

Vom Determinismus bis zum Chaos - wie berechenbar sind komplexe Systeme?

Für Bürger von Heute und Morgen: Elemente eines zukunftstauglichen Welt- und Menschenbildes **13**

Kurzbericht der Vorlesung vom 21.3.03 von Bertram Köhler

Einleitung - Thesen

- Die immer rascheren Veränderungen unserer Lebenswelt überfordern unsere meist auf statischem Denken beruhenden Konzepte. Wir denken in der Regel quasistatisch und in linearen Kausalitäten und versuchen die Dynamik der Prozesse durch Veränderungen in den Anfangs- und Randbedingungen zu erfassen. Das funktioniert nur bei kleinen und/oder langsamen Veränderungen.
- Technische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Systeme werden immer komplexer vernetzt. Hohe Komplexität und enge Kopplung von Systemeigenschaften erhöhen die Gefahr von Fehlreaktionen.
- Die vorherrschende Fragmentierung und Spaltung in Gesellschaft, Beruf und Wissenschaft verlangen zunehmend nach ganzheitlichem Verständnis großer Systeme.
- Durch Technikbewertung müssen systematisch Grundlagen für den Umweltschutz geschaffen werden.

Das Konzept „komplexes System“

Ein System ist ein aus mehreren Teilen zusammengesetztes gegliedertes Ganzes, dessen Teile strukturell oder funktional miteinander in Verbindung stehen. Die systemtheoretische Analyse eines Systems erfordert

- Identifizierung seiner Elemente
- Analyse der einzelnen Elemente ohne die anderen zu berücksichtigen
- Analyse der Beziehungen zwischen den Elementen untereinander und mit ihrer Umwelt
- Synthese der Elemente zu einem Modell des Systems.

Modelle werden zur Untersuchung von Systemen verwendet und sind somit die Darstellung von Systemen. Sie sind durch drei Merkmale gekennzeichnet:

- Modelle sind Abbildungen natürlicher oder künstlicher Originale
- Modelle erfassen nicht alle, sondern nur die relevanten Attribute des Originals
- Modelle werden durch pragmatische Aspekte bestimmt.

Modellierungsmöglichkeiten, methodische Probleme

Die Simulation eines dynamischen Systems erfolgt in folgenden Schritten:

- Aufstellen der Modellgleichungen
- Auswahl geeigneter Parameter
- Lösung der Differentialgleichungen
- Interpretation der Ergebnisse als Szenarioentwicklung.

Das gewählte Modell kann beliebig kompliziert werden durch

- Anzahl der Zustandsgrößen
- Zahl und Komplexität der Kopplungsterme
- Zahl und Komplexität der nichtlinearen Terme.

Komplizierte Modelle führen auf Differentialgleichungen, die nicht analytisch exakt lösbar sind. Vereinfachte Modelle erfassen aber die Dynamik des realen Systems nicht exakt und können die zeitliche Entwicklung des Systems nicht genau vorhersagen.

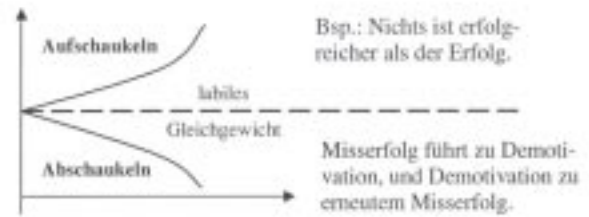
Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts beherrschten lineare Differenzialgleichungen die Naturwissenschaften und erzeugten die Auffassungen:

- Kleine Ursachen haben kleine Wirkungen
- Große Wirkungen sind die Summe vieler kleiner Ursachen
- Einzellösungen kann man addieren.

