

Das Systemkonzept - ein produktiver Lösungsansatz zur Behandlung technischer und natürlicher Systeme

1. Motivation

In unserer Umgangssprache findet der Systembegriff eine häufige Verwendung. Bekannte Ausdrücke sind das Planetensystem, System der Pflanzen und Tiere, Herz-Kreislauf-System, Bildungssystem, politisches System, Steuerungssystem – um nur wenige Beispiele zu nennen. Die Bezeichnung wird also auf völlig unterschiedliche Sachverhalte angewandt. Viele Firmen tragen das Wort *systems* in ihrem Namen.

Der reichhaltige Gebrauch des Systembegriffs ist von unterschiedlichem Wert. In vielen Fällen wird das Wort „System“ lediglich als Oberbegriff gebraucht, um irgendetwas Zusammengehöriges zu benennen. Manchmal wird der Systembegriff auch zum Verweis auf ein Ordnungsgefüge benutzt, wie etwa bei den Beispielen „Zahlensystem“ oder „Notensystem“.

Unser Interesse gilt hingegen der Systembehandlung im Sinne einer auf unterschiedlichste Sachverhalte anwendbaren Methodik. Dazu versuchen wir, nachfolgend eine Gesamtdarstellung der Systemwissenschaft und deren Nutzungsmöglichkeiten zu geben.

Zunächst ist es notwendig, mit den Grundzügen der Systemwissenschaft vertraut zu machen. Anhand der Vorstellung wesentlicher Systemkategorien wird nachfolgend ein Einblick in die Vielfalt der Systeme und deren Besonderheiten gegeben. Danach erfahren die informationsverarbeitenden Systeme, und dort wiederum die Kategorie der gesteuerten Systeme, eine vertiefte Behandlung. Das folgende Kapitel befasst sich mit der Systemtheorie als theoretischer Grundlage der Systemwissenschaft. Es schließt sich die Behandlung der Systemmodellierung mit dem Schwerpunkt der Systemsimulation an. Daran angefügt sind Ausführungen zur Systemtechnik, deren Anwendung keinesfalls auf rein technische Sachverhalte beschränkt ist. Abschließend wird eine zusammenfassende Darstellung des Nutzens der Systemwissenschaft gegeben, mit dem der Autor den Leser von den Vorzügen der Systemtechnologie zu überzeugen hofft. Soweit vorinformiert, kann sich der Leser nun in das Abenteuer der Lektüre begeben.

2. Wesen der Systemmethodik

2.1 Das Grundkonzept

Der Name *System* hat seinen Ursprung im Altgriechischen. Das Wort *συστημα* bedeutet etwa *das Gebildete, Zusammengestellte, Verbundene*. Die Bedeutung des Systembegriffs bezieht sich somit auf das Vorliegen einer gewissen Gesamtheit, internen Ordnung und auch Verbundenheit.

Die Systembetrachtungsweise ist in der Naturwissenschaft und Technik tief verwurzelt. Im Rahmen der Kybernetik und Automatisierungstechnik hat sich – ausgehend von einer exakten Definition des Systembegriffs – eine eigenständige wissenschaftliche Disziplin – die *Systemwissenschaft* – entwickelt. Hierbei handelt es sich um eine überaus produktive Betrachtungs- und Behandlungsweise zusammengehöriger Sachverhalte, die auf völlig unterschiedliche Gebiete anwendbar ist. Dafür werden die Grundlagen sowie eine Vielfalt von Methoden und Arbeitsmitteln bereitgestellt, mit deren Hilfe existierende Systeme analysiert werden können und die einen Entwurf womöglich optimaler Systeme erlauben [1]. Die Systemwissenschaft hat Querschnittscharakter und ist von weitreichender praktischer

Bedeutung. Entsprechend der übergeordneten Sichtweise wird man hier mit einer gewissen Abstraktion bei der Behandlung rechnen müssen. Anwendungsmöglichkeiten bestehen nicht nur im Bereich der Technik, sondern erstrecken sich auch auf Gesamtheiten in der Natur, Ökonomie, Ökologie und Soziologie und viele andere Bereiche.

Der Kerngedanke der Systemmethodik besteht darin, den zu betrachtenden Teil aus der Gesamtheit der realen Welt herauszulösen. Dazu wird der jeweils interessierende Sachverhalt durch Definition einer endlosen Hüllfläche – den sog. *Systemrand* – vom „Rest der Welt“ abgegrenzt. Der gewählte Ausschnitt wird dann als *System* aufgefasst. Die übrige Welt wird nur insoweit berücksichtigt als diese im Sinne einer *Umgebung* mit dem System in Beziehung steht. Der Rahmen für die Systemabgrenzung ist prinzipiell frei wählbar und wird durch Zweckmäßigkeit bestimmt. Je nach gewünschter Detailliertheit kann der Systemrahmen in weiten Grenzen variieren und von der Makro- bis in die Mikrowelt reichen.

Das Modell einer System-Umwelt-Relation auf Makroebene ist in **Bild 1.1** angegeben.

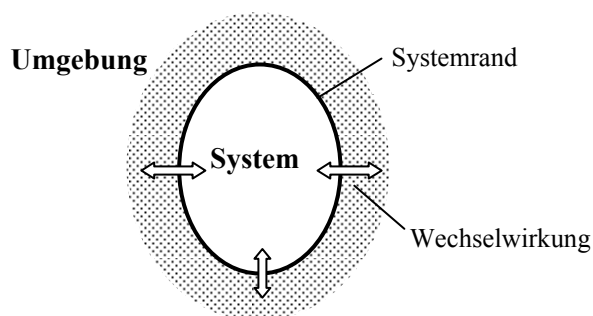


Bild 2.1 allgemeines Systemmodell

Eine Systembetrachtung auf unterlagerter Ebene zeigt, dass diese einen bestimmten internen Aufbau besitzen. Sie enthalten eine Menge von Komponenten, die *Elemente* genannt werden. Diese Elemente stehen wiederum untereinander in bestimmten Beziehungen, die *Kopplungen* heißen. Die Kopplungen zwischen den Elementen repräsentieren Wirkungen von Austauschprozessen. An diesem Austausch können Stoff-, Energie- oder auch Informationsflüsse beteiligt sein. Neben einseitigen (unilateralen) Beziehungen trifft man zumeist auf wechselseitige (bilaterale) Austauschprozesse. Aus den Beziehungen wird dann ein Zusammenhang. Kopplungen können einerseits zwischen gleichrangigen Elementen aber auch zwischen hierarchisch gegliederten Elementen bestehen. Die Gesamtheit von Elementen und einem Netzwerk von Kopplungen wird als *Struktur* bezeichnet. Bloße Ansammlungen von bestimmten kleineren Einheiten ohne verbindende Struktur bilden somit noch kein System. Kopplungen bestehen nicht nur zwischen den Elementen untereinander, sondern auf höherer Ebene auch zwischen System und Umwelt.

Ein weiterer Aspekt der Systemmethodik besteht darin, dass Systeme wahlweise in unterschiedlichem Detaillierungsgrad untersucht werden können. Dazu werden bedarfsweise bestimmte im System enthaltene Elemente herausgegriffen und ihrerseits jeweils zum (Sub-)System erklärt. Damit gelangt man auf eine tiefer gelagerte Betrachtungsebene, auf der die gleichen Verhältnisse wie auf jeder Systemebene gelten. System und Element sind somit relative Begriffe.

Die Elemente verfügen über gewisse individuelle *Eigenschaften* und bestimmen in ihrer Gesamtheit und entsprechend den zwischen ihnen bestehenden Wechselwirkungen auch die Eigenschaften des Gesamtsystems auf der Makroebene. Beispiele solcher Eigenschaften sind Komplexität, Dynamik, Stabilität, Determiniertheit, Adaptivität, Autonomie, Offenheit, technische Ausführung, sozialer Verbund u. v. a.

2.2 Kommentare

Die Systemtechnologie lässt sich durchaus philosophisch begründen. Maßgebend dafür ist eine Ganzheitsbetrachtung nach dem Motto: *Alles ist Eines*. Wenn das Einzelne Teil des Ganzen ist, dann wird es sich in das Ganze einordnen. Somit wird das Einzelne vom Ganzen beeinflusst – wie es auch umgekehrt – auf das Ganze nach Maßgabe seiner Intensität mehr oder weniger einwirkt.

Der Systemgedanke hat möglicherweise auch seinen Ursprung in uns selbst. Für uns wichtig ist eine Unterscheidung zwischen innen und außen. Ohne die Abgrenzung – vor allem nicht von anderen Gegenständen und Wesen – würde kein „Ich“-Gefühl entstehen. Damit ist auch unser Bewusstsein verbunden, das unseren momentanen Internzustand in Beziehung zur Außenwelt prägt. Die Grenze zwischen uns und der Welt bildet unsere Haut – mit etwa 2 qm Fläche unser größtes Organ. Darin sind eine Vielzahl von Sinnesorganen (Sensoren) einschließlich des Seh- und Hörapparates eingebettet, mit denen wir die Außenwelt beobachten können. Durch unsere Bewegungen und Handlungen wirken wir auf die Umgebung zurück.

Eine erste Einschätzung zeigt, dass eine Übertragung des Systemgedankens in die alltägliche Welt eine Reihe von Vorteilen bietet. Mit der Isolation von Systemen wird nur der jeweils interessierende Teil der objektiven Realität in den Focus genommen und damit die zu berücksichtigende Komplexität erheblich reduziert. Damit verbunden ist eine Konzentration auf den jeweils interessierenden Bereich, welcher nun isoliert untersucht und gestaltet werden kann. Die Wahl des Systemrandes obliegt dem Systemingenieur und hat rein pragmatische Gründe. Ein weiterer Vorzug besteht in der freien Wahl der Betrachtungsebene. Bei Bedarf kann das Systeminnere immer detaillierter untersucht werden. In umgekehrter Richtung lassen sich wiederum die auf unterem Systemniveau vorgenommenen Änderungen in ihrer Auswirkung auf das Gesamtsystem verfolgen. Der Systemingenieur kann weiterhin bei seiner Tätigkeit, weitgehend unabhängig von der konkreten Ausprägung des jeweils betrachteten Systems, auf einen weitreichenden Methodenvorrat zurückgreifen, dessen Gebrauch die Systembehandlung wesentlich erleichtert. Wesentliche Beiträge zur Ausarbeitung dieses Methodenvorrats wurden von der Kybernetik und Automatisierungstechnik geleistet. Hinzu gekommen ist die Bereitstellung komfortabler Tools von Seiten der Informatik.

Zur Illustration der Systemtechnologie wählen wir das gut nachvollziehbare Beispiel eines modernen Schiffes. Der Systemrand wird hier physisch durch die Schiffshülle gebildet. Die Umgebung für das Schiff ist das unmittelbare Seegebiet, dessen Einwirkungen auf das Schiff durch Wind, Wellengang und Strömung geprägt sind. Das System *Schiff* enthält eine Anzahl von Subsystemen, zu denen das Navigations-, Propulsions-, Energieversorgungs-, Kommunikations- und andere Teilsysteme zählen. Betrachtet man auf der nächsten Ebene beispielsweise das Navigationssystem, so besteht dieses wiederum aus weiteren Teilsystemen, wie Radar, Autopilot etc.

3. Kategorien realer Systeme

Wir werden uns zunächst einen Eindruck von der Vielfalt der anzutreffenden Systeme verschaffen, indem in loser Folge verschiedene Systemkategorien vorgestellt werden. Die in der nachfolgenden Aufstellung verwendeten Bezeichnungen der Systemkategorien orientieren sich dabei an dem jeweiligen Hauptmerkmal, i. A. der dominierenden Systemeigenschaft.

3.1 Stationäre Systeme

Stationäre Systeme sind – wie der Name verrät – ortsgebunden. Sie sind somit stets in die gleiche Umgebung eingebettet und wechselwirken mit dieser. Da das System keinen unmittelbaren Zutritt zu den Veränderungen der Umgebung hat, kann es diese nur an deren Auswirkungen erfahren.

Stationäre Systeme sind vor allem in der technischen Welt sehr verbreitet. Dafür geben die Industrieroboter ein typisches Beispiel. Diese ortsfesten Produktionsmittel werden bekanntlich eingesetzt, um vorgegebene Handhabungsaufgaben an Werkstücken zu erledigen oder im Fertigungsprozess anfallende Arbeitsaufträge auszuführen. Die verlangte Eigenschaft bezieht sich hier auf die Rekapitulation vorgegebener Handlungsfolgen in gleichbleibender Präzision.

Werden mehrere Industrieroboter zu einem System zusammengeschlossen, so gelangt man zu Mehrrobotersystemen. Hier stellen die einzelnen Roboter also Systemelemente dar, die miteinander wechselwirken. Wie ein Blick in die Werkhallen der Automobilindustrie zeigt, verrichten dort zahlreiche Schweißroboter jeweils begrenzte Arbeitsaufgaben, wobei deren Tätigkeit durch ein Programm synchronisiert wird. Industrieroboter können sich ihre Aufgabe auch aufteilen und dabei miteinander kooperieren. Solche Mehrrobotersysteme sind beispielsweise Paarungen von je einem Handhabungs- und einem Arbeitsroboter. Hier präsentiert der Handhabungsroboter das betreffende Werkstück fortlaufend in der jeweils günstigsten Lage, damit der Schweißroboter unterbrechungslos seine Naht ziehen kann.

Wird der Betrachtungshorizont nochmals erweitert, so gelangt man zu den Fertigungssystemen von zumeist recht komplexer Art. Die darin enthaltenen Roboter kooperieren nicht nur miteinander, sondern auch mit anderen Fertigungsmitteln, wie Werkzeugmaschinen, Montagestationen und anderen Einrichtungen. Die Kopplung der Elemente erfolgt hier über Transporteinrichtungen, insbesondere Fließbänder.

Eine weitere Ausdehnung des Systemrahmens führt zur Fabrik als zu betrachtendes System. Seine Elemente sind dann die verschiedenen Produktionsabteilungen, Lager, das Management und der Verkauf u. a. Aber auch damit ist das Ende der möglichen Systembehandlung noch nicht erreicht. In heutiger Zeit sind Firmen mit ihren Produktionsstätten, Zulieferern und Verkaufsniederlassungen z. T. weltweit vernetzt.

3.2 Mobile Systeme

Die herausragende Eigenschaft mobiler Systeme ist ihre Fähigkeit reisen zu können, also ortsvariabel zu sein. Infolge des ständigen Positionswechsels gelangen sie in immer neue Gebiete der Umwelt, wobei sie wechselnden Einflüssen ausgesetzt sind. Um bei der Durchquerung der sich laufend verändernden Umgebung angemessen reagieren zu können, muss diese sehr schnell (online) erfasst werden. Die hauptsächliche Kommunikation mobiler Systeme bezieht sich somit auf den (informationellen) Austausch mit der (wechselnden) Umgebung. Eine formale Darstellung des geschilderten Sachverhalts zeigt **Bild 3.1**.

