

~~Gruppe der linearen Systeme beliebiger Dimension. Dagegen zeigen nichtlineare Systeme kein derart verallgemeinerbares generisches Verhalten. Bereits kleine nicht-lineare Systeme, die sich oft nur in 'Kleinigkeiten' unterscheiden, zeigen völlig verschiedenes Verhalten.~~

~~In verschiedenen Realitätsbereichen finden sich oft generisch gleiche Strukturen. Mit ihrem charakteristischen Verhalten bestimmen sie die Dynamik der Systeme unserer Welt und damit auch ihre Entwicklung. Beispiele: Exponentielles Wachstum oder Zerfall, logistisches Wachstum, Räuber-Beute-Verhältnisse, Konkurrenz, Abhängigkeit, Ressourcenausbeutung, Übernutzung und Zusammenbruch, Störungen eines dynamischen Gleichgewichts, durch Verzögerungen verursachte Schwingungen und viele andere Phänomene. Der Systemanalytiker und Modellbauer sollte mit ihrer charakteristischen Systemstruktur und dem daraus sich ergebenden Verhalten vertraut sein.~~

~~Im Kapitel 3 sind einige wenige dieser Systeme angegeben; in den Kapiteln 4 und 5 werden einige weitere Systeme genauer untersucht. Im Kapitel 7 'Systemzoo' sind die Kurzbeschreibungen von etwa 100 Simulationsmodellen aus den Bereichen: Elementarsysteme, Technik und Physik, Klima und Pflanzenwuchs, Ökosysteme und Ressourcen, Wirtschaft und Gesellschaft sowie Globale Entwicklung wiedergegeben. Die entsprechenden Modelle sind in Bossel 2004 'Systemzoo' zusammen mit den Parametern und Ergebnissen von Standard-Simulationsläufen vollständig dokumentiert und lassen sich daher für eigene Untersuchungen verwenden und modifizieren.~~

1-2 Grundsätzliches zu Systemen

Die Begriffe 'System' und 'Modell' und andere Systembegriffe haben wir bisher recht pragmatisch benutzt, ohne sie genauer zu definieren. Um einen Einstieg in die Materie zu bekommen, wurde ein Grundverständnis über ihre Bedeutung vorausgesetzt.

Für viele beginnt wissenschaftliche Arbeit mit einem 'sauberen' Satz von Definitionen, auch in der Systemforschung. Aber Systeme können nur verstanden werden über ein Verständnis von Systemen, nicht von Definitionen. Dieser – logisch unsinnige – Satz soll darauf hinweisen, dass Lernen über Systeme immer ein Lernen von Systemen in einem interaktiven Rückkopplungsprozess sein muss. Dieses Buch soll dabei helfen.

Trotzdem kann vieles über Systeme gesagt werden, ohne dass man konkret mit ihnen arbeitet. Im verbleibenden Teil dieses Kapitels sollen wichtige Aussagen zusammengefasst werden. Diese Informationen dienen als Hintergrund für die Untersuchungen in den folgenden Kapiteln, aber sie sind für den Einstieg in die Modellbildung und Simulation nicht unbedingte Voraussetzung und können daher zunächst übersprungen werden.

1-2.1 Was ist ein System? Systemidentität, Systemintegrität, Systemzweck

Viele Objekte in unserer Erfahrungsumwelt bezeichnen wir als 'System'. Sie bestimmen durch ihre Anwesenheit oder durch ihr Verhalten die Entwicklung; viele Systeme sind von Menschen geschaffen und werden von ihnen als Werkzeuge benutzt. Aber nicht alles in unserer Umwelt ist ein System – wir sollten daher unterscheiden können.

Wir nennen ein Objekt ein System, wenn es ganz bestimmte allgemeine Merkmale aufweist:

- 1. Das Objekt erfüllt eine bestimmte Funktion, d.h. es lässt sich durch einen **Systemzweck** definieren, den wir als Beobachter in ihm erkennen.
- 2. Das Objekt besteht aus einer bestimmten Konstellation von **Systemelementen** und **Wirkungsverknüpfungen** (Relationen, Struktur), die seine Funktionen bestimmen.
- 3. Das Objekt verliert seine **Systemidentität**, wenn seine Systemintegrität zerstört wird. Ein System ist daher **nicht teilbar**, d.h. es existieren Elemente und Relationen in diesem Objekt, nach deren Herauslösung oder Zerstörung der ursprüngliche Systemzweck, d.h. die Systemfunktion nicht mehr erfüllt werden kann: Die Systemidentität hätte sich verändert oder wäre gänzlich zerstört.

Diese Kriterien des **Systemzwecks**, der **Systemstruktur** und der **Systemintegrität** ermöglichen es uns nun, Unterscheidungen zu treffen. *Beispiele:*

Ein Stuhl ist demnach ein System, weil er einen Systemzweck und eine Systemstruktur besitzt (Sitzplatte, Rückenlehne, Beine mit entsprechenden Wirkungsbeziehungen zwischen ihnen) und das Abtrennen bestimmter Elemente (z.B. zweier Beine) zu einer Zerstörung der Systemintegrität führt, d.h. der ursprüngliche Systemzweck kann nicht mehr erfüllt werden.

Ein Sandhaufen ist kein System, weil sich zwar ein gewisser Systemzweck definieren lässt (Lagerung von Sand), weil aber selbst das Abtragen einer großen Menge Sand nichts an der Identität als Sandhaufen ändern würde.

Ein Gewichtsstein ist kein System. Zwar lässt sich ein Zweck definieren, und die Identität als Gewichtsstein würde durch eine Halbierung zerstört werden, doch besteht der Gewichtsstein (für die Zwecke dieser Betrachtung) aus einem einzigen Element ohne irgendwelche Relationen (noch nicht einmal einer Rückkopplung zu sich selbst).

Das Straßburger Münster ist ein System, da sich Systemzweck, Elemente und Relationen erkennen lassen und es durch Heraustrennen bestimmter Elemente und Relationen seine Integrität verlieren würde. Organismen, Maschinen, Organisationen und die interagierenden Prozesse der ökologischen Umwelt sind Systeme.

Systeme sind also durch Systemelemente und eine essentielle Wirkungsstruktur gekennzeichnet, die ihnen die Erfüllung bestimmter Funktionen gestattet, die Systemzweck und Systemidentität definieren. Bei der Modellbildung und Simulati-

on, so wie wir sie hier verstehen, geht es in erster Linie darum, diese essentiellen Systemelemente und die Wirkungsstruktur des Systems herauszuarbeiten.

Grundsätzliche Systemkonzepte sind in Abb. 1.1 gezeigt. Ein System existiert in einer bestimmten Systemumgebung ('Umwelt'), von der es durch seine Systemgrenze getrennt ist. Es steht unter dem Einfluss von Einwirkungen aus der Umwelt ('Input') und wirkt selbst mit seinen Auswirkungen auf die Umwelt ('Output'). Die Systemelemente sind durch eine charakteristische Systemstruktur miteinander verbunden. Einige dieser strukturellen Verknüpfungen können Teile von Rückkopplungsschleifen sein.

