

F. Wilhelm Bruns

Lernen in *Mixed Reality*

Forschungszentrum artec - Arbeit, Umwelt, Technik

Universität Bremen

31. 5. 2003

(Published in: ABWF (Ed.): Kompetenzentwicklung 2003, Waxmann, Berlin, 2003, p. 71-112)

Inhalt

1. Einführung.....	3
2. Mixed Reality als Brückentechnik.....	4
2.1 Stand der Forschung.....	5
2.2 Technische Prinzipien und Projekte.....	11
2.2.1 Real Reality.....	11
2.2.2 Ansätze der Mischung.....	17
2.2.3 Komplexe Objekte und Hyper-Bonds als Basistechnik für Mixed Reality.....	21
3. Mixed Reality in Arbeit und Spiel.....	26
4. Erfahrungsorientiertes Arbeiten und Lernen mit Mixed Reality.....	31
5. Lernen in vielfältigen Umgebungen.....	36
6. Perspektiven für die betriebliche Weiterbildung.....	37
Literatur.....	44

1. Einführung

Das Verhältnis von Lernen an Modellen, didaktisch reduzierten oder angereicherten Abbildungen von Wirklichkeit, und Lernen im Arbeitsprozess beschäftigt Pädagogen seit Langem. Für den Erwerb technischer Kenntnisse und Fertigkeiten waren zunächst abstrakte Zeichnungen, gegenständliche Modelle, dann anschauliche Computer-Simulationen hilfreich. Besonders durch das Aufkommen immer leistungsfähiger Simulatoren, verbunden mit einer starken Informatisierung der Produktionsprozesse (SPS-, CNC-, Roboter-Steuerungen) spitzte sich Mitte der 80er Jahre die Frage zu „Wie viel Lernen mit kostensparenden, gefahrlosen und didaktisch orientierten Simulatoren ist möglich und wie viel Lernen in realen Prozessumgebungen (teuer, gefährlich, vorgegeben) ist nötig?“. Leider können an dieser Stelle nicht die zahlreichen Akteure der Forschungsprogramme *Computergestütztes erfahrungsgeleitetes Arbeiten – CeA, Modellierung der Produktion, Arbeitsprozessorientiertes Lernen* angemessen gewürdigt werden. Eine für unsere eigenen Forschungen in Richtung *Mixed Reality* einflussreiche Arbeit war die Studie von Böhle & Milkau (1988) über das Verhältnis von subjektivierendem zu objektivierendem Arbeitshandeln in Automatisierungssystemen. Sie erhärtete die These, dass für einen kompetenten Umgang mit automatisierten Systemen zwei Zugänge von gleichwertiger Bedeutung seien: der wissenschaftlich distanziert rationale und der körperlich einlassende emotionale. In der Gestaltung technischer Anlagen und in der Ausbildung qualifizierter Fachleute überwiegt bisher die objektivierende Seite, das Subjektive wird vernachlässigt. Im Forschungszentrum artec wird seit 12 Jahren nach Brücken zwischen diesen Zugängen gesucht und didaktische Konzepte zusammen mit neuen Lernumgebungen entwickelt und evaluiert. Dabei erwies sich das technische Konzept einer weitgehend selbstbestimmbaren Mischung aus Realumgebung und Modell als besonders vielversprechend. Im folgenden Beitrag werden zunächst technische Grundlagen und Möglichkeiten dieses Konzepts vorgestellt, dann Anwendungsfelder in Arbeit und Spiel aufgezeigt und abschließend die Bedeutung für erfahrungsgeleitetes Lernen und Arbeiten hervorgehoben. Die in diesem Beitrag gewählte Gliederung Technik->Arbeit->Bildung entspricht nicht unserer Vorgehensweise in der Forschung und Entwicklung. Vielmehr gehen wir von einem Spannungsfeld der gleichgewichtigen Pole Arbeit-Technik-Bildung aus, zwischen denen sich Gestaltung iterativ entwickelt.

2. Mixed Reality als Brückentechnik

Der Begriff *Mixed Reality* wurde von Milgram & Kishino (1994) bei dem Versuch eingeführt, verschiedene Mischformen von Computer-generierter Realität (Virtual Reality) und externer Welt zu beschreiben. Ihre Arbeit systematisiert Entwicklungen, die auf E. Sutherland's Vorstellungen von einem allgemeinen Projektionsbegriff („The ultimate display would, of course, be a room within which the computer can control the existence of matter“ Sutherland 1965) zurückzuführen sind und Anfang der 90er Jahre aus verschiedenen Motiven zu einer Gegenbewegung zur zunehmenden Virtualisierung technischer Prozesse und Produkte, dem Verschwinden von realen physikalischen Phänomenen in ihren Repräsentationen im Computer, führte. In den USA wurde diese Gegenbewegung in den amerikanischen Forschungslaboren PARC, MIT, SRI, u.a. geboren (siehe ACM Themenheft *Back to the Real World*) und führte zu den Ansätzen Ubiquitous Computing, Augmented Reality, Ambient Intelligence (Weiser 1993). Unsere eigenen Konzepte und Entwicklungen im Forschungszentrum artec zur Rückgewinnung von Sinnlichkeit (Bruns 1993) und zur erfahrungsorientierten Gestaltung von Rechnersystemen für die Produktion (Bruns, Heimbucher & Müller 1993), provokant als *Real Reality* bezeichnet, waren motiviert durch die Arbeiten von Böhle & Milkau (1988) und eigenen Entwicklungen und Anwendungen partizipativer Simulationstechnik in der Fabrikautomation. Die Tendenz des zunehmenden Verlustes subjektivierender Tätigkeitsdimensionen bei der Arbeit mit automatisierten Werkzeugmaschinen (*Vom Handrad zum Bildschirm*) wurde von uns aufgegriffen und versucht, auf einer höheren Ebene umzukehren. In dem Workshop *Vom Bildschirm zum Handrad* (Bruns et al 1997) stellten wir Ziele vor, die nicht ein nostalgisches Zurück zur Handwerkskunst beinhalteten, sondern die Mächtigkeit des Mediums und Werkzeugs Computer anerkannten, gleichzeitig aber versuchten, letzteren von einer dominanten, viel Aufmerksamkeit und Lebenszeit beanspruchenden Maschine in ein intuitiv nutzbares Werkzeug zu überführen.

In ersten von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsprojekten wurde das Konzept entwickelt, über sensorisierte Hände die reale Welt als Schnittstelle zum Computer zu nutzen. Den Rechner also im Rücken in unsere Alltagswelt zu integrieren. Am Beispiel der Spezifikation von Transportsystemen durch gegenständliches Vormachen wurden Möglichkeiten der Verbindung von unformalisierter und formalisierter Erfahrung von Wirklichkeit erkundet (Brauer 1996, Bruns 2000).

Heute ist *Mixed Reality* eine etablierte Forschungsrichtung mit internationalen Tagungen und ausgeprägten technischen Entwicklungen.

2.1 Stand der Forschung

Virtualität, inzwischen durch *Virtual Reality* zum verbreiteten Begriff geworden, hat mindestens zwei Bedeutungswurzeln: das Vorgestellte, Imaginierte, Mögliche, wie in D'Alembert's *Virtueller Arbeit* und die Illusion eines realen Phänomens, wie in Newton's virtuellem Punkt hinter dem Spiegel. Während der letzten Dekade hat sich der Ausdruck *Virtual Reality* in dem zweiten Sinne durchgesetzt, als Beschreibung für eine vom Computer generierte Illusion von Wirklichkeit, in der Weise, dass die Nutzerin den Eindruck bekommt, sie agiere in und mit der realen Welt statt mit einem Computersimulations-Model. Dieses Untergebiet der Computersimulation, visuellen Projektion und Interfacetechnik hat in den letzten Jahren beachtliche Aufmerksamkeit und Unterstützung von Militär und Unterhaltungsindustrie erfahren. Ihren Nutzen für allgemeinere Zwecke zu erforschen, insbesondere für das berufliche Lernen und für die Gestaltung von Arbeitsumgebungen, nimmt zu.

Erste Arbeiten über *Mixed Reality* waren stark von der Visualisierungstechnik (Head-Mounted Display, 3D-Stereo-Sichten, Projektionswänden, Holographie) geprägt. Milgram & Kishino (1994) führten den Begriff für ein Kontinuum zwischen Realität und Virtualität ein und beschrieben sechs Klassen hybrider Displays um den gesamten Bereich der Mixed Reality Interfaces abzudecken. In *Mixed Reality – Merging Real and Virtual Worlds* (Ohta & Tamura 1999) stellen Milgram & Coquhoun (1999) eine allgemeinere Taxonomie vor, in der sie auch Perspektiven des Betrachters und Intuitivität der Nutzung (Steuerung und Wahrnehmung) in MR-Umgebungen einbeziehen. Das Kontinuum des dreidimensionalen Betrachtungsraumes spannt sich auf zwischen den Polen

- reale Umgebung mit unmodellierter Welt und virtuelle Umgebung mit vollständig modellierter Welt
- egozentrischer und exozentrischer Perspektive
- direkter und indirekter Handhabung

Auf der Realitätsachse kann eine Welt mehr oder weniger durch die andere bereichert werden. Dies führt dann zu *Augmented Reality* oder *Augmented Virtuality*.

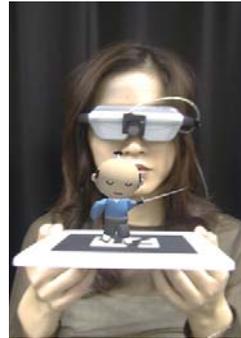
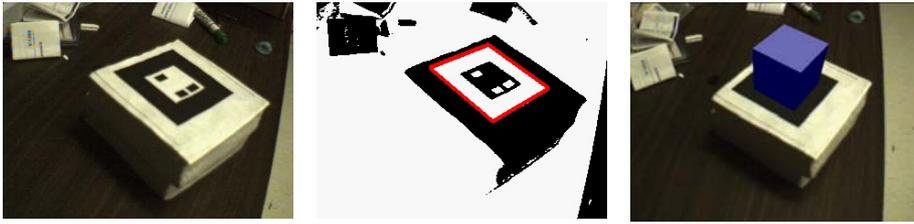


Abb. 1: Augmented Reality Toolkit - Verschiedene Displays mit befestigter Camera (Quelle Kato et al 1999)



Abb. 2: Sicht durch ein Kopfmontiertes Display (Quelle: Kato et al 1999)

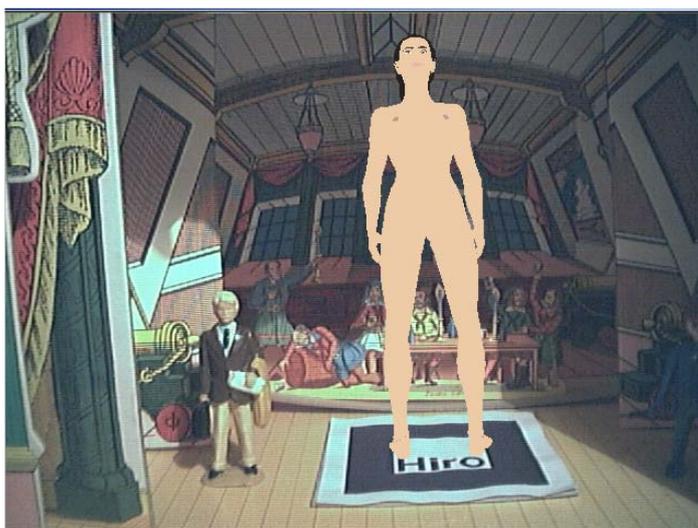
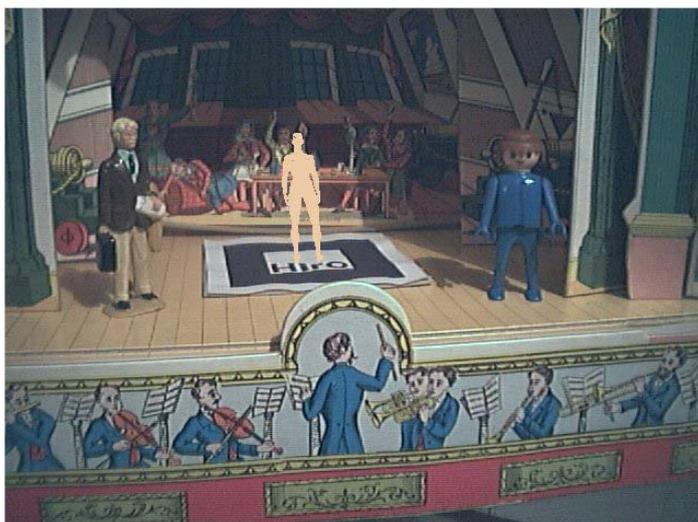


Abb. 3: Angereicherte Theaterwelt

Bei den Abb. 1-3 handelt es sich um passgenaue Echtzeit-Projektionen von dreidimensionalen computergenerierten Bildern in eine Videoaufnahme von Wirklichkeit. Benutzerinnen sehen die Wirklichkeit durch eine Camera vermittelt auf einer Bildschirmbrille. Rohdaten der Videocamera werden mit Computerobjekten überlagert und zwar so, dass an die Stelle von erkennbaren Mustern in der Realwelt, in Größe und Lage richtig angepasst das Kunstobjekt im Display erscheint.

Rohdaten-Repräsentationen von Wirklichkeit (Videoaufnahmen) werden in der oben genannten Taxonomie als Realität angesehen und nicht als Virtualität. Dies führt zu einiger Konfusion. Die Autoren diskutieren eine Anwendung der entfernten Ausgrabung mit Hilfe eines ferngesteuerten Roboters. Der Nutzer ist Teil eines Regelkreises, in dem er Eindrücke von der fernen Realwelt über Videobildübertragung bekommt, aber das Feedback für seine haptischen Steueraktionen wird generiert von einem 3D-Kinematikmodell des Ausgrabungsgeräts. Die Autoren geraten in Schwierigkeiten, diese Anwendung als Augmented Reality (weil die Video-Realität durch ein Computermodell angereichert wurde) oder als Augmented Virtuality (weil das Computermodell durch Videorealität angereichert wurde) zu bezeichnen.

Diese Überbetonung des Bildhaften kann als generelle Tendenz heutiger Mixed Reality – Forschung angesehen werden. Wegen der Bedeutung für gegenständlich erfahrungsorientiertes Handeln, schlagen wir eine Definition von *Mixed Reality* vor, die unter Realität die technisch **unvermittelte** Realitätserfahrung versteht und nur diese die Virtualität bereichern kann. Diese Sicht ist abgeleitet ist von unserem *Real Reality* Konzept. Mit *Real Reality* bezeichnen wir die möglichst unmittelbare, durch Technik unvermittelte Erfahrung von Wirklichkeit mit all unseren Sinnen (schon eine konventionelle Brille ist dabei eine erste Vermittlung). Es ist zugleich ein Konzept, in dem unsere ganze Aufmerksamkeit bei den realen Phänomenen liegt und der Rechner uns im Normalfall unmerklich hilfreich zur Seite steht. Wenn gewünscht, kann der Rechner die Realität mit seinen Modellprojektionen bereichern. Realität ist die greifbare Welt, die allen unseren Sinnen ausgesetzt ist. Weil Haptik der Sinn ist, mit dem wir die direkteste Erfahrung von Realität verbinden, werden greifbare Objekte (tangible objects) als wichtigster Teil dieser Welt und unserer Schnittstelle zu ihr angesehen. Virtualität ist die rechnergenerierte oder vermittelte Ergänzung oder Abbildung von Realität. Abhängig vom Fokus kann die Arbeitssituation als Augmented Reality oder als Augmented Virtuality bezeichnet werden. Einige Szenarien sind die folgenden. Ein Avatar, der als Hologramm auf einem realen Stuhl sitzt, erzeugt die Illusion einer anwesenden Person. Dies kann als Augmented Reality bezeichnet werden, wenn es um

die Auswahl eines Stuhles und seiner Beziehung zu einem realen Tisch geht. Wenn das Interesse auf dem Avatar und seinen möglichen Posen und Gesten liegt, kann diese Situation als *Augmented Virtuality* bezeichnet werden. Es werden weitere Möglichkeiten vorgestellt, in denen im Ganzen funktionsfähige Systeme über reale und virtuelle Instanzen verteilt werden können. Realität kann dabei die Virtualität kontrollieren und umgekehrt. Dieses ist ein technisch vermittelter Prozess, aber aus Sicht des Nutzers gibt es Teile des Systems die direkt erfahrbar und andere die es nicht sind. Wenn wir in der Lage sind, die Grenze zwischen realen und virtuellen Teilen eines Systems in einer freien nutzerzentrierten Weise zu ziehen, werden wir von *Mixed Reality* sprechen. Beispiele dieser Sicht wurden in den Projekten DERIVE, MARVEL und [Lab@Future](#) demonstriert (s.u.).

