

Komplexe Systeme

Systeme bestehen aus klar abgegrenzten einzelnen Komponenten, die im Miteinander eine Funktionseinheit bilden. Einfache Systeme bestehen aus wenigen Komponenten; ihr Verhalten lässt sich vollständig verstehen und vorhersagen. Betrachten wir als Beispiel den freien Fall eines Balls in der Luft, so besteht dieses einfache System aus dem Ball, der von der Schwerkraft angezogen und vom Luftwiderstand gebremst wird. Betrachtet man nun mehrere, miteinander fallende Bälle, so wird das System komplex: Die Luftwirbel hinter jedem Ball beeinflussen jetzt die Fallbewegung der folgenden auf eine Weise, die sich nicht aus der Fallbewegung eines einzelnen Balls vorhersagen lässt. *Komplexe Systeme* enthalten eine Vielzahl von Komponenten, die zusammenwirken und damit eine Funktionseinheit bilden. Dabei selbstorganisiert sich die »emergente« Funktion des Systems ohne jede übergeordnete Kontrollinstanz¹.

DIE KOMPLEXITÄT DES LEBENS

In der Natur dominieren komplexe, sich selbst organisierende Systeme. Sie sind Teil unseres Alltags, von Ökologie, Soziologie und Ökonomie bis hin zur Biologie, Chemie, Medizin und Physik. In vielen Systemen lassen sich einander ganz ähnliche räumliche und zeitliche Strukturen beobachten.

So lässt sich beispielsweise fragen: Sind die großräumigen, periodischen Muster von Sanddünen verwandt mit den nur wenige Nanometer großen Mikrostrukturen so genannter Blockcopolymeren? Oder: Ähnelt die Turbulenz im Innern von Sternen der in einer frisch umgerührten Tasse Kaffee? Gibt es Querbeziehungen zwischen dem Herzflimmern und der dynamischen Ansammlung sozialer Amöben? Erstaunlicherweise lautet die Antwort stets: Ja.

Mit Hilfe von Computersimulationen und moderner Experimentiertechnik gelingen Forschern heute detaillierte Analysen der räumlichen und zeitlichen Entwicklung komplexer Systeme – nicht nur von räumlich ausgedehnten Systemen², sondern auch von stark miteinander gekoppelten Netzwerken.

Höhere Lebensformen entwickeln sich durch kollektive Organisation zahlloser Zellen. Aber schon die Zellen selbst bilden komplexe Systeme. Hoch entwickelte genetische Regelkreise schaffen Strukturen, die sich selbst erhalten oder Teil eines übergeordneten vielzelligen Organismus sind³. Hier, sowohl auf der Ebene der Ein- als auch der Vielzeller, stehen die Forscher noch vor fundamentalen Herausforderungen, um die Prinzipien hinter den Entwicklungsprozessen zu verstehen, die zu den komplexen Mustern und Formen führen⁴ (Bild 1).

VON HERZ UND VERSTAND

Unter allen Organen unseres Körpers sind das Herz und das Gehirn einzigartig – beide verdanken ihre Funktionen der kollektiven Dynamik von Millionen stark wechselwirkender Zellen, welche sowohl in ihrer Konnektivität wie auch räumlich optimal organisiert sind. Die Kontraktion des Herzmuskels steuert eine nichtlineare elektrische Erregungswelle. Normalerweise breitet sie sich geregelt aus und das Herz pumpt effizient. Beim Herzflimmern jedoch entstehen wirbelartige, rotierende, chaotische elektrische Anregungs- und Kontraktionsmuster⁵ (Bild 2). Dieses elektromechanische Versagen fordert allein in Europa jährlich geschätzte 738000 Todesopfer. Dennoch sind die physikalischen Prozesse der Dynamik und Kontrolle weiterhin ein fundamentales wissenschaftliches Rätsel.

Auch im Hirn bilden ähnliche nichtlineare elektrische Erregungswellen die

Grundlage für alle geistigen Leistungen. Hier entsteht aus der hohen Anzahl von Verknüpfungen und der räumlichen Komplexität des neuronalen Netzwerks eine koordinierte Aktivität von Abermillionen von Nervenzellen, die den menschlichen Verstand hervorbringt.