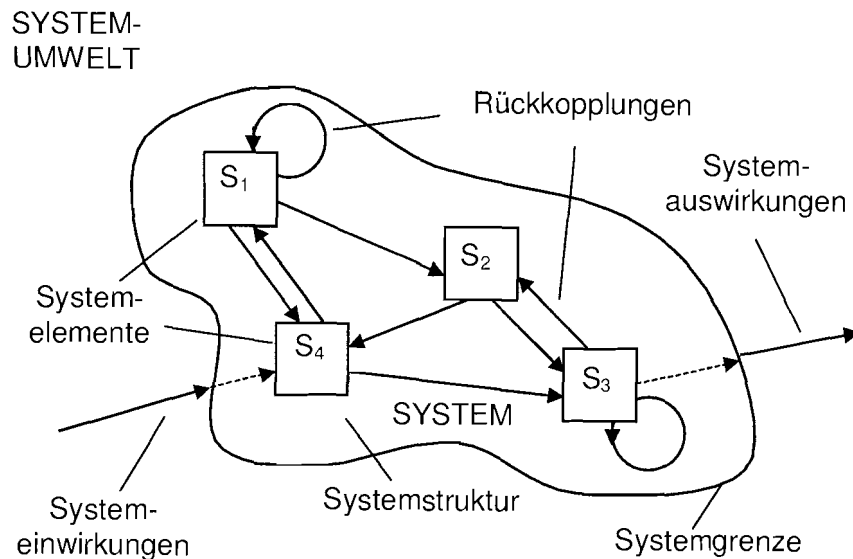


Abb. 1.1: Bestandteile von Systemen: Systemelemente, Systemstruktur, Rückkopplung, Systemgrenze, Systemumgebung, Systemeinwirkungen (Systemeingänge) und Systemauswirkungen (Systemausgänge).

1-2.2 Dynamische Systeme, Systemverhalten, Betrachtungszeitraum

Genau genommen sind alle Systeme dynamische Systeme, auch solche, die uns eher statisch erscheinen, wie der Stuhl oder das Straßburger Münster. Über einen längeren Zeitraum gesehen, unterliegen sie Alterserscheinungen; bei Belastung ergeben sich dynamische Lasten (Benutzung des Stuhls, Winddruck am Münster), die bei gewissen Untersuchungen eine Rolle spielen könnten. Wir sprechen aber hier von 'dynamischen Systemen', wenn diese in einem uns interessierenden Zeitraum ihren Zustand ändern und damit dynamisches Verhalten zeigen. Dabei dürfen wir uns

nicht auf direkt beobachtbares Verhalten beschränken. Wesentliche Zustandsgrößen sind oft nicht beobachtbar und dennoch für die Funktion des Systems entscheidend. Die Herzdynamik einer Person ist z.B. unter normalen Umständen kaum beobachtbar; sie ist aber dennoch entscheidend für ihr Leben und Wohlbefinden.

In der Praxis interessieren Aussagen über das Verhalten des Systems, d.h. über vom System verursachte, in seiner Umwelt beobachtbare Veränderungen systemeigener Größen oder von Einwirkungen auf die Umwelt. Wir errahnen aber bereits, dass in vielen Fällen die Beobachtung von Systemverhalten nicht ausreichen wird, um zuverlässige Aussagen über weiteres Systemverhalten zu gewinnen. Offensichtlich muss in vielen Fällen auch der innere Zustand des Systems analysiert werden. So lässt sich etwa aus dem Verhalten eines Kraftfahrzeugs (Brennstoffverbrauch, Geschwindigkeit, Schadstoffemissionen) nicht ahnen, dass der Ölstand zu niedrig ist, der Motor sich überhitzt hat und das Fahrzeug demnächst mit einem Kolbenfresser stehen bleiben wird. Offensichtlich ist also für die umfassende Beschreibung eines Systems mehr erforderlich als das, was sich von außen beobachten lässt. Diese essentiellen, den tatsächlichen Systemzustand vollständig beschreibenden Größen nennen wir **Zustandsgrößen**. Wie im System selbst, so spielen sie auch bei der Systemanalyse, Modellbildung und Simulation eine entscheidende Rolle.

1-2.3 Systemgrenzen und Systemumwelt, Einwirkungen und Auswirkungen

Systeme der verschiedensten Art (einschließlich unserer selbst) bevölkern unsere Umwelt. Jedes System hat seine eigene **Systemumwelt** oder Systemumgebung. Größen dieser Umwelt können als äußere Einwirkungen Einfluss auf die Systementwicklung haben; umgekehrt können Systemgrößen die Systemumwelt in der einen oder anderen Art beeinflussend verändern. Für die Systemuntersuchung ist es notwendig, eine **Systemgrenze** zu definieren, die das System klar von seiner Umwelt abtrennt.

Systeme sind nie völlig isoliert von ihrer Umgebung: sie wären sonst nicht wahrnehmbar; ihre Existenz wäre nicht beweisbar. Daher kann es also strikt genommen keine undurchlässige Grenze zur Umgebung geben, sondern lediglich eine Oberfläche, durch die gewisse Kopplungen mit der Umgebung stattfinden durch (a) Einwirkungen der Umgebung auf das System und (b) Auswirkungen des Systems auf seine Umgebung. Unter Auswirkungen verstehen wir hier alle beobachtbaren Verhaltensgrößen, also z.B. auch sichtbares Licht, das uns Informationen über Existenz und Zustand eines Systems vermittelt.

Für praktische Untersuchungen stellt sich die Frage, wo diese Grenze zu ziehen ist. In manchen Fällen ist das einfach zu beantworten; so etwa bei einem Stuhl, bei einem Kraftfahrzeug oder einem Menschen. Hier fallen physikalische Oberflächen mit der Systemgrenze zusammen. In anderen Fällen, insbesondere bei Systeme-

men aus dem ökologischen oder sozialwissenschaftlichen Bereich, ist die Grenzdefinition weit schwieriger. Da von dieser Grenzziehung aber die Komplexität und Bearbeitbarkeit der Untersuchung wesentlich abhängt, erfordert die Grenzziehung einige Aufmerksamkeit.

Wo lässt sich z.B. die Systemgrenze eines Waldgebietes ziehen? Ist die Veränderung des Boden- und Grundwasserangebots und der Luftfeuchtigkeit und Niederschläge durch den Wald selbst in einer geschlossenen Systemdarstellung zu berücksichtigen, oder können die Niederschläge als äußere Einwirkungen unabhängig von der Systementwicklung selbst vorgegeben werden? Die Kriterien für die Definition der Systemgrenze laufen alle darauf hinaus, eine Systemoberfläche zu finden, innerhalb derer sich das System in relativer Autonomie verhalten kann. Die folgenden Kriterien gelten einzeln oder in Kombination:

1. Systemgrenze dort, wo die Kopplung zur Umgebung sehr viel schwächer ist als die Binnenkopplung im System (z.B. Organismus: Haut)
2. Systemgrenze dort, wo vorhandene Umweltverkopplungen nicht funktionsrelevant sind. *Beispiel:* Um die Körperfunktionen einer Ameise zu untersuchen, kann sie als isoliertes Individuum betrachtet werden. Ist aber ihre soziale Funktion im Ameisenhaufen von Interesse, muss sie als Teil dieses größeren Systems betrachtet werden.
3. Systemgrenze dort ziehen, wo Umwelteinwirkungen auf das System nicht durch das System selbst bestimmt oder durch Rückkopplung von Systemauswirkungen verändert werden können (bei Ökosystemen z.B.: Einstrahlung, Temperatur, Niederschlag).

