

Von Elektronen bis zu komplexen Systemen

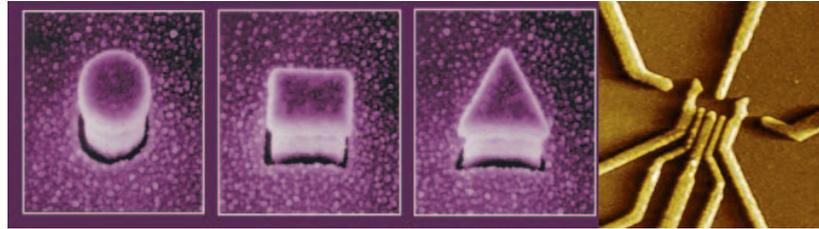
Highlights aus dem Programm des Arbeitskreises Festkörperphysik (AKF)

Rainer Scharf

Hundert Jahre nach Einsteins annus mirabilis präsentiert sich die Physik lebendig und offen. Das zeigt sich bereits im umfangreichen Programm des AK Festkörperphysik, des größten Arbeitskreises der DPG. Die hier repräsentativ herausgegriffenen Haupt- und Plenarvorträge vermitteln einen guten Eindruck vom breiten Themenspektrum, das von einzelnen Elektronen bis hin zu weltumspannenden Netzwerken reicht.

Auf besonderes Interesse stieß während der Jahrestagung das Thema Quantencomputer. Hier geht es derzeit vor allem darum, Quantenbits (Qubits) in quantenmechanischen Zweiniveausystemen möglichst lange zu speichern, mit anderen Qubits wechselwirken zu lassen und das Ergebnis auszulesen. Das Hauptproblem besteht darin, die Qubits weitgehend von ihrer Umwelt zu isolieren und dennoch leichten Zugriff auf sie zu haben, um sie manipulieren und messen zu können. Atomphysiker haben inzwischen mit isolierten Ionen in magneto-optischen Fallen mehrere Qubits gleichzeitig gespeichert und mit ihnen einfache Berechnungen durchgeführt. Trotz dieser großen Fortschritte glaubt man, dass sich leistungsfähige Quantencomputer mit tausenden von Qubits eher mit den Methoden der Festkörperphysik herstellen lassen.

Leo Kouwenhoven und seine Mitarbeiter vom Kavli Institute of Nanoscience an der Technischen Universität Delft haben Qubits in den Spins einzelner Elektronen gespeichert, die in Halbleiter-Quantenpunkten festgehalten werden. Ein Magnetfeld gibt den beiden Spineinstellungen (\uparrow und \downarrow) unterschiedliche Energie, sodass man mit je einem Elektron ein Qubit speichern kann. Die Elektronen sitzen in 100 nm großen Potentialtöpfen im zweidimensionalen Elektronengas in der Grenzschicht einer GaAs/AlGaAs-Heterostruktur. Diese Potentialtöpfe werden durch negativ geladene Metallkontakte erzeugt, die auf der Heterostruktur aufliegen.



Mit der Form und Größe von Quantenpunkten lässt sich die Zahl der Elektronen, die darin enthalten sind, präzise kontrollieren. Quantenpunkte lassen sich

Mit einer elektrischen Spannung an den Kontakten lässt sich die Tiefe der Potentialtöpfe variieren, und damit die Zahl der hineinpassenden Elektronen. Wie viele Elektronen ein Quantenpunkt enthält, lässt sich mit Hilfe eines ladungsabhängigen Tunnelstroms durch einen benachbarten Quantenpunkt kontaktieren messen. Nachdem die Forscher ein einzelnes Elektron in einen Quantenpunkt injiziert haben, bestimmen sie dessen unbekanntes Spinrichtung durch eine Ladungsmessung (eine direkte Spinmessung war zu schwierig). Dazu stellen sie die Fermi-Energie des Elektronenreservoirs so ein, dass sie zwischen den Energien der beiden Spinzustände liegt. Dann kann das Elektron mit dem Spinzustand $|\downarrow\rangle$, der die höhere Energie hat, in das Reservoir tunneln, das Elektron mit dem Zustand $|\uparrow\rangle$ jedoch nicht. Aus der abschließend gemessenen Ladung des Quantenpunkts lässt sich dann die Spinrichtung ermitteln.

