

Dieter Müller und F. Wilhelm Bruns

Software zur Förderung von Arbeitsprozesswissen

Müller, D./ Bruns, F. W. (2002): Software zur Förderung von Arbeitsprozesswissen, in: Fischer, M./Rauner, F. (Hrsg.): Lernfeld: Arbeitsprozess, Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft, S. 411-440

1 Einführung

Die Frage, wie Software beschaffen sein sollte, damit sie Arbeitsprozesswissen unterstützt und fördert, ist bisher nicht befriedigend behandelt und lässt sich wohl auch in dieser Allgemeinheit nicht beantworten. Leichter ist es zu untersuchen, wie Modellierungs- und Simulationssoftware das Wissen über technische Geräte und Prozesse unterstützen und fördern kann. Hierüber liegen Erfahrungen und Erkenntnisse vor, von denen wir hoffen, dass sie auch hilfreich für die weitergehende Frage sind. Die zweifache Einschränkung trifft nach unserer Erfahrung trotzdem noch den Kern der Problematik, denn

1. Software ist immer auch implementierte Modellbildung, und deren Ausführung kann als Simulation interpretiert werden,
2. Arbeitsprozesswissen ist eine Erweiterung von Wissen über technische Prozesse um soziale und organisatorische Aspekte mit starken impliziten Anteilen, die beiden Wissensarten gemeinsam sind.

Zunächst stellen wir unser Verständnis von Arbeitsprozesswissen als besondere Ausprägung von Wissen über Prozesse in Abgrenzung zu Wissen über Physik und Mathematik vor. Dieses Verständnis basiert auf empirischen Arbeiten von Gentner und Stevens (1983) über mentale Modelle sowie eigenen Erfahrungen in Ausbildungsprojekten. Anschließend zeigen wir Gestaltungsperspektiven für neuartige Simulationsumgebungen auf und stellen prototypische Realisierungen vor.

2 Prozesswissen

Im vorliegenden Buch werden verschiedene Perspektiven auf Arbeitsprozesswissen vorgestellt. In unserem Beitrag soll die besondere Bedeutung von Prozesswissen gegenüber physikalischem und mathematischem Wissen und Denken thematisiert werden. Dabei gehen wir nur punktuell auf die Besonderheiten von Arbeitsprozesswissen als besondere Formen von Prozesswissen und Erfahrungswissen ein. Es wird sich zeigen, dass die Kategorie Prozess- und Erfahrungswissen einen Gestaltungsrahmen für Medien markiert, der auch für Arbeitsprozesswissen fruchtbar ist.

Als Einstieg möge uns der Philosoph und Logiker Bertrand Russel dienen, der den Zusammenhang zwischen Physik und Erfahrung diskutiert.

„Wahrnehmungen können ihre Funktion als Erkenntnisquelle physikalischer Objekte nur insoweit erfüllen, als es in der physikalischen Welt trennbare mehr oder weniger unabhängige Kausalketten gibt. Dies trifft nur näherungsweise zu, und deshalb kann auch der Schluss von den Wahrnehmungen zu den physikalischen Objekten nicht exakt sein“ (Russel 1948, 53).

Dieses Zitat zeigt zweierlei: Erstens gibt es in der physikalischen Welt nur näherungsweise trennbare, mehr oder weniger unabhängige Kausalketten, die zu den physikalischen Gesetzen führen. Die Kausalität der Welt ist nur begrenzt gültig. Zweitens ist unser Schluss von den Wahrnehmungen zu den physikalischen Objekten nicht exakt. Die Wahrnehmung der Welt ist nur begrenzt gültig. Für den in der Welt Handelnden ergibt sich daraus die Konsequenz:

- Verlasse dich nicht auf die Kausalität physikalischer Gesetze, und
- verlasse dich nicht auf die Wahrnehmung.

Die geforderten Verhaltensweisen finden wir bei Novizen und Experten, jedoch auf unterschiedlichem Niveau.

2.1 Mentale Modelle und Naive Physik

Es ist recht aufschlussreich, sich die empirischen Arbeiten auf dem Gebiet der *Mentalen Modelle* und der *Naiven Physik* anzusehen. Mentale Modelle sind innere, nicht notwendig bewusste Schemata und Vorstellungen von den strukturellen und funktionalen Zusammenhängen eines Weltausschnittes. Norman (1983, 8) stellt aufgrund von Beobachtungen von Rechnernutzern fest:

- Mentale Modelle sind unvollständig,
- die Fähigkeit, das eigene Modell zu simulieren, ist stark eingeschränkt,
- Mentale Modelle sind instabil, die Details von Systemen werden vergessen,
- Mentale Modelle haben keine präzisen Grenzen, ähnliche Geräte und Operationen werden miteinander verwechselt,
- Mentale Modelle sind „unwissenschaftlich“, die Handelnden behalten ihren Aberglauben,
- Mentale Modelle sind sparsam, die Handelnden nehmen zusätzliche physikalische Operationen in Kauf, um mentale Planungen zu vermeiden.

Larkin (1983, 75 ff.) untersucht den Problemlöseprozess bei analytischen mechanischen Aufgaben (Wie verhält sich folgendes System?) bei Novizen und Experten. Der Novize benutzt eine *naive* Problemrepräsentation, die aus konkreten Objekten der realen Welt (Klötze, Scheiben, Federn) besteht und entwickelt eine entsprechende realzeitliche Dynamik. Experten entwickeln *zusätzlich* physikalische Repräsentationen, die vorgestellte abstrakte Elemente wie Reibung, Kraft, Impuls enthalten. Die Elemente in physikalischen Repräsentationen haben lokale Attribute, d. h., sie sind scharf vom Kontext getrennt. In der naiven Repräsentation sind die Elemente stärker mit dem Kontext verwoben. Eine der Hauptstärken der physikalischen Repräsentati-

on ist die Redundanz der Inferenzregeln: Ein Problem lässt sich über mehrere Zugänge erschließen (Kraft-Schema, Arbeits-Schema). Novizen gehen eher gezielt konkret von der gesuchten Zielgröße nach einer Ziel-Mittel-Strategie vor. Diese besteht darin, durch Ausprobieren bekannter mathematischer Gleichungen so lange zu sortieren, bis alle Unbekannten bestimmt sind. Die Argumentation ist nicht physikalisch.

Geht man von einfachen mechanischen Aufgaben zur Behandlung von Regelkreisen über, wie wir sie bei der Dampfmaschine oder der Klingelschaltung vorfinden, so ergeben sich neue Anforderungen. Hier reicht die sequenzielle Betrachtung zeitlich kausaler physikalischer Phänomene und statisch logischer Zusammenhänge nicht aus. Logik umgeht zirkuläre Argumente und unterstützt nur eine zeitlose Wenn-dann-Kausalität. In zirkulären Verursachungsketten, wie sie bei technischen Systemen häufig vorkommen, spielt Zeit jedoch eine wichtige Rolle (vgl. Bateson 1984, 31). Dabei gibt es keinen bevorzugten Betrachtungsanfang. Das Gerät wird tastend iterativ erschlossen. Ursache und Wirkung lassen sich nicht mehr deutlich bestimmen. Das zeitabhängige qualitative und quantitative Denken in Ursache-Wirkungszyklen ist hier angemessener.

De Kleer/ Brown (1983) untersuchen die Frage, wie Lernende ein Verständnis mechanischer Geräte entwickeln, insbesondere, welche Struktur die entstehenden mentalen Modelle haben und wie mit der Mehrdeutigkeit umgegangen wird, die durch unvollständige Annahmen und Kenntnisse entstehen. Dabei entwerfen sie ein Konzept des *qualitativen* Denkens, welches sich auch in dem externen Modell widerspiegelt. Dieses besteht aus

1. dem Aufbau einer Struktur aus Grundphänomenen,
2. dem vorausschauenden Ableiten aller damit möglichen kausalen Funktionsweisen und Verhalten (Envisioning),
3. der Simulation dieser Konstruktion (Running) mit Auflösung der Mehrdeutigkeiten durch Randbedingungen und quantitative Präzisierung, damit bestimmte Zwecke durch ein determinierbares kausales Verhalten erfüllt werden.

Als Bausteine der Modelle werden Komponenten vorausgesetzt, deren Verhalten unabhängig vom Kontext ist (open world assumption). Diese sind in einem Schema miteinander verbunden. Das Verhalten des Gesamtgeräts ist nun aber nicht nur von den lokalen Interaktionen zwischen den einzelnen Komponenten, sondern auch von den globalen Zusammenhängen abhängig (Beispiel: Klingelschaltung). Dies macht es erforderlich, die kausalen Abhängigkeiten in einem iterativen zyklischen Prozess schrittweise zu verfeinern und zu spezifizieren. Das Vorausschauen erfolgt über einen Ausbreitungsmechanismus, der mit zufälligen äußeren Ereignissen beginnt, die sich über die Wirkbeziehungen zwischen Komponentennachbarn ausbreiten. Dabei werden vielfältige, oft explodierende Verhaltensmuster erzeugt. Es ergibt sich ein kausales Modell, dessen Durchspielen zeigt, wie sich die Maschine oder der Prozess

verhalten könnte. De Kleer und Brown stellen eine formale Sprache und Vorgehensweise vor. Diese besteht aus

- Komponentenmodell
 - Verbindung der Anschlüsse ohne Festlegung der Wirk- oder Fluss-Richtung
 - Definitionsteil, als qualitative Beschreibung der Zustände
- Transitionsteil, als Beschreibung, wie Attribute den Systemzustand ändern
- Kausalmodell
 - Ausbreitung und Filterung von Wirkungen
 - Vorausschau (Envisioning) zur Aufdeckung der inhärenten Kausalität
- Randbedingungen (Constraints)
 - Konsistenz, Freiheit von inneren Widersprüchen
 - Korrespondenz, Angemessenheit und Exaktheit der Repräsentanz
 - Robustheit, Nützlichkeit in unvorhergesehenen Situationen
- Prinzip der funktionsfreien Struktur (No-Function-in-Structure).

Besonders lernförderlich ist hierbei der iterative Prozess des Handelns, der aus der Vorausschau (Envisioning) mit Hypothesenbildung und dem Test mit Kritik besteht. Das Kritisieren erfolgt auf der Basis von Konsistenz, Korrespondenz und Robustheit. Der qualitative Ansatz erlaubt zunächst eine offene vielseitige und intuitive Grobbeschreibung (Naive Physik), die aber wegen der fehlenden Feinunterscheidung (Attributwerte) und der impliziten Zeit (Reihenfolge der Ereignisse) zu unterbestimmtem Verhalten führt. Auch sind in einem ersten Modellerschritt viele Annahmen implizit in den Komponenten, die für ein tieferes Verständnis expliziert werden müssen. Auf diese Weise gelangt man zum Verständnis eines intrinsischen Mechanismus als einer Beschreibung aller möglichen Kausalmodelle, von denen je nach externen Gegebenheiten dann ein Modell als Projektion ausgewählt wird.

Für die Instandhaltung lassen sich dann drei unterschiedliche Fehlerklassen unterscheiden:

- Die Funktion (Zweck) des gestörten Geräts ist im Wesentlichen unverändert, aber nicht optimal. Das kausale Modell bleibt gültig, muss aber quantitativ korrigiert werden.
- Die Funktion verletzt das gewünschte kausale Modell, ist aber noch als Möglichkeit im intrinsischen Mechanismus enthalten. Das unerwünschte kausale Modell muss in das gewünschte überführt werden.
- Die Funktion ist nicht im intrinsischen Mechanismus enthalten. Die bisherige Erfahrung und Voraussicht hat diese Möglichkeit noch nicht berücksichtigt. Das intrinsische Modell muss erweitert werden.