Die Systemabgrenzung kann vom Beschreibungszweck abhängen. Falls also z.B. der Einfluss eines Waldgebiets auf das Lokalklima untersucht werden soll, so müssen auch die atmosphärischen Vorgänge, wie etwa die Rezyklierung des an den Blattoberflächen transpirierten Wassers durch Kondensation und Niederschlag berücksichtigt werden.

1-2.4 Wie macht sich ein System bemerkbar? Verhalten und Zustand

Ein System wirkt über **Verhaltensgrößen** (Ausgangsgrößen) auf seine Umwelt und ist nur über diese in der Umwelt bemerkbar. Soweit das Verhalten sich nicht als direkte Reaktion auf Umwelteinwirkungen ergibt, setzt es Veränderungen im System selbst, d.h. Veränderungen des Systemzustands in der Zeit voraus, die wir als Zustandsänderungen bezeichnen. Möglicherweise reflektieren die Verhaltensgrößen nur einen Teil des Innenlebens des Systems; oft genug dringt überhaupt keine Zustandsgröße, d.h. Information über den Systemzustand nach außen. Der tatsächliche Systemzustand ist (und die entsprechenden Systemzustandsänderungen sind) daher möglicherweise nur teilweise oder gar nicht aus Systemäußerungen an die Umwelt

ablesbar. Für die Weiterentwicklung des Systems ist allerdings der Systemzustand, d.h. die Gesamtheit (der Vektor) seiner Zustandsgrößen entscheidend – selbst wenn sie äußerlich nicht in Erscheinung treten sollten.

Zustandsgrößen sind definiert als diejenigen Größen, aus denen sich zu jeder Zeit der Zustand des Systems vollständig ergibt, einschließlich aller daraus ableitbaren System- oder Verhaltensgrößen. Sie sind voneinander unabhängig, d.h. keine Zustandsgröße lässt sich aus einer beliebigen Kombination anderer Zustandsgrößen ableiten, und jede einzelne Zustandsgröße ist für die vollständige Beschreibung des Systems notwendig.

Beispiel: Bei der Untersuchung einer regionalen Entwicklung sind die Bevölkerungszahl und die Getreideanbaufläche Zustandsgrößen. Sie sind voneinander unabhängig: Die Bevölkerungszahl lässt sich nicht über die Anbaufläche ermitteln und umgekehrt. Andere Systemgrößen können aber aus diesen Zustandsgrößen ermittelt werden, so etwa der Getreideverbrauch der Bevölkerung und die jährliche Getreideproduktion der Region. Diese Größen lassen sich unter Verwendung der Systemparameter 'Pro-Kopf-Verbrauch von Getreide' und 'normaler Hektarertrag' berechnen.

Zustandsgrößen sind oft nicht eindeutig definierbar; d.h. verschiedene Größen im System können für eine bestimmte Zustandsgröße stehen. So ist z.B. zur Angabe des Füllzustands einer Badewanne eine Zustandsgröße notwendig. Ob als Maß für diese Zustandsgröße aber der Wasserinhalt (in Liter), die Wassermasse (in kg), die Wassertiefe (in cm) oder etwa die Zahl der Wassermoleküle genommen werden, ist für die Beschreibung der Systemdynamik ohne Belang, kann aber natürlich praktische, z.B. messtechnische Bedeutung haben.

Wichtig ist besonders die Feststellung, dass, obwohl die Zustandsgrößen im Einzelnen nicht festliegen, ein bestimmtes System durch eine ganz bestimmte Anzahl von Zustandsgrößen beschrieben werden muss. Diese Zahl ist die **Dimensionalität des Systems**; ihr entspricht die Zahl der Differential- oder Differenzengleichungen, die die Zustandsänderungen des Systems beschreiben. Fehlte eine Zustandsgröße, so wäre das System nicht vollständig beschreibbar. Würden dagegen zusätzliche Zustandsgrößen angegeben, so wäre die Beschreibung redundant und überbestimmt. Ein Masse-Feder-Dämpfungssystem z.B. benötigt zwei Zustandsgrößen zu seiner Beschreibung; eine Beschreibung durch eine Zustandsgröße ist nicht möglich. Bei einer Beschreibung mit mehr als zwei Zustandsgrößen wären die überzähligen Größen aus zwei Größen ableitbar und damit keine echten Zustandsgrößen.

1-2.5 Ein System hat 'Gedächtnis': Zustandsgrößen sind Speichergrößen

Zustandsgrößen sind das 'Gedächtnis' des Systems. Typischerweise sind es 'Speicher' von Energie, Rohstoffen, Geld oder Individuen, die im Laufe der Zeit ihren Inhalt verändern. Der neueste Stand wird dabei ermittelt aus dem Bestand zum vor-

herigen Zeitschritt der Zustandsermittlung und den Bestandszugängen und -abgängen während des Zeitschritts. In den Zustandsgrößen schlägt sich also die Summe der Zustandsveränderungen über einen längeren Zeitraum nieder, also die 'Geschichte' des Systems.

Beispiel: In einem Feld sind der Bodenwassergehalt, die Menge des pflanzenverfügbaren Stickstoffs und die Biomasse der Ernte Zustandsgrößen. Letztere ist (auch) eine beobachtbare Verhaltensgröße. Die beiden ersteren sind (normalerweise) nicht beobachtbar, sind aber für die Entwicklung des Gesamtsystems (und der Ernte) unverzichtbar.

Wir stoßen bei dieser Betrachtung auf die Dualität zwischen Zustand und Zustandsänderung, zwischen Produkt und Prozess, die das Wesen der Systemdynamik ausmacht. Dies gibt einen Hinweis darauf, wie wir bei der Suche nach Zustandsgrößen, die ja für die Systembeschreibung definiert werden müssen, vorgehen müssen: Es gilt, die Speicher- und Gedächtnisgrößen des Systems auszumachen. Auf der anderen Seite scheiden Änderungsprozesse im System von vornherein als Kandidaten für Zustandsgrößen aus.

Bei der Suche nach Zustandsgrößen ist es oft hilfreich, sich das System als plötzlich eingefroren vorzustellen. In diesem Falle kommen alle Prozesse, d.h. Zustandsänderungen zum Erliegen. Lediglich Speicherinhalte (und damit Kandidaten für Zustandsgrößen) wären noch messbar. Nachdem das System plötzlich wieder aufgetaut wäre, würde es mit diesem Anfangszustand der Zustandsgrößen sein dynamisches Verhalten wieder genau an der Stelle beginnen, an der es eingefroren worden war. (Man denke hier etwa an den einhundertjährigen Dornröschenschlaf.) Mit der Definition geeigneter Zustandsgrößen werden wir uns in den späteren Kapiteln noch auseinandersetzen müssen.

1-2.6 Die Wirkungsstruktur bestimmt Zustandsänderungen

Prinzipiell lassen sich zwei Ursachen angeben, die zu Zustandsänderungen führen können: Erstens können Einwirkungen von außen Zustandsänderungen bewirken, und zweitens können Prozesse im System selbst Zustandsänderungen veranlassen (Abb. 1.2). Hieraus wird klar, dass die Wirkungsstruktur des Systems selbst (die darüber bestimmt, wie äußere und innere Wirkungen weitergegeben werden) die Zustandsänderungen und damit die Zustandsgrößen und das Systemverhalten bestimmt.

