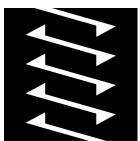


Arnim von Gleich | Stefan Gößling-Reisemann (Hrsg.)

Industrial Ecology

Erfolgreiche Wege zu nachhaltigen
industriellen Systemen

STUDIUM



VIEWEG+
TEUBNER

Bibliografische Information Der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

Dr. Arnim von Gleich, geb. 1949, ist Professor für das Lehrgebiet Technikgestaltung und Technologieentwicklung am Fachbereich Produktionstechnik der Universität Bremen. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen „Risiko und Vorsorge“ in der Technikgestaltung (v.a. chemische, biologische und Nanotechnologien) sowie im Bereich der „leitbildorientierten Technikgestaltung“ (Nachhaltige Chemie, Bionik, Industrial Ecology). Er ist Mitglied des Ausschusses für Gefahrstoffe beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Dr. Stefan Gößling-Reisemann studierte in Düsseldorf, Seattle und Hamburg Physik. Seine Promotion erhielt er an der Universität Hamburg. Er ist derzeit wissenschaftlicher Assistent an der Universität Bremen im Fachgebiet Technikgestaltung und Technologieentwicklung. Seine Forschungsinteressen gelten der Industrial Ecology im Allgemeinen und liegen im Speziellen auf dem Gebiet von Thermodynamik und Ressourcenverbrauch, Ökobilanzen, dynamischer Modellierung von Stoffströmen und der Bewertung von Recycling.

1. Auflage 2008

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2008

Lektorat: Harald Wollstadt

Der Vieweg+Teubner Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg
Druck und buchbinderische Verarbeitung: Strauss Offsetdruck, Mörlenbach
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.
Printed in Germany

ISBN 978-3-8351-0185-2

Danksagung

Dieses Buch basiert auf einer Ringvorlesung zum Thema Industrial Ecology an der Universität Bremen. Für das Zustandekommen der Vorlesung und dieses Buches sind wir vielen Beteiligten zu besonderem Dank verpflichtet. Unser Dank gilt zunächst unserem Team: Daniela Fricke, Ralf Isenmann, Maike Kastrup, Birgitt Lutz-Kunisch, Sebastian Rosskamp, Ole Schirrmeister, Marlies Timmermann und Tino Tuchel.

Darüber hinaus gilt unser ausdrücklicher Dank unseren Unterstützern und Sponsoren, ohne die weder die Vorlesungsreihe noch dieses Buch zustande gekommen wären: Universität Bremen, Bremer Energie-Konsens, Heinrich-Böll-Stiftung Bremen, Flexiti GmbH, Senator für Bau, Umwelt und Verkehr Bremen, artec Forschungszentrum Nachhaltigkeit, Hochschule Bremen, Hochschule Bremerhaven, VDI Landesverband Bremen, Wittheit zu Bremen und die International Society for Industrial Ecology.

Für die professionelle und sehr gelungene Übersetzung der englischen Beiträge bedanken wir uns ganz herzlich bei Cornelia Perthes. Für die wertvolle technische und redaktionelle Hilfe bedanken wir uns bei Sönke Stührmann.

Arnim von Gleich und Stefan Göbbling-Reisemann

Inhaltsverzeichnis

1	Industrial Ecology – Einleitung.....	9
	Stefan Gößling-Reisemann, Arnim von Gleich	
Grundlage der Nachhaltigkeit: Tragekapazitäten von Meer und Atmosphäre		
2	Tragekapazitäten	20
	Arnim von Gleich	
3	Meeresorganismen unter CO ₂ -Stress.....	26
	Hans-Otto Pörtner	
4	Die Atmosphäre als Schadstoffsенke - Einfluss auf Stoffkreisläufe und Klima.....	41
	Johann Feichter	
Partielle Lösungen und Praxisbeispiele der Industrial Ecology		
5	Partielle Lösungen für eine nachhaltige Entwicklung industrieller Systeme	60
	Birgitt Lutz-Kunisch	
6	Mit Biodiesel in die Zukunft	68
	Joosten Connemann	
7	Kraftstoffe der Zukunft	78
	Guido A. Reinhardt, Hinrich Helms	
8	Veredlungsprodukte aus ungenutzten Stoffströmen der Lebensmittelverarbeitung.....	88
	Gerd Klöck, Anja Noke	
9	Biomasse als Rohstoff der Zukunft	97
	Bernd Mahro, Volker Kasche	
10	Wie viel Schmierstoff ist nötig? – Effizienter Einsatz von Kühlschmierstoffen	110
	Ekkard Brinksmeier, Thomas Koch, André Walter	
11	Energie- und Ressourceneffizienz durch Ecodesign	119
	Mario Tobias, Reinhard Höhn, Siegfried Pongratz, Philipp Karch	
12	Wie schwer wiegt ein Bit?.....	129
	Siegfried Behrendt	
13	Voraussetzungen für eine erfolgreiche industrielle Symbiose.....	139
	Noel Brings Jacobsen	
Pfadwechsel verstehen, verantworten, managen und der Umgang mit Komplexität		
14	Pfadwechsel – schwierig aber notwendig.....	154
	Stefan Gößling-Reisemann	
15	Ökologische Nachhaltigkeit im textilen Massenmarkt.....	162
	Simone Back	

16	Symbole und Substanzen – Chancen und Grenzen der Steuerung von Stoffströmen	170
	Martin Müller, Uwe Schneidewind	
17	Das industrielle sozialökologische Regime und globale Transitionen	181
	Marina Fischer-Kowalski, Helga Weisz	
18	Wachstum ohne Umweltverbrauch? Entkopplung und Dematerialisierung.....	202
	Ester van der Voet, Laurant van Oers, Sander de Bruyn, Maartje Sevenster	
19	Zukünfte urbanen Lebens mit Altlasten, Bergwerken und Erfindungen	218
	Peter Baccini	
20	Plädoyer für den Systemwechsel	238
	Hermann Scheer	
21	Pflanzen als Grundlage einer solaren Chemie.....	248
	Hermann Fischer	
22	Von der Verschränktheit der Nachhaltigkeits-Dimensionen.....	264
	Stefan Gößling-Reisemann	
23	Management trotz Nichtwissen.....	271
	Michael F. Jischa	
24	Umgang mit Komplexität	284
	Dietrich Dörner	

Das Lernen von der Natur und die wissenschaftliche Einordnung und Dynamik der Industrial Ecology

25	Industrial Ecology auf dem Weg zur Wissenschaft der Nachhaltigkeit?.....	304
	Ralf Isenmann	
26	Ein Pragmatiker auf dem Weg zum Vorausschauenden Management	316
	Matthias Ruth	
27	Lernen vom Vorbild Natur: Naturverständnis in der Industrial Ecology	333
	Ralf Isenmann	
28	Kann Industrial Ecology die „Wissenschaft der Nachhaltigkeit“ werden?	348
	John R. Ehrenfeld	
29	Fair Future.....	360
	Wolfgang Sachs	
30	Ausblick.....	366
	Arnim von Gleich	