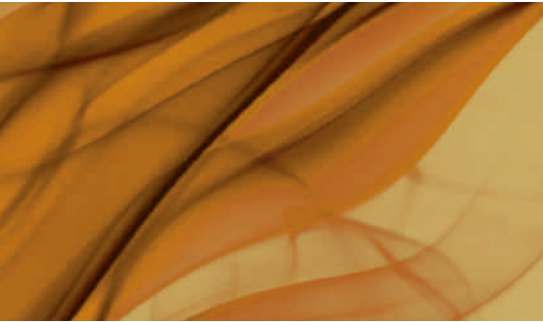
Die Verarbeitung der Wahrnehmungen in Echtzeit wechselwirkt dabei mit dem langsamen Lernprozess der Sinnesorgane durch die Änderung der Stärke ihrer synaptischen Verbindungen^{6,7}. Es ist jedoch nicht ausreichend, das Gehirn nur als ein komplexes dynamisches System zu betrachten: So lässt sich die Verarbeitung hierarchisch strukturierter Reizsequenzen (Sätze) auf der Systemebene damit beschreiben, dass zunächst lokale Verbindungsmuster entstehen, die dann unmittelbar danach zu hierarchischen Elementen verknüpft werden⁸. Daher ist es zum Verstehen des Verstands notwendig, seine emergenten Funktionen der Informationsverarbeitung zu beschreiben und zu analysieren. Offenbar unterscheidet sich der Mensch von anderen Primaten durch seine Fähigkeit, die Regeln hinter hierarchischen Strukturen zu erkennen. Viele Fortschritte beim Verständnis neuronaler Funktion werden daher dadurch erzielt, dass Forscher Methoden der Musterbildung, der mathematischen Statistik und der Entscheidungstheorie einsetzen⁹.

TURBULENTE ZEITEN

Der komplexe Zustand der Turbulenz tritt in zahlreichen Gebieten der Physik, Chemie, Biologie und der Ingenieurwissenschaften in verschiedenster Weise in Erscheinung. Sie tritt immer dann auf, wenn die viskosen Reibungskräfte einer Flüssigkeit klein gegenüber den dominierenden antreibenden Kräften sind. Das ist bei den meisten natürlichen und technischen Strömungen der Fall¹⁰. Turbulenz ist ein grund-

Vorhersage und Kontrolle von Pandemien könnten durch Grundlagenforschung am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation verbessert werden. Infizierte Menschen transportieren Bakterien und Viren und übertragen sie auf andere. Die Forscher untersuchten Daten der Geldschein-Verfolgungswebsite

www.wheresgeorge.com und zeigten, dass sich die Ausbreitung von Pandemien mit einem aus zwei Parametern bestehenden Random-Walk-Modell erstaunlich genau beschreiben lässt (Brockmann, D. et al., *Nature* 439, 462, 2006).



- Wirken die Komponenten eines Systems in geeigneter Weise zusammen, so zeigt sich die Emergenz neuer Funktionen und Eigenschaften.
- Für ihre Dynamik und Struktur benötigen komplexe Systeme Energie. Ändert sich eine Komponente, hat dies Folgen für das Gesamtsystem.
- Theoretische Modelle müssen Raum- und Zeitskalen integrieren und die Selbstorganisation einzelner Systemelemente, aber auch kollektiver Phänomene berücksichtigen.

legendes Thema sowohl der Strömungs- forschung als auch der Erforschung dynamischer Systeme. Dort stellt sie noch immer angewandte Mathematiker und Informatiker vor fundamentale Herausforderungen. Ihre Erforschung bringt deshalb unterschiedlichste Wissenschaftler zusammen, von Experten in den Geowissenschaften, die den Austausch von Wärme, Kräften und Materie in der terrestrischen Biosphäre studieren, über Physiker, die heiße Plasmen in Fusionsexperimenten zähmen wollen, bis hin zu Mathematikern, die neue numerische Methoden entwickeln.

