

Alles so furchtbar kompliziert

Die Wissenschaft der Komplexen Systeme setzt sich mit den radikal veränderten Realitäten der Gegenwart auseinander. Die Vordenker forschen am renommierten Santa Fe Institute – und in Wien. Was genau ist Complex Science? Und warum kann man damit vielleicht die Welt retten?

VON VERENA AHNE

Es kracht im Weltwirtschaftssystem. Prognosen werden nach unten korrigiert, vermeintlich sichere Gewinne in hohe Verluste umgewandelt. Die Politik rudert, Fachleute widersprechen einander und kurz darauf sich selbst. Auf die Frage, ob der Eindruck stimme, sie alle wüssten nicht mehr genau, was sie tun, antwortete Luxemburgs Premier und Eurozonenvorsitzender Jean-Claude Juncker jüngst schlicht mit Ja.

Da hieß es, man habe einen gut funktionierenden Wirtschaftsraum, eine sichere Währung, vor allem: die Sache im Griff. Und jetzt sind all die mikro- und makroökonomischen Modelle, auf denen die Entscheidungen unserer Banken und Staaten basieren, am Ende?

Noch ein Ja. Diesmal von einer Hand voll kluger Köpfe: Physikerinnen und Physiker, die sich mit so genannten Komplexen Systemen beschäftigen, waren seit Jahren vor der Unzulänglichkeit der gängigen Konzepte. „Wirtschaft ist nichts für Ökonomen“, postulierte Stefan Thurner, Professor am Institut für Wissenschaft Komplexer Systeme an der Meduni Wien, schon letztes Jahr. Genau wie Gehirne, Ameisenstaaten, Vogelschwärme, genetische Netzwerke oder die Biosphäre ist Wirtschaft ein Komplexes System. Und um damit umgehen zu können, braucht es andere Werkzeuge. Und ein neues Denken.

Die Idee, Systeme systemisch zu betrachten, ist natürlich so neu nicht: Ansätze finden sich in den frühesten Schriften der Menschheit, etwa im chinesischen I Ging oder bei Philosophen der Antike. Richtig

populär wurde sie Mitte des vorigen Jahrhunderts, genährt durch die **Kybernetik** und die etwa zeitgleich entwickelte Allgemeine Systemtheorie des aus Wien stammenden Biologen Karl Ludwig von Bertalanffy. Sie war Grundlage für Entwicklungen wie die Informatik, die **Spieltheorie**, die systemische (Familien-)Therapie oder die Ökologiebewegung, die die Eindimensionalität der Wissenschaften als überkommen anprangerte und „nichtlineares“, „ganzheitliches“ Denken predigte. Theoretisch also alles da.

„Theoretisch ja“, so Thurner. „Viele schöne Thesen. Aber keine Beweise, keine Modelle, mit denen die Vorhersagen möglich wären, die wir heute so dringend brauchen.“ Denn es gibt ein Problem mit dem System: Steigt die Zahl der wechselwirkenden Teile über die Größe etwa einer Familie oder eines spieltheoretischen Versuchs mit ein paar Teilnehmern hinaus, wird es schwierig zu sa- ▶

Kybernetik: Nach ihrem Begründer Norbert Wiener die „Wissenschaft der Steuerung und Regelung von Maschinen, lebenden Organismen und sozialen Organisationen“. Berücksichtigte erstmals die Möglichkeit von Rückkopplung („Feedback“) und Selbstregulation in Systemen.

Spieltheorie: Beschreibt die rationale Entscheidungsfindung in Situationen mit mehreren Handelnden, die sich gegenseitig beeinflussen – eines der Fundamente der Wirtschaftstheorie. Bereits acht spieltheoretische Arbeiten wurden mit Nobelpreisen bedacht.

Task Force der Komplexen Systeme: Diese Experten suchen die Lösungen für eine total vernetzte Welt.



Geoffrey West, 71, Physiker

Sucht allgemeine Gesetzmäßigkeiten in physikalischen wie biologischen Systemen, die sich mathematisch beschreiben lassen. Arbeitet derzeit an einer „Theorie der Städte“. Seit 2005 Präsident des Santa Fe Institute in New Mexico. 2006 wurde West vom „Time Magazine“ zu den 100 einflussreichsten Personen der Welt gewählt.



