Maus, Bildschirm) zugänglich ist, im Rechner verschwinden. In der Planungswerkstatt kann mit realen Stoffen modelliert werden, formverändernd und Funktionsabläufe vormachend. Über eine geeignete Interfacetechnik werden die Aktivitäten in der stofflichen Welt vom Rechner aufgezeichnet und zur Veränderung des rechnerinternen Abbildes der Außenwelt genutzt. Auf diese Weise läßt sich eine enge Beziehung zwischen realer Welt und Modellwelt aufbauen (vgl. Abb. 2). Die Stärken des Rechners in der numerischen Analyse und der Variation können genutzt werden, die Stärken des Menschen im vielperspektivischen und kommunikativen Umgang mit gegenständlichen Dingen bleiben erhalten.

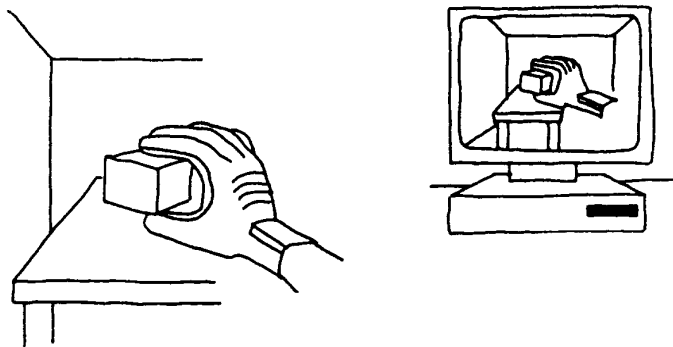


Abb. 2: Reale Handoperationen auf realen Objekten und ihr Abbild

Die Anforderungen an die Interfacetechnik sind in diesem Ansatz sehr hoch. Das Problem läßt sich auf verschiedene Weise lösen. Eine Möglichkeit besteht darin, alle Objekte der realen Welt mit Sensoren auszustatten und mit dem Rechner zu verbinden. Die Ansätze des allgegenwärtigen Rechners (ubiquitous computing) von Negroponte et al (1991) verfolgen diesen Weg. Er ist interfacetechnisch sehr aufwendig. Eine andere Möglichkeit besteht in der Anbringung von unabhängigen ortsfesten Sensoren, wie Kameras, die die Beziehung zwischen den Händen und den Objekten aufzeichnen. Dieser Ansatz wirft wegen der auftretenden Verdeckungsproblematik erhebliche Mustererkennungsprobleme auf.

Eine einfachere dritte Möglichkeit besteht in der Aufzeichnung der Handaktionen über einen Datenhandschuh. Es wird nicht, wie beim üblichen Einsatz dieses Gerätes, auf virtuellen Objekten operiert, sondern auf realen. Dieser Ansatz wird daher weiter von uns

verfolgt. Für das vielseitige Umgehen mit realen Objekten zu Modellierzwecken ergeben sich Anforderungen, die über eine reine Ortsveränderung hinausgehen. Den Objekten müssen variable Attribute zugewiesen werden können, der Rechner sollte durch Handzeichen für Modellrechnungen gestartet und Ergebnisse an den Modellierenden über verschiedene Ausgabekanäle ausgegeben werden. Erste Ergebnisse dieses Ansatzes liegen inzwischen vor und werden in dem laufenden DFG-Projekt *Rechnergestützte Übergänge zwischen gegenständlichen und abstrakten Modellen produktionstechnischer Systeme* ausgebaut. Mit Hilfe eines einfachen Datenhandschuhs und einer Gestenerkennung kann eine „Bausteinwelt“ und synchron dazu ein Rechnermodell, wie in Abb. 1 dargestellt, manipuliert werden (vgl. Bruns et al 1993, Brauer 1994). Ein objektorientierter Softwarebaukasten (Müller 1993) stellt den Rahmen für offene Simulations- und Interaktionsfunktionen zur Verfügung.

Die Einsatzmöglichkeiten des Konzeptes sind vielfältig. Am Beispiel der Steuerungstechnik soll dies illustriert werden:

Im Fach Steuerungstechnik stellt das Verstehen komplexer Schaltungen hohe Anforderungen an die Lernenden. In der beruflichen Ausbildung werden deshalb üblicherweise neben dem theoretischen Unterricht Schaltungen im Rahmen von Laborübungen praktisch aufgebaut und getestet (vgl. Abb. 3). Darüber hinaus werden zur Ergänzung des Theorie- und Laborunterrichts rechnergestützte Medien und Hilfsmittel eingesetzt.