KOMPLEXE TECHNISCHE SYSTEME

Die Erforschung komplexer Systeme befasst sich darüber hinaus auch mit künstlich geschaffenen Systemen, welche unsere Umwelt in dramatischem Ausmaß verändern. Eine wichtige Frage lautet: Lassen sich die Vorräte und Ressourcen der Erde besser nutzen? Bis jetzt hat die Menschheit bei der Auswahl, Produktivität und Nachhaltigkeit chemischer und biotechnologischer Produktionsprozesse große Fortschritte gemacht. In der Zukunft sind jedoch weitere Durchbrüche in der Prozess- und Systemtechnik nötig, um den Übergang von fossilen Treibstoffen und petrochemischen Produkten hin zu erneuerbaren Materialien und Energien zu bewerkstelligen. Dafür bedarf es neuer theoretischer und experimenteller Ansätze für die Analyse und den Entwurf chemischer und biochemischer Produktionsprozesse. Die Komplexitätsforschung bietet hier große Chancen, etwa einen geschlossenen Kohlendioxidkreislauf zu schaffen oder Materialien und Produkte mit neuartigen Funktionen zu entwickeln¹¹. Ein besseres Verständnis komplexer Systeme wird uns somit neue Möglichkeiten eröffnen, Ergebnisse aus der Grundlagenforschung in praktische Anwendungen zu übertragen. Die Herausforderung an die Wissenschaftler ist es, Widersprüche und Ähnlichkeiten, die in physikalischen, biologischen und chemischen Systemen zu finden sind, in Einklang zu bringen, unabhängig davon, ob es sich um natürliche oder künstliche Systeme handelt.

Bild 1 | Gewebe sind in Zellbereiche unterteilt, die durch scharfe Grenzflächen voneinander getrennt sind.

- a In den Flügeln werden zwei Zellbereiche durch die Markierung mit grün fluoreszierenden Proteinen sichtbar.
- b Simulation der Grenze zwischen zwei Zellbereichen, wie sie durch Spannungen in der Zellbindung entstehen

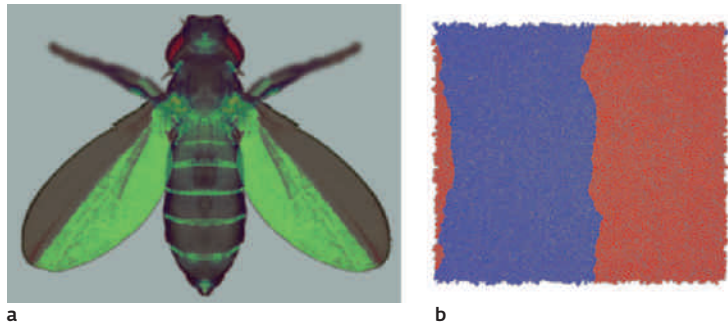
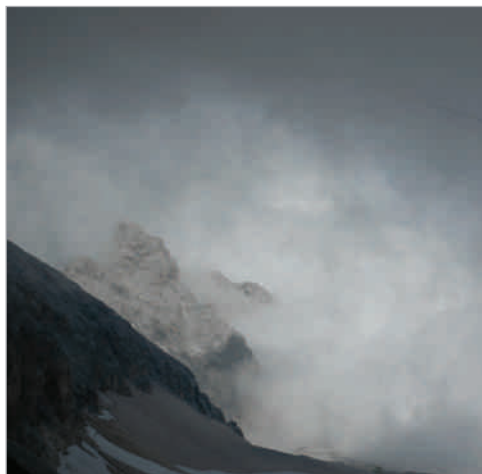
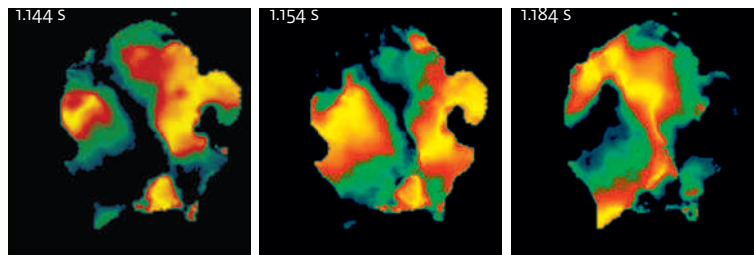


Bild 2 | Herzflimmern

Auf der Oberfläche des Herzgewebes breiten sich die elektrischen Erregungswellen in chaotischen Mustern aus (Ausschnitt: 6 x 6 cm²; schwarz: ruhendes Gewebe; gelb: angeregtes Gewebe). Die fehlende Synchronisation lässt das Herz versagen und führt zum Tod.



links | Dynamik der Wolken: Das Bild zeigt Turbulenzen in Wolken auf der Zugspitze in 2700 Meter Höhe. Die Kenntnis der Dynamik von Teilchen (Eis oder Wasser) in turbulenten inhomogenen Strömungen ist unbedingt notwendig für das Verständnis der Wolken und Niederschlagsbildung. Die Dynamik der Wolken bildet den größten Unsicherheitsfaktor bei der Klimavorhersage¹⁰.

Bild 1: links: Christian Dahmann, Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik; rechts: Frank Jülicher, Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme; Bild 2: Stefan Luther, Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation; Photo unten: Haitao Xu, Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation