

1 Einführung und Grundbegriffe

Die Umwelt des Menschen besteht nicht nur aus einer Anhäufung von Einzelobjekten, sondern auch aus einem Netz von Beziehungen, das die Objekte untereinander verbindet. Ausschnitte aus dieser Gesamtmenge der Objekte und Beziehungen werden vom Menschen abgegrenzt und als *Systeme* bezeichnet. Es kann sich um natürliche, technische oder – wird der Mensch selbst als Teil des Systems gesehen – soziale Systeme handeln. Oft sind die betrachteten Systeme komplex; ihre Struktur und ihr Verhalten sind nicht unmittelbar durchschaubar. Man denke beispielsweise an ökologische Systeme, an große Produktions- und Transportsysteme oder komplizierte elektronische Schaltungen.

Je besser der Mensch Struktur und Verhalten von Systemen durchschauen kann, desto besser sind seine Möglichkeiten, gezielt Einfluß auf die Systeme zu nehmen. Um die Folgen seiner Eingriffe in Systeme oder die Realisierbarkeit seiner Gestaltungswünsche abschätzen zu können, benötigt er nicht nur Wissen über die Eigenschaften einzelner Objekte des jeweiligen Systems (Detailwissen), sondern auch über das Wirkungsgefüge, das die Objekte miteinander verbindet (Strukturwissen).

Die systematische Untersuchung komplexer Systeme ist Gegenstand der *Systemanalyse*. Dieser Forschungsansatz, der im Sinne einer Ganzheitsbetrachtung über die Grenzen der bestehenden Wissenschaftsdisziplinen hinausgreift, ist durch die weitgehende Verwendung mathematisch-quantitativer Modelle gekennzeichnet. Die Systemanalyse untersucht das Verhalten von Systemen mit dem Ziel, den Entscheidungsverantwortlichen umfassende Informationen über die mit ihren Handlungsmaximen und Handlungsalternativen verbundenen Konsequenzen zur Verfügung zu stellen.

Um Erkenntnisse über Systeme zu gewinnen, ist es meist sinnvoll, die Untersuchung nicht am System selbst vorzunehmen, sondern ein *Modell* zu bilden, das die wesentlichen Eigenschaften des Systems abbildet. Durch die Beschränkung auf die problemrelevanten Eigenschaften des Originals erreicht man eine Verminderung der Komplexität, wodurch eine Untersuchung des Systems häufig erst möglich wird. In vielen Fällen sind Experimente am Original auch deshalb nicht angemessen, weil die Vorgänge in der Realität zu schnell oder zu langsam ablaufen, die Kosten zu hoch sind oder die Gefahr einer Störung oder Zerstörung des Realsystems durch die Experimente besteht (vgl. [Zei76]).

Der Umgang mit Systemen und Modellen aus den verschiedensten Anwendungsgebieten setzt zunächst einige begriffliche Klärungen aus der *Systemtheorie* voraus. Die

Systemtheorie ist eine allgemeine Theorie des Zusammenhangs zwischen Struktur und Verhalten von Systemen. Sie sucht nach Grundprinzipien, die gleichermaßen für alle Systeme gelten, die in den unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen erforscht werden. Die Systemtheorie bildet das theoretische Gerüst der Systemanalyse. Will man ein vorliegendes System analysieren, ist es hilfreich, auf allgemeine Prinzipien des Aufbaus und Verhaltens von Systemen zurückgreifen zu können. Der Systembegriff ist dabei lediglich ein Hilfsmittel. Er ist die Basis für ein einheitliches interdisziplinäres Vorgehen (vgl. [Wol79]).

1.1 Systeme

Wenn der Mensch einen Ausschnitt der Realität als System identifiziert, wendet er bereits implizite Kriterien an, nach denen er seine Beobachtungen bewertet und ordnet. Somit bestehen in der Systemanalyse große Freiheitsgrade, denn die untersuchten Systeme werden **problemabhängig** definiert und weniger interessierende Erscheinungen *a priori* ausgeklammert.

J. W. Forrester definiert ein System als eine Menge miteinander in Beziehung stehender Teile (Komponenten), die zu einem gemeinsamen Zweck interagieren [For72]. Der Begriff des Zwecks scheint sich auf den ersten Blick nur auf künstlich geschaffene Systeme zu beziehen. Tatsächlich sind aber auch natürliche Systeme häufig erst dadurch zu verstehen, daß ihnen ein Zweck zugeschrieben wird. So betrachten wir z. B. ein Herz als ein System, das zur Aufrechterhaltung des Blutkreislaufs in einem Organismus dient.

Als *Element* eines Systems bezeichnet man eine nicht weiter unterteilbare oder als nicht weiter unterteilbar *betrachtete* Komponente des Systems [Nie77]. Die Elemente eines Systems lassen sich wiederum als Systeme auf einer niedrigeren Aggregations-ebene auffassen. Umgekehrt kann man ein System als Element eines übergeordneten Systems betrachten. So ergibt sich eine **Hierarchie der Systeme** [Krü74].

Den Elementen eines Systems können *Eigenschaften* (*Attribute*) zugeordnet werden, einem Fahrzeug beispielsweise die Eigenschaft "Geschwindigkeit". Veränderliche Eigenschaften werden als *Zustandsvariablen* bezeichnet, die verschiedenen Ausprägungen dieser Eigenschaften (z. B. 50 km/h) als *Werte* der Zustandsvariablen. Die Menge der Werte aller Zustandsvariablen zu einem bestimmten Zeitpunkt wird als *Zustand des Systems* bezeichnet [Sch79]. Wenn sich Werte im Verlauf der Zeit ändern, ergeben sich **Zustandsfolgen**, die das *Verhalten des Systems* darstellen.

Zwischen den Elementen eines Systems bestehen *Beziehungen*, die mathematisch durch zwei- oder mehrstellige Relationen dargestellt werden. Für das Systemverhalten sind speziell *Interaktionsbeziehungen* von Bedeutung. Eine solche Beziehung liegt

dann vor, wenn der Zustand eines Elements den Zustand eines anderen Elements kausal beeinflusst.

Die *Komplexität eines Systems* hängt von der Anzahl der Elemente und Beziehungen und damit vom **Verflechtungsgrad** der Elemente ab. Je größer die Zahl der Beziehungen im Verhältnis zur Zahl der Elemente, desto höher der Verflechtungsgrad.

Nach Art der Beziehung eines Systems zu seiner Umgebung unterscheidet man offene und geschlossene Systeme [Nie77]. Ein *offenes System* hat mindestens eine Interaktionsbeziehung zu einem umgebenden System (einen Systemeingang oder -ausgang). *Geschlossen* nennt man dagegen Systeme, die keinerlei Interaktionsbeziehungen zu anderen Systemen haben (vgl. jedoch [For72]). Das Verhalten des Systems ist dann unabhängig von äußeren Einflüssen. Reale Systeme sind praktisch immer offen und können nur durch gedankliche Vereinfachung als geschlossene Systeme betrachtet werden. Beispielsweise ist ein See ein offenes System. Vernachlässigt man jedoch die Interaktionen des Systems See mit seiner Umwelt (also sämtliche Zu- und Abflüsse von Materie und Energie), so erscheint es als geschlossenes System. Ob eine solche Vereinfachung im Einzelfall zulässig ist oder nicht, hängt von der zu untersuchenden Problemstellung ab.

Eine weitere Unterscheidung ergibt sich durch das Verhalten der Systeme in der Zeit. Im Gegensatz zu den *statischen Systemen* ändert sich bei *dynamischen Systemen* der Zustand im Zeitablauf. Auch diese Einteilung ist eine Frage der Sichtweise. Z. B. kann man ein Schienennetz ohne die darauf fahrenden Züge betrachten (statisches System) oder den Zugverkehr in die Betrachtung miteinbeziehen (dynamisches System).

Die dynamischen Systeme werden weiter eingeteilt in kybernetische und nicht-kybernetische Systeme. Ein *kybernetisches System* ist dadurch gekennzeichnet, daß das Netz der Interaktionsbeziehungen Zyklen (sog. Rückkopplungsschleifen) enthält. Die grundlegenden Systembegriffe sind in Abb. 1-1 zusammengefaßt.

