

## Nigel Goldenfeld Weil

*Professor für Physik an der University of Illinois – Urbana-Champaign*

Wenn man in die falsche Richtung blickt, bedeutet Fortschritt, dass man zurückgeht. Die Geschichte deutet darauf hin, dass unser Weltbild nicht so sehr dann abrupten Veränderungen unterliegt, wenn die Wissenschaft neue Begriffe unserem kognitiven Werkzeugkasten hinzufügt, als wenn sie alte daraus entfernt. Die Kombinationen von Intuitionen, die uns von Geburt an begleiten, bestimmen unsere wissenschaftlichen Vorurteile, und sie eignen sich nicht nur sehr schlecht für die Bereiche des ganz Großen und des ganz Kleinen, sondern sind auch nicht in der Lage, Alltagsphänomene zu beschreiben. Wenn wir bestimmen sollten, wo der nächste Wandel unseres Weltbilds herkommen wird, müssen wir unsere tiefstliegenden Intuitionen von neuem betrachten. In den zwei Minuten, die Sie brauchen, um diesen Essay zu lesen, werde ich versuchen, Ihre elementaren Vorstellungen von Kausalität neu zu verdrahten.

Kausalität wird gewöhnlich so verstanden, dass es eine einzelne, vorhergehende Ursache für ein Ereignis gibt. In der klassischen Physik kann z.B. ein Ball durch die Luft fliegen, weil er von einem Tennisschläger getroffen wurde. Mein sechzehn Jahre altes Auto dreht immer viel zu hoch, weil der Temperaturfühler fälschlicherweise anzeigt, dass der Motor kalt ist, so, als ob das Auto noch in der Warmlaufphase wäre. Wir sind mit der Kausalität als einem grundlegenden Merkmal der Wirklichkeit so vertraut, dass wir sie fest in die Gesetze der Physik verdrahten. Es mag scheinen, dass das unnötig wäre, aber es zeigt sich, dass die Gesetze der Physik nicht zwischen vorwärts und rückwärts laufender Zeit unterscheiden. Und daher müssen wir eine Wahl treffen, welche Art von physikalischem Gesetz wir gerne hätten.

Komplexe Systeme, wie z.B. Finanzmärkte oder die Biosphäre der Erde, scheinen jedoch der Kausalität nicht zu gehorchen. Für jedes auftretende Ereignis gibt es eine Vielzahl möglicher Ursachen, und das Ausmaß, in dem jede davon zu dem Ereignis beiträgt, ist nicht klar, nicht einmal, nachdem es geschehen ist! Man könnte sagen, dass es ein Netz von Ursachen gibt. Beispielsweise geht an einem gewöhnlichen Tag die Börse um einen gewissen Bruchteil eines Prozentpunkts nach oben oder unten. Das Wall Street Journal könnte nun fröhlich berichten, dass die Börsenbewegung darauf zurückging, dass „Händler Gewinne mitnahmen“, oder vielleicht darauf, dass „Investoren auf Schnäppchenjagd gingen“. Am nächsten Tag könnte die Bewegung in die entgegengesetzte Richtung gehen, und man wird eine andere, dem möglicherweise widersprechende Ursache bemühen. Für jede Transaktion gibt es jedoch sowohl einen Käufer als auch einen Verkäufer, und ihre Perspektiven müssen gegensätzlich sein, damit die Transaktion zustande kommt. Märkte funktionieren nur deshalb, weil es eine

Vielheit von Ansichten gibt. Wenn man den meisten Marktbewegungen eine einzige oder dominante Ursache zuweist, bedeutet das, dass man die Vielheit der Ansichten über den Markt ignoriert und unfähig ist, das Wesen und die Dynamik der zeitweiligen Ungleichgewichte zwischen den vielen Händlern, die diese unterschiedlichen Ansichten vertreten, zu erkennen.

Ähnlich falsche Vorstellungen gibt es andernorts zuhauf in öffentlichen Debatten und in den Wissenschaften. Gibt es beispielsweise einzelne Ursachen für Krankheiten? In manchen Fällen, wie z.B. bei der Huntington-Krankheit, kann die Ursache auf einen einzigen Faktor zurückgeführt werden – in diesem Fall zusätzliche Wiederholungen einer bestimmten Nukleotidsequenz an einem bestimmten Ort auf der DNA einer bestimmten Person, die die Aminosäure Glutamin kodiert. Doch selbst in diesem Fall weiß man auch, dass das Alter bei Krankheitsbeginn und die Schwere der Krankheit von Umweltfaktoren und Interaktionen mit anderen Genen abhängen. Das Netz von Ursachen war zwar viele Jahrzehnte lang eine ständig benutzte Metapher in der Epidemiologie, doch es gibt nach wie vor nur wenige quantitative Erkenntnisse darüber, wie das Netz funktioniert oder gebildet wird. Wie Nancy Krieger von der Harvard School of Public Health eindrücklich in einem berühmten Essay von 1994 fragte: „Hat jemand die Spinne gesehen?“

Die Suche nach Kausalstrukturen ist nirgendwo aussichtsloser als in der Debatte über den Ursprung organischer Komplexität: intelligentes Design versus Evolution. Nährstoff der Debatte ist ein grundlegender Begriff von Kausalität – dass es einen Anfang des Lebens gibt und dass ein solcher Anfang eine einzelne Ursache gehabt haben muss. Wenn es stattdessen ein Netz der Ursachen gibt, das den Ursprung und die Evolution des Lebens gesteuert hat, könnte andererseits ein Skeptiker fragen: Hat jemand die Spinne gesehen?