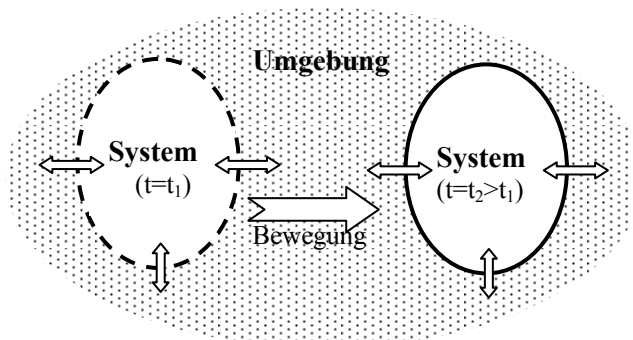


Bild 3.1 Modell mobiler Systeme

Zur Illustration mobiler Systeme ist das von einem Fahrer betätigte Automobil besonders geeignet. Abgegrenzt von der Umgebung durch die Karosserie als Hüllfläche enthält das Kraftfahrzeug in seinem Inneren diverse miteinander wechselwirkende technische Komponenten sowie den Fahrer als aktives, in diesem Fall menschliches Systemelement. Es gibt bereits auch technische Lösungen, die den Fahrzeugführer durch eine Bordautomatik ersetzen. Ein solches mobiles System wäre dann rein technischer Art, wenn man von den Insassen als „Gäste“ solcher Systeme absieht. Dabei kommt dann die Frage auf, ob eine solche Autofahrt überhaupt noch Spaß macht.

Um von A nach B zu gelangen, bewegen sich die Kraftfahrzeuge bekanntlich entlang eines vorhandenen Straßennetzes, wobei die Umgebung in Gestalt verschiedenartiger Landschaften, Gebäude, wechselnder Straßenverhältnisse, anderer Verkehrsteilnehmer, am Straßenrand aufgestellter Verkehrsschil-

der etc. vorüberziehen. Dies erfordert die fortlaufende, fahrtbegleitende Erfassung einer Vielzahl von Informationen, um darauf – möglichst proaktiv – reagieren zu können.

Um den Fahrer bei dieser anspruchsvollen Tätigkeit zu unterstützen und die Fahrsicherheit insgesamt zu erhöhen, enthalten moderne Fahrzeuge in steigendem Maße zusätzliche Elemente in Gestalt von Fahrer-Assistenzsystemen. Hierbei handelt es sich um automatische Komponenten, die den aktuellen Fahrzustand des Fahrzeuges sowie die verschiedensten Außenweltfaktoren entlang der Fahrbahn automatisch überwachen. Damit wird ein wesentlicher Teil der Kommunikation, insbesondere mit der Umgebung, sowie der Informationsauswertung auf automatische (Teil-)Systeme verlagert. Zu den hinzu gekommenen Komponenten zählen Radar-, Laser-, Infrarot-, Video-, Rutschsensoren u. a.. Die gewonnenen Einzelinformationen werden dann im Rahmen der Sensorfusion von Prozessoren ausgewertet. Dabei ergibt sich ein fortwährend aktualisiertes mehr oder weniger detailliertes Abbild der lokalen Umgebungssituation, anhand derer der bestehende Gefahrengrad abgeschätzt wird. Im Gefahrenfall gibt das Assistenzsystem gestufte Warnmeldungen an den Fahrer aus. Ignoriert er diese, so wird in kritischen Fällen selbsttätig ein Notmanöver eingeleitet.

Seit einiger Zeit ist es weiterhin möglich, vom Auto aus mobil mit beliebigen Menschen in der Außenwelt via Handy auf Sprachebene zu kommunizieren, wofür man tunlichst Freisprechanlagen verwenden sollte. Inzwischen wurde sogar nochmals eine Steigerung – der mobile Internetzugang – wenn auch zunächst in der automobilen Oberklasse realisiert.

Nach Betrachtung des Systems „Auto“ gelangt man auf höherer Ebene zu den Verkehrssystemen. Dort stellen die beteiligten Kraftfahrzeuge die jeweiligen Systemelemente da, so dass es sich um Multi-Mobil-Systeme handelt. Da deren Anzahl innerhalb des Verkehrssystems beständig wechselt, liegt ein sog. Offenes System vor (s. Abschn. 3.3).

3.3 Offene Systeme

Das herausragende Merkmal dieser Systemkategorie ist hier der fortlaufende Wechsel der Anzahl der am System beteiligten Elemente und damit auch der bestehenden Kopplungen. Dies geschieht dadurch, dass Elemente aus dem System in die Umgebung emigrieren oder – umgekehrt – von dort imigrieren. Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass die Anzahl der Elemente im System zwar physisch gleich bleibt, aber deren Aktivitätszustand sich zeitlich verändert. Aufgrund des ständigen inhaltlichen Wechsels innerhalb der Systeme sind diese strukturvariant. Entsprechend der internen Variabilität offener Systeme ändern sich auch die Systemeigenschaften. Der geschilderte Sachverhalt wird in allgemeiner Form durch **Bild 3.2** veranschaulicht.

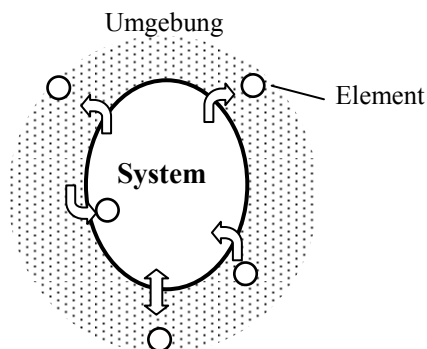


Bild 3.2 Modell offener Systeme

Ein typisches Beispiel offener Systeme sind die bereits zuvor genannten Verkehrssysteme. Das System umfasst einen festgelegten Verkehrsraum, innerhalb dessen sich durch Einfließen oder Ausfließen von Fahrzeugen die Anzahl von Elementen und deren Beziehungen fortlaufend wechselt. Dabei kommt es zu Veränderungen der Eigenschaft der Verkehrsdurchlässigkeit, die sich bis zum Verkehrstillstand verringern kann. Die Kopplungen zwischen den Fahrzeugen sind nicht immer durch Tole-

ranz, manchmal aber leider auch durch Konkurrenz bestimmt. Mit der zu erwartenden Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation ergibt sich auch die Möglichkeit der Kooperation. So können Fahrzeugführer Informationen beispielsweise über liegengebliebene Fahrzeuge, das Ende eines verborgenen Staus, festgestellten Nebel oder Glatteis per Funk den Fahrern nachfolgender Fahrzeuge mitteilen, so dass diese rechtzeitig reagieren können.

Ein anderes Beispiel offener Systeme sind Containerlagerplätze oder Fertigungshallen, in denen manuell gesteuerte oder autonom agierende Trägerfahrzeuge je nach Auftragslage in wechselnder Anzahl aktiv sind. Offene Systeme finden sich auch in der Lagerhaltung, Kommissionierung und Logistik.

Bedeutsam sind weiterhin die (Tele-)Kommunikationssysteme. Im Prinzip ist die Anzahl der potenziellen Kommunikationsteilnehmer zwar gleich, aber deren Aktivitätszustand und damit die Kommunikationsverbindungen wechseln ständig.

3.4 Biologische Systeme

Seit einiger Zeit gehören die natürlichen Systeme ebenfalls zum Betrachtungsgegenstand der Systemwissenschaft. Ihre Elemente sind Pflanzen und Lebewesen gleich welcher Art.

Systeme dieser Art unterliegen einem z. T. über Jahrtausende reichenden Entwicklungsprozess. In solchen Zeiträumen gelang es den Arten, neue Lebensräume zu erobern und sich der jeweiligen Umwelt und auch deren Veränderungen immer besser anzupassen. In diesem Prozess der Selbstentwicklung und -adaption ergaben sich auch innerhalb der Wesen große qualitative Veränderungen ihrer Eigenschaften sowie nach außen hin auch neue Konstellationen zu anderen Arten von Wesen, die auch der Einstellung bedurften.

Kennzeichnend für die Entwicklung biologischer Systeme ist die Aufeinanderfolge von Generationen verbunden mit einer fortwährenden Erneuerung der Systemelemente. Der Generationswechsel bei den Pflanzen erfolgt in jahreszeitlichem Rhythmus. Bei den Tieren erfolgt der Generationswechsel zumeist über einen längeren Zeitraum. Dabei werden Eigenschaften der Eltern (Elemente der aktuellen Generation) auf die Nachkommen (Elemente der Folgegeneration) in modifizierter Form weitergereicht. Die neue Generation hat sich dann entsprechend ihrer individuellen Eigenschaften in ihrer Umgebung zu bewähren, wobei nur die bestangepassten Individuen überleben. Dementsprechend kommt es über die Generationen hinweg tendenziell zu einer Verbesserung der Systemeigenschaften und damit zu einer Höherentwicklung.

Die Entwicklung der Eigenschaften von Individuen (Systemelemente) erfolgt nur phasenweise in einer annähernd konstanten Umgebung. Von Zeit zu Zeit kommt es zu Veränderungen der Umgebung an die sich die Individuen neu anpassen müssen. Dies gelingt nur bei langsamen Änderungen (bspw. durch Klimawandel). Es kommt auch zu spontanen Wechseln (etwa durch Naturkatastrophen). Sind die Individuen solchen Veränderungen nicht gewachsen, so kommt es zum Aussterben ganzer Arten.

Zur Verdeutlichung der Selbstoptimierung und -adaption biologischer Systeme durch natürliche Auslese betrachten wir ein Beispiel aus dem alljährlichen Vogelzug. Gesteuert durch die individuellen Gene brechen die Vögel im Frühjahr zu unterschiedlichen Zeitpunkten zum Rückflug in ihre Sommerquartiere auf. Die Frühflieger haben zwar gute Chancen auf einen guten Nistplatz, setzen sich aber der Gefahr zu kaltem Wetter aus, welches ihren Bruterfolg beeinträchtigen könnte. Die zu spät Angekommenen hingegen treffen zwar statistisch gesehen auf wärmeres Wetter, finden aber alle Nistplätze bereits besetzt. Sie werden daher keine Nachkommen haben. Erfolgreich in ihrer momentanen Umwelt sind daher nur diejenigen Vögel, die zum „richtigen“ Zeitpunkt angekommen sind. Genau diese haben die besten Gene, die sie anschließend an ihre Nachkommen weitergeben.

Man hat der Natur „über die Schulter geschaut“ und dabei die von ihr verwendeten Mechanismen der Evolutionsstrategie formalisiert, um daraus eine wirkungsvolle Optimierungsmethode zu entwickeln. Auf diese Weise entstanden technische Systeme mit den Eigenschaften natürlicher Systeme. Zu den Anwendungsbeispielen dieser evolutionär fundierten Methode zählen die Selbstoptimierung von Trag-

flächenprofilen, Rohrkrümmern, Düsen, optischen Linsensystemen, Baukörpern, Brückenkonstruktionen, Verkabelungsnetzen u. a.

3.5 Individuelle Systeme

Hier betrachten wir eine weitere Klasse von Systemen, deren Mitglieder (Elemente) natürliche Wesen mit z. T. recht anspruchsvollen Eigenschaften sind. Dazu zählt die Fähigkeit, sich selbst *Ziele zu stellen*. Das oberste Ziel natürlicher Wesen besteht darin, zu überleben. Ist dieses gewährleistet, so wird das Individuum versuchen dasjenige zu erreichen, was noch möglich ist („keiner ist zufrieden“). Das individuelle Bestreben kann auf die Erlangung eines möglichst großen materiellen Gewinns, eine hohe Fitness, aber auch auf die Erregung persönlicher Aufmerksamkeit, Anerkennung oder gar auf die Erregung und Erhaltung von Macht gerichtet sein, um nur einige wenige Ziele zu nennen. Die eigenen Absichten der Individuen werden durch die Möglichkeiten begrenzt, welche die Umgebung zulässt. Zu dieser Umgebung zählen auch die anderen Mitbewerber, die ebenfalls eigenes Bemühen entfalten.

Um eigene Ziele erreichen zu können, bedarf es der *Selbstaktivierung*. Diese notwendige Eigenschaft beruht auf der Erkenntnis, dass man selbst etwas tun muss, um eine Veränderung seiner Situation herbeizuführen. Diese Bereitschaft zur Selbstaktivierung ist zumeist individuell unterschiedlich ausgeprägt. Die Kehrseite dieser Haltung ist Lethargie („der Staat wird es schon richten“) oder auch der offenbar unausrottbare Glaube an eine von selbst sich einstellende bessere Zukunft.

Die Selbstaktivierung kann noch zur *Proaktivität* gesteigert werden, die vorausschauenden Charakter besitzt. Diese gründet sich auf vorliegendes Wissen und daraus abgeleitete Erwartungen.

Selbstaktivität und Proaktivität ermöglichen eigenständiges Handeln der Individuen, um in ihrer Umgebung bestehen zu können und darin erfolgreich zu sein. Dabei wird angenommen, dass solche Aktivitäten aus einem rationalen Verhalten resultieren, also entsprechend dem Kausalitätsprinzip gehandelt wird. Dennoch sind besondere individuell geprägte Handlungspräferenzen wie auch spontane Handlungsentscheidungen („aus dem Bauch heraus“) nicht völlig auszuschließen. Daher ist das Verhalten lebendiger Systeme nicht vollständig determiniert und daher mathematisch kaum zu erfassen. So ist zu befürchten, dass es wohl auch in Zukunft keine einheitliche Systemtheorie der lebendigen Systeme geben wird. Es kann jedoch erhofft werden, dass bestimmtes Verhalten natürlicher Systeme aus der Kenntnis von aus der Automatisierungstechnik stammenden systemtheoretischen Methoden erklärt werden kann.

Individuelle Systeme verfügen auch über Eigenschaften kognitiver Art, die allerdings unterschiedlich ausgeprägt sind. Dazu gehört die Fähigkeit, selbst *Wissen zu erwerben und einzusetzen*. Solches Wissen kann einerseits etwa durch Vererbung, Belehrung oder Training, aber durch eigenen aktiven Wissenserwerb erlangt sein, andererseits aber auch im Verlauf der eigenen Tätigkeit durch Erfahrung erworben werden. Solches Erfahrungswissen wird entweder unbewusst, also passiv, aufgenommen oder durch gezielte Experimentation nach dem Prinzip von Trial and Error gewonnen.

Das mehr oder weniger auf Erfahrung gegründete aktive Handeln der Individuen wird dafür eingesetzt, die selbst vorgegebenen Ziele zu erreichen bzw. bereits erreichte Ziele möglichst aufrecht zu erhalten. Der Erfolg, aber auch Misserfolg solchen Tuns widerspiegelt sich dann in der Reaktion der Umgebung. Für die Beurteilung von Erfolg oder Misserfolg gibt es jedoch keinen objektiven Maßstab. Es können nur relative Bewertungen erlangt werden. Solche Bewertungen basieren auf Vergleichen, entweder in Referenz zu früher erlangten eigenen Werten (d. h. ob es einem besser oder schlechter geht) oder auch durch Vergleich mit anderen.

