

# Management komplexer Systeme

## Management von Nicht-Wissen

Prof. (em.) Dr.-Ing. Michael F. Jischa  
Institut für Technische Mechanik der TU Clausthal

Internationale Ringvorlesung „Industrial Ecology“  
SS 2005 Universität Bremen  
Vortrag am 29. Juni 2005



## Gliederung

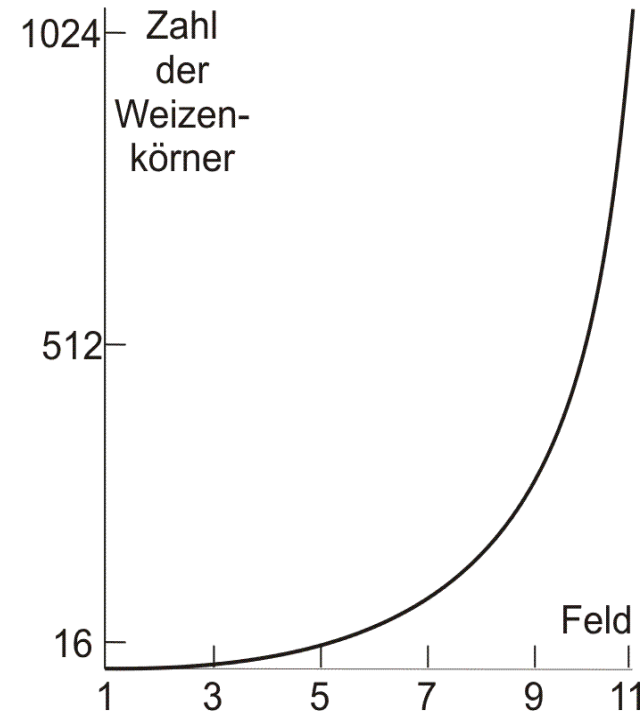
- Linearität und Nichtlinearität
- Deterministisches Chaos
  - Beispiel Pendel (Mechanik)
  - Beispiel konkurrierende Populationen (Ökologie)
- Die Dynamik des technischen Wandels → Zivilisationsfallen
- Information und Wissen
- Management von Nichtwissen statt Wissensmanagement
- Umgang mit komplexen Systemen
- Zusammenfassung



## Ausgangspunkt

- (Natur-) wissenschaftliches Wissen ist durch Präzision und Verlässlichkeit gekennzeichnet
- Vorstellung von Exaktheit gilt letztlich *nur in einer linearen Welt*
- Im Prinzip schon seit Poincare (1854 - 1912), spätestens seit Lorenz (1963) bekannt. Aber zumeist verdrängt, da Linearisierung oft (jedoch nicht immer!) sehr erfolgreich ist → *Überlagerung*
- Das Prinzip der *Überlagerung* erlaubt das Trennen, Teilen und Zerlegen der Probleme in verschiedene wissenschaftliche Disziplinen
- Der *Reduktionismus* war einerseits unglaublich erfolgreich, aber er verschüttete eine andere Perspektive: Komplementarität, Ambiguität, Ambivalenz, Mehrdeutigkeit → *Ganzheitlichkeit*
- Komplexe Systeme lassen sich nicht *nur* reduktionistisch behandeln, denn
  - die Verknüpfungen sind wichtiger als die Teile
  - die Relationen sind wichtiger als die einzelnen Dinge

|     |     |     |   |    |    |     |          |
|-----|-----|-----|---|----|----|-----|----------|
| 1   | 2   | 4   | 8 | 16 | 32 | 64  | 128      |
| 256 | 512 | ... |   |    |    |     | $2^{15}$ |
|     |     |     |   |    |    |     | $2^{23}$ |
|     |     |     |   |    |    |     | $2^{31}$ |
|     |     |     |   |    |    |     | $2^{39}$ |
|     |     |     |   |    |    |     | $2^{47}$ |
|     |     |     |   |    |    |     | $2^{55}$ |
|     |     |     |   |    |    | ... | $2^{63}$ |