Die Messungen haben gezeigt, dass die Elektronen innerhalb von ca. 0,6 ms aus dem angeregten Zustand $|\downarrow\rangle$ in den Grundzustand $|\uparrow\rangle$ relaxieren. Etwa so lange kann der Quantenpunkt ein Qubit speichern. In dieser Zeit müssen alle auf das Qubit wirkenden Operationen und auch die Messung abgeschlossen sein. Das stellt hohe Anforderungen an die Rechengeschwindigkeit eines zukünftigen Elektronenspin-Quantencomputers.

Qubits lassen sich auch mit kollektiven Quantenzuständen realisieren, wie sie in Supraleitern auftreten. John Martinis von der University of Santa Barbara berichtete, wie man in supraleitenden Schaltkreisen

zudem relativ einfach mit Elektroden kontaktieren und könnten so einmal Bestandteile zukünftiger Quantencomputer sein. (Quelle: L. Kouwenhoven, TU Delft)

mit Josephson-Kontakten Qubits speichern, verändern, miteinander verschränken und schließlich auslesen kann. Beim Josephson-Kontakt sind zwei supraleitende Elektroden durch eine dünne Isolatorschicht voneinander getrennt, durch die Elektronen tunneln können. Aufgrund der nichtlinearen elektrischen Eigenschaften eines Josephson-Kontaktes lässt sich die Dynamik des Schaltkreises auf zwei Energieniveaus $|0\rangle$ und $|1\rangle$ beschränken. Mit einem Mikrowellenpuls kann man den Schaltkreis vom Grundzustand $|0\rangle$ in den Zustand $|1\rangle$ bringen.

Da supraleitende Schaltkreise nur wenig Dissipation aufweisen, lassen sich die Qubits im Prinzip sehr lange speichern. Tatsächlich liegen die beobachteten Kohärenzzeiten jedoch bisher nur bei 10 bis 100 ns, sodass ein Qubit sehr schnell gemessen werden muss. Dazu geben die Forscher einen sehr kurzen Spannungspuls auf den Schaltkreis, der die potentielle Energie des Schaltkreises verändert – mit unterschiedlichen Folgen für die Zustände $|0\rangle$ und $|1\rangle$. Befindet sich das System im Zustand $|0\rangle$, bleibt es dort. Aus dem Zustand $|1\rangle$ kann es hingegen in einen neuen Zustand tunneln, der sich von den Zuständen $|0\rangle$ und $|1\rangle$ um ein magnetisches Flussquant unterscheidet, das sich mit einem SQUID nachweisen lässt. Die Messung des Qubits dauert nur etwa 1 ns.

Mit diesem extrem schnellen Verfahren kann man auch miteinander verschränkte Qubits messen, ohne dass sich die Messungen gegenseitig beeinflussen. Dazu haben die Forscher zwei supraleitende Schaltkreise, die je einen Josephson-Kontakt enthielten, kapazitiv miteinander

gekoppelt. Das Ziel weiterer Arbeiten ist es, diese Kohärenzzeit zu verlängern, um eine größere Zahl von Operationen mit ein und zwei Josephson-Qubits zu ermöglichen.

Wachsende Nanowälder

Auch bei herkömmlichen Schaltkreisen sucht man nach neuen Wegen. Die Herstellung von Nanostrukturen nach der Top-Down-Methode wird schon bald an die Grenzen stoßen, die durch die eingesetzten lithographischen Verfahren vorgegeben sind. Linienbreiten von etwa 50 nm scheinen das Äußerste zu sein, was man auf diese Weise erreichen kann. Die Alternative ist die Bottom-Up-Methode, die die Selbstorganisation der Materie auf der atomaren Ebene nutzt, meinte Lars Samuelson vom Nanometer Structure Consortium an der Universität von Lund. Der gesteuerte Selbstaufbau von ein- und zweidimensionalen Heterostrukturen aus verschiedenen Halbleitermaterialien ermöglicht es, nanoelektronische Bauteile mit einer Größe von wenigen Nanometern bis hunderten von Nanometern herzustellen.

Die schwedischen Forscher haben mit Hilfe von etwa 20 nm großen Goldteilchen, die als Katalysatoren wirken, auf einer Unterlage 30 nm dicke Nanodrähte u. a. aus Galliumarsenid oder -phosphid wachsen lassen. Die Bestandteile des Drahtes werden aus der Gasphase abgeschieden, wobei sie sich direkt unter den Goldpartikeln in einer Wachstumszone ablageren. Auf diese Weise wächst langsam ein Nanodraht in die Höhe, an dessen Spitze das Goldteilchen sitzt. Mit Hilfe lithographischer Methoden gelingt es, die Goldkeime in einem regelmäßigen Muster anzuordnen, sodass ein geordneter Wald von Nanodrähten heranwächst, der z. B.

als photonischer Kristall genutzt werden kann.