Das Dilemma besteht allerdings darin, dass beobachtete Veränderungen der Zielgröße nicht allein aus der Reaktion auf voran gegangenes eigenes Handeln erklärt werden können. Eine weitere Ursache kann nämlich darin bestehen, dass dafür Veränderungen der Umgebung verantwortlich sind. Daher ist es für lebendige Systeme nicht sofort erkennbar, ob die meist negativen Änderungen ihrer Zielgröße auf ungeeignetes eigenes Handeln zurückzuführen sind oder auf Veränderungen der Umgebung beruhen. Solche Zeitvarianzen der Umgebung können langsam, also driftartig erfolgen, denen die Indivi-

den durch verändertes Handeln möglicherweise noch folgen können. Es sind aber auch sprungartige Veränderungen möglich, die oft verheerende Auswirkungen haben und dann einen völligen Neuanfang erfordern.

Als einfaches illustrierendes Beispiel betrachten wir einen kleinen Ladenbesitzer. Sein Bestreben besteht natürlicherweise darin, mit seinem Laden einen möglichst hohen Profit zu erwirtschaften. Um sein Betriebsergebnis zu steigern, wird er aktiv sein und dazu ihm geeignet erscheinende Maßnahmen ergreifen. Dazu können Veränderungen des Warensortiments, die Einführung von Sonderangeboten, erhöhte Aktivitäten in der Werbung, die Einführung besondere Serviceleistungen u. a. gehören. Die Auswirkungen seiner Handlungen auf den Umsatz kann der Ladenbesitzer nur über die Reaktion seiner Umgebung bezüglich seiner Einnahmen erfassen. Der darin erkenntliche Erfolg oder Misserfolg kann aber auch auf Änderungen seiner Umgebung zurückzuführen sein, etwa weil ein Strukturwandel der dort ansässigen Bevölkerung stattgefunden, die allgemeine Einkommensentwicklung sich verändert oder einfach ein Konkurrent in der Nachbarschaft ein Geschäft mit ähnlichem Angebot eröffnet hat. Solche Veränderungen wirken sich dann meist derart aus, dass sich der erzielte Gewinn schleichend oder auch dramatisch verkleinert. Muss der Geschäftsmann eine solche Entwicklung feststellen, so kann er weiterhin nur überleben, wenn neue Aktivitäten entfaltet werden, von denen er glaubt, damit seinen Erfolg wiederherstellen oder sogar noch verbessern zu können.

3.6 Organisatorische Systeme

Organisatorische Systeme im hier verstandenen Sinne enthalten Menschen mit breit gefächerten Eigenschaften. Innerhalb solcher Systeme werden Aufgaben, Arbeitsprozesse aber auch Freizeitaktivitäten von den zusammenwirkenden Individuen entsprechend ihren Fähigkeiten organisiert. Es gibt keine zentrale Steuerung; die Systeme *organisieren sich* somit *selbst*. Dies geschieht mit zunehmender Erfahrung im Umgang miteinander, wobei sich ggf. eine Arbeitsteilung herausbildet.

Die Beziehungen (Wechselwirkungen) der Individuen (Elemente) untereinander sind durch Kooperation und/oder Konkurrenz geprägt. Dadurch findet ein Ausgleich der Interessen statt.

Das angestrebte *Ziel* von Systemen mit Organisationscharakter besteht in der Erreichung und Aufrechterhaltung eines Gleichgewichtszustandes (Systemintegrität). Das Maß für den Gleichgewichtszustand hat oftmals Wahrscheinlichkeitscharakter. Entsprechend dem bestehenden Gleichgewichtsbedürfnis strebt das System als Ganzes nach einer dynamischen Balance der (gleichlautenden) Interessen seiner Mitglieder selbst unter wechselnden Bedingungen (Umgebung). In diesem Zustand ist der Aufwand für den Einzelnen am geringsten. Damit ein System seinen Gleichgewichtszustand bewahrt, muss sein Zustand beständig kontrolliert werden. Wird der Gleichgewichtszustand auf Dauer verfehlt, so zerbricht die Organisation.

Als einfaches Beispiel zur Illustration von Organisationssystemen betrachten wir einen Skatclub. Das Verhalten seiner Mitglieder untereinander ist hier durch Wettbewerb, also Konkurrenz, bestimmt. Jeder möchte am Ende einer Sitzung die meisten Zähler erreicht haben. Je nach Spielverlauf kalkuliert der Einzelne das Risiko, das er eingehen möchte, um das Spiel zu gewinnen und richtet danach seine Strategie aus. Harmonie herrscht in diesem System, wenn jeder der Spieler im Mittel die Chance hat zu gewinnen. Ist dies im Einzelfall auf Dauer nicht gewährleistet, so scheidet der schwächere Spieler aus der Organisation (dem System) aus. In schweren Fällen kann es auch zur Auflösung der Organisation kommen.

3.7 Hybride Systeme

Hierbei handelt es sich um heterogene Systeme, in denen Elemente sowohl natürlicher als auch künstlicher, also technischer Natur zusammenwirken. Dazu zeigt **Bild 3.4** das Beispiel eines Systems, in dem Mensch und Roboter etwa in einem Fertigungsprozess zusammenwirken. Die Beziehungen zwischen beiden Teilsystemen werden durch Kooperation bestimmt. Dazu bedarf es der Fähigkeit zur Kommunikation zwischen den sehr unterschiedlichen Partnern. Außerdem ist für den Schutz des Men-

schen vor den schädigenden Berührungen mit Robotern zu sorgen, um die Personensicherheit zu gewährleisten.

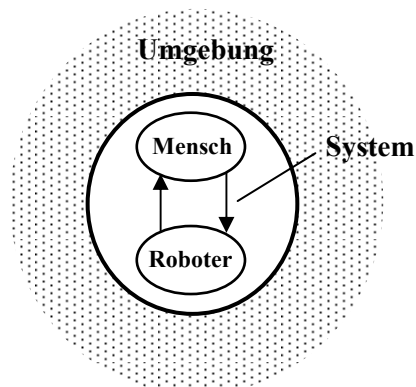


Bild 3.4 Modell hybrider Systeme

Ein weiteres Anwendungsgebiet mit großem Zukunftspotential sind körpernahe *medizintechnische Systeme*. In diesem Fall handelt es sich um eine Personalisierung der Technik, also den Einsatz von Technik mit dem Menschen und für den Menschen. Deshalb werden die Roboter zumeist menschenähnlich (*humanoid*) gestaltet. Bedarfsträger sind vor allem Behinderte und Senioren, die mit Dienstleistungsrobotern kooperieren und daher auch *Personal Robots* oder *Personal Assistents* genannt werden. Von solchen Robotern wird die Eigenschaft verlangt, Dienstleistungen wechselnder Art völlig selbständig zu erfüllen. Entsprechend diesen hohen Ansprüchen müssen diese Roboter Agentenfunktionalität aufweisen.

Ein grundlegendes Problem hybrider Systeme betrifft die Gestaltung der Kommunikationsschnittstelle zwischen Menschen und ihren technischen Dienstleistern. Beide Teilnehmer aus völlig unterschiedlichen Welten müssen sich „verstehen“, um miteinander kooperieren zu können. Dazu bedarf es eines sog. Mensch-Maschine-Interfaces (*human machine interface HMI*).

Bei hybriden Systemen medizintechnischer Art möchte der Mensch verständlicherweise auf Sprachebene mit seinem künstlichen Assistenten kommunizieren. Hierbei kommt es darauf an, dass dieser die gesprochenen und von ihm akustisch aufgenommenen Anweisungen auch verstehen und richtig interpretieren kann. Dabei kann es zu Verständigungsschwierigkeiten kommen, deren Ursache auch beim Auftraggeber in der mangelnden Präzision der gegebenen Anweisungen liegt.

Bei den zunehmend in Kraftfahrzeugen eingesetzten *Assistenzsystemen* werden vorzugsweise akustische und optische Mittel verwendet. Die akustische Warnung erfolgt mittels Lautsprecher, wobei zumeist gestufte Warntöne, aber auch spezifische Geräusche (bspw. Nagelbrettrattern) ausgegeben werden. In Einzelfällen wurde auch bereits die bidirektionale Sprachkommunikation realisiert. Zur optischen Signalisierung werden in einfachen Fällen ggf. farblich unterschiedliche Warnleuchten benutzt. Eine wesentlich komfortablere optische Kommunikationsschnittstelle bilden jedoch die Displays, welche teilweise sogar in die Frontscheibe eingespiegelt werden. In Sonderfällen finden auch taktile Mittel Verwendung, indem Warnmeldungen – für die Mitfahrer unbemerkbar – bspw. durch Erzeugung eines sanften Rüttelns des Lenkrades oder Sitzes ausgegeben werden.

Hybride Systeme können einem auch in der umgekehrten Konstellation entgegentreten, nämlich dass Maschinen die Menschen überwachen. Dabei besteht die Gefahr, dass die gewonnenen Informationen in unbefugte Hände – also wiederum bestimmte Menschen – gelangen können, die daraus Macht oder Gewinn schöpfen (Big-Brother-Szenario). Die dafür notwendigen technischen Voraussetzungen sind bereits weitgehend gegeben. Die Inanspruchnahme solcher Möglichkeiten sollte jedoch durch gesetzliche Regelungen auf ein äußerstes Maß beschränkt werden. Derartige Personenüberwachungen sollten höchstens für den Schutz der Bevölkerung vor terroristischen Aktivitäten zulässig sein.

3.8 Große Systeme

Das bestimmende Merkmal großer Systeme ist ihre hohe Komplexität, so dass sie nur schwer zu übersehen und zu behandeln sind. Sie sind von oftmals großer Ausdehnung und enthalten eine Vielzahl inhärent verteilter Elemente, die untereinander stark vernetzt sind. Die Systemeigenschaften resultieren weitgehend aus den Eigenschaften ihrer Elemente. Große Systeme sind vielfach auch offene Systeme, da die Anzahl ihrer Elemente ständig wechselt bzw. die Aktivität ihrer Elemente variiert.

Systeme mit den genannten Eigenschaften finden sich in großer Anzahl in der *Natur* und verdienen eine immer stärkere Beachtung. Große Systeme natürlicher Art haben eine weite Verbreitung und treten uns in vielerlei Gestalt, etwa von Biosphären, Korallenriffen und anderen in sich geschlossenen Ökosystemen mit ihren unzähligen Bewohnern und Lebensgemeinschaften entgegen. Das oberste Systemziel ist hier die Erhaltung eines Gesamtgleichgewichts bei Bestehen individueller Teilziele. Die wichtigste Eigenschaft ist die in einem oft erstaunlichen Maß ausgeprägte Fähigkeit zur Selbsterhaltung und auch Selbstheilung gegenüber Veränderungen ihrer Umgebung. Diese können ihre Ursache in einem Klimawandel, aber auch in Umweltschädigungen haben, für die der Mensch verantwortlich ist.

Große Systeme sind auch in der Welt von Mensch und Technik zahlreich anzutreffen. Bekannte Beispiele sind die ausgedehnten Elektroenergiesysteme, aber auch die stark verzweigten Gas- und auch Erdölnetze. Zwischen den zahlreichen verteilten Erzeugern und Verbrauchern wird Energie bzw. Materie ausgetauscht. In den ebenfalls ausgedehnten Wirtschaftssystemen werden hingegen Waren zwischen den Produzenten und Konsumenten ausgetauscht, aber auch gewinnträchtig zwischengespeichert. Ähnliches gilt auch für das weltweit agierende Finanzsystem. Schließlich kennen wir auch große Systeme, in denen Informationen ausgetauscht werden. Die Verbindungen zwischen den Teilnehmern erfolgen über heterogene Netze unterschiedlicher Art, zu denen leitungsgebundene und leitungs-freie Festnetze, Funknetze verschiedener Anbieter, satellitengestützte Kommunikationssysteme, sich frei ausbildende ad-hoc-Netze und das Internet zählen.

Weitere große Systeme sind im Bereich des sich regional und inzwischen auch weltweit ausweitenden *Verkehrs* entstanden. Hauptzentren sind die sich entsprechend dem allgemeinen Bevölkerungswachstum und der sich verstärkenden Landflucht ständig ausweitenden Ballungsräume und Megacities. Verstärkt wird diese Entwicklung durch die nicht umkehrbare Globalisierung, den verstärkten Zwang zur besseren Ausnutzung der Ressourcen und Schonung der Umwelt, das weltweit agierende Finanzsystem etc. Diese sich in ihrer Dimension ständig aufblähenden Systeme stellen große Herausforderungen an ein komplexes und großräumig wirkendes Management. Darüber hinaus spielen auch Safety und Security eine immer größere Rolle.

Systeme der hier betrachteten Art verlangen ein andersartiges Instrumentarium. Mit Hilfe der derzeit verfügbaren theoretischen Methoden, wie Komplexitätstheorie und Spieltheorie, lassen sich zwar bestimmte Teilprobleme behandeln, jedoch ist der verfügbare Methodenvorrat noch nicht ausreichend.

Mit dieser Aufführung ist die Anzahl der interessierenden Systeme bei weitem nicht erschöpft. Weitere interessante Systeme, auf die wir hier allerdings nicht näher eingehen, sind ökonomische, ökologische und auch soziale Systeme.

4. Kybernetische Systeme als Universalmodell

4.1 Kybernetik und Systemwissenschaft

Unter den verschiedenen Systemkategorien nehmen die kybernetischen Systeme eine Sonderstellung ein. Systeme dieser Art sind außerordentlich verbreitet und von vielfältiger Erscheinungsform. Das Spektrum reicht von natürlichen Systemen intraindividuelle und interindividuelle Art, etwa dem Herz-Kreislaufsystem bzw. gesellschaftlichen Systemen, über Mensch-Maschine-Systeme bis hin zu technischen und ökonomischen Systemen unterschiedlichster Art.

Der Erste, der die universelle Bedeutung dieser Systemkategorie erkannte, war *Norbert Wiener*, ein US-Amerikaner mit europäischen Wurzeln. In seinem epochalen Werk *“Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine”* hat er seine Vision dargelegt, die in weiten Bereichen (*Animal* und *Machine*) anzutreffenden Steuerungsprozesse (*Control*) in Verbindung mit Informationsaustausch (*Communication*) in vereinheitlichter Weise zu behandeln [2]. Damit gab er den Anstoß zur Gründung einer neuen anwendungsübergreifenden wissenschaftlichen Disziplin, der er den Namen **Kybernetik**, abgeleitet von dem griechischen Wort für Steuermannskunst, gab.