Bei der normalen Definition der Systemgrenze gehen wir davon aus, dass die Einwirkungen aus der Umwelt völlig unabhängig vom Systemverhalten selbst sind, d.h., dass keine Rückkopplungen des Verhaltens (der Systemausgänge) auf die Umwelt stattfinden und diese verändern. Das Systemverhalten entsteht dann einmal durch systemunabhängige Einwirkungen von außen und zum anderen durch Rück-

wirkungen im System selber. Beide Gruppen von Wirkungen werden über die systeminterne Wirkungsstruktur weitergegeben und verändert; für die erklärende Beschreibung des Verhaltens muss diese Wirkungsstruktur daher bekannt sein.

Wir merken hier an, dass Systeme mit sehr verschiedener Systemstruktur gleiches oder fast gleiches Verhalten erzeugen können. Die Systemstruktur bestimmt also das Verhalten, aber das Umgekehrte gilt nicht: Aus dem Systemverhalten lässt sich die Systemstruktur nicht eindeutig bestimmen. Dies hat große praktische Bedeutung für die Systemanalyse, da deshalb zum Systemverständnis komplexer Systeme die sorgfältige Analyse der Wirkungsstruktur unumgänglich ist.

Wenn es dagegen nur um die Darstellung von Systemverhalten geht, so können einfachere Systemdarstellungen ausreichen, um das Verhalten mit ausreichender Genauigkeit 'nachzuäffen'. Solche Simulationen müssen allerdings versagen, wenn sie unter Bedingungen eingesetzt werden, die bei der Modellkonstruktion nicht berücksichtigt wurden. Modelle dieser Art ähneln einem Papagei, der zwar die oft gehörten Kraftausdrücke seines Besitzers täuschend echt nachahmen kann (ohne sie zu verstehen), sonst aber wenig mit ihm gemein hat.

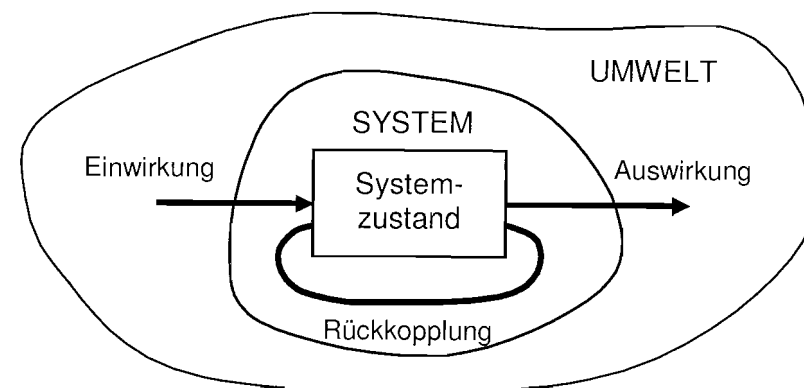


Abb. 1.2: Systemdynamik kann zwei unterschiedliche Ursachen haben: 1. Einwirkungen aus der Systemumwelt und 2. Rückkopplungseffekte der Systemzustände.

1-2.7 Intern erzeugte Systemdynamik: Die Rolle von Rückkopplungen

Besteht ein System aus einer einzigen Zustandsgröße ohne Rückkopplung, so ändert sich dieser Zustand allein durch etwaige Zugänge oder Abgänge. (Beispiel: Badewanne mit Zulauf und Abfluss). Aber bereits hier ist eine unmittelbare Input/Output-Relation, wie sie bei verhaltensbeschreibenden Modellen gern angenommen wird, nicht mehr gegeben: aus dem augenblicklichen Zulauf (Input) lässt sich in keiner Weise auf die augenblickliche Wassermenge (Zustands- und Verhaltensgröße)

schließen: Bei einem starken Zufluss kann die momentane Wassermenge gering oder groß sein; bei starkem Abfluss kann die Wassermenge (noch) groß sein, usw. Klarheit verschafft allein die Integration von Zulauf und Ablauf über eine gewisse Zeit; zusätzlich muss der Anfangswert der Zustandsgröße bekannt sein. Zustandsgrößen sind also prinzipiell nicht direkt (algebraisch) aus ihren Zustandsveränderungen (oder anderen Größen) berechenbar. Diese Beobachtung entzieht bereits vielen verhaltensbeschreibenden Modellen ihre Legitimität (was sich besonders in der Ökonomie noch nicht herumgesprochen zu haben scheint).

Alles wird noch wesentlich vertrackter, wenn sich im System Rückkopplungen befinden, d.h. wenn Zustandsgrößen auf Zustandsveränderungen Einfluss nehmen können. Trotz ihrer immer noch einfachen Systemstruktur sind Entwicklung und Verhalten solcher Systeme auch bei großer Erfahrung nur noch selten mit einiger Zuverlässigkeit einschätzbar: Wir sind hierbei auf mathematische Analyse (nicht immer möglich) und Simulation (immer möglich) angewiesen.

Ein Beispiel ist die einfache gegenseitige Verkopplung zweier Zustandsgrößen: Größe A verändert den Zufluss von Größe B, Größe B verändert den Zufluss von Größe A. Es ist nicht ohne weiteres einsichtig, dass ein solches einfaches System die Neigung hat, mit einer festen Frequenz zu schwingen. Dabei gehören solche Systeme zu unserer Alltagserfahrung: Ein an einer Feder hängendes Gewicht ist ein Beispiel, wobei A = kinetische Energie und B = potentielle Energie. Ein anderes Beispiel findet sich in den unter gewissen Bedingungen auftretenden Schwingungen einer Lagerhaltung, wobei A = Lagerbestand und B = Auftragsbestand. Andere, relativ einfache Rückkopplungen führen bereits zu 'deterministischem Chaos' mit prinzipiell nicht mehr genau vorhersagbarem Verhalten – es können dann nur noch Verhaltensbereiche angegeben werden.

1-2.8 Systemverhalten aus Eigendynamik und Reaktion auf Umwelt

Rückkopplungen im System können also ein eigenständiges, von der Systemstruktur selbst bestimmtes Verhalten erzeugen, das mit etwaigen Einwirkungen auf das System kaum noch oder nicht mehr in Verbindung gebracht werden kann. Dieses charakteristische Verhalten wird als 'Eigendynamik' bezeichnet. Das schwingende Feder-Masse-System und die Lagerhaltung oszillieren auch ohne äußere Anregung nach einer anfänglichen Auslenkung weiter. Auch hier versagt wieder ein verhaltensbeschreibender Ansatz, der versuchen müsste, die schwingende Bewegung aus einer (welcher?) Umwelteinwirkung zu erklären.

Vom System ohne äußere Anregung selbst erzeugte Eigenschwingungen können in Bereichen auftauchen, in denen sie nicht erwartet werden und in denen sie aber erhebliche Bedeutung für zukünftige Entwicklungen haben. Ein Beispiel sind die im Zusammenspiel zwischen Langfristinvestitionen und Anlagenbestand entste-

henden Kondratieff-Zyklen von mehreren Jahrzehnten, die enorme Konsequenzen für ganze Volkswirtschaften haben.