Murray Gell-Mann, 82, Physiker

Liebt Antiquitäten und alte Sprachen. Studierte schon mit 15 an der Eliteuni Yale. Bereicherte die Teilchenphysik mit der Entdeckung der Quarks, wofür er 1969 den Nobelpreis erhielt. Eine der treibenden Kräfte hinter der Gründung des SFI und Wegbereiter der Komplexitätsforschung. Motto: „Um Komplexe Systeme zu verstehen, braucht es manchmal einen unverbrauchten Blick auf das Ganze.“



Dirk Helbing, 46, Physiker und Mathematiker

Professor für Modellbildung und Simulation an der ETH Zürich, externes SFI-Mitglied. Bekannt für Verkehrs- und Fußgängerflussmodelle, die etwa zeigen, wie Großveranstaltungen sicherer gemacht werden können (so teilt eine Säule knapp vor dem Ausgang die Menge, was die Gefahr verringert, im Panikfall zerquetscht zu werden).



Stuart Kauffman, 72, Mediziner und Biologe

Mitglied im amerikanischen „Club der Genies“, Tätigkeit an der University of Vermont im Nordosten der USA, etwas exzentrisches externes Mitglied des SFI. Kauffman glaubt, dass alle evolutionären Systeme an einem kritischen Punkt in einen anderen Zustand wechseln, ähnlich den Phasenübergängen von Wasser zu Eis. Damit sei die Entstehung des Lebens erklärbar, die explosive Vermehrung respektive das plötzliche Aussterben von Arten. 2006 gelang der mathematische Beweis dieser These.

Santa Fe Institute

Setzt seit zwei Jahrzehnten die Maßstäbe für die Komplexitätsforschung weltweit. Gegründet 1984, um Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftern verschiedener Disziplinen zu ermöglichen, gemeinsam in zwangloser Atmosphäre neue, revolutionäre Ideen zu entwickeln. Schon eines der ersten Projekte („Earth 2050“) widmete sich Fragen wie Nachhaltigkeit, globaler Erwärmung und gesellschaftlichen Entwicklungen im 21. Jahrhundert. Viele, die sich weltweit mit Komplexitätsforschung befassen, waren oder sind durch Aufenthalte, gemeinsame Projekte und externe Professuren eng mit dem SFI verbunden.



Albert-László Barabási, 44, Physiker und Ingenieur

Leiter des Barabási-Lab an der Northeastern University in Boston. Von Beginn an zentrale Figur der Netzwerktheorie („in sechs Schritten mit jedem Menschen verbunden“). Fand als Erster heraus, dass neue Knoten in Netzwerken bevorzugt an bereits gut etablierte Knoten anschließen. Zurzeit Konzentration auf das Mobilitäts- und Sozialverhalten, das er aus Handy- und Internetdaten ableitet.



Doyne Farmer, 59, Physiker

Der Mitbegründer der Chaostheorie entwickelte einen neuen Ansatz in der Ökonomie („Econophysics“). Wollte in seiner Hippie-Zeit reich werden mit der Vorhersage der Bahn von Roulettekugeln; wurde reich mit einem Hedgefonds, den er mit einem Modell fütterte, das aufgrund bestimmter Muster von Kursverläufen Aktien kauft oder verkauft. Heute Professor am SFI.

Im September lud Stefan Thurner (Bildmitte) zur „**European Conference on Complex Systems**“ nach Wien. Es kam das Who's who der Szene. Einige der insgesamt 700 klugen Köpfe erklärten sich spontan bereit, für profil wissen zu posieren.



REINER RIEDLER FÜR PROFIL

Karoline Wiesner, 35, studierte Physik in Deutschland und Schweden. Arbeitet heute an der Universität Bristol und beschäftigt sich mit mathematischen Beweisen bei Informationsverarbeitung und Quanteneffekten in Komplexen Systemen sowie mit allgemeinen Überlegungen zur Definition: Gibt es ein Naturphänomen Komplexität, oder sind alle Systeme ein bisschen anders?

Ricardo Hausmann, Ingenieurwissenschaftler und Ökonom, ist derzeit Professor in Harvard. Untersucht die Struktur der Güterproduktion von Ländern: Wie viele unterschiedliche Produkte gibt es? Wie erfolgreich werden sie exportiert? Wie ist deren Umfeld? Zieht daraus Schlüsse auf den (künftigen) Wohlstand des Landes. Annahme: Von Vorteil ist nicht Spezialisierung, sondern Diversifizierung.

Stefan Thurner, 42, studierte Elementarteilchenphysik und Finanzwissenschaft, wollte Musiker oder Koch werden. Professor am einzigen österreichischen Lehrstuhl für Komplexe Systeme an der Meduni Wien, externer Professor am Sante Fe Institute. Beschäftigt sich unter anderem mit Finanzmarktmodellen.

