

### 2.1.3 Nichtlineare Dynamik

Für die Beschreibung physikalischer Phänomene werden heutzutage nichtlineare Gleichungen verwendet, die, im Gegensatz zu linearen Gleichungen, Terme beinhalten, die mit sich selbst multipliziert werden. Zwar werden für die Beschreibung nichtlinearer Phänomene auch lineare Theorien verwendet. Dies ist jedoch nur sinnvoll, wenn die zu beschreibenden Objekte isolierbar sind, das heißt klar abgegrenzt werden können. Die meisten Phänomene der Praxis sind nichtlinear. Es gibt nur sehr wenige lineare Beispiele, wie das reibungsfreie Pendel. Bei nichtlinearen Systemen führen minimale Abweichungen in den Anfangsbedingungen bei gleicher Anzahl von Entwicklungs- bzw. Rechenschritten zu völlig unterschiedlichen Endresultaten. Deswegen besitzen langfristige Vorhersagen bei komplexen Systemen keine hohe Eintrittswahrscheinlichkeit.

Nichtlinearität kann einerseits nichtlineare Ordnung als auch andererseits nichtlineare Unordnung darstellen./1/ Nichtlineare dynamische Systeme haben die Form  $dx/dt = G(x, y, z, \dots)$ ,  $dy/dt = H(x, y, z, \dots)$ ,  $dz/dt = J(x, y, z, \dots)$ , wobei die Funktionen  $G$ ,  $H$  und  $J$  nichtlineare Terme haben. Bei solchen Gleichungssystemen treten neue Verhaltensweisen auf, d.h. es gibt das Phänomen der Emergenz. Die bildlichen Darstellungen nichtlinearer Gleichungen offenbaren Lücken, Schleifen, Rekursionen und Turbulenzen. Da die meisten Systeme weder vollständig integrierbar noch vollständig chaotisch sind, treten reguläre und chaotische Bahnen mit fraktalen Eigenschaften nebeneinander auf; beide haben endliches Maß und sind im Phasenraumvolumen innig durchmischt.

Im Rahmen nichtlinearer Systeme sind Variablen stets zeitabhängig, während Parameter zeitunabhängigen Charakter haben. Der Forschungsbereich der Nichtlinearen Dynamik befaßt sich eher mit der zeitlichen Dynamik von Systemen als mit deren räumlicher Struktur und wurde vor allem von **Birkhoff, Hopf, Kolmogorow, Lyapunow, Newhouse, Sinai und Smale** untersucht. Die explizite Lösung nichtlinearer Gleichungssysteme/2/ erfordert entweder sehr gute Näherungsverfahren oder einen sehr hohen numerischen Rechenaufwand, der erst durch die moderne Computertechnologie möglich wurde. Man unterscheidet lineare und nichtlineare Differentialgleichungen des allgemeinen und des partiellen Typs. Partielle Differentialgleichungen beinhalten die Veränderung einer Größe bezüglich mehrerer verschiedener Variablen. Durch Simulationen

können Sets solcher Differentialgleichungen in ihrem jeweiligen Verhalten untersucht werden.

Wir benötigen ein tiefergehendes Verständnis Nichtlinearer Dynamik und speziell des Chaos, da Ungleichgewichtszustände in der Natur, der Gesellschaft, der Ökonomie und der Politik die Regel sind, während Gleichgewichtszustände eher Ausnahmen darstellen. Die Welt ist voll von Strukturbrüchen, Turbulenzen, Instabilitäten und Phasenübergängen. Die Entfernung vom Gleichgewicht, das Bewegen am Rande des Chaos kann geradezu als überlebensnotwendige Bedingung für Entwicklungsprozesse angesehen werden. Phasenübergänge ermöglichen das Aufkommen völlig neuer Strukturen, die sich durch ständige Iterationen und Rückkopplungen zu Selbstorganisation oder Deterministischem Chaos weiter entwickeln. Sowohl konservative wie auch dissipative Systeme sind durch nichtlineare Differentialgleichungen gekennzeichnet.