Es zeigt sich, dass es keine Spinne gibt. Netze von Ursachen können sich spontan durch die Verknüpfung von Verbindungen zwischen den Akteuren oder den aktiven Elementen des Systems bilden. Betrachten Sie beispielsweise das Internet. Obwohl es ein einheitliches Kommunikationsprotokoll gibt (TCP/IP etc.), entstand die Topologie und Struktur des Internets im Laufe eines fieberhaften Ausbaus, als die Anbieter von Internetdiensten ihr Territorium in einem Goldrausch von beispiellosen Ausmaßen absteckten. Sobald sich die Aufregung gelegt hatte, wurde bemerkenswerterweise deutlich, dass die statistischen Eigenschaften des daraus resultierenden Internets ganz besondere sind: Die zeitlichen Verzögerungen bei der Übertragung von Datenpaketen, die Netzwerktopologie und sogar die übertragenen Informationen weisen fraktale Eigenschaften auf.

Wie auch immer man das Internet betrachtet – lokal oder global, auf einer kurzen oder einer langen Zeitskala –, es sieht genau gleich aus. Obwohl die Entdeckung dieser fraktalen Struktur um 1995 eine unangenehme Überraschung war, weil die Standard-Algorithmen zur Steuerung des Datenverkehrs unter der Annahme konstruiert wurden, dass alle Eigenschaf-

ten der Netzwerkdynamik zufällig wären, charakterisiert die Fraktalität auch weitgehend biologische Netzwerke. Ohne einen Generalplan unterliegt die Evolution des Internets denselben statistischen Gesetzen, die auch die biologische Evolution beherrschen, und Strukturen entstehen spontan, ohne dass eine steuernde Einheit nötig wäre. Darüber hinaus kann das resultierende Netzwerk auf sonderbaren und unvorhersagbaren Wegen zum Leben erweckt werden und neuen Gesetzen gehorchen, deren Ursprung auf keinen einzelnen Teil des Netzwerks zurückgeführt werden kann. Das Netzwerk verhält sich als ein Kollektiv, nicht bloß als Summe der Teile, und es ist sinnlos, von Kausalität zu sprechen, weil das Verhalten in Raum und Zeit verteilt ist.

Am 6. Mai 2010 erlebte der Dow-Jones-Index zwischen 14 Uhr 42 und 14 Uhr 50 einen rasanten Absturz und eine anschließende Kurserholung um fast 600 Punkte, ein Ereignis von beispiellosem Ausmaß wie zeitlicher Kürze. Die Störung war Teil eines turbulenten Ereignisses an jenem Tag, das heute als Blitz-Crash bezeichnet wird, zahlreiche Marktindizes und einzelne Aktien betraf und bei einigen Aktien zu unglaublich niedrigen Preisen führte (Accenture kostete beispielsweise zu einem bestimmten Zeitpunkt nur einen Cent).

Anhand von Tickdaten, die für jede Transaktion verfügbar sind, können wir im Zeitlupentempo sehen, wie sich der Crash entfaltet – ein Film über eine Finanzkatastrophe. Aber die Ursache des Crashes selbst bleibt ein Rätsel. Der Bericht der amerikanischen Börsenaufsichtsbehörde (Securities & Exchange Commission) über den Blitz-Crash konnte zwar das auslösende Ereignis identifizieren (ein Verkauf im Umfang von vier Milliarden Dollar, der von einem Investmentfonds getätigt wurde), aber keine detaillierte Erklärung dafür liefern, warum dieses Ereignis den Crash verursachte. Die Bedingungen, die den Crash herbeiführten, waren bereits in das Ursachennetz des Marktes eingebettet, d.h. in eine selbstorganisierte, sich schnell entwickelnde Struktur, die durch das Wechselspiel von Hochfrequenz-Handelsalgorithmen geschaffen wurde. Der Blitz-Crash war der Geburtsschrei eines Netzwerks, das zum Leben erweckt wurde, und erinnert auf unheimliche Weise an Arthur C. Clarkes Science-Fiction-Geschichte „Dial F for Frankenstein“ (Wählen Sie F für Frankenstein), die folgendermaßen anfängt: „Am 1. Dezember 1975 um 1 Uhr 50 westeuropäischer Zeit begann jedes Telefon auf der Welt zu klingeln.“ Ich bin begeistert von der wissenschaftlichen Herausforderung, all diese Dinge im Einzelnen zu verstehen, weil... nun, schon gut. Ich vermute, dass ich es nicht wirklich weiß.