Madan Babu, 32, studierte Biotechnologie in Indien und ist heute Professor für Molekularbiologie in Cambridge. Arbeitet an Zellregulation auf unterschiedlichen Ebenen der Komplexität. Eine Anwendung ist die Schaffung künstlichen Lebens, etwa gezielt „programmierter“ Bakterien, die Krankheitssymptome oder Alterungserscheinungen im Körper auflösen.

Ed Bullmore, 51, Professor für Psychiatrie in Cambridge und spezialisiert auf Brain Mapping: die Kartierung des Gehirns, seiner Funktionen und Strukturen. Um aus den Datenfluten, die immer bessere Darstellungsmethoden wie MRT erbringen, sinnvollere Schlüsse ziehen zu können, hofft er auf Hilfe aus der Wissenschaft Komplexer Systeme.

gen, was weiter passiert. Nicht genug damit: Ab einer gewissen nicht vorhersagbaren Größe entstehen plötzlich neue, **unerwartete Eigenschaften**: im Gehirn Bewusstsein, bei Vögeln und Fischen Schwarmverhalten – auch bei Menschen, etwa wenn sie in einem übervollen Raum in Panik geraten oder auf den Finanzmärkten alle dasselbe tun. Der Fachterminus dafür lautet „Herding“: Menschen benehmen sich wie Vieh.

Jetzt ist das System nicht mehr nur kompliziert. Das berühmte „Mehr als die Summe seiner Teile“ ist entstanden: Komplexität.

Die Philosophie, die Geistes- und Sozialwissenschaften, deren Thema dieses „Mehr“ im Grunde ist, können keine zuverlässigen Prognosen liefern. Und weil kein Mensch die Dynamiken durchblicken kann,

die durch die Wechselwirkung Tausender Teile entstehen, setzten auch die Naturwissenschaften lieber auf Vereinfachung. Von der Physik bis zur Ökonomie, von der Medizin bis zur Biologie wurde über Jahrhunderte hinweg lieber seziert, zerteilt, heruntergebrochen, statisch betrachtet oder bestenfalls zu simplen „Wenn, dann“-Modellen verknüpft.

„Das hat uns weit gebracht“, konzediert Thurner. „Wir sind Auto gefahren auf dem Mond. Wir können jederzeit mit jedem anderen Menschen kommunizieren. Und wir schaffen es, King Kongs zu sein.“ Das ist Geoffrey Wests Bild, im September in Wien vorgetragen: „Ein

Mensch in Ruhe braucht 100 Watt Leistung. Wenn wir herumlaufen und Nahrung sammeln, brauchen wir vielleicht 250. Aber mit all unseren Gütern und Lebensgewohnheiten strahlen wir mit 11.000 Watt vor uns hin.“

Lauter Dreißigtonner. Dass das überhaupt geht, ist eine Leistung. Aber sieben Milliarden und pro Kopf alle 15 Jahre ein weiterer? Die Probleme wachsen. Nicht ein wenig, sondern exponentiell. Eine „systemische

Spekulative Investments

werden oft mit geborgtem Geld gemacht. Über die Höhe des Eigenanteils am Kredit lässt sich laut dem Finanzmarktmodell von Farmer und Thurner das Risiko für einen Crash beeinflussen. Ab einem Verhältnis von 10:1 geborgtes zu eigenem Geld steigt die Kollapswahrscheinlichkeit um Potenzen. Für Aktien empfiehlt das Modell ein Verhältnis von maximal 5:1. Bis 2009 handelten Investmentbanken in den USA bis 30:1.

„Ein Eingriff zu viel, und alles kippt ins Gegenteil. Wir nennen das Singularität: der Punkt, an dem es crasht“

Stefan Thurner,
Professor für Komplexe Systeme

Krise“ nannte Jean-Claude Trichet, noch bis November EZB-Präsident, die Entwicklungen, die Europa gerade beuteln. Auch der Klimawandel und die Tatsache, dass bald 80 Prozent der Menschen in **Städten** leben werden, provozieren systemische Krisen. Und diese lassen sich nicht mehr berechnen und schon gar nicht steuern, weiß Thurner. Eine Black Box: Wir stecken eine Intervention hinein – und haben keine Ahnung, was auf der anderen Seite herauskommt.

