

Ilya Prigogine (1917–2003): Strukturbildung fernab des Gleichgewichts

Ilya Prigogine, Träger des Nobel-Preises für Chemie 1977, verstarb am 28. Mai

2003 in Brüssel. Er war einer der Begründer der modernen Theorie der Irreversibilität und eine führende Persönlichkeit in der Wissenschaft während der vergangenen 50 Jahre.

Prigogine wurde am 25. Januar 1917 in Moskau geboren. Seine Familie verließ Russland 1921 in Richtung Deutschland und ließ sich schließlich 1929 in Belgien

nieder. Prigogine schloss sein Studium der Chemie und Physik an der Université Libre de Bruxelles ab, blieb dort, um in Chemie zu promovieren, und wurde 1945 habilitiert. 1951 wurde er an derselben Universität Professor in der naturwissenschaftlichen Fakultät und behielt diese Stelle bis zu seiner Pensionierung 1987. Von 1959 bis 2003 leitete er die Internationalen Solvay-Institute für Physik und Chemie, die der bekannte belgische Industrielle Ernest Solvay gegründet hatte. Seit 1967 war er Professor am Physics Department der University of Texas at Austin (USA), wo er das Ilya Prigogine Center for Studies in Statistical Mechanics, Thermodynamics, and Complex Systems gründete.

Prigogines Forschungsinteressen hatten eine außergewöhnliche Bandbreite. Während seiner gesamten Karriere versuchte er, die Bedeutung der Irreversibilität für das Verständnis natürlicher Phänomene in den Vordergrund zu rücken. Sein Antrieb war die Überzeugung, dass die Irreversibilität und der Zeitpfeil fundamentale Eigenschaften der Evolution und wachsender Komplexität sind, die in der Natur allgegenwärtig sind. Er erkannte, dass er mit vorherrschenden Ideen brechen musste, um diese Überzeugung durchzusetzen. Gelegentlich gingen seine Arbeiten über die traditionellen Ziele der Naturwissenschaften hinaus. Dann war er mutig genug, auch die erkenntnistheoretischen, philosophischen und kulturellen Schlüsse zu ziehen, die er für

angemessen hielt. Wegen der Kontinuität seiner Ideen und ihrer humanistischen Dimension ging Prigogines Bedeutung weiter als einzelne naturwissenschaftliche Beiträge oder seine bekannten Bücher.

Dissipative Strukturen

Prigogines Untersuchungen der Irreversibilität begannen auf der makroskopischen Ebene. Seine Arbeiten führten zu einer wahren Renaissance der gesamten Thermodynamik. Unter diesem Blickwinkel ist es als glücklicher Umstand zu bezeichnen, dass er in den 1940er Jahren Schüler von Theophile De Donder war, einem der wenigen Wissenschaftler seiner Zeit, die an eine konsistente thermodynamische Theorie glaubten, die über die Gleichgewichtsphänomene hinaus reicht und explizit auch die Irreversibilität umfasst. Prigogine baute auf De Donders Ergebnissen auf und erarbeitete 1945–1949 eine allgemeine makroskopische Theorie für Systeme unter Randbedingungen, die sie aus dem Gleichgewicht heraus führen. Die Arbeiten von Prigogine, Lars Onsager und Josef Meixner führten zu einer lokalen Beschreibung, die in der Ableitung einer Entropiegleichgewichtsbeziehung gipfelte, die auf der berühmten bilinearen Struktur der Entropieproduktion beruht. Die Anwendung dieses Formalismus auf den Bereich linearer irreversibler Prozesse ermöglichte es ihm, das Theorem der minimalen Entropieproduktion abzuleiten, in dem er erklärte, dass Systeme unter schwachen Nichtgleichgewichtsbedingungen schließlich einen stabilen Zustand minimaler Dissipation erreichen. Nach diesem anfänglichen Erfolg versuchte er gemeinsam mit seinem Brüsseler Kollegen Paul Glansdorff fast 20 Jahre lang erfolglos, dieses Ergebnis auf den gesamten Bereich der Nichtgleichgewichtsphänomene auszudehnen. Schließlich erkannten sie, dass dieser Fehlschlag nicht technischer Natur war, sondern dass es keine allgemeinen Trends gibt, wie sich natürliche Systeme vom Gleichgewicht weg entwickeln. Interessanterweise berichteten die Gruppen von Benno Hess^[1] in Deutschland und Anatol Zhabotinski in Russland zu dieser Zeit über aufregende Ergebnisse ihrer

