

Zur Diskussion gestellt

Modellierung, Simulation, Visualisierung: Zu aktuellen Aufgaben der Informatik¹

Hartmut Wedekind, Günter Görz,
Rudolf Kötter, Rüdiger Inhetveen

Zusammenfassung Zahlreiche Anwendungen der Informatik erfordern die Erstellung oder Bearbeitung von Modellen konkreter Abläufe oder Prozesse, zu deren erfolgreicher Durchführung ein Einblick in die grundlegenden Verfahrensschritte der Modellierung unabdingbar ist. Die Verfasser versuchen, im vorliegenden Text über eine genaue Beschreibung der Aufgaben auf einem hohen Abstraktionsniveau zu einer einschlägigen (Meta-)Terminologie zu gelangen und zu zeigen, unter welchen Bedingungen sich unterschiedliche Modelltypen auch für nachfolgende Verarbeitungsschritte (Simulation und Visualisierung) nutzen lassen. Die zentralen Methoden werden mit einigen einfachen Beispielen illustriert.

Schlüsselwörter Modellierung, Simulation, Visualisierung, Methodologie

Summary In many applications of Computer Science specifications and implementations of process models are designed requiring detailed knowledges of basic modelling procedures. In this paper the authors develop a specific meta-terminology on a high level of abstraction by using the background of various disciplines. Different model types and their particular applications (simulation and visualization) are outlined. Some illustrative examples are used to explain the basic methods.

Key words Modelling, Simulation, Visualisation, Methodology

Computing Classification System H.1.1, I.6.0, I.6.1, I.6.5, J.6

1. Vorbemerkung

Eine der grundlegenden Aufgaben der Informatik besteht darin, die aus den Fachwissenschaften stammenden Modelle so umzuschreiben, daß sie mit Hilfe eines Computers dargestellt und bearbeitet werden können. Genauer heißt dies, daß die vorgegebenen Modelle

in eine Fassung gebracht werden müssen, für die sich *effektive Prozeduren* angeben lassen. Dieses Geschäft bringt dort besondere Schwierigkeiten mit sich, wo die Modelle aus den Fachwissenschaften in einer Darstellung vorliegen, die sich nicht unmittelbar in die Sprache der Informatik übersetzen läßt. Hier muß das Ausgangsmodell zunächst *rekonstruiert* werden, d.h. es muß von dem fachwissenschaftlichen Modell ein maschinell ausführbares Modell erstellt werden.

Ein wesentlicher Einsatzbereich der mit Mitteln der Informatik rekonstruierten Modelle ist die *Simulation*. Dabei liegen für die Informatik besondere Herausforderungen zum einen in der Bewältigung der rechentechnischen Schwierigkeiten, die komplizierte und komplexe Systeme mit sich bringen, zum anderen in der sorgfältigen und korrekten Modellierung der Systeme selbst, insbesondere bei der Bewältigung von Verifikations- und Testproblemen. Hier (aber natürlich nicht nur hier) kommt es zusätzlich darauf an, die vom Computer ausgeführten prozeduralen Schritte und ihre Ergebnisse auf einem bestimmten Abstraktionsniveau symbolisch oder graphisch (*bildlich*) zu präsentieren.

Gelingt die Rekonstruktion nur unzulänglich oder scheitert sie gänzlich, dann ist es erforderlich, daß Fachwissenschaften und Informatik im Sinne einer interdisziplinären Forschung nach einer Modifikation des Ausgangsmodells suchen. Dabei wird sich häufig ein Erfolg nur durch eine Präzisierung der Fachterminologie, eine Abänderung des Modellierungsansatzes oder eine Erweiterung der von Seiten der Informatik eingesetzten Methoden erreichen lassen. In diesem Vorgehen steckt die Chance, daß nicht nur bestehendes Wissen vertieft oder verfeinert wird, sondern sich neue Erkenntnisinteressen herausbilden - und zwar sowohl in den Fachwissenschaften wie in der Informatik. Solche Bildungsprozesse kennen wir z.B. aus dem Konstruktionswesen, aus der Theorie der nichtlinearen Systeme oder den Neurowissenschaften. Hier liegt z.B. auch die eigentliche Bedeutung der neuen interdisziplinären Arbeitsrichtung „*Computational Science*“. Wesentlich ist bei diesem Prozeß, daß Informatik und beteiligte Fachwissenschaften über eine *gemeinsame Sprache* verfügen, mit deren Hilfe sie über die zu erbringenden Leistungen sprechen können. Wie die vorstehenden Ausführungen schon erahnen lassen, werden dabei die Begriffe „Modell“, „Simulation“ und „Visualisierung“ eine besondere Rolle spielen.

Um schon an dieser Stelle ein mögliches Mißverständnis auszuräumen, sei ausdrücklich betont, daß man die Modelle einer Theorie oder Disziplin durchaus virtuos handhaben kann, ohne ei-

Hartmut Wedekind

IMMD (Informatik) VI, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Martensstraße 3, 91058 Erlangen

Günter Görz

IMMD (Informatik) VIII, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Am Weichselgarten 9, 91058 Erlangen

e-mail: {wedekind, goerz}@informatik.uni-erlangen.de

Rudolf Kötter, Rüdiger Inhetveen

IIWW, Bismarckstraße 12, 91054 Erlangen

¹Der nachfolgende Aufsatz ist das Ergebnis von Überlegungen, die von den Verfassern im Zusammenhang mit der Einrichtung des Master-Studiengangs „Computational Engineering“ an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg angestellt worden sind.

nen allgemein zufriedenstellenden Begriff von „Modell“ zu besitzen. Aber wenn man über *Modellbildung* und ihre methodischen wie technischen *Grundlagen* sprechen und diese in der Lehre vermitteln möchte, dann wird schnell deutlich, daß die sorgfältige Einführung von Metabegriffen unverzichtbar ist. In diesem Sinne wollen wir die angesprochenen Begriffe so fassen, daß mit ihrer Hilfe Anforderungs- und Leistungsstrukturen beschrieben werden können, welche sich dann durch gemeinsame Forschungs- und Lehrbeiträge zu einer Computational Science inhaltlich wie organisatorisch ausbauen lassen.

2. Der problematische Wortgebrauch von „Modell“ und „Simulation“ im wissenschaftlichen Alltagsleben

In den Fachwissenschaften wird von den Wörtern „Modell“ und „Simulation“ häufig ein nichtterminologischer Gebrauch gemacht. In diesem Sinne versteht man dann unter „Modell“ eine wissenschaftlich halbwegs anspruchsvolle hypothetische Behauptung und unter „Simulation“ die numerische Behandlung von umfangreichen und/oder komplexen Gleichungssystemen. Neben dieser unspezifischen Wortverwendung gibt es in der Informatik zumindest für den Modellbegriff zwei anspruchsvollere Bedeutungszuweisungen, die sich am Sprachgebrauch der Mathematik bzw. der Physik und der ihnen zugrundeliegenden „Hausphilosophien“ orientieren.