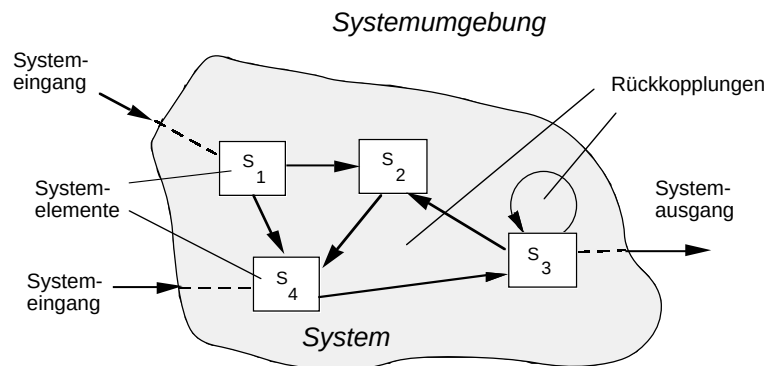


Abb. 1-1: Grundlegende Systembegriffe (nach [Bos89], S. 11)

1.2 Modelle

Durch den Vorgang der Modellbildung werden Systeme in *Modelle* abgebildet. Die Modelle sind selbst wiederum Systeme, die aber die Elemente und Relationen des Ursprungssystems in veränderter Weise darstellen.

"Modelle sind materielle oder immaterielle Systeme, die andere Systeme so darstellen, daß eine experimentelle Manipulation der abgebildeten Strukturen und Zustände möglich ist."
[Nie77, S. 57]

Beim Übergang vom Ursprungssystem (Original) zum Modell findet eine Abstraktion und Idealisierung statt. Ein Modell stellt das Original also vereinfacht dar – dadurch erst wird die Untersuchung komplexer Systeme handhabbar. Da die Ergebnisse, die mit dem Modell erzielt werden, auf das Original übertragen werden sollen, ist eine ausreichend genaue Abbildung der wesentlichen Eigenschaften nötig. Welche Eigenschaften als *wesentlich* betrachtet werden, hängt von der Fragestellung und Zielsetzung der Untersuchung ab. Zu einem gegebenen System können mehrere unterschiedliche Modelle erstellt werden, abhängig von der Zielsetzung der Modellstudie und der subjektiven Sichtweise des Modellbildners.

Modelle können nach verschiedenen Kriterien klassifiziert werden: nach der Art der *Untersuchungsmethode*, nach dem *Abbildungsmedium*, nach der Art der *Zustandsübergänge* und schließlich nach dem intendierten *Verwendungszweck*.

Klassifikation nach Art der Untersuchungsmethode

Wenn Untersuchungen an einem Modell vorgenommen werden, so können Erkenntnisse entweder durch *analytische Berechnung* oder durch *Simulation* gewonnen werden. Entsprechend unterscheidet man:

- analytische Modelle
- Simulationsmodelle

Modelle mit analytischem Lösungsansatz erlauben es, in ein Gleichungssystem, das die vorhandenen Systembeziehungen widerspiegelt, bestimmte angenommene Werte einzusetzen und in einem geschlossenen Lösungsdurchlauf den zu ermittelnden Systemzustand direkt zu bestimmen. In Simulationsmodellen dagegen wird der Modellzustand Schritt für Schritt fortgeschrieben, d. h. die Zwischenergebnisse der Berechnung besitzen eine Interpretation als Zwischenzustände des Originals. Aus diesem Grund eignen sich Simulationsmodelle besonders zur *Veranschaulichung* des Systemverhaltens. Analytische Untersuchungen sind außerdem wegen mathematischer Restriktionen auf Systeme mit relativ geringer Komplexität begrenzt (vgl. 1.3).

Klassifikation nach Abbildungsmedium

Modelle müssen nicht notwendigerweise in einem Formalismus dargestellt werden. Auch informale Beschreibungen oder materielle Systeme können als Modelle dienen. Verbale Modelle (umgangssprachliche Beschreibungen) und grafisch-deskriptive Modelle können wichtige Zwischenstufen bei der Entwicklung formaler Modelle darstellen (s. 1.4). Abbildung 1-2 zeigt die Hierarchie der Abbildungsmedien. Der Vollständigkeit halber wurde hier auch die Unterscheidung nach der Untersuchungsmethode miteinbezogen. Die folgenden Beispiele sollen die Klassifikation verdeutlichen:

- *materielles Modell*: Schiffmodell
- *verbales Modell*: umgangssprachliche Beschreibung
- *grafisch-deskriptives Modell*: Flußdiagramm
- *mathematisches Modell*: Gleichungssystem
- *grafisch-mathematisches Modell*: Petri-Netz

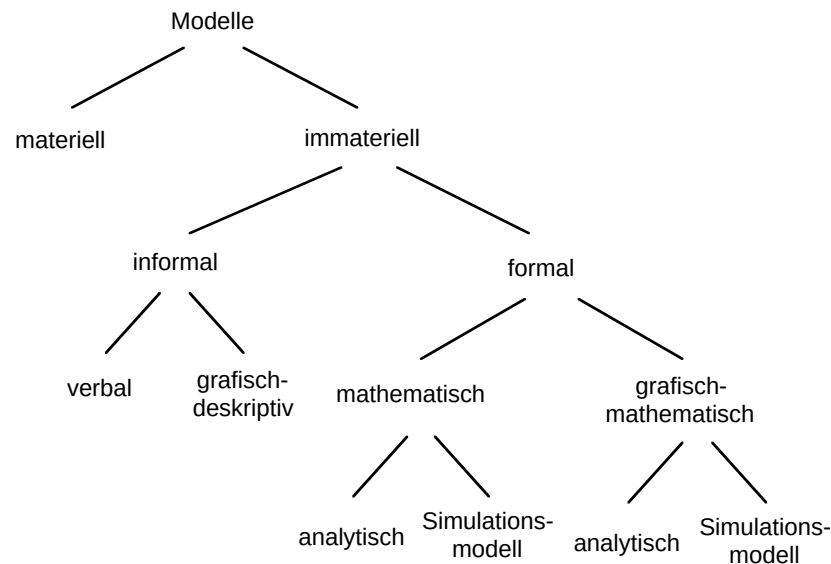


Abb. 1-2: Klassifikation nach Abbildungsmedium und Untersuchungsmethode

Klassifikation nach Art der Zustandsübergänge

Abbildung 1-3 zeigt die Klassifikation von Modellen nach der Art der Zustandsübergänge. Bei einem *statischen* Modell treten keine Zustandsänderungen auf. Ein *dynamisches* Modell zeichnet sich dagegen durch die Zeitabhängigkeit des Modellzustandes aus.

Die Zustandsvariablen eines *kontinuierlichen* Modells lassen sich durch stetige Funktionen beschreiben. Bei einem *diskreten* Modell ändern sich die Werte der Zustandsvariablen dagegen sprunghaft zu bestimmten, auf der Zeitachse diskret verteilten Zeitpunkten.

Deterministisch heißt ein Modell, wenn seine Reaktion auf eine bestimmte Eingabe, ausgehend von einem bestimmten Zustand, eindeutig festgelegt ist. Wenn dies nicht der Fall ist, d. h. wenn sich Reaktionen des Modells nur durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschreiben lassen, nennt man es *stochastisch*.

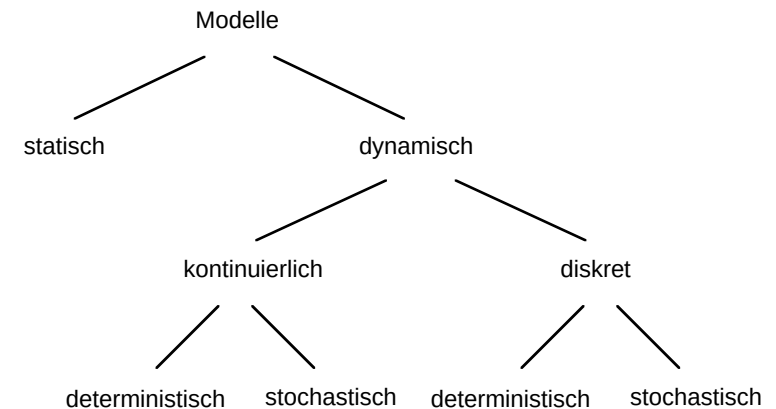


Abb. 1-3: Klassifikation nach Art der Zustandsübergänge

Klassifikation nach Verwendungszweck

Der Verwendungszweck eines Modells ist durch die Fragestellung und Zielsetzung der Modellstudie festgelegt. Abhängig vom Verwendungszweck werden unterschiedliche Anforderungen an Modelle gestellt. Ein *Erklärungsmodell* muß die Struktur des Originalsystems so detailliert abbilden, daß es zur Erklärung des beobachteten Systemverhaltens herangezogen werden kann. Ein *Prognosemodell* dient dazu, künftige Systemzustände unter gegebenen (alternativen) Annahmen abzuschätzen. Es ist durchaus möglich, daß ein bestimmtes Modell als Prognoseinstrument nützlich ist, ohne das System-

verhalten zu erklären. *Gestaltungsmodelle* dienen als Entscheidungshilfe beim Entwurf von Systemen und der Maßnahmenauswahl in der Projektplanung. *Optimierungsmodelle* schließlich werden zur Ermittlung optimaler Systemzustände entwickelt. Beispielsweise kann ein Transportmodell mit dem Ziel entwickelt werden, Transportkosten zu minimieren.