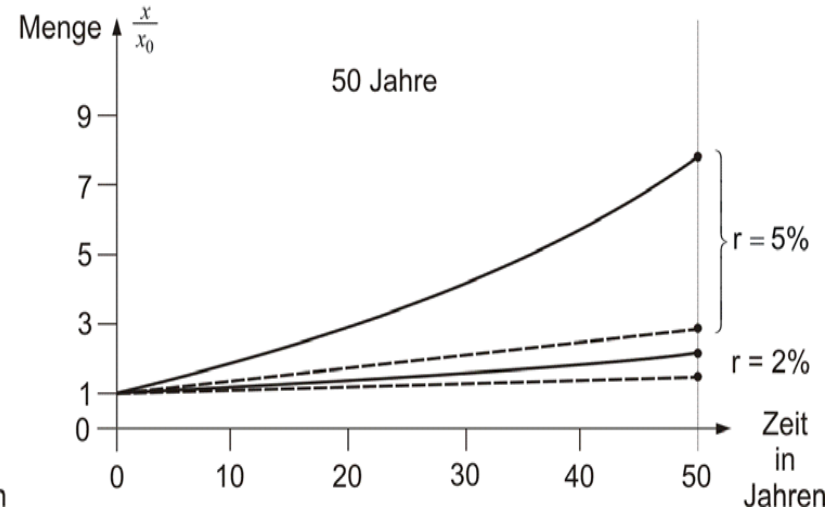
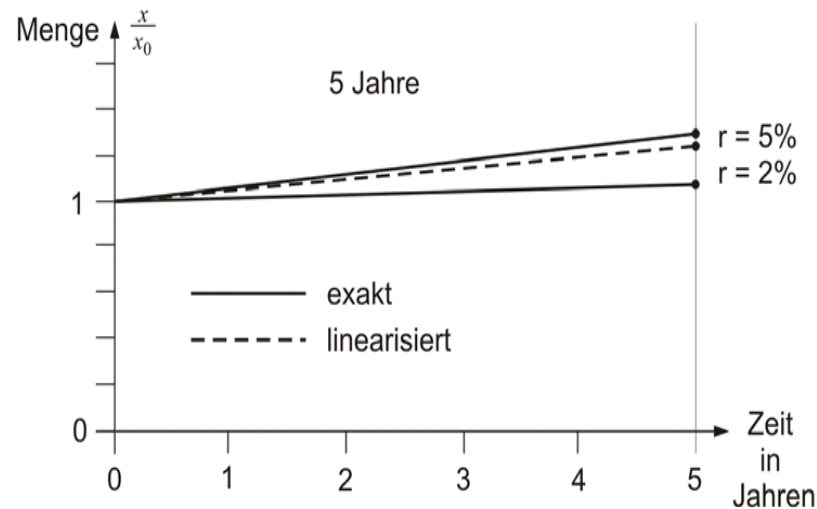


**2.1 Das indische Schachbrettmärchen.** Im 64. Feld liegen 9,2 Billiarden Körner. Im Jahr 2003 lag die Weizenernte bei 590 Mio. t. Die gesamte Weltgetreideproduktion betrug etwas über 2 Mrd. t, davon entfielen jeweils etwa 30% auf Mais, Reis und Weizen. Ein Weizenkorn hat die Masse von 0,4 mg. Somit enthält das 64. Feld 37 Mrd. t Weizen, das 63-fache der derzeitigen Weltjahresproduktion.



**Tabelle 2.1: Dickenwachstum beim Papierfalten als Beispiel für exponentielles Wachstum.** Das Wachstumsgesetz lautet  $x_{N+1} = 2 \cdot x_N$ . Nach 50 Faltungen und einer Papierstärke von 0,1 mm erhält man eine Dicke von etwa  $10^{14}$  mm =  $10^8$  km. Das entspricht dem 10.000-fachen des Erddurchmessers.

| Gefaltet | Dicke/Stärke                    |
|----------|---------------------------------|
| 1 x      | $2^1 = 2$                       |
| 10 x     | $2^{10} = 1,024 \times 10^3$    |
| 20 x     | $2^{20} = 1,049 \times 10^6$    |
| 30 x     | $2^{30} = 1,074 \times 10^9$    |
| 40 x     | $2^{40} = 1,100 \times 10^{12}$ |
| 50 x     | $2^{50} = 1,126 \times 10^{15}$ |