Bis jetzt hatten wir Glück: Denn eine weitere Eigenschaft Komplexer Systeme ist ihre Robustheit. Das heißt, sie halten lange viel aus: verzeihen Fehler, massive Eingriffe wie Bankenrettungen oder zu viel CO₂. Das System schlägt ein wenig aus, bleibt insgesamt jedoch intakt. Indes: „Ein Eingriff zu viel, ein unvorhergesehenes Ereignis, und alles kann ins Gegenteil dessen kippen, was erreicht werden sollte“, erklärt Thurner. „Wir nennen das Singularität: den Punkt, an dem es crasht.“ Von einem Augenblick zum an-

deren verändert sich das System – unvorhersehbar und radikal. „Dann haben wir weltweit Kirgistan. Oder einen verdörrten Amazonas, weil ein Hektar zu viel gerodet wurde. Etwas in der Art.“

Mit ihren Modellen möchte die Komplexitätsforschung solche Katastrophen verhindern. Wieder mit Modellen? „Nichts Theoretisches“, beruhigt **Doyme Farmer** und erklärt, was seine Wissenschaft seit etwa 20 Jahren anders macht. „Wir können es rechnen.“ Das wiederum wurde

erst durch den Computer möglich.

Die stetig wachsende Rechnerleistung erlaubt einerseits die Speicherung von Abermillionen Daten, vor allem aus dem Internet, wo jeder unserer Schritte Spuren hinterlässt – in Form von Einkäufen, Mails, Kontobewegungen oder der Teilnahme an Social Net-

Megacitys: Jede Woche wachsen die Städte der Welt um eine Million Menschen. Umso erschreckender die Potenzgesetze, die laut Geoffrey West in Städten wirken: Alles Lebendige, von Zellen bis zu Wäldern, verbraucht mit jeder Verdoppelung der Größe nur um 75 Prozent mehr Energie. Menschen hingegen brauchen mit jeder Verdoppelung einer Stadt um 115 Prozent mehr Energie. Dieses Gesetz gilt zwar auch für Positives wie Innovationskraft, aber genauso für Ressourcenverbrauch, Umweltverschmutzung und Kriminalität. Exponentielles Wachstum muss früher oder später zum Zusammenbruch führen. Verhindert wird er nur durch Innovationen. Doch auch die müssen in immer kürzeren Abständen erfolgen, um mit dem Wachstum Schritt zu halten.

Eigenschaften Komplexer Systeme

Sie bestehen aus Einzelteilen (Zellen, Genen, Individuen ...), die in nicht linearer Wechselwirkung miteinander stehen. Ab einer bestimmten Anzahl entwickelt das System neue Eigenschaften („Emergenz“) wie Stabilität oder Effizienz, die sich aus den Teilen selbst nicht ableiten lassen.

Veränderungen an einem Punkt beeinflussen das ganze System. Die meisten komplexen Systeme sind „offen“, also in Interaktion mit ihrer Umgebung, und zeichnen sich durch kritische Punkte aus, an denen sich die Systemeigenschaften schlagartig verändern können.

„Unser derzeitiges politisches und ökonomisches System ist grandios gescheitert“

Geoffrey West,
Physiker

Die „Blogosphäre“ deuten: Noch bevor etwas auf den Straßen zu bemerken ist, zeigen Anzahl und Verteilung bestimmter Wörter in Blogs, welche Themen, Filme, Konsumgüter im Kommen sind, dass sich eine neue Krankheit ausbreitet oder ob Unruhen bevorstehen – wie am Tahrir-Platz in Kairo.

Bei der Auswertung hilft wieder der Computer. Er kann, was Menschenhirne nicht mehr können: Millionen von Varianten, Jahren, Möglichkeiten von Interaktionen durchrechnen. „Wie im Labor schauen wir dem System dabei zu, was passiert, wenn wir an diesem oder jenem Schraubchen drehen“, erklärt Thurner. Das erlaubt auch die wichtige Kontrolle des Modells: Nur wenn es zu ähnlichen Ergebnissen kommt, wie sie in der Realität zu beobachten sind (zum Beispiel, wie sich in einem Markt Preise bilden), ist es akzeptabel.

Die Wissenschaft Komplexer Systeme ist „quantitative predictive“. Quantitativ bedeutet: Etwas kann so in Zahlen ausgedrückt werden, dass eindeutig ist, was gemeint ist, und es in Computerprogramme eingespeist werden kann. Predictive bezieht sich auf die Möglichkeit der Vorhersage von Eigenschaften und Entwicklungen des Systems.

gebracht werden kann, sich selbst zu stabilisieren“, so Thurner. Das ist die Kernbotschaft der Wissenschaft Komplexer Systeme: Nicht durch Maßnahmen von außen kann reguliert werden, sondern nur durch das Umkonfigurieren des Netzwerks selbst.