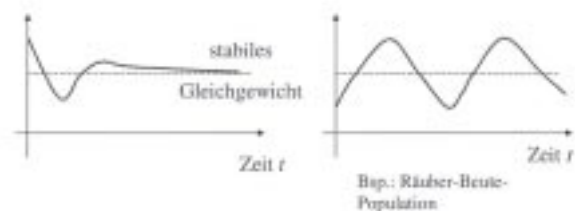
Naturgesetze sind jedoch meist nichtlineare Differentialgleichungen mit den Folgen:

- Kleine Ursachen können auch gewaltige Wirkungen haben
- Durch Rückkopplungen wirken Variable auf sich selbst zurück, was Nichtlinearitäten erzeugt
- Nichtlineare Differentialgleichungen können chaotische Lösungen haben.

Die Rückkopplung beschreibt den Zusammenhang zwischen Ursache, Wirkung und Rückwirkung in einem System
Positive Rückkopplung: Wirkung und Rückwirkung verstärken sich (s. Abb.). Es gibt zwei Fälle: Aufschaukeln und abschaukeln.



Negative Rückkopplung: Wirkung und Rückwirkung schwächen sich ab. Nur dadurch können Systeme stabil gehalten werden (Grundprinzip aller Regelkreise - s. Abb.).



Trajektorien: beschreiben die Zustandsvariablen des Systems als Funktion der Zeit. Sie münden in einen Attraktor, der

- ein Punkt sein kann (stabiles Gleichgewicht)
- ein periodischer Attraktor sein kann (periodische Schwingungen)
- ein instabiler (seltsamer) Attraktor sein kann, (chaotisches Verhalten).

Chaotische Lösungen (deterministisches Chaos) können auftreten bei:

- Nichtlinearen dynamischen Systemen
- Positiven Rückkopplungen
- Ungenauen Anfangsbedingungen.

Trotz komplexer Zusammenhänge und auftretender Unsicherheiten sind technische Systeme noch gut mathematisch modellierbar und durch Simulationen können unerwünschte Abläufe und deren Folgen identifiziert werden. Interaktionen und Einflussgrößen, die mathematisch nicht genau beschreibbar oder schwer quantifizierbar sind wie z.B. Risiko, Lebensqualität, Akzeptanz etc. können nur über Randbedingungen berücksichtigt werden oder werden ganz vernachlässigt, was zu Informationsverlusten führt.

Die Bewertung von alternativen Lösungen erfolgt anhand von Kriterien, die durch Auswahl und Aggregation von Indikatoren gebildet werden.

Technikbewertung bedeutet das planmäßige, systematische, organisierte Vorgehen, das

- den Stand einer Technik und ihre Entwicklungsmöglichkeiten analysiert,
 - unmittelbare und mittelbare technische, wirtschaftliche, gesundheitliche, ökologische, humane, soziale und andere Folgen dieser Technik und mögliche Alternativen abschätzt,
 - aufgrund definierter Ziele und Werte diese Folgen beurteilt oder auch andere wünschenswerte Entwicklungen fordert,
 - Handlungs- und Gestaltungsmöglichkeiten daraus herleitet und ausarbeitet,
- so dass begründete Entscheidungen ermöglicht und gegebenenfalls durch geeignete Institutionen getroffen und verwirklicht werden können.

Aus der Sicht der Ingenieurwissenschaften ist Nachhaltigkeit mit bestimmten Anforderungen an Technologien verbunden. Bisherige Bewertungskriterien der Ingenieure sind technische Aspekte wie Funktionalität und Sicherheit und ökonomische Fragen wie Wirtschaftlichkeit innerhalb vorgegebener rechtlicher und fiskalischer Randbedingungen. Das Leitbild Zukunftsfähigkeit erfordert die Einbeziehung auch anderer Kriterien: Umweltqualität (Umweltverträglichkeit) und Lebensqualität (Sozial- und Humanverträglichkeit) und führt damit auf eine Interdisziplinäre Fragestellung Technikbewertung als Operationalisierung des Leitbildes Nachhaltigkeit bedeutet, die Entwicklung komplexer dynamischer (ökologischer, ökonomischer, sozialer) Systeme zu analysieren mit dem Ziel, Stabilitätsrisiken zu verringern. Nachhaltige Entwicklung ist ein Transformationsprozess mit veränderlichen Randbedingungen. Die Trajektorien können nur für kurze Zeiträume vorausberechnet werden. Sehr oft sind Kurskorrektoren erforderlich, die ein Nachhaltigkeitsmanagement durch gezielte Maßnahmen von Zeit zu Zeit einleiten muss, um Prozesse innerhalb vorgegebener Grenzen zu halten.