Systeme können bei schwacher oder starker Eigendynamik unterschiedlich auf Einwirkungen aus ihrer Umwelt reagieren. Die Wirkungen können von der kaum feststellbaren Veränderung bis zum Anfachen selbstzerstörerischer Schwingungen reichen. Generell gilt nur, dass sowohl Umwelteinwirkungen wie Eigendynamik das Systemverhalten bestimmen. Die genaue Verhaltensreaktion ergibt sich aus den Elementen des Systems, ihren strukturellen Verknüpfungen und schließlich aus den zeitabhängigen äußeren Einwirkungen (insbesondere: periodische Anfachung). Am Systemmodell lassen sich diese Reaktionen durch Computersimulation ermitteln, ohne dass das reale System zeit- und kostenaufwendigen und möglicherweise zerstörenden Experimenten unterzogen werden muss.

1-2.9 Verhaltensbestimmende Größen: System- und Umweltparameter

Per definitionem sind Umwelteinwirkungen nicht von Veränderungen des Systems abhängig. Für die Systembetrachtung müssen sie als Funktionen der Zeit vorgegeben sein; oft wird es sich dabei auch um konstante Größen handeln. Auch im System selbst können Größen (Parameter) einen Einfluss haben, die nicht durch Veränderungen im System selbst beeinflusst sind, die oft konstant sind, aber möglicherweise auch von der Zeit abhängen. Man denke an die Alterung von Systemkomponenten oder an wichtige Systemkonstanten wie Federkonstanten, Hebellängen, Hubraum, Gravitationskonstante und andere physikalische Konstanten usw. Auch die An- oder Abwesenheit einer Wirkungsbeziehung kann als Parameter gewertet werden, der u.U. zeit- oder ereignisabhängig ist.

An diesem Beispiel wird bereits offensichtlich, dass Parameter einen entscheidenden Einfluss auf das Systemverhalten haben können, gerade wenn sie wichtige Wirkungsbeziehungen abschwächen oder verstärken. Es ist daher zu erwarten, dass Systeme mit gleicher Wirkungsstruktur bei Veränderungen eines oder weniger kritischer Parameter ein quantitativ und qualitativ völlig unterschiedliches Verhalten zeigen können. Diese kritischen Parameter müssen durch besondere Sensitivitätsuntersuchungen identifiziert werden. Sensitive Parameter lassen auf der einen Seite das System empfindlich auf kleine Schwankungen dieser Parameter reagieren; auf der anderen Seite können aber auch gerade diese Parameter verwendet werden, um das Systemverhalten in gewünschter Weise zu beeinflussen.

1-2.10 Systeme als Komponenten von Systemen: Teilsysteme und Modularität

Die Systeme unserer technischen, gesellschaftlichen und ökologischen Umwelt, die wir besser verstehen lernen wollen, sind selten einfach und meist relativ komplex. Bei genauer Betrachtung bestehen sie aber fast immer aus abgrenzbaren relativ auto-

nomen Teilsystemen, die sich in ihrem Teilverhalten untersuchen lassen. *Beispiele:* Der menschliche Organismus besteht aus einer Vielzahl sehr spezialisierter Organe, die einzeln untersucht werden können, und für die sich Systemgrenzen und Einwirkungen aus ihrer jeweiligen Systemumwelt angeben lassen: Magen, Darm, Herz, Gehirn usw. Das gleiche gilt für technische Anlagen und Maschinen und Geräte wie etwa für ein Kraftfahrzeug mit seinen Komponenten Motor, Getriebe, Fahrwerk, Bremsanlage usw. Auch ein Ökosystem ist aus einer großen Zahl von Teilsystemen mit zum Teil sehr unterschiedlichen Funktionen zusammengesetzt: Pflanzen (Produzenten), Tiere (Konsumenten) und Zersetzer (Destruenten) usw.

Für die Systemuntersuchung dieser komplexen Systeme bietet es sich daher an, sich an die bereits vorgegebene Modularität zu halten und – nach Definition der jeweiligen Systemgrenzen – Teilsysteme und ihr Verhalten als Reaktionen auf Außenwirkungen getrennt zu untersuchen. Ist die Wirkungsstruktur der Teilsysteme bekannt und damit ihr jeweiliges Verhalten ermittelbar, so kann das Verhalten des Gesamtsystems als Zusammenspiel der interagierenden Teilsysteme untersucht und verstanden werden.

Durch diese Systembetrachtung der Teilsysteme nach entsprechender Identifizierung der Systemgrenze und Definition der entsprechenden Umwelteinwirkungen ergibt sich eine beachtliche Komplexitätsreduktion. Im Allgemeinen bleibt die Analyse überschaubar. Zur Untersuchung der Teilsysteme können die entsprechenden Spezialisten herangezogen werden. Da die Wirkungseinflüsse zwischen den Teilsystemen bei dieser Untersuchung 'aufgeschnitten' werden, wird es einfacher, Problemstellen zu ermitteln, kritische Parameter zu identifizieren und ihre Änderung herbeizuführen, angepasste Regelungen zu entwerfen, negative Einflüsse abzukoppeln usw.

Analog zum realen System orientiert sich die Gesamtbetrachtung an der Verkopplung der Teilsysteme. Werden die Teilsysteme gut verstanden, so lassen sich oft kompakte Darstellungen der Funktionsweise der Teilsysteme ohne Detaillierung der inneren Vorgänge finden, so dass sich die tatsächliche Komplexität eines Teilsystems nicht unbedingt auch in der Darstellung des Gesamtsystems niederschlagen muss.

Die Modularisierung der Systembetrachtung ist schließlich eine unabdingbare Voraussetzung für das Verständnis auch komplexer Systeme. Die Dynamik von Systemen mit mehr als einem halben Dutzend Zustandsgrößen ist selten noch zu überschauen, geschweige denn verlässlich vorherzusagen. Werden dagegen die Teilsysteme (mit jeweils nur wenigen Zustandsgrößen) verstanden, so lässt sich meist auch das Verhalten des Gesamtsystems nachvollziehen. Diese Beobachtung hat wichtige praktische Bedeutung, da die Modellbildung und Computersimulation insgesamt zu einem besseren Verständnis der komplexen Systeme unserer Umwelt führen und uns nicht auf Gedeih und Verderb von undurchschaubaren Computerprogrammen (und ihren möglichen Fehlern) abhängig machen sollten.

1-2.11 Übergeordnete Systeme: Hierarchien in komplexen Systemen

Die Modularität gewinnt für das Systemverhalten besondere Bedeutung dann, wenn die Teilsysteme hierarchisch angeordnet sind, d.h. sich übergeordnete und untergeordnete Systeme identifizieren lassen. Bei komplexen Systemen findet sich damit oft eine Verantwortungshierarchie der Teilsysteme als wichtiges Prinzip für die effiziente Funktion des Gesamtsystems. Im Bereich normaler Systemzustände werden dann nämlich Einzelprozesse in den zuständigen Teilsystemen selbst in eigener Autonomie geregelt. Sollten dagegen außergewöhnliche Umstände eintreten, die den Systemzustand aus dem normalen Verhaltensbereich herausbringen, so werden (erst dann) diese Überschreitungen an übergeordnete Systeme gemeldet. Die übergeordnete Systemeinheit erzeugt dann eine passende Systemantwort, und erst wenn auch hier der Zuständigkeitsbereich überschritten wird, so wird versucht, das anstehende Problem durch Eingreifen einer weiteren übergeordneten Einheit zu lösen. Systeme können mehrere Hierarchiestufen dieser Art aufweisen. Die Hierarchie arbeitet auch umgekehrt: Wird von einer übergeordneten Einheit eine (globale) Systemverhaltensänderung veranlasst, so ist es Aufgabe der untergeordneten Einheiten, jeweils (lokal) angepasste Lösungen zu finden (Subsidiarität).