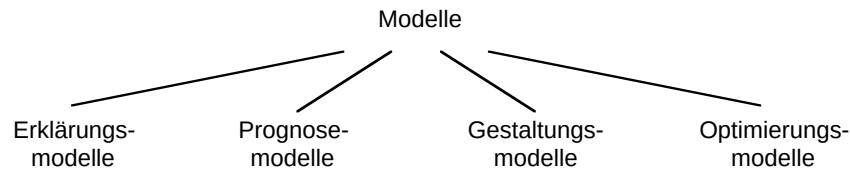


Abb. 1-4: Klassifikation nach Verwendungszweck

1.3 Simulation

Man spricht ganz allgemein von *Simulation*, wenn bei der Systemanalyse ein Modell an die Stelle des Originalsystems tritt und **Experimente** am Modell durchgeführt werden. Ist die hinreichend korrekte Abbildung zwischen Original und Modell gesichert, so lassen sich die Abläufe des realen, dynamischen Systems im Modell nachvollziehen und Kenntnisse über das Modellverhalten sammeln, die in gewissen Grenzen **Rückschlüsse** auf das Verhalten des Originals erlauben (vgl. [Krü74]).

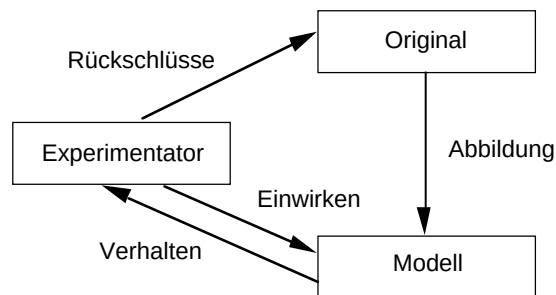


Abb. 1-5: Beziehungen zwischen Objekt, Modell und Experimentator

Die Simulation eines Systems S durch ein zweites System M (ein Modell von S) wird in der mathematischen Systemtheorie wie folgt charakterisiert (s. auch Abb. 1-6):

"Ein allgemeines System S transformiert einen Input u aus einer Inputmenge $U(S)$ in einen Output y aus der Outputmenge $Y(S)$. [...] Ein Output y des Systems S , der durch einen Input u erzeugt wird, muß auch dadurch erreicht werden können, daß man den Input u zunächst in einen Input $u' = \alpha(u)$ des Systems M umcodiert, den zugehörigen Output y' des Systems M erzeugt und ihn in den Output $y = \beta(y')$ des Systems S rückcodiert." [Koh76, S. 223]

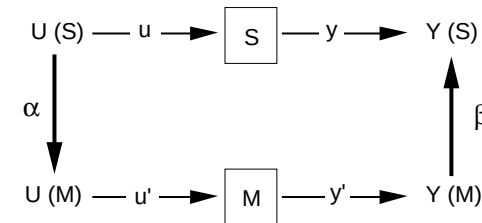


Abb. 1-6: Simulation eines Systems S durch ein zweites System M (nach [Koh76])

Der Begriff der Simulation ist hier sehr allgemein gefaßt, so daß er auch den Fall abdeckt, daß Experimente mit *analytischen* Modellen durchgeführt werden. Dennoch werden im allgemeinen nur solche Modelle als Simulationsmodelle bezeichnet, die keine analytische Behandlung erlauben.

Simulationsmodelle in diesem Sinne können keiner bestimmten mathematischen Methode zugerechnet werden. Immer dann, wenn ein analytisches Verfahren (z. B. aus der Warteschlangentheorie) keine adäquate Abbildung eines Systems mehr gestattet, bietet sich die Simulationsmethode an. Hierbei werden mathematische Beziehungen beliebiger Art, algorithmische Beschreibungen in Form von logischen Verknüpfungen, Fallunterscheidungen oder Wiederholungen entwickelt, bis die erstrebte Abbildungsgenauigkeit erreicht ist. Simulationsmodelle bieten sich besonders für komplexe Systeme an, da eine korrekte Anwendung analytischer Verfahren hier oft starke Vereinfachungen erfordert und somit die Gefahr inadäquater Ergebnisse mit sich bringt. Generell sind die folgenden **Vorteile von Simulationsmodellen** gegenüber analytischen Modellen hervorzuheben:

- Mit einem Simulationsmodell lassen sich auch komplexe Systemstrukturen untersuchen, die die Einschränkungen analytischer Verfahren nicht erfüllen.
- Ohne vereinfachende Annahmen über Verteilungen, Zufälligkeit oder Unabhängigkeit kann das Simulationsmodell mit einem wesentlich höheren Grad an Realitätsnähe versehen werden.

- Ein Simulationsmodell ermöglicht flexible Sensitivitätsuntersuchungen bezüglich der angenommenen statistischen Verteilungen.
- Simulation ist für den Anwender mathematisch weniger schwierig als die Verwendung analytischer Ansätze.
- Simulation ermöglicht eine anschauliche Darstellung des Systemverhaltens, weil die zeitliche Entwicklung des Systemzustandes Schritt für Schritt nachvollzogen wird.

Diesen Vorteilen stehen die folgenden **Nachteile von Simulationsmodellen** im Vergleich mit analytischen Modellen gegenüber:

- Im Gegensatz zu analytischen Verfahren (wie der linearen Programmierung oder anderen Optimierungsverfahren) ist bei der Simulation das Auffinden der optimalen Lösung nicht sichergestellt.
- Ein Simulationsmodell erfordert in der Regel höheren Entwicklungsaufwand als ein analytisches Modell.
- Computersimulation erfordert mehr Rechenzeit und Speicherplatz als die Anwendung analytischer Methoden.

In 1.2 wurden bereits zwei Modellklassen genannt, auf denen zwei grundlegend verschiedene Ansätze im Bereich der Computersimulation beruhen: diskrete und kontinuierliche Modelle.

Bei vielen Prozessen, vor allem in betrieblich-organisatorischen Systemen (der Mikroebene), z. B. bei Abläufen in Produktions-, Transport- oder Lagerhaltungssystemen, ändert sich der Systemzustand nicht kontinuierlich, sondern **diskret**. Als Beispiel kann etwa die Warteschlange vor einer Maschinengruppe einer Fertigungsanlage dienen: Der Zustand der Warteschlange (die Zahl der "wartenden" Werkstücke) ändert sich nur bei Ankunft oder Abgang eines Werkstückes. Diese Ankünfte und Abgänge können als *diskrete Ereignisse* betrachtet werden, d. h. als Ereignisse, die zu diskret über die Zeitachse verteilten Zeitpunkten auftreten. Bei derartigen Systemen haben wir es außerdem mit *diskreten Einheiten* (z. B. Werkstücke oder Maschinen) zu tun. Es ist oft vorteilhaft oder sogar notwendig, solche Einheiten als individuelle Elemente mit "eigener Geschichte" oder "individuellem Schicksal" in der Simulation mitzuführen.

Dagegen erscheint es bei physikalischen, biologischen oder medizinischen Systemen meist natürlich, daß sich Systemveränderungen **kontinuierlich** vollziehen, denn das Systemverhalten ist hier durch physikalische bzw. biologische Gesetze bestimmt, die in Form von *Differentialgleichungen* dargestellt werden können.

Das System wird in diesem Fall durch eine Reihe von zeitabhängigen Zustandsvariablen $x_1(t), \dots, x_n(t)$ beschrieben. Die Änderungsraten, d. h. die zeitlichen Ableitungen $x_1'(t), \dots, x_n'(t)$ der Zustandsvariablen werden durch Funktionen der Zustandsvariablen selber und gewisser Eingabevariablen $u_1(t), \dots, u_m(t)$ bestimmt:

$$\begin{aligned} x_1'(t) &= f_1(x_1(t), \dots, x_n(t), u_1(t), \dots, u_m(t)) \\ &\vdots \\ x_n'(t) &= f_n(x_1(t), \dots, x_n(t), u_1(t), \dots, u_m(t)) \end{aligned}$$

Die Ergebnisvariablen $y_1(t), \dots, y_r(t)$ können dann durch Funktionen $h_1, \dots, h_r$ der Zustandsvariablen ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned} y_1(t) &= h_1(x_1(t), \dots, x_n(t)) \\ &\vdots \\ y_r(t) &= h_r(x_1(t), \dots, x_n(t)) \end{aligned}$$

In den meisten Fällen ist man jedoch unmittelbar an den Zustandsgrößen interessiert, so daß keine besonderen Ergebnisvariablen benötigt werden. Diese Gleichungen definieren das kontinuierliche Simulationsmodell. Die Simulation besteht dann im wesentlichen in der Lösung der Differentialgleichungen durch **numerische Integrationsverfahren** für vorgegebene Eingabevariablen $u_1(t), \dots, u_m(t)$.