23 Management trotz Nichtwissen

Steuerung und Eigendynamik von komplexen Systemen

Michael F. Jischa

23.1 Die Ausgangslage

Es hat dem Schöpfer gefallen, unsere physische Welt so zu gestalten, dass sie durch ein System von *nichtlinearen* partiellen Differenzialgleichungen zweiter Ordnung beschrieben werden kann. Die Bilanzgleichungen für Masse, Impuls und Energie sind von dieser Art. Wir nennen sie Naturgesetze. Sie erlauben uns, die Veränderungen in unserer natürlichen Umwelt zu beschreiben. Dazu brauchen wir neben dem System von Differenzialgleichungen noch einige weitere Informationen, die das Material betreffen, das wir betrachten wollen. Denn ein Gletscher hat ein anderes Fließverhalten als ein Lavastrom, und ein Kormoran wird sich in der Luft anders fortbewegen als im Wasser. Nicht nur natürliche Systeme, auch technische Systeme unterliegen den gleichen Naturgesetzen. Das ist der Grund dafür, warum es so starke Analogien zwischen natürlichen und technischen Systemen gibt. So lässt sich etwa die Frage der Überfischung eines Gewässers mathematisch durch ein Gleichungssystem beschreiben, mit dem auch die Frage nach der Stabilität eines chemischen Reaktors behandelt werden kann (Jischa 2008).

Technische Systeme sind von Menschen gemacht. Das unterscheidet sie von natürlichen Systemen, in die wir durch unser Handeln zunehmend eingreifen. Neben den technischen Systemen haben wir politische, ökonomische und gesellschaftlichen Systeme entwickelt, wobei wir diese nahezu beliebig weiter ausdifferenzieren können. Wir sprechen von Bildungs-, Gesundheits- und Sozialsystemen, die es zu managen gilt. Auch derartige Systeme gehorchen gewissen Gesetzmäßigkeiten, die herauszufinden und zu beschreiben die zentrale Aufgabe der „anderen Kultur“ ist. Dies ist im Sinne der „Zwei Kulturen“ (Snow 1967) gemeint, der die Welt der Wissenschaftler in jene der Natur- und Ingenieurwissenschaftler und die der Geistes- und Gesellschaftswissenschaftler einteilt. Die großen Erfolge in den Natur- und Ingenieurwissenschaften durch die Mathematisierung, verbunden mit immer besseren und schnelleren mathematischen Auswertemethoden, haben die anderen Disziplinen stark beeinflusst. Auch Ökonomen, Politologen und Soziologen sprechen von „Gesetzen“, die jedoch von anderer Qualität sind als Naturgesetze.

Es ist offenkundig, dass letztere Systeme wesentlich schwieriger (wenn überhaupt) in Form von mathematischen Relationen zu beschreiben sind. Es ist hier nicht der Ort, darüber zu spekulieren, ob und in welcher Weise die Veränderungen ökonomischer und sozialer Zustandsgrößen durch Bilanzgleichungen (in Analogie zu den Naturgesetzen) beschrieben werden können. Aus meiner Sicht besteht jedoch kein Grund zu der Annahme, dass derartige „Gesetze“ prinzipiell anders aussehen sollten als die Bilanzgleichungen, die aus den Naturgesetzen folgen.

Wenn wir uns nun die Frage stellen, von welcher Art die Eigendynamik komplexer Systeme ist, und welche Probleme bei der Steuerung von komplexen Systemen auftreten (können), dann müssen wir uns dazu zunächst auf die Behandlung natürlicher und/oder technischer Systeme beschränken. Denn daran können wir sehr schön die grundsätzlichen Probleme studieren, die bei der Steuerung von komplexen Systemen jeglicher Art auftreten (können). Die Gründe dafür sind:

- Reale Systeme sind *nichtlinear*
- *Nichtlinearität* ist gleichbedeutend mit der Existenz von *Rückkopplungsmechanismen*. In nichtlinearen Gleichungssystemen werden Terme laufend mit sich selbst oder mit anderen gekoppelten Variablen verknüpft. Sie wirken auf sich selbst zurück und können einander aufschaukeln
- In nichtlinearen Systemen ist das Ganze stets mehr als die Summe seiner Teile. Während man bei linearen Differenzialgleichungen aus zwei bekannten Lösungen durch Überlagerung eine neue Lösung erhält (Prinzip der Superposition), gilt dies bei nichtlinearen Differenzialgleichungen nicht
- Reale Systeme können *chaotisch* reagieren. Dies hängt von den Parametern des Systems und von dessen Anfangs- und Randbedingungen ab

23.2 Die Erschütterung des Determinismus

Seit wann wissen wir um diese Probleme? Die erste Beschreibung des Phänomens *Nichtlinearität* ist von Galilei überliefert. Bedeutende Leistungen im Sinne unserer heutigen Mechanik, jener grundlegenden Disziplin zur Erklärung der Welt, sind von Galilei im Jahr 1638 in seinen berühmten „*Discorsi*“ niedergelegt worden. Seine Untersuchungen über die Tragfähigkeit eines Balkens sind die wohl älteste Formulierung eines nichtlinearen Zusammenhangs, dass nämlich die Festigkeit eines belasteten Balkens von seiner Breite linear, aber von seiner Höhe quadratisch abhängt, Abbildung 23.1.

Galilei hat seine Überlegungen in einer damals üblichen Dialogform dargestellt. Darin diskutieren Simplicio, ein Anhänger der Lehren des Aristoteles, Sagredo, ein fortschrittlich gesinnter und gebildeter Laie und Salviati, ein die Lehren Galileis verfechtender Wissenschaftler, miteinander. Galilei nahm an, dass der Balken beim Zerschneiden an der unteren Kante des eingemauerten Endes dreht und an allen Stellen des Querschnittes dem Zerreißen den gleichen Widerstand entgegensetzt. Die Resultierende der Widerstandskraft $\sigma \cdot b \cdot h$, wobei σ die Spannung, b die Breite und h die Höhe des Balkens darstellen, greift im Schwerpunkt des Querschnittes an der eingemauerten Stelle an. Das Momentengleichgewicht um die untere Kante liefert die dargestellte Beziehung. Dabei ist l die Länge des Balkens und F die senkrecht nach unten wirkende Kraft. Wir wissen heute, dass Galileis Annahme von den gleichen Spannungen in dem Querschnitt falsch ist. Sein Resultat jedoch, dass die Bruchfestigkeit der Breite und dem Quadrat der Höhe direkt und der Länge umgekehrt proportional ist, ist qualitativ richtig. Eine Verdopplung der Balkenbreite b wird demnach die Bruchfestigkeit verdoppeln, eine Verdopplung der Höhe h wird diese jedoch vervierfachen. Galilei lässt Sagredo in seinen *Discorsi* sagen: „Von der Wahrheit der Sache bin ich überzeugt ..., warum bei verhältnismäßiger Vergrößerung aller Teile nicht im selben Maße auch der Widerstand zunimmt“.