Indem die Forscher das Molekülangebot in der Gasphase verändern, können sie in axialer Richtung des Drahtes Heterostrukturen wachsen lassen. Auf diese Weise lassen sich Tunneldioden herstellen, bei denen ein InAs-Draht durch eine 80 nm dicke InP-Barriere unterbrochen ist. Durch Änderung der Wachstumsbedingungen lässt sich auch die Zusammensetzung der Nanodrähte in radialer Richtung variieren. Dadurch wird es möglich, Drähte herzustellen, deren Kern aus GaAs von einem Mantel aus AlGaAs umgeben ist. Mit einem geeigneten Mantel kann man z. B. die optischen und elektrischen Eigenschaften des Kerns verbessern.

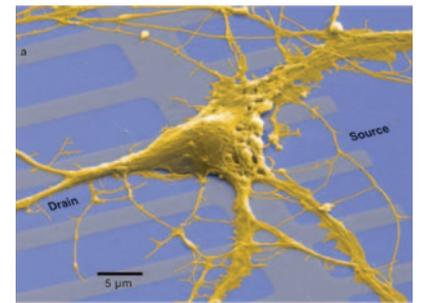
Da man die chemische Zusammensetzung, die Struktur und die Dimensionierung der Halbleiter-Nanodrähte vielfältig variieren kann, eröffnen sich zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten. Neben der schon erwähnten Tunneldiode sind dies Quantenpunkte für Einzelelektronentransistoren oder -speicher, Feldeffekttransistoren oder Fluoreszenzmarker für biomedizinische Anwendungen, meinte Samuelson. Außerdem könnte man Nanodrähte als Sonden für die Untersuchung von Nervenzellen benutzen oder mit ihnen das Wachstum des Axons der Neuronen lenken.

Im Kontakt mit den Nerven

Wie die vernetzten Nervenzellen im Gehirn ihre elektrischen Signale aufeinander abstimmen, ist nach wie vor unklar. Doch Peter Fromherz und seine Mitarbeiter am MPI für Biochemie in Martinsried haben einen Weg gefunden, die neuronalen Signale aufzunehmen und zugleich die Nervenzellen mit elektrischen Signalen zu stimulieren. Dazu ha-

ben sie Nervenzellen von Ratten oder Schnecken in einer elektrolytischen Lösung auf einem Mikrochip wachsen lassen. Eine solche Zelle sitzt dabei direkt über dem Gate eines Feldeffekttransistors, der mit einer isolierenden Siliziumoxidschicht überzogen ist. Wie sich zeigte, sitzt die Zelle nicht direkt auf der Chip-Oberfläche, sondern es befindet sich eine dünne Elektrolytschicht dazwischen.

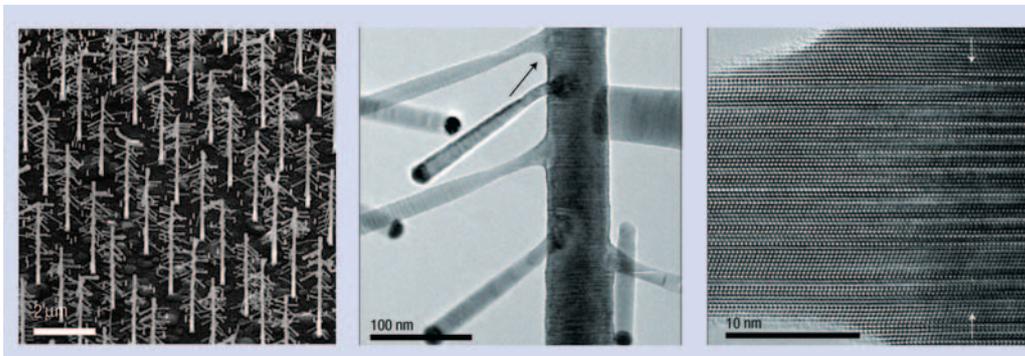
Wenn das Neuron „feuert“, fließt ein elektrischer Strom durch die Zellmembran in der Kontaktregion. Daraufhin fließt auch ein Strom durch die dünne Elektrolytschicht