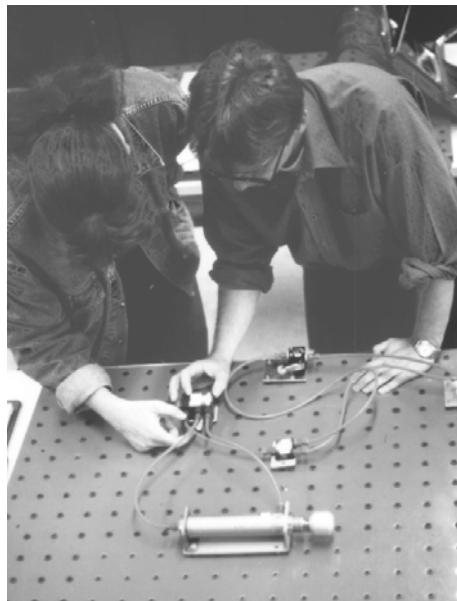


Abb. 3: Gegenständliche Modellierung einer Zylindersteuerung

Mit Hilfe des skizzierten Ansatzes ist es nun denkbar, daß Steuerungsschaltungen mit Bausteinen eines Elektro- bzw. Pneumatikbaukastens gegenständlich aufgebaut werden und synchron dazu im Rechner ein virtuelles Modell erzeugt wird. Dieses Modell kann

dann in späteren Phasen des Lernprozesses für unterschiedliche Zwecke genutzt werden, beispielsweise um Fehler zu suchen, Optimierungen vorzunehmen oder komplexe Verbindungen zwischen unterschiedlichen Bauelementen zu identifizieren.

Durch die direkte Kopplung des realen Versuchsaufbaus mit der Modellgenerierung im Rechner könnten Irrtümer und Fehler beim Aufbau einer Schaltung (z.B. Verpolung, Vertauschung von Ein- und Ausgängen, Verwecheln von Bauelementen) frühzeitig erkannt oder für spätere Analyse Zwecke aufgezeichnet werden. Eine akustische oder optische Rückkopplung zeigt den im Realen Modellierenden den Erfolg bzw. den Zustand einzelner Operationen an (z.B. das erfolgreiche Greifen eines Objekts). Die Kommunikation mit dem rechnerinternen Modellierer bezüglich Parametereingabe, Bauteil- bzw. Funktionspezifizierung und Ablaufsteuerung erfolgt entweder über definiertes Plazieren der Bauelemente auf einer Stecktafel oder über eine einfache Gestensprache.

Da in der modellerzeugenden Phase eine direkte geometrische, topologische und funktionale Analogie zwischen dem physikalischen, d.h. dem gegenständlichen Schaltungsaufbau und dem rechnerinternen Modell besteht, wird eine enge Beziehung zwischen realer Welt und Modellwelt aufgebaut. Die im Rechner erzeugte Modellbeschreibung kann damit gleichzeitig dazu dienen, unterschiedliche Visualisierungen der Aufgabenstellung (z.B. Schaltpläne, Stücklisten, 3D-Darstellungen von Bauelementen) zu erzeugen. Hierdurch bietet sich die Möglichkeit, technische Systeme mit Hilfe verschiedener symbolischer Repräsentationen auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen im Rechner zu visualisieren

Im Fokus der oben formulierten lernpsychologischen Vorstellungen zeigt dieses Szenario, wie erste Lernschritte im stofflichen Bereich stattfinden, während die Analyse, Variation und Fehlersuche mit Hilfe des Rechners erfolgen kann. Dadurch sind Übergänge und Bezüge zwischen einer konkreten, stofflichen Welt mit ihren sinnlichen Elementen und einer abstrakten, virtuellen Welt mit ihren formalen Strukturen möglich: Die *handgreifliche* Modellierung bildet die Grundlage kognitiver Abstraktionsvorgänge, Denkprozesse und Begriffsbildungen. Erst im zweiten Schritt wird das im Rechner erzeugte virtuelle Modell als Hilfsmittel zur rationalen Analyse (Fehlersuche, Optimierungen, Suche nach alternativen Lösungen) genutzt.