Thema dieses Buches sind **diskrete Simulationsmodelle**. Da dieser Modellansatz eine Diskretisierung der Zeit und damit eine bestimmte Betrachtungsweise der Real-systeme voraussetzt, spricht man auch von der *Simulation zeitdiskreter Systeme*. Eine Ortsabhängigkeit von Zustandsgrößen, wie sie z. B. bei Ausbreitungsmodellen für Schadstoffe auf dem Umweltsektor vorzufinden ist, bleibt hier außer Betracht.

1.4 Modellbildung und Modellbildungszyklus

Anknüpfend an Abschnitt 1.2 sei noch einmal festgehalten:

1. Die grundlegende Funktion eines Modells ist die *Abbildung* eines wirklichen oder gedachten Systems.
2. Auf dem Weg vom Original zum Modell findet eine *Abstraktion* statt; nur die relevanten Merkmale des Originals werden abgebildet. Was relevant ist, hängt einerseits vom Erkenntnisinteresse, andererseits auch vom Stand der Kenntnis ab. (Beispiel: In einem ökologischen Seemodell kann für bestimmte Fragestellungen von der Topographie des Sees abstrahiert werden.)
3. Bei der Modellbildung wird häufig auch eine *Idealisierung* bestimmter Merkmale des Originals vorgenommen. (Beispiel: Die jahreszeitlichen Schwankungen der Sonneneinstrahlung in einem ökologischen Seemodell werden durch eine einfache Sinusfunktion dargestellt, vgl. [Sch85].)

Durch Abstraktion und Idealisierung wird bei der Modellbildung die Komplexität des Originals reduziert. Im folgenden wird vorausgesetzt, daß der Modellbildungsprozeß von einem in der Realität vorgefundenen Original ausgeht (was etwa bei Gestaltungsmodellen nicht der Fall ist). Das Original wird als *Realsystem* bezeichnet. Viele der nachfolgenden Überlegungen gelten sinngemäß jedoch auch für die Modellierung fiktiver Systeme.

Der Prozeß der Modellbildung und Simulation läßt sich in mehrere Schritte zerlegen (s. Abb. 1-7). Zunächst wird ein *konzeptuelles Modell* entworfen. Dieses ist das Ergebnis des oben erwähnten Abstraktions- und Idealisierungsprozesses. Es handelt sich um ein rein **gedankliches Modell**, das zunächst nur in der Vorstellung des Modellentwicklers existiert. Beschreibungen des konzeptuellen Modells (z. B. in Form von umgangssprachlichen Texten, Modelldiagrammen, mathematischen Ausdrücken) sind unabhängig von der späteren Implementation des Modells als **Computerprogramm**. Das letztere wird zur deutlichen Abgrenzung vom konzeptuellen Modell auch als *Computer-Modell* bezeichnet. Ist ein lauffähiges und korrektes Computer-Modell entwickelt, so kann die **Simulation** durchgeführt werden. Die so erhaltenen *Simulationsergebnisse* erlauben in gewissen Grenzen Rückschlüsse auf das **Realsystem**. Die Ermittlung dieser Grenzen ist Aufgabe der *Modellvalidierung* (vgl. S. 16 und Kap. 5).

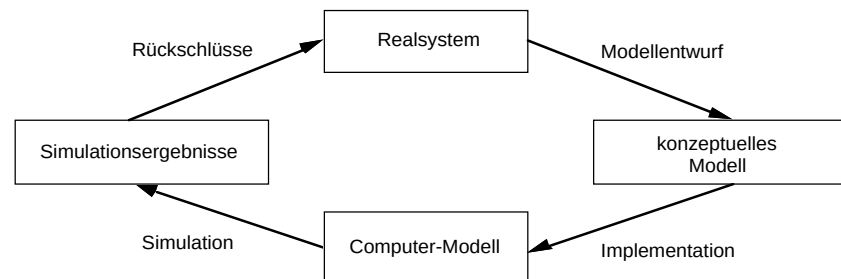


Abb. 1-7: Schematische Darstellung der Modellbildung und Simulation

Bisher wurde die Modellbildung stark vergrößert dargestellt. Betrachtet man die Arbeitsschritte des Modellentwicklers genauer, so lassen sich zahlreiche Einzelaktivitäten unterscheiden, die nicht streng sequentiell, sondern *parallel* und häufig in bestimmten *Zyklen* ablaufen.

Der gesamte Modellbildungsprozeß ist in Abbildung 1-8 in Anlehnung an [Käm90] dargestellt. Dabei kennzeichnen **Rechtecke** Aktivitäten des Modellentwicklers und **Ellipsen** deren Voraussetzungen bzw. Resultate. Die einzelnen Phasen werden im folgenden näher erläutert.

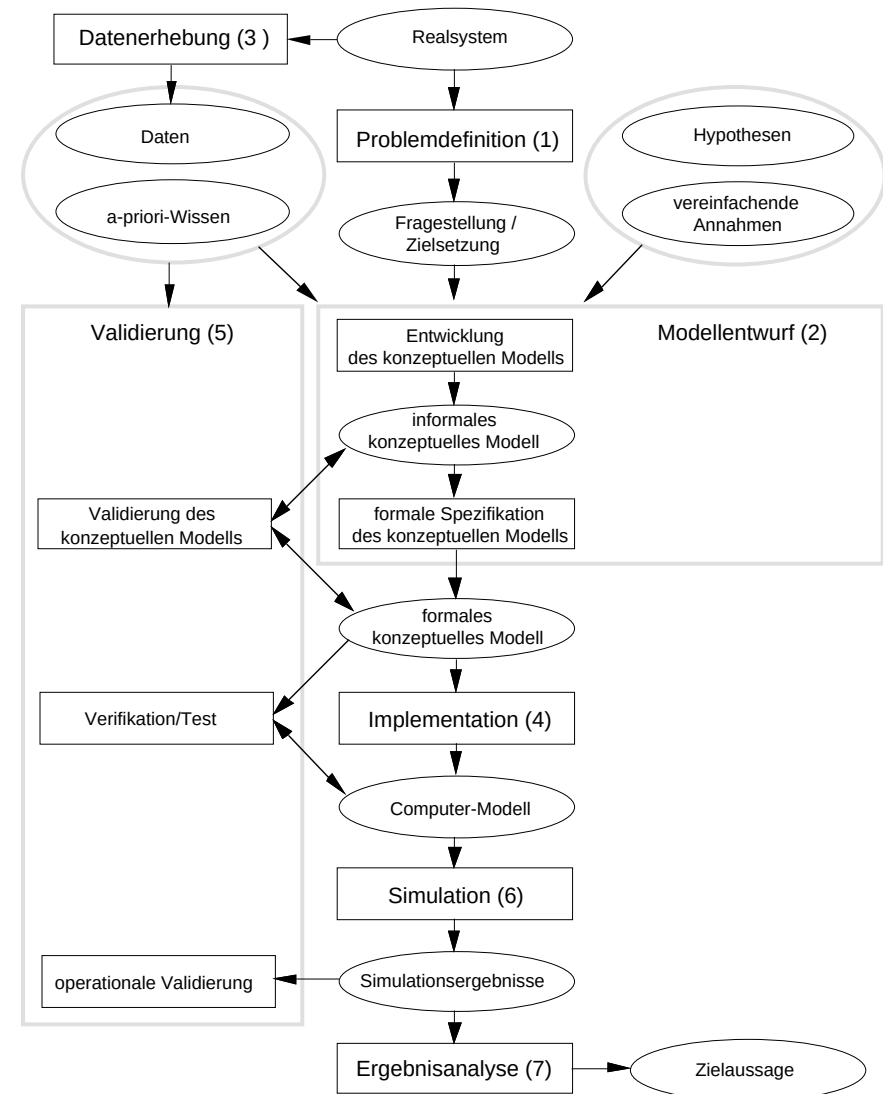


Abb. 1-8: Die Phasen des Modellbildungsprozesses

1. Problemdefinition

Am Anfang jeder Modellstudie sollte eine möglichst gründliche Problemdefinition stehen. Sie legt die zu untersuchenden Fragestellungen und zu erreichenden Ziele fest. Bei der genauen Problemabgrenzung muß dem Modellentwickler möglichst vollständig bewußt sein, unter welchem Blickwinkel er an die Problemstellung herangeht, da in diesem Anfangsschritt bereits eine Bandbreite von Lösungsmöglichkeiten abgesteckt wird.