Untersuchungen oszillierender biochemischer und chemischer Systeme und lieferten so die experimentellen Befunde für diese Idee sowie zusätzliche Motivation für zwei neue Entwicklungen: eine Theorie der thermodynamischen Stabilität, die auf der Exzessentropie beruht, die durch Störungen hervorgerufen wird, und die Analyse prototypischer nichtlinearer kinetischer Modelle wie des Lotka-Volterra-Modells und des Brusselators (Abbildung 1). Diese Arbeiten führten schließlich zum Konzept der dissipativen Strukturen, die 1966–1967 von Prigogine und seinen Kollegen als Zustand formuliert wurden, der die Fähigkeit eines Systems widerspiegelt, die Energie, die aus dem Gleichgewicht heraus dissipiert wurde, zu nutzen, um neuartige Phänomene zu erzeugen. Diese Fähigkeit entspringt dem thermodynamischen Zweig gleichgewichtsartiger Zustände durch eine Instabilität. Indem er die universelle Rolle der Entfernung vom Gleichgewicht als Quelle von Ordnung erkannte, lieferte er einen einheitlichen Rahmen für eine Vielfalt von Selbstorganisationsprozessen. Dadurch führte er auch eine neue Art „biologischen“ Denkens ein, die viele inspirierte und die Beziehung zwischen Natur und Naturwissenschaften neu definierte. Eine bedeutende Entwicklung, die die Synergie zwischen Biologie, Irreversibilität, Thermodynamik und nichtlinearer Kinetik vor Augen führt, sind die Arbeiten von Manfred Eigen und Kollegen über Hyperzyklen^[2] und die Evolution biologischer Informationsträger Ende der 1960er bis Anfang der 1970er Jahre.

Grundlagen der Irreversibilität

Schon am Beginn seiner Karriere erkannte Prigogine die Notwendigkeit, die mikroskopischen Grundlagen irreversibler Phänomene zu untersuchen. In einer epochalen Veröffentlichung zeigte er 1949 durch Anwendung von Boltzmanns kinetischer Gleichung, dass die lokale Beschreibung der irreversiblen Thermodynamik nur dann zutrifft, wenn die Ort-Geschwindigkeits-Verteilung der Teilchen leicht vom lokalen Gleichgewicht abweicht. Diese Arbeiten wurden nach und nach auf chemische Reaktionen erweitert und sind noch immer



Ilya Prigogine

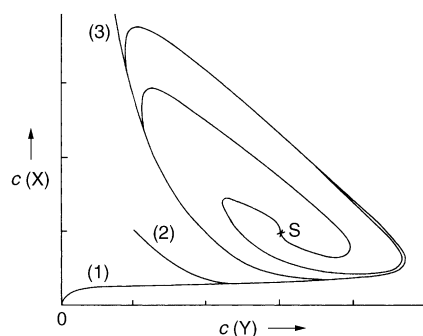


Abbildung 1. Der Brusselator: In einer Reaktion der Edukte A und B zu den Produkten D und E über den Mechanismus $A \rightarrow X$, $2X + Y \rightarrow 3X$, $B + X \rightarrow Y + D$ und $X \rightarrow E$ erhält man für verschiedene Anfangsbedingungen stets dieselbe periodische Trajektorie für die Konzentrationen von X und Y (S: instabiler stationärer Zustand).

Bezugspunkt für das Verständnis der phänomenologischen Geschwindigkeitsgesetze. Sie führten darüber hinaus zu der Vorhersage, dass Abweichungen von diesen Gesetzen (im Zusammenhang mit anderen als Maxwell'schen Geschwindigkeitsverteilungen) unter bestimmten Bedingungen möglich sind, zum Beispiel wenn stark exotherme Schritte in Reaktionsfolgen vorkommen. Mitte der 1950er Jahre wurde das Bedürfnis, die Annahmen der Boltzmann'schen Gleichung zu verlassen, Prigogines zentrales Thema. In den späten 1950er und frühen 1960er Jahren leiteten seine Kollegen und er Gleichungen für den irreversiblen Transport in einer großen Klasse von Systemen von dichten Fluiden bis hin zu anharmonischen Festkörpern und Plasmen ab, indem sie einen systematischen Störungsansatz zur Lösung der Liouville-Gleichung verwendeten. Gleichzeitig entwickelte Prigogine gemeinsam mit Robert Herman eine kinetische Theorie für den Ver-

kehrsfluss, wobei es ihm gelang, Terme für das Verhalten des Fahrers zu berücksichtigen.