Unter didaktischen Aspekten betrachtet, unterstützt der beschriebene Ansatz unterschiedliche experimentierende Lernformen im Kontext eines handlungsorientierten Unterrichts. Dieses Spektrum beinhaltet verschiedene Tätigkeiten und Aktivitäten, wie Ausprobieren, Entwickeln, Üben und Konstruieren usw.. Diese möglichen Lernaktivitäten deuten hin auf verschiedene Formen des experimentierenden Lernens, wie z.B.:

- Experiment als Probehandeln,
- Experiment als Problemlösen, Entwickeln und Konstruieren,
- Experiment als Üben manueller Operationen,
- Experiment als Optimierung der Bewegungskoordination und
- Experiment als Erkenntnistätigkeit.

Durch die Entfaltung eines entsprechenden berufspädagogischen Ansatzes könnte ein Beitrag zur Weiterentwicklung des handlungsorientierten Unterrichts und des experimentierenden Lernens in der beruflichen Bildung geleistet werden. Das neue an diesem Konzept besteht darin, daß durch die direkte Kopplung gegenständlicher Systeme und abstrakter Modellwelten, erfahrungsorientierte Übergänge zwischen eben diesen gegenständlichen und abstrakten Modellen technischer Systeme geschaffen werden und damit rechnergestütztes Lernen nicht nur im *virtuellen Raum*, sondern auch im Konkreten möglich wird.

Forschungsperspektiven

Ausgangsthese unserer Überlegungen ist, daß der Grad an Konkretheit, in dem Lernende die Möglichkeit bekommen, im Kontext beruflicher Arbeits- und Qualifizierungsprozesse mit konkreten, stofflichen Objekten und Situationen umzugehen sowohl einen wichtigen Einfluß hat auf das Verstehen komplexer technischer Zusammenhänge als auch auf die Fähigkeit, Gelerntes auf reale Anwendungs- bzw. Arbeitssituationen zu transferieren. Begründen läßt sich diese These mit verschiedenen lernpsychologischen, arbeitswissenschaftlichen und pädagogischen Theorien. Allerdings mangelt es an pädagogischen und technischen Konzepten, *auf welche Weise* verlorengegangene Gegenständlichkeit in den Lernprozeß zurückgeholt werden kann. Insbesondere wird kaum der Frage nachgegangen, ob gegenständliches Lernen in Verbindung mit rechnerbasierten Lernsystemen und der Nutzung virtueller, nicht-gegenständlicher Medien prinzipiell pädagogisch und technisch denkbar ist.

Ziel unserer weiteren Forschungsarbeiten ist die Entwicklung und Erprobung einer rechnergestützten Lernumgebung für den Technikunterricht, die das Modellieren technischer Systeme im Gegenständlichen ermöglicht und zugleich den Übergang von realen stofflichen Objekten zu virtuellen abstrakten Rechnermodellen unterstützt. Das heißt, mit gegenständlichen Bausteinen können Modelle technischer Systeme aufgebaut und synchron dazu ähnliche rechnerinterne generiert werden. Auf diese Weise wird eine Alternative zum rein abstrakten Modellieren im virtuellen Raum angestrebt. Der sinnlichen Wahrnehmung und Überprüfung realstofflicher Phänomene wird eine zentrale Bedeutung für das Begreifen und Beurteilen komplexer Zusammenhänge zuerkannt. Dabei sollte die Frage der Komplementarität gegenständlicher technischer Lernmedien zu symbolischen, auf virtuellen Rechnermodellen basierenden Medien untersucht werden. An Beispielen aus der Steuerungstechnik kann eine schrittweise, nachvollziehbare und überprüfbare Abstraktion, ausgehend von konkret erfahrbaren Zusammenhängen, zu physikalischen, funktionalanalytischen und numerischen Modellen demonstriert werden.