## 2.11 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.



## Deterministisches Chaos

- Nichtlineare Systeme *können* unter bestimmten Voraussetzungen chaotisches Verhalten zeigen
- Exemplarische Erläuterung an zwei Beispielen (separate Folien)
  - Feder-Masse-Pendel (Mechanik)
  - Konkurrierende Populationen nach Gause (Ökologie)
  - weitere Beispiele siehe:
- M. F. Jischa: Skript „Dynamische Systeme in Natur, Technik und Gesellschaft“, TU Clausthal 1995;  
Online Version B. Ludwig: [www.iee.tu-clausthal.de](http://www.iee.tu-clausthal.de) → Studium → Skripte
- M. F. Jischa: Ingenieurwissenschaften; Springer, Berlin 2004
- M. F. Jischa: Herausforderung Zukunft, Technischer Fortschritt und Globalisierung; Elsevier/Spektrum Akad. Verlag, Neuauflage, erscheint am 7.Sept. 2005



## Der technische Fortschritt

beeinflusst mit beschleunigter Dynamik nicht nur unsere *Arbeitswelt*, sondern zunehmend auch unsere *Lebenswelt* !

Konsequenzen:

### 1. „*Gegenwartsschrumpfung*“ (Lübbe)

- In einer dynamischen Zivilisation erhöht sich in Wissenschaft und Technik, in Wirtschaft und Kunst die Neuerungsrate
- Die Zeitdauer konstanter *Arbeits- und Lebensverhältnisse* nimmt ständig ab
- Der Aufenthalt in der Gegenwart verkürzt sich ständig
- Gleichzeitig wächst in der Gesellschaft die Sehnsucht nach dem Dauerhaften, dem Beständigen; der Handel mit Antiquitäten, Oldtimern und Repliken blüht, weil diese das Dauerhafte symbolisieren





## 2. „*Popper-Theorem*“:

*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.*

Ernüchternde Erkenntnis für Entscheidungsträger in Wirtschaft und Politik, denn:

- Wir werden immer klüger und immer blinder
- Mit fortschreitender Entwicklung der modernen Gesellschaft nimmt die Prognostizierbarkeit ihrer Entwicklung ständig ab
- Nie zuvor gab es eine Zeit, die über ihre bevorstehende Zukunft so wenig gewusst hat wie heute
- Gleichzeitig wächst die Zahl der Innovationen ständig, die unsere Lebenssituation strukturell und meist irreversibel verändert



## Zivilisationfallen

Der Begriff umfasst Probleme, die erst in jüngerer Zeit durch die beschleunigte Dynamik des technischen Wandels deutlich wurden:

- „*Beschleunigungsfalle*“ (Kafka)
- „*Innovationsfalle*“ (von Braun)
- „*Fortschrittsfalle*“ (Handy): Dilemmata, charakteristisch für reife Gesellschaften, ausgedrückt durch (neun) Paradoxien; die der Intelligenz, der Arbeit, der Produktivität, der Zeit, des Reichtums, des Alterns, der Individualität, der Gerechtigkeit und der Organisationen
- „*Globalisierungsfalle*“ (Martin, Schumann), Abschnitt 11.5



## Exemplarische Analysen zu den „Zivilisationsfallen“ aus der Sicht von **Philosophen**

- *Rapp*: Der Gegensatz zwischen Absicht und Resultat – der „Eigensinn“ der Technik – ist allgegenwärtig
- *Mittelstraß*: „Leonardo-Welt“; Wissenschaft und Technik haben die Welt zu einem Artefakt – einem Menschenwerk – gemacht
- *Meyer-Abich*: Weiß die Wissenschaft, was wir für die Zukunft der Industriegesellschaft wissen müssen?
- *Böhme*: „Am Ende des Baconschen Zeitalters“ ist in unserem Verhältnis zur Wissenschaft eine Selbstverständlichkeit abhanden gekommen: nämlich die Grundüberzeugung, dass wissenschaftlicher und technischer Fortschritt zugleich humaner Fortschritt ist



## Aus der Sicht von **Soziologen**

- *Bell* (1973!): Die nachindustrielle Gesellschaft wird eine „Wissensgesellschaft“ mit einem starken Wandel der Sozialstruktur sein
- *Giddens*: Die Moderne bezieht ihre Dynamik aus der Trennung von Raum und Zeit, der Entbettung der sozialen Systeme sowie der Reflexivität des soziologischen Wissens
- *Drucker*: In der Gesellschaft wandeln sich die Grundwerte, die sozialen und politischen Strukturen sowie deren Institutionen; wir überschreiten eine „Wasserscheide“
- *Wagner*: Die großen Veränderungen haben zu einer Regierbarkeitskrise der Massendemokratien, einer Krise der keynesianischen Wirtschaftssteuerung, einer Krise des sozialdemokratischen Wohlfahrtsstaats und einer ökologischen Krise des Industrialismus geführt