Ist die Fragestellung der Untersuchung nicht eindeutig formuliert, so kann nicht zuverlässig entschieden werden, welche Systemkomponenten im Modell abzubilden sind und von welchen abstrahiert werden kann. Fehler, die in dieser frühen Phase gemacht werden, sind später nur mit großem Aufwand zu korrigieren, da hierzu die Modellstudie in der Regel wieder neu begonnen werden muß.

2. Modellentwurf

Der erste Schritt in der Phase des Modellentwurfs ist die **Entwicklung des konzeptuellen Modells**. Hierbei ist, ausgehend von der zu untersuchenden Fragestellung, eine Abgrenzung des zu modellierenden Systems gegenüber seiner Umgebung vorzunehmen (vgl. Abb. 1-1). Auf der Basis der Definition der Systemgrenzen wird eine erste Erfassung der Systemstruktur vorgenommen. In diesem ersten Abstraktionsschritt werden relevante Systemobjekte, ihre Attribute und Beziehungen ausgewählt und es wird entschieden, welche Systemaspekte für die zu untersuchende Fragestellung unwesentlich sind und unberücksichtigt bleiben können [Sch82].

Die relevanten Systemgrößen und ihre Beziehungen werden zunächst informal beschrieben. Hierfür wird meist ein *grafisch-deskriptives* Medium verwendet (Struktur-, Kausal- oder Flußdiagramme, Petri-Netz-ähnliche Darstellungen usw.).

Auf dieser Grundlage erfolgt die **Wahl eines geeigneten Modelltyps**. Ein System kann abhängig von der gewählten Fragestellung und Betrachtungsweise meistens durch Modelle verschiedenen Typs (z. B. durch ein kontinuierliches oder ein diskretes Modell) dargestellt werden. So kann man die Abfertigung der Kunden an den Kassen eines Supermarktes als *diskreten* Prozeß im Verlauf der Zeit ansehen. Betrachtet man aber die gesamte Masse der Kunden, die in den Supermarkt strömen, einkaufen, sich an den Kassen stauen, abgefertigt werden und den Supermarkt verlassen, so ist auch die Darstellung dieser Masse als "Menschenfluß" in einem *kontinuierlichen* Modell gerechtfertigt.

Ferner ist zu entscheiden, ob das System oder Teile davon durch Zufallsprozesse in einem *stochastischen* Modell beschrieben werden sollen, oder ob ein *deterministisches* Modell zu verwenden ist. In stochastischen Modellen lassen sich auch solche Komponenten des Systems durch Zufallsprozesse nachbilden, die zwar prinzipiell deterministisch beschreibbar wären, aufgrund ihrer Komplexität und Undurchschaubarkeit aber

ein zufällig erscheinendes Verhalten zeigen. Die Abbildung deterministischer Systeme auf stochastische Modelle ist ein wichtiges Mittel der Komplexitätsreduktion.

Eine weitere Möglichkeit, die Komplexität des zu untersuchenden Systems zu reduzieren, ist die **Zerlegung des Systems in Subsysteme** (Strukturierung und Modularisierung). Die Subsysteme müssen dabei Einheiten bilden, die für eine isolierte Untersuchung anhand von Teilmodellen geeignet sind. Um eine korrekte Verknüpfung der Teilmodelle zu einem Gesamtmodell zu gewährleisten, ist eine genaue Kenntnis der Interdependenzen der entsprechenden Subsysteme erforderlich.

Das Ergebnis der beschriebenen Arbeitsschritte ist das *informale konzeptuelle Modell*. Spätestens an diesem Punkt sollte auch eine **Aufwandsabschätzung** hinsichtlich Arbeitszeit, Ressourcenbedarf und Kosten für die gesamte Modellstudie vorgenommen werden, um die vollständige Realisierbarkeit des Modells im vorgegebenen Rahmen sicherzustellen.

Der nächste Schritt im Rahmen des Modellentwurfs ist die **formale Spezifikation des konzeptuellen Modells**, d. h. eine exakte Beschreibung des Modells in einem geeigneten Formalismus. Voraussetzung für eine mathematische Darstellung ist die Quantifizierbarkeit der Systemgrößen, damit Gleichungen oder Entscheidungsregeln zur Beschreibung der Beziehungen dieser Größen aufgestellt werden können. Bei kontinuierlichen Systemen handelt es sich hierbei um *Differentialgleichungen*. Bei diskreten Modellen werden dagegen die Modellabläufe vorwiegend durch *algorithmische Beschreibungen* in Form von Aktionssequenzen, Verzweigungen und Wiederholungen abgebildet. Für Modellparameter und stochastische Modellgrößen werden statistische Schätzwerte benötigt.

Auf welche Informationen stützt sich ein Modellentwickler in der Entwurfsphase? Zum einen sind dies empirische Daten, anhand derer *induktiv* Schlußfolgerungen über bestimmte Eigenschaften des Realsystems gezogen werden (s. Punkt 3, Datenerhebung). Auf der Basis von Beobachtungsdaten werden Gesetzmäßigkeiten postuliert, die sich in den oben genannten Schätzwerten (z. B. Verteilungsparametern) ausdrücken. Beispielsweise könnte die mittlere Lebensdauer eines Maschinenteils auf der Grundlage empirischer Daten geschätzt und als Parameter in einem Modell eines ausfallanfälligen Systems verwendet werden. Zum anderen wird der Modellentwickler sein "a priori"-Wissen einbringen, also jene Fachkenntnisse und Erfahrungen, die er vor Beginn der Modellstudie erworben hat. Aus diesem Wissen kann er *deduktiv* bestimmte Aussagen über das Realsystem ableiten. Beispielsweise wird in ein Modell eines technischen Systems umfangreiches Ingenieurwissen einfließen. Besonders hilfreich sind auch Erfahrungen aus früheren Modellstudien. Wo sicheres Wissen fehlt, werden Hypothesen aufgestellt, die in späteren Validierungsphasen (s. Punkt 5, Modellvalidierung, sowie Kap. 5) abgesichert werden müssen. Im Rahmen des Abstraktions- und Idealisierungsprozesses macht der Modellentwickler schließlich bestimmte vereinfachende Annahmen, die sich ebenfalls im Rahmen der Validierung bewähren müssen. Ergebnis der gesamten Modellentwurfsphase ist ein *formales konzeptuelles Modell*.

3. Datenerhebung

Da im Rahmen des Modellentwurfs genau festgelegt wird, welche Konstanten und Variablen das Modell enthält und wie diese quantifiziert werden, ist die **Ermittlung der erforderlichen Daten** eng mit den verschiedenen Ebenen des Modellentwurfs verflochten. Daher ist dieser Schritt des Modellbildungsprozesses zeitlich parallel zur Entwurfsphase zu sehen. Es müssen Werte für Modellkonstanten, Anfangswerte oder Zeitreihen für Modellvariablen sowie Verteilungstypen und -parameter für stochastische Modellgrößen ermittelt werden.

Die Datenerhebung kann einen beträchtlichen Teil des Aufwandes einer Simulationsstudie ausmachen. Beobachtungsdaten können prinzipiell als unausgewertete Zeitreihen in ein Modell einfließen (etwa zu Validierungszwecken). Häufiger werden die Daten jedoch zu statistischen Kennwerten (insbesondere Verteilungsparametern) aggregiert und in dieser Form weiterverwendet. Dies hat den Vorteil, daß eine Verallgemeinerung gegenüber den speziellen Beobachtungsdaten erreicht wird. In den meisten Modellstudien werden historische Daten vorliegen, die einen Teil des Datenbedarfs abdecken, aber durch gezielte neue Messungen am Realsystem ergänzt werden müssen. Schätzwerte können auch durch Expertenbefragungen gewonnen werden, wenn eine Neuerfassung und Auswertung der entsprechenden empirischen Daten aus Aufwandsgründen nicht in Frage kommt.