Zimmerleute haben aus Erfahrung die längere Kante eines Balkens stets senkrecht gelegt, um die Tragfähigkeit eines Balkens zu erhöhen.

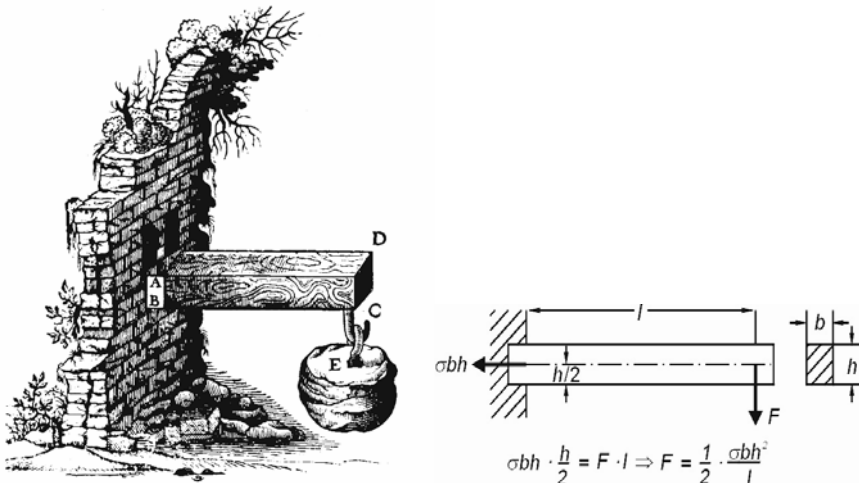


Abbildung 23.1 Balkentheorie nach Galilei, linkes Bild aus: Szabo, I. (1979) Geschichte der mechanischen Prinzipien. Basel: Birkhäuser

Ständig stoßen wir auf nichtlineare Zusammenhänge. Ein Mensch ist in der Lage, seine eigene Körpergröße zu überspringen. In dieser Beziehung übertrifft ihn jedoch der Floh bei weitem, während noch nicht beobachtet wurde, dass der sehr viel kräftigere Elefant einen Artgenossen zu überspringen vermag. Die Mechanik lehrt uns, warum man bei bloßer geometrischer Vergrößerung oder Verkleinerung keine gigantischen Mücken oder winzige Elefanten „konstruieren“ kann, oder warum Berge und Bäume nicht in den Himmel wachsen.

Poincaré (1854-1912) hat als erster den *Determinismus* in Frage gestellt und seine Zweifel überzeugend formuliert. Er tat dies am Beispiel der Himmelsmechanik, die ja gerade zu einem Triumph des Determinismus geführt hatte. Waren doch die Planeten Neptun und Pluto in unserem Sonnensystem erst vorausgerechnet und anschließend entdeckt worden. Der Grund für Poincarés Frage nach der Stabilität des Sonnensystems war folgender: Die Newtonschen Gleichungen lassen sich aus mathematischen Gründen nur für ein System aus zwei Körpern (Sonne und Erde *oder* Erde und Mond) exakt lösen. Bei Systemen mit drei Körpern (Sonne, Erde *und* Mond) ist man auf Näherungslösungen angewiesen. Der kleine zusätzliche Einfluss, den der Mond auf die exakte Zweikörper-Lösung für das System Sonne-Erde hat, musste schrittweise durch eine Reihe von Näherungen hinzugefügt werden. Denn die Hoffnung lautete, der exakten Lösung nach theoretisch unendlich, praktischen aber endlich vielen Korrekturen näher zu kommen.

Poincaré machte dabei die Erfahrung, dass das Näherungsverfahren für wenige Iterationen offenbar funktionierte. Er bemerkte jedoch auch, dass selbst bei winzigen Störungen einige Bahnen ein absolut unvorhersehbares Verhalten zeigen konnten. Mathematisch ist das Dreikörper-Problem nichtlinear. Eigenartigerweise sind die Untersuchungen von Poincaré zu-

nächst nicht weiterverfolgt worden. Erst als in den sechziger Jahren die Chaosforschung begann, wurde auf seine Untersuchungen zurückgegriffen.

Es ist schon eine Ironie, dass erst der Computer das Chaos erforschbar machte. Wo doch der Computer der Inbegriff des Determinismus ist. Er trifft nach vorgegebenen Befehlen scharfe Entscheidungen mit hoher Genauigkeit und unvorstellbarer Geschwindigkeit. Erst numerische Rechnungen mit dem Computer haben die Brisanz der Aussage „winzige Ursachen können katastrophale Wirkungen haben“ verdeutlicht. So wurde Poincaré wieder entdeckt.

Der Meteorologe Lorenz stieß 1963 erstmals auf praktische Konsequenzen dieser Erkenntnis. Und das war, wie so oft in der Wissenschaft, eher das Ergebnis eines Zufalls. Lorenz beschäftigte sich mit mathematischen Modellen zur Wettervorhersage. Seine stark vereinfachten Modellgleichungen bestanden aus einem System von drei gewöhnlichen, nichtlinearen, gekoppelten Differenzialgleichung erster Ordnung zur Beschreibung der durch Temperaturunterschiede hervorgerufenen Konvektionsbewegung der Atmosphäre. Das Gleichungssystem lässt sich nicht analytisch lösen. Man muss auf in der Mathematik geläufige Näherungsverfahren zurückgreifen. Zur Lösung benötigt man Anfangswerte. Erhalten wir diese Startwerte aus dem Experiment, was der Normalfall ist, so sind sie naturgemäß von beschränkter Genauigkeit. Für die Auswahl der Kleidung mögen ungenaue Angaben über die Temperatur ausreichen, doch als Startwert für eine Wettervorhersage sind sie zu grob.

Wir erkennen hier das prinzipielle Problem. Kein Experiment kann uns die Startwerte exakt liefern. Aber warum müssen diese überhaupt exakt sein? Ist es nicht denkbar, dass ein leicht ungenauer Startwert auf das Ergebnis der Modellrechnung einen vernachlässigbaren oder gar keinen Einfluss hat? Das ist in der Tat häufig der Fall, wenn in einem Modell negative Rückkopplungen dominieren. Es sind die positiven Rückkopplungen, die in vielen Modellen enthalten sind, welche aus ungenau bekannten Startwerten unsinnige Ergebnisse machen *können*.

Lorenz hatte nun, um unangenehm lange Rechenzeiten zu vermeiden, Zwischenergebnisse eines früheren Ausdrucks erneut als Startwerte in das Programm eingegeben. Über einen gewissen Zeitraum stimmten die neu errechneten Werte mit jenen der alten Rechnung überein. Doch nach einer gewissen Zeit war jede Ähnlichkeit mit dem vorherigen Resultat verschwunden. Das Modell entwickelte sich in dramatischer Weise anders. Die Ursache wurde rasch klar. Der Computer druckte weniger Stellen hinter dem Komma aus, während er intern mit mehr Stellen hinter dem Komma rechnete. Die von Lorenz eingegebenen Startwerte der Kontrollrechnung wiesen somit kleine Fehler auf. Diese winzigen Abweichungen in den Startwerten konnte das Klimamodell nicht verkraften. Damit waren alle Hoffnungen auf eine langfristige Wettervorhersage geplatzt, denn meteorologische Messdaten sind zwangsläufig ungenau. Lorenz erkannte als erster, dass man mit einem Computermodell durch Iterationen Chaos erzeugen kann. Er hat dafür den anschaulichen Begriff „Schmetterlingseffekt“ geprägt. Der Flügelschlag eines Schmetterlings *kann* irgendwo einen Wirbelsturm auslösen.

Lineare Systeme sind robust, sie verzeihen Ungenauigkeiten in den Anfangsbedingungen. Nichtlineare Systeme *können* dagegen außerordentlich sensibel auf winzige Abweichungen in den Anfangswerten reagieren. Mitte der siebziger Jahre ist dafür der Begriff *deterministisches Chaos* geprägt worden. Er verbindet die nur scheinbar widersprüchlichen Begriffe *deterministisch* (= vorbestimmt) und *Chaos* (= Unordnung) miteinander.

Das Nebeneinander von Chaos und Ordnung ist zu einem wahrhaft interdisziplinären Forschungsgegenstand ersten Ranges geworden. Es hat nicht nur Mathematiker, Naturwissen-

schaftler und Ingenieure in ihren Bann gezogen. Auch Gesellschafts- und Wirtschaftswissenschaftler befassen sich mit dem Chaos. Wirtschafts- und Börsenkrisen sowie das Zusammenbrechen von Kulturen und Herrschaftssystemen lassen sich oft auf kleine Ursachen zurückführen. Es wird zukünftigen Untersuchungen vorbehalten bleiben, das Auseinanderfallen des vorher scheinbar stabilen Ostblocks auf Rückkopplungsmechanismen zurückzuführen.

Halten wir als Fazit fest: Es kann immer dann zu einer Katastrophe, einer chaotischen Erscheinung kommen, wenn positive Rückkopplungen in einem nichtlinearen dynamischen System vorhanden sind, dessen Anfangswerte (zwangsläufig!) nicht absolut genau sein können. Und das ist in vielen Fällen die Realität der uns umgebenden Welt, unabhängig davon, welche Art von Systemen wir betrachten.

23.3 Deterministisches Chaos beispielhaft

Das zuvor Gesagte soll an einem einfachen mechanischen System erläutert werden. Denn nichts ist anschaulicher als eine bildhafte Darstellung. Als Beispiel wählen wir zwei (unge-dämpfte) Pendel, Abbildung 23.2.

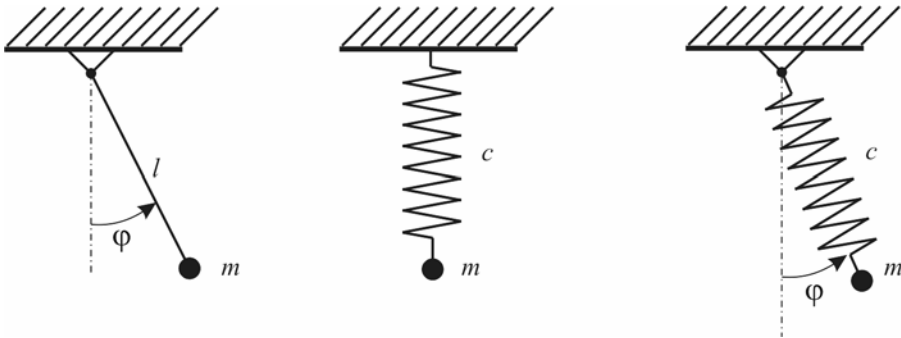


Abbildung 23.2 Punktpendel, Feder-Masse-Pendel, ebenes elastisches Pendel

Betrachten wir zunächst das Punktpendel, auch mathematisches Pendel genannt. Mithilfe des Drallsatzes oder des Energiesatzes kann die Schwingungsgleichung zur Bestimmung der Auslenkung φ als Funktion in der Zeit t ermittelt werden; sie lautet (für kleine Auslenkungen):

$$\ddot{\varphi} + \omega^2 \varphi = 0 \quad \text{mit} \quad \omega^2 = \frac{g}{l}$$

Die Schwingungsgleichung für das Feder-Masse-Pendel zur Bestimmung der vertikalen Auslenkung x als Funktion der Zeit t folgt aus dem Impulssatz:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0 \quad \text{mit} \quad \omega^2 = \frac{c}{m}$$

Dabei wird ω Kreisfrequenz des schwingenden Systems genannt. Darin sind die relevanten Parameter des jeweiligen Systems zusammengefasst. Das sind die Erdbeschleunigung g und

die Pendellänge l bei dem Punktpendel sowie die Federkonstante c und die Masse m bei dem Feder-Masse-Pendel. Beide Schwingungsgleichungen haben die gleiche Form. Dabei handelt es sich um eine lineare gewöhnliche Differenzialgleichung zweiter Ordnung, die analytisch gelöst werden kann. Sie führt auf eine periodische Sinus-Schwingung, wobei die Periodendauer einer Schwingung und deren Amplitude in eindeutiger Weise von der Kreisfrequenz abhängen.

Wenn wir die starre Stange des Punktpendels durch eine Feder ersetzen, dann erhalten wir das ebenfalls in Abbildung 23.2 dargestellte ebene elastische Pendel. Dieses besitzt nun zwei Freiheitsgrade im Gegensatz zu den beiden einfachen Pendeln mit jeweils einem Freiheitsgrad. Durch Anwendung des Impulssatzes in der horizontalen (x -) Richtung sowie der vertikalen (y -) Richtung kommen wir zu den folgenden Bewegungsgleichungen, die die Schwingungen dieses Pendels beschreiben:

$$\ddot{x} = \frac{c}{m} x \frac{\sqrt{x^2 + y^2} - l_0}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad ; \quad \ddot{y} = \frac{c}{m} y \frac{\sqrt{x^2 + y^2} - l_0}{\sqrt{x^2 + y^2}} + g$$

Wir erhalten nunmehr zwei gewöhnliche Differenzialgleichungen zweiter Ordnung, die *nichtlinear* sind. Der physikalische Grund für die *Nichtlinearitäten* liegt darin, dass die Pendellänge von der momentanen Federlänge abhängt. Das Gleichungssystem erlaubt keine analytische Lösung, es muss numerisch integriert werden. Dafür stehen Standardverfahren wie das Runge-Kutta-Verfahren zur Verfügung. Bei vorgegebenen Systemparametern m (Masse), c (Federkonstante) und l_0 (Ruhelänge der unbelasteten Feder) sowie der bekannten Erdbeschleunigung g hängen die Lösungen des Systems der beiden Differenzialgleichungen *nur* von den Anfangsbedingungen ab. Dabei können wir sowohl die Anfangsauslenkung (x_0 und y_0) sowie die Anfangsgeschwindigkeit variieren. Bei den in Abbildung 23.3 gezeigten Resultaten einer exemplarischen numerischen Simulation ist die Anfangsgeschwindigkeit zu Null angenommen worden, variiert wurde nur die Anfangsauslenkung.

