

Grégoire Nicolis/  
Ilya Prigogine  
Die Erforschung  
des Komplexen

Auf dem Weg zu einem neuen  
Verständnis der Naturwissenschaften

Deutsche Ausgabe bearbeitet von  
Eckhard Rebhan

Mit 110 Abbildungen



Piper  
München Zürich

# Inhalt

Vorwort: Wissenschaft in einer Übergangsphase . . . . .	9
1. Kapitel Komplexität in der Natur . . . . .	17
1.1 Was ist Komplexität? . . . . .	17
1.2. Selbstorganisation in physikalisch-chemischen Systemen: Geburt des Komplexen . . . . .	19
1.3 Thermische Konvektion, ein Prototyp für Selbstorganisationsphänomene in der Physik . . . . .	20
1.4 Selbstorganisationsphänomene in der Chemie. . . . .	29
1.5 Weitere Beispiele komplexen Verhaltens in Alltagsdimensionen. . . . .	45
1.6 Nochmals biologische Systeme . . . . .	51
1.7 Komplexität in planetaren und kosmischen Dimensionen . . . . .	58
1.8 Kräfte und Korrelationen – eine Schlußbilanz . . . . .	65
2. Kapitel Das Vokabular des Komplexen . . . . .	71
2.1 Konservative Systeme . . . . .	71
2.2 Dissipative Systeme . . . . .	77
2.3 Mechanisches und thermodynamisches Gleichgewicht. Nichtgleichgewichts-Einschränkungen . . . . .	82
2.4 Nichtlinearität und Rückkopplung . . . . .	86
2.5 Die vielen Facetten des Zweiten Hauptsatzes . . . . .	93
2.6 Stabilität. . . . .	99
2.7 Bifurkation und Symmetriebrechung . . . . .	108
2.8 Ordnung und Korrelationen. . . . .	113
3. Kapitel Dynamische Systeme und Komplexität . . . . .	119
3.1 Die Geometrie des Phasenraums. . . . .	119
3.2 Maße im Phasenraum . . . . .	123

3.3	Integrable konservative Systeme . . . . .	129
3.4	Bifurkation in einem einfachen dissipativen System: Suche nach Urbildern komplexen Verhaltens . . . . .	136
3.5	Dissipative Systeme in zweidimensionalen Phasenräumen. Grenzzyklen . . . . .	142
3.6	Reduktion auf niedrigdimensionale Systeme: Ordnungsparameter und Normalformen . . . . .	148
3.7	Rückkehr zum Phasenraum: Topologische Mannigfaltigkeiten und Fraktale . . . . .	157
3.8	Nichtintegrale konservative Systeme: die neue Mechanik . . . . .	164
3.9	Ein Modell für instabile Bewegung: das Hufeisen . . . . .	171
3.10	Dissipative Systeme in hochdimensionalen Phasenräumen. Chaos und seltsame Attraktoren . . . . .	174
3.11	Ortsabhängige Systeme. Symmetriebrechende Bifurkationen und Morphogenese . . . . .	187
3.12	Asymmetrie, Selektion und Information . . . . .	194
4.	Kapitel Stochastische Aspekte komplexer Phänomene . . . . .	202
4.1	Fluktuationen und stochastische Beschreibung . . . . .	202
4.2	Markov-Prozesse. Master-Gleichung . . . . .	209
4.3	Markov-Prozesse und Irreversibilität . . . . .	217
4.4	Räumliche Korrelationen und kritisches Verhalten . . . . .	223
4.5	Das zeitabhängige Verhalten von Fluktuationen: Kinetik und Zeitskalen der Selbstorganisation. . . . .	232
4.6	Sensitivität und Selektion . . . . .	243
4.7	Symbolische Dynamik und Information . . . . .	248
4.8	Irreversibilität als Quelle von Asymmetrie und Information . . . . .	253
5.	Kapitel Auf dem Weg zu einer einheitlichen Formulierung von Komplexität . . . . .	261
5.1	Allgemeine Eigenschaften konservativer dynamischer Systeme . . . . .	262
5.2	Allgemeine Eigenschaften dissipativer dynamischer Systeme . . . . .	266
5.3	Die Suche nach einer einheitlichen Beschreibung . . . . .	267

5.4	Wahrscheinlichkeit und Dynamik . . . . .	269
5.5	Die Bäcker-Transformation . . . . .	271
5.6	Mannigfaltigkeiten mit gebrochener Zeitsymmetrie . . . . .	275
5.7	Die symmetriebrechende Transformation $\Lambda$ . . . . .	277
5.8	Gibbs-Ensemble und Boltzmann-Ensemble . . . . .	282
5.9	Kinetische Theorie . . . . .	283
5.10	Schlußbemerkungen . . . . .	286
6.	Kapitel Komplexität und Kenntnistransfer . . . . .	288
6.1	Nichtlineare Dynamik unter Nichtgleichgewichtsbedingungen und die Modellierung von Komplexität . . . . .	289
6.2	Materialwissenschaften . . . . .	290
6.3	Schwellenwertphänomene in der Zelldynamik . . . . .	297
6.4	Modellierung der Klimaentwicklung . . . . .	300
6.5	Wahrscheinlichkeitsverhalten und Anpassungsstrategien staatenbildender Insekten . . . . .	307
6.6	Selbstorganisation in Humansystemen . . . . .	316
	Anhang I Lineare Stabilitätsanalyse . . . . .	322
I.1	Grundgleichungen . . . . .	322
I.2	Das »Prinzip« der linearen Stabilität . . . . .	326
I.3	Die charakteristische Gleichung . . . . .	327
I.4	Beispiele . . . . .	331
I.5	Systeme mit chaotischer Dynamik . . . . .	334
	Anhang II Bifurkationsanalysis . . . . .	337
II.1	Allgemeine Eigenschaften . . . . .	337
II.2	Die Entwicklung der Lösungen in Störungsreihen . . . . .	340
II.3	Die Bifurkationsgleichungen . . . . .	342
	Anhang III Störung resonanter Bewegungen in nicht-integrablen konservativen Systemen. . . . .	345
III.1	Die Twist-Abbildung . . . . .	345
III.2	Wirkung der Störung im Falle rationaler Rotationszahlen. . . . .	347
III.3	Homokline Punkte. . . . .	350

Anhang IV	Rekonstruktion der Dynamik komplexer Systeme aus Zeitreihen. Anwendung auf Klimaschwankungen . . . . .	355
IV.1	Einführende Bemerkungen . . . . .	355
IV.2	Theoretischer Hintergrund für die Datenanalyse . . . . .	358
IV.3	Der Klimaattractor . . . . .	359
IV.4	Schlußbemerkung und Ausblick . . . . .	362
	Literaturempfehlungen . . . . .	363
	Namenregister . . . . .	377
	Sachregister . . . . .	379