4. Modellimplementation

Das formale konzeptuelle Modell, das in der Entwurfsphase erstellt wurde, muß in ein ablauffähiges Computerprogramm überführt werden. In Abhängigkeit vom verwendeten Modelltyp und der zur Verfügung stehenden Hard- und Software ist die **Wahl einer geeigneten Programmiersprache** zu treffen. Prinzipiell ist die Verwendung allgemeiner höherer Programmiersprachen (z. B. Pascal oder Modula-2; vgl. Kap. 3) möglich. Darüber hinaus stehen auch spezielle Simulationssprachen (z. B. GPSS, Simula, Simscript, SLAM; vgl. Kap. 6) oder Simulationspakete (z. B. DESMO in Modula-2; vgl. Kap. 7) zur Verfügung. *Simulationssprachen* unterstützen und erleichtern die Implementation eines bestimmten Modelltyps durch die Bereitstellung simulationsspezifischer Basisfunktionen wie Zeitführung, Zufallszahlenerzeugung usw., verfügen jedoch meist nicht über die Flexibilität allgemeiner höherer Programmiersprachen. *Simulationspakete* mit ähnlicher Funktionalität wie Simulationssprachen haben den Vorteil, daß dem Benutzer die volle Flexibilität der Basissprache erhalten bleibt. Andererseits erfordern sie aber umfassendere Programmierkenntnisse. Ergebnis der Modellimplementation ist das *Computer-Modell*, eine maschinell ausführbare Beschreibung des konzeptuellen Modells.

5. Modellvalidierung

Bevor ein Modell für Simulationen eingesetzt wird, die entsprechende Experimente am Realsystem ersetzen sollen, muß seine *Validität* (Gültigkeit) überprüft werden. Die Bewertung des Modells hinsichtlich seiner Validität (Gültigkeitsnachweis, Modellvalidierung) verläuft parallel zu anderen Phasen des Modellbildungsprozesses.

Ob ein Modell "richtig" ist, läßt sich jedoch nicht allgemein – d. h. unabhängig von bestimmten Fragestellungen, Zielsetzungen und Bewertungen – nachweisen. Daher kann es auch keinen allgemeingültigen, umfassenden Validitätstest geben. Vielmehr muß man während des Modellentwicklungsprozesses auf verschiedenen Ebenen vielfältige Prüfungen vornehmen, um das Modell nach außen hin *transparent* und seine Eignung für die jeweilige Problemstellung glaubhaft zu machen ("*model credibility*"). Für die Modellvalidierung bieten sich die folgenden Stufen an (vgl. auch [Sar84] und Kap. 5):

- **Validierung des konzeptuellen Modells:**

Dieser Schritt bezieht sich auf die Abbildung vom *Realsystem* auf das *konzeptuelle Modell*. Es wird u. a. geprüft, ob das konzeptuelle Modell gemessen am jeweiligen Untersuchungsziel hinreichend genau beschrieben und in seinen wesentlichen Systemobjekten, -attributen und -beziehungen korrekt erfaßt ist [Hen84].

- **Modellverifikation:**

Die Modellverifikation befaßt sich mit der korrekten Abbildung des *konzeptuellen Modells* auf das *Computer-Modell*. Es wird überprüft, ob das Programm eine korrekte Implementation des (formalen) konzeptuellen Modells darstellt. Trotz der üblichen Bezeichnung "Verifikation" handelt es sich normalerweise nicht um eine formale Programmverifikation, sondern vielmehr um systematische Programmtests.

- **Operationale Modellvalidierung:**

Dies ist die aufwendigste Phase der Validierung. In Simulationen mit dem Computer-Modell wird das *dynamische Modellverhalten* überprüft. Hierfür stehen unterschiedliche Mittel zur Verfügung:

- *Plausibilitätstest*: Untersuchung des plausiblen Verhaltens des Gesamtmodells oder einzelner Modellteile (z. B. Beurteilung durch Experten)
- *Sensitivitätsanalyse*: Untersuchung der Robustheit des Modells bezüglich Veränderungen der Eingabewerte
- *Kalibrierung*: Anpassung des Modells an das reale System durch Änderung von solchen Parametern, die nur ungenau erfaßt werden konnten
- *Outputvergleich*: Vergleich von empirischen Ergebnissen über das Verhalten des Realsystems mit Modellergebnissen bei entsprechenden Eingabewerten
- *Prognostische und dynamische Gültigkeitsprüfung*: Nachweis der Prognosefähigkeit und der dynamischen Gültigkeit eines Modells im späteren Praxiseinsatz

Werden im Verlauf der unterschiedlichen Stufen der Modellvalidierung Unzulänglichkeiten aufgedeckt, müssen bestimmte Phasen des Modellbildungsprozesses erneut durchlaufen werden. Im ungünstigsten Fall kann die Modellrevision sogar eine Überarbeitung der ursprünglichen Problemdefinition erfordern.

Die Modellvalidierung gehört zu den schwierigsten Aufgaben im Laufe des Modellbildungsprozesses. Sie erfordert möglichst weitreichendes Erfahrungswissen über das Systemverhalten, das häufig nur Fachleute besitzen, die mit dem Realsystem eng vertraut sind.

6. Simulation

Mit dem lauffähigen und verifizierten Computer-Modell können nun Simulationen durchgeführt werden. Die Simulationsphase umfaßt die Planung und Durchführung von Modellexperimenten. Ein *Modellexperiment* oder *Simulationsexperiment* besteht aus einem oder mehreren Simulationsläufen. In jedem *Simulationslauf* wird das dynamische Modellverhalten unter vorher festgelegten Bedingungen generiert. Dabei werden die Eingabewerte bzw. experimentellen Parameter von Lauf zu Lauf variiert. Die Auswahl dieser speziellen Werte gehört zur Planung eines Experiments. Für eine Untersuchung sind häufig mehrere Experimente mit strukturell unterschiedlichen Modellvarianten notwendig.

Bei der Planung empfiehlt sich große Sorgfalt, um den Aufwand für die Durchführung der Experimente gering zu halten und die Anzahl der Simulationsläufe auf ein geeignetes Maß zu reduzieren. Die *Simulationsergebnisse*, also die Ausgabedaten der Simulationsläufe, müssen in angemessener Form präsentiert werden. Dabei spielt die grafische Aufbereitung der Daten eine wichtige Rolle.

7. Ergebnisanalyse

Die Simulationsergebnisse geben auch nach einer geeigneten Aufbereitung noch keine direkte Antwort auf die Fragestellung der Modellstudie. Vielmehr ist eine umfassende und sorgfältige Ergebnisanalyse und -bewertung erforderlich, um eine Zielaussage zu gewinnen. Im Rahmen der Ergebnisanalyse werden z. B. die Simulationsdaten aus verschiedenen Läufen verglichen, um die Auswirkungen der Eingabewerte auf das Modellverhalten zu untersuchen. Bei stochastischen Modellen müssen die Wahrscheinlichkeitsverteilungen (bzw. deren Parameter) der Ausgabeveriablen mit statistischen Methoden geschätzt werden.

Eine Bewertung der Ergebnisse erfolgt auf der Grundlage der ursprünglichen Fragestellung und Zielsetzung der Simulationsstudie. Wenn im Verlauf des Modellbildungsprozesses Einschränkungen vorgenommen wurden, die die Anwendbarkeit des Modells betreffen, müssen diese bei der Interpretation der Ergebnisse unbedingt berücksichtigt

werden. Nur auf dieser Grundlage ist eine Übertragung der aus der Analyse gewonnenen *Zielaussage* auf das Realsystem zulässig.

8. Dokumentation

Parallel zu allen beschriebenen Phasen des Modellbildungsprozesses sollte eine umfassende Dokumentation erstellt werden. Sie hat den Zweck, die Kommunikation zwischen allen am Modellbildungsprozeß beteiligten Personen zu unterstützen.

Die Dokumentation bildet auch die Arbeits- und Beurteilungsgrundlage für spätere Benutzer der Modelle. Sie sollte sich dabei keinesfalls nur auf das Computerprogramm, sondern auf die relevanten Ergebnisse *aller* Phasen der Modellstudie beziehen. Dazu gehört die explizite Problemdefinition ebenso wie eine genaue und verständliche Darstellung des konzeptuellen Modells einschließlich der Bemühungen um seine Validierung und der Erklärung seiner Ergebnisse. Grafische Darstellungsformen können die Dokumentation entscheidend unterstützen.

9. Einsatz in der Praxis

Beim Einsatz eines Modells in der Praxis ist zu beachten, mit welcher Fragestellung und Zielsetzung das Modell entwickelt wurde. *F. Maryanski* unterscheidet zwei grundlegende Zielrichtungen von Modellstudien: Bei sogenannten *classroom projects* wird die Modellentwicklung (z. B. im Ausbildungs- und Forschungsbereich) betont, wobei eine mehrmalige Anwendung des Modells nicht angestrebt wird. Der Nutzen solcher Projekte besteht im **Erkenntnisgewinn**, der sich als Folge der Modellentwicklung einstellt. Im Gegensatz dazu steht bei den *practical applications* die Anwendung im Vordergrund. Das Modell wird als mehrfach verwendbares Werkzeug entwickelt, das in der Praxis als **Entscheidungshilfe** dient [Mar80].