Drei Arten des Lernens werden von de Kleer unterschieden: a) Herstellen der Verbindung zwischen Struktur und Verhalten, b) Verbesserung der Verbindung durch Explizierung impliziter Annahmen, Differenzierung und Erweiterung des intrinsischen Mechanismus, c) Einprägen bevorzugter praktisch relevanter Projektionen des intrinsischen Mechanismus auf die Wirklichkeit. Daraus wird deutlich, dass mit der

üblichen rechnergestützten Simulation nur die Lernphase a unterstützt wird, denn eine Veränderung der Implizit/Explizit-Grenze ist bei vorgegebenen Modellen selten möglich, das Überschreiten der in der stimmigen Simulationswelt getroffenen Annahmen nur durch Realitätsbezug erreichbar.

Dieser Ansatz ist grundlegend für ein inzwischen bedeutendes Forschungs- und Entwicklungsgebiet, das unter Bezeichnungen wie *Qualitative Modelling*, *Naive Physics*, *Case Based Reasoning*, *How Things Work*, *Causal-Functional Modelling* besonders in den USA hohe Relevanz hat, bei uns bisher aber geringe Beachtung findet. Wir sind der Überzeugung, dass bei aller Vorläufigkeit dieser Arbeiten wichtige Anregungen für die Entwicklung von Software zur Systemanalyse, Systemkonstruktion, Fehlerdiagnose und Systembeherrschung gewonnen werden können.

2.2 Objektivierendes und subjektivierendes Handeln

Böhle und Milkau (1988) untersuchen auf der Grundlage verschiedener Fallstudien aus dem Bereich der Werkstattarbeit an konventionellen und rechnergesteuerten Werkzeugmaschinen die Bedeutung unterschiedlicher Handlungstypen im Arbeitsprozess. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass kompetentes Arbeitshandeln als eine Einheit von *objektivierendem* und *subjektivierendem Handeln* charakterisiert werden kann (Böhle/ Milkau 1988, 13 ff.).

Objektivierendes Handeln ist ein auf systematischem und rationalem Wissen basiertes Handeln, es ist an objektivierten Kenntnissen und Bewertungen orientiert. Wissenschaftlich begründetes Wissen und technisch-rationales Handeln sind in diesem Sinne besondere Ausformungen objektivierenden Handelns (Böhle/ Milkau 1988, 18 ff.). *Subjektivierendes Handeln* ist im Wesentlichen situatives, gefühlorientiertes Handeln, es basiert auf der sinnlichen Erfahrung des Subjekts mit seiner Umwelt (ebd., 25 ff.). Die prinzipiellen Merkmale subjektivierenden Handelns im Unterschied zum objektivierenden Handeln lassen sich in Anlehnung an Böhle/Schulze wie folgt zusammenfassen (Böhle/ Schulze 1997, 34 f.):

Die sinnliche Wahrnehmung¹ spielt bei einem subjektivierenden Handeln eine zentrale Rolle; sie bezieht sich nicht nur auf rational definierbare und messbare Informationen, sondern in erster Linie auf vielschichtige qualitative Gegebenheiten. Dabei ist das *Gefühl* ein wichtiges Element für die Beurteilung des sinnlich Wahrgenommenen und hat eine kognitive und handlungsleitende Funktion.

1 Charakteristisch für den hier verwendeten Begriff der sinnlichen Wahrnehmung sind Formen der Wahrnehmung, „die auf einer fühlenden, spürenden Sinnlichkeit beruhen, bei der die einzelnen Sinne nicht fragmentiert sind, sondern im und durch den Leib wirken. Leib meint den sensiblen, empfindenden Körper. Er bildet die lebendige Einheit der Sinne mit anderen Dimensionen menschlicher Existenz. Zwischen den Sinnesorganen wird keine scharfe Trennung gezogen, sondern die Sinne sind wirksam in ihrer Komplexität und Verflechtung“ (Böhle/ Milkau 1988, 25).

Sinnliche Wahrnehmung in diesem Sinne ist gebunden an „wahrnehmungs- und verhaltensnahe Formen menschlichen Denkens“ (ebd., 34). Eigenschaften konkreter Sachverhalte, Prozesse, aber auch nicht unmittelbar wahrnehmbare abstrakte Gegebenheiten werden nicht nur rein begrifflich, sondern auch bildlich oder handlungsbezogen gespeichert. Kognitive und mentale Prozesse basieren dabei wesentlich auf assoziativen Verknüpfungen und Imaginationen und weniger auf formal-logischem Denken.

Charakteristisch beim subjektivierenden Handeln sind Vorgehensweisen, die sich „dialogisch-interaktiv oder explorativ“ (ebd., 35) beschreiben lassen. Dementsprechend sind Handlungen durch eine Verschränkung von Aktion und Reaktion geprägt. Im Unterschied zu objektivierenden, zweckrationalen Handlungsweisen werden Ziele nicht immer im Vorhinein geplant, sondern im Handlungsvollzug entwickelt, konkretisiert, und falls erforderlich, modifiziert.

Ein weiteres zentrales Element subjektivierenden Handelns ist seine emotionale Involviertheit im Sinne einer empathischen Beziehung des Subjekts zum Objekt. Nicht nur im Umgang mit anderen Individuen, auch im Umgang mit Werkzeugen, Materialien und Werkstoffen spielt dies eine bedeutende Rolle. „Wahrnehmen und Erkennen vollzieht sich hier [...] nicht über die distanzierte Analyse, sondern über den Weg der Transformation ‚äußerer‘ Gegebenheiten in körperlich-sinnliches und gefühlsmäßiges Erleben“ (ebd., 35).

Der Handlungstypus des subjektivierenden Handelns ist, wie Böhle/ Milkau im Zuge ihrer Studie empirisch belegen, für die umfassende Herausbildung von Handlungswissen unbedingt erforderlich. Dementsprechend ist dieser Wissensmodus keine Restgröße im Arbeitsprozess, sondern für die Bewältigung komplexer Situationen unerlässlich. Vor allem in Arbeitssituationen mit unvollständigen Informationen und bei risikobehafteten Entscheidungsfällen, und dies insbesondere unter Zeitdruck, steuert nicht objektivierendes, sondern subjektivierendes Handeln, das heißt das durch praktische Erfahrung individuell erworbene Wissen, angemessenes Handeln. Hier reicht objektivierendes Handeln, basierend auf objektivierten Kenntnissen und Bewertungen, nicht aus. Mit anderen Worten: Subjektivierendes Handeln im Sinne einer ganzheitlich-sinnlichen Tätigkeit ist in besonderer Weise erfahrungs- und kompetenzbildend, objektivierendes Arbeitshandeln allein genügt nicht, um komplexe Situationen zu meistern.

3 Lern- und handlungspsychologische Aspekte

3.1 Erfahrung und Kognition

Wir nehmen Bezug auf die genetische Erkenntnistheorie Piagets². Sie geht von einem aktiven Erkenntnisprozess durch das Subjekt aus, bei dem Erfahrungen eine zentrale Rolle spielen: „wenn der Geist immer mehr Dinge erobert, dann nur deshalb, weil er seine Erfahrungen stets aktiver organisiert und nicht bloß außen eine in sich vollendete Wirklichkeit imitiert. Der Gegenstand ist nicht eine ‚Gegebenheit‘, sondern das Ergebnis eines Konstruktionsprozesses“ (Piaget 1973, 377 f.).

Zu den wesentlichen Bestimmungselementen der Piaget’schen Theorie gehört die Auffassung von der gesetzmäßigen Abfolge strukturell jeweils verschiedener Entwicklungsstadien innerhalb der kognitiven Ontogenese des Menschen (vgl. z. B. Bugge 1993, 49 ff.). Piaget hat dazu ein Stufenmodell entwickelt, in dem vier aufeinander folgende Perioden unterschieden werden (vgl. Tabelle 1).

	Phase	Alter	Typische Aktivitäten	Abstraktion
4	formal-operational	ab 11	urteilendes und hypothetisches Denken (formale Kontexte)	Theorie
3	konkret-operational	7–11	invariante Strukturen von Klassen, Relationen, Zahlen (Begriffs- und Handlungskontext)	Begriff
2	prä-operational	2–7	Verständnis raum-zeitlicher Beziehungen (Vorstellungskontext)	Vorstellung
1	sensomotorisch	0–2	Wahrnehmung der Objekte („hier und jetzt“)	sinnliche Erfahrung

Tab. 1: Stufen der kognitiven Entwicklung nach Piaget (Stadientheorie)

Nach diesem Stufenmodell bilden *sensomotorische Erfahrungen* den Ausgangspunkt „begreifenden“ Erkennens und damit die Grundlage aller kognitiven Prozesse. Im ersten Stadium der kognitiven Entwicklung resultieren Erfahrungen aus dem unmittelbaren Kontakt und der sensomotorischen Auseinandersetzung mit den Dingen der äußeren Welt. Handlungen erfolgen schrittweise, das Handlungsinteresse bezieht sich nur auf die aktuellen Wahrnehmungen und motorischen Aktivitäten ohne antizi-

2 Piaget hat sich übrigens selbst kaum mit didaktischen oder schulbezogenen Fragestellungen befasst. Dennoch ist seine Theorie wegen ihrer vielfältigen didaktischen Implikationen von vielen Pädagogen rezipiert worden. Zur Übersicht vgl. z. B. Kron (1994, 159 ff.).

pierende Momente. Ziel ist die Veränderung der Wirklichkeit, *nicht* ihre Erklärung. Innerhalb dieser Phase sind vom Zufall, der Wiederholung und der Beobachtung der Handlungswirkung gekennzeichnete Handlungsvollzüge typisch. Erst später sind zielgerichtete sowie systematisch probierende Handlungen erkennbar, die auf eine zunehmende Strukturierung und Koordination hindeuten. Daraus entwickeln sich immer abstraktere Formen des Denkens.

Piagets Stadientheorie mag die Vermutung nahe legen, dass die als notwendig erachtete *sensomotorische* Erfahrung mehr oder weniger nur auf das Kleinkindalter beschränkt ist. Wie Bugge allerdings betont, haben „entsprechende Nachuntersuchungen gezeigt, dass manche Entwicklungsprozesse sich über weit längere Zeiträume – zum Teil bis in das Erwachsenenalter hinein – erstrecken, als Piaget idealtypisch beschrieben hat“ (Bugge 1993, 113). Die *sensomotorische* Erfahrung ist in diesem Sinne nicht nur wichtig für die kognitive Entwicklung des Kindes beim Übergang von der sensomotorischen zur prä-operationalen Phase, sondern erweitert auch noch beim Jugendlichen und Erwachsenen die vorhandenen Lernmöglichkeiten. Im Jugend- und Erwachsenenalter ist sensomotorisches Handeln oft durch eine „Kreisreaktion“ geprägt: Wenn Handlungen eine Wirkung haben, die zu unverständlichen Ergebnissen führt, so werden diese Handlungen oft wiederholt, um sie zu „begreifen“ (Scherler 1979, 105). Im Unterschied zum Kleinkind sind solche „Kreisreaktionen“ nicht Folge zufälliger Handlungen, sondern Folge aktiven Suchens (Möller 1987, 192).