## Aus der Sicht von **Ökonomen**

- *Heilbroner*: Im Kampf der Wirtschaftssysteme scheint der Kapitalismus wegen seiner erstaunlichen Lernfähigkeit eindeutiger Sieger zu sein; nun muss es ihm gelingen, die Selbstzerstörung aggressiver Marktkräfte auszuschalten.
- *Thurow*: Eine Gesellschaft kann nur dann blühen und sich entwickeln, wenn Technologien und Überzeugungen zusammenfallen. Welche Dynamik wird die neue Welt haben, zu der wir aufbrechen wollen?
- *Reich*: Geld- und Warenströme sowie Dienstleistungen kennen keine Grenzen mehr; Aufgabe nationaler Politik muss die verstärkte Förderung des Humankapitals sein; der entscheidende Wachstumsbereich sind „symbolanalytische“ Dienste.



## Information und Wissen

Norbert Wiener („Kybernetik“) formulierte 1948:

*„Information ist Information, weder Materie noch Energie“*

- Naturalistische *und* kulturalistische Auffassung von Information
- *Information* ist mehr als Daten und Signale  
*Wissen* ist mehr als Information  
*Bildung* ist mehr als Wissen
- Wissen ist Information auf einer höheren Reflexionsstufe;  
Information ist „der Unterschied, der einen Unterschied macht“  
(Zimmerli)
- Wissen wird unterteilt in  
*Verfügungs-, Orientierungs- sowie Transformationswissen*



## Wissensgesellschaft

- Erzeugung, Verbreitung und Management von *Wissen* ist zu *der entscheidenden Ressource* geworden
- Wissen entsteht in nahezu allen gesellschaftlichen Bereichen und ist vollends zu einem öffentlichen Gut geworden
- Entscheidend ist die Frage nach dem Zugang („Access“); Folge: Einteilung der Weltgesellschaft in „Informationsreiche“ und „Informationsarme“ → *Digitale Spaltung*
- Gründe für die *digitale Spaltung* sind ökonomischer Art (mangelnde Kaufkraft), Kontrolle der Internetnutzung (China, Singapur), Verbote von Satellitenschüsseln (Iran, Saudi-Arabien)
- „Wissen ist Macht“ muss ergänzt werden durch einen zweiten Slogan „Wissen teilen ist Macht“



**Paradoxon der Wissensgesellschaft:** Mit dem verfügbaren Wissen nimmt gleichzeitig das **Nichtwissen** zu; Folgen:

- Wie gehen wir mit der „Information **Nichtwissen**“ um?
- Statt *Wissensmanagement* geht es um das Management des *unsicheren*, des *unscharfen* und des *Nichtwissens*
- Bei Entscheidungen geht es um das
  - „**Handeln trotz Nichtwissen**“ (Böschen u. a.)
  - „**Management komplexer Systeme**“ (Ludwig)
- Wie können Unternehmen das verborgene Wissen (Tacit Knowledge) der Mitarbeiter nutzbar machen?
- Wie können Unternehmen und Organisationen „lernen“?