Neue methodische Ansätze

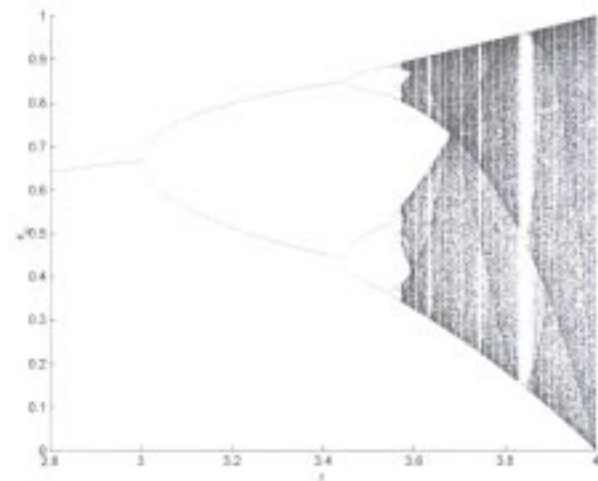
Zur Untersuchung nachhaltig zukunftsfähiger Entwicklungen werden folgende Strategien eingesetzt:

- Das Konzept der integrativen Modellierung bezieht Aspekte aus unterschiedlichsten Bereichen, wie Technik, Ökonomie, Umwelt und Gesellschaft in ein einheitliches systemtheoretisches Modell ein
- Das „Dominant Relations Model“ verfolgt eine komplexitätsreduzierende Strategie, in dem es nur dominierende, für das zu untersuchende Problem relevante Beziehungen zwischen den Elementen berücksichtigt und andere vernachlässigt.
- Durch Fuzzy Logic (Unschärfe Logik) können qualitativ verschiedene Indikatoren zusammengefasst, schwer quantifizierbare Größen in mathematische Modelle eingebunden und die Dynamik von Systemen durch Abweichungen von einem leichter zu berechnenden Normalverhalten beschrieben werden.

Beispiele für komplexes Systemverhalten

- Das Wachstum von Populationen folgt der logistischen Gleichung $x_{t+1} = r \cdot x_t \cdot (1 - x_t)$. Die Wachstumsrate r bestimmt den Typ der Lösung und den Typ des sich ergebenden Attraktors. Für $r < 1$ erlischt die Population für jeden Anfangswert. Für $1 < r < 3$ stellt sich die Population unabhängig vom Anfangswert auf einen einzigen festen Wert ein, dessen Größe nur von r abhängt. Für $r > 3$ springt die Population zwischen einer mit r anwachsenden Zahl von Fixpunkten hin und her, bis bei Werten von $r > 3,56994\dots$ die Population chaotisch innerhalb eines immer breiter werdenden Bandes hin und her schwankt.

Bifurkationsdiagramm der logistischen Gleichung.



- Die Bewegungsgleichungen eines ebenen elastischen Pendels sind nicht analytisch lösbar. Bei numerischer Lösung gibt es je nach den Anfangsbedingungen drei verschiedene Typen von Bahnkurven, nach denen das Pendel schwingt:
 1. Periodische Bahnkurven
 2. Quasiperiodische Bahnkurven
 3. Chaotische Bahnkurven.

- Im EPR-Modell sind in einer Region Energieverbrauch E , Luftqualität P und Lebensqualität R in bestimmter Weise miteinander verknüpft. Die gegenseitige Abhängigkeit der drei Parameter kann entweder durch Modellierung mit Differentialgleichungen (klassisches Modell) oder mit Hilfe der Fuzzy Logic (unscharfes Modell) dargestellt werden. Mit beiden Modellen wurde untersucht, wie sich das System im Raum der 3 Systemvariablen entlang von Trajektorien entwickelt. Im Fall a) entwickelt es sich ohne Maßnahmen zur Luftreinhaltung vom Ausgangspunkt M über einen Grenzpunkt N wegen starker Luftverunreinigung in ein Gebiet mit ständig sinkender Lebensqualität und sinkendem Energieverbrauch, bis deren Nullpunkt bei S_1 erreicht wird. Im Fall b) wird mit Maßnahmen zur Luftreinhaltung erreicht, dass die vom gleichen Ausgangspunkt M ausgehende Trajektorie die Lebensqualität nicht verschlechtert und einen Endpunkt S_2 bei niedrigerer Luftverunreinigung und