Piaget hat den Prozess der Erfahrungsbildung noch weiter differenziert und zwei basale *Erfahrungstypen* beschrieben, die die kognitive Auseinandersetzung des Individuums mit seiner Umwelt wesentlich bestimmen (Wetzel 1980, 116 ff.; Klewitz 1989, 26 ff.). Piaget unterscheidet

- die physikalische bzw. physische Erfahrung oder Objekt-Abstraktion und
- die logisch-mathematische Erfahrung oder Handlungs-Abstraktion.

Physikalische Erfahrungen sind eine spezifische Form sensomotorischer Erfahrungen, die entstehen, wenn das Subjekt im Umgang mit der konkret-gegenständlichen Objektwelt Gesetzmäßigkeiten ihrer Reaktion erkennt. Physikalische Erfahrungen basieren nicht auf einem einfachen Verbildlichungsvorgang, mit dem eine Gegebenheit unmittelbar erfasst wird³. Für Piaget bedeutet Erkennen, auf Objekte einzuwirken, nicht sie abzubilden. Erkennen beinhaltet für ihn, Realität zu transformieren, um zu verstehen, wie ein bestimmter Zustand zustande kommt.

Im Unterschied zu physikalischer Erfahrung, die von der konkreten materiellen Objektwelt, auf die sich das Erkennen richtet, abstrahiert, bezieht sich die *logisch-mathematische Erfahrung* auf die Handlung im Erkenntnisprozess. Die logisch-

3 Zur Abgrenzung der Theorie Piagets gegenüber Abbildungs- und Widerspiegelungstheorien vgl. Montada (1982, 554).

mathematische Erfahrung beinhaltet die *reflektierende* Abstraktion des Subjekts von allen kognitiv relevanten Handlungsanteilen, sie wird dementsprechend auch als Handlungs-Abstraktion bezeichnet.

Der Begriff „logisch-mathematisch“ bezieht sich nicht nur auf die logisch-mathematischen Operationen⁴ im engeren Sinne, sondern generell auf Handlungskoordinationen, die Piaget als Vorstufen zu den logisch-mathematischen Operationen auffasst. Solche Handlungskoordinationen sind beispielsweise Beziehungs- und Ordnungsbildungen, Klassifizierungen usw. Dementsprechend beinhaltet die logisch-mathematische Erfahrung den Mechanismus des Übergangs von der konkreten Handlung zur (Re-)Konstruktion generalisierbarer, das heißt auf beliebige Objekte anwendbare Operationen.

Logisch-mathematisches Verständnis kann im Sinne Piagets demzufolge nicht ohne experimentelle und konstruktive Zugriffe auf die Realität und entsprechende physische Erfahrungen zustande kommen.

Zwischenfolgerungen

Dass Erfahrung grundlegend für die Kompetenzentwicklung überhaupt ist, hat Piaget deutlich gemacht. Wir ziehen folgenden Schluss aus den Piaget'schen Erfahrungsformen:

1. Das begriffliche Erkennen nimmt genetisch seinen Ausgang in den Vorformen sensomotorischer Schemata und sinnlicher Handlungsvollzüge. Jeder Unterricht muss deshalb der Tatsache Rechnung tragen, dass Lernfortschritte wesentlich aus dem *Interaktionsprozess* zwischen Subjekt und der äußeren Welt entstehen. Lernhandlungen, die ausgehend von den sensomotorischen Erfahrungen beim Umgang mit Objekten die Begriffsbildung auf handlungsmäßiger Ebene ermöglichen, sind besonders geeignet, Verstehensprozesse zu initiieren⁵. „Experimentierendes Lernen“ oder „experimentierende Erkenntnistätigkeit“, wie sie auch intensiv in der beruflichen Bildung diskutiert worden sind (Eicker 1983; Rauner 1985; Rauner/ Eicker 1997), bieten hierzu die entsprechenden Voraussetzungen. Experimente erfordern insofern die gegenständliche Auseinandersetzung mit der Problemstellung, als die Rückbindung an die sinnliche Erfahrung erforderlich ist, wenn im Experiment Gedachtes überprüft werden soll (Fischer 1996, 234).

4 Zum Begriff der Operation vgl. auch Aebli (1993, 209 f.).

5 Eigene Erfahrungen bestätigen, dass es häufig Situationen gibt, in denen Lernende – sofern die Möglichkeit dazu besteht – bevorzugt auf die „äußere“ gegenständliche Handlung zurückgreifen, um eine Lernaufgabe zu bearbeiten. Dies gilt insbesondere in denjenigen Fällen, in denen die Vorerfahrungen mit den „Dingen“ noch nicht vorhanden sind.

2. Physikalische Erfahrungen erwachsen aus dem experimentellen Handlungskontakt mit Objekten. Das Objektfeedback bildet dabei das Korrektiv für die Erfahrung, wobei es weitgehend dem Lernenden überlassen werden muss, welche empirischen Erfahrungen er wie verarbeitet. Logisch-mathematische Erfahrungen lassen sich durch operatorische Übungen fördern. Hierbei bildet das Handlungsfeedback das entsprechende Korrektiv. Dabei können durch entsprechende Lernmedien und die jeweilige Lernorganisation Handlungsfreiräume ermöglicht oder auch eingeschränkt werden. Wichtig sind hier Lernaufgaben und Medien, die das Durcharbeiten von Operation und Begriffen an einem konkreten Beispiel ermöglichen (vgl. hierzu auch Aebli 1995, 156).
3. Physikalische und logisch-mathematische Erfahrungen sind elementare Erfahrungsformen, die sich gegenseitig bedingen und ergänzen. Die Entstehung kognitiver Kompetenzen wird durch beide Formen der Erfahrung bestimmt und nicht a priori durch eine determiniert. In konkreten Problemsituationen lassen sich nur schwer die den Lernfortschritt bestimmenden Anteile beider Erfahrungsformen ausmachen: „Durch die auf die Objekte der Umwelt ausgeübten Handlungen konstruiert das Subjekt sein Wissen sowohl im dinglichen als auch logisch-mathematischen Erfahrungsbereich. [...] Je nachdem, ob der angestrebte Erkenntniserwerb primär durch Handlungsfeedback oder Feedback vom Objekt selbst stimuliert wird, muss methodisch unterschiedlich agiert werden. In beiden Fällen ist es jedoch nicht der Lehrer, der über die Richtigkeit der Annahmen entscheidet. Sind falsche Annahmen über Objekteigenschaften experimentell relativ einfach zu überprüfen und zu korrigieren [...], lässt sich an ein auf logisch-mathematischer Strukturierung gründendes Urteil nicht ebenso einfach das Kriterium richtig/ falsch anlegen“ (Klewitz 1989, 39).

Überträgt man diese Erkenntnisse aus der Theorie Piagets auf das Lernen mit Simulatoren, so ergeben sich folgende didaktische Schlussfolgerungen sowie Hinweise für die Gestaltung rechnergestützter Simulationsumgebungen:

1. Prinzipiell kann durch Simulationen aktives und exploratives Lernen im Sinne Piagets unterstützt werden. Insbesondere der Modellbildungsvorgang enthält Momente, die Lernende zur Eigenaktivität herausfordern. Aber auch der Wechsel von Hypothesengenerierung und den Hypothesentests innerhalb der Experimentierphase fördert explorierende Lernformen. In diesem Sinne kann das Lernen mit Simulatoren als eine besonders lernförderliche Form des „Experimentierenden Lernens“ betrachtet werden. Voraussetzung ist allerdings, dass rechnergestützte Simulatoren eine Aufgabenbearbeitung zulassen, die ein experimentierendes Vorgehen erforderlich und möglich machen. Vorerfahrungen müssen dabei eingefordert werden und zugleich müssen auch die Grenzen vorhandener Erfahrungen deutlich werden.

2. Die im Sinne der Theorie Piagets für viele Lernprozesse als notwendig erachteten direkten, sensomotorischen Erfahrungen mit Lerngegenständen lassen sich allerdings mit Hilfe rein rechnerbasierter Simulationen nur sehr eingeschränkt gewinnen, da rechnerbasierte Simulationen nur mittelbare, das heißt mediatisierte Erfahrungen ermöglichen. Wie die obigen Ausführungen nahelegen, sind insbesondere im Zuge der Modellbildung sensomotorische Erfahrungsmöglichkeiten lernförderlich, weil in dieser Phase Neues kognitiv erfasst und strukturiert werden muss. Eine Rückbindung an konkret sinnliche Lernmedien scheint also in vielen Fällen geboten; dies gilt insbesondere für Anfänger, denen spezifische sinnliche Vorerfahrungen mit dem zu simulierenden Original fehlen. Insofern sind Konzepte, die versuchen, Lernen mit Simulationen allein an einem Bildschirm zu konzentrieren, pädagogisch kein Fortschritt. Aus dieser Perspektive erscheint nur ein integratives Konzept didaktisch sinnvoll zu sein, bei dem der Einsatz rechnerbasierter Simulatoren in Verbindung mit gegenständlichen Simulationsmodellen (oder Realsystemen) angestrebt wird. Auf diese Weise können direktes und indirektes (mediatisiertes) Lernen mit konkret-stofflichen Medien und rechnerbasierten, symbolischen Modellen kombiniert werden. Hierdurch bleiben einerseits sensomotorische Erfahrungsmöglichkeiten im Sinne Piagets erhalten, andererseits werden die didaktischen Potentiale von Simulationen mit den Vorteilen anderer Medien kombiniert. Ein solcher Verbund mehrerer Lernmedien erfordert didaktische Lernarrangements, ähnlich wie sie in handlungsorientierten Unterrichtskonzepten gefordert werden (Schulz 1992). Der Einsatz von Simulationsumgebungen, bei denen eine Kopplung gegenständlicher Modelle mit rechnerbasierten Modellen möglich ist, stellt eine Lösung dar, die dies in idealer Weise auch technisch unterstützt.
3. Obwohl sich Simulationen – im streng wissenschaftlichen Sinne – weniger an einer Heuristik des Entdeckens im Sinne Piagets, dafür mehr an einem Modell wissenschaftlichen Forschens und Experimentierens orientieren, sollten im didaktischen Kontext Simulationen vor allem spielerisches Probieren und Experimentieren unterstützen. Relevant ist nicht nur das Ergebnis eines Simulationsexperiments an sich, sondern, dass Lernende verschiedene Strategien zur Lösung ausprobieren und Rückmeldungen ihres Handelns sinnlich-empirisch erfahren können. Auf einer elementaren Stufe kann so auch mit Hilfe des „trial and error“-Verfahrens eine Lösung auf rein handlungsmäßiger Ebene gelingen. Hierdurch wird sichtbar, wie die „Begriffsbildung als Bewusstwerdung von rein handlungsmäßigen Lösungen zu begrifflichem Verstehen im Zusammenspiel von Handlungen, Beobachtungen der Ergebnisse, Theoriebildung und ihren wechselseitigen, regulierenden Wirkungen verläuft“ (Klewitz 1989, 40). Die daraus resultierende Frage, inwieweit derartige „Vorformen“ der Modell-

bildung durch entsprechende Lernsimulatoren technisch unterstützt werden können, ist in der Technikdidaktik bisher noch wenig erforscht (vgl. Müller 1998).⁶