Aufbauend auf den im Forschungszentrum artec vorliegenden konzeptionellen Arbeiten zu einer Werkstattmetapher und den realisierten Softwarekomponenten zur Gestenerkennung, Geometriedatenverarbeitung und diskreten ereignisorientierten Simulation ist die prototypische Realisierung eines stofflichen und virtuellen Simulationsbaukastens in Arbeit. Das Grundkonzept der simultanen Ortsveränderung stofflicher und rechnerinterner

abstrakter Bausteine konnte deshalb bereits mit einer einfachen Interfacetechnik am Beispiel von Würfelgeometrien demonstriert werden. Unter Berücksichtigung dieser stärker technisch-orientierten Ansätze beinhalten zukünftige Forschungen die Entwicklung einer berufspädagogischen Konzeption und die Erprobung eines zu entwickelten Systems. Im Zentrum unserer weiteren Forschungsarbeiten stehen daher zunächst folgende Forschungsfragen, die die berufspädagogische und didaktische Fundierung unseres Ansatzes betreffen:

- Welche komplementären Aufgabenbereiche zwischen Mensch und Rechner lassen sich im Hinblick auf das rechnergestützte Lernen im Konkreten mit Übergängen zum Abstrakten spezifizieren?
- Welche Formen der Mensch-Maschine-Interaktion und welche Interface-Techniken sind geeignet, ein rechnergestütztes Lernen im Konkreten mit Übergängen zum Abstrakten zu unterstützen?
- Welche Formen der Sachbegegnung (z.B. symbolische, materiale Objekte, konkrete Materialien, Werkzeugen und Maschinen) sind in beruflichen Qualifizierungsprozessen erforderlich, um kognitive Abstraktionsvorgänge, Denkprozesse und Begriffsbildungen zu initiieren und damit erfahrungsorientiertes Lernen auf unterschiedlichen Stufen zu ermöglichen?
- Welche Bedeutung hat das nichtgegenständliche Lernen und damit der Umgang mit symbolischen Informationen und virtuellen, in Rechnern gespeicherten Modellen für berufliche Lernprozesse und die Erlangung beruflicher Handlungskompetenz?
- Welche Lehr- bzw. Lernformen sind besonders geeignet, um dieses Konzept in seinen didaktischen Möglichkeiten zu entfalten?
- Welche Hilfen zur Lösung der Übergangproblematik zwischen Konkretem und Abstraktem lassen sich auf lernpsychologischer Ebene aus der Verbindung der systemtheoretischen Ansätze quantitativen und qualitativen Modellierens und Experimentierens gewinnen?

All diese Fragen tangieren verschiedene Aspekte der Berufspädagogik, der Lernpsychologie und vor allen Dingen der Mensch-Computer-Interaktion: von der oben skizzierten Ausgangshypothese über Formen gegenständlichen Lernens bis hin zu Aspekten der Gestaltung von Hard- und Softwaresystemen. Reflektiert werden sollen dabei die verschiedenen Ansätze aus dem Bereich der Informatik, Berufspädagogik und Didaktik des computerunterstützten Lernens, die die oben skizzierte Problematik aus unterschiedlichen Perspektiven beleuchten und Hinweise auf neue System-Design-Entwürfe, Benutzungsformen und Einsatzmöglichkeiten von Rechnern geben. Ziel ist es, hieraus Erkenntnisse für die Konzeption und Gestaltung rechnergestützter Modellierungs- und Simulationsumgebungen zu gewinnen, die einerseits den Umgang mit konkreten Objekten im Realen unter Berücksichtigung lernpsychologischer Aspekte ermöglichen und

andererseits die *Stärken der Maschine* im Hinblick auf die Entlastung des Lernenden von lästigen, substitutionsbedürftigen Formalismen, Fakten usw. nutzen.