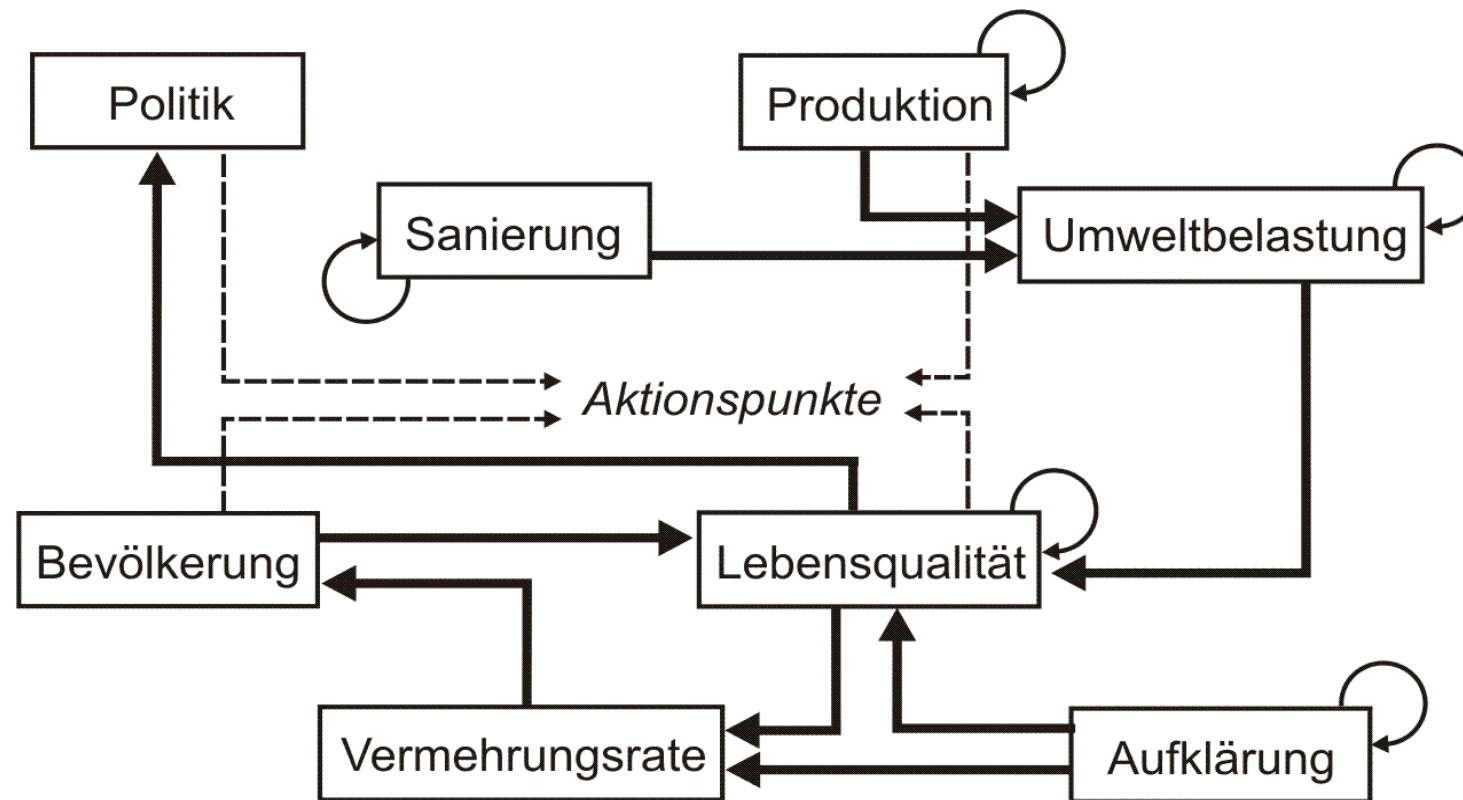
## Lernende Organisationen

- sind „Organisationen, in denen die Menschen kontinuierlich die Fähigkeit entfalten, ihre wahren Ziele zu verwirklichen, in denen neue Denkformen gefördert und gemeinsame Hoffnungen freigesetzt werden und in denen Menschen lernen, miteinander zu lernen“ (Senge).
- **Wissensmanagementsysteme** leisten mehr als Informationssysteme, die funktional auf bestimmte spezifische Aufgaben zugeschnitten sind. Wissensmanagementsysteme generieren und suchen semantische Informationen; sie strukturieren, analysieren, verteilen, kommunizieren und lehren Wissen.
- Wissensmanagementsysteme sind rückgekoppelt nach Art einer „Knowledge Supply Chain“: Create, Clarify, Classify, Communicate, Comprehend, Create.



Fehler im Umgang mit komplexen Systemen (nach Dörner);  
aus Vester (1999): Die Kunst vernetzt zu denken

- Falsche Zielbeschreibung
- Unvernetzte Situationsanalyse
- Irreversible Schwerpunktbildung
- Unbeachtete Nebenwirkungen
- Tendenz zur Übersteuerung
- Tendenz zu autoritärem Verhalten



- > Verknüpfungen über Tabellenfunktion  
 - - - - -> Eingriffsmöglichkeiten des Spielers über Aktionspunkte

2.15 Wirkungsgefüge des Simulationsspiels Ökolopoly bzw. Ecopolicy, nach (Vester 1994, 1997)



## **Zusammenfassung n. Vester (1991): Ballungsgebiete in der Krise**

„Was wir aus dem Simulationsspiel ...lernen können, kann man unter folgenden Punkten zusammenfassen:

- Kein Eingriff in ein vernetztes System bleibt ohne Folgewirkung.
- In vielen Fällen wirkt ein Eingriff an einer Stelle mit mehr oder weniger starker Verzögerung in überraschender Weise wieder auf diese Stelle zurück.
- Auf diese Weise kehren sich zunächst positiv erscheinende Änderungen über entsprechende Zwischenglieder oft ins Gegenteil um, werden unprofitabel und schädlich.
- Durch nichtlineare Wechselwirkungen beschleunigen sich manche Prozesse derart, dass sie nicht mehr zu kompensieren sind.