Piaget hat verdeutlicht, dass die kognitive Entwicklung in seinen Ursprüngen an sensorische Erfahrungen gebunden ist. Dabei spielt die Hand eine besondere Rolle. Der „handgreifliche“ Umgang mit den Dingen ist nicht nur eine wichtige Voraussetzung, um psychomotorische Fertigkeiten zu erlernen. Für viele Individuen stellt das „handwerkliche“ Vorgehen eine besonders kreative Möglichkeit dar, um auf neue Ideen und Einfälle zu kommen oder auch um auf relativ einfache und unkomplizierte Weise anderen etwas mitzuteilen oder am Gegenstand zu verdeutlichen. Der handfixierte Umgang mit Dingen hat in diesem Sinne eine wichtige Stützfunktion, die gerade für das Erlernen komplexer Zusammenhänge vielfältig hilfreich sein kann. Versucht man, diese Erkenntnisse für das Lernen mit Simulatoren umzusetzen, so ergeben sich einige Schlussfolgerungen:

- Die besonderen Fähigkeiten des Menschen, die Erkenntnisfunktion der Hand und deren stützende Funktion zu nutzen, sind beim Lernen mit rechnerbasierten Simulatoren reduziert. Hieraus ergeben sich Defizite, die die didaktische Reichweite von Simulatoren wesentlich einschränken. Dies gilt nicht nur für Trainingssimulatoren, an denen der operative Umgang mit Geräten, Maschinen, technischen Anlagen oder sonstigen Apparaten eingeübt werden soll, sondern auch für rechnerbasierte Simulationen insgesamt.
- Die Möglichkeit eines „be-greifenden“ Umgangs mit Simulationsmodellen ist vor allem während der Modellbildung lernförderlich, weil in dieser Phase men-

6 Im Hinblick auf das rechnergestützte Lernen von Kindern finden sich allerdings solche Überlegungen bei Papert, der dafür plädiert, Lernenden konkret-operative Zugangsmöglichkeiten zu den neuen Techniken zu verschaffen, die allerdings nicht der Lehrer auf ein genau definiertes Ziel hin vorherbestimmt, sondern die im Rahmen selbstbestimmter Lernprozesse erobert und erschlossen werden sollen. In diesem Kontext benutzt Papert in Anlehnung an den Anthropologen Claude Lévi-Strauss den Begriff *bricolage*, der in etwa mit „zurechtbasteln“ übersetzt werden kann (Papert 1994, 148, 159). „Die wichtigsten Grundsätze von *bricolage* als einer Methodik für geistige Aktivität sind: Nehmen, was man hat, improvisieren, sich behelfen. Und ein wahrer *bricoleur* hat Werkzeuge in seiner Kiste, die über einen langen Zeitraum durch einen Prozess, bei dem nicht nur der praktische Nutzen eine Rolle spielte, ausgewählt worden sind. Diese mentalen Werkzeuge sind genauso abgegriffen und bequem wie die materiellen Werkzeuge des reisenden Kesselflickers; sie werden das Gefühl des Vertrautseins, des sich Wohlfühlens vermitteln, sie werden das sein, was Illich als ‚umgänglich‘ und ich in Gedankenblitze als ‚syntonisch‘ bezeichnet habe. Hier verwende ich das Konzept des *bricolage*, um Vorstellungen und Modelle zu entwickeln, mit denen die Fertigkeiten mentale Konstruktionen zu bauen – und zu reparieren und auszubessern – verbessert werden können. Ich behaupte, daß es möglich ist, systematisch seine Fähigkeiten als *bricoleur* zu verbessern“ (ebd., 159).

tale Analyse- und Syntheseleistungen gefordert werden, die sich besser im Gegenständlichen und mit Hilfe der Hand erbringen lassen als im virtuellen, rechnergenerierten Raum – dies wird durch Forschungsergebnisse und eigene Erfahrungen bestätigt.⁷ So lassen sich beispielsweise die geometrischen Attribute eines komplexen Modells im Gegenständlichen häufig viel leichter modellieren als mit Hilfe eines Rechners. Zu fordern ist deshalb ein Konzept der *gegenständlichen Modellierung*, mit dem es möglich ist, physikalische Modelle mit der Hand erstellen zu können und dann diese Modelle auf ein symbolisch repräsentiertes Modell im Rechner abzubilden.

3.2 Erfahrung und Handlung

Der Piaget-Schüler Aebli stellt den Handlungsbegriff in den Mittelpunkt seiner Theorie kognitiver Prozesse. Während Piaget den Übergang vom sensomotorischen Handeln zum anschaulichen Denken und weiter zu den formalen Operationen im wesentlichen unter der Perspektive eines biologisch determinierten Adaptionprozesses (Akkommodation und Assimilation) betrachtet, erweitert Aebli den Begriff des Piaget'schen Handlungsschemas über das Adaptionkonzept hinaus, indem er von folgender Grundthese ausgeht: „Kognitive Prozesse treten im Rahmen der Wahrnehmungstätigkeiten und des Handelns auf. Sie haben die Aufgabe, deren Struktur zu sichern und auszubauen bzw. neue Strukturen des Handelns und Wahrnehmens zu elaborieren“ (Aebli 1993, 20). Dementsprechend beruht nach Aebli alles Lernen auf Handlung und Tätigkeit: „Denken geht aus dem Handeln hervor, und es trägt [...] noch grundlegende Züge des Handelns, insbesondere seine Zielgerichtetheit und seine Konstruktivität“ (ebd., 26). „Denken: das Ordnen des Tuns“ (Aebli 1993; 1994a) vollzieht sich schrittweise von der Handlung zur Operation bis hin zum Begriff. Die *Handlung* wird dabei als die „ursprünglichste Form der Erfahrungsbildung“ (Aebli 1994b, 386) gesehen, *Operationen* werden als abstraktes Handeln betrachtet und der *Begriff* als objektivierter Gedanke (ebd., 179 f.). Seine Taxonomie bildender Tätigkeiten, Abbildung 1, ist uns hilfreiche Orientierung.

7 Im Unterricht lässt sich häufig beobachten, dass gerade Anfänger sich durch die Arbeit am Rechner behindert fühlen, wenn sie Probleme lösen müssen, die besondere kreative oder geistige Anstrengungen erfordern. Nicht selten wird beispielsweise das Formulieren und Schreiben von Texten direkt am Rechner als schwieriger empfunden als mit Bleistift und Papier. Offensichtlich bindet die Interaktion mit dem System soviel psychische und kognitive Energie, dass kein Raum bleibt für kreative Zerstreuung, Assoziation und damit für das Entstehen und Umsetzen neuer Ideen.

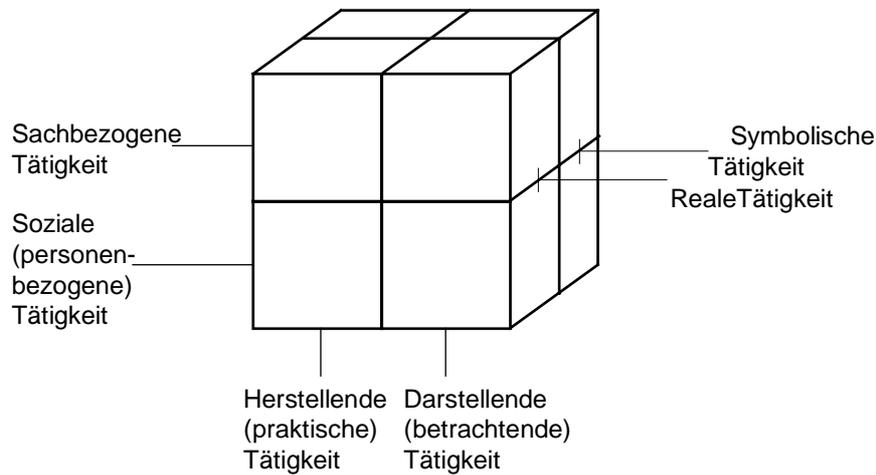


Abb. 1: Drei Dimensionen der Tätigkeit im Unterricht (Aebli 1995, 22)

4 Gestaltungsperspektiven für Lehr- und Lernmedien

Lehr- und Lernmedien wie das Buch, der Film und das Modell unterstützen jeweils unterschiedliche Aspekte des Lernprozesses. Diese lassen sich in einem Medium *Rechnergestützte Modellier- und Simulationsumgebung*, das wir im Folgenden näher spezifizieren wollen, vereinen.

Die Simulation ist eine experimentelle Methode. Sie umfasst die Abbildung eines Systems in einem Modell und das Experimentieren mit diesem Modell zum Zwecke der Erfahrungs- oder Erkenntnisgewinnung. Eine Gestaltung von Simulationsumgebungen hat sich also zunächst an bestimmten didaktischen Leitlinien zu orientieren, um dann daraus Empfehlungen für geeignete Modelle, Methoden des Experimentierens und Umgangsformen mit dem Medium selbst abzuleiten. Als didaktische Leitlinien dienen uns Erfahrungs- und Handlungsorientierung. Wesentliche Dimensionen der Modellgestaltung sind die Abstraktheit, die Komplexität und der Originalbezug von Modellen. Eine ausführlich Behandlung dieser Dimensionen erfolgte von Müller (1998).

4.1 Handlungsorientierung

Versucht man, die didaktischen Implikationen des handlungspsychologischen Ansatzes von Aebli auf das Lernen mit Simulationen zu übertragen, so ergeben sich fol-

gende Hinweise für den didaktischen Einsatz und die Gestaltung rechnergestützter Simulatoren:

1. Lernen mit Simulatoren ist als ein *Handlungsprozess* zu organisieren, das heißt als ein selbstgesteuertes und aktives Tun. Handlungselemente eines solchen Lernprozesses sind neben Modellen auch andere Objekte, Vorgänge oder Personen. Der Rechner sollte dabei als ein Hilfsmittel fungieren, um diesen Prozess zu unterstützen. Aebli's „Taxonomie bildender Tätigkeiten“ markiert den Rahmen möglicher Erfahrungsbereiche, die idealerweise gleichgewichtig zur Geltung kommen sollten. Dabei wird deutlich, dass Simulationen am Computer-Bildschirm im Aebli'schen Sinne nur ein Element eines solchen Lernprozesses sein können. Hieraus ergibt sich eine Forderung, wie sie schon mehrfach formuliert wurde, nämlich neben rechnerbasierten Simulatoren auch andere konkret-stoffliche Lernmedien wie Realsysteme oder gegenständliche Funktionsmodelle im technischen Unterricht einzusetzen bzw. mit Simulationen zu kombinieren. Dies ist insbesondere dann bedeutsam, wenn Lernende noch keine (Vor-)Erfahrungen im Umgang mit den entsprechenden Originalen mitbringen.
2. Ferner lässt sich aus dem handlungspsychologischen Ansatz Aebli's schließen, dass der Wert der Simulation in erster Linie darin gesehen werden sollte, dass hiermit eine experimentelle Vorgehensmethode zur Verfügung steht, handlungsorientiert mit Komplexität umzugehen. Dementsprechend sollten nicht allein die Einzelergebnisse einer Simulationsaufgabe im Mittelpunkt des Lernprozesses stehen, sondern die Planung und Durchführung der Simulation. Dabei sind außer den direkt aufgabenbezogenen Tätigkeiten zur Durchführung der Simulation u. a. auch folgende Lerntätigkeiten bedeutsam und lernförderlich:
 - Vorbereitungstätigkeiten (das Aufstellen von Zielen, die Planung von Vorgehensweisen bei der Modellierung und bei der Durchführung von Experimenten, Überlegungen zur Auswertung usw.),
 - Koordinierungstätigkeiten (das Koordinieren der Handlungsschritte mit anderen Lernenden).
3. Aebli's Stufenkonzept zur Verinnerlichung von Handlungen und Operationen lässt vielfältige Rückschlüsse für die Gestaltung von Simulatoren zu. Zunächst lässt sich konstatieren, dass Lernhandlungen mit Simulatoren unterschiedliche Medien der Erfahrung bieten sollten. Ausgehend vom Handeln mit gegenständlichen Objekten sollten bildliche und symbolische Modelldarstellungsmittel dem Lernenden zur Verfügung stehen, damit eine Simulationsaufgabe schrittweise erschlossen werden kann. Auch hier ergibt sich die oben formulierte Forderung zum Einsatz konkret-stofflicher Lernmedien in Verbindung mit rechnerbasierten Simulationen.