Für das Gebiet der Automatisierungstechnik ist ein Konzept zu entwickeln, das darauf abzielt, mit elementaren gegenständlichen Bausteinen und entsprechenden rechnerinternen Modellfragmenten den Aufbau einfacher, didaktisch relevanter Schlüsselmodelle zu ermöglichen. Der existierende Baukasten ist um diese Elemente zu erweitern. In einem Anwendungsszenario sollen Erfahrungen über die Auswirkungen dieser neuen Modellierart auf die Orientierung, Fehlersuchfähigkeit und Transferfähigkeit der Lernenden gewonnen werden. Aus diesen Forschungsarbeiten sollen Erkenntnisse über die *gegenständlich-abstrakte Komplexitätsbewältigung* auf der Basis rechnergestützter Modellierungsumgebungen entstehen. Gleichzeitig sollen mit Hilfe der verfügbaren Systeme empirische Studien durchgeführt werden, um die Tragweite unseres Konzeptes zu untersuchen. Dazu sollen auf der Basis eines 'Real World'-Editors Beispiele aus der Steuerungstechnik im berufspädagogischen Kontext erprobt werden. Die empirischen Daten könnten durch teilnehmende Beobachtung, Erfahrungsberichte sowie Befragungen von Lernenden und Lehrenden gewonnen und sollen im Sinne partizipativer Software-Entwicklung (vgl. Floyd 1989) in die Prototypenentwicklung einfließen.

Daraus ergeben sich folgende Fragestellungen für zukünftige Forschungsprojekte:

- Untersuchung und Bewertung verschiedener Formen der Mensch-Computer-Interaktion, z.B. Ubiquitous Computing, Computer-Augmented Environments, 'Real Reality'-Ansatz, Virtual Reality-Konzept im Hinblick auf die Entwicklung und Realisierung eines Konzeptes zum direkten Umgang mit konkreten Objekten im Realen. Insbesondere soll untersucht werden was Konzepte, die entweder von der Sensorisierung realer Objekte oder von der Sensorisierung der Hand oder von der Sensorisierung einer unabhängigen Instanz ausgehen, für die Entwicklung und Realisierung eines Ansatzes zum direkten Umgang mit konkreten Objekten im Realen und die Übertragung in den Rechner bedeutet.
- Bestimmung komplementärer Aufgabenbereiche zwischen Mensch und Rechner im Hinblick auf das rechnergestützte Lernen im Konkreten mit Übergängen zum Abstrakten: Welche Funktionen technischer Modellierung und Simulation sollen vom System unterstützt werden? Welche Interaktions-, Handlungs- und Lernformen sind beobachtbar, und wie ist diesen durch das System am besten Rechnung zu tragen?
- Weiterentwicklung der bereits entworfenen und prototypisch realisierten Soft- und Hardwarearchitektur, insbesondere: Baustein-Editor, Modell-Editor, Simulator, Visualierer. Überarbeitung des Modulkonzeptes (Schnittstellen, Integration vorhandener Module, spätere Einbindungsmöglichkeiten in eine vernetzte Lernumgebung). Spezifizierung einzelner Systemkomponenten.
- Analyse der komplementären bzw. polaren Dimensionen von Gegenständlichkeit und Nichtgegenständlichkeit unter lernpsychologischen und softwareergonomischen Aspekten. Analyse verschiedener Ebenen der Sachbegegnung (reale Systeme, gegenständliche

und symbolische Modelle) sowie Spezifizierung der didaktischen Funktion entsprechender technischer Medien (Anschaulichkeit, Sinnlichkeit, Abbildtreue).

- Spezifizierung geeigneter gegenständlicher und abstrakter Modellbausteine für einen Anwendungsbereich.
- Entwicklung eines Anwendungsszenarios aus der Automatisierungstechnik.
- Entwicklung eines Interaktionskonzeptes auf der Basis der vorhandenen Systeme. Weiterentwicklung der Griffenerkennung bezüglich der Identifizierung unterschiedlicher steuerungs technischer Komponenten.
- Erweiterung der Modellbausteineigenschaften um Attribute, die für das spezifizierte Anwendungsgebiet relevant sind.
- Realisierung einer neutralen Datenschnittstelle zwischen Modellierer ('Real-World-Editor') und Simulator.
- Realisierung neuer Module und Integration aller Komponenten: Baustein-Editor, Modell-Editor, Simulator und Visualisierer.
- Erstellung von Modellbausteinen.
- Durchführung und Auswertung empirischer Studien: Analyse und Evaluation des Modellierungsvorgangs im Realen und Virtuellen.
- Konzeptionelle Arbeiten zur Verbindung der systemtheoretischen Ansätze quantitativen und qualitativen Modellierens mit dem Ziel, auf lernpsychologischer Ebene zur Lösung der Übergangsproblematik zwischen Konkretem und Abstraktem beizutragen.