Photos und digitalisierte Bilder enthalten mehr oder weniger indirekt Spuren der Realität, sie sind in semiotischer Terminologie Index und Ikone. Digitalisierte Photos haben eine längere Kette technisch vermittelter Spuren und sind deshalb weiter von der Realität entfernt als Silberplatten eines Belichtungsprozesses, selbst wenn sie im Endprodukt ähnlich sein können, ein farbiges Blatt Papier. Digitale Spuren von Realität, mögen sie Indexe von Lichtverteilungen, Druck, Temperatur, Elektrizität oder anderen physikalischen Phänomenen sein, sind, wenn sie wenig verändert in eine Ausgabe übersetzt werden, wie ein Videobild auf dem Bildschirm, oder als Druck aus einem Generator, können als direkte Virtualität bezeichnet werden. Sind diese Verbindungen verändernd und algorithmisch vermittelt, so nennen wir sie indirekte oder erzeugte Virtualität. Wenn unser Hauptinteresse dieser Virtualität als Ersatz für ein Original gilt, so handelt es sich, je nach Einbezug realer direkter Erfahrungen um angereicherte Virtualität. Wird diese Virtualität benutzt, um als Projektion in eine gegenständliche Welt diese zu bereichern, so liegt *Augmented Reality* vor.

Reale Objekte die von einem Computer über einen Algorithmus gesteuert sind und damit Spuren einer digitalen Welt zeigen, sind kontrollierte Realität. Wenn diese Objekte als Projektion in eine virtuelle Welt benutzt werden, bereichern sie Virtualität. Beispiel dieser letzten Form ist die Visualisierung einer simulierten Stadt auf einem Planungstisch und die Verwendung von realen Fahrzeug- oder Hausmodellen zur Erhöhung der Anschaulichkeit und Handhabbarkeit der Interaktion, z.B. um Kollisionen und Sichtbarkeiten mehrerer Fahrzeuge deutlich zu machen. Ein realer Hammer, der einen virtuellen Nagel in einem virtuellen Gebäude einschlägt wäre ein weiteres Szenario angereicherter Virtualität. Ein komplexer Pneumatikschaltkreis mit einer realen Komponente, an der besondere Eigenschaften studiert werden sollen um die gesamte virtuelle Schaltung besser zu verstehen, ist *Augmented Virtuality*. Das funktionsgleiche System auf einem realen Tisch aufgebaut mit einigen

2.2 Technische Prinzipien und Projekte

2.2.1 Real Reality

Die rechnergestützte Simulation hat eine lange Tradition in den Anwendungsgebieten Produktion und Logistik. Das Experimentieren an und mit einem Modell, sei es ein mathematisches oder eine miniaturisierte Nachbildung einer Realanlage, gehört zu den grundlegenden Methoden in der Planung, im Betrieb und in der Ausbildung an produktionstechnischen Einrichtungen. Bevor extrem kostenaufwendige Neu- und Umbaumaßnahmen in die Tat umgesetzt werden oder neue Betriebsprogramme wegen einer Umstellung auf andere Produkte installiert werden, ist eine reibungslose Inbetriebnahme sicherzustellen. Fehler in der Planung führen zu teuren Ausfallzeiten, in denen u.U. der gesamte Produktionsbetrieb stillsteht. Die Simulationstechnik bietet die Möglichkeit zur Vorausschau auf das zukünftige System anhand eines (vereinfachten) Modells und kann somit zu einer größeren Planungssicherheit beitragen.

In Hinblick auf den Einsatz der Simulationstechnik sind u.a. zwei Faktoren zu nennen, die wesentlich den Erfolg einer Studie und die Akzeptanz der Resultate bestimmen. Der eine bezieht sich auf die Abbildung des existierenden bzw. geplanten Systems in ein Simulationsmodell d.h. die Frage danach, wie gut das Modell dem Vorbild entspricht. Zum anderen ist es die Anschaulichkeit und Transparenz, mit der sowohl der dynamische Ablauf der Experimente als auch deren Ergebnisse präsentiert werden, die den Planern glaubhaft dargestellt werden müssen. Damit stehen die Anwender der Simulationstechnik vor der Aufgabe, ein zutreffendes Modell für ihr Problem zu spezifizieren und dieses, entweder selbständig oder mit Unterstützung eines Experten, in ein Simulationsmodell für einen Simulator zu überführen und es anschließend zu simulieren. Abhängig vom gewählten Simulator, variiert der Zugang des Benutzers zum Simulationssystem und die Art und Weise, wie Simulationsmodelle zu definieren sind. Ein verbreitetes Konzept ist es, eine Simulationssprache zur Verfügung zu stellen, mit der programmiert werden kann, und darauf aufbauend eine grafische Benutzungsschnittstelle einzurichten, mit der anhand vorkonfektionierter Bausteine ein Simulationsmodell konfiguriert werden kann. Neben diesen sprachlichen und grafischen Darstellungsmethoden haben sich gegenständlich-stoffliche Modellanlagen bewährt, bei denen insbesondere physikalische Eigenschaften erhalten bleiben und logisch-funktionale Zusammenhänge wirklichkeitsnah verdeutlicht werden können.

Mit den Fortschritten im Bereich der Computer Grafik bieten sich erweiterte Möglichkeiten zur grafischen Darstellung auf diversen Ausgabegeräten, bis hin zur Projektion ganzer virtueller Räume, in denen Menschen mit grafischen Objekten interagieren können. Allein eine grafische Abbildung führt jedoch noch nicht zu dem, was mit dem Begriff *Virtual Reality*, nämlich die Rekonstruktion der Realität im Rechner und deren Präsentation als Realitätsillusion, gemeint ist. Den virtuellen Objekten fehlt es häufig an Eigenschaften, die im Umgang mit den Originalen selbstverständlich sind: Schwere, Elastizität, Oberflächenrauheit, dynamische Eigenschaften. Kombinationen der Simulationstechnik, dessen ureigenes Gebiet die Definition dynamischer Modelle ist, mit Virtual Reality ist vielversprechend und längst noch nicht selbstverständlich. Beide Technologien profitieren von dieser Synthese: Virtual Reality Anwendungen kämen der physikalischen Realität näher und die Simulationstechnik würde um die Komponente der interaktiven Grafik bereichert werden.

Die aus dieser Synthese resultierende Problematik der Integration verschiedener Hard- und Software-Systeme wird im Rahmen mehrerer Projekte an der Universität Bremen vom Forschungszentrum Arbeit, Umwelt, Technik (artec) untersucht. Dabei wird schwerpunktmäßig der Frage nachgegangen, wie gegenständliche Modelle, also greifbare Gegenstände, als eine fundamentale Dimension der Simulationsmethodik mit virtuellen Modellen kombiniert werden können. Da wir in diesem Zusammenhang häufig mit gegenständlichen Objekten („realen Modellen“) konfrontiert werden, haben wir diesen Ansatz – komplementär zu Virtual Reality – „*Real Reality*“ genannt.

Das *Real Reality* Konzept sieht die Verknüpfung zweier Modellwelten vor, die bis heute strikt voneinander getrennt erstellt und benutzt werden. Eine Reihe von Simulationsstudien, die gemeinsam mit gewerblich-industriellen Partnern durchgeführt wurden, haben gezeigt, daß gegenständliche Modelle, bestehend aus Holz-, Kunststoff oder Papierelementen, zur Verständigung zwischen den Beteiligten und zum Verständnis komplexer Zusammenhänge das bevorzugte Kommunikationsmedium während der Entwurfsphase von Simulationsmodellen sind (Abb. 5). Die vereinbarten Ergebnisse werden erst daran anschließend mittels eines Simulators in ein virtuelles Modell übertragen, wobei die Gefahr besteht, dass während des Übergangs vom Realmodell zum rechnerinternen Simulationsmodell Fehler gemacht werden.



Abb. 5 Layoutplanung mit gegenständlichen Modellen (Scheel, 1994)

Durch eine direkte Kopplung zwischen realen, greifbaren Modellbausteinen und virtuellen Modellelementen wird diese Fehlerquelle beseitigt. Durch synchrones Arbeiten im Realen und Virtuellen entstehen zwei miteinander gleichgeschaltete Modelle. Diese Kopplung wird erreicht, indem alle Aktionen, die an den Realbausteinen vorgenommen werden, auf die parallel im Rechner vorhandenen virtuellen Bausteine übertragen werden. Dafür werden die Hände der Benutzer sensorisiert, d.h. ein Datenhandschuh in Einheit mit einem Tracking-System misst kontinuierlich den Zustand der Hand sowie die Position innerhalb des Realmodells und mittels entsprechender Software werden Griff- und Gestenereignisse des bzw. der Benutzer erkannt. Diese werden vom *Real Reality* Modelliersystem interpretiert, welches das virtuelle Modell aktualisiert. Somit besteht in der modellerzeugenden Phase eine direkte geometrische, topologische und funktionale Analogie zwischen dem physikalischen und dem rechnerinternen Modell. Erst in der nachfolgenden Phase des Experimentierens mit dem rechnerinternen Modell und dessen Variation kann eine Auseinanderbewegung der beiden Modelle erfolgen.



Abb. 6 Layout- und Prozessplanung mit Real Reality Modellen (Hannover-Messe, 1996)

Abbildung 6 zeigt ein einfaches, aus Fischer-Technik Förderbandmodellen aufgebautes Transportsystem und im Vordergrund einen System-Designer, der einen Datenhandschuh trägt. Bei dieser Anordnung verschwindet der Rechner im Hintergrund, man ist unabhängig von der Bildschirmausgabe und kann sich auch mit mehreren Teilnehmern konzentriert den Inhalten zuwenden. Anhand des Modells können Transportwege von Paletten, die an der abgebildeten Verzweigung angeliefert werden, dem System vorgemacht und in einem anschließenden Simulationslauf analysieren werden (Abb. 7).

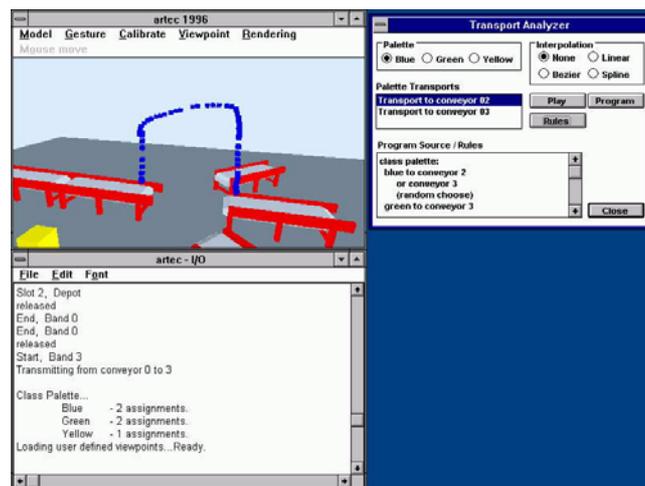


Abb. 7 Ein visualisierter Transportweg an einer Verzweigung

Dieser Prototyp bietet im Wesentlichen die folgenden Funktionen:

- Die mit dem Datenhandschuh aufgezeichneten Wege können analysiert und in Bewegungsbahnen für Roboter umgerechnet werden. Mit Hilfe eines Roboter-Simulators können diese Bahnen nachgefahren, überarbeitet und in ablauffähige Roboterprogramme umgewandelt werden. Dieses Verfahren wurde bereits mit dem Simulationssystem COSIMIR der Firma Festo bzw. dem Robotik Labor der Universität Dortmund realisiert.
- Aus den vorgemachten Wegen werden Zuteilungsregeln generiert, welche die Verteilung der Paletten im System steuern. Dabei werden verschiedene Palettentypen, hier durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet, denjenigen Förderbändern zugeordnet, auf die zuvor der Benutzer Paletten abgesetzt hat.
- Mit Hilfe der generierten Regeln kann eine Materialflusssimulation durchgeführt werden, bei der in zufälliger Reihenfolge erzeugte Paletten, den Regeln entsprechend, durch das Transportsystem geschleust werden.

- Der Prozess der Simulation wird mit dreidimensionalen Grafikmodellen visualisiert. Während die Simulation abläuft, kann der Benutzer am Bildschirm durch das virtuelle System navigieren und es aus verschiedenen Perspektiven betrachten.

In einer Weiterentwicklung des Prototypen wurde eine Kopplung des *Real Reality* Modellersystems mit dem industriell verbreiteten Simulator Simple++ realisiert. Damit wird die in VR-Entwicklungsumgebungen fehlende Funktionalität zur Abbildung realer physikalischer Prozesse mit ihren funktionalen und zeitlichen Parametern verfügbar. Um dies zu erreichen, werden die ablaufenden Programme der Visualisierung und der Simulation mit Techniken der Interprozess-Kommunikation miteinander verbunden. Der Simulator sendet über diese Kommunikationsschnittstelle kontinuierlich Zustandsänderungen des Simulationsmodells an das Visualisierungssystem, so dass dieses ständig aktualisiert werden kann. Darüber hinaus können sich nach dem Prinzip der Client/Server Architektur mehrere Workstations an einen Modell-Server anmelden, den aktuellen Zustand des virtuellen Modells laden und wiederum auch grafisch darstellen. Auf diese Weise kann man über das Internet mit jedem Rechner, der über die entsprechende Client-Software verfügt, einen Modellierungsvorgang verfolgen, womit ein erster Schritt des *Real Reality* Konzepts in Richtung eines Tele-Modellersystems realisiert ist.

Die Kombination von realen mit virtuellen Modellen macht vor allem dann Sinn, wenn Realmodelle innerhalb eines Anwendungsgebiets Bestandteil der zugehörigen Methodik sind. Dieses trifft beispielsweise auf die Bereiche Ausbildung, Planung und kreatives Entwerfen zu, wobei Realmodelle in vielen verschiedenen Formen und Ausprägungen als Mittel zur Visualisierung, Kommunikation oder auch als Ersatz für echte Anlagen und Systeme eingesetzt werden. In der beruflichen Ausbildung werden – häufig auch aus Kostengründen – Nachbildungen von Maschinen, Robotern und anderen Einrichtungen genutzt, um die Bedienung und die Funktionsweise der Realsysteme zu unterrichten. Für viele solcher Systeme gibt es auch computerbasierte Simulationssysteme, mit denen ihre Funktionsweise demonstriert und auch weitergehende Lernziele, wie z.B. das Programmieren von Steuerungen, erlernt werden können. Die physikalischen Modellanlagen und die rechnergestützten Simulatoren existieren in der Praxis jedoch nur nebeneinander, so dass der Bezug zwischen dem, was mit dem Simulator, und dem, was mit dem Modell gemacht wird, nur schwer hergestellt werden kann. Diese Grenze aufzuheben, war das Ziel eines weiteren *Real Reality* Projektes.

Dabei ging es um den Aufbau, die Analyse und die Simulation von pneumatischen Schaltungen, die im Pneumatik-Unterricht an einer Schalttafel erstellt werden. So wie es das *Real Reality* Prinzip vorsieht, werden die Schaltelemente aus einem Pneumatikbaukasten entnommen, auf die Schalttafel gesteckt und mit Schläuchen verbunden, so dass ein pneumatischer funktionaler Regelkreis entsteht (Abb. 8). Da die Verschaltung über den Datenhandschuh gleichzeitig an den Computer übermittelt wird, entsteht simultan ein virtuelles pneumatisches Modell.

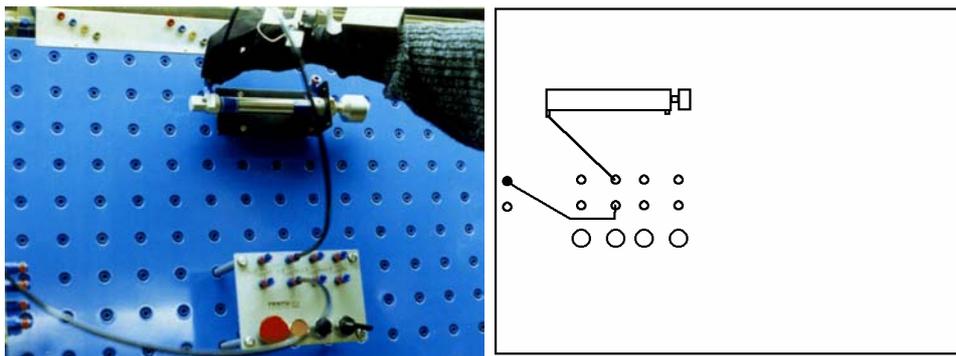


Abb. 8 Aufbau eines pneumatischen Schaltkreises als Realmodell und als Rechnermodell

Dieses Modell kann, ebenso wie das Realmodell, in Betrieb genommen werden. Besonders interessant dabei ist, dass eine Überprüfung stattfinden kann, ob das digitale Modell sich tatsächlich so verhält wie das reale, das an Druckluft angeschlossen wird und bei dem sich mechanische Schalter, Ventile und Kolben bewegen.

Die bisherigen Erfahrungen mit dem *Real Reality* System zeigen, dass die Einbindung bzw. der Erhalt der Dimension der Gegenständlichkeit, also das Arbeiten mit realen Modellbausteinen, sowohl von den Benutzern als auch vom Fachpublikum, dem es auf diversen Veranstaltungen präsentiert wurde, positiv aufgenommen wird. Gerade das, was in VR-Umgebungen wegen des fehlenden physikalischen Widerstands zu Problemen führt, nämlich das Greifen und Manipulieren von Objekten sowie die Fixierung auf den Computer, wird durch den Umgang mit Realmodellen vermieden. Die Modellelemente werden wie gewohnt gegriffen, bewegt, manipuliert und wieder abgesetzt. Der gesamte Vorgang der Modellerstellung kann gemeinschaftlich mit mehreren Personen, die sich gegenseitig ergänzen, Ideen einbringen oder Kritik äußern können, erfolgen. Damit bietet *Real Reality* nicht nur eine alternative Eingabeschnittstelle zum Computer, sondern darüber hinaus ein Kommunikationsmedium für mehrere Benutzer, das mit einem Rechner gekoppelt ist. Dieser kann Protokollfunktionen übernehmen, wertet die Eingaben aus und erstellt ein virtuelles Modell. Dieses kann, die vielseitigen Fähigkeiten des Rechners nutzend, analysiert, simuliert,

visualisiert und archiviert werden. Damit stehen für ein und dieselbe Aufgabe völlig verschiedene Perspektiven auf eine Problematik zur Verfügung. Je nach persönlicher Präferenz und abhängig von der jeweiligen Zielsetzung, kann eine dieser Perspektiven zum Verständnis einer Problemsituation herangezogen werden.

Ein weiterer Schritt war, für die Planung von Produktionsanlagen nicht nur das Layout und lokale Steuerungsfunktionen einzelner Maschinen zu unterstützen, sondern darüber hinaus auch die Produktionslogistik mit dem Zusammenspiel der beteiligten Komponenten in ein *Real Reality* Modell abzubilden. Dies bedeutet, dass die logische Verknüpfung zwischen den einzelnen Komponenten erkannt wird und das konkrete Schaltverhalten an Abzweigungen oder Kreuzungen spezifiziert werden muss. Nach heutigem Stand der Technik ist dafür die Programmierung von Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) in spezialisierten Sprachen notwendig. Wir wollen diesen Vorgang vereinfachen, indem die Möglichkeiten des Vormachens anhand von Realmodellen noch erweitert werden. Die Überprüfung der generierten SPS-Programme kann dann wiederum sowohl am Realmodell, welches für diesen Zweck mit Motoren, Sensoren und Aktoren ausgestattet wird, oder mit einem Simulator am Computer erfolgen. Da es eine direkte Kopplung zwischen dem Simulationssystem und der 3D-Grafikausgabe gibt, wird eine realitätsnahe Wiedergabe des Prozessmodells am Bildschirm erreicht. Diese kann durch Realität angereichert werden, insbesondere dann, wenn in Gruppen gemeinschaftlich an einem Modell gearbeitet wird.

2.2.2 Ansätze der Mischung

In den frühen 90er-Jahren konzentrierten sich Multimediaprojekte auf Interaktivität, Virtualität, Visualisierung und Simulation. Jedoch gingen einige Projekte weiter und folgten dem Weg „Back to the Real World“. Dazu gehörten

- MIT-MediLab's Tangible Projects, <http://tangible.www.media.mit.edu/>
- ETH Zürich's BUILD-IT Projekt, <http://www.ifap.bepr.ethz.ch/>
- Artec's RUGAMS Projekt, <http://www.artec.uni-bremen.de/field1/>

Verschiedene Anstrengungen wurden unternommen um die Gegenständlichkeit der Modellierung zu erhöhen. Eine Hauptströmung war Virtual Reality. Über neue Interface-Techniken wie Datenhandschuh und Datenhelm (head mounted display) wurde angestrebt, ein direkteres Gefühl der virtuellen Welt und ihrer Objekte zu bekommen. Die Nutzer versuchten in die Welt einzutauchen (Barfield & Furness 1995, Anderson 1998, Burdea & Coiffet, Sherman & Craig 2002). Eine andere Richtung war Augmented Reality, in der versucht wurde, die Sicht des Nutzers von der realen Welt mit computer-generierten Bildern zu

mischen (Feiner et al., 1993, Milgram et al. 1995, Ohta & Tamura, 1999). Fitzmaurice et al. (1995), Ishii (1997) und Suzuki und Kato (1995) gingen weiter, indem sie explizit den Gegenständen der externen Welt eine Schnittstellenfunktion zur Rechnerwelt zuwies. Mit realen Griffen, *Handles*, konnten virtuelle Objekte manipuliert werden.

Unser eigener Ansatz unterschied sich davon, indem wir in dem Projekt RUGAMS (Rechnergestützte Übergänge zwischen gegenständlichen und abstrakten Modellen produktionstechnischer Systeme) die Möglichkeit des Wanderns zwischen den Welten anstrebten, geboren aus dem Wunsch, die Modellierung der Produktion zu verbessern. Über einen Datenhandschuh wurden Gesten und Operationen auf realen Transportsystem-Modellen erkannt und so ein virtuelles Modell synchron zum realen aufgebaut. Je nach Fokus kann nun von angereicherter Realität oder angereicherter Virtualität gesprochen werden.

Das Ziel des Projektes war es, die Machbarkeit und den Vorteil einer neuartigen Entwicklungsumgebung in der Produktionstechnik zu zeigen. Ausgehend von Zwillingobjekten mit einer Realkomponente und einem virtuellen Modell, konnten über eine grifforientierte Benutzungsschnittstelle reale und virtuelle Phänomene in der Richtung Realität->Virtualität gekoppelt werden. In ersten Ansätzen war es damit möglich, nicht nur die geometrische Struktur einer Anlage zu spezifizieren, sondern auch ihr Verhalten. Über automatisch generierte Petri-Netze, einer abstrakten Beschreibung von Automatenverhalten, konnten Verhaltensfragmente zu einem Steuer-Programm montiert werden, das dann eine Simulation oder in einer Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) eine Realanlage oder physikalische Modellanlage (Abb. 9) steuerte. Der Vorteil einer derartigen Vorgehensweise für eine partizipative Systemgestaltung war offensichtlich. Aber auch für das Lernen in und mit automatisierungstechnischen Prozessen zeigten sich interessante Perspektiven auf.

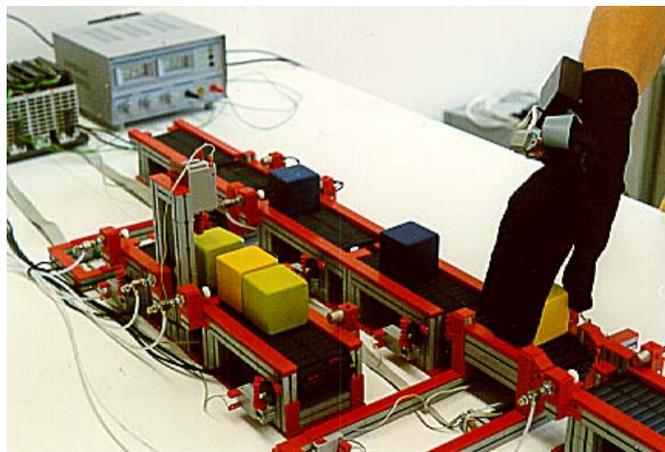


Abb. 9: Steuerung eines Realmodells mit einer SPS

Im DFG-Projekt EUGABE wurde versucht, diese Mischung realer und virtueller Perspektiven für den Pneumatikunterricht in beruflichen Schulen zu nutzen. Jedes Pneumatikelement hatte wie bereits im Projekt RUGAMS eine reale und eine virtuelle Komponente. Jedoch war das Problem ungleich komplexer, da es darum ging, über die sensorisierten Hände nicht nur die Positionierung von starren Komponenten, wie Zylinder und Ventile, sondern auch die Anschlüsse und Verbindungen von Druckluft-Schläuchen zu erkennen. Bei der kompakten Bauweise von Ventilen mit zum Teil sehr dicht liegenden Anschlüssen stieß die Erkennungstechnik über Datenhandschuhe an ihre Grenzen. Mit einem verkabelten Datenhandschuh sensorisierte Hände erwiesen sich aus praktischen Gründen als ungeeignet für den pädagogischen Einsatz. Trotzdem kann prognostiziert werden, dass eine in naher Zukunft zu erwartende Technik mit feiner Fingererkennung diesen Ansatz wieder aufleben lassen wird.

Im EU-Projekt *BREVIE – Bridging Reality and Virtuality with a graspable User Interface* wurde für dasselbe Themengebiet Pneumatik der Weg beschritten, nicht die Handbewegungen zu erkennen, sondern über eine fest installierte Camera die fixierten Positionen von Elementen und ihrer Verbindungen. Eine Pneumatik-Schaltung hatte immer dann einen definierten Zustand, wenn für ein kurzes Zeitintervall keine Veränderungen mehr vorgenommen wurde. Auf diese Weise konnte eine virtuelle Repräsentation auf abstrakt symbolischer und anschaulich dreidimensionaler Ebene nachgeführt werden, Abb. 9 und 10. Das pädagogische Ziel dieses Ansatzes war es,

- das Verständnis theoretischer und praktischer Beziehungen und Abhängigkeiten in mechatronischen Systemen zu erhöhen
- die Handlungskompetenz in elektropneumatischen Problemsituationen zu bilden
- die Kommunikation zwischen Facharbeitern, Ingenieuren und Nutzern über komplexe Systeme zu verbessern.

Diese Ziele wurden angenähert durch eine neue intuitive Nutzungsschnittstelle, die den Lernprozess in der beruflichen Bildung durch die Unterstützung eines handlungsorientierten Vorgehens, sozialorientierter verbaler und nicht-verbaler Kommunikation und dem Verstehen physikalischer Phänomene durch wörtlich genommenes Begreifen flexibler und individualisierbarer machten. Damit war die Erwartung verbunden, dass die Einsicht in Zusammenhänge zwischen konkret-realen und abstrakt-virtuellen Strukturen die Entwicklung angemessener mentaler Modelle für die Handhabung komplexer technischer Systeme fördern würde.

Eine vergleichende Evaluation unterschiedlicher Lernszenarien mit unterschiedlichem Medieneinsatz ergab eher bescheidene quantitative Aussagen über spezifische Lernerfolge. Dies lag einerseits an der Breite des Problemfeldes, andererseits an dem hohen Entwicklungscharakter des Projektes, der zu Prototypen führte, die noch nicht ausreichend stabil waren. Jedoch waren die qualitativen Eindrücke ermunternd und zeigten einen sinnvollen Raum weiterer Entwicklungen auf.

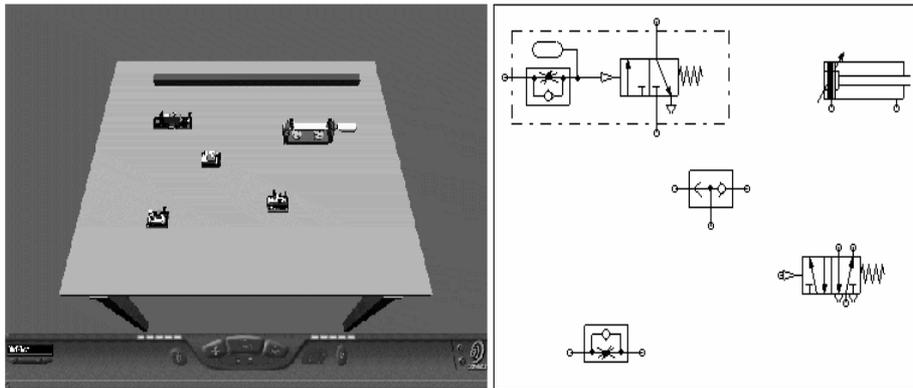


Abb. 10: Verschiedene Abstraktionen einer Pneumatikschaltung

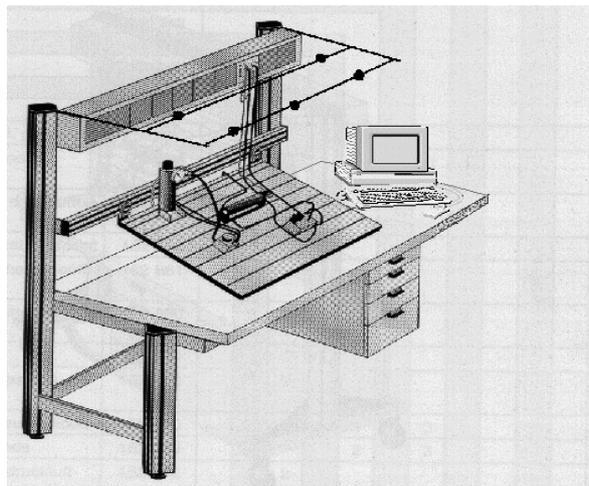


Abb. 11: Lernumgebung in BREVIE



Abb. 12: Evaluation der Lernumgebung

DERIVE – Distributed Real and Virtual Learning-Environment for Mechatronics and Tele-service

Während BREVIE auf einer unidirektionalen Verbindung zwischen realer und virtueller Welt beruhte, die es erlaubte, die virtuelle Welt von der realen Schaltung aus zu konstruieren und zu kontrollieren, nicht aber umgekehrt, wurde dieses Konzept in DERIVE erweitert. Über bidirektionale Kopplungen konnte nun von der Realität auf die Virtualität und umgekehrt zugegriffen werden. Zur Realisierung dieser Lösung führten wir zwei neue Konzepte ein: **Complex Objects** und **Hyper-Bonds**.

2.2.3 Komplexe Objekte und Hyper-Bonds als Basistechnik für Mixed Reality

Mixed Reality verlangt eine flexible Kopplung zwischen Phänomenen der realen Rechneraußenwelt und verschiedenen Informationen, die durch den Rechner repräsentiert werden. Dieses kann dadurch erfolgen, dass Informationen in die Realität projiziert und realen Phänomenen überlagert werden (siehe Augmented Reality Forschung: Weiser 1993, Wellner 1993), dass reale Phänomene als Benutzungsoberfläche für die Manipulation von Daten benutzt werden (Graspable User Interface Forschung: Fitzmaurice et al 1995) oder dass beide Welten bi-direktional verbunden sind (Ishii & Ullmer 1997, Brave et al 1998). Der Fokus unserer Arbeit liegt auf dem letzteren Ansatz. Über ein verallgemeinertes technisches Prinzip können physikalisch-technische Anlagen mit ihren virtuellen Repräsentationen, funktionalen Fortsetzungen oder Ergänzungen in der Rechnerinnenwelt verbunden werden. In früheren Arbeiten haben wir das Konzept komplexer Objekte vorgestellt (Bruns 2000). Darunter sind Objekte zu verstehen, die einen realen konkreten Teil haben, der mit verschiedenen virtuellen Repräsentationen durch eine Griff- oder Bilderkennung verbunden ist, Abb. 13. Die vielversprechende Anwendung dieses Konzeptes in verschiedenen Lernumgebungen konnte in einigen Schulen demonstriert werden (Grund & Grote 2000). Auch von anderen Autoren existieren Untersuchungen, die darauf hindeuten, dass ein konstruktivistisches Lernen auf der Basis konkreter Objekte viele Vorteile gegenüber rein virtuellen Lerngegenständen in Simulationen hat (Brereton & McGarry 2000).