Bei genauerer Betrachtung dieser Systemklasse wird deutlich, dass in ihnen Subsysteme enthalten sind, in denen *Prozesse* stattfinden. Diese Prozesse können sehr verschiedener Art sein, besitzen jedoch als gemeinsame Eigenschaft ein dynamisches Verhalten. Diese Eigenschaft ist somit für kybernetische Systeme insgesamt prägend. Prozesse sind nur dann sinnvoll, wenn sie zielgerichtet beeinflusst, also gesteuert werden. Damit wird die Steuerbarkeit von Prozessen als weitere Eigenschaft vorausgesetzt. Bezüglich des Verhaltens von Prozessen wird das Bestehen von Ursache-Wirkungs-Beziehungen, also Kausalität, vorausgesetzt, woraus sich die Möglichkeit einer exakten formalen Beschreibung ergibt.

Zur zielorientierten Steuerung von Prozessen wird eine Instanz benötigt, die *Steuerung* genannt wird. Der Prozesszustand unterliegt jedoch nicht allein der Beeinflussung durch Steuerung, sondern auch Einwirkungen aus der Umgebung, welche als Störungen aufgefasst werden.

Das Grundmodell der bisher beschriebenen kybernetischen Systeme wird durch **Bild 4.1** veranschaulicht. Bei jedem der Teilsysteme handelt es sich um Subsysteme, die ihrerseits weitere Elemente in netzartiger Verknüpfung enthalten.

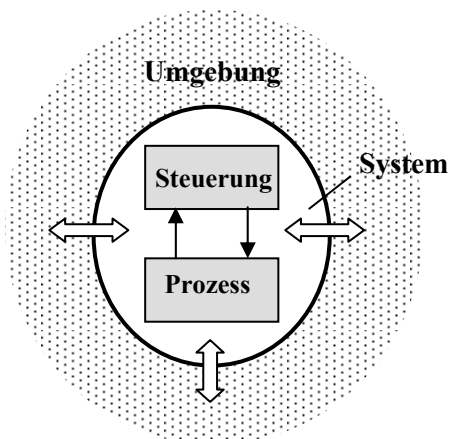


Bild 4.1 allgemeine Architektur von Steuerungssystemen

Die Wechselwirkung zwischen Steuerungsinstanz und Prozess erfordert die Verarbeitung, den Austausch und die Nutzung von *Informationen*. Kybernetische Systeme sind folglich *informationsverarbeitende Systeme*. Die im System vorhandenen Elemente werden somit unter dem Gesichtspunkt betrachtet, erhaltene Informationen zusammen mit intern gespeicherten zu neuen Informationen zu verarbeiten und diese entsprechend den zwischen ihnen bestehenden informationellen Kopplungen anderen Elementen zu übermitteln. Dieser Informationsaustausch erfolgt dann durch Kommunikation. Bedeutsame Informationen betreffen Angaben zum vorgegebenen Ziel, dem vorliegenden Zustand des Prozesses, den notwendigen Prozesseingriffen und soweit möglich auch über Einwirkungen aus der Umgebung. Hierbei ist es zweitrangig, in welcher Form Informationen repräsentiert und ausgetauscht werden.

Weitere wichtige Eigenschaften kybernetischer Systeme betreffen die Stabilität, Bewegungsgenauigkeit, Güte bzw. Optimalität des dynamischen Verhaltens sowie die Funktionssicherheit.

Die zur zielgerichteten Prozessbeeinflussung benötigte Steuerungsinstanz kann beispielsweise durch natürliche Wesen realisiert werden. Als Beispiel dafür betrachten wir den wohl ältesten von Menschen geführten Prozess: die Unterhaltung des Feuers. Dies gelang bereits dem steinzeitliche *homo sapiens*. Dazu beobachtete dieser beständig die Ausprägung des Feuers, bewertete dessen Zustand und legte bedarfsweise Brennmaterial nach. Wir heutzutage Lenden bedienen uns dieser Art des Feuerunterhaltens wohl nur noch beim Grillen, vertrauen ansonsten aber bei der Erzeugung häuslicher Wärme wohl eher der automatisierten Gas- oder Ölheizung. In diesem Fall obliegt die Prozesssteuerung einem beständig und zielgenau arbeitenden künstlichen Teilsystem, dem Automaten.

4.2 Automatisierungssysteme

Wie zuvor angedeutet, kann die Prozessführung auch von selbsttätig arbeitenden technischen Einrichtungen übernommen werden. Darauf Bezug nehmend wenden wir uns nunmehr einer speziellen Klasse kybernetischer Systeme, den *Automatisierungssystemen*, zu. Auf eine Kurzform gebracht könnte man formulieren: Automatisierungssysteme sind kybernetische Systeme, bei welchen die Steuerung selbsttätig funktionierender technischer Einrichtungen übertragen ist und welche vorzugsweise mit technischen Prozessen wechselwirken.

4.2.1 Merkmale automatisierungstechnischer Systeme

Die die Prozesssteuerung vornehmende Einrichtung, allgemein *Steuereinrichtung* genannt, ist eine mit technischen Mitteln realisierte informationsverarbeitende Einheit, die beständig zugeführte Informationen über den aktuellen Prozesszustand zusammen mit den vorgegebenen Zielinformationen und ggf. dem bestehenden Steuerzustand zu Stellinformationen verarbeitet. Ihre Funktionsweise wird durch die jeweilige (Anwendungs-)Software bestimmt. Diese Steuereinrichtung, zumeist realisiert durch einen Computer bzw. ein Computernetzwerk, ist im Gegensatz zum Prozess der gestaltbare Teil von Automatisierungssystemen. Diese Software basiert auf einem Entwurf der Steuerung unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften des Prozesses.

Damit sich der Prozess und die Steuereinrichtung verständigen können, sind zwischen den beiden Subsystemen angeordnete sog. Schnittstellenelemente (sog. *Interface-Baugruppen*) erforderlich. Diese betreffen einerseits die *Sensoren*. Diese Koppelglieder sind zwischen Prozess und Steuereinrichtung angesiedelt und dienen zur fortlaufenden messtechnischen Erfassung und informationellen Abbildung der kontrollierten Prozesszustandsvariablen. Da besonders der Prozess auch Einflüssen der Umgebung unterliegt, sind weitere Sensoren erforderlich, um diese Einflüsse zu erfassen. Dabei kann es sich angesichts der Komplexität der Umgebung um aufwändige Sensorsysteme handeln.

Auf der Gegenseite finden *Aktoren* als Schnittstellenelemente Verwendung. Diese wandeln die von der Steuereinrichtung erzeugten Stellinformationen in Form von Signalen bzw. Daten prozesswirksam um, indem Energie- oder Stoffströme über sog. Stellglieder beeinflusst werden. Zur Betätigung der entsprechenden Stelleinrichtungen ist die Zufuhr von Hilfsenergie erforderlich.

Die wechselseitige Kommunikation zwischen der Steuereinrichtung und dem Prozess erfolgt weitgehend unter Verwendung von *Signalen*. Diese verfügen über einen Signalträger (bspw. ein elektrisches oder pneumatisches Medium) und besitzen einen Informationsparameter (bspw. Spannung, Strom, Druck, auf den die zu übertragenden Informationen aufgeprägt werden. Eine andere, besonders in digitalen – vor allem computergestützten Systemen angewandte Art der Informationsabbildung sind *Daten*. Die Informationen werden dort in codierter Form auf dem Signalträger abgebildet. Während Signale Informationen kontinuierlich übertragen können, repräsentieren Daten jeweils nur Signalwerte. Eine ständige Informationsübertragung ist daher nur in Form von *Datenströmen* möglich. Für die Abtastung von Signalwerten, Codierung und Wertebereitstellung werden somit weitere Baugruppen benötigt.

4.2.2 Übersicht über die automatisierungstechnischen Systeme

Automatisierungssysteme können eine völlig unterschiedliche Zweckbestimmung haben. Dementsprechend vielfältig sind die mit dieser Technologie lösbaren Aufgaben. Eine Darlegung des Leistungsspektrums findet sich in [3]. Wir begnügen uns hier mit der Auflistung der wesentlichen Systemklassen.

- Überwachungssysteme
permanente automatische Prozesskontrolle in Bezug auf die Einhaltung des nominalen Betriebsverhaltens ggf. mit Diagnose aufgetretener Störfälle sowie Therapie zur Wiederherstellung eines möglichst sicheren Betriebs
- Ereignisdiskrete Systeme
automatische Realisierung vorgegebener Prozessabläufe ggf. unter Berücksichtigung von Alternativen bzw. Nebenläufigkeiten
- Regelungssysteme
automatische Einhaltung vorgegebener Prozesszustände trotz vorhandener Störungen aus der Umgebung bzw. automatisches fehlerarmes Folgen einer variierenden Zielgröße
- Optimierungssysteme
automatisches Aufsuchen und Einhalten einer vorgegebenen Prozesszielgröße
- Adaptionssysteme
automatische Aufrechterhaltung einer vorgegebenen bzw. optimalen Prozessdynamik
- Problemlösende Automatisierungssysteme
autonome Realisierung übertragener Aufträge gleichbleibender oder wechselnder Art
- Lernende Automatisierungssysteme
automatische Akquisition von Steuerungswissen und dessen Anwendung zur Verbesserung der Systemperformance

4.2.3 Leistungsspektrum der Automatisierungstechnik

Zu den wohl frühesten Automatisierungssystemen gehören die seit 1788 von *James Watt* mit einem Fliehkraftregler ausgestatteten Dampfmaschinen. Dieser Regler sorgte erstmalig für die selbsttätige Einhaltung einer annähernd konstanten Drehzahl unter variierenden Belastungen. Spätere Anwendungen bezogen sich auf den Einsatz in Turbinen sowie den militärischen Bereich. Der Durchbruch der Automatisierungstechnik erfolgte etwa ab Mitte des vergangenen Jahrhunderts auf breiter Front. Seither leisten diese Systeme einen wichtigen Beitrag zum beständigen technischen Fortschritt.

Betrachtet man die Anwendungen von Automatisierungssystemen aus heutiger Sicht, so stößt man auf ein überraschend breit gefächertes Einsatzfeld. Ein Schwerpunkt von großer wirtschaftlicher Bedeutung sind die vielfältigen industriellen Anwendungen. Unter automatischer Kontrolle werden in fertigungs- und verfahrenstechnischen Anlagen die verschiedensten Güter und auch Energie in hoher Qualität und mit gleichbleibender Präzision reproduziert sowie auch technologische Prozesse und sonstigen Einrichtungen auf effektive und weitgehend betriebssichere Weise geführt. Automaten ermöglichen die selbsttätige Optimierung von Prozesskenngrößen, die Anpassung der Systeme an zeitvariable Umgebungsbedingungen, die selbsttätige Ausführung übertragener Aufträge und Vieles andere mehr.

Die Automatisierungstechnik bietet die Möglichkeit, die Menschen von anstrengender körperlicher Arbeit bzw. dauerhafter Ausführung monotoner Tätigkeiten bei der Prozesssteuerung zu entlasten. Sie trägt somit wesentlich zur nachhaltigen Verbesserung seiner Arbeits- und auch Lebensumstände bei. Auch die Steuerung von Prozessen, die dem Menschen nicht zugänglich oder für ihn zu gefährlich sind, kann durch künstliche Automaten realisiert werden. Automaten können bekanntlich auch weder ermüden noch streiken, was für die Sicherheit und manchmal auch die Produktivität der Anlagen durchaus von Interesse ist.

Später erfolgte eine beträchtliche Ausweitung der Einsatzfelder der Automatisierungstechnik. Zu den neuen Einsatzgebieten zählen die Energie- und Verkehrstechnik, Luft- und Raumfahrt, die Kraftfahrzeugtechnik, Robotik, regenerative Energietechnologie, Ökologie, Biotechnologie, Haustechnik sowie der Konsumgüterbereich. Zu den neueren Einsatzfeldern der Automatisierungstechnik gehören auch die Dienstleistungen am Menschen, vornehmlich im Gesundheitswesen und der Medizin sowie in der Pflege und Betreuung von Senioren. Automatisierungslösungen sind auch inhärenter Bestandteil einer Vielzahl unterschiedlicher Produkte selbst im home-Bereich und in Spielzeugen.

Abschließend sei noch vermerkt, dass auch das Verhalten des Menschen zu wesentlichen Teilen durch automatische Abläufe bestimmt ist, deren Sitz bestimmten Hirnregionen zugeordnet werden kann. Dies gilt nicht nur für immer wiederkehrende Bewegungsabläufe, sondern ist auch beim Autofahren routinierter Fahrer zu beobachten.

4.2.4 die Automatisierung als zukunftsorientierte Technologie

Die Automatisierungstechnik sieht sich im Zusammenwirken mit der Informations- und Kommunikationstechnologie für die Bewältigung der vor uns stehenden Herausforderungen technisch gut gerüstet. Dazu tragen auch die auf anderen technischen Gebieten erreichten Fortschritte bei. Wesentliche Beiträge wurden dabei u. a. geleistet auf Seiten der:

- **Hardware-Technologie**
Verfügbarkeit immer leistungsfähigerer und kostengünstigerer Prozessoren, beliebige Verteilung der Funktionen auf Hardware, Firmware, PC oder Leitsystem
- **Kommunikationstechnologie**
Verfügbarkeit heterogener Kommunikationsnetzwerke, lokale Funknetze, ad-hoc-Netze (sich spontan bildende und wieder auflösende Teilnetze), Satellitenkommunikation, weltweit zugreifbares Internet, Sprachkommunikation
- **GPS-Technologie**
Satelliten-gestützte aktuelle Positionsbestimmung, Ermittlung der Richtung und Geschwindigkeit von Bewegungen, Navigationshilfen
- **RFID-Technologie**
Funkbasierte Autoidentifikation von Gütern bzw. Verfolgung ihrer Bewegung in der Ausführung als flexible und aufklebbare preiswerte Chips ohne eigene Energieversorgung bei Gewährleistung hoher Datensicherheit, Lageunabhängigkeit und Robustheit gegenüber elektromagnetischer Strahlung
- **Spezielle Sensoren**
div. Umgebungssensoren (Laserscanner, Radar, Infrarot), biometrische Sensoren (Blutwerte, Herzfrequenz), ökologische Sensoren, Motorsensoren et al.
- **spezielle Aktoren**
Piezoaktoren, Lenkaktoren, Nanoantriebe, spezielle Dosieraktoren u. a.

Die Verfügbarkeit solcher neuer technischer Möglichkeiten eröffnet der Automatisierungstechnik völlig neue Einsatzfelder. Die neuartigen Problemlösungen bereichern u. a. die Gebiete der individuellen Mobilität, Verkehrsleitung, Umweltüberwachung, Logistik, Lagerhaltung, Handel, der individuellen (Fern-)Überwachung, Medikamentierung und microchirurgische Behandlung von Patienten.

4.3 Von der Automatisierungstechnik zur Schlüsseltechnologie

Der erreichte Stand der Automatisierungstechnik erlaubt es, dieser einen neuen Stellenwert zuzuweisen. In Erweiterung der Betrachtungsweise bietet sich die Möglichkeit, das vorliegende Methodenspektrum der Automatisierungstechnik zur Behandlung von Aufgabenstellungen (nicht nur) aus dem Alltagsleben methodisch als Automatisierungsprobleme einzusetzen. In solchen Fällen erweist sich

der bisher maßgebende technische Aspekt häufig als marginal oder gar irrelevant. Geblieben sind hingegen die typischen Merkmale gesteuerter Systeme, nämlich das Vorliegen dynamischer Prozesse, die informationsgeleitete Steuerung der Prozesse im Sinne der Erreichung bzw. Einhaltung eines Ziels oder Erzielung eines vorgegebenen Prozessablaufs in Interaktion mit der Umgebung.