Abbildung 23.3 zeigt drei verschiedene Fälle, die sich je nach Wahl der Anfangsbedingungen einstellen können. Es gibt Anfangswerte, die zu *periodischen* Bahnkurven (I) führen. Das Pendel läuft in der numerischen Simulation immer entlang der gleichen Lösungskurven. Von einer periodischen Bahn ausgehend findet man durch eine geringfügige Veränderung der Anfangswerte einen zweiten Bahntyp, die *quasiperiodischen* Bahnkurven (II). Bei weiterer Veränderung der Anfangswerte stellen sich *chaotische* Bahnkurven (III) ein. Selbst bei diesem einfachen mechanischen Modell mit nur zwei Freiheitsgraden können wir nicht *vorab* (d. h. *vor* einer numerischen Integration) entscheiden, welche der drei Bahnkurven sich einstellen wird.

In der Literatur finden wir zahlreiche Beispiele für dynamische, natürliche und technische Systeme, die aufgrund ihrer innewohnenden Nichtlinearitäten chaotisches Verhalten aufweisen können. Dabei liegt die Betonung auf *können*. Denn es hängt von den Parametern der Systeme und von deren Anfangsbedingungen ab, ob sie chaotisches Verhalten aufweisen oder nicht. Verallgemeinernd können wir sagen, dass kleine Veränderungen (entsprechend den Anfangsauslenkungen in dem besprochenen Beispiel) zu periodischen Lösungen führen. Wir können jedoch nicht vorab entscheiden, bei welchen „Anfangsauslenkungen“ sich keine periodischen Lösungen mehr einstellen, wann also das Chaos beginnt. Dazu brauchen wir eine numerische Simulation, sofern das betrachtete System eine mathematische Modellierung und damit eine Simulation zulässt. Untersuchen wir Systeme außerhalb der Natur und Technik,

also ökonomische, soziokulturelle oder politische Systeme, so kann nur das reale Experiment Aussagen machen (mit teilweise entsprechend katastrophalen und irreversiblen Folgen).

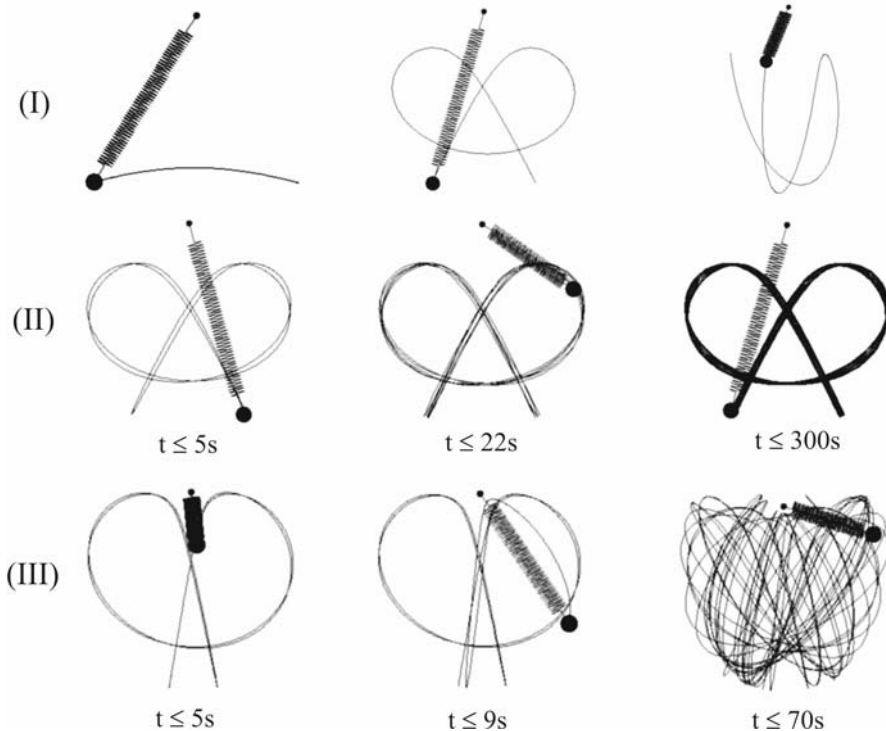


Abbildung 23.3 Mögliche Lösungskurven für das ebene elastische Pendel

Bevor ich auf Handlungsempfehlungen beim Umgang mit komplexen Systemen eingehe, möchte ich Gründe für unser offenkundiges Versagen anführen. *Ein* Grund liegt schlicht darin, dass wir gedanklich zumeist linearisieren. Das Verhängnisvolle ist, dass Linearisierungen komplexe Probleme nicht nur drastisch vereinfachen, sondern auch oft sehr erfolgreich sind!

23.4 Gründe für unser Versagen beim Umgang mit Komplexität

Beginnen möchte ich mit einer kleinen Rechenaufgabe. Stellen Sie sich bitte ein Blatt Papier von der Stärke 0,1 mm vor, das Sie fünfzig-mal falten würden. Das wird Ihnen aus praktischen Gründen schwerlich gelingen. Aber wie hoch schätzen Sie den Stapel ein, den Sie auf diese Weise erzeugen? Die Lösung lautet: Der Papierstapel entspricht dem 10.000 fachen des Erddurchmessers (Jischa 2005). Ähnlich verblüffend ist das indische Schachbrettmärchen. Oder die Frage, wie hoch der Betrag heute sein würde, wenn ein Vorfahre von Ihnen am Ende des dreißigjährigen Krieges eine bestimmte Summe Geldes für Sie angelegt hätte. Sicher eine theoretische Frage, aber das Ergebnis wäre dennoch überraschend.

Warum haben wir kein Empfinden, keinen Sensor für die katastrophale Dynamik des exponentiellen (oder gar des hyperbolischen) Wachstums? Weil wir es in der Natur und in unserem täglichen Leben meist mit kleinen Wachstumsraten, wie etwa eine niedrige Verzinsung zu tun haben, und weil wir letztlich immer in kurzen Zeiträumen denken. Dazu wollen wir uns den Fall des exponentiellen Wachstums für zwei unterschiedliche Zeiträume ansehen und insbesondere die oft bedenkenlos durchgeführte lineare Fortschreibung beleuchten, Abbildung 23.4 (Jischa 2004, 2005).