2.1. Das formale Modellverständnis der Mathematik und der theoretischen Informatik

In der Mathematik wird der Modellbegriff in der Regel nur im Zusammenhang mit strukturtheoretischen Ansätzen gebraucht. Ausgehend von einem Axiomensystem A , welches aus einer bestimmten Anzahl von Aussageschemata besteht, kommt man, der herrschenden Sicht folgend, zu einem *Modell* M dieses Axiomensystems, indem man seine Aussageschemata *interpretiert* (das Modell M stellt eine *Belegung* von A dar). Damit ist gemeint, daß man die Variabilitäts- oder Gegenstandsbereiche V der Quantoren festlegt und den Relatoren R , die die Beziehungen zwischen den Elementen von V herstellen, eine bestimmte Bedeutung gibt, so daß die dadurch erzeugten Aussagen den Bedingungen des Axiomensystems gehorchen und als „wahr“ gelten müssen. Die Gegenstandsbereiche V werden also durch die Relatoren R in einer durch das Axiomensystem A festgelegten Weise strukturiert; man sagt, daß zwei Axiomensysteme A und B die gleiche *Struktur* darstellen, wenn jedes Modell M von A auch Modell von B ist und umgekehrt. Deshalb wollen wir hier von Modellen als „*Strukturmodellen*“ sprechen.

Problematisch bei diesem „Standard-View“ ist in erster Linie der vage materiale Wahrheitsbegriff. Einerseits wird gefordert, daß zu „Strukturen“ immer inhaltlich interpretierte Modelle gehören, andererseits bleibt aber offen, was zur „inhaltlichen“ Mathematik gehören und wie sich deren materiale Richtigkeit zeigen soll; dies ist offensichtlich Sache eines intuitiven, durch die Sozialisation des Mathematikers geprägten Verständnisses, welches nicht durch methodologische Kriterien gestützt wird.

Strukturmodelle in dem soeben skizzierten *strengen Sinne* gibt es nur in Mathematik und Logik (vgl. Thiel 1995). Zwar hat sich auch in mathematisierten empirischen Wissenschaften, insbesondere in der Physik, die Redeweise vom „Modell als Belegung einer Struktur“ eingebürgert; jedoch sind die Axiomensysteme, auf die man sich hier bezieht, bei physikalischen Theorien nur „formales Halbzeug“, d.h. sie enthalten von Anfang an sowohl interpretierte wie schematische Bestandteile. Durch die als Axiomensystem gedeuteten Grundgleichungen einer physikalischen Theorie werden die Variablen und Parameter in ihrem Charakter als physikalische Größen festgelegt und ihre Verknüpfung in formaler (z.B. algebraischer oder topologischer) Hinsicht bestimmt (vgl. Falk 1990). Bei der „Interpretation“ werden dann in die Grundgleichungen an die Stelle der schematischen Ausdrücke zulässige Funktionen eingesetzt, wodurch man ein physikalisches Strukturmodell gewinnt; dieses hat einen im weiteren Sinne hypothetischen Charakter (Naturgesetz). Werden dann noch die Parameter (Randbedingungen) und die Variablen in bestimmter Weise (Anfangsbedingungen) numerisch belegt, erhält man eine Hypothese im engeren Sinne.

Am Beispiel der Physik kann man besonders gut erkennen, wie in den mathematisierten empirischen Wissenschaften zwei grundsätzliche Vorstellungsweisen aus der Mathematik aufgenommen und vermischt werden: einerseits sieht man aus der formalistischen Perspektive die Grundgleichungen einer Theorie nur als ein Stück Strukturmathematik an und behandelt sie in diesem Sinne wie andere Axiomensysteme auch (vgl. Ludwig 1978; Willems 1989); andererseits sieht man aus einer vor- oder besser: nichtformalistischen Perspektive die Grundgleichungen einer Theorie als Axiome im alten, an der klassischen euklidischen Geometrie orientierten Sinne an und behandelt sie als die Deduktionsanfänge der Theorie (so in vielen Physik-Lehrbüchern).

In der Informatik stößt diese formale Modellauffassung, die vor allem in der theoretischen Informatik beheimatet ist, mit einem Modellverständnis zusammen, das stark inhaltlich geprägt ist und aus den Anwendungsfeldern der Informatik stammt, also im wesentlichen aus den Natur-, Sozial- und Ingenieurwissenschaften. Dort steht „Modell“ für eine besondere Beschreibungsweise empirischer Vorgänge, wobei diese Beziehung meistens im Rahmen einer naiv-realistischen Erkenntnistheorie reflektiert wird.

2.2. Das naiv-realistische Modellverständnis

Als exemplarisch für diese Art des Modellverständnisses können die Ausführungen von Kowalk (1996) gelten, auf die wir deshalb etwas näher eingehen wollen. Kowalk (S. 30) definiert „Modell“ als „eine Zusammenfassung von Merkmalen eines realen (oder empirischen) künstlichen Systems sowie eine Festlegung der Beziehungen zwischen diesen Merkmalen; da ein Modell niemals alle Merkmale eines Systems umfassen kann, ist ein Modell eine Abstraktion eines realen Systems“.² Als „System“ gilt für ihn „eine räumlich abgeschlossene, logisch zusammengehörende und zeitlich begrenzte Einheit, die voneinander abhängende Komponenten umfaßt“ (S. 27), erläuternd fügt er hinzu: „Systeme sind im allgemeinen komplexe Gebilde, deren vollständige Beschreibung schwierig oder unmöglich ist. Die Wissenschaften zeichnen sich gerade dadurch aus,

² Als „Abstraktion“ gilt für Kowalk (S. 30) „eine Vereinfachung eines realen Systems durch Reduzierung auf solche Teile, die für die jeweilige Fragestellung wesentlich sind.“

daß sie *Modelle* entwickeln, in denen die untersuchten Systeme auf relevante Merkmale reduziert werden; die Diskussion über diese Systeme geschieht somit in diesem Merkmalsraum, also in dem Modell; Ergebnisse solcher Untersuchungen werden dann aus dem Modell wieder auf das reale System projiziert“ (S. 28). Unter „*Simulation*“ versteht er schließlich die numerisch approximative Behandlung von Modellen, deren mathematische Darstellung nicht auf geschlossene Lösungen führt (S. 31, 35); wir werden darauf später noch zurückkommen.