Diese übergreifende Betrachtungsweise soll an Hand eines Beispiels illustriert werden. Dabei soll es sich um die Luftüberwachung in Großstädten und Ballungsräumen handeln. Zunächst ist es sinnvoll, dies als eine Aufgabe mit Systemcharakter zu begreifen. Dazu wird das Gebiet mit Hilfe von an verschiedenen neuralgischen Orten aufgestellten Messstationen beobachtet und die erfassten Daten selbsttätig über geeignete Informationskanäle an eine Zentrale übermittelt. Diese Instanz entscheidet selbsttätig bei Überschreitung festgelegter Grenzwerte über entgegenwirkende Maßnahmen. Dazu gehören je nach Grad der Belastung die Verfügung der Abschaltung besonders emissionsträchtiger Verursacher, etwa an Metallurgiebetriebe oder Kohlekraftwerke. Wenn notwendig wird auch der Zustrom von Kraftfahrzeugen in das Stadtgebiet gestoppt und eventuell die Stilllegung von Dieselfahrzeugen verfügt. Am Ende wird der Betrieb auch der restlichen Kraftfahrzeuge mit Ausnahme von Rettungsfahrzeugen und der Feuerwehr untersagt. Zeigen die getroffenen Maßnahmen Wirkung, indem sich die Luftqualität allmählich verbessert, so werden die Beschränkungen in umgekehrter Reihenfolge wieder aufgehoben. Es handelt sich also um einen typischen Regelkreis.

In dieser Art ließen sich noch weitere Beispiele aus vielen anderen Gebieten anfügen. Der Automatisierungstechnologie wird entsprechend ihrem integrativen Charakter offenbar die Kompetenz zugetraut, nachhaltige Beiträge sogar zur Bewältigung der gewaltigen Zukunftsaufgaben vor denen die Menschheit steht. Der Automatisierungshorizont ist damit auf großräumige hin bis zu globalen Dimensionen zu erweitern. Zu den anstehenden Zukunftsaufgaben zählen die Bewältigung der Auswirkungen dieser unvermeidlichen und unumkehrbaren Globalisierung, des sich ankündigenden Klimawandels sowie das Management der sich verknappenden und nicht erneuernden Ressourcen an Energieträgern und Rohstoffen.

Diesen Herausforderungen entsprechend hat sich u. a. eine Arbeitsgruppe der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik gegründet und dazu ein Thesenpapier ausgearbeitet [4]. Eines dieser Projekte beschäftigt sich beispielsweise mit dem Thema „Automatisierungstechnologie als Problemlöser für existenzielle Bedürfnisse in Gesellschaft und Lebensraum“.

Einschränkend dazu ist allerdings darauf hinzuweisen, dass die Automatisierungstechnologie allein nicht in der Lage sein wird, die vor unserer Gesellschaft liegenden Zukunftsprobleme zu lösen. Dazu bedarf es der Beteiligung traditioneller Verbündeter. Dazu zählen vor allem die traditionellen Verbündeten der Computer-, Kommunikations-, Bildverarbeitungstechnologie, Elektronik aber auch neue Disziplinen, wie die Ökologie, Biologie, Soziologie u. a.

5. Systemtheorie als wissenschaftliche Grundlage

Für die Behandlung gesteuerter dynamischer Systeme wird – wie in jeder anderen Wissenschaftsdisziplin auch – eine eigenständige Theorie benötigt. In kybernetischen Systemen besteht hierfür eine besondere Notwendigkeit wegen der vielfach vorhandenen Rückkopplungen. Deshalb können im System vorgenommene Veränderungen nur noch schwer überschaut werden. Entsprechend diesem Bedarf wurde im Rahmen der Automatisierungs- und Kommunikationstechnik ein leistungsfähiges Instrumentarium an theoretischen Methoden zur Behandlung dynamischer informationsverarbeitender Systeme mit vernetzten Komponenten ausgearbeitet.

Entsprechend dem breit gefächerten Anforderungsprofil gesteuerter dynamischer Systeme sind die ausgearbeiteten Methoden der Systemtheorie sehr vielfältig. Im Zentrum steht dabei das Methodenspektrum der Steuerungs- und Regelungstechnik. Die wichtigsten Beiträge der Systemtheorie sollen nachfolgend kurz umrissen werden.

5.1 Zustandsbasierte Beschreibung dynamischer Systeme

Dynamische Systeme jeder Art – auch natürliche – besitzen einen *Zustand*. Unter einem Zustand versteht man im hier betrachteten Sinn die momentane Befindlichkeit von Systemen. Im aktuellen Zustand drückt sich die Vergangenheit einer Systembewegung aus. Der Zustand von Systemen unterliegt einer zeitlichen Veränderung, deren Ursache Prozesseingriffe der systeminternen Steuerung oder auch externe Einwirkungen der Umgebung sein können. Der Zustand dynamischer Systeme ist somit in der Systemtheorie von grundlegender Bedeutung.

Die allgemeinste Form einer zustandsorientierten Beschreibung dynamischer Systeme mit deterministischem Verhalten ist ein Quintupel (T, Z, f, g, z_0) mit den Mengen T (Zeitraum), Z (Zustandsraum), f (Operation), z_0 (Anfangszustand). Der Zustand $z \in Z$ wird durch eine Gesamtheit von Zustandsvariablen z_i ; $i=1, 2, \dots, m$ beschrieben. Diese Variablen können messbare oder auch formal eingeführte Größen sein. Der Zustand z wird dann entsprechend durch einen Zustandsvektor $\underline{z} = [z_i]$ abgebildet.

Die allgemeine Beschreibung linearer kontinuierlicher dynamischer Systeme auf Zustandsbasis lautet

$$\underline{z}' = \underline{A} \underline{z} + \underline{B} \underline{x} \quad (\text{Systemgleichung}), \quad \underline{z}(0) = \underline{z}_0 \quad (5-1)$$

$$\underline{y} = \underline{C} \underline{z} + \underline{D} \underline{x} \quad (\text{Ausgabegleichung}) \quad (5-2)$$

Die angegebene kompakte Darstellungsform durch eine Matrixdifferentialgleichung 1. Ordnung und eine algebraische Gleichung geht auf einen Vorschlag von *Lagrange* zurück. Damit besteht die Möglichkeit einer formalen Behandlung dynamischer Systeme unter Nutzung der Vektoralgebra bzw. des Matrizenkalküls.

Der durch das Gleichungssystem bestimmte Zusammenhang wird in grafischer Form durch **Bild 5.1** wiedergegeben.

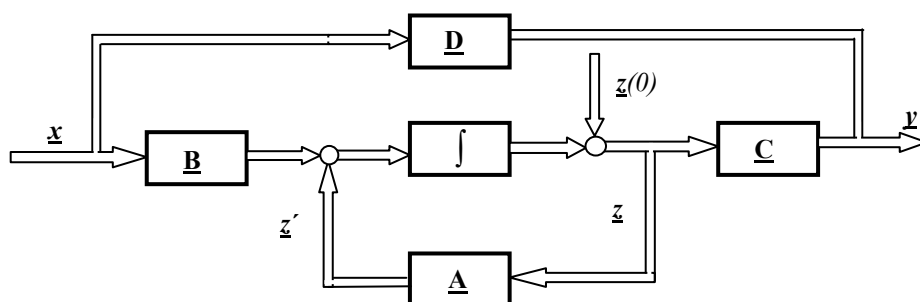


Bild 5.1 Systembeschreibung in Zustandsform

Die Matrizen \underline{A} (Systemmatrix), \underline{B} (Steuermatrix), \underline{C} (Beobachtungsmatrix), \underline{D} (Durchgangsmatrix) enthalten nur Koeffizienten, welche das vorliegende System charakterisieren. Weiterhin bedeuten \underline{x} (Eingangsvektor), \underline{y} (Ausgangsvektor), \underline{z} , \underline{z}' , $\underline{z}(0)$ (Zustandsvektor) Vektoren verschiedener Signale. Das Zeitverhalten des Systems verkörpert implizit der Integrationsoperator \int .

Die gemäß der Gln. (5-1) und (5-2) gegebene Beschreibung bietet den Rahmen für eine ganze Klasse dynamischer Systeme. Dazu zählen kontinuierliche lineare Ein- und Mehrgrößensysteme. Diese Darstellung ist auch auf äquidistant getastete, d. h. diskontinuierliche Systeme übertragbar, wobei der Integrationsoperator dann durch einen Verzögerungsoperator zu ersetzen ist. Auch Systeme mit verteilten Parametern sind bei entsprechender Modifikation beschreibbar. Ist der Systemzustand nicht vollständig messbar, so kann dieser mittels eines Zustandsbeobachters geschätzt werden. Alternativ dazu ist auch eine abgerüstete Lösung möglich, wofür beispielsweise auf das Prinzip der Ausgangsrückführung zurückgegriffen werden kann.

Die Zustandsbeschreibung bildet eine Plattform, auf der ein ganzes Methodenspektrum aufsetzt. Dazu zählen Verfahren zur Transformation der Systembeschreibung (Zeit-, Frequenz-, Laplace- und z-Transformation) sowie leistungsfähige Methoden zur Systemanalyse und des Entwurfs nach verschie-

denen Kriterien. Des Weiteren existieren leistungsfähige mathematisch begründete Verfahren zur *Systemanalyse* (Stabilität, Beobachtbarkeit, Steuerbarkeit) sowie zur *Systemsynthese* (div. Kriterien). Bemerkenswert ist, dass sich die Systemsynthese jeweils nur auf das Teilsystem bezieht, welches beeinflussbar ist. Dies ist i. A. die Steuereinrichtung, die dafür über Freiheitsgrade verfügen muss. Grundlage für den Systementwurf ist wiederum der jeweilige Prozess, von dem ein mathematisches Modell benötigt wird (s. Abschn. 6.3).

5.2 Automatenbasierte Beschreibung dynamischer Systeme

Die Beschreibung Ereignisdiskreter Systeme kann in ähnlicher Weise erfolgen, wobei der Systemzustand wiederum von zentraler Bedeutung ist. Die theoretische Grundlage liefert in diesem Fall die *Automatentheorie*.

Die Eingangs- und Ausgangsvariablen Ereignisdiskreter Systeme sind i. A. binärwertig und können wiederum zu Vektoren zusammengefasst werden. Dementsprechend bezeichnen

$$\underline{x} = [x_i]; x_i \in \{0, 1\}; i=1, 2, \dots, m \text{ den Eingangsvektor}$$

und

$$\underline{y} = [y_i]; y_i \in \{0, 1\}; i=1, 2, \dots, n \text{ den Ausgangsvektor.}$$

Die in den Automaten auftretenden Zustände Z sind von diskreter Natur. Ihre Beschreibung erfolgt vorzugsweise unter Verwendung binär codierter Zustandsvariabler. Ihre Anzahl p entspricht den im System vorhandenen (Binär-)Speichern. Die binären Zustandsvariablen werden wiederum vektoriell zusammengefasst. Dementsprechend ist

$$\underline{z} = [z_i]; z_i \in \{0, 1\}; i=1, 2, \dots, p \text{ der Zustandsvektor.}$$

Die bei den Automatenzuständen verwendete Binärcodierung entspricht der bereits für die Eingangs- und Ausgangsvariablen verwendeten Codiervorschrift. Die damit erreichte Vereinheitlichung ermöglicht die Anwendung der formalen Logik zur internen Funktionsbeschreibung.

Automaten können in allgemeiner Form durch ein 5-Tupel $(\underline{X}, \underline{Y}, \underline{Z}, f, g)$ erfasst werden mit den Bedeutungen

$$\begin{aligned} \underline{X} & \quad \text{Menge der Belegungen des Eingangsvektors} \\ \underline{Y} & \quad \text{Menge der Belegungen des Ausgangsvektors} \\ \underline{Z} & \quad \text{Menge der Belegungen des Zustandsvektors} \\ f: & \quad \underline{X} \times \underline{Z} \rightarrow \underline{Z} \text{ der Überföhrungsfunktion} \\ g: & \quad \underline{X} \times \underline{Z} \rightarrow \underline{Y} \text{ der Ausgabefunktion.} \end{aligned}$$

Hinter der formalen Darstellung der Funktion f verbirgt sich ein Zustandsübergang. Um diesen konkreter anzugeben bedarf es der Vorgabe einer Automatenstruktur, in die an geeigneter Stelle ein Verzögerungsglied integriert werden muss. Es gibt mehrere Angebote solcher Automatenstrukturen, hier Automatenmodelle genannt, unten denen das sog *MEALY-Automatenmodell* das bedeutsamste ist. Legt man dieses zugrunde, dann gilt

$$\underline{Z}' = f(\underline{X}, \underline{Z}) \text{ Überföhrungsfunktion} \quad (5-3)$$

und

$$\underline{Y} = g(\underline{X}, \underline{Z}) \text{ Ergebnisfunktion.} \quad (5-4)$$

Die Gegenüberstellung dieser Beziehungen mit den Gleichungen (5-1) und (5-2) zeigt eine formale Ähnlichkeit. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Funktionen f und g hier formallogischer Natur sind.

Die grafische Darstellung der Automatenbeschreibung in Form eines Mealy-Modells veranschaulicht **Bild 5.2**.

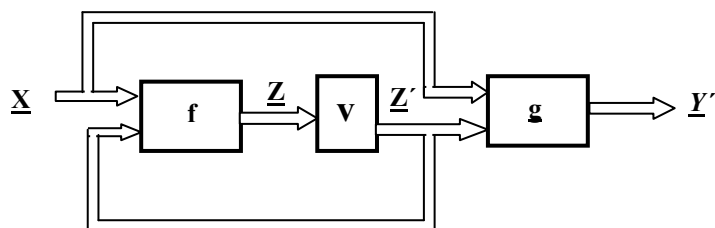


Bild 5.2 Systembeschreibung durch Mealy-Automatenmodell

Automaten, die einen Zustand besitzen, werden auch *sequentielle Automaten* genannt. Im Sonderfall können Automaten auch keinen zu berücksichtigenden Zustand aufweisen. Diese heißen dann *kombinatorische Automaten*. Ihre Beschreibung vereinfacht sich zu

$$\underline{Y} = g(\underline{X}). \quad (5-5)$$

Ereignisdiskrete Steuerungen besitzen häufig Ablaufcharakter. In solchen Fällen ist es zweckmäßig, das gewählte Automatenmodell in eine ablauforientierte Struktur umzusetzen. Eine diesbezügliche Möglichkeit bietet die Verwendung sog. *Programmablaufgraphen (PAG)* [5]. Günstiger sind jedoch die *Petrinetze (PN)*, da hier auch Prozessnebenläufigkeiten berücksichtigt werden können [6]. Hier werden die aufeinander folgend wechselnden Zustände auf eine Schrittsequenz abgebildet. In jedem (Steuer-)Schritt wird zunächst eine Aktion x ausgegeben, deren erwartete Wirkung y anhand der Erfüllung einer definierten (Prozess-)Bedingung b kontrolliert wird. Diese Bedingungen haben die Form formallogischer Gleichungen, in denen binäre Eingangssignale verknüpft werden.