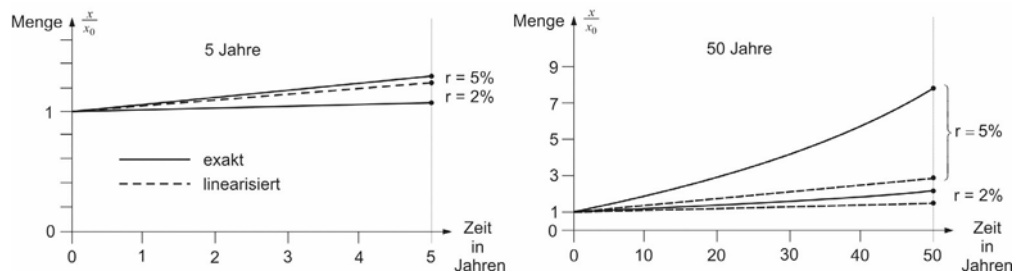


Abbildung 23.4 Zeiteinfluss bei exponentiellem Wachstum. Die Funktion $x/x_0 = \exp(r \cdot t)$ lässt sich in eine Reihe entwickeln: $x/x_0 = 1 + r \cdot t/1! + (r \cdot t)^2/2! + (r \cdot t)^3/3! + \dots$, wobei z. B. $3! = 1 \cdot 2 \cdot 3$ bedeutet. Brechen wir die Reihentwicklung nach dem linearen Ausdruck ab, so erhalten wir die linearisierte Aussage $x/x_0 = 1 + r \cdot t$. Die beiden Darstellungen zeigen den Verlauf der Exponentialfunktion verglichen mit der linearisierten Form für zwei Wachstumsraten ($r = 2\%$ und 5%) sowie zwei Zeiträume (5 und 50 Jahre). Abweichungen zwischen den beiden Wachstumsverläufen werden erst später sichtbar.

Wir erkennen daran, dass bei kleinen Zeiträumen und kleinen Wachstumsraten durchaus linear extrapoliert werden darf. Mit zunehmenden Zeiträumen und auch mit zunehmenden Wachstumsraten werden die Abweichungen zwischen dem tatsächlichen und dem linearisierten Verlauf aber immer größer.

Der *zweite* Grund für unser Versagen beim Umgang mit Komplexität liegt darin, dass wir meist in Wirkungsketten und nicht in Wirkungsnetzen denken. An dieser Stelle möchte ich auf zwei „Altmeister“ zurückgreifen, auf den 2003 verstorbenen Biologen Frederic Vester und den Psychologen Dietrich Dörner. Auf Vester gehe ich ausführlicher ein, da Dörner in diesem Band selbst zu Wort kommt. Auf die typische Journalistenfrage, wie beide ihr Wirken in einem Satz zusammenfassen würden, hätten sie vermutlich folgende Antwort gegeben: Wir kämpfen ständig gegen das monokausale, lineare Denken, das allzu dominant ist. Beide messen Simulationsspielen einen hohen Stellenwert in der didaktischen Vermittlung von Komplexität zu, und beide haben eigene Simulationsspiele entwickelt.

Zu Vester sei auf sein letztes Buch „Die Kunst vernetzt zu denken“ (Vester 1999) verwiesen, in dem seine Veröffentlichungen, seine Ausstellungen und seine Spiele aufgeführt sind. Das von ihm entwickelte Spiel Ökopolopoly ist als Brettspiel und als Simulationsspiel in einer PC-Version erschienen, die in einer späteren Fassung Ecopolopoly genannt wurde. Damit können in spielerischer Weise nichtlineare, gekoppelte Zusammenhänge zwischen den Variablen eines Systems in einem überschaubaren Wirkungsgefüge „erfahren“ werden. Dieses Spiel ist aus dem Thema Ökologie in Ballungsräumen entstanden, daher sind die (acht) gewählten Sys-

telemente, die Variablen, nach den dort herrschenden Lebensbereichen benannt. Dabei werden die Verknüpfungen zwischen den Variablen über Tabellenfunktionen (die von den Spielern verändert werden können) bereitgestellt. Diese Verknüpfungen sollen die realen Wirkungsverläufe möglichst gut wiedergeben, und sie sollen derart miteinander vernetzt sein, dass sich genügend Rückkopplungen und Zeitverzögerungen ergeben. Einige der Variablen sind mit sich selbst rückgekoppelt. Dies sei am Beispiel der Produktion erläutert. Eine Zunahme der Produktion wird zunächst eine weitere Zunahme der Produktion stimulieren. Zu hohe Produktion führt jedoch zu Überkapazitäten und Absatzproblemen, die Produktion wird einbrechen. Das Spiel erlaubt Eingriffsmöglichkeiten der Akteure über Aktionspunkte wie politisches Kapital, Handlungsspielraum und Entscheidungspotenzial. Sie bedeuten Einfluss und Vertrauen, Geld, Arbeit, Energie, Rohstoffe und gesicherte Nahrungsversorgung. Nicht vergebene Aktionspunkte werden auf die nächste Runde des Spiels (das nächste Haushaltsjahr) übertragen. Schulden können nicht gemacht werden, der Akteur muss mit den vorhandenen Aktionspunkten auskommen. Die Kunst des „Regierens“ besteht darin, diese Aktionspunkte weise zu verteilen. Ziel des Spiels ist es, eine gewisse Stabilität im Verhältnis der Systemteile zueinander zu erzeugen, ein Gleichgewicht herzustellen.

Was aus dem Simulationsspiel gelernt werden kann, sei in Anlehnung an Vester zusammengefasst: Kein Eingriff in ein vernetztes System bleibt ohne Folgen. In vielen Fällen wirkt ein Eingriff an einer Stelle mit Verzögerungen in teilweise überraschender Weise wieder auf diese Stelle zurück. Dadurch können sich zunächst positiv erscheinende Änderungen über entsprechende Zwischenglieder ins Gegenteil verkehren. Durch nichtlineare Wechselwirkungen können sich Prozesse derart beschleunigen, dass sie nicht mehr zu kompensieren sind (Bevölkerungswachstum, Umweltbelastung). Vorbeugende Maßnahmen ziehen zwar zunächst einen Teil des begrenzten Aktionskapitals ab, bringen jedoch, je früher man damit anfängt, umso größeren Profit beim Durchlaufen des Regelkreises. Als besonders kritisch erweisen sich Stellen mit positiver Rückkopplung, deren Kontrolle auch den stärksten Einsatz rechtfertigt. Eine Berücksichtigung großer Zeiträume und vorbeugendes Denken erspart kostspielige Gegensteuerungen (und Übersteuerungen) des Systems. Es ist effizienter und führt schneller zum Ziel als jedes isolierte Behandeln inzwischen eingetretener Symptome. Einen Nachteil lediglich als einen solchen zu korrigieren, führt ebenso wenig zu einem Gleichgewichtszustand wie das ständige Wiederholen zunächst richtiger Entscheidungen. Nur unter einer klugen dynamischen Folge sich wandelnder Entscheidungen entwickelt sich ein System zur stabilen Selbstregulation.

Als Ergänzung dazu seien Arbeiten von Dörner erwähnt, hier nenne ich den mehrfach aufgelegten Klassiker „Die Logik des Misslingens - Strategisches Denken in komplexen Situationen“ (Dörner 1989). Seine Erfahrungen mit Laien und Experten zeigen, dass beim Erfassen und Planen komplexer Systeme stets die gleichen schwerwiegenden Fehler gemacht werden. Es wird in eindimensionalen Wirkungsketten und nicht in Wirkungsnetzen gedacht. Und es werden zeitliche Abläufe, die Dynamik von Wirkungsgefügen, vernachlässigt.