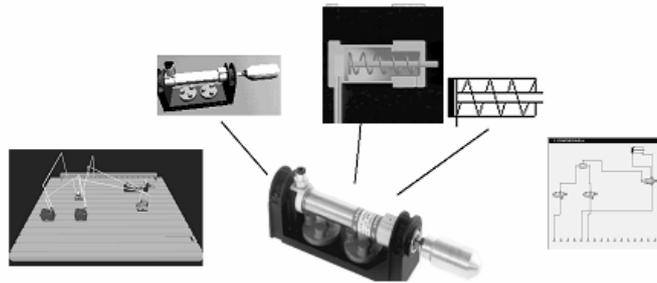


Abb. 13: Komplexes Objekt (Pneumatikzylinder)

Diese Kopplung war zunächst unidirektional, sodass nur die Möglichkeit bestand, ein reales System aufzubauen und synchron dazu automatisch ein virtuelles zu erzeugen, das dem ersten funktional entspricht. Es konnten dann Simulationen am virtuellen Model ausgeführt und studiert werden und mit dem Verhalten des Realsystems verglichen werden. Die erste Erweiterung dieses Konzeptes war ein bi-direktionaler Pneumatik-Link zwischen dem realen und virtuellen System, der es ermöglichte alle relevanten Druckluftphänomene über eine Schlauch-Verbindung zu erfassen (Sensorik) und zu erzeugen (Aktorik) (Bruns & Gathmann 1999), Abb. 14.

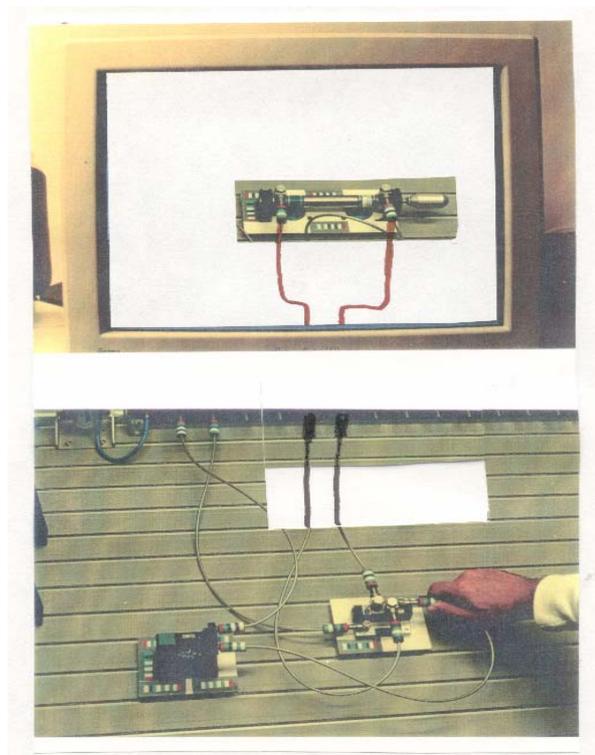


Abb. 14: Verbindung realer und virtueller Pneumatik

Das Konzept kann verallgemeinert und auf weitere physikalische Phänomene ausgeweitet werden: Hydraulik, Elektrik, Mechanik, Thermodynamik. Als vereinheitlichendes theoretisches Konzept eignet sich die Theorie der Bond-Graphen (Paynter 1961, Karnopp 1995). *Hyper-Bonds* verbinden diese vereinheitlichte Beschreibung abstrakter Systeme mit Hilfe von Bond-Graphen mit deren technischer Implementierung durch *Hyper-Verbindungen*. Hyper-Verbindungen sind flexibel handhabbare Schnittstellen zwischen physikalischen Phänomenen der Rechner-Außenwelt und logischen Strukturen der Rechner-Innenwelt. Um diese flexiblen Schnittstellen zu realisieren muss ein Mechanismus vorhanden sein, der alle relevanten Phänomene erzeugen und messen kann. Die Theorie der Bond-Graphen betrachtet Systeme aus der Perspektive eines kontinuierlichen Leistungsflusses. Leistung fließt durch Systemkomponenten und Verbindungen nach dem Kontinuitätsprinzip: das Produkt von Antrieb (effort) und Fluss (flow) folgt typischen Energieerhaltungs- und Energieflussgesetzen.

Hyperbonds können mit einem Mechatronik-Baukasten aus Sensoren und Aktoren für die relevanten Phänomene realisiert werden. Abb. 15 zeigt die Realisierung der obigen Ideen-Skizze für das Gebiet der Elektro-pneumatik. Ein realer Druckluftschlauch vom realen Ventil kommend wird über die Hyperbondleiste im Virtuellen fortgesetzt und treibt dort einen virtuellen Zylinder. Die Richtung ist auch umkehrbar, sodass ein virtuelles Ventil einen realen Zylinder treiben kann.

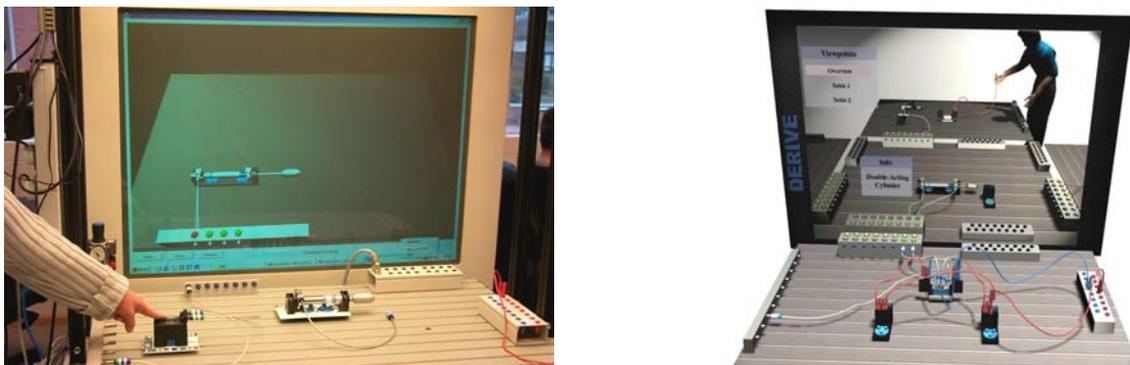


Abb. 15: Hyberbonds in Aktion

Es sei noch einmal hervorgehoben, dass unser Ansatz nicht nur die geometrischen Eigenschaften der realen Objekte mit denen der virtuellen koppelt, sondern auch deren interne Strukturen und deren äußeres Verhalten. Durch diese bidirektionale Kopplung ist es möglich, dass die Realität die Virtualität steuert und umgekehrt. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für das handlungsorientierte Lernen. Der Ansatz bietet ein breites Kontinuum medialer Unterstützung des Lernprozesses und erlaubt somit eine angemessene, den individuellen und

kulturellen Besonderheiten angepasste Vorgehensweise. Lernende, die die Erkundung und Erschließung neuer Wissensgebiete mit konkreten, greifbaren Objektmanipulationen beginnen wollen, mögen dies tun und von diesem Start zu abstrakteren Stufen, symbolischen Repräsentationen oder virtuellen illusionären Objekten vordringen. Lernende, die abstraktes Denken gewohnt sind und bevorzugen, mögen mit symbolischen Repräsentationen beginnen und zu konkreten Anwendungen fortschreiten. Unser komplexer Bau- und Werkzeugkasten erlaubt dem Lehrenden und dem Lernenden die Wahl des geeigneten Mediums.

In zwei laufenden Projekten [Lab@Future](#) und MARVEL wird diese Perspektive weiter erforscht. [Lab@Future](#) entwickelt Vorstellungen und Prototypen für zukünftige Laborarbeit. MARVEL untersucht weitere Einsatzmöglichkeiten der Mixed Reality Technik im Tele-Service.

In diesen Projekten erweitern wir Milgram & Colquhoun's (1999) Mixed Reality Taxonomy, indem wir die folgenden Dimensionen verwenden

- Fokus der Aufmerksamkeit zwischen Realität und Virtualität
- Zentriertheit als Ort unserer Erfahrung, als Wahrnehmung und Handlung
- Direktheit des Aktion-Reaktion Regelkreises

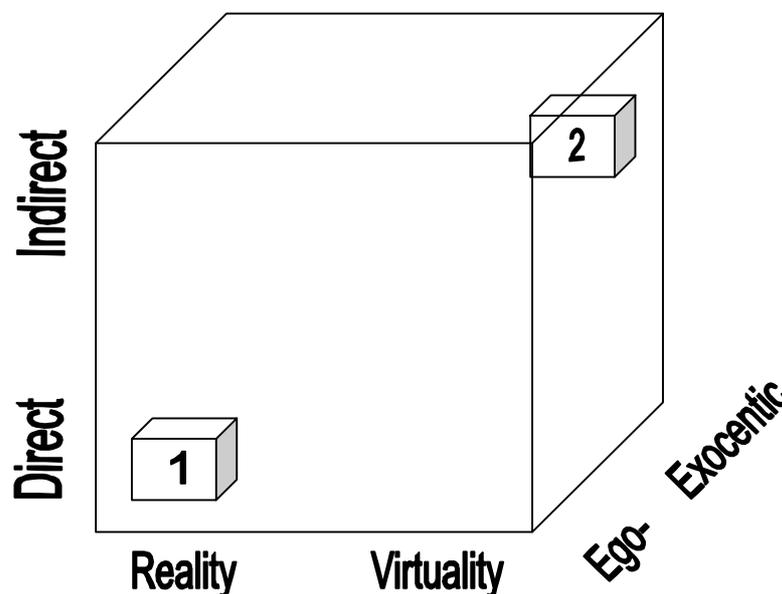


Abb. 16: Taxonomie Mixed Reality (Fokus, Kontrolle, Ort)

Die Zentriertheit ist egozentrisch, wenn wir VR oder RR sehen, hören und fühlen, als wären wir im Zentrum der Welt. Exzentrisch ist die Sicht, wenn wir VR und RR aus einer distanzierten Perspektive sehen, sei sie räumlich oder abstrakt.

Direktheit ist die Art der Abbildung der Nutzersteueraktionen auf die Projektions-Reaktionen des Systems (optisch, haptisch, akustisch). Wenn eine Kette vermittelnder Techniken oder „Manipulanda“ (Milgram) wie Maus, Joystick, Steuerrad, Datenhandschuh involviert ist, ist die Direktheit reduziert. Auch die Reaktionszeit des Systems hat einen Einfluss, wenn sie zunimmt, nimmt die Direktheit ab. Ein anderer Einfluss auf Direktheit ist die Übertragungsfunktion, die Steuerungsordnung. Ordnung Null beschreibt eine Eins-zu-Eins Abbildung zwischen physikalischen Phänomenen, die für die Steuerung verwendet werden, und deren virtueller Einfluss (Ort->Ort, Geschwindigkeit->Geschwindigkeit, Kraft->Kraft). Ordnung Eins ist weniger direkt, die Eingabe wird durch eine Abbildungsfunktion der Integration oder Differentiation transformiert bevor sie auf das System angewendet wird (Geschwindigkeit->Ort, Kraft->Geschwindigkeit). Kontrolle zweiter Ordnung ist noch indirekter.

Diese Taxonomie kann helfen, verschiedene Systeme und ihre sinnvolle Nutzung einzuordnen. Die Lernumgebung BREVIE unterstützt verschiedene Nutzungsarten:

- Arbeit mit realen Komponenten - Verwendung der virtuellen Modelle nur um ein besseres Verständnis des Realproblems zu erhalten und zu übersichtlichen und optimalen Lösungen desselben zu gelangen. Der Fokus ist also auf Realität, die Kontrolle ist direkt und der Nutzer ist in einer egozentrischen oder exozentrischen Position, je nach seiner Distanz zur Anlage, (1).
- Arbeit mit virtuellen Komponenten (FluidSim) – reale Modelle werden nur verwendet um ein besseres Verständnis der abstrakten Schaltungszusammenhänge zu bekommen. Der Fokus ist auf Virtualität, die Kontrolle ist indirekt über Maus, die Erfahrung ist exozentrisch mit der Möglichkeit sehr abstrakter Sichten, (2).
- Flexibles Wechseln der Perspektive (VirtualConstructionKit) mit der Möglichkeit der egozentrischen Erfahrung im Realen oder Virtuellen und direkten Kontrolle der Virtuellen Welt über reale Gegenstände.

[Lab@Future](#) spannt den vollen Raum der Modalitäten auf. Wir können die Lernmedien aus der Ferne nutzen und mit virtuellen Repräsentationen arbeiten, ein Feedback nur über die Kamerabilder erhaltend (Fokus auf Virtualität, ego- und exozentrisch, indirekte Kontrolle) oder wir können das Labor lokal nutzen in Realitätsorientierung, egozentrisch und direkt kontrolliert.

Unsere Erweiterung der Taxonomie von Milgram hat einige Vorteile für eine Arbeits- und Lernerorientierte Forschung und Entwicklung. Wir können Fragen stellen, die fruchtbar für weitere empirische Studien sind, wie: Was sind exozentrische Projektionen von Ton, Kraft,

Geruch? Welchen Beitrag können sie zur Erkenntnisgewinnung leisten? Wie können sie in abstrahierter Form verwendet werden?

3. Mixed Reality in Arbeit und Spiel

Das Gebiet der Produktionstechnik erfordert eine zunehmende Mischung verschiedenster Qualifikationen: Wissen und Erfahrung über physikalische und materielle Prozesse, logische und algorithmische Steuermechanismen, soziale und organisatorische Strukturen. Es sind also Lern- und Arbeitsumgebung anzustreben, die die Entwicklung dieser gemischten Qualifikationen unterstützen. Isoliertes Lernen, gefördert durch konventionelle Multimediatechnik, die Trennung von Theorie und Praxis in Unterricht und Übung, die strikte Trennung von Berufsschule und Arbeitsplatz könnten mit *Mixed Reality* überwunden werden. Simulation und die *Illusion of Life* spielen m.E. eine zunehmende Rolle in einer Gesellschaft, die durch Computertechnik und Konsum bestimmt ist. Deshalb gewinnt auch die Fähigkeit, zwischen Realität und Fiktion unterscheiden zu können, an Bedeutung. Simulationen werden oft als Ersatz von Realität in Unterhaltung, Ausbildung und Arbeitsplanungen akzeptiert. Man könnte erwarten, dass die Fähigkeit des Urteils über die Angemessenheit von Simulationsmodellen nur in begrenzten Gebieten und für Experten relevant ist, wie in Prozesssimulation, Kriegs-Simulationen, Klimavorhersagen. Wir nehmen dagegen an, dass in Zukunft diese Urteilsfähigkeit eine notwendige Kompetenz für jeden Bürger sein wird, damit er mit veränderten Nahrungsmitteln, nano-technischen Produkten, genetisch veränderten Objekten, Vorhersagen und Berichte aus fernen Umgebungen kritisch umgehen kann. Ein wichtiges Ziel der Pädagogik läge dann in der Entwicklung von Urteilskraft über das Verhältnis von Original und Repräsentation, Realität und Simulation. Eigentlich ist dies ein altes allgemeines Bildungsziel, gewinnt aber an Aktualität durch die zunehmende Mediatisierung unserer Umgebung und die einfache Manipulierbarkeit digitaler Repräsentationen. Die Unterscheidung zwischen Wunsch und Wirklichkeit, interner Repräsentation und Außenwelt ist ein früh beginnender und permanenter Entwicklungsprozess. Das kindliche Spiel hat hierbei eine große Bedeutung (Piaget 1974). Wir sehen deshalb ein interessantes Gebiet in dem Versuch, Brücken zwischen Spiel- und Arbeitswelten, zwischen Spiel- und Werkzeugen zu bauen, also auch in diesem Sinne eine gemischte Realität herzustellen.

Grundprinzipien dieser Trennung werden in der frühen Kindheit gelernt, wenn der Sinn für das Reale entwickeln und Wünsche und Träume gezügelt bzw. verarbeitet werden. Diese

Trennung findet sich mehr oder weniger in jedem Curriculum von Schulunterricht und Laborarbeit. Aber dieser Punkt ist selten Gegenstand einer systematischen Betrachtung. Wenn die Entwicklung von theoretischer und praktischer Vernunft für jede Bildung wichtig ist, kann in *Mixed Reality* eine Möglichkeit gesehen werden, mit Spiel- und Werkzeugen diese Entwicklung zu fördern.