Diese Vorschläge von Kowalk sind nun in mehrerer Hinsicht problematisch. So muß uns, um von einem Modell reden zu können, vorher „etwas“ als System gegeben sein. Fatal ist dabei, daß wir nach Kowalk eigentlich nichts als System erkennen können, da wir prinzipiell nicht in der Lage sind zu beurteilen, wann die *Abgeschlossenheitsbedingung* erfüllt ist. Auch die geforderte „logische Zusammengehörigkeit“ offenbart sich nicht unmittelbar. Ein räumlicher Zusammenhang mag sich noch durch bloßen Augenschein wahrnehmen lassen, eine logische Beziehung dagegen nicht; diese läßt sich nur zwischen Begriffen und Sätzen, nie aber zwischen den durch die Begriffe und Sätze bezeichneten bzw. dargestellten Gegenständen und Sachverhalten herstellen. Was immer wir wahrnehmen, es ist kein System, sondern bestenfalls etwas, was sich als System beschreiben läßt - und dies ist ein gewaltiger Unterschied. Deshalb stellt die Forderung, mit einem sprachlichen Modell ein Stück „der Wirklichkeit“ zu vereinfachen, auch einen sog. „Kategorienfehler“ dar: Mit *sprachlichen* Mitteln lassen sich grundsätzlich nur *sprachliche* Darstellungen vereinfachen.

Der Grund, warum dieser schlichte abbildungstheoretische Realismus trotz seiner offensichtlichen Schwächen so weit (nicht nur in den Naturwissenschaften!) verbreitet ist, liegt wohl darin, daß der entscheidende Schritt, der dem Modellieren vorausgeht, als relativ unproblematisch gilt und die meisten Wissenschaftler deshalb meinen, auf eine nähere Reflexion verzichten zu können. Dabei ist offensichtlich, daß Naturwissenschaftler es nie mit einer „Realität“ zu tun haben, der man sich unvermittelt und unbefangen stellen könnte; ihre Realität ist immer durch disziplinspezifische Versuchs- und Beobachtungskontexte gegeben, in die man aber gewissermaßen von Studienbeginn an hinein sozialisiert wird, so daß man bei dem Stichwort „Realität“ im Grunde genommen doch nur an *Beschreibungen* disziplinrelevanter Sachverhalte denkt. D.h. jede Erstellung eines Modells baut in den Naturwissenschaften auf einer umfänglichen Beschreibung des zu modellierenden Sachverhalts auf: Wer einen physikalischen Sachverhalt modelliert, greift auf Beschreibungen eines Versuchsaufbaus zurück, auf Meßprotokolle und daraus verfertigte Datensätze; wer Verkehrsabläufe modelliert, hat Straßenkarten vorliegen sowie Ergebnisse von Verkehrszählungen und -befragungen usw. Derartige Beschreibungen sind es genau genommen, die zu Modellen umgeschrieben, vereinfacht und abstrakt gefaßt werden.

Die Frage, was hier „umfängliche Beschreibung“ heißen soll, führt uns zu einer weiteren Schwäche des naiv-realistischen Ansatzes. Bei Kowalk sieht es so aus, als müsse der Mensch abstrahieren und vereinfachen, weil die Welt „eigentlich“ für sein Auffassungsvermögen zu kompliziert und komplex ist. Wenn wir uns Modelle in den Wissenschaften aber näher ansehen, dann können wir feststellen, daß sie nicht aus dieser existenziellen Not des Menschen geboren werden, sondern sich bestimmten, theorieinduzierten Fragen verdanken. So bestimmt sich denn auch das Maß für die Umfänglichkeit der Ausgangsbildung, die einem Modell zugrunde liegt, nach dem *Forschungsprogramm*³ derjenigen Theorie, in deren

Kontext das Modell erstellt werden soll. Dieses Forschungsprogramm liefert die Beschreibungssprache, die Beschreibungsstandards und die Erklärungsschemata, in seinem Rahmen werden nicht zuletzt auch die Erwartungen formuliert, die der Arbeit an einem Modell vorausgehen. Modellieren ist also eine Tätigkeit, die nach zwei Seiten hin ausgerichtet ist: zum einen muß sich ein (gutes) Modell den empirischen Beschreibungen fügen, zum anderen den theoretischen Vorgaben. Wir wollen dieses Verhältnis noch ein wenig näher untersuchen.

3. Idealmodelle

3.1. Deskriptive und technische Idealmodelle

Gehen wir von einer relativ zum Forschungsprogramm einer Disziplin möglichst umfassenden *Beschreibung* eines Sachverhalts aus. An dieser Beschreibung, die sich z.B. in Protokollen von Experimenten oder Feldbeobachtungen verkörpert, werden nun bestimmte Veränderungen, sog. „*Idealisierungen*“ vorgenommen: Wertverläufe werden geglättet, unterschiedliche Ausprägungen eines Merkmals in einer Individuengruppe durch den Mittelwert ersetzt, bestimmte Einflüsse als „vernachlässigbar“ unterdrückt. Mit solchen Idealisierungen soll zweierlei erreicht werden: zum einen möchte man eine relativ einfache und übersichtliche Darstellung eines empirischen Sachverhalts geben, zum anderen den Anschluß an einschlägige theoretische Strukturen erreichen. Das Ergebnis einer solchen Idealisierung soll *deskriptives Idealmodell* heißen. Gelingt es, das deskriptive Idealmodell eines Sachverhalts so zu erstellen, daß es zugleich Strukturmodell einer Theorie ist, dann gilt der mit dem Strukturmodell verbundene hypothetische Geltungsanspruch als bestätigt und der Sachverhalt als *durch die Theorie beschrieben bzw. erklärt*. Läßt sich ein deskriptives Modell dagegen nicht oder nur unter nicht hinnehmbaren Manipulationen an ein Strukturmodell