Die Chaosforschung als wichtigstes Forschungsgebiet der Nichtlinearen Dynamik, ist eine der drei erkenntnistheoretischen Aspekte der modernen Physik; die beiden anderen sind die Messung von Quantenphänomenen sowie die Simulation von Selbstorganisationsprozessen. Während bei der Quantenmechanik der Indeterminismus, die Nichtlokalität und die Linearität von Bedeutung sind, sind dies bei der Nichtlinearen Dynamik der Determinismus, die Lokalität und die Nichtlinearität. Nichtlinearität ist eine notwendige, nicht jedoch eine hinreichende Bedingung für Chaos, da diese auch die Emergenz von Ordnung durch Selbstorganisation erlaubt.<sup>3/</sup> Selbstorganisation muß nicht zum Chaos führen, jedoch besitzen chaotische Systeme die Fähigkeit zur Selbstorganisation. Auch Solitonen (unnatürliche Wellen mit außergewöhnlicher Stabilität) sind durch Nichtlinearitäten gekennzeichnet, die ein holistisches Wechselspiel zwischen den Teilchen erzeugen.<sup>4/</sup>

Auch die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie sind im Wesentlichen nichtlinear, was zur Vorhersage interessanter Phänomene wie den "Schwarzen Löchern" im Weltall führte.<sup>5/</sup> Solche Singularitäten, die sowohl im Mikro- wie im Makrokosmos auftreten und eine wichtige Rolle bei vielen Prozessen spielen, sind, wie **Einstein** es formulierte, "das Salz in der Suppe". Er hob hervor, daß es eben "böse" wäre, nichtlineare Differentialgleichungen so zu lösen, daß nirgends Singularitäten auftreten.<sup>6/</sup> Hierbei reichen oft infinitesimale Änderungen aus, um große Wirkungen zu erzielen. Auch im Management treten singuläre Punkte auf, nach deren

Erreichen sich maßgebliche Veränderungen einstellen. So können visionäre Topmanager mit Charisma ganze Unternehmen mitreißen oder Fußballtrainer einen Abstiegskandidaten auf einen vorderen Tabellenplatz führen, wenn sie die Energien des Teams freisetzen.

Nichtlineare Systeme können sowohl reversibel als auch irreversibel sein. Irreversibilität ist hierbei ein Bindeglied im Verständnis des Wechselspiels zwischen Chaos und Ordnung. Die Omnipräsenz der Irreversibilität in der Natur verdeutlicht, daß wir uns intensiv mit diesem Phänomen und seinen Folgewirkungen auseinandersetzen müssen. Unser Geist und unser Denken sind jedoch auch reversibel, was uns das Lernen, die Simulation und das Spielen ermöglicht. Nichtlineare Kopplungen sind kein Ausnahmefall, sie sind im Gegenteil die Regel, wenn man Systeme nicht grob vereinfacht beschreiben will. Nichtlineares Verhalten ist ein Schlüssel zum Verständnis der sich vollziehenden Phasenübergänge. Die mathematischen Lösungen solcher nichtlinearen Systeme sind instabil, wobei der Begriff Nichtlinearität eine nicht proportionale Wechselwirkung zwischen Systemelementen beschreibt, wie beispielsweise bei der Logistic Map, auf die später noch ausführlich eingegangen wird:

$$x_{t+1} = a x_t (1-x_t)$$

Mathematisches Chaos kann hochgradig symmetrisch sein, wie die Logistic Map offenbart (siehe auch Kapitel 2.3.2).<sup>[7]</sup> Symmetrie im Chaos ist ein Kennzeichen der Geometrie nicht-linearer dynamischer Systeme. Um die Zustandsentwicklung von dynamischen Systemen zu visualisieren, greift man auf den Phasenraum mit Orts- und Geschwindigkeitskoordinaten zurück. So ist beispielsweise der Lorenz-Attraktor im Phasenraum weder ein dreidimensionaler Körper noch eine zweidimensionale Fläche, seine Dimension liegt zwischen 2 und 3. In diesem Kontext spricht man auch von fraktaler Dimension (siehe Kapitel 2.3.3).

- Nichtlineare Systemtypen

Nichtlineare Systeme mit chaotischen Zuständen können dissipativ und konservativ sein. Dissipativ heißen sie, wenn Energie, Materie oder Arbeit verbraucht wird, konservativ, wenn sie gegenüber ihrer Umwelt geschlossen sind. Die folgende Zusammenstellung gibt einen Überblick über nichtlineare und chaotische Systeme und zeigt, wo die später behandelten Forschungsgebiete systemtheoretisch einzuordnen sind:

<b>Nichtlinearität:</b>	Statistisches Chaos	Konservatives oder hamiltonsches Chaos	Dissipatives Chaos	Endo-Simulation
<b>Beispiele:</b>	Brownsche Molekularbewegung	Sinai-Chaos; Billard mit runden Ecken	Lorenzgleichungen	Molekulardyn. Simulation
		Doppelpendel; Dreikörperproblem	Rössler-Attraktor; Laser	Virtual Reality
		Hyperchaos	Hyperchaos	Zellul. Automaten vom reversiblen Typ
			Bewußtsein; Bedeutungen	Denken; Kontexte
<b>Begründer:</b>	Boltzmann/Clausius	Maxwell/Poincaré	Lorenz/Prigogine	Finkelstein/Rössler
<b>Systemmerkmale:</b>				
- Thermodynam. Gleichgewicht	ja	ja	nein	nein
- konservativ	ja	ja	nein	nein
- dissipativ	nein	nein	ja	beides
- reversibel	ja	nein	nein	beides
- statistisch	ja	nein	nein	nein
- makroskopisch	nein	ja	ja	nein
- endo	nein	nein	nein	ja
- Vorhersagbarkeit	stochastisch	det. chaotisch	det. chaotisch	det. Chaotisch
- Attraktor	nein	nein	ja	nein
- Beobachtung	objektiv	objektiv	objektiv	subjektiv

Tab. 2.3: Nichtlineare und chaotische Systeme

- Das Auftreten singularer Punkte führt in nichtlinearen Systemen stets zu einer Veränderung der Machtverhältnisse.

- Die Unvorhersagbarkeit nichtlinearer Systeme schränkt das langfristige Machtpotential für Teilnehmer ein.

- Nichtlineare Systeme können je nach Wahl der Parameter sowohl konservatives als auch dissipatives Verhalten hervorbringen.

- Diese Verhaltensfreiheit gilt sowohl für den mikro- als auch den makroskopischen Bereich.

Abb. 2.8: Konsequenzen für Macht und Freiheit

**Systemwissenschaftliche Kontexte:                      Auswirkungen auf das Management:**

- |   |  |
|---|--|
| - Nichtlineare Dynamiken können Strukturbrüche komplexer Systeme beschreiben.               | - Durch Nichtlineare Dynamiken lassen sich Strukturbrüche im Management beschreiben.                           |
| - Nichtlineare Dynamiken zeigen sich durch Selbstorganisation oder Deterministischem Chaos. | - Nichtlineare Dynamiken können auch in Märkten zu deterministisch – chaotischem Verhalten führen.             |
| - Nichtlineare Dynamiken offenbaren die Unvorhersagbarkeit komplexer Systeme.               | - Nichtlineare Dynamiken zeigen auf, daß langfristige Prognosen für Märkte und Unternehmen keinen Sinn machen. |
| - Nichtlineare Dynamiken eignen sich zur Beschreibung komplexer Netzwerke.                  | - Nichtlineare Dynamiken erlauben die Beschreibung komplexer Endo-Welten.                                      |

Abb. 2.9: Konsequenzen für das Endo-Management

---

[1](#) Vgl. Geissler (Zeit), 150.

[2](#) Nichtlineare Differentialgleichungen sind bis heute unlösbar sind, weshalb Lösungen nur näherungsweise durch Computer bestimmt werden können.

[3](#) Vgl. Mainzer (Complexity), 15.

[4](#) Vgl. Peat (Chaos), 176ff.

[5](#) Vgl. Peat (Chaos), 31.

[6](#) Vgl. Rosenthal-Schneider (Einstein), 27.

[7](#) Der Symmetriebruch findet beim Phasenübergang von einem Zustand zum anderen statt.