Lernen in Mixed Reality wird ein Forschungsgegenstand für sich.

Eine Mischung von Realität und Virtualität, lokalen und entfernten Spiel- und Werkzeugen, macht es möglich, zu vergleichen und zu ergänzen:

- Ausrüstungen, Geräte, Umgebungen von Laboren und Arbeitsplätzen
- Lerngruppen und ihre verschiedenen Perspektiven, Träume und Realitäten
- kulturelle Äußerungen, Theater, Mythologien

In einem geplanten Vorhaben *Ubiquitous Access to Toys and Tools of Tomorrow* (AuToTom) soll die innovationsförderliche Beziehung zwischen Realität und Virtualität unterstützt werden, indem ein freies Wechseln zwischen diesen Welten leicht gemacht wird. Es ist geplant, Szenarien und Medien zu entwickeln, die diese Übergänge für verschiedene Altersstufen fördern. Vier Beispiele seien kurz vorgestellt.

Szenario 1: Kraft und Energie auf der Ebene des Spiels

Lernende bauen ein virtuelles mechanisches System, in dem sie Prinzipien der Energieerzeugung durch menschliche Kraftanwendung, der Speicherung, der Umwandlung und der Übertragung anwenden. Dann bauen sie sukzessive Teile des Systems in der Realität und verbinden beide Subsysteme mit Hyper-Bonds. Sie sind dann in der Lage, ein reales Force-Feedback Handrad zu drehen und damit eine virtuelle Masse auf ein bestimmtes Niveau zu heben. Mit dieser gespeicherten Energie können sie nun virtuelle oder reale Objekte antreiben. Die zu lösenden Aufgaben sind auf einem spielerisch lustvollem Niveau, ähnlich den Aufgaben des bekannten Konstruktionsspiels „The incredible Machine“ von Sierra, jedoch stellt der physikalische Hintergrund realistische Verbindungen zur realen Welt her, Abb. 17). Studierende können selbst die Ähnlichkeit von Modell und Original erfahren und beurteilen. Kraft und Energie können in ihrem Fluss durch Realität und Virtualität untersucht werden. Das Szenario kann in Richtung eines Multi-User Spieles erweitert werden, wenn zwei Studierende an verschiedenen Orten sitzen und über Hyper-Bonds an eine verteilte virtuelle Welt gekoppelt sind, in der sie ein Kräfteressen oder Geschicklichkeitsspiel veranstalten. Impuls und Drehmomente können benutzt werden um ein kleines Fahrzeug über ein kraft-rückgekoppeltes Lenkrad (Force-Feedback) zu steuern. Dies würde Übergänge zu den komplexeren Szenarien 3 und 4 eröffnen. Studenten können aber auch mit einem realen mechanischen System beginnen und dann sukzessive zu einem virtuellen Modell mit immer mehr Komplexität übergehen, die sich so nicht im Labor realisieren ließe, wie in dem unten gezeigten Beispiel des Formel-Eins Rennwagens. Im Prinzip soll es möglich sein, ein reales Gerät zu bauen und es in einem virtuellen Kontext als funktionale Fortsetzung oder Duplikat zusammen mit anderen Lernenden im Spiel, Wettbewerb oder kooperativ zu nutzen.

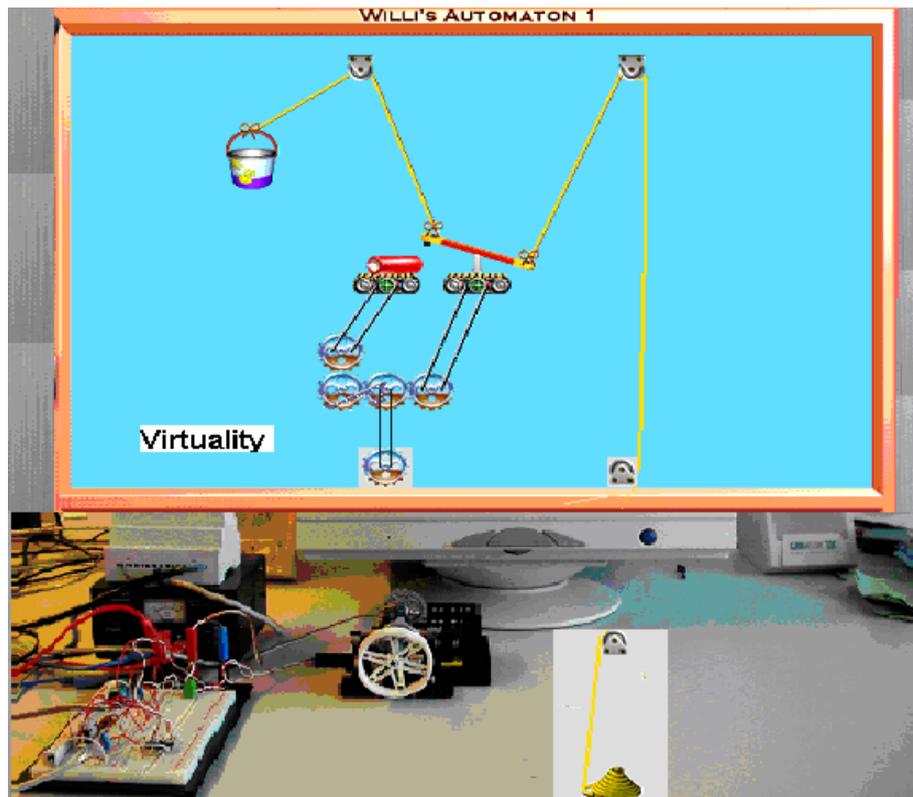


Abb. 17: Vom virtuellen Spielzeug zum *Mixed Reality* Spielzeug

Szenario 2: Kraft und Energie auf Werkzeug-Ebene

Mit Industriekomponenten eines Mechatronik-Baukastens können Studenten experimentieren und Grundprinzipien und Mechanismen der Energieerzeugung, -wandlung, des Transports und der Nutzung kennen lernen, wie einen elektrisch angetriebenen Kompressor zur Erzeugung von Druckluft, mit der mechanische Geräte gesteuert und angetrieben werden. Sie können kleine elektro-pneumatische Systeme bauen und die Beziehung zwischen Druck und Kraft, Reibung und Wärme kennen lernen, Abb. 18. Die Beziehung zwischen Masse, Kraft und Beschleunigung kann an realen Objekten, wie einem Roboterarm, der eine Montageaufgabe löst, studiert werden. Dies kann sowohl in Realität als auch in Virtualität erfolgen, sodass eine Vielfalt von Perspektiven und über das Internet einbeziehbare Ressourcen verfügbar werden. Gesetze der Energieerzeugung, der Übertragung und des Verlustes, der Umwandlung und Speicherung können so in konkreter Weise studiert werden und gleichzeitig Wege zur Abstraktion beschriftet werden, auf denen Ähnlichkeiten und Analogien erkannt werden, wie sie in der Bond-Graphen-Theorie deutlich werden.

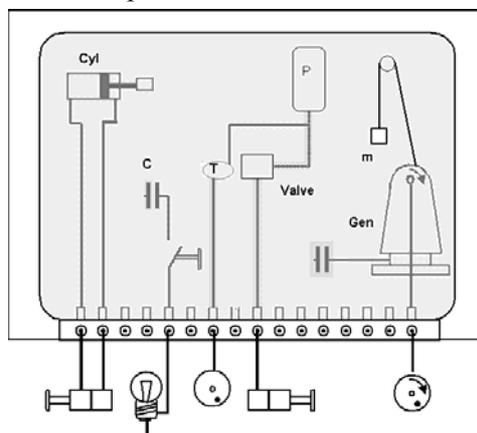


Abb. 18: Mock-Up eines Mixed Reality Toolkits

Das Szenario könnte erweitert werden bis zu einer Ebene wie in Abb. 19 dargestellt, hier noch als Fiktion. Ein Student baut sein eigenes Feder-Dämpfer-System auf dem Labortisch für ein Fahrzeug, das er dann in einem virtuellen Autorennen mit dieser Dynamik testet. Abgesehen von derzeit etwas hohen Echtzeitanforderungen wäre dieses Szenario mit Hyper-Bonds möglich. Während des Rennens würde also der Student die reale Aktion und Reaktion seines Feder-Dämpfer-Systems auf dem Tisch erleben können und das Fahrverhalten im Virtuellen im wahrsten Sinne des Wortes „erfahren“. Während des Rennens könnten Lernende im Wettbewerb mit anderen ihre Feder-Dämpfer Lösung den aktuellen Umgebungsbedingungen anpassen und über ein Fein-Tuning versuchen, ihre Leistungen zu steigern. (Das umgekehrte Szenario: Fahren eines realen Rennautos mit einer computer-simulierten Feder-Dämpfer-Anlage, die über Hyper-Bonds das reale Geschehen steuert, wäre vorerst besser nicht zu versuchen)



Abb. 19: Mock-Up: reales Feder-Dämpfer-System auf dem Labortisch und virtueller Rennwagen

Szenario 3: Information and Steuerung auf Spielzeug Niveau

Studenten bauen eine virtuelle Roboter Plattform mit zwei Motoren, die über an/aus Schalter die Plattform bewegen. Sie versuchen, die Motoren so zu steuern, dass die Plattform einem vorgegeben Pfad folgt. Dann bauen sie eine entsprechende reale Plattform und verbinden sie über Hyper-Bonds kreuzweise mit dem virtuellen System. Nun ist es möglich, das reale Fahrzeug über virtuelle Schalter und das virtuelle Fahrzeug über reale Schalter zu steuern. Dies wird verbunden mit einer ersten Reflektion über das Verhältnis von Information, Steuerung, Energieantrieb. Die Studenten können mit dieser Mischung aus realer und virtueller Welt experimentieren. Sie können lokal oder verteilt arbeiten, sie können versuchen, bei der Aufgabe zu kooperieren, indem jeder Student nur einen Motor kontrolliert. Dies würde zu einem der aktuellsten Forschungsgebiete im Mixed Reality Bereich führen: „Welche Formen der Kooperation von Avataren werden wie realisiert?“ (vergleiche das bekannte Referenzproblem der beiden virtuellen Pianoträger mit Force-Feedback Kontakt).

Dieses Szenario könnte dann in Richtung komplexeren Verhaltens erweitert werden unter Verwendung von Kontrollalgorithmen, Aktoren und Sensoren wie sie von Caprani (2002) in den Lego-Tieren verwendet werden (LegoRobotLab).

Szenario 4: Information und Steuerung auf Werkzeug-Niveau

Studenten bauen ein virtuelles Automatisierungssystem auf der Basis elektro-pneumatischer Komponenten. Die Kontrolle des Systems erfolgt durch Logik. Der Steueralgorithmus läuft in einem Simulator, der einen industriellen Steuerrechner, eine Speicherprogrammierbare Steuerung SPS, simuliert. Das in standardisiertem IEC-Code geschriebene Steuerprogramm wird von dem Simulator interpretiert und entsprechende Steuersignale werden an den simulierten Prozess geleitet. Der Steuersimulator erhält seine Eingangssignale von dem simulierten Prozess. Das komplexe System kann beliebig auf Realität und Virtualität verteilt werden. Signal- und Energieflüsse werden unterbrochen und je nach Systemgrenze an virtuelle oder reale Komponenten mit Hilfe von Hyper-Bonds umgeleitet, Abb. 20. Dieses Szenario eröffnet neuartige Perspektiven für die Aus- und Weiterbildung von Instandhaltern, Mechatronikern, Tele-Arbeitern. Das Denken in Entwurfsalternativen, ein zentrales Thema für Mechatroniker, also die Frage danach, welches Prinzip wird für die Steuerung, welches für die Arbeitsebene verwendet wird, wird experimentierbar. Auch in diesem Lernszenario können unterschiedliche Lernpfade verfolgt werden: vom Konkreten zum Abstrakten oder umgekehrt.



Abb. 20: Modulares Produktionssystem (MPS) von Festo

4. Erfahrungsorientiertes Arbeiten und Lernen mit Mixed Reality

Die pädagogische Diskussion über Lerntheorien und didaktische Methoden hat einige fruchtbare aber auch verwirrende Impulse aus der Informatik und der Kognitionswissenschaft erhalten, die manchmal den Fokus der Betrachtung stark auf rationale Erkenntnis oder informations-theoretische Modelle konzentrierten. Siehe dazu Brahler & Johnson (1999), Gerstenmaier & Mandl (1995), Mandl et al (1995), Riedl (1998), Urhahne et al (2000). Wir wollen diese Verkürzung vermeiden und eine breitere Sicht des Lernprozesses anstreben. Es ist für Ingenieure und Softwareentwickler nicht selbstverständlich, was unter Pädagogen allgemeine Zustimmung findet, dass Lehr- und Lernpraxis und deren Unterstützung durch Medien nicht in einer direkten Weise aus philosophisch-soziologischen und lerntheoretischen Grundpositionen abgeleitet werden kann, dass aber diese Grundlagen helfen können, Erfahrungen zu systematisieren und zu ordnen und zur Schärfung des Blickes bei der Bewertung von Handlungsorientierungen beitragen können. Die *Theorie des kommunikativen Handelns* von Habermas (1981) liefert einen solchen theoretischen Hintergrund, der geeignet ist, kognitionsorientierte Theorien zu erweitern und zu bereichern. Dies gilt auch für berufspädagogische und arbeitsprozessbezogene Praxis.

Je stärker Lernmedien aus komplexer Software bestehen, desto wichtiger scheint mir einerseits eine formale Spezifikation und Betrachtung derselben, andererseits aber auch der Blick auf die nicht-formalen Umgangsformen und Wirkungen dieser Medien. Bildung hätte also zum Ziel: Qualifikation für das Erstere und Kompetenz für das darüber hinaus gehende. Kompetenzentwicklung wird allgemein als umfassender angesehen, als die Qualifikation für bestimmte formale Methoden, für eine Arbeitsaufgabe oder für ein Arbeitsgebiet. Sie ist Persönlichkeitsbildung in einem breiten Sinne. Kompetenz ist die Fähigkeit des Individuums in einer verantwortungsvollen Weise privat, gesellschaftlich und in beruflichen Situationen zu handeln. Sie ist nützlich für den Arbeitsmarkt, aber nicht nur. Qualifikation dagegen wird gesehen im Licht einer spezifischen Nützlichkeit, privat, beruflich oder sozial. Sie ist eng verbunden mit der Fähigkeit, Probleme lösen zu können. Bader (2000) unterscheidet drei Kategorien beruflicher Handlungskompetenz: sachorientiert, sozial und personal und drei Querkategorien methodisch, kommunikativ und lernen. Daraus können Kompetenzgruppen abgeleitet werden, die bei der Betrachtung von Lernprozessen und Lernmedien hilfreich sind:

- Methodenkompetenz im Sachgebiet (z.B. Sehen und Erkennen von Ursache-Wirkungsbeziehungen)
- Methodenkompetenz in sozialen Handlungen (z.B. Organisation von Gruppenarbeit, Moderation)
- Methodenkompetenz in persönlichen Dingen (z.B. Methode der Traumdeutung)

Kommunikationskompetenz in Sachfragen (z.B. Beherrschung bestimmter technischer Fachsprachen)
Kommunikationskompetenz in sozialen Fragen (z.B. Umgang mit Konflikten)
Kommunikationskompetenz in persönlichen Fragen (z.B. Sprechen über persönliche Themen)

Lernkompetenz in der Sache (z.B. Lernen aus Fehlern und Erfolgen)
Lernkompetenz im Sozialen (z.B. aus Gesprächen mit anderen lernen)
Lernkompetenz im Persönlichen (z.B. aus Beschäftigung mit sich selbst lernen, Abstraktionsfähigkeit)

Sachkompetenz ist dabei die Fähigkeit, Probleme und Aufgaben in selbständiger Weise, angemessen, normorientiert, methodisch, und kreativ zu lösen. Sie schließt logisches, analytisches, konstruktives, abstrahierendes und integrierendes Denken und Erkennen von System- und Prozesszusammenhängen ein. Sie erfordert Planung, Prüfung und Bewertung.