Die Einführung eines Modells in die Planungspraxis ist an eine Reihe von Voraussetzungen geknüpft. Neben einer besonders gründlichen Validierung ist auf die *Benutzerorientierung* des Modells Wert zu legen, da sie für die Annahme oder Ablehnung des Modells in der Praxis von großer Bedeutung sein kann. Demnach sollten Modelle dem Benutzer *verständlich*, in der Handhabung möglichst *einfach* und außerdem *anpassungsfähig* an Benutzerwünsche und an das sich verändernde Realsystem sein [Pag82]. Hier sollte sich der Modellentwickler an den Prinzipien der *Software-Ergonomie* orientieren. Häufig ist eine *Schulung* der Benutzer erforderlich, da die Benutzerorientierung des Modells selten so weit entwickelt werden kann, daß ein selbständiges Erlernen seiner Anwendung möglich und sinnvoll wäre.

1.5 Anwendungsfelder der zeitdiskreten Simulation

Die Simulation als bedeutendes Instrument für die Analyse komplexer Systeme findet allgemein Eingang in die verschiedensten Fachgebiete, von den Natur- und Ingenieurwissenschaften über die Wirtschafts- und Sozialwissenschaften bis hin zur Medizin oder Ökologie. In dem hier behandelten Teilgebiet der zeitdiskreten Simulation stehen die folgenden Anwendungsfelder im Vordergrund:

- **Verkehrsplanung:** Planung von Straßen (z. B. [Kac85]), Personennahverkehrssystemen, Flugplätzen (z. B. [Mre82]), Hafenanlagen (z. B. [Par87], [Amb85]) usw.
- **Fertigungssysteme:** Planung von Betriebs- und Produktionsabläufen (z. B. [Sch87a], [Kuh87] und Abschnitt 2.5.1), Planung des Personaleinsatzes (z. B. [Pet87]), betrieblicher Transportsysteme (z. B. [Sch87b]) und Lagerhaltungssysteme (s. Abschnitt 2.4.2)
- **Versorgungs- und Dienstleistungseinrichtungen:** Planung und Betrieb von öffentlichen Einrichtungen z. B. des Gesundheitswesens, hier insbesondere für die Lagerhaltung in Blutbanken, das Rettungswesen, Röntgenabteilungen und die Personalplanung in Krankenhäusern (s. [Pag82])
- **Umweltschutz und Umweltforschung:** Abfallwirtschaft (z. B. [Vog86]), Emissionsminderung (z. B. [Bel84]), umweltfreundliche Verkehrsregelung (z. B. [Vor88]), Ökosystemforschung (z. B. [Bre87])
- **Datenverarbeitung:** Konfigurierung von Rechenanlagen, Analyse von Betriebssystemen, Analyse von Rechnernetzen (z. B. [Joh84]), Datenbankentwurf (z. B. [Eic89])
- **Technik:** Schaltkreisentwurf (z. B. [Lew87] oder [Hor85]), Entwurf von Industrierobotern, Analyse von Funknetzen (z. B. [Bol87]), Zuverlässigkeitsanalyse technischer Systeme auf den verschiedensten Gebieten (s. Abschnitt 2.4.3)

1.6 Möglichkeiten und Grenzen der Modellbildung und Simulation

Die Methode der Modellbildung und Simulation kann ein nützliches Instrument der Systemanalyse sein. Voraussetzung dafür ist eine gut durchdachte und korrekt ausgeführte Simulationsstudie und eine **kritische Analyse der Ergebnisse**, die die im Laufe der Modellbildung getroffenen Annahmen und Einschränkungen berücksichtigt. Dabei ist zu bedenken, daß Modellbildung und Simulation zur Unterstützung eines *Problemlösungsprozesses* dienen, der unter vorgegebenen Zielen und Randbedingungen statt-

findet und Antworten auf konkrete Fragestellungen liefern soll. Diesem ist ein *Zielfindungsprozeß* vorgelagert, in dem die zu lösenden Probleme festgelegt werden. Zur Auswahl dieser Fragestellungen und Zielsetzungen kann das methodische Instrumentarium der Modellbildung und Simulation keinen Beitrag leisten. Der instrumentelle Charakter dieser Methoden sollte dem Entwickler und Anwender von Simulationsmodellen stets bewußt bleiben.

In den vorausgegangenen Abschnitten sollten bereits die prinzipiellen Möglichkeiten und Vorteile der Modellbildung und Simulation deutlich geworden sein. Diesem methodischen **Potential** stehen bestimmte **Probleme** und Grenzen gegenüber, die beim Einsatz dieser Methode zu beachten sind. Abbildung 1-9 faßt das Potential und die Probleme der Modellbildung und Simulation in Stichworten zusammen; die einzelnen Punkte werden im folgenden diskutiert.

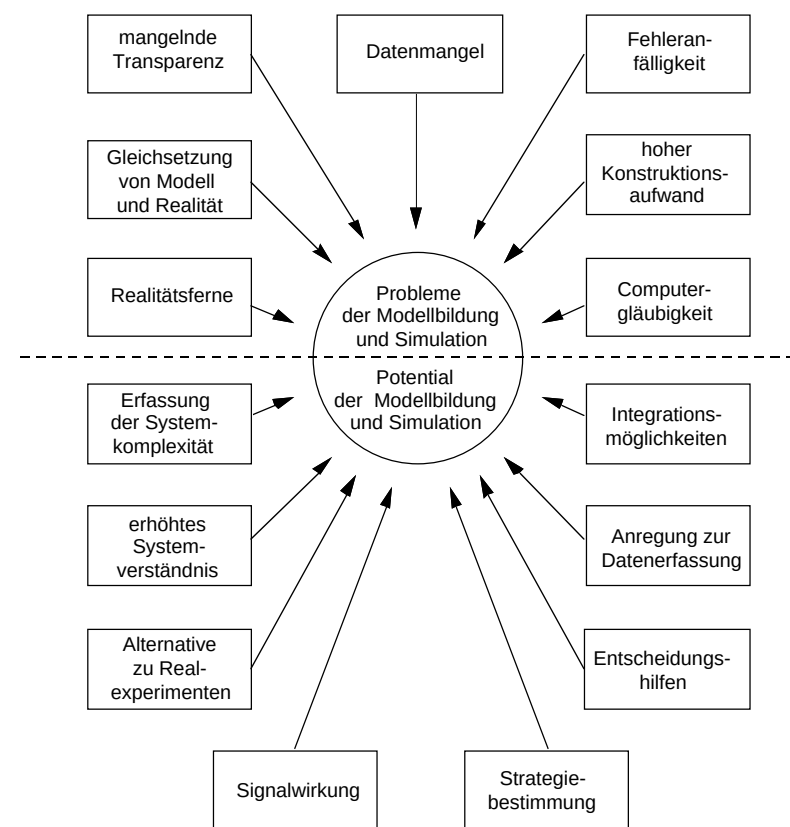


Abb. 1-9: Potential und Probleme der Modellbildung und Simulation

1.6.1 Das Potential der Modellbildung und Simulation

Die Modellbildung und Simulation bietet als Methode der Systemanalyse die folgenden potentiellen Vorteile:

Erfassung der Systemkomplexität

Der menschliche Verstand kann die Dynamik von Systemen und die Konsequenzen bestimmter Systemzustände dann recht gut erfassen, wenn eine isolierte Betrachtung der jeweils relevanten Komponenten und Prozesse möglich ist. Diese Möglichkeit ist bei komplexen Systemen mit vielfach interagierenden Prozessen jedoch nicht mehr gegeben. Hier bietet sich die systemtheoretische Modellbildung mit der Möglichkeit zur Computersimulation an. In ihr ist darüber hinaus der interdisziplinäre Gedanke verankert, der die Fähigkeit erhöht, komplexe Probleme zu lösen.

Erhöhtes Systemverständnis

Durch die Modellbildung wird das Verständnis des Realsystems verbessert. Auch ohne Simulationsergebnisse führt die Modellbildung zu einem Erkenntnisgewinn für den Modellentwickler. Die explizite Formulierung des Modells (informal, formal und schließlich als Computerprogramm) führt dazu, daß alle in das Modell einfließenden Prämissen (a-priori-Wissen, empirische Daten, Hypothesen, vereinfachende Annahmen) erkennbar werden. Dabei wird die logische Struktur des ursprünglichen konzeptuellen Modells aufgedeckt. Inkonsistenzen und Unvollständigkeiten werden sichtbar.