- Vorbeugende Maßnahmen ... ziehen zwar zunächst einen Teil des begrenzten Aktionskapitals an Energie, Arbeitskraft und Kreativität ab, bringen jedoch, je früher man damit anfängt, um so größeren Profit nach Durchlaufen des Regelkreissystems.
- Als besonders gefährlich und kritisch erweisen sich Stellen mit positiver Rückkopplung ..., deren Kontrolle auch den stärksten Einsatz rechtfertigt.
- Eine Einbeziehung größerer Zeiträume und prophylaktisches Denken erspart kostspielige Gegensteuerungen (und Übersteuerungen) des Systems, ist effizienter und führt schneller zum Ziel als jedes isolierte Behandeln inzwischen eingetretener Symptome.
- Einen Nachteil lediglich als 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.“



## Zusammenfassung

### **1. Komplexe Systeme sind charakterisiert durch**

- Vernetztheit → Wirkungsnetze statt Wirkungsketten
- Eigendynamik
- Intransparenz durch Unübersichtlichkeit, Unvollständigkeit, Ungenauigkeit, Vagheit, Unschärfe
- Emergenz und Synergie (Haken)
- Selbstorganisation (Prigogine)

### **2. Das Management komplexer Systeme ist problemorientiert**

- Die Entscheidung ist dringend
- Die Sachlage ist ungewiss/unsicher/unscharf

### 3. Grundprobleme aller Managementmethoden (DSS)

- Die Suche nach einfachen und aussagefähigen Bewertungsgrößen bewegt sich zwischen zwei Extremen:
- Das Einfache ist theoretisch falsch
- Das Komplizierte ist praktisch unbrauchbar
- Entscheidungen müssen richtungssicher sein
- „We need quick and dirty methods“



## Abschließende Empfehlungen für das Studium der Ingenieurwissenschaften

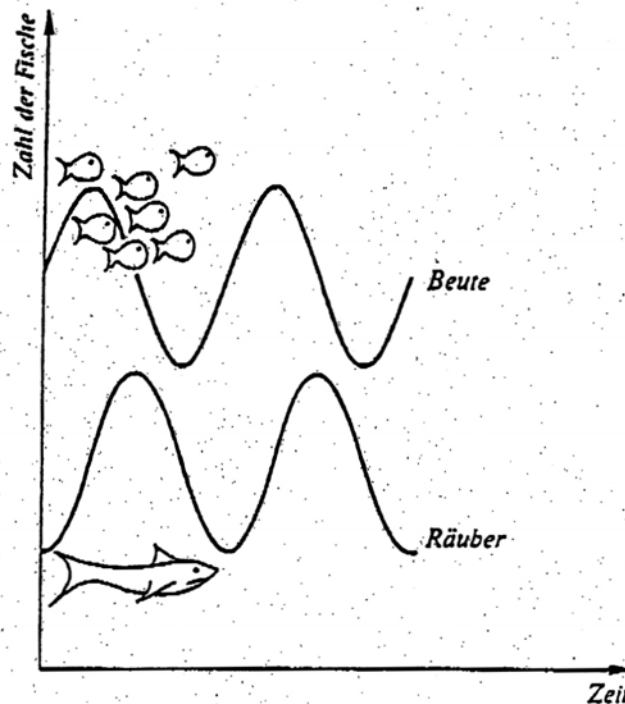
- Vorlesungen mit „*Systemcharakter*“ einbauen; etwa
- Regelungstechnik, wird in der Regel angeboten
- Technikbewertung/Technikgestaltung
- Managementmethoden wie Qualitäts-, Umwelt-, Risiko- ...sowie Nachhaltigkeits-Management
- Verfahrenssystemtechnik neben den Unit Operations
- Umweltsystemtechnik statt Umweltschutztechnik, Umwelttechnik
- Energiesystemtechnik neben den einzelnen Verfahren der Wandlung, der Speicherung und des Transports von Energie