Eine Nervenzelle einer Ratte lässt sich mit einem Feldeffekttransistor kontaktieren. (Quelle: P. Fromherz, MPI für Biochemie)

zwischen Zelle und Chip, der eine elektrische Spannung hervorruft, die ihrerseits über das Gate den Source-Drain-Strom durch den Feldeffekttransistor messbar verändert. Umgekehrt verursacht ein Spannungsstoß im Halbleitermaterial unter der Zelle, dass ein kapazitiver Stromstoß durch die Zellmembran fließt. Die dabei entstehende Spannung öffnet die Ionenkanäle in der Membran und erregt dadurch die Nervenzelle. Dass Neuronen und Transistoren tatsächlich miteinander kommunizieren, zeigten Experimente mit Schneckenneuronen. Wird ein Neuron durch Spannungspulse gereizt, so gibt es ein Spannungssignal ab, das sich wiederum mit dem Transistor messen lässt.

Die Forscher haben auch mehrere Neuronen auf einem Siliziumchip zu einem neuronalen Netz zusammenwachsen lassen. Sie fixieren die einzelnen Neuronen mit mikroskopisch kleinen „Lattenzäunen“ über den Transistoren. Wird ein Neuron elektrisch gereizt, dann kann die Reaktion eines zweiten, mit ihm synaptisch verbundenen Neurons als Spannungspuls nachgewiesen werden, und zwar mit Hilfe des unter dem zweiten Neuron liegenden Transistors. Auf diese Weise lässt



Mit Hilfe selbstorganisierender Prozesse lassen sich immer komplexere Nanostrukturen aufbauen, wie die hier gezeigten baumartigen Strukturen aus Galliumphosphid. Dabei kann man einen regelrechten „Nanowald“ (links) erzeugen. In der Mitte ist ein Teil eines einzelnen Nanobäumchens zu sehen, rechts die Vergrößerung der mit dem schwarzen Pfeil markierten Stelle. (Quelle: L. Samuelson, Univ. Lund)

wald“ (links) erzeugen. In der Mitte ist ein Teil eines einzelnen Nanobäumchens zu sehen, rechts die Vergrößerung der mit dem schwarzen Pfeil markierten Stelle. (Quelle: L. Samuelson, Univ. Lund)

sich die Informationsverarbeitung in neuronalen Netzen untersuchen. In Zusammenarbeit mit Infineon haben Fromherz und seine Mitarbeiter einen CMOS-Chip mit 16384 Transistoren entwickelt. Mit diesem Chip wird eine massiv parallele Beobachtung der neuronalen Aktivitäten von Gehirngewebe möglich, und das mit einer räumlichen Auflösung von weniger als $10\ \mu\text{m}$ und einer zeitlichen Auflösung von 0,5 ms. Der Weg zur elektronischen Neuroprothese oder gar zum neuroelektronischen Computer ist zwar noch weit, aber das Zusammenwachsen von Nervenzellen und Halbleiterchips eröffnet schon jetzt einzigartige Forschungsmöglichkeiten.

Elektronische Landschaften

Magnetische Mikro- und Nanostrukturen werden gegenwärtig intensiv erforscht, zum einen wegen ihrer großen Bedeutung für die Magnetspeichertechnologie, aber auch wegen ihrer oft überraschenden physikalischen Eigenschaften. Mit Hilfe der spinpolarisierten Rastertunnelmikroskopie und -spektroskopie ist es der Gruppe von Roland Wiesendanger an der Universität Hamburg gelungen, Spinstrukturen auf atomarer Skala sichtbar zu machen. Dabei wird eine Oberfläche mit unterschiedlich magnetischen Bereichen von der magnetisch beschichteten Spitze eines Rastertunnelmikroskops abgetastet. Der Tunnelstrom hängt davon ab, wie die Magnetisierung der Spitze und der Oberfläche zueinander orientiert sind. So lässt sich die Magnetisierung parallel oder senkrecht zur Oberfläche messen.