Literatur

- Aebli, H. (1970): Psychologische Didaktik. Stuttgart
- Becker, B.-D. (1991): Simulationssystem für Fertigungsprozesse mit Stückgutcharakter - Ein gegenstandsorientiertes System mit parametrisierter Netzwerkmodellierung. Dissertation, Universität Stuttgart
- Bolte, A./Martin, H. (1992): Prozeßbeherrschung durch Erfahrungswissen und deren technische Unterstützung - ein neues Forschungsfeld. In: Institut für Arbeitswissenschaft der Gesamthochschule Kassel (Hrsg.): Erfahrungsgeleitete Arbeit mit CNC-Werkzeugmaschinen und deren technische Unterstützung. Kassel
- Böhle, F. (1995): Qualifizierung für erfahrungsgeleitetes Arbeiten - neue Anforderungen an die berufliche Bildung. In: Dybowski, G./Pütz, H./Rauner, F.(Hrsg.): Berufsbildung und Organisationsentwicklung. Perspektiven, Modelle, Grundlagen. Schriftenreihe Berufliche Bildung - Wandel von Arbeit und Technik; Donat Verlag. Bremen, S. 122-133
- Böhle, F./Milkau, B. (1988): Vom Handrad zum Bildschirm. ISF München, Campus Verlag
- Böhle, F./Rose, H.(1992): Technik und Erfahrung. Arbeit in hochautomatisierten Systemen. ISF München, Campus Verlag
- Brauer, V. (1994): Feature-basierte Erkennung dynamischer Gesten mit einem Datenhandschuh. Diplomarbeit, Universität Bremen
- Bruns, F. W. (1990): Künstliche Intelligenz in der Technik. Carl Hanser Verlag, München
- Bruns, F. W. (1993): Zur Rückgewinnung von Sinnlichkeit - Eine neue Form des Umgangs mit Rechnern. Technische Rundschau Heft 29/30, S. 14-18
- Bruns, F. W. (1996): Sinnlichkeit in der Technikgestaltung und -handhabung - Ein konstruktiver Ansatz. In C. Schachtner (Hrsg): Technik und Subjektivität. Suhrkamp
- Bruns, F. W., Brauer, V. (1995): Greifendes und begreifendes Modellieren im Realen und Virtuellen. Positionspapier zum 7. Workshop "Hypermedia und KI". Hannover, Nov. 95
- Bruns, F.W., Heimbucher, A. (1992): Simulation as a Means of Shaping Work and Technology - using new tools in participatory factory planning. In: P. Brödner, W. Karwowski (Hrsg): Ergonomics of Hybrid Automated Systems III, Elsevier, Amsterdam
- Bruns, F. W., Heimbucher, A., Müller, D. (1993): Ansätze einer erfahrungsorientierten Gestaltung von Rechnersystemen für die Produktion. artec-Paper 21, Bremen
- Bruns, F.W./ Müller D.(1992): Hypermedia als Simulationswerkzeug. Universität Bremen, artec-Arbeitspapier 17. Bremen
- Bruns, F.W./ Müller D./ Steenbock, J.(1993): Hypermediagestützte Simulationssysteme für berufliche Schulen. 1. Zwischenbericht zum Modellversuch. Senator für Bildung und Wissenschaft. Bremen
- Bruns, F.W./ Müller D./ Steenbock, J.(1994): Hypermediagestützte Simulationssysteme für berufliche Schulen. 2. Zwischenbericht zum Modellversuch. Senator für Bildung und Wissenschaft. Bremen
- Bruns, F.W./ Müller, D./ Steenbock, J. (1995): Hypermediagestützte Simulationssysteme für berufliche Schulen. 3. Zwischenbericht zum Modellversuch. Senator für Bildung und Wissenschaft. Bremen