**Ziel:** Verständnis für die *Dynamik komplexer Systeme* wecken





## Dynamische Systeme in Natur, Technik und Gesellschaft



Prof. Dr.-Ing. Michael F. Jischa

Institut für Technische Mechanik  
der TU Clausthal

Ausgabe WS 1999/2000 (Erstausgabe 1995)



## Gliederung der Vorlesung

### 1. Einführung

- 1.1 Vorbemerkungen
- 1.2 Einführende Beispiele
- 1.3 Wachstumsgesetze
- 1.4 Rückkopplung und Regelkreise
- 1.5 Einfache dynamische Systeme  
(Räuber/Beute-, Konkurrenz-, Symbiosemodelle)
- 1.6 Determinismus und Chaos
- 1.7 Systeme von Differentialgleichungen
- 1.8 Attraktoren
- 1.9 Literatur

### 2. Dynamische Systeme in der Natur

- 2.1 Ökologie: Inhalt und Ziele
- 2.2 Elementare Populationsdynamik
- 2.3 Verallgemeinertes logistisches Modell: Depensation
- 2.4 Modelle für den Fischfang: Kompensations- und  
Depensationsmodell (Katastrophenmodell)
- 2.5 Konkurrierende Populationen
- 2.6 Epidemien
- 2.7 Diffusionsmodell für die Algenblüte
- 2.8 Literatur

### 3. Dynamische Systeme in der Technik

- 3.1 Schwingungen
- 3.2 Chemische Reaktoren
- 3.3 Wellenausbreitung in Strömungen
- 3.4 Bénard-Konvektion
- 3.5 Verkehrsdynamik
- 3.6 Literatur



## **4. Dynamische Systeme in der Gesellschaft**

- 4.1 Verhaltensdynamik
- 4.2 Modelle in der Volkswirtschaftslehre
- 4.3 Wirtschaftsplanung durch Besteuerung
- 4.4 Zivilisationsdynamik
- 4.5 Ökolopoly - ein kybernetisches Umweltspiel
- 4.6 Literatur

## **5. Komplexe dynamische Systeme**

- 5.1 Klimamodelle
- 5.2 Weltmodelle
- 5.3 Literatur

## **6. Zusammenfassung, Kritik, Ausblicke**

### **Anmerkung:**

Die Computersimulationen in der Vorlesung wurden von meinen Mitarbeiterinnen Dipl.-Ing. Petra Kensy und Dipl.-Ing. Ildiko Tulbure vorbereitet und durchgeführt.

Den vorliegenden Text schrieb cand. rer. mont. Henning Förster.



*Gause-Modell*, siehe hierzu /2,4/:

Zwei Populationen mit den Populationsstärken  $x$  und  $y$  bewohnen ein gemeinsames Gebiet und konkurrieren miteinander um Nahrung und andere Ressourcen. Jede Art kann für sich allein gedeihen und wächst logistisch.

*Modellgleichungen*

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} = rx \left(1 - \frac{x}{K}\right) - axy = F(x,y)$$

$$\frac{dy}{dt} = \dot{y} = sy \left(1 - \frac{y}{L}\right) - bxy = G(x,y)$$

$r, s$ : Wachstumsraten der beiden Arten

$K, L$ : Kapazitätsgrenzen der beiden Arten

$a, b$ : beschreiben die Konkurrenzvorteile. Wächst  $a$ , so wird Spezies  $y$  effektiver, die Spezies  $x$  zu übervorteilen. Die gegenseitige Behinderung ist  $\sim x \cdot y$ .

Alle Parameter sind positive Konstanten.

*Gleichgewichtszustände* aus  $\dot{x} = \dot{y} = 0$ :

$$rx \left(1 - \frac{x}{K}\right) = axy; \quad sy \left(1 - \frac{y}{L}\right) = bxy$$

Nur Lösungen  $x, y \geq 0$  von Interesse. Es gibt 4 Lösungen:

1.  $x = y = 0$ , trivial

2.  $x = 0; \quad y = L$   
3.  $y = 0; \quad x = K$  } asymptotisch stabile  
Attraktoren, siehe 2.2.3

$$4. \quad x = \frac{(aL - r)sK}{abKL - rs}; \quad y = \frac{(bK - s)rL}{abKL - rs}$$