³ Dieser Begriff geht auf den ungarisch-britischen Wissenschaftshistoriker und -theoretiker Imre Lakatos (1922-1974) zurück, der damit verständlich machen wollte, wie wissenschaftliche Entwicklung verläuft. In erster Linie hat er an eine Programmform gedacht, die aus einem Komplex von disziplinär (relativ) festen Hypothesen und Heuristiken besteht, aus deren Befolgung der wissenschaftliche Satzbestand einer Disziplin aufbaut. Im einzelnen besitzt ein solches Forschungsprogramm einen sog. harten Kern, gebildet aus grundlegenden Prinzipien und theoretischen Modellannahmen, durch welche festgelegt wird, was in dieser Disziplin als eine korrekte Beschreibung und was als ein erklärungs-fähiger bzw. -bedürftiger Sachverhalt zu gelten hat. Neben diesem harten Kern nimmt Lakatos für das Forschungsprogramm auch Verbotsregeln („negative Heuristik“) und Gebotsregeln („positive Heuristik“) an. Die Verbotsregeln besagen, daß Hypothesen aus dem harten Kern des Forschungsprogramms nicht angegriffen werden dürfen. Die Gebotsregeln dagegen sind eine oft nur teilweise explizit ausgedrückte Reihe von Vorschlägen und Hinweisen. Damit wird eine Forschungsstrategie umschrieben, die der wissenschaftlichen Tätigkeit eine gewisse Stabilität verleiht, da die Hürde für ernstzunehmende Widerlegungsversuche und Einwände hoch angesetzt ist. Ein Forschungsprogramm im Sinne von Lakatos ist dann erfolgreich, wenn es neue empirische Tatsachen vorauszusagen vermag und dadurch wissenschaftliches Wachstum erlaubt (vgl. Lakatos 1974, Luft/Kötter 1994).

anpassen, obwohl der Sachverhalt potentiell theoriefähig ist, dann steht man vor einem tieferen wissenschaftlichen Problem (das sich u.U. zu einer „Anomalie“ im Kuhnschen Sinne auswachsen kann).

Sehen wir uns diesen Zusammenhang an einem ganz einfachen Beispiel an. Angenommen, man interessiert sich für das Schwingungsverhalten einer Feder und möchte Frequenz und Amplitude der Federschwingung bei verschiedenen Belastungen untersuchen, wobei die „Belastung“ durch die Masse der Körper repräsentiert wird, die jeweils an die Feder angehängt werden. Um den Weg verfolgen zu können, den ein Probekörper zurücklegt, projiziert man die Federschwingung auf einen gleichförmig vorbeiziehenden Papierstreifen. Nach einer Einschwingphase wird sich für einige Durchgänge das ziemlich genaue Bild einer Sinusschwingung ergeben, welche im weiteren Verlauf immer stärker gedämpft wird. Das Bild auf dem Papierstreifen stellt die Beschreibung des Vorgangs dar, „Idealisieren“ heißt dann in diesem Zusammenhang z.B., die sich für verschiedene Belastungen ergebenden Abschnitte mit „reiner“ Sinusschwingung herauszuschneiden; nur diese werden dann bezüglich der Anfangsfragestellung verglichen, wodurch man zu einer einfachen Fassung des Gesetzes für das Federpendel kommt (deskriptives Idealmodell). Dieses Ergebnis kann man auch erhalten, indem man die Newtonschen Grundgesetze (welche die Struktur der Newtonschen Mechanik darstellen) entsprechend belegt, also insbesondere in das zweite Newtonsche Gesetz für den schematischen Buchstaben „ K “ das Kraftgesetz $K = -\alpha x$ einsetzt. Man erhält dann die bekannte Differentialgleichung, deren Lösung das Strukturmodell der Federschwingung ergibt, welches für geeignete Konkretisierungen der Rand- und Anfangsbedingungen auf die idealisierte Beschreibung führt, die man auch auf experimentellen Wege erhalten hat. Man kann jetzt noch einen Abstraktionsschritt weiter gehen: Fordert man, daß in der Schwingungsgleichung nicht nur mechanische Größen, sondern allgemein physikalische Größen überhaupt verknüpft sind, dann erhält man das allgemeine Modell des „harmonischen Oszillators“, durch den eine bestimmte *Schwingungsform* (gleichgültig ob in Mechanik, Elektrodynamik oder Kernphysik) beschrieben wird.

In den Ingenieurwissenschaften haben wir es nun noch mit einem besonderen Modellierungsverfahren zu tun. Hier tritt häufig neben die Stelle einer theoretischen Struktur, die mit einem Modell zu belegen ist, ein Satz von *technischen Funktionsnormen*. *Technische Idealmodelle* beschreiben dann einen technischen Aufbau oder Ablauf unter der Vorgabe, daß alle Bestandteile ihren technischen Funktionsbestimmungen *in idealer Weise* gehorchen. Konstruktionspläne oder Ablaufplanungen sind typische Beispiele für technische Idealmodelle von Gebäuden, Geräten oder Abläufen.⁴ Bei der technischen Leistungskontrolle spielt dann die Konfrontation des einschlägigen technischen Idealmodells mit dem deskriptiven Modell, welches aus den im Umgang mit dem technischen Objekt gewonnenen Erfahrungswerten erzeugt wurde, eine entscheidende Rolle. Durch die Entwicklung von CAD/CAM-Verfahren ist der Computer zu einem unersetzlichen Werkzeug bei der Erstellung von technischen Idealmodellen in den Ingenieurwissenschaften geworden.

⁴Die Verknüpfung von technischen Idealmodellen mit deskriptiven Idealmodellen aus den Naturwissenschaften zu Zwecken visueller Darstellung bildet z.B. ein Kernthema im Erlanger SFB "Modellbasierte Analyse und Visualisierung komplexer Szenen und Sensordaten"; vgl. SFB 603.

3.2. Simulationsmodelle

Mit „Simulation“ meint man im allgemein entweder die *physische* Modellierung eines Systemverhaltens, auf dessen Ablauf und Ergebnis der Simulator keinen direkten Einfluß nehmen kann bzw. will (*Realsimulation*, auf sie wollen wir im weiteren nicht eingehen) oder aber dessen *beschreibende* Darstellung mit Hilfe eines Computers (*Simulationsmodell*). Als „System im weiteren Sinne“ oder „physikalisches System“ gilt dabei (a) eine Menge von Elementen (Systembestandteilen), die (b) durch bestimmte Ordnungsbeziehungen miteinander verbunden und (c) durch klar definierte Grenzen von ihrer Umwelt geschieden sind; von „System im engeren Sinne“ oder „*technischem System*“ spricht man, wenn sowohl die Außenwirkung des Systems insgesamt wie auch seine Binnenstruktur (d.h. die Ordnungsbeziehungen der Systembestandteile) durch *Zielfunktionen* bestimmt sind.⁵ Um den Simulationsbegriff etwas genauer zu fassen, ist es zweckmäßig, noch einmal auf das Verhältnis von Strukturmodell, deskriptivem Modell und Experiment in den Experimentalwissenschaften zurückzukommen (vgl. auch Franklin 1989; Wagner 1974).