Sozialkompetenz ist die Fähigkeit, mit anderen umzugehen. Sie zeigt sich im Umgang mit Kunden, Arbeit im Team, im Umgang mit Konflikten, in Solidarität und sozialer Verantwortung. *Personalkompetenz* soll hier als *Selbstkompetenz*, auch unter der angestrebten Perspektive subjektivierenden Arbeitshandelns, eine etwas andere Bedeutung erhalten. Sie ist die Fähigkeit, mit sich selbst umzugehen, rational und träumerisch. Sie zeigt sich in der Fähigkeit, sich mit der eigenen Entwicklung zu beschäftigen, über Beziehungen zur Familie, zum Beruf, zu Freunden, über Vergangenheit und Zukunft nachzudenken. Sie enthält Selbstkritikfähigkeit, Selbstvertrauen, die Fähigkeit Unsicherheit und Ambivalenz zu ertragen, Zuverlässigkeit, Verantwortung, Wertevorstellungen.

Berufliches Schul- und Ausbildungswesen soll auf komplexe Arbeits- und Handlungssituationen vorbereiten. Dabei stellt sich die Frage, wie organisatorisch, didaktisch und curricular mit den Dualitäten Fächerung/Ganzheitlichkeit, Theorie/Praxis, Grundbildung/Fachbildung, Allgemeines/Berufliches, Lernen/Arbeiten umzugehen ist (vgl. Lipsmeier 2000). Mit einer Strukturierung der Lehrpläne an beruflichen Schulen nach Lernfeldern, die aus beruflichen Handlungsfeldern abgeleitet sind (Baader 2000), zeigt sich zwar eine Tendenz zur Ganzheitlichkeit und zur Arbeitsprozess-/Situationsorientierung, dieses bedeutet aber keine Abkehr von fachsystematischen Ansätzen. Vielmehr bleibt nach wie vor der Anspruch, das dialektische Verhältnis von Fachsystematik und Situationsorientierung konkret auszufüllen (Lipsmeier 2002) und dieser Anspruch wird länderspezifisch behandelt. „Lernfelder sind durch Zielformulierung, Inhalte und Zeitrichtwerte beschriebene thematische Einheiten, die an beruflichen Aufgabenstellungen und Handlungsabläufen orientiert sind“ (Lernfeld-Konzept der KMK, 9.5.96)

Bezogen auf Medienentwicklung kann ein Rahmencurriculum dazu dienen, unterschiedlich Einsatzkonzepte aus vielperspektivischer Sicht zu prüfen. Zu fragen ist dann, welchen Beitrag ein Medium in einem Lernfeld zur Entwicklung gewünschter Kompetenzen leisten kann.

Jedes Lernfeld zusammen mit den Medien könnte dann so gestaltet werden, dass sie objektive, soziale und persönliche Kompetenzen fördert. Ein geeignete Startmenge von Lernfeldern für gewerblich-technische Ausbildung ist der Rahmenlehrplan Mechatronik der KMK. Es zeigt sich dann sehr schnell, dass ein weites Feld der Gestaltung entsteht und einige Lernfelder für bestimmte Kompetenzentwicklungen besser und für andere nicht so geeignet sind.

Lernfelder Technik, angelehnt an den Mechatronik Rahmenlehrplan, aber erweitert

1. Analyse funktionaler Abhängigkeiten
2. Herstellung mechanischer Subsysteme
3. Installation elektrischer Komponenten
4. Untersuchung von Energie und Informationsfluss
5. Kommunikation über und durch IT-Medien
6. Planung und Organisation von Arbeit
7. Bau einfacher technischer Komponenten
8. Entwurf und Bau technischer Systeme
9. Untersuchung des Informations- und Energieflusses in komplexen Systemen
10. Planung der Montage und Demontage
11. Inbetriebnahme, Fehlersuche und Reparatur
12. Vorbeugende Instandhaltung
13. Übergabe an Nutzer
14. Reflektion über Technik-Umwelt-Mensch

Es könnten nun Details spezifischer Kompetenzen und dafür unterstützende Szenarien und Medien entwickelt werden. Wir entscheiden uns für einen intuitiveren Weg, indem wir, diese Kategorien im Bewusstsein, typische Fallbeispiele entwickeln, von denen wir annehmen, dass sie hilfreich sind.

Beispiel

Lernfeld *Kommunikation über und durch IT-Medien* kann folgende Bezüge haben

zur Fachkompetenz: Wissen über Fakten und Zusammenhänge, Fähigkeit der Operation und Reflektion darüber (methodisch), Austausch über und durch Medientechnik in Fachbegriffen (kommunikativ), Nachdenken über Leistung-Risiko-Sicherheit, Neugier (lernen)

zur Sozialkompetenz: planen, ausführen, kontrollieren von Medien in einer beteiligungsorientierten Weise (methodisch), handeln und kommunizieren in einer Gruppe (kommunikativ), Reflektion über den sozialen Prozess in Rechnergestützter Kooperation *Computer Supported Cooperative Work* (lernen)

zur Selbstkompetenz: Selbstbeobachtung, private Kommunikation durch Medien, Reflektionen über die Wirkungen von Technik auf eigenes Verhalten

Einige Aspekte bezüglich Methode, Kommunikation und Lernen sollen vertieft werden.

In Lernumgebungen für Technikunterricht benötigen wir spezielle Methoden um mit komplexen Zusammenhängen umzugehen, spezielle formale Sprachen und spezielle Zugangsweisen, die uns ein kontinuierliches Lernen ermöglichen.

Die Verwendung schematischer Darstellungen hat eine lange Tradition in den

Ingenieurwissenschaften und sie wird von Lehrenden benutzt um Prinzipien des Entwurfs und der Implementierung von Lösungen für Aufgabenstellungen zu zeigen. Vier Gebiete, in denen diese schematischen Darstellungen sehr verbreitet sind, sind Mechatronik, Elektronik, Pneumatik, Hydraulik. Die Verwendung dieser Schemata erlaubt es den Ingenieuren, Lehrern und Lernenden eine konkrete Lösung in einer eindeutigen abstrakten Form zu präsentieren. Es ist häufig der Fall, dass diese abstrakten Schemazeichnungen wenig Ähnlichkeit mit ihren realweltlichen Entsprechungen haben. Schemata verlangen eine hohe Abstraktionsfähigkeit, da sie erstens statisch sind, also vor dem inneren Auge des Lernenden zum „Leben“ erweckt werden müssen, und zweitens wenig anschaulich sind. Abstraktionsfähigkeit ist ein wichtiges Bildungsziel. Demgegenüber hat die Verwendung von Simulatoren in der Ausbildung eine Reihe anderer Vorteile. Der Lernende ist nicht den Gefahren der Realität ausgesetzt, er kann einen großen Bereich von Möglichkeiten schnell und leicht erkunden. Simulatoren sind sehr viel billiger und erreichbar als Realkomponenten und das Experimentieren mit ihnen kann sehr viel selbst- und gruppenbestimmter erfolgen, als die Einweisung in eine Realanlage. Ein weiterer Vorteil von Computersimulationen ist die Tendenz bei jungen Lernenden, Freude an computergestützten Ansätzen zu haben und diese Begeisterung unterstützt den Lernprozess. Es soll hier nicht die alte Kontroverse Lernen an der Realmaschine – Lernen am Simulator wiederholt werden. Es zeigt sich inzwischen deutlich, dass beide Medien ihre Vorteile haben und dass die Lösung in der Kombination liegt.

Eine wichtige Forderung in der technischen Bildung ist es, Erfahrungen mit realen Arbeitsumgebungen zu machen. Betriebe suchen Studenten, die nicht nur Theorien kennen, sondern auch Arbeitserfahrungen mit neuen Systemen haben. Viele Schulen und Universitäten haben nicht die Möglichkeit, sich neueste technische Anlagen anzuschaffen und reale Arbeitsumgebungen damit herzustellen oder gar eine Vielfalt von Alternativen anzubieten. Es ist deshalb ein verlockendes Ziel, eine Technik zu entwickeln, die es Schulen erlaubt, Zugang zu realen Arbeitserfahrungen zu bekommen und diese mit einer Vielfalt von Simulationen und Theoriebildung zu verbinden. In den Projekten *Lab@Future* und *Toys and Tools of Tomorrow* streben wir diese Entwicklung für breite mechatronische Anwendungen an. Studenten können Betrieb und Fehlerdiagnose komplexer Systeme im Kontext realer Anwendungen lernen. Ressourcen sollen ökonomisch und handhabbar in einem Pool von Schulen, Betrieben und Universitäten genutzt werden. Mehr noch, es wird angestrebt, diesen Prozess der wechselseitigen Bereicherung von Original und Model schon in früher Kindheit im Umgang mit Spielzeugen in einer Weise zu unterstützen, die den Transfer begünstigt. Diese neue Lernumgebung kann Schulen darin unterstützen, Kurse in technischer Bildung zu

entwickeln und zu vertreiben. Die Unterstützung des Lernprozesses erfolgt in einer graduellen Entwicklung von lokal konkreten über lokal virtuellen zu entfernt konkreten Systemteilen, die die Lernenden dort abholt wo sie stehen. Tele-kooperative Funktionalität erlaubt es Firmen, Trainings-Ausrüstung von Schulen, Herstellern und Universitäten zu benutzen. Sie erlaubt es darüber hinaus, diese Weiterbildung nicht in isolierter Form, sondern als verteilte Gruppenarbeit zu organisieren. Damit wird Weiterbildung nicht nur zu einer individuellen Aufgabe, sondern unterstützt eine Verflechtung von Betrieben hin zu virtuellen Unternehmen oder besser zu gemischten Unternehmen.

Wir erwarten, dass eine *Mixed Reality* Lernumgebung

1. das theoretische Wissen und die Handlungskompetenz bezüglich komplexer Systeme
2. die Kompetenz, komplexe Systeme mit IT-Werkzeugen in Kooperation mit anderen zu warten und zu betreiben
3. die Fähigkeit der Kooperation zwischen Menschen unterschiedlichen Kultur- und Technik Hintergrundes

verbessern wird. Im pädagogischen Konzept folgen wir den drei Hauptprinzipien: Vielfalt von Abstraktion, Modalität und Lokalität, die auf kontinuierliches, globales Lernen und vielfältige Fertigkeiten (multi-skilling) ausgerichtet sind.

Didaktische Prinzipien	Kognitives Wissen	Handlungsfähigkeit	Sozialfähigkeit	Szenario
1. Lernen auf verschiedenen Ebenen der Abstraktion (Komponente, Maschine, Fabrik)	Wissen über Struktur, Form, Verhalten, Funktion	Fähigkeit zu bauen und zu reparieren	Fähigkeit in global sozialem Kontext zu handeln	
2. Lernen auf verschiedenen Ebenen der Modalität (gegenständlich, bildlich, symbolisch)	Wissen über verschiedene Symbolsysteme und Übersetzungen	Fähigkeit aufgabenangemessen zwischen Repräsentationsarten zu wechseln	Fähigkeit sich auf fremde Symbolsysteme einzulassen	
Lernen auf verschiedenen Ebenen der Direktheit und Örtlichkeit (lokal, remote)	Wissen über Vernetzung	Fähigkeit rechnergestützte Kooperationssysteme zu nutzen	Fähigkeit im Team zu kooperieren	

5. Lernen in vielfältigen Umgebungen

Die Theorie der kognitiven Flexibilität und das Hypermedia Design Model (Spiro 1998) nennen als zentralen Grund für das Versagen vieler Instruktionssysteme, sie seien zu einfach und wohl-strukturiert. Die *Cognitive Flexibility Theory* konzentriert sich auf das Lernen in schlecht-strukturierten, schwach definierten Situationen, wie sie typisch für Situationen des täglichen Lebens sind. Die Theorie beschäftigt sich hauptsächlich mit der Frage, wie Lernende ihr Wissen aus einer Initialsituation heraus darüber hinaus transferieren. Flexible Lernumgebungen sind nötig, damit die Lernenden kognitive Flexibilität lernen. Diese Lernumgebungen müssen es erlauben, dasselbe Wissenselement auf verschiedene Weise und für verschiedene Zwecke zu lernen und zu präsentieren. Brahler & Johnson (1999) unterscheiden in diesem Zusammenhang auch verschiedene individuelle Lernstile:

Sprachlich: effektiver Gebrauch von Worten, Spaß am Lesen, Wortspiele, schreiben
Logisch-mathematisch: konzeptuelles und abstraktes Denken, Muster und Strukturen sehen, Spaß Schlussfolgern, Rechnen, Logik-Spiele, Puzzle
Körperlich-kinästhetisch: Bewegungsfreudig, Kommunikation durch Körpersprache
Visuell-Räumlich: Denken in Begriffen des physikalischen Raumes, Freude am Zeichnen, Lernen durch Zeichnungen und Bilder
Musisch: zeigen Sensibilität für Rhythmus und Ton, lernen mit Musik im Hintergrund
Interpersönlich: Freude an der Interaktion mit anderen, lernen in Gruppen
Intrapersönlich: Zurückhaltung gegenüber anderen, im Einklang mit ihren persönlichen Gefühlen, lernen in unabhängigen Studien und Introspektion

Eine bestimmtes Medium möge angemessen sein, den bevorzugten Lernstil zu unterstützen, andererseits kann es auch von Vorteil sein, gerade Medien komplementär zu nutzen, also den nicht-bevorzugten Stil zu unterstützen. Diese Argumente für eine Vielfalt der Medien, die selektierbar und anpassbar eingesetzt werden können, haben uns bewogen, an einer Sammlung von Erweiterten Komplexen Objekten (ECO) zu arbeiten, die zusammen mit Richtlinien und Fallbeispielen für individuelle Lernarrangements zur Verfügung stehen sollen. Erweiterte komplexe Objekte haben **mehrere** reale und virtuelle Repräsentationen einer abstrakten Struktur oder Funktionalität und sind deshalb besonders geeignet für die Unterstützung verschiedener Lernstile und Lehrkonzepte. Sie sollen das Lernen mit Kopf, Herz und Hand unterstützen und eine Grundlage für die Öffnung des Lernprozesses von der Schule hin zum realen Leben bilden. Rechnergestütztes Lernen kann dann nicht nur das

Experiment im Labor unterstützen, sondern auch Projektarbeit, mit der Möglichkeit von Einzelfällen auf allgemeine Prinzipien zu schließen und aus allgemeinen Prinzipien spezielle praktische Anwendungen abzuleiten. ECO als Brücke zwischen Spiel- und Arbeitswelten, realen und virtuellen, konkreten und abstrakten Welten sollen diesem Bedürfnis entgegenkommen.

Verschiedene Lerntheorien mit alten Wurzeln können einen Beitrag zu viel-perspektivischem Lernen leisten und neue Aspekte erhellen:

Situated cognition hat seine Wurzeln bei Piaget und wurde weiterentwickelt von Greeno & Moore (1993). Aufschnaiter & Welzel (1999) untersuchten 10 Ebenen der Komplexität kognitiver Prozesse im Physikverständnis und analysieren wie atomare Bedeutungselemente benutzt werden um Konzepte und kognitive Strukturen zu entwickeln. Die Forschungsgruppe Physikdidaktik der Universität Bremen konzentriert sich auf diesen Formationsprozess und wie Lernen durch Analogienutzung unterstützt werden kann.

Die *Aktivitätstheorie* hat Wurzeln bei Leont'ev (1978) und wurde von Engeström (1999) weiterentwickelt, der Arbeits-Lernprozesse, die Zone der nächsten Entwicklung, die Rolle von Double Binds und das Expansive Learning in einem starken Gesellschaftsbezug hervorhebt.

Psychodynamische Lerntheorien des Unbewussten haben Wurzeln in Melanie Klein und wurden von Bion (1962) weiterentwickelt, der Lernen aus Erfahrung als einen emotionalen Prozess untersuchte. Unser Ziel ist es, diese Theorien auf den Prozess des Lernens mit Spiel- und Werkzeugen anzuwenden.

Obwohl es verschiedene Forschungsprogramme und Projekte gibt, die multimodale und multisensorische Mensch-Computerschnittstellen zum Gegenstand haben (Badique 2001, Klinker et al 2002), fehlt eine systematische pädagogische Forschung und ein vereinheitlichtes technisches Konzept zur Mischung virtueller und realer Welten. Wir wollen zur Verringerung dieser Lücke durch das Konzept der Hyper-Bonds und der erweiterten komplexen Objekte beitragen.

6. Perspektiven für die betriebliche Weiterbildung

Betriebliche und private Weiterbildung verlangt nach selbstbestimmtem, effektivem Zugang zu Wissensbeständen. Ein zentrales Thema in der Europäischen Lehr- und Lernmittelforschung ist der allgegenwärtige, unbeschränkte Zugriff zu Lernmedien (Ubiquitous Access to learning resources, siehe 6. EU Forschungsprogramm – Technology Enhanced Learning).