Die von Aebli beschriebene Problematik der *Phasenübergänge* zwischen verschiedenen Darstellungsmitteln impliziert, dass diese Übergänge, in denen der Lernende die Bedeutung von vorhergehenden Darstellungsmitteln in neue

transformieren muss, mit Hilfe des Rechners in besonderer Weise unterstützt werden müssen:

- Zunächst sollten Simulatoren den *synchronen* Gebrauch unterschiedlich abstrakter Darstellungsmittel ermöglichen. Dies gilt insbesondere für die Modellierungsphase, aber auch für das Modellexperiment und die Auswertungsphase. Können beispielsweise verschiedene abstrakte Darstellungsformen gleichzeitig benutzt werden, so kann jede neue, symbolischere Darstellung mit der vorangehenden, konkreten in eine möglichst enge Verbindung gebracht werden. Das Ziel ist es, wie Aebli es formuliert, „dass sich die symbolischere Darstellung mit der Bedeutung auflädt, die die konkrete Darstellung schon besitzt“ (Aebli 1994b, 238).
 - Ferner sollten diese *Übergänge* zwischen verschiedenen Modelldarstellungsmitteln möglichst haptisch und/oder audiovisuell unterstützt werden. Denkbar ist, dass konkrete Modelldarstellungen mit abstrakten *gemischt* bzw. *überlappt* werden. So lassen sich beispielsweise Elemente eines gegenständlichen Modells mit zusätzlichen symbolischen Modellelementen durch Überlagerungsgraphiken anreichern. Konzepte aus dem Bereich der *Augmented Reality* bieten dazu entsprechende technische Lösungsvarianten.
4. Aus der Sicht Aebli lassen sich nur *bedeutungshaltige* Handlungs- und Denkstrukturen aufbauen, wenn Handlungen möglich sind, bei denen jeder Teilschritt sich in einem erkennbaren Ergebnis niederschlägt und vom Lernenden nachvollzogen werden kann. Das heißt, im konkreten Ergebnis muss für den Lernenden auch im Nachhinein deutlich werden, was er getan hat, um zu diesem Ergebnis zu kommen. Für das Lernen mit Simulatoren folgt daraus, dass nur solche Systeme lernförderlich sind, die „sequentiell (zyklisch) und hierarchisch“ (Hacker 1994, 74) vollständige Handlungszyklen ermöglichen und die einzelnen Handlungsschritte auch transparent machen. Diese Forderungen beziehen sich sowohl auf den Umgang mit dem Simulationssystem selbst als auch auf die übrige Hard- und Software insgesamt. Hieraus resultieren spezifische Designanforderungen, die insbesondere die Ein-/Ausgabe-Ebene eines Systems betreffen:
- Ein Simulationssystem sollte grundsätzlich so ausgelegt sein, dass Lernhandlungen mit diesem nicht auf Resttätigkeiten, wie beispielsweise die Eingabe von Daten oder das passive Betrachten der Ergebnisse beschränkt sind. Vielmehr sollte der Lernende vollständige Handlungsvollzüge in dem Sinne ausführen können, dass er in allen Phasen der Simulation vielfältige Einflussmöglichkeiten hat, wie einzelne Lernschritte vorbereitet, durchgeführt und ausgewertet werden sollen. Dabei sollten anforderungsarme und monotone Dateneingabe-Operationen vom Rechner übernommen werden.
 - Ferner sollten die Zwischenergebnisse, die in den einzelnen Handlungsphasen gewonnen werden, mit Hilfe des Systems protokolliert und angemessen dargestellt werden können. Dazu gehört auch, dass durch interaktive Histo-

ry- und Protokoll-Funktionen der Benutzer die Möglichkeit hat, Lernschritte zurückzuverfolgen bzw. auch zu bestimmten Situationen zurückzukehren.

- Nachteilig bei rechnergestützten Simulatoren sind generell die Einschränkungen, die sich dadurch ergeben, dass Handeln tendenziell auf Eingabetastaturen, Mäuse und optische Ausgaben am Computer-Bildschirm reduziert wird. Hierdurch werden vor allem „soziale (personenbezogene) Tätigkeiten“ in Lerngruppen, wie Aebli sie fordert, behindert. Dementsprechend sollten Simulatoren mit multimodalen Benutzungsschnittstellen versehen werden, die den Benutzer nicht auf bestimmte Interaktionsformen fixieren. Eingabetechniken wie Spracheingabe, Bildverarbeitung oder Interface-Techniken aus der *Virtual-Reality* bieten hierzu erweiterte Möglichkeiten.
5. In allen Phasen der Simulation sollten Möglichkeiten zur Verfügung stehen, die es dem Lernenden erleichtern, kausale Zusammenhänge nicht nur kognitiv zu erschließen, sondern auch direkt wahrzunehmen. Dazu gehört beispielsweise, dass operationale Eingriffe, die zu gewünschten oder unerwünschten Zustandsänderung des Simulationsmodells führen, ein entsprechendes *Feedback* erzeugen. Hierbei können sowohl graphische Animationen als auch akustische Rückkopplungen dazu beitragen, angemessene *Kausaleindrücke* zu erzeugen. Eine erfahrungsförderliche Funktion des Rechnereinsatzes ist in diesem Zusammenhang vor allem darin zu sehen, dass mit diesem Medium auf vielfältige Weise die Möglichkeit gegeben ist, auch *verborgene, nicht unmittelbar wahrnehmbare* Eigenschaften, Wirkungszusammenhänge, Funktionsprinzipien oder Prozesse deutlich zu machen.

Dass ganzheitlich-sinnliche Tätigkeiten, möglichst im Umgang mit gegenständlichen Artefakten, konkreten Situationen und realen Prozessen, in besonderer Weise erfahrungsbildende Elemente enthalten, konnte in den arbeitspsychologischen Studien von Böhle/ Milkau u. a. theoretisch belegt und empirisch bestätigt werden. Mit der Unterscheidung zwischen *objektivierendem* und *subjektivierendem* Handeln wurde deutlich, welchen Stellenwert sinnliche Erfahrungsprozesse für die Entwicklung von Fachkompetenz haben. Entsprechend wurde die praktische Bedeutung „erfahrungsgeleiteter“ Arbeit sowie ihre Besonderheit und Leistung im Umgang mit rechnergestützten Systemen aufgezeigt. Ferner wurde anschaulich belegt, welche Rolle technische Gestaltungskonzepte für ein erfahrungsgeleitetes Handeln besitzen. Zusammenfassend ist dabei festzustellen, dass das Konzept des „subjektivierenden Handelns“ im Vergleich zu den Ansätzen von Aebli oder auch Piaget, die unbewusste, sinnliche und gefühlsmäßige Dimension des Handelns viel stärker in den Mittelpunkt stellt und ihr den entsprechenden Stellenwert zuweist.

Obwohl die dargestellten Ansätze sich in erster Linie auf das Arbeitshandeln in spezifischen Situationen und nur mittelbar auf schulisches Lernen beziehen, lassen

sich hieraus auch didaktische Konsequenzen für den technischen Unterricht ziehen.⁸ Dabei ergeben sich Hinweise für die Gestaltung von Simulatoren, die darauf hindeuten, dass nicht nur ein planmäßiges und logisch-formales Vorgehen beim Umgang mit Simulatoren vom System unterstützt werden sollte, sondern auch wesentlich subjektivierende und nicht-rationale Handlungsweisen.

4.2 Erfahrungsorientierung

Versteht man Lernen als einen zirkulären Prozess, der sich durch die Nutzung *vorhandener* und die Integration *neuer* Erfahrungen auszeichnet, so hat Erfahrung eine *doppelte* Funktion: zum einen bildet sie den Ausgangspunkt neuer Lernprozesse, und zum anderen führen Lernergebnisse wieder zu neuen Erfahrungen. Im Hinblick auf eine erfahrungsorientierte Mediengestaltung ergeben sich daraus *zwei* Prinzipien:

- Vor-Erfahrungsorientierung und
- Neu-Erfahrungsförderlichkeit.

Eine Untersuchung unterschiedlicher Modellarten technischer Sachsysteme zeigte, dass der Spezialisierungsgrad technischer Modelle weit fortgeschritten ist (Müller 1998). Hieraus können erhebliche Lernbarrieren für den Einzelnen entstehen, vor allem dann, wenn Simulationen auf abstrakt-formalen Modellen, wie beispielsweise Programmiersprachen oder mathematischen Gleichungssystemen, aufsetzen, die nicht den Vorerfahrungen entsprechen. Obwohl abstrakt-formale Modelle eine große Bedeutung haben, besteht ein wesentliches Ergebnis der vergleichenden Analyse darin, dass Modelle zum Zweck der Simulation nicht generell und ausschließlich in *einem* Formalismus dargestellt werden sollten. Neben abstrakt-formalen Modellbeschreibungen können auch wenig formale graphisch-deskriptive, textliche und gegenständliche Modelle dazu beitragen, Simulationen anschaulicher und verständlicher zu machen. Für das Design von Simulatoren lässt sich daraus zunächst allgemein ableiten, dass rechnergestützte Simulationsumgebungen eine möglichst große *Vielfalt* an (vor-)erfahrungsorientierten Zugängen und (neu-)erfahrungsförderlichen Übergängen anbieten sollten, damit Lernende entsprechend ihrer unterschiedlichen subjektiven Voraussetzungen vielfältige Lernmöglichkeiten haben. Dies impliziert insgesamt auch die Forderung nach einer *Durchlässigkeit* zwischen digitaler und nicht-digitalisierter „Welt“, das heißt zwischen nicht-rechnergestützten und rechner-

8 Dass erfahrungsgeleitetes Handeln nicht nur für die Facharbeiterausbildung relevant ist, sondern auch für die Ausbildung von Ingenieuren, deutet Ferguson an, wenn er schreibt: „Heute ist [...] das Wissen und Geschick der Arbeiter – sinnliches nichtsprachliches Wissen und Urteilsfindung – für eine erfolgreiche industrielle Produktion entscheidend. [...] junge Ingenieure können Wichtiges über die im handwerklichen Wissen und Können verborgenen Möglichkeiten lernen, wenn sie erfahrene Handwerker beobachten“ (Ferguson 1993, 63).

gestützten Simulationsmedien. Nur so ist es möglich, von Vorerfahrungen ausgehend neue Erfahrungen zu machen und daraus zu lernen. Diese Forderungen sind noch recht allgemein und bedürfen der Konkretisierung.⁹

4.3 Abstraktheit von Modellen

Wir verstehen Abstraktion als einen Prozess unterschiedlicher geistiger Durchdringung im Sinne Piagets vom konkreten Gegenstand über die Anschauung, Vorstellung, den Begriff zum wissenschaftlich-formalen System. Aus eigener Erfahrung mit technischen Geräten wissen wir jedoch auch, dass das Erreichen der höchst abstrakten Stufe für uns kein Garant für eine kompetente Beherrschung technischer Geräte ist. Wir folgen den Gedanken Böhle/ Milkaus (1988) und ihrem Verständnis von den zwei Seiten des Technikzugangs, dem subjektivierenden und dem objektivierenden. Beide Seiten gilt es nach unserer Vorstellung in einer Modellierungsumgebung zu unterstützen.