Wie weiter oben schon angedeutet, muß sich eine *Hypothese* in den Experimentalwissenschaften immer auch als Strukturmodell bestimmter theoretischer Grundannahmen ausweisen lassen bzw. als dessen numerische Spezifikation. Auf der anderen Seite gewinnt man aus der Beschreibung des Experiments, welches der Hypothese zugeordnet wurde, ein deskriptives Idealmodell, das durch den Vergleich mit dem Strukturmodell ein Urteil über die empirische Richtigkeit der Hypothese zu fällen erlaubt. Damit ein Experiment seinen Charakter als Prüfstein empirischer Richtigkeit nicht verliert, darf man natürlich seine Beschreibung nicht willkürlich idealisieren. Dies bedeutet insbesondere, daß jeder Idealisierungsschritt beim Modellaufbau der Tendenz nach mit einer technischen Manipulation im Experiment verbunden werden kann; d.h. das experimentelle Design muß durch geeignete Maßnahmen „näher“ an das Ideal gebracht werden können (eine solche Maßnahme liegt z.B. vor, wenn in einem mechanischen Experiment die Reibung unterdrückt wird).

Sieht man sich nun genauer an, wie aus der protokollarischen Beschreibung eines Experiments ein deskriptives Idealmodell erstellt wird, so wird man feststellen können, daß bei diesem Übergang die *technische Seite* der Realisierung von Rand- und Anfangsbedingungen ihre Bedeutung verliert, d.h. die der Beschreibung des Experiments noch eigene technische Individualität (hier wird ja stets von einem konkreten experimentellen Aufbau und örtlich wie zeitlich bestimmten Meßergebnissen gesprochen) ist im deskriptiven Idealmodell ausgelöscht. Dieses stellt letztlich nur eine Beziehung zwischen Größen dar, der nicht entnommen werden kann, *wie* funktionale Zusammenhänge oder Wertverläufe technisch realisiert werden (konkret: mit welchem Batterietyp z.B. eine bestimmte Spannung erzeugt oder mit welchem Verfahren eine unerwünschte Temperaturschwankung unterdrückt wird). Ein deskriptives Idealmodell steht also immer für ganze *Klassen von Experimenten*.

Damit ist der Punkt erreicht, an dem sich das *Spezifikum der Simulation* im Unterschied zum Experiment genauer bestimmen läßt: Simulationsmodelle sind *spezielle deskriptive Modelle* von Systemen technischer oder natürlicher Art, die an *bestimmte materiale Vorgaben* gebunden sind. Auch bei der Simulation wird

⁵Jedes technische System ist auch ein physikalisches, aber natürlich gilt dies nicht im umgekehrten Sinne.

zunächst von einer maximal umfänglichen Systembeschreibung ausgegangen, die sich daran anschließenden Idealisierungsschritte müssen aber bestimmte, für relevant gehaltene Charakteristika des Ausgangsfalls erhalten. D.h. die Abstraktionsschritte, die beim Aufbau eines Simulationsmodells ausgeführt werden, zielen nicht auf die Erzeugung einer Klasse von Fällen (wie beim deskriptiven Idealmodell), sondern auf die Erzeugung einer *Klasse von Variationen eines Grundfalles* und in diesem Sinne kann man ein Simulations-szenarium als Entwicklung eines *konkreten Sachverhaltes* bei bestimmter Einstellung der Modellparameter verstehen.

Bilden Naturgesetze das Gerüst für Simulationsmodelle, so müssen diese u.U. so „zurückgebaut“ und in jedem Fall so mit Anfangs- und Randwerten belegt werden, daß eine eindeutige Zuordnung zur Beschreibung eines bestimmten technischen oder natürlichen Ablaufs möglich ist. Wird z.B. ein Klimamodell als Simulationsmodell mit prognostischem Anspruch erstellt, so geht es nicht um die Frage, wie sich Klima im Sinne der theoretischen Meteorologie in einem idealen Fall aufbaut und verändert, sondern um die Rekonstruktion eines Stückes unserer Natur- und Kulturgeschichte; werden die Strömungsverhältnisse in den Zylinderventilen eines Automotors simuliert, dann geht es um einen durch seine Materialeigenschaften und innere Geometrie bestimmten Ventiltyp, der zu einem ganz bestimmten Motorentyp gehört. Anders als im Falle der im Rahmen der Experimentalwissenschaften generierten Idealmodelle lassen sich für Simulationsmodelle keine allgemeinen methodologischen Kriterien für die Auslegung der Idealisierungsschritte angeben; hier entscheiden pragmatische, in den Kontext der Verwendung gehörige Gründe.

Simulationsmodelle werden vor allem dort erstellt, wo Realsimulationen nicht möglich sind oder ihre Durchführung zu aufwendig bzw. zu teuer ist. Wegen ihrer Komplexität und ihres Umfangs ergeben sich für die Arbeit mit ihnen erhebliche, nicht nur rechentechische Schwierigkeiten; oft sind solche Modelle aus verschiedenen Teilen zusammengesetzt, deren wechselseitige Beeinflussungen in der Simulation nicht transparent gemacht werden können; auch ist nicht immer klar zu erkennen, ob hinter einem Idealisierungsschritt ökonomisch-rechentechische oder inhaltliche Überlegungen stecken. Methodologische Probleme ganz besonderer und weitgehend noch ungelöster Art treten schließlich dort auf, wo in einem Simulationsmodell Teilmodelle zusammengeführt werden müssen, die zu unterschiedlichen Erklärungs- oder Beschreibungsformen gehören; dies ist z.B. im Ökologie- und Umweltbereich häufig der Fall, da hier naturwissenschaftliche mit sozial- und wirtschaftswissenschaftlichen Beschreibungen und Erklärungen kombiniert werden müssen. Besonders die Verbindung von Teilen, die durch Zielfunktionen bestimmt sind mit solchen, die reine Kausalstrukturen besitzen, bereitet hier Kopfzerbrechen.

4. Veranschaulichungsmodelle

Einen ganz eigenen Typ stellen schließlich die *Veranschaulichungsmodelle* dar. Sie haben die Aufgabe, einen Mangel an Anschaulichkeit, der bestimmten Struktur- oder Idealmodellen eigen ist, zu heilen. Wenn Strukturmodelle so *abstrakt* oder Idealmodelle so *komplex* sind, daß die menschliche Vorstellungskraft nicht mehr damit umzugehen weiß, und sich folglich auch keine Ansatzpunkte für eine fruchtbare Weiterentwicklung dieser Modelle ergeben, dann muß

man nach einer in gewisser Weise *metaphorischen* Darstellung suchen. Im (methodologisch gesehen) einfachsten Fall erhält man diese durch eine geometrische Deutung des mathematischen Formalismus, der zum Bau des Modells verwendet wurde (graphische Darstellung). Problematischer ist dagegen die Veranschaulichung durch Analogiebildung.