Beispiel: Bei eingeschalteter Raumheizung regelt der Thermostat normalerweise die Raumtemperatur, indem er den Zufluss von Warmwasser in den Heizkörper regelt. Werden die Wärmeverluste aber (z.B. durch niedrige Außentemperatur oder offen stehende Fenster) so stark, dass die eingestellte Temperatur nicht mehr aufrechterhalten werden kann, weil die Kesseltemperatur wegen der Heizverluste stark abgesunken ist, so springt der Brenner an und sorgt wieder für einen zeitweiligen Wärmeüberschuss. Kann auf der anderen Seite der Kessel keine Wärmeleistung mehr erbringen, weil der Heizöltank leer ist, so ist das nächstübergeordnete System (der Mensch) gefordert, der entweder für neues Heizöl sorgen oder den Holzofen anheizen muss. Auch hier sorgt die Modularisierung wieder dafür, dass komplexe Regel- und Entscheidungsfunktionen überschaubar bleiben.

1-2.12 Systemerhaltung und -entfaltung: Regelung, Anpassung, Evolution

Umwelteinwirkungen bestimmen, wie wir gesehen haben, teilweise das Systemverhalten. Wie groß der Einfluss auf das Verhalten ist, hängt von der jeweiligen Wirkungsstruktur ab. Damit besteht aber prinzipiell die Möglichkeit, das Systemverhalten durch Umwelteinwirkungen zu beeinflussen und zu steuern.

Größere Bedeutung für die Regelung und Umweltanpassung von Systemen haben aber meist die Rückwirkungen im System selbst. Rückkopplung bedeutet, dass der Systemzustand sich selbst beeinflusst. Verhaltensändernde interne Rückwirkungen sind auf verschiedenen Ebenen möglich, die unterschiedliche Auswirkungen und Zeitkonstanten (typische Reaktionszeiten) haben (Abb. 1.3).

Die einfachste Art der Systemreaktion ist die **Ursache-Wirkungsbeziehung**. Sie erfolgt sofort, wie etwa das Fließen eines elektrischen Stroms nach dem Einschalten. Sie ist die einzige Art von Systemverhalten, die sich legitim dadurch beschreiben lässt, dass der Output direkt zum Input in Beziehung gesetzt wird. Oft genug wird leider angenommen, dass die gleichen einfachen Verhältnisse für andere Reaktionen des Systems (wie die folgenden) ebenfalls gelten, und diese irrtümliche Ansicht führt immer wieder zu groben Fehleinschätzungen.

Auf der nächsten Stufe finden sich Reaktionen, die über **Rückkopplungen** im System erzeugt werden, die also über mindestens eine Zustandsgröße laufen. Zu ihnen gehören Regelungsvorgänge. Die Reaktionszeit ist kurz; an den Wirkungsstrukturen und Parametern des Systems ändert sich nichts. Ein Beispiel ist wiederum der Thermostat.

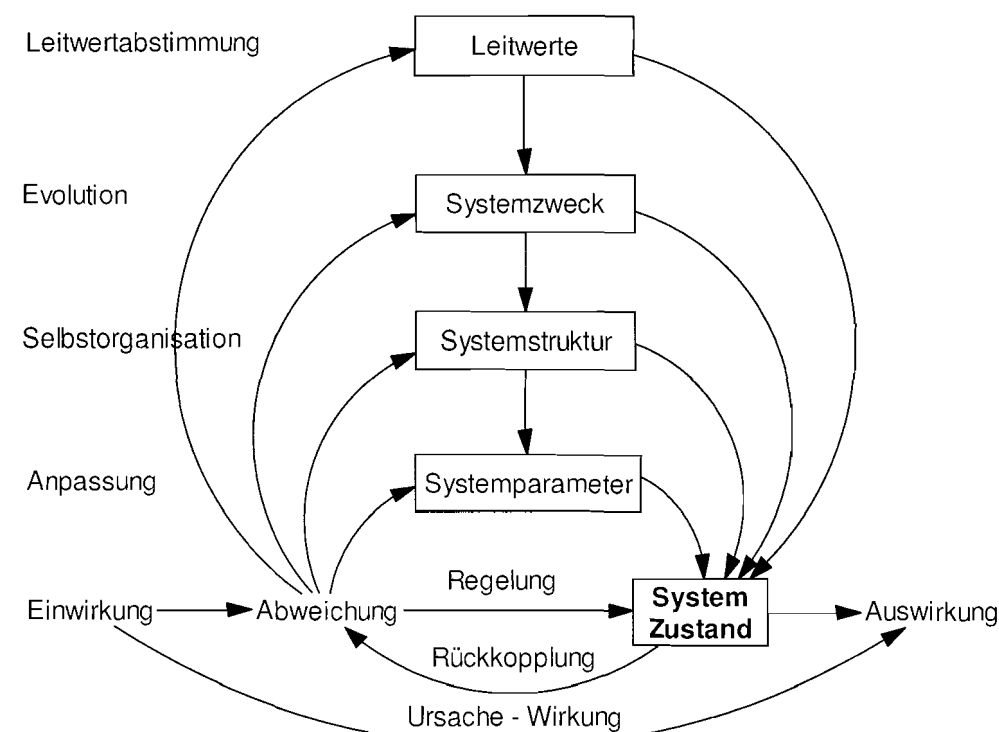


Abb. 1.3: Systemverhalten kann sich bei komplexen Systemen aus sehr verschiedenen Prozessen ergeben: Ursache-Wirkung, Rückkopplungsregelung, Anpassung, Selbstorganisation, Evolution, Leitwertabstimmung.

Auf der nächsten Ebene finden wir Prozesse der **Anpassung**. Hier wird vom System zwar die grundsätzliche Wirkungsstruktur beibehalten, es werden aber Parameteränderungen vorgenommen, die auch das Verhalten selber ändern. So kann sich z.B. ein Baum dem allmählichen Absinken des Grundwasserspiegels anpassen, indem er seine Wurzeln tiefer wachsen lässt, was einer Parameteränderung (Wurzellänge und evtl. Wurzeloberfläche) entspricht. Die Grundstruktur des Baums, z.B. die grundsätzliche Funktion der Wurzeln, hat sich dabei nicht verändert.

Auf einer nächsten Ebene finden sich Prozesse der **Selbstorganisation** in Reaktion auf Umwelanforderungen. Dies bedeutet Strukturwandel im System, d.h. eine Veränderung der ursprünglichen Wirkungsstruktur. Ein Betrieb, der z.B. ursprünglich nur Petroleumlampen herstellte, mag sich aufgrund veränderter Marktbedingungen dazu entschließen, in Zukunft Glühlampen herzustellen. Vorgänge dieser Art haben längere Reaktionszeiten und können auch nur von Systemen ausgeführt werden, die zur Selbstorganisation befähigt sind. Hierzu gehören Organismen oder technische Systeme selten oder nie, dagegen findet sich die Eigenschaft eher bei gesellschaftlichen Systemen, Organisationen oder Ökosystemen. Strukturwandel kann also stattfinden, um einem System die Erhaltung seiner **Identität** (z.B. als Firma für Beleuchtungsgeräte) zu ermöglichen.