Die Abstraktheit der Modelle drückt sich auch unmittelbar in der Art ihrer Stofflichkeit, ihrer Repräsentation aus. Wir unterscheiden hier Gegenstände, Bilder und Texte. Dabei sind Gegenstände greifbar, Bilder anschaulich, und Texte stellen Begriffe, Symbole und formale Systeme dar. Insgesamt betrachtet besitzen unterschiedliche Modellrepräsentationen, seien sie gegenständlicher, bildlicher oder symbolischer Natur, eine *komplementäre* Funktion zueinander, weil sie im Prozess der Abstraktion unterschiedliche Stufen unterstützen.

4.4 Komplexität von Modellen

Unter Komplexität verstehen wir die Anzahl der Komponenten, die Vielfalt der inneren und äußeren Verknüpfungen und die Systematik eines Systems. Technische Sachsysteme können je nach Betrachtung unterschiedlich komplex sein und reichen vom einfachen Bauteil bis hin zu globalen Aggregatverbänden. Je größer dabei die Zahl der unterschiedlichen Subsysteme (Elemente) eines Gesamtsystems und deren materielle, energetische und informationelle Kopplungen sowie der räumlichen und zeitlichen Relationen untereinander wird, desto schwieriger ist es in der Regel, den

9 Die DIN EN ISO 9241 Teil 10 enthält Anforderungskriterien an die Gestaltung rechnergestützter Systeme, wie beispielsweise Erwartungskonformität, Steuerbarkeit, Individualisierbarkeit und Lernförderlichkeit, aus denen sich allerdings nur recht allgemeine Hinweise für eine erfahrungsbezogene Systemgestaltung ableiten lassen. Dabei werden die Besonderheiten von rechnergestützten Lernprozessen nicht speziell berücksichtigt. Insofern ist DIN EN ISO 9241 nur hilfreich für generelle Gestaltungsfragen, insbesondere was die „Informationsdarstellung auf Bildschirmen und ihre Manipulation durch Eingabegeräte“ (Eberleh u. a. 1994, 1) betrifft. Zu den Grenzen der Anwendbarkeit vorfindlicher software-ergonomischer Richtlinien für die Gestaltung von Lernsoftware vgl. Daldrup (1995).

inneren Aufbau oder die Funktion eines solchen Systems zu erfassen und zu modellieren. Aus den Arbeiten Simons (1982) zur Theorie komplexer Systeme lässt sich folgern, dass es bei der Simulation komplexer Systeme hilfreich ist, diese in ihre Subsysteme hierarchisch zu zerlegen. Einzelne Subsysteme können in der Regel dann relativ einfach aufgebaut werden und häufig auch einander ähnlich sein. Dadurch vereinfacht sich der Modellierprozess. Zusätzlich wird die gleichzeitig zu erfassende Informationsmenge wesentlich vermindert, da immer nur einzelne Subsysteme für sich betrachtet werden müssen. Hieraus ergeben sich, insbesondere was die kognitive Verarbeitungs- und Gedächtniskapazität des Modellierenden angeht, *komplexitätsreduzierende Effekte* – obwohl die Komplexität des zu simulierenden Systems im eigentlichen Sinne nicht reduziert, sondern lediglich *selektiv* erfasst und *stückweise* verarbeitet wird.

Eine Möglichkeit, komplexe Systeme der Simulation zugänglich zu machen, besteht dementsprechend darin, Modellkonfigurationen zu verwenden, die eine schrittweise und iterative Vorgehensweise auf verschiedenen Ebenen der Systemkomplexität mit Hilfe unterschiedlicher (*Teil-Modelle*) unterstützen. Für derartige *Mehrebenenmodelle* lassen sich unterschiedliche Konzepte zur Ebenenbildung bezüglich *Aggregation* und *Auslassung* unterscheiden (vgl. Müller 1998).

4.5 Originalbezug von Modellen

Eine wichtige Voraussetzung für die Nützlichkeit eines Simulationsmodells ist die Ähnlichkeit zwischen Modell und Original. Stachowiak (1973) unterscheidet in seiner *Allgemeinen Modelltheorie* zwischen struktureller (formaler) und materialer (inhaltlicher) Angleichung zwischen Original und Modell.

Bei der *strukturellen Angleichung* zwischen Original und Modell liegt eine Abstraktion von den Bedeutungsgehalten der Original- bzw. Modellattribute vor. Ergebnis einer solchen Abstraktion sind „Zahlen und Zahlenverhältnisse, Zeichenkontexte, Strukturen, eben *formale Gegebenheiten*“ (ebd., 141). Die strukturelle Angleichung bezieht sich also auf Attribute, die keine Bedeutungen im Sinne empirischer, realgegenständlicher „Perzeptionsgegebenheiten“ (ebd., 145) repräsentieren, sondern lediglich formal gestaltete Relationsgefüge zwischen Original und Modell beschreiben, wobei die strukturelle Angleichung insbesondere auch quantitative Erfassungsmöglichkeiten von Attributen eröffnet.

Im Gegensatz zur strukturellen repräsentiert die *materiale Angleichung* die bedeutungs- bzw. inhaltsbestimmenden Attribute eines Originals bzw. Modells. Um sagen zu können, wann einem Attribut bzw. seiner symbolischen Repräsentation, die Eigenschaft der „Materialität“ zukommt, bezieht sich Stachowiak auf die Semiotik. Er schreibt dazu:

„Sind nämlich die *strukturellen* Attribute sämtlich durch Prädikate repräsentierbar, für deren semiotisch exakte Definition eine formalisierte Objektsprache (zuzüglich höchstens *einer syntaktischen* Metasprache) genügt, so bedarf die ‚mate-

riale Belegung‘ oder ‚Interpretation‘ jener strukturellen, objektsprachlichen Attribute einer *semantischen* Metasprache, mit deren Hilfe den strukturellen Attributen ‚Bedeutungen‘, d. h. den sie repräsentierenden Prädikaten *Bedeutungszeichen* zugeordnet werden. Anstatt von ‚Bedeutungszeichen‘ soll hier und im folgenden auch [...] von ‚Kodezeichen‘ *gesprochen* werden“ (Stachowiak 1973, 146 f.).

Demzufolge ist ein Attribut genau dann

„als *materiales* Attribut zu betrachten [...], wenn ihm ein semantisch-metasprachliches *Kodezeichen* zugeordnet ist, das seinerseits als Zeichen für ein ‚außersprachliches Referendum‘ steht – dieses mag in der *Bedeutung* (Semantik) oder in dem *Sinn* („Nouetik“) des Kodezeichens oder in *beidem gleichzeitig* bestehen, sie mag auch, sofern hinreichende Eindeutigkeit der Zeichenzuordnung (pragmatisch) gewährleistet scheint, die mit dem Kodezeichen verknüpften *Vorstellungen* („Eidetik“) einbeziehen“ (ebd., 171).¹⁰

Mit dem Begriff der materialen Angleichung ist also die bedeutungs-, sinn- bzw. vorstellungsmäßige Entsprechung zwischen den Inhaltselementen des Abbildungsvorbereiches und des -nachbereiches gemeint.

Analogmodelle sind solche, die eine maximale strukturelle und keine materiale Ähnlichkeit haben, isohyle Modelle sind solche, die maximale inhaltliche, aber keine strukturelle Ähnlichkeit haben, und Kopierungen sind solche, die maximale strukturelle und materiale Ähnlichkeit haben. Für den Lernprozess nehmen wir an, dass auch hier eine Vielfalt und Durchgängigkeit förderlich ist.

4.6 Methode der Simulation

Im gängigen Verständnis erfolgt Modellbildung und Simulation stark theoriegeleitet. Auf der Grundlage einer theoretischen Durchdringung der Aufgabenstellung und „objektiver“ Fakten wird ein Simulationsmodell erstellt, indem dieses mit mehr oder weniger formal-abstrakten Mitteln und Methoden beschrieben und als Rechnermodell implementiert wird. Charakteristisch ist, dass dabei eine an wissenschaftlichen Kriterien orientierte Vorgehensweise angestrebt wird. Das Ziel besteht dabei durchgängig in der Optimierung von Systemen, die sich anschließend in der Praxis bewähren sollen. Die üblichen Phasenkonzepte zum Simulationsablauf, wie beispielsweise nach VDI 3633 (Modellbildung, Experiment, Auswertung, Anwendung), legen ein solches Vorgehen nahe. Man kann dieses als *deduktiv* bezeichnen: vom Allgemeinen, Abstrakten zum Besonderen, Konkreten. Ein erfahrungsbezogenes Vorgehen

¹⁰ Nouetik bezeichnet im weitesten Sinne die Semantik. Eidetik schließt neben der Semantik die Pragmatik mit ein. Zum Gebrauch dieser Begriffe in der Allgemeinen Modelltheorie vgl. Stachowiak (1973, 149), (vgl. auch ebd., Fußnote 108, 197).

folgt aber häufig dem umgekehrten Weg: Auf der Grundlage *subjektiver* Vorerfahrungen und beobachtbarer Gegebenheiten wird ein Simulationsmodell erstellt, das allmählich im Verlaufe des Simulationszyklus sukzessive verfeinert, verallgemeinert und formalisiert wird. Dabei haben auch nichtformale Elemente im Simulationsprozess eine hohe Bedeutung. Dies gilt insbesondere in der Anfangsphase der Simulation, in der es vorrangig darum geht, neue Ideen zu sammeln, auszuprobieren und Schritt für Schritt einen Lösungsweg im Sinne eines explorierenden Handlungsprozesses zu erkunden. Ein solches Vorgehen ist keineswegs ziellos, aber die jeweiligen Handlungsziele bzw. ihre Abfolgen können individuell sehr unterschiedlich sein, weil sie von den jeweils vorhandenen Vorerfahrungen, von Erkenntnisinteressen und Strategien des einzelnen Benutzers abhängen. Man kann dieses Vorgehen als *induktive* Modellbildung und Simulation bezeichnen: vom Besonderen, Konkreten zum Allgemeinen, Abstrakten. Dass im Verständnis dieser Untersuchung einem solchen Vorgehen eine hohe Bedeutung zugemessen wird – nicht nur im didaktischen Kontext, sondern auch im technikwissenschaftlichen Zusammenhang –, wurde schon in den didaktischen und lernpsychologischen Analysen angedeutet.