Reale Arbeitssituationen verhindern normalerweise den offenen Fernzugriff von außen auf den Arbeitsplatz zu Lernzwecken. Umgekehrt ist dieses dagegen sehr erwünscht, damit on-the-Job Training möglich wird. Es könnte für betrieblich Weiterbildung eine herausfordernde Gelegenheit sein, diese Verbindung auch in die andere Richtung zu öffnen: für den Zugriff von außen auf den Arbeitsplatz. Verschiedene Betriebe bieten so etwas wie eine permanente offene Betriebsbesichtigung an. Mit einer *Mixed Reality* Technik wäre es möglich, diese Besuche im Virtuellen stattfinden zu lassen und einen kontrollierten Realitätszugriff zu gestatten. Dies wäre dann so etwas wie der permanente Tag der offenen Tür aber bei Erhalt des realen produktionstechnischen Kontextes. Dies würde eine interessante Perspektive für kontinuierliches Lernen in formalen, nicht-formalen und informellen Strukturen. Erpenbeck & Sauer (2000) weisen auf die Problematik hin, dass die Hinwendung zur betrieblichen Weiterbildung die Lage von Arbeitslosen noch problematischer macht, dass also neue Formen des Lernens im sozialen Umfeld gesucht werden sollten. Sie fordern deshalb

„Nur eine Lernkultur,

- die sich auf die Gesamtheit der möglichen Lernumgebungen – mit den Schwerpunkten Arbeitsprozess und soziales Umfeld – konzentriert und dem non-formellen und informellen Lernen den ihnen zukommenden Stellenwert einräumt,
- Lernprodukten wie dem impliziten („hidden“, „tacit“) (Nonaka & Takeuchi, 1997) und dem wertbeladenen Wissen, insbesondere dem Erfahrungswissen, eine hohe Bedeutung zumisst, und
- Selbstgesteuerte und vor allem selbstorganisierte Lernprozesse hinreichend berücksichtigt,

kann die Brücke zwischen Innovation, Entwicklung und Lernen schlagen.“ (S. 296)

Kontinuierlicher allgegenwärtiger Zugang zu gemischter Realität setzt die Lösung verschiedener Probleme bezüglich privater und öffentlicher Sicherheit (security und safety) voraus. Dies erfordert die Beherrschung von Synchronisationsproblemen, Qualitätsgarantie von Kommunikationsdiensten, persönliche und virtuelle Präsenz, spürbare Kollaboration in virtuellen Räumen, Mobilitäts- und Tragbarkeitsanforderungen aber auch das allgegenwärtige Erkennen von Personen und Objekten durch elektronische Systeme. Dies sind Themen, die ein hohes Maß gesellschaftlicher Reflektion verlangen. Eine weitere Voraussetzung für einen kontinuierlichen Zugriff auf Lernressourcen, die immer umfangreicher und undurchsichtiger werde, ist die Entwicklung semantischer Repräsentationen von Beidem, den Wissensressourcen oder besser Lernmöglichkeiten und den Lernenden, um das Zusammenkommen beider zu unterstützen. Hier sind formale Ansätze, wie die von Anderson

& Lebiere (1998) mit ACT-R (einem einheitlichen formalen Model menschlichen Wissens und seiner Aneignung, Anwendung und Weiterentwicklung), Ontologiesprachen und Ontologien gefragt, aber auch kritisch zu hinterfragen.

Lernen am Arbeitsplatz und Lernen im Labor

In den physikalischen Wissenschaften lernen wir das Prinzip des *Schneidens und Freimachens*, ein Prinzip der Untersuchung eines wohldefinierten Weltausschnittes an spezifischen Grenzen mit bestimmaren Randbedingungen, über beobachtbare und messbare Variablen, die eine reduzierte Sicht auf die interne Dynamik eines Ausschnittes und seiner Beziehung zur Umwelt einnehmen. In Laboren nutzen wir diese Technik um reproduzierbare Experimente zu bauen, aber auch mental verwenden wir diese Technik wenn wir in möglichen Zuständen eines Systems denken (wie d'Alembert bei seiner virtuellen Arbeit). Zukünftige Labore, die eine freie Verteilung der Phänomene eines Systems auf Realität und Virtualität erlauben, würden den Vorteil bieten, Arbeitswelt mit Laborwelt verbinden zu können. Wohlbekannte Aspekte könnten in einer formalen Weise repräsentiert und durch Algorithmen realisiert werden. Unbekanntere, unsichere oder informelle Phänomene könnten in der Realität belassen werden, aber verbunden sein mit dem Rest. Mit Hyper-Bonds ist diese Verbindung möglich. Das Prinzip kann auf viele Szenarien physikalisch-technischer Labore angewendet werden. Zum Beispiel kann eine Gruppe Lernender von verschiedenen Orten und Kulturen aus in einer verteilten virtuellen Umgebung zusammenkommen, vertreten von ihren Avataren, und ein gemeinsames Laborexperiment auf einem Experimentiertisch aufbauen oder verschiedene bevorzugte Lösungen zunächst lokal realisieren und sie dann in einen Kommunikations- und Kooperationsprozess einbringen. Die verschiedenen Tische können vollständig in der Virtualität existieren und als Grundlage für Simulationsexperimente dienen, aber sie könnten auch sehr fruchtbar für die Entwicklung handlungsrelevanter mentaler Modelle real erfahren werden. Teilaspekte in Form von Untersystemen, könnten lokal realisiert werden und trotzdem mit dem Gesamtsystem koppelbar sein. Verschiedene Reale und virtuelle Verhalten können so verglichen und bewertet werden. Aspekte von Formalisierung und Abstraktion, Reduktion und Anreicherung, sehr wichtig für IT-Kompetenz, können so behandelt werden. Die Anwendungen können übertragen werden auf allgemeinere Produktionssysteme, Stadtplanung, Ferndiagnose und Instandhaltung, kooperative Gebäudetechnik, umgebende künstliche Intelligenz, umgebendes Wissen und Lernen, Labortische, einzelne Geräte oder ganze Fabriken. Der klassische Turing-Test (Beobachte zwei Verhalten und urteile, welches von einer realen Person und welches von

einer „künstlichen Intelligenz“ stammt) kann als generelles pädagogisches Ziel angesehen werden (Lerne zu unterscheiden technisches Realverhalten und Simulationsverhalten, reale interaktive Gruppen und Gruppen von KI-Agenten, zwischen algorithmisch gesteuerten Bots und menschlich gesteuerten Avataren)

Das Konzept der erweiterten komplexen Objekte erlaubt es, verschiedene reale Objekte als eine Materialisierung ein und derselben technischen Funktion oder eines Strukturprinzips anzusehen. Dies hat Vorteile für die Technikgestaltung und für das Lernen. Es erlaubt das Experimentieren in einem Zyklus von Abstraktion und Konkretion in verschiedenen Kontexten und an verschiedenen Orten.

Lernorte zu verbinden, Theorie und Praxis zusammenzubringen, ist eine alte Forderung im Dualen System der Berufsbildung. Lernortverbund in Verbindung mit allgegenwärtigem kontinuierlichem Lernen verlangt auch Fernkooperation. Diese Forderung gewinnt an Relevanz für sich schnell ändernde Berufe oder Berufe mit hoher Integration. Der Mechatronik-Beruf, als Integration von Elektrik, Elektrotechnik, Mechanik und Informatik hängt stark von der Fähigkeit des Lernenden ab, sich auf unterschiedliche Fachgebiete einzulassen und die dort üblichen Sprach- und Verhaltenskonventionen zu erfassen. Mehr noch als bisher verlangt die Ausbildung für diesen Beruf eine Kooperation der Lehrenden. In dem EU-Projekt DERIVE wurde untersucht, wie sich die co-lokale Kooperation bei der Problemlösung (Abb. 21) verändert, wenn verteilte virtuelle (Abb. 22) und gemischten Lernumgebungen (Abb. 23) verwendet werden.



Abb. 21: Kooperatives Lernen in Realität

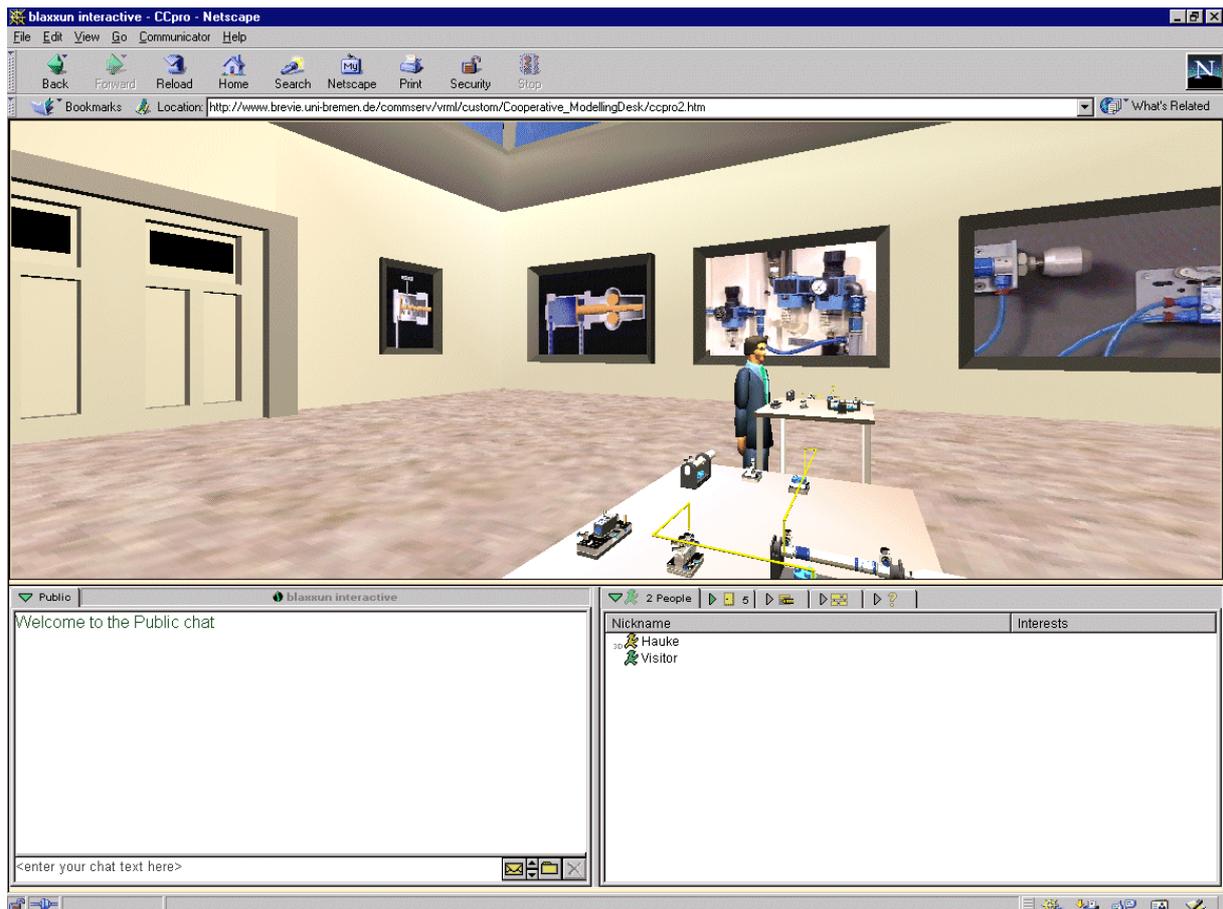


Abb. 22: Verteilte virtuelle Lernumgebung

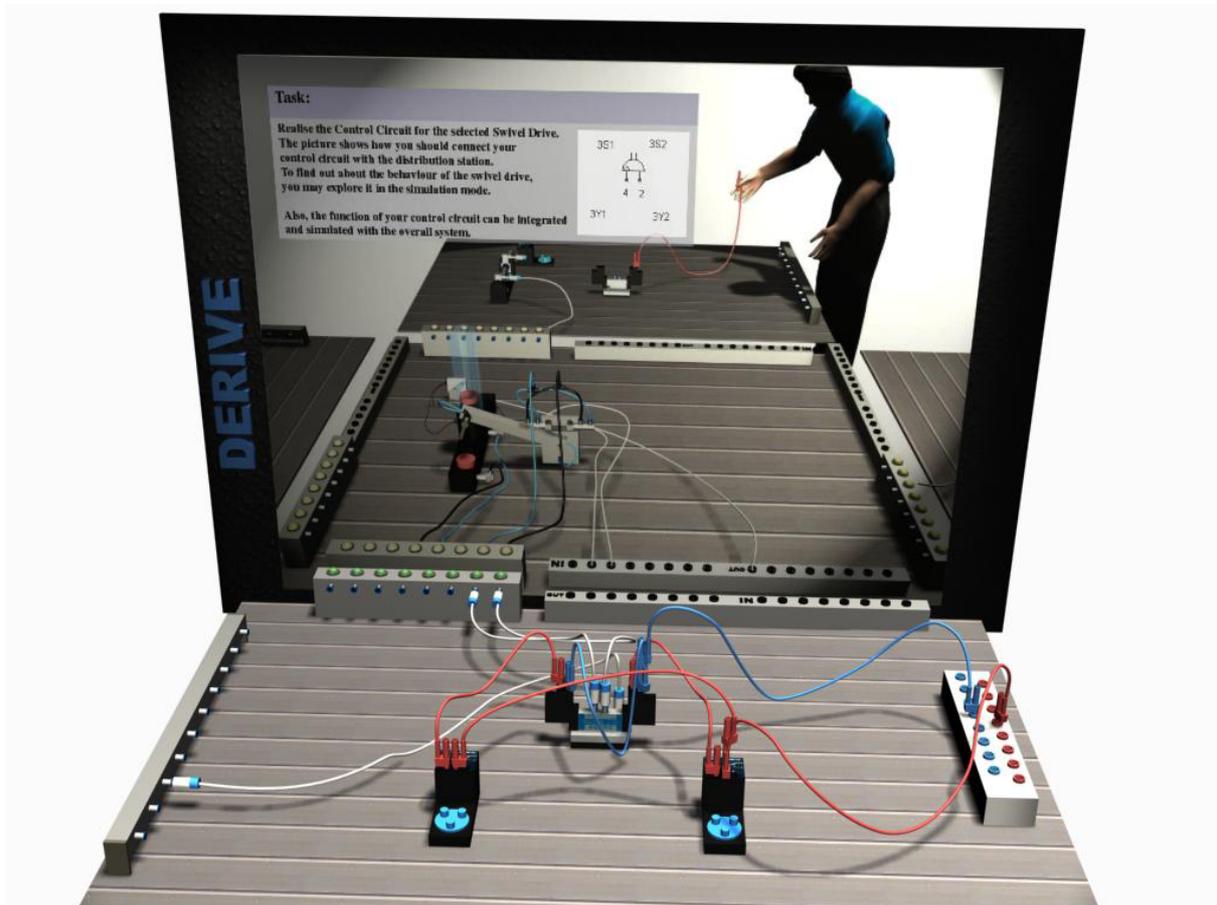


Abb. 23: Kooperatives Lernen in verteilten realen und virtuellen Umgebungen

Die Umgebungen erlauben verschiedene Formen der Kooperation:

Eine lokale Gruppe, um einen Tisch stehend, arbeitet gemeinsam an der Lösung einer Aufgabe in Form einer Realschaltung, hat aber die Möglichkeit, diese Lösung in einen komplexen Kontext zu stellen (Arbeitsituation),

eine Gruppe ist räumlich verteilt und arbeitet an einer gemeinsamen Lösung einer komplexen Aufgabe. Teile oder Aspekte des Systems werden isoliert und delegiert, sodass an komplementären oder vergleichenden Lösungen gearbeitet werden kann, die lokal behandelt aber global veröffentlicht und diskutiert werden können

- a) eine lokale Gruppe, um einen Tisch stehend, arbeitet gemeinsam an der Lösung einer Aufgabe in Form einer Realschaltung, hat aber die Möglichkeit, diese Lösung in einen komplexen Kontext zu stellen (Arbeitsituation)

- b) eine Gruppe ist räumlich verteilt und arbeitet an einer gemeinsamen Lösung einer komplexen Aufgabe. Teile oder Aspekte des Systems werden isoliert und delegiert, sodass an komplementären oder vergleichenden Lösungen gearbeitet werden kann, die lokal behandelt aber global veröffentlicht und diskutiert werden können
- c) Lehrer präsentieren ein System mit Black-Box Komponenten, die von den Lernenden in verteilter Kooperation spezifiziert werden sollen,
- d) Lehrer präsentieren fehlerhafte Systeme und fordern die verteilt Lernenden zu einer gemeinsamen Fehlersuche und –behebung

In Zukunft erwarten wir

- eine Simulationstechnik, die einen hohen Grad von Realitätsnähe ermöglicht, sodass viele Anwendungsbereiche existieren, in denen der Unterschied zwischen Modell und Realität vernachlässigt werden kann, sowohl für Arbeits- als auch für Lernzwecke,
- dass Illusionen von Wirklichkeit nicht mehr beschränkt auf Produktionen von Walt Disney sind, sondern Bestandteil unseres täglichen Lebens werden,
- dass Produktionsprozesse sich verlagern von grober automatenbasierter Materialdestruktion zu konstruktiver Transformation von einzelnen Atomen in Makrostrukturen durch Nano-Technik
- dass Produkte und Prozesse gleichermaßen als Materialisierung von Ideen und als Abstraktion von Handarbeit gesehen werden können.