Mit der spinpolarisierten Rastertunnelmikroskopie haben die Hamburger Forscher Domänenstrukturen mit einer Auflösung im Nanometerbereich sichtbar gemacht. Die bisher kleinsten beobachteten Details waren 0,6 nm breite Domänenwände in einer ferromagnetischen Eisenschicht auf Wolfram. Die atomare Auflösung und die große Empfindlichkeit der spinpolarisierten Rastertunnelmikroskopie ermöglicht es, Antiferromagnetismus in atomaren Monolagen zu beobachten, in denen benachbarte Atome entgegengesetzt magnetisiert sind. Die Untersuchung einer Eisenmonolage auf einer Wolfram(001)-Oberfläche ergab dabei kürzlich eine Überraschung: Das Eisen zeigt einen antiferromagnetischen Grundzustand, obwohl es der pro-

totypische Ferromagnet ist und auf W(110)-Oberflächen ferromagnetische Monolagen bildet.

Die spinpolarisierte Rastertunnelspektroskopie erlaubt es, die elektronische Zustandsdichte einer magnetischen Oberfläche zu bestimmen, in Abhängigkeit von der Energie und der Spinrichtung der Elektronen. Mit diesem Verfahren haben die Hamburger Wissenschaftler den Einfluss eines einzelnen adsorbierten Sauerstoffatoms auf die magnetischen Eigenschaften einer Doppellage von Eisenatomen untersucht. Es zeigte sich, dass das Sauerstoffatom Elektronen mit einer bestimmten Spinausrichtung streut und die Elektronen stehende Wellen bilden. Da diese Wellen spinpolarisiert sind, lassen sie sich nur auf magnetischen Domänen mit der „richtigen“ Magnetisierung beobachten. Als zukünftige Herausforderungen nannte Wiesendanger die Bestimmung der Spinstruktur von Hochtemperatur-Supraleitern, die Untersuchung von Spinwellen und die Entwicklung von magnetischen Aufzeichnungsverfahren auf atomarer oder molekularer Skala.

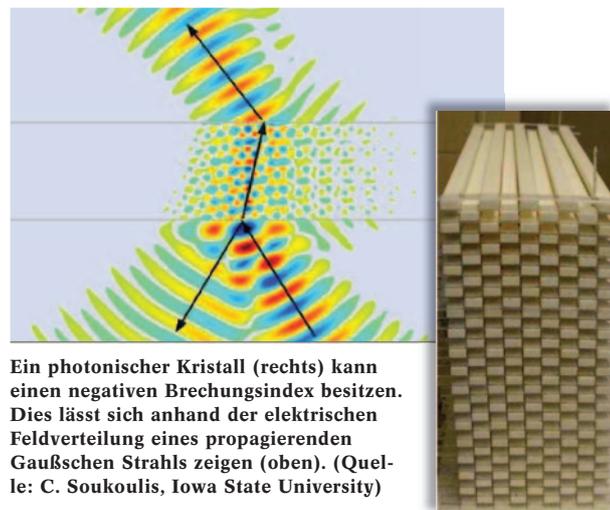
Linkshändige Materialien

Über die so genannten linkshändigen Materialien berichtete Costas Soukoulis von der Iowa State University. Diese Materialien zeichnen sich durch einen negativen Brechungsindex aus: In einem bestimmten Frequenzbereich werden sowohl ihre Dielektrizitätskonstante ϵ als auch ihre Permeabilität μ negativ. Schon 1968 hatte der russische Physiker Victor Veselago berechnet, dass diese Materialien das Licht in die „falsche“ Richtung brechen, d. h. vom Lot weg, und dass sie noch weitere ungewöhnliche optische Eigenschaften besitzen sollten. Aus linkshändigen Materialien kann man z. B. flache Linsen herstellen, die quaderförmig sind und dennoch einfallende Strahlung bündeln. Darüber hinaus wirken sie wie Superlinsen, die auch die abklingenden Wellen des optischen Nahfeldes fokussieren und dadurch eine Abbildung unterhalb der Beugungsgrenze ermöglichen.

Unter den natürlich vorkommenden Materialien scheint es keine „linkshändigen“ zu geben. Doch inzwischen ist es gelungen, verschiedene „Metamaterialien“ herzustellen, die für Mikrowellen oder für Infrarotstrahlung einen negativen Brechungsindex zeigen. Die speziel-

le Struktur dieser Materialien führt dazu, dass elektrische und magnetische Resonanzen bei derselben Frequenz auftreten und ϵ und μ negativ werden lassen. Die Metamaterialien bestehen aus Drähten und millimetergroßen geschlitzten Kupferringen bzw. aus knapp mikrometerlangen Goldstäbchen, die in einem periodischen Gitter angeordnet sind. Wie frühere Experimente zeigten, bricht das Metamaterial aus Kupfer die Mikrowellen tatsächlich vom Lot weg.