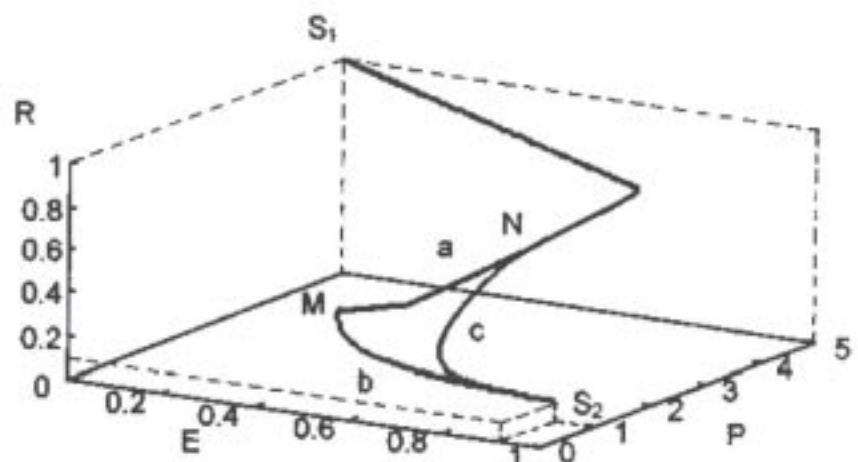


Abbildung 5.4: Phasendiagramm des klassischen Modells mit den drei berechneten Kurven in den drei Situationen:

- a) Reale Entwicklung mit den Anfangswerten $(E, P, R) = (0.4, 1.5, 0.3)$;
- b) Szenariofall I mit den Anfangswerten $(E, P, R) = (0.4, 1.5, 0.3)$;
- c) Szenariofall II mit den Anfangswerten $(E, P, R) = (0.6, 3.6, 0.5)$.

höherem Energieverbrauch erreicht. Der gleiche Endpunkt S2 kann auf einer anderen Trajektorie auch erreicht werden, wenn die Maßnahmen zur Luftreinhaltung erst am Grenzpunkt N eingeleitet werden. S1 und S2 sind Attraktoren, auf die sich das System hinentwickelt. Beide Modelle zeigen sehr ähnliches Systemverhalten.

- Das von der Europäischen Kommission geförderte Modell EFENIA verfolgt das Ziel, die von der Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologien hervorgerufenen Wirkungen in das von Meadows und Randers beschriebene World3-Modell zur Beschreibung zukünftiger