Wesentliche Elemente einer induktiven Modellbildung und Simulation sind Methoden und Hilfsmittel, die ein erfahrungsorientiertes, vorbegriffliches Vorgehen unterstützen und die die Möglichkeit eröffnen, mit einfachen, „unscharfen“, nichtformalen Modellentwürfen zu beginnen und diese dann nach eigenen Handlungsweisen in detailliertere und auch formale Modellierungen zu überführen. Eine solche Vorgehensweise im Simulationsprozess erfordert in einem hohen Maße die Möglichkeit der Selbststeuerung des Lernprozesses durch den Lernenden. Dabei spielen explorative und entdeckende Lernformen eine herausragende Rolle. Didaktische und lernpsychologische Analysen, insbesondere die über *Erfahrung und Phantasie* (vgl. Müller 1998) haben deutlich gemacht, dass vor allem Spielerisches Probieren und Experimentieren dazu beitragen können, exploratives und entdeckendes Lernen zu unterstützen und anzuregen. In diesem Sinne ist ein *Spielerisches Probieren* und *Experimentieren* als eine besonders erfahrungsbezogene „Vorform“ der Simulation zu betrachten, die – nicht nur im didaktischen Kontext – relevant ist, um Komplexität bewältigen zu können.

Diesem spielerischen und experimentellen Vorgehen ist eine Simulationsmethodik angemessen, die zwischen Struktur-Verhalten-Zweck und Analyse-Konstruktion unterscheidet. Diese Systematik eröffnet eine offenere und für den Lernprozess geeignetere Vorgehensweise. Hierbei zwingt sich keine Richtung auf. Ein Modell oder ein System kann entwickelt werden, indem der Zweck definiert und beschrieben wird, daraus ein Verhalten abgeleitet und dann die Struktur festgelegt wird. Oder ein vorgegebenes System kann analysiert werden, indem seine Struktur simuliert (experimentelle Verhaltenszeugung) und das Ergebnis auf Zweckerfüllung geprüft wird.

Ein Simulationskonzept, das sowohl eine Vielfalt von Modellarten als auch eine möglichst freie Wahl von Übergängen zwischen diesen Modellarten während des

Simulationsprozesses unterstützt, wurde in Müller (1998) als *Mehrdimensionale Simulation* vorgestellt und soll hier in leicht erweiterter Form wiedergegeben werden.

Das Konzept einer *Erweiterten Mehrdimensionalen Simulation* lässt sich als ein fünfdimensionaler Zustandsraum mit den Dimensionen: Modellkomplexität (Detailierung), Modellabstraktheit (gegenständlich, anschaulich, symbolisch), Originalähnlichkeit (formal, inhaltlich), Fokus (Struktur, Verhalten, Zweck) und Umgangsart (analytisch, konstruktiv) darstellen. Beim Lernen kann intuitiv sprunghaft oder auf systematischen Pfaden dieser Lernraum durchschritten werden.

4.7 Benutzungsoberfläche

Aus lernpsychologischen und didaktischen Analysen (vgl. Müller 1998, 105 ff.) lässt sich die Forderung ableiten, dass störende Einflüsse rechnergestützter Systeme auf den Lernprozess so weit wie möglich minimiert werden sollten. Dies heißt insbesondere, dass das Handeln des Lernenden sich nicht auf die Bedienung und die Beobachtung der Rechnerperipherie beschränken darf. Entsprechend sollte der Rechner stärker eine *sekundäre* Rolle als Berechnungs- und Analyseinstrument im Hintergrund übernehmen, *als Rechner im Rücken* des Benutzers (Bruns u. a. 1993) zu sein. Damit soll ein Leitbild umschrieben werden, bei dem nur zu einem sehr begrenzten Teil über gängige Mensch-Rechner-Schnittstellen wie Eingabetastatur, Maus und optische Ausgabe am Bildschirm interagiert wird. Vielmehr wird angestrebt, dass der Benutzer implizit im Umgang mit den Objekten seiner Umwelt mit dem Rechner in Verbindung tritt. Der Benutzer bleibt ein in der realen Welt Agierender, der im Umgang mit vertrauten realen Objekten rechnerbasierte Funktionen steuert oder abrufen.

Die Idee, Rechner als Lehr- und Lernmittel zu gebrauchen, die im Hintergrund nur bei Bedarf verfügbar sind, läuft dem herrschenden Trend eher zuwider. Der *Rechner im Rücken* bedeutet etwas völlig anderes als eine multimediale Lernumgebung. Bei der heutigen multimedial ausgerichteten Lernsoftware zieht der Bildschirm die ganze Aufmerksamkeit des Benutzers auf sich, hierbei reduzieren sich Lernaktivitäten auf wenige Tätigkeiten, die meist auf die Interaktion mit der Rechner-Peripherie beschränkt sind. Betrachtet man Lehr- und Lernprozesse aus der Perspektive unterschiedlicher sachbezogener, sozialer, herstellender, darstellender, realer und symbolischer Tätigkeitsformen, wie sie Aebli in seiner „Taxonomie bildender Tätigkeiten“ (Aebli 1995) ausführlich dargelegt hat, wird deutlich, dass Multimedia nur eine sehr geringe Menge möglicher lernförderlicher Aktivitäten abzudecken vermag.

5 Prototypische Realisierungen

Erste Ansätze der Realisierung oben genannter Gestaltungsempfehlungen in Lernumgebungen liegen inzwischen vor (vgl. Bruns 1999; Brauer 1999; Müller 1998). Wir führen im Sinne der Verbindung verschiedener Repräsentationsarten (Abstrakti-

onsstufen), Komplexitätsstufen (Detaillierungsgrade) und Originalbezüge (strukturell-material) neuartige Komponenten einer Modellierungs- und Simulationsumgebung ein, die wir, in Anlehnung an die komplexe Zahl, *Komplexes Objekt* nennen (siehe Abbildung 2).

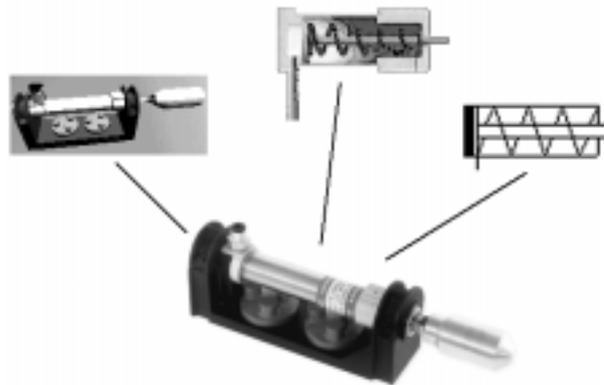


Abb. 2: *Komplexes Pneumatik-Objekt mit Real- und Imaginärteil*

Komplexe Objekte haben eine reale, greifbare Komponente und verschiedene rechnerinterne Repräsentationen, die eine möglichst große Vielfalt im oben beschriebenen Sinne unterstützen. Die einzelnen Teile des komplexen Objekts stehen nun aber nicht beziehungslos nebeneinander, sondern sind über Wirkungsketten eng verbunden. Die Synchronisierung erfolgt über Techniken der Realitätserkennung per Videokamera, sensorisierter Hand oder sensorisierten Objekten. Das Operieren am Realteil bedingt automatisch eine synchrone Veränderung der anderen Komponenten. Durch diese Verbindung von Realität und Virtualität ist es möglich, reale Systeme aufzubauen und synchron dazu ihre immer abstrakter werdenden Repräsentationen zu verfolgen (siehe Abbildung 3 und 4). Lernen kann auf einer Ebene beginnen, die den Vorerfahrungen des Lernenden entspricht, und sich dann auf unbekanntes Gebiet ausweiten und zu neuen Erfahrungen führen. Der Prozess kann in hohem Maße iterativ und explorativ erfolgen.

Der von de Kleer und Braun (1983) beschriebene Envisioning-Prozess, das Ableiten eines Verhaltensspektrums über das iterative zyklische Aufbauen kausaler Strukturen aus der topologischen Struktur eines Gerätes, lässt sich besonders deutlich bei der Erschließung einer Pneumatikschaltung erkennen. Anspruchsvoll sind hier die vielfältigen Verzweigungen und Rückkopplungen der kausalen Wirkungskette in komplexeren Schaltungen. Pneumatik ist als Forschungsfeld besonders geeignet, weil sie stärker noch als die Elektrotechnik auf sinnlich wahrnehmbaren Verbindungen und Wirkungsketten beruht.

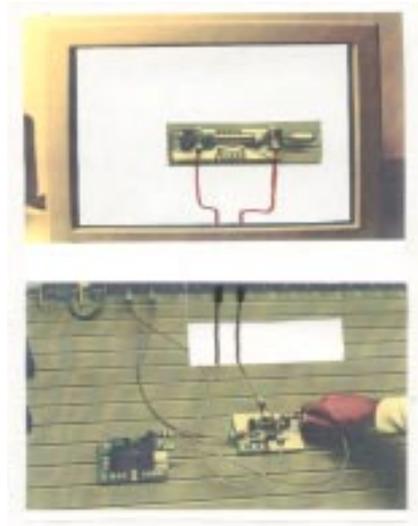


Abb. 3: Verbindung von Virtualität und Realität

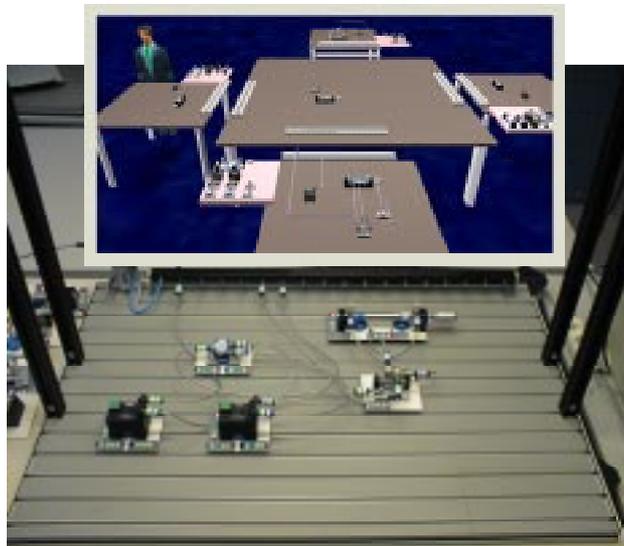


Abb. 4: Verteilte kooperationsunterstützende reale und virtuelle Lernumgebung

Erste empirische Ergebnisse des Einsatzes einer derartigen Lernumgebung in der beruflichen Ausbildung (siehe Abbildung 5) liegen inzwischen vor (Grund/ Grote 1999).



Abb. 5: Einsatz der Pneumatik-Lernumgebung

6 Zusammenfassung

Ausgehend von Erfahrungen mit technischen Systemen in Lern- und Arbeitssituationen wurde aufbauend auf den Lerntheorien von Piaget, Aebli und de Kleer/ Brown ein Gestaltungsrahmen für Modellierungs- und Simulationsumgebungen zur Unterstützung des Lernens technischer Zusammenhänge vorgestellt. Als besonders relevant erwiesen sich die Zielkategorien Handlungsorientierung und Erfahrungsorientierung. Diese sollen durch ein offenes Konzept der individuell angemessenen explorativen Wanderung durch einen Erfahrungsraum unterstützt werden. Der Erfahrungsraum wird durch die Dimensionen Modellkomplexität (Detaillierung), Modellabstraktheit (gegenständlich, anschaulich, symbolisch), Originalähnlichkeit (formal, inhaltlich), Fokus (Struktur, Verhalten, Zweck) und Umgangsart (analytisch, konstruktiv) aufgespannt. Erste Realisierungen, die diesen Gestaltungsleitlinien folgen, wurden als Pneumatiklernumgebungen vorgestellt. Sie öffnen ein breites Feld für empirische Untersuchungen und weitere Anwendungen.