Auch photonische Kristalle mit der richtigen Bandstruktur können einen negativen Brechungsindex besitzen. Das zeigen Berechnungen und Experimente, die Soukoulis und seine Mitarbeiter durchgeführt haben. Der von ihnen hergestellte zweidimensionale photonische Kristall besteht aus zentimeterdicken Stäben, die in Form eines Dreiecksgitters übereinander geschichtet sind. Je nach Ausbreitungsrichtung der einfallenden Mikrowellen variiert der Brechungsindex zwischen $-0,97$ und $-1,22$. Wie erwartet, bricht der photonische Kristall die Mikrowellen vom Lot weg und wirkt wie eine Superlinse. Die vielen Möglichkeiten, die die Materialien mit negativem Brechungsindex



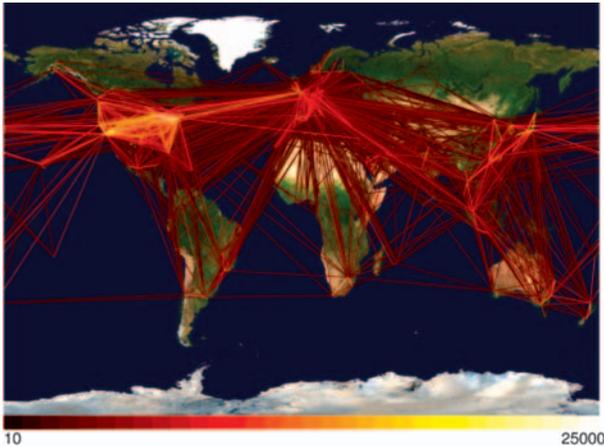
Ein photonischer Kristall (rechts) kann einen negativen Brechungsindex besitzen. Dies lässt sich anhand der elektrischen Feldverteilung eines propagierenden Gaußschen Strahls zeigen (oben). (Quelle: C. Soukoulis, Iowa State University)

eröffnen, haben Physiker und Ingenieure enorm motiviert, nach praktischen Anwendungen zu suchen, betonte Soukoulis. Dabei würden viele fundamentale optische und elektromagnetische Phänomene neu überdacht.

Komplexe Systeme

In den letzten Jahren hat die Erforschung komplexer Systeme mit den Methoden der Physik großes Interesse in der Öffentlichkeit gefunden. Die Schwankungen der Börsenkurse, die Stärke und

Abfolge von Erdbeben oder die Eigenschaften von Netzwerken sind bekannte Beispiele. Viele makroskopische Systeme zeigen ein auffälliges Verhalten, bei dem Perioden mit relativ ruhiger Entwicklung von Ausbrüchen hektischer Aktivität unterbrochen werden, stellte Henrik Jeldtoft Jensen vom Imperial College in London fest. Das sei gewissermaßen ein Charakteristikum komplexer Systeme. Da sie aus vielen, miteinander gekoppelten Komponenten bestehen, ist es



Das weltumspannende Netz der zivilen Flugverbindungen (links) war der Ausgangspunkt für ein stochastisches Modell, mit dem sich die Ausbreitung

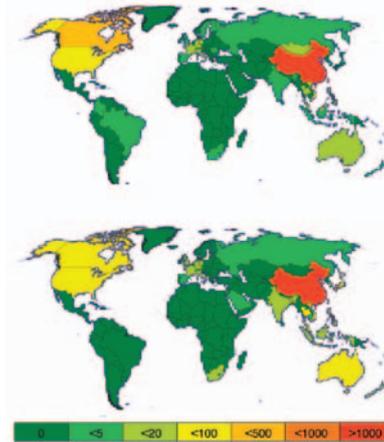
unwahrscheinlich, dass schon die erste, zufällige Konfiguration die Wechselwirkungen optimiert. Solch ein System ist in der Regel in einem metastabilen Zustand mit großer Frustration und Spannung.

Unter der Wirkung der Spannung entwickelt sich ein komplexes System langsam, wobei relativ kleine Fluktuationen die Stabilität des metastabilen Zustands austesten. Doch gelegentlich findet eine plötzliche, kohärente Umordnung von Systemkomponenten statt, die wie eine Schneelawine oder ein Erdbeben das System irreversibel verändert. Solche Vorgänge werden auch von der Theorie der selbstorganisierten Kritikalität beschrieben, die aber in erster Linie zu erklären versucht, wieso eine Dynamik einen stationären kritischen Zustand annimmt, dessen Eigenschaften sich mit Potenzgesetzen beschreiben lassen. Die von Jensen untersuchten komplexen Systeme erreichen hingegen keinen stationären Zustand, sondern sie gelangen nach jedem „Beben“ in eine neue, etwas stabilere Konfiguration.