Die Modellbildung ist allerdings mühsam und kann Jahre dauern. Es gilt, die systemrelevanten Teile zu finden. Typische Eigenschaften müssen festgelegt, ihre Beziehungen zueinander definiert werden. Verwendung findet nur, was mit Daten belegt werden kann. Gefordert sind hier auch die Inputs der

works und Blogs. Hinzu kommen Daten von „Ortungssystemen“ wie dem Handy sowie empirisch Erhobenes wie Wirtschafts-, Gesundheits- oder Wetterdaten. „Wir brauchen eine kritische Menge an Daten“, so Farmer. „Doch die gibt es inzwischen zu fast allem.“

Und macht möglich, woran die Wissenschaften bisher gescheitert sind: **realistische Vorhersagen**. „Wir können zeigen, wie ein stabiles Netzwerk aussieht. Oder wie es dazu ge-

Sozial- und Geisteswissenschaften, die dabei helfen können, die richtigen Fragen zu stellen.

Die Mühen sollten jedoch nicht gescheut werden. „Allein die Wirtschaftskrise hat uns bis jetzt 3000 Milliarden gekostet“, sagt Dirk Helbing. „Wenn wir es schaffen, Schäden durch Krankheiten, Verbrechen, Finanz- oder Umweltprobleme nur um ein einziges Prozent zu reduzieren, hat sich bereits jeder Euro Investment in diese Forschung ausgezahlt.“ Wobei er der Wissenschaft deutlich mehr zutraut: erfahrungsgemäß zwischen zehn und 30 Prozent.

Die Zeit drängt überall. „Es gibt große Wissenslücken“, mahnt Helbing, „vor allem bei der Bewertung von systemischem Risiko, bei der Modellierung sozioökonomischer Krisen und dem Verständnis der globalisierten Welt mit ihrer zunehmenden Vernetzung.“ Besonders die Dynamiken, die von den rasanten Entwicklungen im soziotechnischen Bereich – gemeint ist hier die Verwendung der neuen Medien – ausgehen, sind von Interesse. Eine schnelle Verabredung über das Handy kann lustig sein, aber auch gefährlich. „Wir müssen verstehen, wie solche kollektiven Phänomene funktionieren, um sie bewältigen zu können. Das ist ein Paradigmenwechsel, ähnlich wie der Wechsel vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild.“

Helbing – und mit ihm hunderte Forscherinnen und Forscher – setzt zurzeit auf Brüssel: 2013 werden von der EU zwei Informations- und Kommunikationstechnologie-Projekte (ICT) ausgewählt, die zehn Jahre lang mit bis zu 100 Millionen Euro jährlich gefördert werden sollen. Einer der sechs Anträge, die es in die Vorauswahl geschafft haben – und zugleich der bestgereichte –, ist „FuturICT“.

„Wir wollen mit dem Geld hauptsächlich brillante junge neue Leute ausbilden“, sagt der Österreich-Koordinator des Projekts, Stefan Thurner. „In dieser Disziplin braucht es die Besten der Besten.“ Im Moment, glaubt er, könnten weltweit vielleicht ein paar hundert Personen Komplexmodelle wirklich verstehen und entwickeln. Das müsse sich ändern. „Woher sonst sollten Lösungen kommen“, so Geoffrey West. „Unser derzeitiges politisches und ökonomisches System ist grandios gescheitert. Auch wenn wir vielleicht um Jahrzehnte zu spät beginnen: Es gibt keine Alternative.“

Geistes- und Sozialwissenschaften neu „Die Social Sciences können bei einfachen Fragen zwar helfen, aber sobald es komplizierter wird, reicht es nicht“, erklärt die Soziologin und Präsidentin des Europäischen Forschungsrats Helga Nowotny. Viele der Themen, denen sich die Komplexitätsforschung widmet, wie Wirtschaftsdynamik, Sprachentstehung, Konfliktforschung, Entscheidungsfindung oder Nachhaltigkeit, sind jedoch Fragestellungen der Sozial- und Geisteswissenschaften. Zusammen mit der Wissenschaft Komplexer Systeme könnten sie ihre bisher theoretischen Konzepte empirisch überprüfen und so zu neuer Bedeutung gelangen.

FuturICT. Im Rahmen des EU-Flaggschiff-Projekts wollen Computer- und Sozialwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler aus ganz Europa mithilfe der Komplexitätsforschung eine Simulationsplattform für sozioökonomisch/technische Systeme, eine Art „globales Nervensystem“ zur Messung des Zustands der Welt, schaffen. Käme es irgendwo zu besorgniserregenden Entwicklungen, wie 2008 auf den Finanzmärkten, sollten Computerprogramme rechtzeitig Alarm schlagen. Ein „sozioökonomischer Flugsimulator“ soll es Entscheidungsträgern wie auch Bürgerinnen und Bürgern ermöglichen, die Chancen oder Risiken von Handlungsalternativen besser zu bewerten.