Auch hier existiert ein ganzes Methodenspektrum, das auf der Automatenbeschreibung aufsetzt. Im Kern geht es wieder um die Systemanalyse (Wettläufe, Verklemmungen, Kollisionen) sowie den Systementwurf auf Basis wählbarer Modelle.

5.3 Regelbasierte Beschreibung dynamischer Systeme

Zu den bisher aufgeführten, streng formalen Beschreibungsarten ist in jüngerer Zeit noch eine weitere, eher pragmatische Art hinzugekommen. Gemeint ist hier eine regelbasierte Funktionsnotation. Das Grundelement bilden sog. *Produktionsregeln* der Art

$$r: \quad \text{WENN (Bedingung) DANN (Schlussfolgerung)}. \quad (5-6)$$

Diese Regeln enthalten elementare Funktionsangaben, deren Gesamtheit die sog. *Regelbasis* R bildet. Die Regeln $r \in R$ müssen vollständig und untereinander widerspruchsfrei sein. Die Bedingungen enthalten Angaben zu bestimmten Eingangsvariablen, welche je nach Systemart arithmetisch, logisch oder auch komparativ miteinander verknüpft sein können. Die Schlussfolgerungen beziehen sich auf Operationen der Ausgangsvariablen, die prinzipiell ebenfalls verschiedenartig sein können.

Bei der Systembeschreibung in Regelform handelt es sich um eine *wissensbasierte* Notationsart. Jede Regel $r \in R$ enthält ein Wissensinkrement mit der Bedeutung:

$$r: \quad \text{WENN (Situation } s \in S) \text{ DANN (Handlung } h \in H) \quad (5-7)$$

Unter diesem Gesichtspunkt stellt dann die Gesamtheit der Regeln R die Wissensbasis dar.

Wissensbasiertes Handeln lässt sich bereits bei den höher entwickelten Säugetieren, etwa den Elefanten, beobachten. Besonders die Leittiere einer Herde verfügen über ein in Generationen erworbenes Wissen, das ihnen in bestimmten Situationen Entscheidungshilfen gibt. Die Jungtiere der Herden versuchen dieses Wissen im Sinne einer Belehrung zu übernehmen um später davon zu profitieren. Dann

und wann wird auch von den Regeln abgewichen und anders entschieden. Bewährt sich die neue Relation, so wird damit die alte Regel ersetzt, ansonsten bleibt es bei der bisherigen Regel. Auf diese Weise erfolgt auch ein Lernen aus Erfahrung, wodurch eine Anpassung an eine sich ändernde Umwelt ermöglicht wird.

In technischen Systemen muss das Regelwissen auf formale Weise verarbeitet werden. Dies geschieht dann durch *Schlussfolgerung*. Die Regelbasis steht dann in Kontakt mit einem Schlussfolgerungsmechanismus. Die Funktionsweise ist dann dadurch bestimmt, dass bei Vorliegen einer aktuellen Situation bestimmte Regeln angesprochen werden, aus denen eine Schlussfolgerung gezogen wird. Auf diese Weise ergibt sich ein völlig anderer Wirkungsmechanismus, der jedoch auch einige Vorteile bietet. Dazu zählen zum Einen die weitgehenden Freiheiten bezüglich der Formulierung der Bedingungen und Schlussfolgerungen in den Regeln. Daraus resultiert ein breiter Anwendungshorizont. Die regelbasierte Beschreibung ist daher einsetzbar für praktisch sämtliche Automatisierungsaufgaben wie Prozessüberwachung, Regelungen, Ereignisdiskrete Steuerungen, Adaption, Optimierung.

Eine wesentliche Erweiterung des Konzepts der regelbasierten Beschreibung erfolgte durch *L. A. Zadeh* mit dem Vorschlag einer Fuzzy-Set-Theory [7]. Dort ist es sogar erlaubt, die Formulierung der Bedingungen und Schlussfolgerungen in sprachlichen Termen, also linguistisch, vorzunehmen [8]. Eine weitere wesentliche Erweiterung bedeutet die Berücksichtigung qualitativer und damit unscharfer (fuzzy) Aussagen in den Bedingungen und Schlussfolgerungen. Daraus resultiert dann wiederum, dass unscharfe Schlussfolgerungen (*approximate reasoning*) gezogen werden müssen [9]. Der zusätzliche Nutzen des Fuzzy-Konzepts besteht folglich darin, dass nun auch Prozesse einer Steuerung zugänglich sind, deren Verhalten nicht exakt beschrieben werden kann.

Man darf bei aller Begeisterung nicht übersehen, dass die Anzahl der in den Regeln zu berücksichtigenden Variablen stark begrenzt ist. Außerdem ist es nicht einfach, die Konsistenz und Widerspruchsfreiheit der Regelbasis nachzuweisen. Schließlich muss man auch akzeptieren, dass der zwar sehr einfachen Funktionsbeschreibung doch ein aufwändiger Entwurfsprozess gegenüber steht.

5.4 künftige Anforderungen an die Systemtheorie

Mit wachsendem Interesse an nichttechnischen, also ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Systemen z. T. globaler Dimension wird deutlich, dass die klassische kybernetische Methodologie zunehmend an ihre Grenzen stößt. Dementsprechend erweist es sich als notwendig, das kybernetische Konzept weiter auszubauen. Von großem Interesse sind daher die Bemühungen um eine Weiterentwicklung der Kybernetik. Als Standardwerke dieser sog. *Neokybernetik* gelten die Monografien von *Kunihiko Kaneko* [10] und *Heikki Hyötyniemi* [11].

Die notwendigen Erweiterungen des Theoriengebäudes beziehen sich insbesondere auf die Behandelbarkeit stark vernetzter großer Systeme hoher Komplexität sowie zur optimalen Strukturierung großer Systeme. Ansätze dafür bieten u. a. die Komplexitätstheorie sowie neue Methoden zur Komposition, Dekomposition und Modularisierung. Weiterer Theoriebedarf besteht bezüglich der Behandlung hybrider, d. h. gemischt analog- und diskretwertiger Systeme sowie von dynamischen Systemen mit verteilten und hierarchischen Strukturen. Auch die Behandlung heterogener Systeme, bestehend aus Regelungs- und Ereignisdiskreten Systemen, bedarf einer vereinheitlichenden theoretischen Grundlage. Weitere Anforderungen betreffen den Ausbau der Theorie nichtlinearer Systeme, von Systemen mit den Fähigkeiten der Planung, autonomen Problemlösung, Navigation und Kognition. Hier werden vor allem graphenbasierte Verfahren eine wesentliche Rolle spielen.

Angesichts der weiterhin steigenden Bedeutung der Modellbildung und Simulation (*Virtual Engineering*) von Systemen besteht ein unmittelbarer Bedarf an einer Erweiterung des Anwendungshorizonts. Dieser richtet sich sowohl auf die Behandelbarkeit hochgradig vernetzter komplexer Systeme als auch die durchgängige Modellierbarkeit heterogener Systeme unter Einschluss quantitativer und qualitativer Modellkomponenten

6. Systemmodelle als nützliche Werkzeuge

Eine essentielle Komponente der Systemwissenschaft von kaum zu überschätzender Bedeutung ist die *Systemmodellierung*. In sicherlich überspitzter Form gilt der Slogan: „Mensch sei helle, mach' Modelle“.

6.1 Wesen

Systeme müssen nicht notwendigerweise in ihrer originalen Erscheinungsform behandelt werden. Dies kann auch stellvertretend in Form von Modellen geschehen.

Modelle müssen den Originalen, die sie abbilden, in irgendeiner Weise ähnlich sein. Dabei stellt sich die Frage, *wie* ähnlich Modelle ihren Vorbildern sein sollten. Der eine Extremfall besteht in der vollkommenen Ähnlichkeit. Damit wären Modell und Original identisch. Dann kann man sich den Aufwand für die Modellerstellung ersparen, da keinerlei Zugewinn zu erwarten ist. Das Gegenstück wäre die vollkommene Unähnlichkeit. Derartige Modelle wären wiederum nutzlos, da sie keinerlei Eigenschaften des Originals widerspiegeln. Bleibt also der Zwischenbereich, die *partielle* Ähnlichkeit. Modelle sind also nur dann sinnvoll, wenn sie bestimmte Eigenschaften des Originals widerspiegeln.

Welche der Eigenschaften eines Originals modelliert werden sollen, hängt vom jeweiligen Verwendungszweck des Modells ab. So ist für den Architekten, Produktdesigner oder Anlagenkonstrukteur eindeutig die Form von entscheidender Bedeutung. Man benötigt also hier *Formmodelle*. In anderen Fällen werden *Struktur-* oder *Ablaufmodelle* bevorzugt, um andere Beispiele zu nennen. Weitere wichtige Modellkategorien sind Wetter- sowie Umweltmodelle. Diese geben Auskunft über die Verteilungen von Parametern, wie Temperatur, Luftdruck und Windströmung, bestimmten Schadstoffen, Ozonwerten u. a. in einer bestimmten Region bzw. im globalen Maßstab. Die Liste der Beispiele ließe sich weiter fortsetzen.

Unser Interesse gilt den *Verhaltensmodellen*, welche für die Kybernetik und Automatisierungstechnik von großer Bedeutung sind. Diese Modelle sollen das dynamische Verhalten von Systemen auf der Basis von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen abbilden. Da diese Beziehungen auf informationeller Ebene erfasst und gehandhabt werden, die an Signale (d. h. den sog. Signalparameter) oder an Daten gebunden sind, handelt es sich letztlich um *Signal-* bzw. *Datenmodelle*.

6.2 Form von Modellen

Betrachten wir als nächstes die wesentlichen Repräsentationsformen von Systemmodellen, so können folgende Arten unterschieden werden.

Die einfachste Realisierungsform sind die *grafischen Modelle*, welche auch *Paper-and-Pencil-Models* genannt werden. Diese sind nur für einfache Zwecke geeignet, indem sie beispielsweise vom Systemingenieur genutzt werden, sich einen groben Überblick über die Bestandteile (Elemente) des von ihm abgegrenzten Systems und deren Wechselwirkungen zu verschaffen.

Eine weitere gelegentlich angewandte Form der Modellierung sind die sog. *gebauten Modelle*. Hierbei handelt es sich oft um maßstäblich verkleinerte bzw. vereinfachte Nachbauten realer Komponenten oder ganzer Systeme. Von dieser Modellkategorie wird Gebrauch gemacht, wenn das Original zu komplex ist, um es mathematisch zu beschreiben bzw. die real vorhandenen Einflüsse nicht exakt erfasst werden können. Beispiele für die Verwendung gebauter Modelle sind körperliche Modelle von Flugzeugen oder Automobilen zur Untersuchung und Optimierung der Strömungsverhältnisse im Windkanal, die Optimierung von Motoren und Triebwerken auf Prüfständen oder die berüchtigten Crashtests unter Verwendung von Dummies.

Die vielleicht wichtigste Kategorie bilden die *mathematischen Modelle*. Diese bieten eine formale Funktionsbeschreibung realer Systeme in Gestalt mathematischer Beziehungen unterschiedlicher Art. Die mathematischen Modelle kybernetischer Systeme haben die Form von algebraischen, Differential-

, Vektor- oder formallogischer Gleichungen (s. Kap. 5.). Modelle können auch durch Algorithmen beschrieben werden. Diese Form der Notation ist besonders geeignet für die Untersuchung von Modellen auf Computern.

Ergänzend sei noch auf eine andere Art von Modellen hingewiesen: die *Denkmodelle*. Derartige im Gehirn von Menschen sich abspielende Modelle werden beispielweise benutzt, um in manchmal schlaflosen Nächten verschiedene Konstellationen gedanklich durchzuspielen, um etwa die günstigste Strukturvariante zu ermitteln.

6.3 Verwendungszweck von Modellen

Grafische Modelle in Form von Zeichnungen, Dokumenten, seit einiger Zeit aber auch von Dateien, dienen zur Dokumentation reproduktiv herstellbarer Produkte und Anlagen. Maßstäbliche Formmodelle werden im Bereich der Architektur und des Verkehrswesens dazu verwendet, um die Vorstellungskraft über das spätere Aussehen eines Bauwerks zu unterstützen und womöglich die Finanzierungsbereitschaft zu erhöhen. Gebaute Modelle technischer Systeme, wie Flugzeuge und Motoren, benutzt man zur Optimierung von Betriebsparametern oder zu Testzwecken.

Von besonderer Bedeutung sind die mathematischen Modelle. Diese ermöglichen eine vielseitige Verwendung jenseits des jeweiligen physischen Originals. Mathematische Modelle müssen von den originalen Systemen jedoch zunächst erst gewonnen werden, was als *Modellbildung* bezeichnet wird. Dafür gibt es zwei prinzipiell unterschiedliche Wege. Die eine Möglichkeit besteht in einer physikalisch-mathematischen Analyse des Originals auf der Grundlage von Bilanzgleichungen oder Ähnlichem und erfordert ein u. U. tiefes Eindringen in die vorliegenden Sachverhalte und Beziehungen. Alternativ dazu besteht auch die Möglichkeit der experimentellen Modellbildung. Diese basiert auf der Durchführung spezieller Experimente am Originalsystem. Die Auswertung der erhaltenen Resultate liefert dann, zumeist unter Zugrundelegung einer geeigneten Modellstruktur, das gewünschte Systemmodell.

Mathematische Modelle dynamischer Systeme werden einerseits für den Entwurf anderer noch zu bestimmender Systemkomponenten benötigt. So ist etwa in Regelungssystemen das Vorhandensein eines Prozessmodells die grundlegende Voraussetzung für den Entwurf der Systemkomponente "Steuerung". Gesamtmodelle dynamischer Systeme werden wiederum zur Analyse bestimmter Systemeigenschaften, etwa der Stabilität, gebraucht. Modelle können auch integrale Bestandteile dynamischer Systeme sein. So werden beispielsweise in selbsteinstellenden und adaptiven Systemen sog. Strecken- oder auch Kreismodelle als Referenzobjekte eingesetzt. Eine andere Art der Modellverwendung ist die modellbasierte Regelung. Hier wird ein zumeist zeitverkürzt arbeitendes Streckenmodell eingesetzt, um ein prädictives Verhalten zu erzielen. Ein Beispiel für die modellbasierte Regelung ist die Manövrierung von Raumflugkörpern von der Bodenstation aus. Auf diese Weise können die oftmals großen Signallaufzeiten zwischen dem Raumflugkörper und der Bodenstation ausgeglichen werden. Eine recht bedeutsame Art der Verwendung von Modellen erfolgt im Rahmen der *Systemsimulation*.