Infolge der Einführung des Konzepts der dissipativen Strukturen Ende der 1960er Jahre fühlte sich Prigogine veranlasst, die mikroskopischen Grundlagen der Irreversibilität neu zu betrachten. Er initiierte einen neuen Ansatz, der die grundlegenden Eigenschaften der mikroskopischen Dynamik ausgehend von Arbeiten Henri Poincarés und Andrei Kolmogorovs mit einbezog, unter anderem die Nichtintegrierbarkeit und die Resonanz. Dies ermöglichte es ihm, die Arten von Startkonfigurationen vorauszusagen, die sich thermodynamisch in die Zukunft entwickeln können, und formale, aber exakte Wahrscheinlichkeitstheoretische Gleichungen für diese Konfigurationen zu erhalten. Auf diese Weise wurde die grundlegende Rolle der Wahrscheinlichkeit beim Verständnis der Irreversibilität und beim Bruch der Zeitsymmetrie erkannt.

Prigogines unersättliche Neugier trieb ihn dazu, sich auf eine Vielfalt von Aktivitäten einzulassen. Er entwickelte eine große Leidenschaft für Literatur, Philosophie und Kunst. Eine seiner Lieblingsbeschäftigungen war das Klavierspiel. Er zog eine große Zahl von Schülern und Kollegen aus der ganzen Welt an. Er brachte sich auch aktiv in die Forschungspolitik ein und wirkte stark bei der Entwicklung eines gemeinsamen europäischen Forschungsprogramms Mitte der 1980er Jahre mit. Er bestand darauf, dass flexible Mechanismen eingeführt wurden, um innovative Ideen aus der Wissenschaft heraus zu fördern. Hierfür prägte er den Ausdruck „hoffnungsvolle Fluktuationen“ („hopeful fluctuations“).

Prigogine war einer der am häufigsten ausgezeichneten Wissenschaftler unserer Zeit. Er war unter anderem Mitglied der Königlich-Belgischen Akademie, der National Academy of Sciences of the USA, der sowjetischen Akademie der Wissenschaften, Träger von Ehrenwürden von über 40 Universitäten und von bedeutenden wissenschaftlichen Preisen wie dem Francqui-Preis 1955, dem Solvay-Preis 1965, der Cothenius-Goldmedaille der Akademie der Naturforscher Leopoldina 1975, der Rumford Gold Medal der Royal Society 1976, dem Honda-Preis 1983 und natürlich dem Nobel-Preis für Chemie 1977.^[3] Prigogine setzte sich nie wirklich zur Ruhe. Er arbeitete bis wenige Tage vor seinem Tod an mehreren Forschungsprojekten. Er war Autor oder Mitautor von 16 Büchern^[4] und einer großen Zahl von Original- und Übersichtsarbeiten sowie von Artikeln für Laien.

Er hinterlässt seine zweite Frau Marina Prokopowicz und seine zwei Söhne Yves und Pascal.

Grégoire Nicolis
Université Libre de Bruxelles

- [1] M. Engelhardt, S. C. Müller, *Angew. Chem.* **2003**, *115*, 2432; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2003**, *42*, 2330.
- [2] M. Eigen, *Int. J. Quantum Chem.* **1978**, 219.
- [3] I. Prigogine, *Angew. Chem.* **1978**, *90*, 704.
- [4] Zum Beispiel a) I. Prigogine, *Vom Sein zum Werden*, Piper, München, **1979**; b) G. Nicolis, I. Prigogine, *Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*, Wiley, New York, **1977**; c) I. Prigogine, I. Stengers, *Entre le temps et l'éternité*, Fayard, Paris, **1988**.