Die hohe Integration von realen und virtuellen Welten, Original und Repräsentation, lokalen und entfernten Objekten, künstlicher und menschlicher Beratung, wirft Fragen nach Vertrauen und Urteilskraft auf, Angemessenheit von mentalen Modellen über Realität, angemessene Konstruktion, Repräsentation und Präsentation von Wissen.

Literatur

- Anderson, J. R., Lebiere, C. J. (1998). *The Atomic Components of Thought*. Lawrence Erlbaum Associates
- Bader, R. (2000). Konstruieren von Lernfeldern. Eine Handreichung für Rahmenlehrplanausschüsse und Bildungsgangkonferenzen in technischen Berufsfeldern. In: Bader, R., Sloane, P.F.R. (Hrsg): *Lernen in Lernfeldern. Theoretische Analysen und Gestaltungsansätze zum Lernfeldkonzept*. Markt Schwaben, 33-50
- Badique, E. (2001). *Under Construction in Europe: Virtual and Mixed Reality for Rich Media Experience*. In : Balet, Subsol, Torguet (Ed) s.u.
- Balet, O., Subsol, G., Torguet, P. (2001). *Virtual Storytelling – Using Virtual Reality Technology for Storytelling*. Springer Verlag, Berlin
- Barfield, W. & Furness, T. (1995). *Virtual Environments and Advanced Interface Design*, Oxford University Press
- Bion, W. R. (1962): *Learning from Experience*. London: Heinemann
- Böhle, F. & Milkau, B. (1988). *Vom Handrad zum Bildschirm. Eine Untersuchung zur sinnlichen Erfahrung im Arbeitsprozess*. Frankfurt, Campus
- Brahler, C. J., Johnson, E. C. (1999). *Pedagogy: A Primer on Education Theory for Technical Professionals*. Washington State University, USA
- Brauer, V. (1996). *Simulation Model Design in Physical Environments*. *Computer Graphics* Vol 30, Nr. 4, 55-56, ACM Siggraph
- Brave, S., Ishii, H., Dahley, A. (1998). *Tangible Interfaces for remote Collaboration and Communication*. *Proc. Of CSCW '98*, Nov. 14-18
- Brereton, M., McGarry, B. (2000). *An Observational Study of How Objects Support Engineering Design Thinking and Communication: Implications for the design of tangible media*. *CHI 2000 Conf. Proceedings*, acm press, 217-224
- Bruns, F. W. (1993). *Zur Rückgewinnung von Sinnlichkeit - Eine neue Form des Umgangs mit Rechnern*. *Technische Rundschau* Heft 29/30, 14-18
- Bruns, F. W. (1996). *Grasping, Communicating, Understanding - Connecting Reality and Virtuality*. *AI & Society*, 10: 6-14
- Bruns, F. W. (2000). *Rechnergestützte Übergänge zwischen gegenständlichen und abstrakten Modellen produktionstechnischer Systeme (RUGAMS)*, IFA Institut für Farbranlagen (Ed.): *Abschlusskolloquium zum DFG-Schwerpunktprogramm „Modellierung der Produktion“*, 7.-8. 3. 2000, Universität Hannover, E2-6,1-4, ISBN 3-00-006281
- Bruns, F. W., Heimbucher, A., Müller, D. (1993). *Ansätze einer erfahrungsorientierten Gestaltung von Rechnersystemen für die Produktion*. *artec-Paper* 21, Bremen

- Bruns, F. W., Brauer, V. (1996). Greifendes und begreifendes Modellieren im Realen und Virtuellen. 7. GI-Workshop „Hypermedia und KI“. Hannover, Nov. 95
- Bruns, F. W., Brauer, V. (1996). Bridging the Gap between Real and Virtual Modeling - A New Approach to Human-Computer Interaction. 2. IFIP 5.10 Workshop on Virtual Prototyping, Arlington, Texas (artec Paper Nr. 46, Universität Bremen)
- Bruns, F.W., Hornecker, E., Robben, B., Rügge, I. (1997). Vom Bildschirm zum Handrad – Compute(be)nutzung nach der Desktop-Metapher. Workshop-Dokumentation. Artec-paper 59. Universität Bremen
- Bruns, F. W. (1999). Complex Construction Kits for Coupled Real and Virtual Engineering Workspaces. CoBuild '99
- Bruns, F. W., Gathmann, H. (1999). Auto-erecting Agents for a collaborative Learning Environment. Proc. of 8th IEEE Int. Workshops on Enabling Technologies: Infrastructures for Collaborative Enterprises, June 16-18, Stanford, 287-288
- Burdea, G., Coiffet, P. (1994). Virtual Reality Technology. Wiley-Interscience
- Caprani, O, Fredslund, Ilsoe, Jacobsen, Kramhoeft, Lunding and Wahlberg (2003). Evolution of Computer Bugs – an Interdisciplinary Team Work. In: K. H. Madsen: Production Methods: Behind the Scenes of Virtual Inhabited 3D Worlds. Springer, London
- Cellier, E. F., Elmqvist, H., Otter, M. (1995). Modeling from Physical Principle. In W. S. Levine (Ed): The Control Handbook, CRC Press, Boca Raton, 1995, 99-108
- Churchill, E. F., Snowdon, D. N., Munro, A. J. (2001). Collaborative Virtual Environments. Springer Verlag
- Engeström, Y. (1999): Lernen durch Expansion. BdWi-Verlag, Marburg
- Erpenbeck, J., Sauer, J. (2000). Das Forschungs- und Entwicklungsprogramm „Lernkultur Kompetenzentwicklung“. In: Arbeitsgemeinschaft QUEM (Hg.). Kompetenzentwicklung 2000 - Lernen im Wandel – Wandel durch Lernen, Waxmann Verlag, Münster, 289-335
- Feiner, MacIntyre, Haupt & Solomon (1993). Windows on the World: 2D Windows for 3D Augmented Reality. Proc. ACM Symp. on User Interface Software and Technology (UIST), Atlanta GA, Oct. 1993, 145-155
- Fishwick, Paul (1995). Simulation Model Design and Execution: Building Digital Worlds. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
- Fitzmaurice, G. W., Ishii, H., Buxton, W. (1995). Bricks: Laying the Foundations for Graspable User Interfaces. CHI'95 Mosaic of Creativity, 442-449

- Gerstenmaier, J. & Mandl, H. (1995). Wissenserwerb unter konstruktivistischer Perspektive. Zeitschrift für Pädagogik, 41, 867-888.
- Gorbet, M. G., Orth, M. (1997). Triangles: A Physical/Digital Construction Kit. Tangible Media Group, MIT
- Greeno, J.G., Moore, J.L. (1993). Situativity and Symbols: Response to Vera and Simon. [Cognitive Science 17](#)(1): 49-59
- Grund, S., Grote, G. (1999). Auswirkungen einer gegenständlich-virtuellen Lernumgebung auf Wissen und Problemlösen. Arbeit - Zeitschrift für Arbeitsforschung, Arbeitsgestaltung und Arbeitspolitik. Heft 3/1999. Wiesbaden. Westdeutscher Verlag, 312-317
- Grund, S., Grote, G. (2001). Integrating Real and Virtual Training Tools via a Graspable Interface in Vocational Training: The Evaluation of a New Training Tool, In: M. J. Smith & G. Salvendy (Ed.): System, Social and Internationalization Design Aspects of Human Computer Interaction, Lawrence Erlbaum Association, London, 2001, 819-823
- Habermas, J. (1981). Theorie des kommunikativen Handelns. Suhrkamp, Frankfurt
- Ishii, H, Ullmer, B. (1997). Tangible Bits: Toward Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms. CHI'97, Atlanta, Georgia
- Ishii, H. (1996): Tangible Media Group Project List. Internet: media.mit.edu
- 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, 1759-1764
- Karnopp, D. C., Margolis, D. L., Rosenberg, R. C. (1990). System Dynamics – A unified Approach. John Wiley, New York
- Kato, H., Billinghamurst, M., Blanding, R., May, R. (1999). ARToolKit PC version 2.11 Human Interface Technology Laboratory, University of Washington, Seattle
<http://www.hitl.washington.edu>
- Klinker, G., Stricker, D., Reiners, D. (1999). Augmented Reality: A Balance Act between High Quality and Real-Time Constraints, In: Y. Ohta and H. Tamura (eds.), Mixed Reality – Merging Real and Virtual Worlds, Proc 1. Int. Symp. on Mixed Reality (ISMR '99), 325-346
- KMK (1998). Rahmenlehrplan für den Ausbildungsberuf Mechatroniker/Mechatronikerin. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 30. Januar 1998, Bekannt gemacht im Bundesanzeiger Nummer 168a
- Lipsmeier, A., Pätzold, G. (2000). Lernfeldorientierung in Theorie und Praxis. Stuttgart

- Lipsmeier, A. (2002). Lernfeldorientierung in Theorie und Praxis. 1/2002
http://www.bildungsverlag1.de/aktuell/lernfelder/handout_lipsmeier.doc, Zugriff
 31.5.03
- Leont'ev, A. N. (1978). Tätigkeit-Bewußtsein-Persönlichkeit. Volk und Wissen, Berlin
- Mandl, H., Gruber, H. & Renkl, A. (1995). Situiertes Lernen in multimedialen Lernumgebungen. In L. J. Issing & P. Klimsa (Hrsg.), Information und Lernen mit Multimedia (S. 167-178). Weinheim: Beltz.
- Milgram, F., Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality and virtual display. IEICE Trans. Inf. & Sys. Vol F77-D, no 12, 1321-1329
- Milgram, Drascic, Grodski, Restogi, Zhai & Zhou (1995). Merging Real and Virtual Worlds. *Proc. of IMAGINA '95*, Monte Carlo, Feb. 1995
- Milgram, F. & Coquhoun, H. (1999). A Taxonomy of Real and Virtual World Display Integration. In: Ohta & Tamura s.u.
- Müller, D. (2001). Simulation und Erfahrung. Dissertation, Universität Bremen
- Ohta, Y., Tamura, H. (1999). Mixed Reality – Merging Real and Virtual Worlds. New-York.
- Paynter, H. M. (1961). Analysis and Design of Engineering Systems, MIT Press, Cambridge, MA
- Piaget, J. (1974). Der Aufbau der Wirklichkeit beim Kinde. Ernst Klett Verlag Stuttgart
- Rauterberg, M., Leonhardt, M., Meier, M. (1997). BUILD-IT: A Computer Vision-Based Interaction Technique of a Planning Tool for Construction and Design. Proc. Of the HCI '97 Conf., San Francisco
- Resnick, M. (1993). Behavior Construction Kits. Communications of the ACM, 36(7), 64-71
- Rekimoto, J. (1998). Multiple-Computer User Interfaces: A Cooperative Environment Consisting of Multiple Digital Devices. In: Streit, N., Konomi, S., Burkhardt, H.-J. (Eds.) Co-Build98, 42-52
- Riedl, A. (1998). Verlaufsuntersuchung eines handlungsorientierten Elektropneumatikunterrichts und Analyse einer Handlungsaufgabe. Dissertation München. Verlag Peter Lang, Frankfurt am Main, <http://www.lrz-muenchen.de/~riedl/k32.htm> (Zugriff 31.5.2003)
- RUGAMS (1995). Rechnergestützte Übergänge zwischen gegenständlichen und abstrakten Modellen produktionstechnischer Systeme. Artec - Universität Bremen
- Scheel, Hacker & Henning (1994). Fabrikorganisation neu beGreifen. Verlag TÜV Rheinland, Köln

- Sherman, W. R., Craig, A. B. (2002). *Understanding Virtual Reality: Interface, Application, and Design*. Morgan Kaufmann
- Spiro, R., Feltowich, P., Coulson, R. (1998). *Cognitive Flexibility Theory*, March 1998, <http://www.gwu.edu/~tip/spiro.html>
- Sutherland, Ivan E. (1965): *The Ultimate Display*, in: Proc. IFIP Congress, Washington, Vol. 1, 508
- Suzuki, H. & Kato H. (1995). *Interaction-Level Support for Collaborative Learning: AlgoBlock - An Open Programming Language*. Proc. of the Computer Supported Collaborative Learning (CSCL) Conf., University of Indiana
- Tachi, S. (1999). *Augmented Telexistence*. In: Ohta, Y., Tamura, H. (1999): *Mixed Reality – Merging Real and Virtual Worlds*. New-York, 251-260
- Thomas, F. & Johnston, O. (1981). *Disney Animation – The Illusion of Life*, Abbeville Press, New York
- Urhahne, D., Prenzel, M., v. Davier, M., Senkbeil, M. & Bleschke, M. (2000). *Computereinsatz im naturwissenschaftlichen Unterricht – Ein Überblick über die pädagogisch-psychologischen Grundlagen und ihre Anwendung*. Zeitschrift für die Didaktik der Naturwissenschaften, 6, 157-186
- von Aufschnaiter, S. , Fischer, H.E., Schwedes, H. (1992): *Kinder konstruieren Welten – Perspektiven einer konstruktivistischen Physikdidaktik*. In: Schmidt, S.J. (Hrsg.). *Kognition und Gesellschaft. Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus 2*. Frankfurt am Main, Suhrkamp, 380-424
- von Aufschnaiter, S. & Welzel, M. (1999): *Individual Learning Processes – a Research Program with Focus on the Complexity of Situated Cognition*. In: Bandiera, M.; Caravita, S.; Torracca, E. & Vicentini, M. (Eds.) *Research in Science in Europe*. Dordrecht: Kluwer, 209-215
- Weiser, M. (1993). *Some Computer Science Issues in Ubiquitous Computing*. *Communications of the ACM*, Vol. 36, No. 7, 74-78
- Wellner, P. (1993). *Interacting with Paper on the DigitalDesk*. In: *Communications of the ACM*, 36/7
- Wellner, P., Mackay, W., Gold, R. (1993). *Computer-Augmented Environments: Back to the Real World*. *Communications of the ACM*, 36, 7, 24ff
- Zühlke, D., Küster, J. (1994). *Die Simulation als Planungshilfsmittel*. VDI-Z 136, 5, S. 33 - 37

Ich danke meinen Kolleginnen und Kollegen, die zur Realisierung dieser Konzepte beigetragen haben:

Volker Brauer, Kai Schäfer, Dieter Müller, Martin Faust, Herman Gathmann, Eva Hornecker, Bernd Robben, Hauke Ernst, Jürgen Huyer, Kai Schmudlach, Mladen Illic, Piotr Kaczmarczyk, Rainer Pundt und den zahlreichen talentierten Studenten ohne die diese Arbeiten nicht möglich gewesen wären.

Unsere Forschung und Entwicklung wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG (G-Nr. Br 1556/2-3, G-Nr. Br1556/3-3) und der EU (MM1002, IST2031,...) gefördert.

Dank auch unseren Europäischen Projektpartnern von Escola Superior de Tecnologia e Gestao-Leiria, Stockport College of Further and Higher Education, Friese Poort-Drachten, Schulzentrum im Holter Feld-Bremen, Festo Didactic-Esslingen, Institut für Arbeitspsychologie-ETH-Zürich, Superscape Ltd, Virtual Presence Ltd

Weitere Details siehe

<http://www.brevie.uni-bremen.de>

<http://www.derive.uni-bremen.de>

<http://lab.artec.uni-bremen.de>