6.4 Systemsimulation

Bei der Systemsimulation handelt es sich prinzipiell darum, Systeme auf anderen Systemen nachzubilden. Dazu bedarf es einer Quellbeschreibung des jeweiligen Originalsystems in Form eines mathematischen oder algorithmischen Modells. Die modellhafte Nachbildung des Originals erfolgt auf Computern, heutzutage nahezu ausschließlich digitaler Art. Dies erfordert die Umsetzung in ein Computermodell, welches anschließend programmtechnisch zu realisieren ist. Damit werden Objekte der realen Welt durch Datenstrukturen in Computern nachgebildet. Auf diese Weise entsteht ein virtuelles Abbild eines Ausschnitts der objektiven Realität. Der Computer selbst dient dabei als *Simulator*.

Für die Übertragung formal beschriebener Modelle in ein Simulationsprogramm wurden verschiedene Simulationssprachen entwickelt. Eine frühe Simulationssprache, die allerdings kaum noch in Gebrauch ist, ist die Sprache SIMULA. In heutiger Zeit finden vorzugsweise objektorientierte Sprachen Anwendung, deren Grundidee wiederum auf die Simulation zurückgeht. Ein Beispiel für eine derartige objektorientierte Simulationssprache ist die Sprache MODELICA.

Bei der Simulation kann auf eine reichhaltige *Supportsoftware* zurückgegriffen werden, die breite Unterstützung bietet. Ein Beispiel für ein hochleistungsfähiges Simulationssystem ist SIMULINK (*MathWorks Inc.*). Simulationssysteme enthalten üblicherweise den Sprachkern, das Simulationsprogramm, den Simulator sowie eine möglichst komfortable Bedienoberfläche. Zusätzliche Programme ermöglichen eine Steuerung der Simulationsexperimente, deren Ablauf durch einen vorbestimmten Plan festgelegt ist. Auch die Ergebnisse von Simulationsexperimenten können automatisch ausgewertet werden. Die Simulationsexperimente können sogar derartig geführt werden, dass sie zu einer selbsttätigen Systemoptimierung führen.

Das Zusammenwirken von Computermodell, Simulator und Experimentator veranschaulicht **Bild 6.1**.

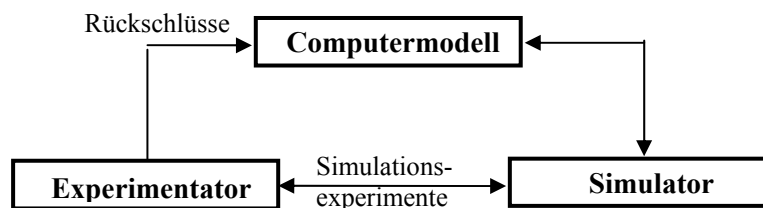


Bild 6.1 Simulationssystem

Die Simulationstechnologie bietet die Möglichkeit, mit den Modellen anstelle der Originale in überschaubarer Weise experimentieren zu können. Dies ist mit einer Reihe von Vorzügen verbunden. Zunächst ist der Experimentator von der mehr oder weniger aufwändigen technischen Herstellung des Untersuchungsobjekts entlastet. Anhand von Simulationsexperimenten können die vorgesehenen Untersuchungen isoliert voneinander und unter Ausschaltung störender Quellen vorgenommen werden. Auch lassen sich Änderungen am System sowohl parametrischer wie auch struktureller Art am verwendeten Modell auf wesentlich einfachere Weise durchführen und deren Auswirkungen übersichtlicher verfolgen. Selbst Systemeingriffe, die beim Originalsystem zu Beschädigungen oder gar zum Verlust führen würden, lassen sich auf virtuellem Niveau problemlos realisieren und können bequem studiert werden. Einen weiteren Vorzug bietet die Möglichkeit, die Untersuchungen in wählbaren Zeitmaßstäben durchführen zu können. So lassen sich etwa bei der Untersuchung schnell verlaufender Prozesse mittels Zeitdehnung detaillierte Einsichten in die Abläufe gewinnen. Umgekehrt ermöglicht die Zeitraffung u. U. beträchtliche Zeiteinsparungen.

Simulationsuntersuchungen finden in zahlreichen Bereichen Anwendung. Zu den Einsatzgebieten zählt einerseits die Automatisierungstechnik, die aus der vorab durchführbaren Systemanalyse und -synthese großen Nutzen zieht. Simulationsuntersuchungen sind auch ein wertvolles Hilfsmittel der Ingenieure bei der Optimierung des Strömungsverhaltens von Luft- und Straßenfahrzeugen, Untersuchung und Optimierung von Vorgängen in Verbrennungsmotoren und Antrieben, der Ermittlung der Auswirkungen von Störungen und Ausfällen - um nur einige Beispiele zu nennen. Selbst Crashtests werden inzwischen weitgehend auf virtueller Ebene durchgeführt.

Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet ist das Training von Fahrzeugführern und Anlagenfahrer in simulierter Umgebung. Solche Systeme besitzen Steuerungscharakter. Simuliert werden der Fahrprozess, d. h. das Verhalten des jeweiligen Fahrzeuges, sowie steuerbare Einwirkungen der Umgebung. Die Steuerung übernimmt der jeweilige Schüler, der dazu mit dem simulierten Prozess über realitätsnahe Schnittstellen wechselwirkt. Die Ausbildung am Trainer kann sowohl zum reinen Fahrtraining als auch zur Schulung bei der Problembewältigung verwendet werden. Dazu werden potenzielle Störungen wiederholt in unterschiedlichen Fahrsituationen präsentiert, wobei der angehende Pilot ein stabiles Handlungsmuster erwirbt.

Der Einsatz der Simulationstechnologie ist auch bei der Wetterprognose, Schadstoffausbreitung, Klimaveränderung, Wirtschaftsprognose u. a. verbreitet. Sie erweist sich zunehmend auch als wertvoller

Helfer in Problemsituationen, etwa der Bewältigung der großen vor uns liegenden Zukunftsprobleme. Die dafür nötigen Modelle sind allerdings von beträchtlicher Komplexität, so dass deren Nachbildung gewaltige Rechenleistungen verlangt. Anhand von Simulationsuntersuchungen können einerseits in der Vorausschau die Auswirkungen der zu erwartenden Entwicklungen in Bezug auf die Veränderung bestimmter Parameter erkannt werden. Auf diese Weise können beispielsweise die sich abzeichnenden Entwicklungen in den Megacities, die Auswirkungen des demografischen Wandels, die Folgen des zu erwartenden ansteigenden Transport- und Verkehrsaufkommens, die mögliche Ausbreitung von Seuchen, Schadstoffen und Schadinsekten, die globalen Auswirkungen von Klimaveränderungen u. a. untersucht werden. Studien dieser Art werden u. a. im Rahmen des internationalen Projekts TAPAS (*Travel Activity Pattern Simulation*) unter maßgeblicher deutscher Beteiligung durchgeführt [12]. Auf diesen eher analytischen Untersuchungen aufbauend lässt sich dann die Wirksamkeit verschiedener Gegenmaßnahmen anhand verschiedener Szenarien modellhaft durchspielen, um die mutmaßlich beste Variante herauszufinden. Damit kann rechtzeitig Wissen erlangt werden und insbesondere den politisch Verantwortlichen ein wertvolles Instrument zur Hand gegeben werden, das diese zu fundierten Entscheidungen zur Bewältigung unserer Zukunftsprobleme befähigt.

7. Systemtechnik als universelle Methodik

7.1 Wesen

Die Systemtechnik beruht auf einer speziellen Interpretation des Systemgedankens. Wie bereits der Name erkennen lässt, handelt es sich hier um Systemanwendungen im rein technischen Bereich. Die zugrunde liegende Idee ist alt und wurde bereits in den Stein- oder Holzbaukästen unserer Kinderzeit realisiert. Baukästen dieser Art bieten ein bestimmtes Sortiment von Bausteinen, aus denen je nach Phantasie der Nutzer verschiedenartige kleine Bauwerke errichtet werden können.

Damit die in den Baukästen enthaltenen Klötzchen in nahezu beliebiger Weise kombiniert werden können, müssen sie miteinander passfähig sein. Die freizügige Koppelbarkeit von Bausteinen stellt somit eine grundlegende Voraussetzung für die Verwendung solcher Baukästen dar. Die Koppelbarkeit betrifft die Übereinstimmung der Schnittstellen (des sog. Interfaces) und wird als *Kompatibilität* bezeichnet. Die Kompatibilität kann sich auf ganz unterschiedliche Sachverhalte beziehen. Beim kindlichen Baukasten betrifft diese ein Formmerkmal, und zwar die geometrische Übereinstimmung der Bausteine. Deshalb verfügen die Bausteine über nur wenige unterschiedliche Abmessungen, welche sich in ein vorgegebenes Raster einfügen. In kybernetischen Systemen hingegen bezieht sich die Kompatibilität insbesondere auf die Passfähigkeit von Informationsschnittstellen.

Der Entwurf der in sich abgeschlossener Komponenten (Elemente) kann der Kreativität seiner Entwickler überlassen bleiben. Die Systemtechnik erlaubt eine frühzeitige Funktionskontrolle. Die Prüfung kann bereits bei der Produktion der Komponenten beginnen. Dies ermöglicht, einen Großteil der Fehler in dieser Phase auszuschalten. Das Angebot an Systemelementen kann jederzeit verändert werden, indem Komponenten ergänzt, substituiert oder wieder entfernt werden. Die Mehrfachnutzung von Komponenten ermöglicht weiterhin eine Fertigung in größeren Stückzahlen (Serienfertigung) und bietet damit Kostenvorteile.

Die Anwendung der Systemtechnik verspricht somit eine Reihe von Vorzügen. Insbesondere erscheint diese Technologie als ein effektiver Weg zur Herstellung kundenbezogener Produkte mit vergleichsweise geringem Aufwand an Kosten und Zeit.

7.2 Basislösung

Die Nützlichkeit solcher Baukästen wurde inzwischen von der Welt der Technik erkannt. Diese Idee wurde von der Systemtechnik aufgegriffen und weiterentwickelt. Dazu werden die Bausteine als Elemente potenzieller Systeme interpretiert, die über die Eigenschaft der Kompatibilität verfügen.

Das Grundprinzip wird anhand von **Bild 7.1** erläutert.

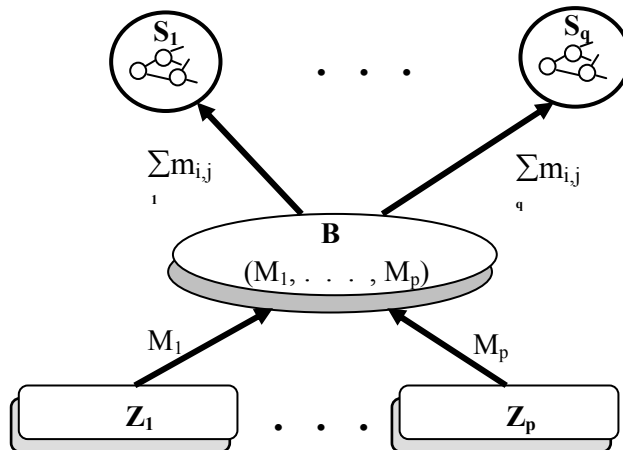


Bild 7.1 Methodik der Systemtechnik

Den Baukasten B betrachten wir nun als irgendeine Art von Speicher, der einen Vorrat von Teillösungen (Elementen) in den Mengen M_1, \dots, M_p enthält, mit denen ein bestimmtes Anwendungsgebiet abgedeckt werden kann. Die Elemente können ihrerseits verschiedenen Detaillierungsgrad aufweisen und somit Subelemente darstellen. Somit ist eine Hierarchie von Teillösungen verfügbar. Die im Baukasten enthaltenen Elemente $i=1, \dots, p$ mit der Eigenschaft der Kompatibilität wurden zuvor von externen Instanzen, den Zulieferern Z_1, \dots, Z_p , in sporadischer Folge produziert. Jeder Zulieferer hat dabei die Möglichkeit, seine Elemente nach eigener Kunst zu gestalten, sofern nur die Koppelbedingungen erfüllt sind. Bedarfswise können von den Zulieferern Elemente aus dem Baukasten auch wieder entfernt werden (etwa um sie zu verbessern) oder es werden neue Elemente eingespeist. Aus dem im Baukasten enthaltenen Sortiment an Elementen können dann bedarfsweise Systeme S_1, \dots, S_q synthetisiert werden, wozu die benötigten Elemente in gewissen Teilmengen $\sum m_{i,j}$ entnommen werden

7.3 Modifizierte Lösung

Eine Variante der Systemtechnik, der sich vor allem der Automobilbau bedient, orientiert auf die Verwendung von Plattformen. Diese Technologie bietet eine effektive Lösung des Fertigungsproblems zur Herstellung von PKWs nach individuellen Kundenwünschen. Bei dieser maßgeschneiderten Produktion kann es sich durchaus um Einzelstückzahlen handeln.

Das hier verwendete Prinzip mit systemtechnischer Orientierung basiert auf der Einrichtung mehrerer Depots, welche Bauteile jeweils einer Kategorie, jedoch unterschiedlicher Ausführung (Elemente) in begrenzter Anzahl enthalten. Die Bauteile verfügen über die gleichen Schnittstellen und erlauben so eine wählbare Verwendung. Den verteilten Speichern werden dann im Verlauf der Herstellung des Wunschprodukts die dafür benötigten Komponenten entsprechend dem Baufortschritt entnommen und aufeinanderfolgend zum Endprodukt (System) zusammengefügt. Im angeführten Beispiel des Automobilbaus gibt es Depots für Plattformen weniger Typen, diverse Motoren, Getriebearten und andere Komponenten. Daraus werden in einer bestimmten zeitlichen Folge die individuell ausgewählten Komponenten entnommen und schrittweise montiert.

Die hier betrachtete modifizierte Variante der Systemtechnik wird durch **Bild 7.2** veranschaulicht.

Wie ersichtlich bestehen r Depots D_k mit den Mengen M_k unterschiedlicher Komponenten $k=1, \dots, r$. Die entsprechende Belieferung erfolgt durch die Zulieferer Z_k , $k=1, \dots, r$. Aus den Depots werden zu aufeinander folgenden Zeitpunkten $t_1 < t_2 < \dots < t_r$ die für die individuelle Systemlösung S_i benötigten Komponenten $m_{1,i}, m_{2,i}, \dots, m_{r,i}$ entnommen und der Reihe nach montiert.