Es ist aber auch möglich, dass ein System im Laufe einer **Evolution** seine Identität, d.h. seinen Funktions- und Systemzweck mit der Zeit verändert. Veränderungen dieser Art werden durch die Möglichkeit der Selbstreproduktion lebender Organismen (Autopoiese) ermöglicht, lassen sich aber auch bei Produkten feststellen (z.B. die Entwicklung vom Ackerwagen zum modernen Personenwagen). Kennzeichnend ist, dass mit der Systemveränderung eine möglicherweise drastische Verschiebung der Systemidentität (seiner Zielfunktion, seines Systemzwecks) unter Erhaltung der Systemintegrität einhergeht. Ein evolutionäres Beispiel ist das Entstehen flugfähiger Tiere (Vögel) aus wasserbewohnenden Reptilien.

Alle diese Systemreaktionen auf Anforderung der Umwelt stellen im Grunde den Versuch dar, die **Systemintegrität** zu wahren (eventuell auch über eine lange Generationenfolge und über eine lange Zeit), selbst wenn das mit einer Veränderung der Systemidentität, d.h. des Systemzwecks verbunden ist. Aus dieser Beobachtung lässt sich ableiten, dass ein System, um seine langfristige Erhaltung und Entfaltung in einer unsicheren und oft feindlichen Umwelt zu sichern, sich (implizit oder explizit) an gewissen Leitwerten orientieren muss. Diese Dimensionen der Verhaltensorientierung lassen sich mit den Begriffen Existenz, Sicherheit, Handlungsfreiheit, Wirksamkeit, Wandlungsfähigkeit und Koexistenz umreißen (s. Kap. 5). Die geforderte Leitwertaufrechterhaltung kann zu einer Änderung des Systemzwecks, dieses zur Änderung der Systemstruktur und von Systemparametern führen (Abb. 1.3). Die Änderung von Leitwertwichtungen, Systemzweck und Systemstruktur kann den Systemzustand auch unmittelbar verändern.

Normalerweise werden uns bei Systemuntersuchungen und Modellbildungs-

versuchen nur die unteren Ebenen dieser Systemreaktion und Anpassung begegnen. Es ist aber wichtig, die gesamte Palette der Möglichkeiten zu kennen, da gerade auch Vorgänge wie Identitätswandel zur Integritäts-erhaltung etwa in sozialen Systemen eine bedeutende Rolle spielen können und damit für Aussagen über zukünftige Entwicklungen wichtig sein könnten.

Wichtig ist vor allem, dass wir unterscheiden lernen zwischen Vorgängen, die die Wirkungsstruktur des Systems konstant lassen und solchen, die sie verändern. Bei der Regelung oder Anpassung (durch kontinuierliche Parameteränderungen) verändert sich die Wirkungsstruktur nicht; das Verhaltensrepertoire des Systems bleibt qualitativ unverändert. Bei Wirkungsstruktur-Veränderungen jeder Art dagegen ändert sich prinzipiell das Verhaltenspotential des Systems, u.U. grundlegend. Im einfachsten Fall kann das bereits dann geschehen, wenn eine im System latent vorhandene Strukturverbindung, die vorher im Verhalten keine Rolle gespielt hat, durch die gegebenen Umstände plötzlich aktiviert wird. (Etwa wenn ein wichtiges Bauteil bricht und sich damit das Systemverhalten völlig ändert.)

Reaktionszeit	Vorgang	Konsequenz
immer	Leitwertabstimmung	Entfaltungssicherung
sehr lang	Evolution	Identitätswandel
lang	Selbstorganisation	Strukturwandel
mittel	Anpassung	Parameteränderung
kurz	Rückkopplung	Regelung
sofort	Ursache-Wirkung	Direkte Reaktion

1-2.13 Akteure in ihrer Umwelt: Verhaltensorientierung

Unter 'Akteuren' verstehen wir hier Systeme, die auf Umwelteinwirkungen nicht im bedingungslosen Reflex antworten, sondern deren Verhalten in bewusster oder unbewusster Weise an bestimmten Kriterien, Zielen oder Prinzipien, oft den Interessen ihrer eigenen Identität orientiert ist (meist also ihrer eigenen Erhaltung und Entfaltung, unter Einbeziehung der Interessen mit ihnen interagierender Systeme). Beispiele sind Individuen (Konsumenten!), Organisationen, Staaten. In diesen Fällen lässt sich aus der Analyse des Folgenspektrums für mögliche Handlungsalternativen und ihrer Bewertung im Hinblick auf die Leitwerte des Akteurs auf wahrscheinliche Handlungsweisen schließen. Damit lassen sich gerade bei der Untersuchung zukünftiger Entwicklungspfade die Handlungstendenzen von Akteuren eingrenzen und die Sicherheit und Gültigkeit der Aussage erhöhen.

Zur Umwelt eines Systems gehören normalerweise auch andere Systeme, mit denen es in mehr oder weniger enger Interaktion steht. D.h. sein Verhalten wird Auswirkungen auf andere Systeme haben und damit ihr Verhalten beeinflussen, während es selbst den Einwirkungen anderer Systeme unterliegt und darauf reagiert.

Darüber hinaus ergeben sich indirekte Einflüsse durch die Wirkungen der verschiedenen Systeme auf die Umwelt und die sich daraus ergebenden Veränderungen und Einwirkungen auf die Systementwicklung. Klassisches Beispiel für derartige gegenseitige Einwirkungen sind Räuber-Beute-Systeme (mit ihren Entsprechungen in der Ressourcennutzung und Umweltbelastung durch menschliche Gesellschaften): Die Beutepopulation (erneuerbare Ressource) ist durch die ökologische Tragfähigkeit einer Region bestimmt und von deren Veränderungen abhängig, die auch von der Nutzung durch die Beutepopulation bestimmt werden, während die Räuberpopulation (Ressourcennutzer) wiederum von der Beutepopulation und ihrer Veränderung abhängt.

Wenn Systeme interagieren, d.h. ihre Auswirkungen Einwirkungen auf andere Systeme darstellen, dann ergibt sich also aus diesen Interaktionen eine über das Einzelverhalten hinausgehende Dynamik; zur Verhaltensbeschreibung muss dann das Gesamtsystem betrachtet werden.

1-2.14 Unberechenbarkeit auch bei determinierten Systemen

Lange galt für determinierte Systeme (deren Verhalten nicht vom Zufall, sondern nur vom Systemzustand und nicht-zufälligen Umwelteinwirkungen abhängig ist) die Annahme, dass bei Kenntnis von Anfangszustand und Umwelteinwirkungen sich jeder spätere Zustand ermitteln lässt, und dass bei kleiner Veränderung etwa des Anfangszustands das System auf den gleichen Zustandspfad wie vorher konvergiert.