Alternative zu Realexperimenten

Der Einsatz von Modellen ist immer dann nützlich, wenn Experimente am Realsystem unmöglich, zu kostenintensiv oder aus anderen Gründen nicht vertretbar sind. Simulation ist häufig die *einzige* Möglichkeit, Experimente durchzuführen, ohne das zu untersuchende System in unerwünschter Weise zu beeinflussen.

Signalwirkung

Modelle erlauben die Abschätzung der Auswirkungen geplanter Eingriffe in ein Realsystem und können somit frühzeitig vor ungewollten Folgen bestimmter Maßnahmen oder Entwicklungen warnen.

Strategiebestimmung

Die Methode der Modellbildung und Simulation ist hilfreich bei der Auswahl und Begründung alternativer Handlungsstrategien für den Umgang mit komplexen Realsystemen.

Entscheidungshilfen

Modellbildung und Simulation erhöhen den Informationsstand und erweitern den Blickwinkel der Entscheidungsträger. Sie können (und sollten) zwar keine Entscheidungen liefern (denn ein "Entscheidungsautomat" trägt keine Verantwortung!), bieten jedoch *Entscheidungshilfen*, wenn im Rahmen von Planungs- und Entscheidungsprozessen eine Abwägung verschiedener hypothetischer Maßnahmen vorzunehmen ist. Das gilt insbesondere für normative Entscheidungen.

Integrationsmöglichkeiten

Modelle oder Teilmodelle, die im Rahmen einer bestimmten Problemstellung entwickelt werden, können (unter Beachtung der relevanten Einschränkungen) anschließend im Rahmen weiter gefaßter Untersuchungen wiederverwendet werden, indem sie als *Bausteine* in ein neues Gesamtmodell *integriert* werden. Durch die Modellintegration lassen sich die in mehreren Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse systematisch kumulieren.

Anregung zur Datenerfassung

Der systemtheoretische Ansatz der Modellbildung kann Datenlücken aufdecken und die Erschließung der fehlenden Daten motivieren. Dadurch wird ein *gezielter* Einsatz der Forschungsmittel möglich, die für die Datenerfassung zur Verfügung stehen. Durch Modellstudien kann auch ein Anstoß zum Aufbau von Informationssystemen mit regelmäßiger Aktualisierung der Daten gegeben werden.

1.6.2 Probleme der Modellbildung und Simulation

Ein angemessener Einsatz der Methode der Modellbildung und Simulation setzt voraus, daß ihre Grenzen und Risiken beachtet werden. Im folgenden werden die Probleme beschrieben, die beim Einsatz der Methode zu berücksichtigen sind:

Realitätsferne

Im Modellbildungsprozeß erfolgt notwendigerweise eine starke Simplifizierung der realen Gegebenheiten. Die Erfahrung zeigt, daß dabei häufig Beziehungen falsch interpretiert, Probleme übersehen und inadäquate Ziele vorgegeben werden [Rüs82]. In vielen Systemen, insbesondere sozio-ökonomischen oder ökologischen Realsystemen, überwiegen qualitative Einflußfaktoren, die schwierig zu quantifizieren sind. Dadurch entstehen in diesen Bereichen besondere Zweifel an der Realitätsnähe und damit an der

Validität der Modelle. Allgemein sollten die Mittel der Validitätsprüfung möglichst vollständig ausgeschöpft werden (vgl. Kap. 5).

Gleichsetzung von Modell und Realsystem

Die Modellbildung und Simulation erscheint attraktiv und kann daher leicht zu einer Überbewertung von Modellergebnissen verführen. Ein Modellanwender sollte sich keinesfalls dazu verleiten lassen, Simulationsdaten mit Fakten gleichzusetzen oder zu vermischen. Das verwendete Computerprogramm repräsentiert nur *ein* Modell des Realsystems und steht mit diesem nur indirekt über mehrere Ebenen der Abbildung in Beziehung, die im Modellbildungszyklus (vgl. Abb. 1-8) zu erkennen sind. Diese Ebenen müssen argumentativ und terminologisch möglichst sauber auseinandergehalten werden.

Mangelnde Transparenz

Eine wichtige Voraussetzung für die Nachprüfbarkeit von Simulationsergebnissen ist die Transparenz aller Schritte einer Simulationsstudie. Alle Faktoren, die am Zustandekommen der Simulationsergebnisse beteiligt waren, müssen für Außenstehende Betrachteter möglichst unmittelbar einsehbar sein [Häu88]. Häufig sind jedoch Modellstruktur, vereinfachende Annahmen, Hypothesen und andere Prämissen des Modells für Außenstehende wenig transparent und mit vertretbarem Aufwand kaum nachvollziehbar. Besonders die mangelnde Dokumentation von Modellstudien und die unzureichende Strukturiertheit von Simulationssoftware sind für dieses Problem verantwortlich. Daher ist eine möglichst vollständige und verständliche Dokumentation der Modellstudie anzustreben, unterstützt durch eine klare Strukturierung der erstellten Programme.

Datenmangel

In vielen Anwendungsbereichen, insbesondere in den Sozialwissenschaften oder der Ökologie, fehlen häufig die Daten, die zur Entwicklung und Anwendung von validen Simulationsmodellen benötigt werden. Die schlechte Datenlage kann dazu führen, daß bei der Modellkonstruktion mit empirisch nicht ausreichend gesicherten Schätzungen gearbeitet wird, was den Wert der Simulationsergebnisse erheblich mindert. Wo es möglich ist, sollten die wichtigsten Daten gezielt erhoben werden; nicht zuletzt ist der Nutzen einer Modellstudie auch darin zu sehen, daß eine gezielte Datenerhebung und damit ein optimaler Einsatz der dafür zur Verfügung stehenden Forschungsmittel möglich wird.

Fehleranfälligkeit

Die Komplexität des Modellbildungsprozesses, die hohe Qualifikationsanforderungen stellt, birgt das Risiko von Irrtümern und Fehlentscheidungen. Fehler sind in allen Phasen des Modellbildungsprozesses denkbar. In der Implementationsphase können wegen der hohen Komplexität der Simulationsprogramme Inkonsistenzen zwischen konzeptuellem Modell und Computer-Modell auftreten, die nur schwer als Fehler erkennbar sind (und vielleicht nie erkannt werden). Viele Modellstudien vernachlässigen außerdem notwendige Untersuchungsschritte wie z. B. die explizite Systemabgrenzung oder eine sorgfältige Modellvalidierung. Nicht zu unterschätzen sind daneben auch die Auswirkungen *numerischer Fehler*, die sich im Simulationslauf akkumulieren und das Ergebnis beträchtlich verfälschen können. Bei stochastischen Modellen können sich über die Zufallszahlenerzeugung und die stochastischen Variablen zusätzliche, oft schwer erkennbare Fehler in die Ergebnisse einschleichen. Störend kann sich bei vielen Modellen auch eine ungünstige Wahl der Initialisierungswerte auswirken.

Hoher Konstruktionsaufwand

Ein weiteres Problem der Modellbildung und Simulation ist der hohe Aufwand, der mit entsprechenden Studien verbunden ist. Wird dieser Aufwand bei der Planung einer Modellstudie unterschätzt, so kann dies leicht zu einem Scheitern der gesamten Untersuchung führen. Auch können sich während der Durchführung umfangreicher, langwieriger Simulationsstudien die Rahmenbedingungen derart verändern, daß das Modell nach Abschluß seiner Entwicklung bereits nicht mehr anwendbar ist.

Computergläubigkeit

Es besteht die Gefahr, daß Modelle aufgrund der Verwendung des Computers als Modellmedium mit einer *Scheinobjektivität* ausgestattet werden, die der stets begrenzten und nie endgültig feststellbaren Validität von Modellen nicht gerecht wird. Aufgrund einer verbreiteten Computergläubigkeit werden Modellergebnisse häufig unkritisch interpretiert. Eine möglichst transparente Dokumentation der Modellstudie sollte es dem Leser ermöglichen, sich ein eigenes Urteil über die Validität der Ergebnisse zu bilden.

Die hier beschriebenen Probleme der Modellbildung und Simulation sind nicht in allen Anwendungsgebieten gleich ausgeprägt. Bei Modellstudien auf der Makroebene, wie sie in den Sozialwissenschaften, der Ökonomie und der Ökologie durchgeführt werden, treten sie stärker in Erscheinung als bei Anwendungen auf der Mikroebene, die mehr in den technisch-organisatorischen Bereich fallen. Diese typischen Anwendungen der *zeitdiskreten Simulation*, die in diesem Buch im Mittelpunkt stehen, sollten vom Modellentwickler und Modellanwender dennoch im Bewußtsein der prinzipiellen Grenzen und Risiken des Instrumentariums bearbeitet werden.