- Floyd, Christiane (1989): Softwareentwicklung als Realitätskonstruktion. In: W.-M. Lippe (Hrsg.): Software-Entwicklung. Konzepte, Erfahrungen, Perspektiven. Berlin, Heidelberg, New York 1989, S. 1-20
- Forbus, K.D (1984): Qualitative process theory. Cambridge, MIT. Ph.D. Thesis
- Gathmann, H./ Schäfer, P. (1995): Unterrichtliche Erprobung und Weiterentwicklung der Lern- und Simulationssoftware zur Elektropneumatik / Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS). In: Bruns, F.W./ Müller, D./ Steenbock, J. (1995), S. 105ff
- Gentner, D., Stevens, A. L. (1983): Mental Models. Hillsdale, N.J.
- Hayes, P.J.(1979): The naive physics manifesto. In: Michie, D. (editor): Expert Systems in the Micro Electronic Age. Edingburgh University Press, Edingburgh
- Hacker, W. (1986): Arbeitspsychologie - Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten. Berlin.
- Hoppe, M./Schulz, H.-D. (1995): Handlungslernen - ein sinnstiftendes, lernorganisatorisches Konzept. In: Zeitschrift Berufsbildung, Heft 31, Februar 1995, S. 3-7
- Isdale, J. (1993): What is Virtual Reality - a homebrew Introduction. Isdale Engineering
- Iwasaki, Y., Vescovi, M., Fikes, R. (1994): A Causal Functional Representation Language with Behavior-Based Semantics. Knowledge Systems Laboratory, Stanford University, KSL-94-10
- Kang, S. B., Ikeuchi, K. (1994): Grasp Recognition and Manipulative Motion Characterization from Human Hand Motion Sequences. Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Diego, Cal., Vol 2, S 1759-1764
- Keller, H., Stolz, H., Ziegler, A., Bräunl, T. (1993): Virtual Mechanics: Simulation and Animation of Rigid Body Systems. Technischer Bericht, Universität Stuttgart, Computer Science Report 8
- Kerschensteiner, G. (1926): Begriff der Arbeitsschule. Berlin/Leipzig
- Krueger, M. (1991): Artificial Reality II. Addison-Wesley Pub.
- Kuipers, B. (1994): Qualitative Reasoning. Modeling and Simulation with Incomplete Knowledge. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- Kummer, R.R. (1991): Computersimulation in der Berufsschule. Frankf./M.
- MacKenzie, C. L., Iberall, T. (1994): The Grasping Hand. Amsterdam: Elsevier Science
- Müller, D. (1990): Karel der Roboter. Eine interaktive Programmier- und Simulationsumgebung. Bremen
- Müller, D. (1993): Application Framework für die Entwicklung interaktiver Anwendungen mit multisensorischen Benutzungsschnittstellen. artec-Paper 22, Bremen
- Murakami, T., Nakajima, N. (1994): Direct and Intuitive Input Device for 3-D Shape Deformation. Human Factors in Computer Systems, CHI '94, Boston, 465-470
- Negroponte, N. (1991): Beyond a Desktop Metaphor. In: A. R. Meyer et al (Hrsg.): Research Directions in Computer Science: An MIT Perspective. The MIT Press, Cambridge
- Piaget, J. (1947): Psychologie der Intelligenz. Zürich
- Piaget, J. (1959): La formation du symbole chez l'enfant. Imitation, jeu et rêve - Image et representation. Neuchâtel
- Pritsker, A. A. B. (1986): Introduction to Simulation and SLAM II. Halsted Press, New York

- Reinhardt, A. Kühne, K. (1988): Modellbausteine und Werkzeuge für den Anlagenbau - Entwurf, Dimensionierung und Angebotserstellung. In: Ameling, W. (Hrsg.): Simulationstechnik, 5. Symp. Simulationstechnik, Aachen, S. 464-469
- Scheel, J., Bruns, F. W., Busekros, L., Frank, G., Heimbucher, A., Hofferberth, D. (1994): Simulation von Arbeit und Technik - Entwicklung, Implementation und Betrieb von Programmsystemen für Planung, Simulation und Animation im Fabrikbereich an der Hochschule Bremen, Abschlußbericht, PSA-Institut, Hochschule Bremen
- Schulz, H.-D. (1992): Handlungslernen in der beruflichen Bildung. Darstellung eines Lernkonzepts und Überprüfung an ausgewählten Beispielen betrieblicher Berufsbildung. Diss., Unversität Bremen.
- Warnecke, H.-J., Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Virtual Reality '94 - Anwendungen & Trends. Springer-Verlag, Berlin, 1994
- Wellner, P., Mackay, W., Gold, R. (1993): Computer-Augmented Environments: Back to the Real World. Communications of the ACM, 36, 7, S. 24 ff