Nunmehr kommen wir zu dem eigentlichen Anliegen dieses Beitrages, dem Management trotz Nichtwissen. Rezepte wird es hier nicht geben können, das sollte nach den vorangegangenen Ausführungen klar sein. Es kann nur darum gehen, Respekt vor komplexen Systemen zu erzeugen und vor Fehlern zu warnen, die insbesondere durch allzu rasches und forsches Eingreifen in bestehende Systeme hervorgerufen werden. Es geht um Reflexionen statt Rezepte. In einschlägigen Büchern findet man zahlreiche Beispiele für missglückte Eingriffe in komplexe Systeme mit katastrophalen Folgen. Hier sei ein Beispiel genannt, das ich während

des Schreibens dieses Artikels in der FAZ vom 27.07.06 las: „Gentechnik in Reinkultur“, mit dem Untertitel „In China beklagt man Ertragseinbußen bei Baumwolle“. Daraus sei in Auszügen wörtlich zitiert:

„Chinesische Landwirte haben in der jüngsten Zeit erhebliche Einbußen beim Anbau insektenresistenter Baumwolle zu verzeichnen. Diese widersteht durch einen gentechnischen Eingriff dem wichtigsten Baumwollschädling, der Baumwollkapselraupe. Die Baumwolle bildet in ihren Blättern ein Gift ..., an dem die Raupen nach dem Fressen zugrunde gehen. China war eines der weltweit ersten Länder, das die neue Baumwollsorte großflächig anbaute. In den ersten Jahren erzielten die Bauern einen um 36 % höheren Gewinn als ihre Kollegen mit dem Anbau konventioneller Baumwolle. Doch ... begann der Gewinn nach drei Jahren zurückzugehen und liegt inzwischen unter dem der Bauern mit konventionellem Anbau. Die Ursache liegt in nachrückenden Schädlingen, gegen die das Bakterientoxin nicht wirkt. Um diese zu bekämpfen, mussten die Landwirte bis zu 20mal Pestizide spritzen, was ihre Gewinnmarge erheblich schmälerte.“

23.5 Management trotz Nichtwissen

Stellen wir uns das Unbekannte als einen riesigen Ozean vor und unser Wissen als kleine Inseln in diesem Ozean. Mit zunehmendem Wissen werden unsere Wissensinseln größer, aber gleichzeitig wachsen die Küstenlinien und damit die Grenzlinien zu dem Unbekannten. Es ist ein Paradoxon der Wissensgesellschaft, dass mit dem verfügbaren Wissen gleichzeitig auch das Nichtwissen zunimmt. Von daher ist die häufig verwendete Bezeichnung Wissensmanagement eigentlich irreführend. Denn bei Entscheidungsprozessen in Wirtschaft und Politik geht es nicht nur darum, das vorhandene Wissen zu managen, sondern mit Nichtwissen umzugehen und dieses Nichtwissen in Entscheidungsprozesse einzubauen. „Handeln trotz Nichtwissen“ (Böschchen u. a. 2004) lautet die Herausforderung, es geht um das „Management komplexer Systeme“ (Ludwig 2001). In komplexen Systemen gibt es zwischen Wissen und Nichtwissen viele Schattierungen. Es gibt unscharfes und es gibt unsicheres Wissen, was nicht dasselbe ist. Nichtwissen kann bedeuten, dass wir es heute noch nicht wissen, oder dass wir es niemals wissen werden.

Unser Entscheiden reicht weiter als unser Erkennen. Dieser Satz ist über 200 Jahre alt, er stammt von Kant, und er ist ein schönes Plädoyer dafür, die Disziplin Technikbewertung in Lehre und Forschung auf breiter Front einzuführen. Kant hat einen weiteren Satz geprägt, der an dieser Stelle ebenfalls wunderbar passt: Die Notwendigkeit zu entscheiden ist stets größer als das Maß der Erkenntnis. Anders formuliert: Wie müssen wir mit Nichtwissen in Entscheidungsprozessen umgehen? Die Situation wird durch die unglaubliche Dynamik des technischen Wandels zusätzlich verschärft. Hierzu greife ich auf plastische Formulierungen zweier Philosophen zurück.

Wir leben in einer Zeit der „Gegenwartsschrumpfung“ (Lübbe 1994). Denn wenn wir Gegenwart als die Zeitdauer konstanter Lebens- und Arbeitsverhältnisse definieren, dann nimmt der Aufenthalt in der Gegenwart ständig ab. Als eine Folge der unglaublichen Dynamik des technischen Wandels rückt die unbekannte Zukunft ständig näher an die Gegenwart heran. Gleichzeitig wächst in der Gesellschaft die Sehnsucht nach dem Dauerhaften, dem Beständigen. Der Handel mit Antiquitäten, Oldtimern und Repliken blüht, weil sie das Dauerhafte symbolisieren.

Zugleich gilt eine für Entscheidungsträger ernüchternde Erkenntnis, die wir kurz das „Popper-Theorem“ nennen wollen (Popper 1987). Es lautet etwa folgendermaßen: Wir können immer mehr wissen und wir wissen auch immer mehr. Aber eines werden wir niemals wissen, nämlich was wir morgen wissen werden, denn sonst wüssten wir es bereits heute. Das bedeutet, dass wir zugleich immer klüger und immer blinder werden. Mit fortschreitender Entwicklung der modernen Gesellschaft nimmt die Prognostizierbarkeit ihrer Entwicklung ständig ab. Niemals zuvor in der Geschichte gab es eine Zeit, in der die Gesellschaft so wenig über ihre nahe Zukunft gewusst hat wie heute. Gleichzeitig wächst die Zahl der Innovationen ständig, die unsere Lebenssituation strukturell und meist irreversibel verändert.

Der Umgang mit Komplexität ist *die* zentrale Herausforderung unserer Zeit. Dafür sind wir schlecht gewappnet, denn unsere Ausbildungsgänge an den Hochschulen sind nach wie vor reduktionistisch ausgerichtet. Der Reduktionismus ist eben so erfolgreich (gewesen!). Der Umgang mit Komplexität verlangt mehr. Wir brauchen ein „Denken der Zukunft: Lernen, in Beziehungen zu denken. Unterscheidungsvermögen und Anschlussfähigkeit ausbilden“ (Mutius 2000, S. 258). Darauf beziehe ich mich bei meinen abschließenden Bemerkungen.

Von Mutius plädiert für eine neue Denkkultur. Denn die Wirklichkeit entzieht sich unseren einfachen Vorstellungen. Unsere gedankliche Ausrüstung ist antiquiert. Wir müssen lernen, in Beziehungen zu denken. Wir müssen dem „Dazwischen“ mehr Beachtung schenken. Anschlussfähigkeit ist gefordert, um problemadäquat reagieren zu können. Er zitiert den ethischen bzw. „kybernetischen“ Imperativ, den von Foerster formuliert hat: „Handle stets so, dass die Zahl der Wahlmöglichkeiten wächst!“ Unser Handeln muß darauf ausgerichtet sein, Suchräume zu erweitern und nicht zu verengen, die Optionenvielfalt zu erhöhen und nicht einzuschränken.