Ein im Wege der *Analogie* gewonnenes Veranschaulichungsmodell muß wenigstens drei Kriterien genügen: (a) es muß einer geläufigen und gut verstandenen Theorie (u.U. aus einer anderen Disziplin) entnommen sein; (b) es muß die geforderte Anschaulichkeit besitzen und dadurch ein Potential an fruchtbaren Assoziationen freisetzen können und (c) es muß mit dem unanschaulichen Struktur- oder Idealmodell eine strukturelle Ähnlichkeit besitzen. Die ersten beiden Kriterien sind pragmatischer Art und (relativ) unproblematisch, das dritte Kriterium hat theoretischen Charakter und bereitet bei der Anwendung gewisse Schwierigkeiten.

Für den Bau einer Ähnlichkeitsbeziehung bieten sich drei Möglichkeiten an: Zunächst kann man sich überlegen, ob die mathematischen Ausdrücke, mit denen die Modellbeziehungen dargestellt werden, nicht auch in einer anderen Theorie auftauchen, dort aber anschaulicher interpretiert werden können (diesen Weg ist man z.B. im letzten Jahrhundert bei der Veranschaulichung elektromagnetischer Modelle durch mechanische gegangen). Ein anderer Brückenschlag wird über metaphysische Grundannahmen hergestellt. Diese Möglichkeit spielte früher vor allem in den Biowissenschaften eine nicht zu unterschätzende Rolle (so ließen sich unter dem Postulat, Lebewesen seien nichts weiter als komplizierte Maschinen, mechanische Deutungen der Leistungen von Organen erzielen). Heute wird die geforderte Ähnlichkeit zwischen Ausgangsmodell und Veranschaulichungsmodell meist über den Einsatz von „*Supertheorien*“ hergestellt. Die in einer Supertheorie zum Ausdruck gebrachte Struktur ist so abstrakt, daß in ihr keine disziplinspezifischen Elemente mehr enthalten sind, sie kann deshalb mit den für empirische Disziplinen typischen partiell interpretierten theoretischen Grundannahmen belegt werden und ermöglicht so den Übergang von der Modellklasse der einen Theorie zu der Modellklasse einer anderen. Im wesentlichen spielen zwei solcher Supertheorien eine Rolle: die allgemeine Systemtheorie und die Informationstheorie; beide ermöglichen es, komplexe biologische oder sozialwissenschaftliche Phänomene in den Horizont technischer Rationalität zu ziehen.

5. Die Rolle der Informatik beim Modellieren

Bei der Erstellung von Ideal- bzw. Simulationsmodellen kommt der Informatik an zwei Stellen eine besondere Rolle zu: Zunächst hat sie die Aufgabe, die den jeweiligen Modellen zugrunde liegenden Ausgangsbeschreibungen so zu organisieren, daß die erforderlichen Modellierungsschritte überhaupt durchgeführt werden können; außerdem muß sie Beschreibungen und Modelle in eine zweckmäßige, meist visuelle Darstellung bringen. Zur Bewältigung der ersteren Aufgabe ist es erforderlich, die *Beschreibungstätigkeiten* in den verschiedenen Disziplinen selbst so zu beschreiben, daß aus dieser Beschreibung ein *Idealmodell dieser Tätigkeiten* entworfen werden kann. D.h. den Informatiker muß interessieren, wie Beschreibungen und Modelle in den unterschiedlichen Disziplinen gefertigt werden und nicht was dort jeweils beschrieben und mo-

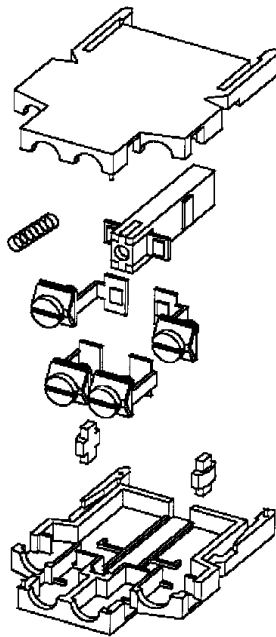


Abb. 1 Explosionszeichnung eines Schalters

deliiert wird. Sein Ziel ist es dabei, ein allgemeines Modell dieser Vorgänge zu erstellen, welches dann fachspezifisch konkretisiert werden kann. Dazu muß er z.B. festlegen, wie generell Gegenstände durch Merkmale bzw. Merkmalsgruppen repräsentiert werden können, welche Relationen zwischen ihnen gebildet werden können und wie eine Bedeutungszuweisung an bestimmte Merkmalsausprägungen zustande kommt, so daß diese dann als „Daten“ verarbeitet werden können. Auf der Basis solcher Beschreibungen läßt sich dann z.B. ein Modell der Verwaltung solcher Daten als Datenbankmodell erstellen.⁶ Wir wollen diese Zusammenhänge noch am Beispiel der Fertigung eines einfachen Schalters verdeutlichen.

Der Fertigung voraus geht die Konstruktion und Fertigungsplanung. Klassische Repräsentation des Konstruktionsentwurfs war früher die technische Zeichnung, die Form und metrische Bestimmung der Einzelteile und funktionalen Gruppen enthielt. Begleitet waren die technischen Zeichnungen durch verbale und symbolische Erläuterungen zur Funktionalität der dargestellten Elemente.⁷ Ohne größere Schwierigkeiten kann man heute durch den Einsatz von CAD-Verfahren die Funktionalität eines Geräts durch bildliche Darstellungen, etwa in Form von *Explosionszeichnungen* (oder bei komplexen Gebilden durch eine Folge davon) darstellen, vorausgesetzt, es ist durch vorangegangene Konstruktionsschritte festgelegt worden, was als Einzelteil (z.B. Feder), was als Baugruppe (z.B. Schieber) zu gelten hat (s. Abb. 1).

Für die Fertigungsplanung braucht man eine Montageanleitung, in der die Elemente der Stückliste des Schalters durch eine

⁶ Generell kann man sagen, daß das Modellieren in diesem Bereich auch heute noch eher eine Kunst denn eine methodisch fundierte Disziplin ist, obwohl es hier neben allerlei Tips, Tricks und Heuristiken auch Bemühungen um eine systematische Vorgehensweise gibt. Erwähnt seien hier z.B. auf dem Gebiet der (relationalen) Datenbanken Wedekinds (Wedekind 1992) objektorientierte Schemaentwicklung oder der stufenweise Modellierungsansatz für Beschreibungslogiken von Brachman et al. (1991); für weitere Einzelheiten vgl. auch Kaufmann 1993.