Zwar gilt dies tatsächlich für die Mehrzahl determinierter Systeme, doch ist inzwischen bekannt, dass viele determinierte Systeme auch bei fast identischen (Anfangs)Bedingungen exponentiell beschleunigt auseinander laufen und sich auf gänzlich verschiedene Zustandspfade begeben können. Damit zerfällt die früher angenommene Vorhersagbarkeit dieser Systeme. Für solche 'chaotischen Systeme' lassen sich nur noch Attraktionsbereiche angeben, in denen der Systemzustand zu finden sein wird – die genaue Angabe des späteren Systemzustands ist nicht mehr möglich. Chaotische Systeme dieser Art haben erhebliche praktische Bedeutung etwa bei Insektenpopulationen, beim Wettergeschehen und bei Flatterschwingungen von Tragflügeln. Mit chaotischem Verhalten muss daher auch bei 'ganz normalen' Systemen gelegentlich gerechnet werden.

Chaos führt bei Systemuntersuchungen zu einer ersten Möglichkeit der Unbestimmbarkeit zukünftigen Verhaltens. Eine zweite Möglichkeit ergibt sich aus der Tatsache, dass bewusst handelnde Akteure (Individuen oder Organisationen) z.B. willkürlich gegen 'rationale' Handlungsprinzipien verstoßen können und in unerwarteter Weise handeln. Eine dritte Möglichkeit der Unbestimmtheit schließlich ergibt sich aus den Zufälligkeiten der Umwelt, wie einer Unwetterkatastrophe, einem Erdbeben oder der zufälligen Verteilung von Samen in einem Wald.

In allen Fällen gilt aber, dass die daraus resultierende Verhaltensänderung eines Systems nicht beliebig sein kann. Systemverhalten hat immer seine Grenzen (Energie- und Ressourcenbeschränkungen, mögliche Verhaltensbereiche). Dies gilt auch in besonderer Weise für das Verhalten von Akteuren. Das mögliche Systemverhalten ist also in jedem Falle abgrenzbar, selbst wenn es nicht genau angebar sein sollte. Dies hat erhebliche Bedeutung gerade für die Analyse zukünftiger Entwicklungen.

1-3 Grundsätzliches zu Modellen

1-3.1 Modelle für Verhaltensaussagen: Vorteile und Nachteile

Der einfachste und präziseste Weg, um zuverlässige Aussagen über das Verhalten eines Systems zu bekommen, ist natürlich, das interessierende System selbst unter verschiedenen Bedingungen zu beobachten. Zwar hat dieses Verfahren erhebliche praktische Bedeutung etwa bei chemischen Experimenten oder bei der Tierbeobachtung, aber in wichtigen anderen Bereichen wiederum ist diese Methode unangebracht, unzulässig oder sogar unmöglich. So würden etwa Versuche zum Aufbau stabiler künstlicher Mischwaldökosysteme Jahrzehnte bis Jahrhunderte dauern, die Flugeigenschaften von Mondlandern können auf der Erde nicht getestet werden, und Großversuche mit Treibhausgasen in der Atmosphäre verbieten sich von selbst. Es existieren aber weite Bereiche der menschlichen Erfahrungswelt, in denen das Verhalten dynamischer Systeme zuverlässig ermittelt werden muss. Hier steht nur der Weg offen, mit Modellen und Simulationen zu arbeiten statt am Realsystem zu experimentieren.

Die Vorteile der Verwendung von Modellen für Verhaltensaussagen sind vielseitig: Es müssen keine Experimente am Original durchgeführt werden, dieses wird nicht gefährdet; es lassen sich rasch Ergebnisse erzielen; die Untersuchungen können einen breiteren Verhaltensbereich abdecken, als dies am Realsystem möglich wäre; alternative Entwicklungen lassen sich überprüfen; die Kosten der Untersuchungen sind verhältnismäßig gering, besonders, wenn es sich um die Entwicklung eines Computermodells handelt, das keiner materiellen Umsetzung bedarf.

Der Modellansatz hat selbstverständlich auch seine Nachteile: Das Modell ist schließlich nicht das Original, und prinzipiell bleibt immer die Unsicherheit bestehen, ob das Modell nun tatsächlich das Systemverhalten in allen Aspekten richtig wiedergeben kann. Gründliche Validierung kann diese Unsicherheiten weitgehend beseitigen (s. Abschnitt 1-3.10).

1-3.2 Das Modell als beschränkt gültige Abbildung

Ein Modell ist immer eine vereinfachte Abbildung eines interessierenden Realitätsausschnitts. Es soll nur für diesen Ausschnitt und für einen bestimmten Zweck eine gültige Aussage vermitteln. So ist etwa eine Autobahnkarte von Deutschland ein Modell dieser Fernstraßen, das für die Zwecke der Orientierung eines Autofahrers völlig ausreicht; es ist für diesen Zweck gültig. Ansonsten hat die auf einem Blatt Papier gedruckte Karte fast nichts gemeinsam mit der Geographie des Landes oder der physikalischen Oberfläche der Fahrbahn.

Ein Modell zur Simulation von Verhalten muss selbst dynamisches Verhalten erzeugen können, muss also prinzipiell über die gleichen Elemente verfügen wie jedes dynamische System: Es muss eine Wirkungsstruktur aufweisen mit entsprechenden Systemparametern, und es muss auf Einwirkungen aus der (simulierten) Systemumgebung reagieren können. Oft ist dieses dynamische System nichts weiter als eine mathematische Formel, aus der sich bei entsprechenden Eingaben (die die Systemeinwirkungen simulieren) über ihre 'Wirkungsstruktur' ein Systemverhalten ableiten lässt.

Das Modell ist daher nicht das Originalsystem; es kann nur einen begrenzten Verhaltensausschnitt des Originals wiedergeben, der durch den Modellzweck und die entsprechende Modellformulierung bestimmt ist. Ein gut funktionierendes Modell verführt aber leicht dazu, sein Verhalten als das Systemverhalten schlechthin zu interpretieren. Man sollte sich immer an den Unterschied erinnern und nur mit Vorsicht von Modellergebnissen auf Systemverhalten schließen. Dazu gehört, dass man bei der Diskussion des Modells und der Ergebnisse nicht vom System und Systemverhalten spricht (oder klarmacht, dass man das Modellsystem meint).

1-3.3 Problemstellung, Modellzweck, Modellauswahl

Die ursprüngliche Problemstellung umreißt bereits einen bestimmten Fragenbereich, auf den das Modell Antwort geben soll. Das heißt, Antworten auf andere Fragen sind nicht gefordert; der Antwortbereich ist begrenzt. Dieser Antwortbereich bestimmt den Modellzweck. Die Beschränkung des Antwortbereichs und des Modellzwecks ist auch eine Frage der Effizienz. Ein allgemeingültiges Supermodell ist nur mit hohem Aufwand erstellbar und wäre für spezielle Problemstellungen ineffizient. Da mit der Komplexität auch die Fehlermöglichkeiten anwachsen, ist auch zu erwarten, dass für spezielle Fragen die Zuverlässigkeit und Aussagekraft gering sind. Generell gilt also nicht, dass das größere Modell auch das bessere ist. Das beste Modell ist dasjenige, das seinen Zweck bei geringstmöglicher Komplexität voll erfüllt. Das Modell sollte so einfach wie möglich, aber so komplex wie nötig sein.

Der Modellzweck ist daher die wichtigste Vorgabe der Modellentwicklung. Je genauer er spezifiziert wird, desto schärfer, präziser und knapper kann die Modell-