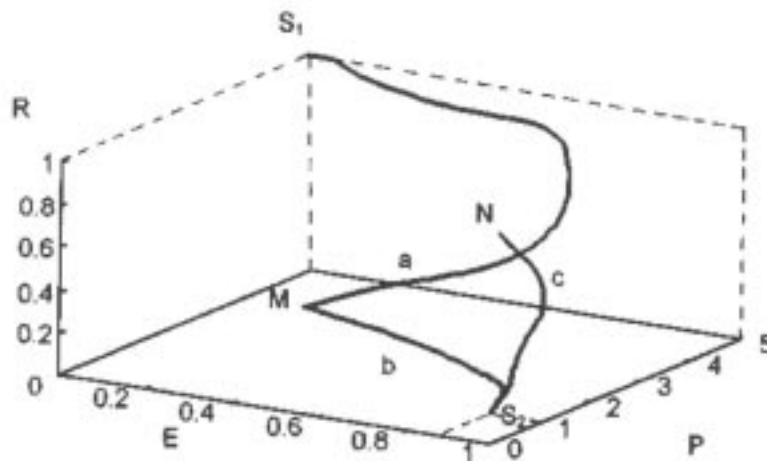


Abbildung 5.8: Phasendiagramm des unscharfen Modells mit den berechneten Trajektorien für die drei Situationen:
a) Reale Entwicklung mit den Anfangswerten $(E, P, R) = (0.4, 1.5, 0.3)$ (Punkt M);
b) Szenariofall I mit den Anfangswerten $(E, P, R) = (0.4, 1.5, 0.3)$ (Punkt M);
c) Szenariofall II mit den Anfangswerten $(E, P, R) = (0.6, 3.6, 0.5)$ (Punkt N).

Wachstumsprozesse zu integrieren. Insbesondere soll die Frage untersucht werden, ob durch den Übergang zur Informationsgesellschaft eine Nachhaltigkeit der Entwicklung per se gewährleistet wird. Wesentliche Untersuchungsbereiche dieses Modells sind

- Infrastruktur für die Internetnutzung, Anzahl der Computer und der Internetzugänge
- Nutzung durch Online-Informationsangebote und e-working
- Energieverbrauch der Computer bei Herstellung und Nutzung
- Energieverbrauch zur Papierherstellung und beim Fahren zum Arbeitsplatz
- Umweltprobleme durch elektronischen Schrott und Schadstoffemissionen.

Durch Untersuchung mehrerer Szenarien mit unterschiedlichen Nutzeranteilen, unterschiedlichem Papierverbrauch pro Kopf und unterschiedlicher KFZ-Nutzung ergaben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Bumerangeffekte sind nicht auszuschließen, insbesondere im Bereich des Papierverbrauches und der Mobilität
- Nur durch eine Veränderung des Verhaltens der Nutzer wird mit der Nutzung der Informationstechnologien auch eine Verbesserung der Situation im Umweltbereich erreicht
- Die Gestaltung der Informationsgesellschaft schließt nicht unbedingt auch ihre nachhaltige Entwicklung ein.

Fazit

Ziel der Forschungen ist es, möglichst allgemeine und flexible Methoden zum Nachhaltigkeitsmonitoring und -management systematisch zu entwickeln und Instrumente bereitzustellen, die auf verschiedene Ebenen (national, regional, lokal oder sektoral) angewendet werden können.

Technikbewertung ist das Instrument zur Operationalisierung von Nachhaltigkeit aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht.

Neue Modellierungsansätze erlauben die Entwicklung von sogenannten integrativen Modellen, die der Anwendung des Leitbildes Nachhaltigkeit helfen können.



WZFG e.V.
Berlin-Buch

Forschung für zukunftstaugliches Verhalten
Förderung regenerativer Energien
zukunftsorientierte Kulturarbeit
Öffentlichkeitsarbeit

WERKSTATT FÜR ZUKUNFTS-FORSCHUNG UND -GESTALTUNG (WZFG e.V.) auf dem Biomedizinischen Forschungscampus Berlin-Buch
Geschäftsstelle, PF, 13092 Berlin, od. Robert-Rössle-S. 10, 13125 Berlin, T=030/94063845, F=/9494161 d.; T=030/4241718, F=42085416 p.
www.zukunfts-werkstatt.org / kontakt@zukunfts-werkstatt.org

Vorstand: Dr. Hans-Volker Pürschel (Vorsitzender - Physiker/Zukunftsforscher/Kulturarbeiter), Uwe Frömberg (Vorstandsmitglied - Informatikingenieuer), Anna Franziska Schwarzbach (Vorstandsmitglied - Dipl. Architektin/Bildhauerein). **Bankverbindung:** Kto. 397 2629 005, Berliner Volksbank, BLZ 100 900 00. **Gemeinnützigkeit:** Für Wissenschaft, Kultur, Bildung wurde dem Verein am 19.10.00 die Gemeinnützigkeit und die Berechtigung, Spendenquittungen auszustellen, durch das Finanzamt Für Körperschaften I, Gerichtstr. 27, 13347 Berlin, vorläufig zuerkannt und am 3.6.02 bestätigt.