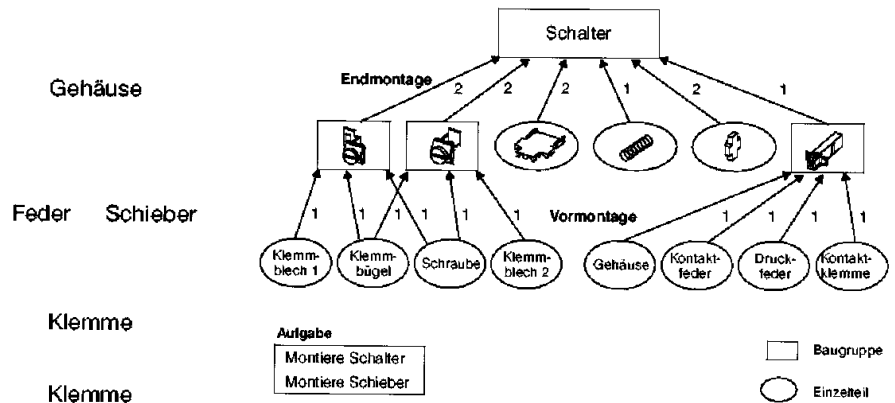


Abb. 2 Stückliste eines Schalters

oder mehrere Relationen, die die Fertigungsschritte darstellen, verknüpft werden (s. Abb. 2).

Die Stückliste selbst kann aus der Explosionszeichnung abgeleitet werden, ihre *Struktur* (s. folgende Tabelle) wird dann durch ein geeignetes Datenbankmodell dargestellt.

Teil	(TeileNr,	Beschreibung	...	, Verweis auf Geometrie)
4711	Schalter			• →
4712	Gehäuse			• →
4713	Schieber			• →
.	.			.
.	.			.
.	.			.

Stücklisten-Struktur	UnterteileNr,	OberteileNr,	Anzahl
	4712	4711	2
	4713	4711	1
	.	.	.
	.	.	.
	.	.	.

Wir haben es also schon bei diesem simplen Beispiel mit drei Formen der Darstellung zu tun, die ganz unterschiedlichen Zielen folgen: Es geht um den Aufweis von Funktionalität, um die Darstellung der Fertigungsstruktur und um die Verwaltung der für die Organisation eines reibungslosen Ablaufs erforderlichen Daten. In jedem Fall geht es aber darum, einer *Struktur* (die mit Blick auf einen bestimmten Verwendungszweck abstrahiert wird) einen bildhaften bzw. symbolischen Ausdruck zu verleihen. Da die Informatik es - jedenfalls unter anderem und pointiert gesprochen - mit dem *Modellieren des Modellierens* bzw. Beschreibens zu tun hat, ist die naivrealistische Rede vom „Abbildern der Wirklichkeit“ hier besonders

⁷ Das Erstellen und die Normierung technischer Zeichnungen hat im Maschinenbau eine lange Tradition. Bei der Entwicklung der CAD-Systeme war es ein Hauptproblem der Informatik, ein rechnergestütztes geometrisches Modellieren zu ermöglichen, um die „Papierwelt“ des klassischen Maschinenbaus und damit auch die Unbestimmtheit und Zweidimensionalität zu überwinden. Bekannte dreidimensionale Modellierverfahren sind z.B. „Constructive Solid Geometry“ (CSG), Begrenzungsflächendarstellung („Boundary representation“) und die analytisch-gometrische Darstellung der Freiformflächen durch B-Spline-Kurven.

verwirrend. Wie wir gesehen haben, besteht die besondere Leistung der Informatik gerade in der Abstraktion von den konkreten Gegenstandsbezügen der einzelnen Fachdisziplinen. Vergessen werden darf aber nicht, daß die Informatik als eine technische Disziplin praktische Ziele verfolgen muß, d.h. ihre Beschreibungs- und Modellierungsmodelle müssen geeignet sein, Fachwissenschaftler und andere Anwender in ihrer Tätigkeit effizient zu unterstützen.

Sind die Organisationsaufgaben gelöst, bleiben noch die Darstellungsaufgaben, wobei insbesondere Fragen der Visualisierung eine Rolle spielen; diese lassen sich im wesentlichen in drei Bereiche aufteilen:

- (a) Die Umsetzung von *sprachlichen* (insbesondere mathematischen) Beschreibungen räumlicher bzw. raum-zeitlicher Beziehungen in eine *visuelle* Darstellung (dies reicht von der Abbildung von Funktionsgraphen über CAD/CAM-Verfahren bis zur Darstellung einer räumlichen Struktur von Molekülen). Dabei ergeben sich besondere Darstellungsprobleme dort, wo man von den zu visualisierenden Vorgängen keine Eindrücke aus der sinnlichen Wahrnehmung besitzt, wie dies etwa im Mikrobereich der Fall ist. Hier gilt es dann die Freiheiten, die man hinsichtlich der Darstellung besitzt, optimal an die Informationsinteressen anzupassen.
- (b) Die Umsetzung von Beschreibungen, welche keine raum-zeitlichen Relatoren enthalten, in visuelle Darstellungen (vgl. hierzu Tuftte 1991). Dabei muß zunächst ein *Veranschaulichungsmodell* für das Ausgangsmodell gewonnen werden, das dann wie unter (a) umgesetzt werden kann.
- (c) Die Verarbeitung von physikalischen, aber nicht unbedingt optischen Signalen zu einem Bild, das handlungsleitende oder orientierende Funktion bekommen soll (man denke etwa an die Sonographie oder Kernspintomographie in der Medizin). Hierbei ist es erforderlich, daß ein physikalisches (Ideal-) Modell, das die Ausgangsprozesse beschreibt, verbunden wird mit zwei technischen Idealmodellen, von denen das erste die Transformation der ursprünglichen Signale in optische liefert und das zweite die Steuerungsleistungen des bei der Umwandlung eingesetzten Computers beschreibt, wobei hier insbesondere physikalische *Signale* in zu verarbeitende *Daten* umzudeuten sind.