Danksagung

Die Ausführungen beruhen in wesentlichen Teilen auf der Dissertation von Dieter Müller (1998), sind aber angeregt und getragen von vielen Mitentwicklerinnen, Ent-

wickeln und Diskutanten unseres Konzeptes. Wir danken Achim Heimbucher, Volker Brauer, Hermann Gathmann, Jürgen Huyer, Eva Hornecker, Hauke Ernst, Bernd Robben, Kai Schäfer, Kai Schmudlach, Martin Faust und unseren zahlreichen studentischen Helfern. Nicht zuletzt aber danken wir auch unseren Schülern und Lehrern der beruflichen Schulen für ihre Experimentierbereitschaft.

Literatur

a) Verwendete Literatur

- Aebli, H. (1993) Denken, das Ordnen des Tuns. Band I: Kognitive Aspekte der Handlungstheorie. 2. Aufl. Stuttgart.
- Aebli, H. (1994a) Denken, das Ordnen des Tuns. Band II: Denkprozesse. 2. Aufl. Stuttgart.
- Aebli, H. (1994b) Zwölf Grundformen des Lehrens. Eine Allgemeine Didaktik auf psychologischer Grundlage. 8. Aufl. Stuttgart.
- Aebli, H. (1995) Grundlagen des Lehrens. Eine Allgemeine Didaktik auf psychologischer Grundlage. 3. Aufl. Stuttgart.
- Bateson, G. (1984) Geist und Natur – Eine notwendige Einheit. Frankfurt/ Main.
- Böhle, F./ Milkau, B. (1988) Vom Handrad zum Bildschirm. Eine Untersuchung zur sinnlichen Erfahrung im Arbeitsprozeß. Frankfurt/ Main, New York.
- Böhle, F./ Schulze, H. (1997) Subjektivierendes Arbeitshandeln. Zur Überwindung einer gespaltenen Subjektivität. In: Schachtner 1997, 26–64.
- Brauer, V. (1999) Gegenständliche Benutzungsschnittstellen für die Mensch-Computer-Interaktion. (Dissertation) Bremen.
- Bremer, R. (1997) Schritte auf dem Weg zur gestaltungsorientierten Berufsbildung. Ein Portrait des Instituts Technik & Bildung anlässlich seines 10jährigen Bestehens. Bremen.
- 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. (1997) Sinnlichkeit in der Technikgestaltung und Technikhandhabung. Ein konstruktiver Ansatz. In: Schachtner 1997, 191–207.
- Bruns, F. W. (1999) Complex Construction Kits for Engineering Workspaces. In: N. A. Streit/ J. Siegel/ V. Hartkopf/ S. Konomi (Hg.). Cooperative Buildings – Integrating Information, Organizations and Architecture. Second Int. Workshop CoBuild'99. Lecture Notes of Computer Science 1670. Heidelberg, 55–68.
- Bruns, F. W./ Heimbucher, A./ Müller, D. (1993) Ansätze einer erfahrungsorientierten Gestaltung von Rechnersystemen für die Produktion. artec-Arbeitspapier 21. Universität Bremen.
- Bugge, F. (1993) Die Entwicklungspsychologie Jean Piagets. Stuttgart, Berlin, Köln.

- Daldrup, U. (1995) Lernsoftware gestalten – Wege zu ergonomischen Benutzungsoberflächen. In: U. Daldrup (Hg.). *Menschengerechte Software-Gestaltung – Konzepte und Werkzeuge auf dem Weg in die Praxis*. Stuttgart, 3–7.
- De Kleer, J./ Brown, J. S. (1983) Assumptions and Ambiguities in Mechanistic Mental Models. In: D. Gentner/ A. L. Stevens (Eds.). *Mental Models*. Hillsdale, N J.
- DIN EN ISO 9241 (1995) Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten – Teil 10: Grundsätze der Dialoggestaltung. Entwurf.
- Eberleh, E./ Oberquelle, H./ Oppermann, R. (1994) *Einführung in die Software-Ergonomie. Gestaltung graphisch-interaktiver Systeme. Prinzipien, Werkzeuge*. Berlin, New York.
- Eicker, F. (1983) *Experimentierendes Lernen. Ein Beitrag zur Theorie beruflicher Bildung und des Elektrotechnikunterrichts*. Bad Salzdetfurth.
- Ferguson, E. S. (1993) *Das innere Auge. Von der Kunst des Ingenieurs*. Basel, Boston, Berlin.
- Fischer, M. (1996) Überlegungen zu einem arbeitspädagogischen und –psychologischen Erfahrungsbegriff. In: ZBW – Zeitschrift für Berufs- und Wirtschaftspädagogik. 92. Band. Heft 3. Stuttgart, 227–244.
- Forbus, K. (1984) Qualitative Process Theory. In: *AI Journal*. Vol. 24, 85–168.
- Gentner, D./ Stevens, A. L. (Eds.) (1983) *Mental Models*. Hillsdale, N J.
- Grund, S./ Grote, G. (1999) Auswirkungen eines gegenständlich-virtuellen Lernumfelds auf Wissen und Problemlösen. *Arbeit. Zeitschrift für Arbeitsforschung, Arbeitsgestaltung und Arbeitspolitik*. Wiesbaden, 321–317.
- Hacker, W. (1994) Arbeits- und organisationspsychologische Grundlagen der Software-Ergonomie. In: Eberleh/ Oberquelle/ Oppermann 1994, 53–93.
- Klewitz, E. (1989) *Zur Didaktik des naturwissenschaftlichen Sachunterrichts: eine Untersuchung von Unterrichtsmodellen am Beispiel von „Schwimmen und Sinken“ vor dem Hintergrund der genetischen Erkenntnistheorie*. Essen.
- Kron, F. W. (1994) *Grundwissen Pädagogik*. 4. Aufl. München.
- Larkin, J. H. (1983) The Role of Problem Representation in Physics. In: Gentner/ Stevens (Hg.). *Mental Models*. London, 75 ff.
- Möller, K. (1987) *Lernen durch Tun. Handlungsorientiertes Lernen im Sachunterricht der Grundschule*. Frankfurt/ Main u. a.
- Montada, L. (1982) Die geistige Entwicklung aus der Sicht Jean Piagets. In: Oerter/ Montada 1982.
- Müller, D. (1998) *Simulation und Erfahrung*. (Dissertation) Bremen.
- Norman, D. A. (1983) Some Observations on Mental Models. In: D. Gentner/ A. L. Stevens (Eds.). *Mental Models*. Hillsdale, N J.
- Oerter, R./ Montada, L. (1982) *Entwicklungspsychologie*. Ein Lehrbuch. München.
- Papert, S. (1994) *Revolution des Lernens: Kinder, Computer, Schule in einer digitalen Welt*. (Originaltitel: *The Childrens's Machine*). Hannover.

- Piaget, J. (1969) La formation du symbole chez l'enfant. Neuchatel, 1968 (Deutsch.: Nachahmung, Spiel und Traum. Stuttgart, 1969). Zit. nach Möller 1987, 195.
- Piaget, J. (1973) Das Erwachen der Intelligenz beim Kinde. Stuttgart.
- Rauner, F. (1985) Experimentierendes Lernen in der Technischen Bildung. In: Steffens 1985.
- Rauner, F./ Eicker, F. (1997) Experimentierendes Lernen im Elektrotechnik-Unterricht. In: Bremer 1997, 242–248. Zuerst erschienen in: A. Lipsmeier/ F. Rauner (Hg.) (1996). Beiträge zur Fachdidaktik Elektrotechnik. Stuttgart, 201–208.
- Russel, B. (1948) Physik und Erfahrung. Zürich.
- Schachtner, C. (1997) Technik und Subjektivität. Frankfurt/ Main.
- Schäfer, K./ Brauer, V./ Bruns, F. W. (1997) A new Approach to Human-Computer Interaction – Synchronous Modelling in Real and Virtual Spaces. Proceedings of Designing Interactive Systems (DIS '97). Amsterdam.
- Scherler, K. H. (1979) Sensomotorische Entwicklung und materiale Erfahrung. Begründung einer vorschulischen Bewegungs- und Spielerziehung durch Piagets Theorie kognitiver Entwicklung. 2. Aufl. Schorndorf. Zit. nach Möller 1987.
- Schulz, H.-D. (1992) Handlungslernen in der beruflichen Bildung. Darstellung eines Lernkonzepts und Überprüfung an ausgewählten Beispielen betrieblicher Berufsbildung. (Dissertation) Universität Bremen.
- Simon, H. A. (1982) The Sciences of the Artificial. Cambridge.
- Stachowiak, H. (1973) Allgemeine Modelltheorie. Wien, New York.
- Steffens, K. (1985) Experimentelle Statik an Fachhochschulen. Didaktik, Technik, Organisation, Anwendung. Hochschuldidaktische Materialien.
- Wetzel, F. G. (1980) Kognitive Psychologie. Eine Einführung in die Psychologie der kognitiven Strukturen von Jean Piaget. Weinheim.

b) Weiterführende Literatur

- Baumgartner, P./ Payr, S. (1999) Lernen mit Software. Innsbruck.
- Böhle, F./ Milkau, B. (1988) Vom Handrad zum Bildschirm. Eine Untersuchung zur sinnlichen Erfahrung im Arbeitsprozeß. Frankfurt/ Main, New York.
- Brauer, V. (1999) Gegenständliche Benutzungsschnittstellen für die Mensch-Computer-Interaktion. (Dissertation) Bremen.
- 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. (1999) Complex Construction Kits for Engineering Workspaces. In: N. A. Streitz/ J. Siegel/ V. Hartkopf/ S. Konomi (Hg.). Cooperative Buildings – Integrating Information, Organizations and Architecture. Second Int. Workshop CoBuild'99. Lecture Notes of Computer Science 1670. Heidelberg, 55–68.

- Fishwick, P. A. (1995) *Simulation Model Design and Execution: Building Digital Worlds*. Englewood Cliffs, New Jersey.
- Issing, L. J./ Klimsa, P. (Hg.) (1997) *Information und Lernen mit Multimedia*. Weinheim.
- Kerres, M. (2001) *Multimediale und telemediale Lernumgebungen. Konzeption und Entwicklung*. München.
- Müller, D. (1998) *Simulation und Erfahrung*. (Dissertation) Bremen.
- Rügge, I./ Robben, B./ Hornecker, E./ Bruns, F. W. (Hg.) (1998) *Arbeiten und Begreifen: Neue Mensch-Computer-Schnittstellen*. Münster.
- Schulmeister, R. (1997) *Grundlagen hypermedialer Systeme. Theorie-Didaktik-Design*. München.
- Weiser, M. (1991) *Computer for the 21st century*. In: *Scientific American*, 265, 3. September 1991, 94–104.