Diese schrittweise Optimierung hat unter anderem zur Folge, dass die Wartezeit zwischen zwei „Be-

ben“ linear mit dem Alter des Systems anwächst. So hat man z. B. für die biologische Makroevolution beobachtet, dass das Tempo, mit dem Arten in den letzten 470 Millionen Jahren ausgestorben sind, langsam abgenommen hat – vom Artensterben in historischer Zeit einmal abgesehen. Eine ähnliche Tendenz sieht man auch in der Dynamik von Spingläsern oder im Langzeitverhalten von geologischen Verwerfungen.

In einem speziellen Modell untersuchte Jensen etwa, wie mag-



von Epidemien, wie z. B. SARS (rechts), beschreiben lässt. (Quelle: T. Geisel, MPI für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen)

netische Flusslinien in einen Supraleiter zweiter Art, der sich in einem Magnetfeld befindet, eindringen und sich in ihm anordnen. Die Flusslinien stoßen sich ab und können zudem an Störstellen hängen bleiben. Wie Monte-Carlo-Simulationen gezeigt haben, werden Zeiten stetiger Entwicklung unterbrochen von plötzlichen Änderungen der Dichte und Anordnung der Flusslinien. Dabei nimmt die Wartezeit zwischen solchen Aktivitäten mit dem „Alter“ des Systems zu. Die metastabilen komplexen Systeme zeigen ein universelles Verhalten, das sich vom Verhalten stationärer oder im Gleichgewicht befindlicher Systeme deutlich unterscheidet.

Netzwerke und Epidemien

Viele komplexe Systeme haben die Form von Netzwerken, die aus zahlreichen Knoten und vielen paarweisen Verbindungen bestehen. Beispiele sind das Funktionsgeflecht der Zellproteine, das soziale Geflecht einander persönlich bekannter Menschen oder das weltumspannende Netz der zivilen Flugverbindungen. Solche Netzwerke haben interessante Struktur- und Stabilitätseigenschaften. Darüber

hinaus können sie den Ablauf von bestimmten Prozessen entscheidend beeinflussen. Das hat die schnelle weltweite Ausbreitung von SARS im Frühjahr 2003 gezeigt, bei der das globale Flugliniennetz eine wichtige Rolle spielte. Theo Geisel und seine Mitarbeiter vom MPI für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen haben ein stochastisches Modell entwickelt, das die Ausbreitung von Epidemien beschreibt und dabei die mehr als zwei Millionen Flüge berücksichtigt, die jede Woche die 500 größten Flughäfen der Welt miteinander verbinden.

Das Modell teilt die urbane Bevölkerung in der Umgebung eines jeden Flughafens in vier Gruppen: krankheitsanfällige, latent aber noch nicht ansteckend kranke, ansteckend kranke und immune gesunde. Die Verkehrsströme zwischen den Flughäfen und die Aufenthaltszeiten der Reisenden in der jeweiligen urbanen Bevölkerung haben die Forscher aufgrund von veröffentlichten Daten abgeschätzt. Für die weltweite Ausbreitung von SARS stimmen die Vorhersagen des Modells verblüffend gut mit den WHO-Daten überein.

Wenn irgendwo auf der Welt eine Epidemie ausgebrochen ist, dann ermöglicht es das Göttinger Modell, besonders gefährdete Regionen zu identifizieren. Außerdem erlaubt es abzuschätzen, welcher Prozentsatz einer urbanen Population geimpft werden muss, um die Epidemie einzudämmen. Auch durch Beschränkung des Flugreiseverkehrs kann man eine Epidemie aufhalten. Dabei ist es, den Simulationen zufolge, wesentlich wirksamer, bestimmte Städte oder urbane Gebiete zu isolieren, als Hauptfluglinien stillzulegen. Angesichts eines stetig zunehmenden Flugverkehrs wächst die Gefahr globaler Epidemien. Das Göttinger Modell gestattet es, mögliche Abwehrmaßnahmen zu testen und dadurch im Ernstfall viele Menschenleben zu retten.