

Selbstorganisation und Strukturbildung

Vorlesung an der Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Physik und Astronomie
Sommersemester 2003

D. M. Herlach, D. Holland-Moritz, A. Wieck

Die Erscheinungsformen von Strukturmustern, die uns in unserer natürlichen Umgebung begegnen, sind fast unendlich groß. Es wird in dieser Vorlesungsreihe darum gehen, zunächst einmal in diese Vielfältigkeit sowohl geordneter Muster als auch ungeordneter Muster und Strukturen einzuführen. Wir wollen versuchen, in dieser Mannigfaltigkeit gemeinsame Gesetzmäßigkeit vorzufinden, und einen Formalismus zu entwickeln, der es uns erlaubt, zumindest diese Gesetzmäßigkeiten zu beschreiben. Dazu ist das Konzept der fraktalen Geometrie ein wirkungsvolles Werkzeug.

Wir wissen alle, dass unter Änderung der thermodynamischen Variablen wie Temperatur und Druck Systeme ihre Strukturen und Mustern diskontinuierlich, aber auch kontinuierlich ändern können. Im ersten Fall sprechen wir von Phasenübergängen erster Art, die zwar im Rahmen der Thermodynamik phänomenologisch beschrieben werden, wo aber bis jetzt noch eine überzeugende atomistische Theorie fehlt. Für den Fall der Phasenübergänge 2. Art wurden in den letzten Jahrzehnten Werkzeuge entwickelt, die es erlauben, den universalen Charakter solcher Übergänge auf den Grundlagen der Skalengesetze zu verstehen. Das theoretische Konzept hierzu wurde um 1970 entwickelt und basiert auf der Renormierungsgruppenmethode. Der große Erfolg dieser Arbeiten besteht darin, die Gesetzmäßigkeiten Phasenübergänge 2. Art unabhängig vom betrachteten System einheitlich durch die gleichen Skalengesetze zu erfassen. Hierfür erhielt Kenneth Wilson 1982 den Nobelpreis.

Eine in der jüngeren Vergangenheit zunehmend attraktiv gewordene Methode um universelle Phänomene zu beschreiben, ist die Perkolationstheorie. Deren Grundzüge und Anwendung auf einfache Beispiele wird uns beschäftigen. Sie gestaltet nicht nur die einfache Beschreibung von Gemeinsamkeiten bei Zustandsänderungen, sondern erlaubt auch die quantitative Voraussage von charakteristischen Parametern während dieser Zustandsänderungen.

Ein sehr schönes anschauliches Beispiel für Strukturbildung durch Selbstorganisation sind Dendriten. Dendritische Morphologien treten in großer Vielzahl nicht nur in der unbelebten, sondern auch in der belebten Natur auf. Sie entstehen stets unter Nicht-Gleichgewichtsbedingungen unter dem Einfluss von Gradienten, z. B. der Temperatur oder in mehrkomponentigen Systemen der Konzentration.

Wichtig für die Entstehung von Strukturen sind die Wachstumsvorgänge, unter denen sie sich bilden. Wir werden Modelle kennenlernen, die Wachstumsvorgänge bei der Strukturbildung durch Selbstorganisation zu beschreiben.

Ein wichtiges Konzept dieser Wachstumsmodelle basiert auf dem "Random walk". Damit ist gemeint, dass Strukturen sich durch willkürliche Bewegungen, z. B. von Atomen bei Diffusionsvorgängen bilden. Ihnen allen bekannt ist die Braun'sche Bewegung. Diffusionsvorgänge sind für Wachstumsprozesse von fundamentaler Bedeutung, da durch sie Wärme und /oder Masse transportiert werden. In der Behandlung des "Random walk" wird auch eine Voraussetzung geschaffen, um das deterministische Chaos zu besprechen. Viele Abläufe in der Natur erscheinen uns als chaotisch als Ergebnis vieler Freiheitsgrade des Systems. In der Wirklichkeit gibt es aber auch Systeme mit nur sehr wenigen Freiheitsgraden, die sich chaotisch verhalten, obwohl sie deterministisch wenigen Bewegungsgleichungen gehorchen. Entscheidend für das chaotische Verhalten sind die Anfangs- bzw. Randbedingungen, deren Einfluss auf den Bewegungsablauf sich im Laufe der zeitlichen Entwicklung solcher Bewegungsabläufe rasch ändern kann. Als Beispiel sei der Schmetterlingsschlag in Rio genannt, der sich durch Änderung der Randbedingung auf das Wetter in Europa auswirkt.

Zum Schluss dieser Vorlesungsreihe werden noch zwei konkrete Beispiele für Selbstorganisation und Strukturbildung besprochen, die in der angewandten Physik von großer Bedeutung sind. Das sind Turbulenzen in Flüssigkeiten, die z. B. den Strömungswiderstand in Öl-pipelines beträchtlich vergrößern können und die Selbstorganisation von niederdimensionalen Quantenstrukturen auf Halbleiteroberflächen.

Wir haben insgesamt 10 Vorlesungstermine. Diese Zeit wird nicht ausreichen, alle die angesprochenen Phänomene detailliert zu behandeln. Dazu brauchte man sicherlich eine Größenordnung mehr an Zeit. Wir wollen versuchen Ihnen während dieser Vorlesung zumindest die Konzepte vorzustellen, mit denen Selbstorganisation und Strukturbildung verstanden werden kann. Ebenfalls soll dabei ein Eindruck vermittelt werden, wie vielfältig und universell diese Konzepte sind, die nicht nur in der Physik, sondern auch in Chemie und Biologie zur Anwendung kommen. Sie gewinnen daher eine zunehmende interdisziplinäre Bedeutung.

Dieter Herlach

Inhalt:

1. Einführung (Herlach)
2. Fraktale (Herlach)
3. Seltsame Attraktoren (Herlach)
4. Strukturänderungen durch Phasenübergänge (Herlach)
5. Perkolation (Herlach)
6. Ein Beispiel: Dendriten (Herlach)
7. Wachstumsmodelle (Holland-Moritz)
8. "Random walk" (Holland-Moritz)
9. Deterministisches Chaos (Holland-Moritz)
10. Turbulenzen in Flüssigkeiten (Holland-Moritz)
11. Selbstorganisation von niederdimensionalen
Quantenstrukturen auf Halbleiteroberflächen (Wieck)