Auch hierzu ein Beispiel. Bei der Visualisierung von sog. Sensordaten geht es zunächst darum, daß man Signale von Meßgeräten aufnimmt, interpretiert und bewertet. Die interpretierten und bewerteten Signale bilden dann die Daten, aus denen ein „Bild“ aufgebaut wird. Dazu müssen die Daten aggregiert, fusioniert und mit neuen Bedeutungen versehen werden. Ob nun die Fusion von Daten besser auf der Ebene der Signalverarbeitung oder auf der Ebene der symbolischen Verarbeitung geschehen sollte, wäre eine für die Informatik typische abstrakte Fragestellung: Man wünscht sich *generelle* Algorithmen, die es erlauben, diese Frage für mögliche *konkrete* Fälle optimal zu beantworten.

Wir sehen also: Auch im Falle der Visualisierung liegt die wesentliche Aufgabe der Informatik nicht in einer Ausarbeitung oder Konkretisierung fachwissenschaftlicher Darstellungsziele. Was optisch dargestellt, welche Aufgaben damit erfüllt oder welche Heuristik vermittelt werden soll, muß in den Disziplinen selbst entschieden werden. Aber aus diesen inhaltlich unterschiedlichen Darstellungszielen lassen sich Forderungen für den *Umgang* mit solchen Darstellungen ableiten, die weitgehend invariant zu den Zielen selbst sind. Und mit diesen abgeleiteten Anforderungen beschäftigt sich die Informatik im Rah-

men des Visualisierungsthemas. Hier geht es also darum, daß Objekte dreidimensional dargestellt werden und sich aus unterschiedlicher Perspektive betrachten lassen müssen; oder daß die Zusammensetzung und Trennung von räumlichen Formen zeitabhängig oder zeitinvariant dargestellt werden kann; oder daß Sensordaten in ein räumliches Bild umgewandelt werden und ähnliches mehr. Solche Fragestellungen werden natürlich immer nur unter einer inhaltlichen Problemstellung virulent, sie lassen sich aber zumindest ein Stück weit in Abstraktion von solchen konkreten Problemstellungen behandeln; wie weit ist dabei eine Frage, die sich a priori nicht beantworten läßt und auf dem Feld interdisziplinärer Forschung angegangen werden muß. ☺



Professor Dr. Hartmut Wedekind, geb. 1935, studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der TH Darmstadt; nach seiner Promotion 1963 bis 1969 war er bei IBM Deutschland. 1967 Habilitation. 1970 - 1979 Professor für Informatik und Betriebswirtschaftslehre an der TH Darmstadt; seitdem Professor für Informatik, Universität Erlangen-Nürnberg. Hauptarbeitsgebiete: Angewandte Informatik, bes. Datenbanksysteme, Konstr. von Anwendungssystemen für die Informatik.



Professor Dr. Günther Görz, geb. 1947, Studium der Mathematik, Informatik und Philosophie; Diplom in Mathematik, Promotion in Informatik. 1987 - 1989 Gastwissenschaftler Projekt LILOG bei IBM Deutschland. 1989 - 1991 Professor für Informatik an der Universität Hamburg, seitdem in Erlangen. Arbeitsschwerpunkte: Masch. Sprachverarbeitung, Logik und Wiss.repräsentation.



Dr. Rudolf Kötter, geb. 1947; Studium der Rechtswissenschaften (Staatsexamen 1971), der Volkswirtschaftslehre (Dipl. 1975) und der Philosophie (Promotion 1980). Derzeit Akademischer Oberrat am Interdisziplinären Institut für Wissenschaftstheorie und Wissenschaftsgeschichte der Universität Erlangen-Nürnberg. Arbeitsgebiete: Wissenschaftstheorie, Erkenntnistheorie, Angewandte Ethik.



Dr. Rüdiger Inhetveen, geb. 1943; Studium der Mathematik, Physik und Philosophie; Promotion in Mathematik 1971, danach wiss. Assistent am Institut für Philosophie der Universität Erlangen-Nürnberg. 1983 - 1993 Mitarbeiter am Inst. f. Gesellschaft und Wissenschaft in Erlangen. Derzeit Lehrbeauftragter für Philosophie am IIWW der Universität Erlangen-Nürnberg.

Literatur

1. Brachman, R.J. et al. (1991), Living with CLASSIC: When and How to Use a KL-ONE-like Language, in: Principles of Semantic Networks (F.J. Sowa, Ed.), San Mateo, S.401-456
2. Falk, G. (1990), Physik- Zahl und Realität, Basel
3. Franklin, A. (1989), The epistemology of experiment, in: The uses of experiment: Studies of the experimentation in the natural sciences (D. Gooding/J. Pinch/S. Schaffer, Eds.), Cambridge, S.437-460
4. Inhetveen, R. (1986), Über den Sinn des Gebrauchs von Modellen, in: Aachener Beiträge zur Philosophie (M. Gatzemeier, Hrsg.), Aachen
5. Kaufmann, F. (1993), Erstellen von Modellen für Organisations- und DV-Lösungen, Berlin/München
6. Kötter, R. (1986), Modell und ökonomische Realität, in: Die Neoklassik und ihre Kritik (E. Hödl/G. Müller, Hrsg.), Frankfurt/M., S. 41-59
7. Kowalk, W. (1996), System - Modell - Programm, Heidelberg
8. Lakatos, I. (1974), Falsifikation und die Methodologie wissenschaftlicher Forschungsprogramme, in: Kritik und Erkenntnisfortschritt (I. Lakatos/A. Musgrave, Hrsg.) Braunschweig, S. 89-189
9. Ludwig, G. (1978), Die Grundstrukturen einer physikalischen Theorie, Berlin u.a.
10. Luft, A.L./Kötter, R. (1994), Informatik - Eine moderne Wissenstechnik, Mannheim
11. Müller, R. (1983), Zur Geschichte des Modelldenkens und des Modellbegriffs, in: Modelle - Konstruktion der Wirklichkeit (H. Stachowiak, Hrsg.), München, S. 17-86
12. Schmidt, B. (1994), Der wissenschaftliche Erkenntnisprozeß und die Modellierung technischer Systeme, in: Forschung nach Programm? (R. Inhetveen/R. Kötter, Hrsg.), München, S.139-152
13. Thiel, Ch. (1995), Philosophie und Mathematik, Darmstadt
14. Tufte, E.R. (1991), Envisioning Information, Cheshire, Conn.
15. Wagner, C. (1974), Methoden der naturwissenschaftlichen und technischen Forschung, Mannheim
16. Wedekind, H. (1992), Objektorientierte Schema-Entwicklung, Mannheim
17. Willems, J.C. (1989), Some Thoughts on Modelling, in: Newton to Aristotle. Toward a Theory of Models for Living Systems (J. Casti/A. Karlqvist, Eds.), Boston/Basel, S. 91-119

Eingegangen am 29.06.1998