Wir haben in der Wissenschaft das Zerlegen, Teilen und Auseinanderdividieren perfektioniert. Der Reduktionismus hat uns sehr weit gebracht, er hat jedoch einen wesentlichen Tatbestand verschüttet: Es geht primär um Systeme, deren Verhalten, Fragen nach deren Stabilität und Beeinflussbarkeit. Zweifellos bedarf die Analyse komplexer Systeme Kenntnisse über die einzelnen Bestandteile des Systems. Um eine chemische Anlage konzipieren und steuern zu können, müssen die einzelnen Komponenten und Verfahrensschritte beherrscht werden. Aber entscheidend ist das systemische Wissen, das kaum gelehrt wird. Erst in jüngerer Zeit taucht der Begriff „System“ nach und nach in Studiengängen, in Vorlesungen, in Institutsbezeichnungen oder in Stellenbeschreibungen auf.

Da ich den geschilderten Missstand seit langem beklage, habe ich an der TU Clausthal ab 1991/92 im Rahmen des Studium Generale Vorlesungen systemischer Art angeboten. Zunächst die Vorlesung „Herausforderung Zukunft“, die kurz darauf als Buch erschien (Jischa 1993), das zwischenzeitlich neu aufgelegt wurde (Jischa 2005). Alsdann die Vorlesung „Technikbewertung“ (gemeinsam konzipiert und gehalten mit B. Ludwig) sowie die Vorlesung „Dynamische Systeme in Natur, Technik und Gesellschaft“. Letztere dient als Basis für ein in Arbeit befindliches Buch (Jischa 2008). Diese drei Vorlesungen sind (teilweise schon vor meiner Emeritierung 2002) von ehemaligen Mitarbeitern übernommen worden. Dies sind in der Reihenfolge der Vorlesungen Christian Berg, Ildiko Tulbure sowie Björn Ludwig.

Eines sollte klar sein. Die *durch* Technik erzeugten Probleme können nur *mit* Technik gelöst werden, nicht etwa ohne oder gegen die Technik. Die Technik ist die Antwort, aber wie lautet die Frage? Wir brauchen Ingenieure mit mehr Weitblick. In unseren Ausbildungsgängen herrscht nach wie vor ein eklatanter Mangel an Fächern, die systemisches Denken vermitteln.

Nachdenken über die sozialen und ökologischen Folgen unseres Handelns findet bei Ingenieuren kaum statt, es sei denn in Vorlesungen wie Technikbewertung oder Technikgestaltung. Bedauerlicherweise gibt es meines Wissens nur eine planmäßige Professur in den Ingenieurwissenschaften einer deutschen Universität, die diesen Themen gewidmet ist, jene von A. von Gleich an der Universität Bremen, dem Initiator der Vortragsreihe und Mitherausgeber dieses Bandes. Öffentliche Diskussionen über Akzeptanz und Folgen von Technik laufen zumeist ohne Ingenieure ab. Diese Abstinenz ist hausgemacht. Es ist seit langem mein Anliegen, dem entgegenzuwirken *und* junge Leute (wieder!) für Technik zu begeistern. Mit einer „mission to the moon“ hatte J. F. Kennedy seinerzeit eine gewaltige Technikeuphorie entfacht. Warum sollte uns das mit einer „mission to the earth“ nicht wieder gelingen?

Der Untertitel dieses Buches formuliert eine Idealvorstellung. Auch wenn diese nicht erreichbar ist, so ist sie als Leitbild unverzichtbar. In der Praxis sollten wir jedoch die Fragestellung umkehren. Es muss darum gehen, Verfahren, Prozesse, Produkte, Verhaltensweisen und Maßnahmen zu identifizieren und zu vermeiden, die in besonderer Weise *nicht* nachhaltig sind. Dazu müssen Korridore identifiziert werden, die wir nicht verlassen dürfen. In der Sprache der Mathematik geht es um obere und untere Schranken für unser Handeln. Dazu brauchen wir ein tiefes Verständnis über das Verhalten komplexer Systeme.

Abschließendes Fazit: Einfache Rezepte beim Umgang mit Komplexität wird es nicht geben. Die wahrnehmbare Welt ist nun einmal von Nichtlinearitäten geprägt und neigt daher zu Überraschungen. Darüber sollten wir alles andere als unglücklich sein. Denn in einer linearen Welt wäre alles vorhersagbar, wir würden die Zukunft vorausberechnen können. Das wäre nicht nur langweilig, sondern auch überaus erschreckend! Wenn wir schon keine Rezepte angeben können, dann zumindest Empfehlungen. Da jedes System charakteristische Totzeiten besitzt, die wir in der Regel nur ungenau kennen, und die stark unterschiedlich sein können (so reagiert die Luft sehr viel rascher als das Wasser, und das Wasser deutlich rascher als das Eis, was bei der Klimamodellierung zu beachten ist), so lautet eine erste Empfehlung, bei äußeren Eingriffen in ein komplexes System zunächst einige Zeit (wie lange?) abzuwarten, bevor ein neuer Eingriff vorgenommen wird. Eine zweite Empfehlung wäre, kleine Eingriffe vorzunehmen. Dem Autor ist klar, dass derartige Empfehlungen häufig nicht weiterhelfen. In Wirtschaft und Politik ist der (reale oder vermeintliche) Entscheidungsdruck zumeist hoch, während die Sachlage (das System!) ungewiss und die Fakten unsicher sind, die Entscheidung jedoch dringlich ist.

23.6 Literatur

Bösch, S.; Schneider, M.; Lerf, A. (2004): *Handeln trotz Nichtwissen*. Frankfurt am Main: Campus (Hrsg.)

Dörner, D. (1989): *Die Logik des Misslingens*. Reinbek: Rowohlt

Jischa, M. F. (1993): *Herausforderung Zukunft, Technischer Fortschritt und ökologische Perspektiven*. Heidelberg: Spektrum Akad. Verlag

Jischa, M. F. (2004): *Ingenieurwissenschaften*. Reihe *Studium der Umweltwissenschaften*. Berlin: Springer

Jischa, M. F. (2005): *Herausforderung Zukunft, Technischer Fortschritt und Globalisierung*. München: Elsevier/Spektrum Akad. Verlag

Jischa, M. F. (erscheint 2008): *Dynamik in Natur und Technik*.

Ludwig, B. (2001): *Management komplexer Systeme*. Berlin: Edition Sigma (Habilitationsschrift TU Clausthal 2000)

Lübbe, H. (1994): *Im Zug der Zeit*. Berlin: Springer

Mutius, B. von (2000): *Die Verwandlung der Welt*. Stuttgart: Klett-Cotta

Popper, K. (1987): *Das Elend des Historizismus*. Tübingen: Mohr

Snow, C. P. (1967): *Die zwei Kulturen*. Stuttgart: Ernst Klett

Vester, F. (1999): *Die Kunst vernetzt zu denken*. Stuttgart: DVA