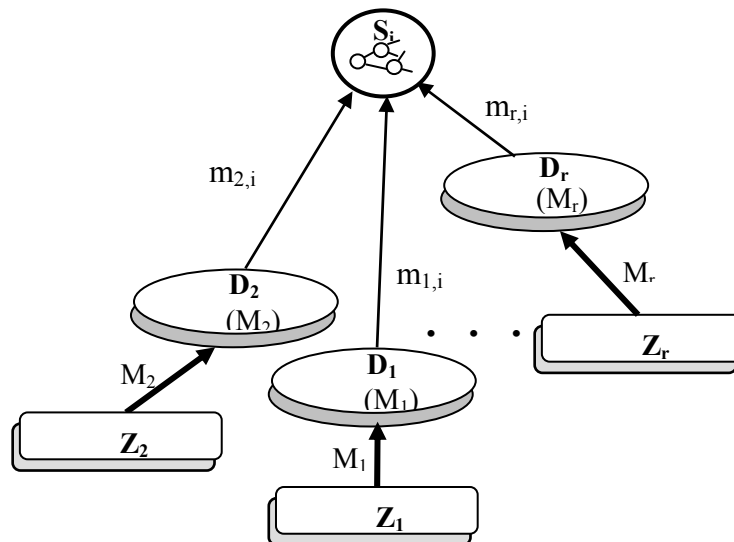


Bild 7.2 Prinzip der Plattform-orientierten Systemtechnik

7.3 Anwendungen der Systemtechnik

Zu den frühzeitigen Anwendern der Systemtechnik gehört die *Automatisierungstechnik*. Das Interesse am Einsatz dieser Technologie hat seinen Ursprung in der Verschiedenartigkeit der zu automatisierenden Prozesse, woraus wiederum die Notwendigkeit unikatler Lösungen für die entsprechenden Automatisierungsprojekte resultiert. Diese Spezifität betrifft einerseits die funktionelle Seite, weshalb individuelle Entwürfe der Automatisierungseinrichtung erforderlich sind. Zum Andern führen die bestehenden Besonderheiten auch zu unterschiedlichen gerätetechnischen Ausstattungen (die sog. Instrumentierung). Die benötigten Sensoren, Einrichtungen zur Informationsverarbeitung, Aktoren und Hilfseinrichtungen stammen zumeist von verschiedenen Herstellern und besaßen in früheren Zeiten auch unterschiedliche Anschlussbedingungen. Daraus resultierte eine aufwändige und zeitintensive Projektierung, die entsprechende Kosten verursachte.

Abhilfe versprach hier die Anwendung der Systemtechnik. Dementsprechend war es notwendig, die Entwicklung einer neuen Gerätegeneration einzuleiten, deren Komponenten miteinander kompatibel sind und deren Mächtigkeit eine möglichst weitgehende Abdeckung industrieller Anwendungen ermöglicht. Neben der geometrischen Koppelbarkeit der Komponenten war vor allem eine Standardisierung der Kommunikationsschnittstellen notwendig, welche zur Einführung sog. Einheitssignale führte. Die später erfolgte Digitalisierung erforderte dann die Vereinheitlichung der Datenformate und –schnittstellen.

Im Zuge der immer komplexer werdenden technischen Systeme erweist sich der ausufernde Verkabelungsaufwand zum Informationsaustausch zwischen der Vielzahl der Komponenten als ernsthaftes Hindernis. Die dafür anfallenden Kosten konnten bis zu 1/3 der Gesamtkosten betragen. Die Abhilfe bestand in der Einführung gemeinsam benutzbarer Kommunikationswege, die zeitmultiplex betrieben werden. Dafür wurden für die verschiedenen Aufgabenbereiche geeignete Bussysteme entwickelt. Für den ordnungsgemäßen Betrieb busartiger Kommunikationssysteme müssen neben den Daten auch Adress- und Steuerinformationen übertragen werden. Dies setzt wiederum eine Standardisierung der auszutauschenden Telegramme sowie eine Vereinheitlichung der Schnittstellen der daran anschließbaren Baugruppen voraus. Das Buskonzept wurde ebenfalls von der Automobilindustrie übernommen, um die mittlerweile stark angestiegene Anzahl elektronischer Komponenten zu vernetzen. Für diesen Bordeinsatz wurden Spezialbusse (CAN-, A-Bus) geschaffen. Auch in der Gebäudetechnik werden anstelle der Einzelverkabelung in verstärktem Maße Bussysteme (bspw. INSTA-Bus) eingesetzt.

7.4 Von der Systemtechnik zur Systemphilosophie

Das Potenzial der Systemtechnik ist keineswegs auf technische Anwendungen beschränkt, sondern ist von universeller Bedeutung. In diesem erweiterten Sinne kann man dann von einer *Systemphilosophie* sprechen.

Ein Beispiel für die nichttechnische Anwendung der Systemphilosophie bietet die *Möbelindustrie*. Diese Branche wetteifert um die Gunst der Kunden, indem sie einerseits modular gestaltete Bauteile für Gebrauchsmöbel (Elemente) zur Selbstmontage wie auch individuell gestaltbare Systemlösungen etwa für Küchen anbietet. In mehreren iterativen Schritten kann sich der Kunde seine Traumküche zusammenstellen und diese danach bestellen. Die Entwürfe werden – dem heutigen Stand entsprechend – am Computer in sog. *virtual reality* präsentiert. Dies unterstützt nicht nur die Vorstellungskraft der Kunden, sondern ermöglicht auch den raschen Umbau der Einrichtungsgegenstände.

Ein weiterer beispielhafter Einsatz der Systemphilosophie findet sich in der *Softwaretechnologie*. Waren bisher große und damit recht unübersichtliche Programme (sog. Spaghettiprogramme) die Regel, so orientiert man zunehmend auf den Programmierstil der verteilten Programmierung. Das ist Systemphilosophie pur. Das neue Konzept verlangt eine Aufgliederung der Programme in kleine überschaubare Programmmodule (Elemente), die jeweils Teilaufgaben lösen. Die Erstellung solcher Programmmodule bleibt der Kreativität ihrer Programmierer überlassen. Die Vorteile dieses Programmierstils liegen in der besseren Transparenz, der Möglichkeit der parallelen Erstellung, unabhängigen Prüfung sowie in der Wiederverwertbarkeit von Teilprogrammen aus einem vorhandenen Vorrat an Teillösungen. Die Kombinationsfähigkeit der Programmmodule verlangt wiederum die Erfüllung von Kompatibilitätsbedingungen. Im vorliegenden Fall sind das verbindliche Festlegungen bezüglich der Programmschnittstellen und benutzbaren Datentypen.

Zum Abschluss bringen wir ein Beispiel aus der Bildung. Hier scheint das klassische Studium an einer einzigen Universität bzw. Hochschule mittlerweile zum Auslaufmodell zu werden. Der heutige Student möchte im Zeichen der Globalisierung seine Studieninhalte und –orte selbst bestimmen können. Dies setzt eine Modularisierung der Lehrfächer voraus, die somit miteinander kompatibel sein müssen. Des Weiteren bedarf es vereinheitlichter Regelungen für die (international gültige) Anerkennung von Teilleistungen und Abschlüssen. Diesen Aufgaben haben sich die Bildungseinrichtungen zu unterziehen, wollen sie auch weiterhin konkurrenzfähig bleiben. Der Student ist dann sein eigener Designer für die Gestaltung und Organisation seines individuellen Bildungssystems.

Mit den vorstehenden Beispielen sollte ein Eindruck von der breit gefächerten Anwendbarkeit der Systemphilosophie vermittelt werden. Die auf diesem Weg erlangten Systemlösungen zeichnen sich vor allem durch Effektivität, Flexibilität und individuellen Zuschnitt aus.

8. Offerten der Systemwissenschaft

Gegen Ende der Behandlung wollen wir ein Fazit ziehen. Dabei geht es letztlich um die Frage, welchen Nutzen die Systemwissenschaft für den Anwender bringt. Zu ihrer Beantwortung wollen wir der Kürze halber eine thesenhafte Form wählen.

1. Das Systemkonzept ermöglicht eine *überschaubare und transparente Behandlung* zusammengehöriger Sachverhalte, indem das jeweilige Objekt gleichsam isoliert betrachtet und der „Rest der Welt“ im Sinne einer Umgebung nur marginal berücksichtigt wird.
2. Das Systemkonzept bietet eine *anwendungsübergreifende Nutzung*, wobei von den spezifischen Merkmalen der jeweiligen konkreten Systeme abstrahiert und eine vereinheitlichte Methodik benutzt wird.
3. Das Systemkonzept ist pragmatisch angelegt und erlaubt eine *freie Wahl der Ebene* der Systembetrachtung, wobei die Weite des Systemrahmens von untergeordneter Bedeutung ist.
4. Die Systeme können entsprechend der *Relativität von System und Element* durch Veränderung des Systemrahmens auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen untersucht werden.

5. Systeme besitzen einen *inneren Aufbau*, der formal als eine Gesamtheit von Elementen aufgefasst wird, zwischen denen Beziehungen (Kopplungen) bestehen.
6. Die bestehenden *Kopplungen* zwischen den Elementen des Systems und auch der Umgebung können je nach Art des untersuchten Systems durch den Austausch von Informationen, Energien, Materie (bspw. Nahrung), Finanzwerten u. a. bestimmt sein.
7. Eine herausgehobene Bedeutung besitzen die *kybernetischen Systeme* mit den Besonderheiten eines dynamischen Verhaltens, informationsgeleiteter Steuerung von Prozessen und kommunikativer Kopplung der Elemente, welche eine vereinheitlichte Behandlung einer weiten Klasse von Systemen ermöglichen.
8. Die innerhalb der Kybernetik und Automatisierungstechnik entwickelten Methoden besitzen ein großes Anwendungspotenzial, das weit über technische Anwendungen hinausreicht, so dass diese Disziplinen den Charakter einer *Schlüsseltechnologie* erlangen.
9. Die im Rahmen der Kybernetik und Automatisierungstechnik entwickelte *Systemtheorie* bietet dem Nutzer das theoretische Rüstzeug zur formalen Behandlung von Systemen.
10. Die auf theoretischer oder experimenteller Basis erstellten *Systemmodelle* sind partielle Abbilder realer Systeme unterschiedlichster Art und ermöglichen eine formale Behandlung auf vorteilhafte Weise.
11. Die *Systemsimulation* erlaubt eine freizügige Experimentation mit Modellen in virtueller Form durch Nachbildung auf Computern und bietet großen Nutzen.
12. Die *Systemtechnik* bietet eine Möglichkeit zur effektiven Produktion von Systemlösungen auf der Grundlage eines universell einsetzbaren begrenzten Elementevorrats.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Im Beitrag wird das vorliegende Wissen zur Systemtechnologie zusammenfassend dargelegt und das große Leistungspotenzial der Systemwissenschaft aufgezeigt. Der Leser wird zunächst mit den Systemgrundlagen vertraut gemacht. Zur Verdeutlichung des anwendungsübergreifenden Charakters dieser Wissenschaftsdisziplin wird nachfolgend ein Einblick in die Vielgestaltigkeit realer Systeme vermittelt. Eine detailliertere Darstellung finden kybernetische Systeme, deren herausragende Eigenschaften dynamisches Verhalten, Steuerbarkeit und Kommunikation sind. Dabei werden besonders die Automatisierungssysteme hervorgehoben, wobei ein Einblick in die funktionelle Vielfalt gegeben sowie das weit über technische Anwendungen hinaus reichende Anwendungspotenzial aufgezeigt wird.

Die Ausführungen befassen sich anschließend mit den theoretischen Grundlagen der Systemwissenschaft: der Systemtheorie. Dazu werden die wichtigsten Methoden der mathematischen bzw. algorithmischen Systembeschreibung angegeben und knapp erläutert. Danach gelangt man folgerichtig zu den Systemmodellen. Hier werden Ausführungen zu verschiedenen Modellaspekten gemacht und insbesondere auf die vorteilhafte Nutzung von Modellen zur Systemsimulation eingegangen. In diesem Zusammenhang wird auch auf die Einsatzmöglichkeiten der Simulationstechnologie zur Lösung unserer Zukunftsprobleme auf virtueller Ebene hingewiesen.

Der Blick richtete sich weiter auf die Systemtechnik, einem weiteren Bestandteil der Systemwissenschaft. Nach Erläuterung der Grundidee und der daraus folgenden Kompatibilitätsforderung wird anhand von Beispielen ein Einblick in die breite Palette vorteilhafter Anwendungsmöglichkeiten auf völlig unterschiedlichen, weit über die Technik hinausragenden Gebieten gegeben.

So kommt bei der abschließenden Zusammenstellung des Nutzens der Systemwissenschaft ein beträchtliches Konto zusammen. Damit erklärt sich auch, warum die Systemwissenschaft auf immer mehr Gebieten zur Leitdisziplin avanciert.

Der vorstehende Beitrag soll dazu dienen, den Systemgedanken in die Breite zu tragen und damit die Verbreitung neuer Ideen zu fördern. Dabei soll der Leser von manchmal noch vorhandenem Black-Box-Denken weggeführt und zu einem anwendungsübergreifenden **“Denken in Systemen“** geführt werden. Der Autor hofft, mit seinen Ausführungen verdeutlicht zu haben, dass die Systemwissenschaft echte Erfolgsrezepte auf mehreren Ebenen bietet. In diesem Sinn soll auch dazu angeregt werden, das erworbene Systemwissen in eigenen Projekten kreativ anzuwenden.

Literaturverzeichnis

- [1] Weller, W.: Die Systemtechnologie als innovatives Konzept. Copyright: Wolfgang Weller 2008; Herstellung und Verlag: Books on Demand GmbH; ISBN 9783837057485
- [2] Wiener, N.: Kybernetik. Regelung und Nachrichtenübertragung in Lebewesen und in der Maschine. Deutsche Ausgabe: Econ-Verlag Düsseldorf, Wien 1963
- [3] Weller, W.: Automatisierungstechnik im Überblick. Beuth Verlag GmbH 2008; ISBN 978-3-410-16760-0
- [4] Harbach, F., Janschek, K., Jumar, U., Reusing, G., Sommer, R., Spohr, G.-U., Zühlke, D. : Thesenpapier der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik 2008
- [5] Zander, H.- J.: Logischer Entwurf binärer Systeme. Verlag Technik Berlin 1989. ISBN 3-341-00526-9
- [6] König, R.; L. Quäck: Petri-Netze in der Steuerungs- und Digitaltechnik. R. Oldenbourg Verlag München Wien 1988. ISBN 3-486-20735-0
- [7] Zadeh, L. A.: Outline of a New Approach to the Analysis .of complex System and Decision Processes. IEEE Trans. on Systems Man., Cybern.Vol. SMC- 3, Nr. 1, pp. 28-44, 1973
- [8] Zadeh, L. A.: the Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning. Memorandum ERL-M411 Berkeley 1973
- [9] Baldwin, J. F.: A New Approach to Approximate Reasoning using a Fuzzy Logic. Fuzzy Sets and Systems 2, pp. 309-325 1979
- [10] *Kunihiko Kaneko*: Life: An Introduction to Complex Systems Biology. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, Wien
- [11] *Hyötyniemi, H.*: Neocybernetics in Biological Systems. Report Univ. Helsinki 2006.
- [12] [www.innovations-report.de/html/berichte/ . . .](http://www.innovations-report.de/html/berichte/)