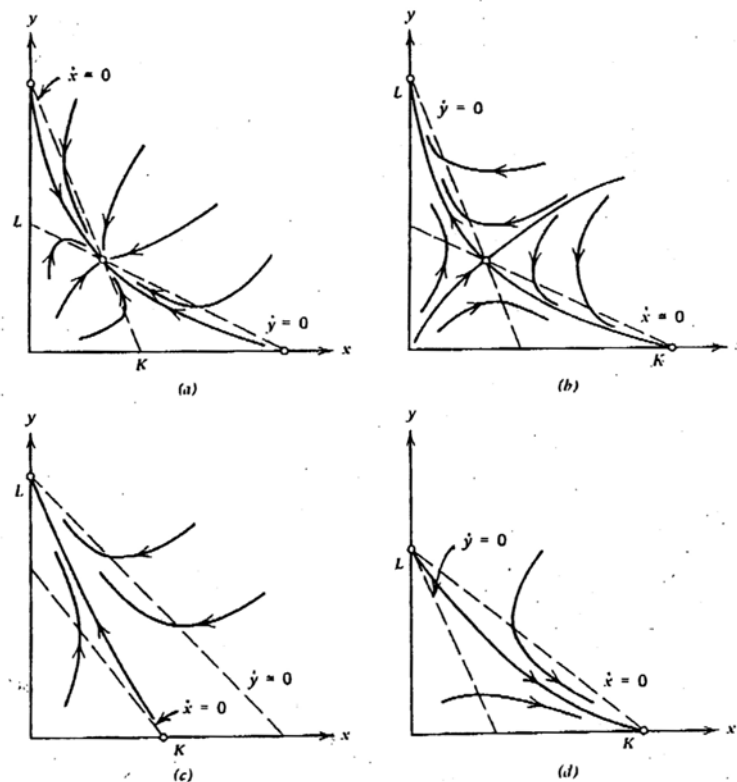
Fall 4 liefert mit  $x \neq 0$  und  $y \neq 0$  aus

$$\dot{x} = 0: \quad y = \frac{r}{a} \left( 1 - \frac{x}{K} \right) = A - Bx$$

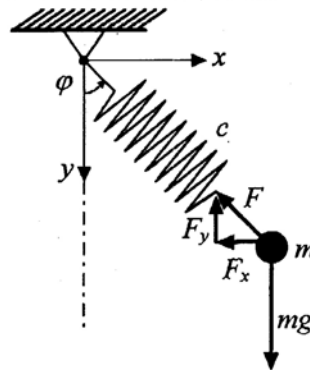
$$\dot{y} = 0: \quad x = \frac{s}{b} \left( 1 - \frac{y}{L} \right) = C - Dy$$

Also gibt es 4 Isoklinen: Die beiden Geraden  $x = C - Dy$ ;  $y = A - Bx$  sowie  $x = 0$  und  $y = 0$ .

Je nach Lage der beiden Geraden gibt es Fallunterscheidungen, Bild aus /2/:



### Ebenes elastisches Pendel



- $m$  = Punktmasse
- $c$  = Federkonstante
- $l_0$  = Ruhelänge der unbelasteten Feder
- $l = \sqrt{x^2 + y^2}$   
= momentane Länge der belasteten Feder
- $\varphi$  = Auslenkwinkel

Punktpendel und Feder-Masse-Pendel sind miteinander gekoppelt. Die Pendellänge hängt von der momentanen Federlänge ab  $\Rightarrow$  *Nichtlinearität*. Herleitung über Impulssatz in  $x$ - und  $y$ -Richtung:

$$m\ddot{x} = \sum K_x \quad m\ddot{y} = \sum K_y$$

$$\text{Federkraft } F = c(l - l_0) = c(\sqrt{x^2 + y^2} - l_0)$$

$$\text{mit den Komponenten } \frac{F_x}{F} = -\frac{x}{l}; \quad \frac{F_y}{F} = -\frac{y}{l}$$

$$m\ddot{x} = -F_x = +F \frac{x}{l} = cx \frac{l - l_0}{l}, \quad \text{es folgt}$$

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

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

analog wird

Zwei gekoppelte nichtlineare Dgln. 2. Ordnung für  $x(t)$  und  $y(t)$ :

- Keine analytische Lösung möglich
- Numerische Lösung für verschiedene Anfangswerte  $x_0, y_0$  (Anfangsort) und  $v_{x0}, v_{y0}$  (Anfangsgeschwindigkeit)