

Ästhetik in der Wissenschaft

»Formbildende Dynamik in Chemie und Mathematik. Ästhetik in der Wissenschaft« – so hieß die Ausstellung, die der Boehringer Ingelheim Fonds vom 11. November bis zum 11. Dezember in seinen Geschäftsräumen in der Löffelstraße in Stuttgart-Degerloch zeigte.

Dabei handelte es sich um eine »Sammlung wissenschaftlicher Bilder« – wie es im Katalog heißt – von Benno Hess, Mario Markus, Theo Plesser und Stefan C. Müller vom Max-Planck-Institut für Ernährungsphysiologie in Dortmund.

Die Verknüpfung von Computer und Videotechnik hat einen Weg zu neuen Formen der Darstellung wissenschaftlicher Ergebnisse eröffnet. Diese Ausstellung von mehr als 30 Visualisierungen chemischer Reaktionen¹ und mathematischer Rekursionen vermittelte einen Eindruck davon, welche Möglichkeiten sich auf-tun. Überraschend war vor allen Dingen, welchen ästhetischen Gehalt die Darstellung »kalter« wissenschaftlicher Experimente und mathematischer Modelle hat.

Besonders auf diesen Aspekt ging **Prof. Dr. med. Benno Hess**, der Direktor des Max-Planck-Instituts, in seiner Einführung für den Katalog², die wir im folgenden wiedergeben, ein: DS

Die Beziehungen zwischen Wissenschaft und Kunst sind eines der erregendsten Kapitel der Kulturgeschichte. Von Leonardo da Vinci bis Dürer bis in die Neuzeit führt uns die Geschichte durch die immer neuen intellektuellen Abenteuer einer fortlaufenden und umfassenden Welterkenntnis, die Wissenschaft und Kunst vermittelt. Die Verwissenschaftlichung der Kunst, von Constable, Ruskin, Matisse zu Kandinskys »Beitrag zur Analyse der malerischen Elemente« zieht sich wie ein breiter Strom nie enden wollender Reflexion durch die Neuzeit komplementär dem Versuch, künstlerische Elemente dem wissenschaftlichen Denken zu entlocken. Natürlich, die neugierige, zunächst unordentliche Phantasie und Kreativität sind Künstler wie Wissenschaftler zu eigen, doch dann scheiden sich die Geister: Die Kriterien ihres Schaffens sind seit Kants Kritiken klassifiziert und weit voneinander getrennt; die ästhetische Information ist subjektiv, die wissenschaftliche Information ist objektiv und damit generell übersetzbar. Die Trennung beider Kategorien – von Schiller weitläufig beklagt – ist bis heute eine der großen Herausforderungen kultureller Reflexion.

Seit jeher jedoch haben methodische Brücken Wissenschaft und Kunst verbunden. Der Einbruch der Photographie in die Kunst am Ende des letzten Jahrhunderts kann als Vorläufer der heutigen Evolution einer faszinierenden Computerkunst verstanden werden, einer Kunst, die ihre Mittel aus dem wissenschaftlichen Experiment und seiner quantitativ visuellen Darstellung bezieht. Der fast zwanglose Übergang der zweidimensionalen in die dreidimensionale, perspektivi-

sche Darstellung illustriert den Einbruch der Computertechnik, die mit Leichtigkeit vollzieht, was seit Kepler und Dürer Menschen bewegt hat. Heute werden wir überrascht von dem ästhetischen Gehalt der Visualisierung »kalter« wissenschaftlicher Experimente und mathematischer Modelle und Theorien und erfahren, daß es gelingt, wissenschaftliche Information in die Sprache der Kunst zu projizieren. Somit werden komplizierteste wissenschaftliche Zusammenhänge ästhetisiert und quasi humanisiert zur Darstellung gebracht und der Phantasie und Kreativität neue Welten erschlossen.

¹ Vergleichen Sie dazu auch bitte den Beitrag von Stefan C. Müller »Räumliche Strukturbildung in reaktiven Lösungen« in diesem Heft, S. 40 ff.

² Der Katalog umfaßt 32 Seiten und gibt die Bilder der Ausstellung in exzellentem Vierfarbdruck wieder. Er ist vom Boehringer Ingelheim Fonds zu beziehen, wobei er allerdings um Kostenerstattung bitten muß (DM 8,- + Porto).

Abb. 1: Eine Anzahl von immer wiederkehrenden Vorgängen in der Natur lassen sich durch einfache Formeln, z. B. $x_{n+1} = rx_n(1-x_n)$ approximieren. n ist 1, dann 2, dann 3, usw. Aus der Formel erhält man somit aus x_1 den nächsten Wert x_2 , aus x_2 den nächsten Wert x_3 , usw. Beispiele für die Anwendung solch einer Formel findet man bei der Analyse von Epidemien (Masern, Mumps, Windpocken) und Insektenplagen (z. B. beim australischen Pflanzenschädling *Thrips imaginis*). Die Werte für x_1, x_2, x_3 , usw. sind in diesen Fällen die Zahlen der durch die Epidemie erkrankten Personen bzw. die Zahl der Insekten. Der Wert für r hängt von den Umweltbedingungen ab. Hier nehmen wir an, r hat abwechselnd zwei Werte, A und B . Dies bedeutet, daß sich die Umwelt periodisch verändert, wie es z. B. bei der Abfolge von Sommer und Winter der Fall ist. Auf dem Bild zeigen wir, wie sich das System in Abhängigkeit von A (x -Achse) und B (y -Achse) verhält. In dem dunkleren Hintergrund des Bildes ist das System »chaotisch«, d. h. unvorhersagbar, wie es bei Epidemien und Insektenplagen oftmals der Fall ist. In den helleren Partien des Bildes (Vordergrund) ist das System periodisch, und damit sind längerfristige Prognosen aus der vorhergehenden Beobachtung des Systems möglich. (Mario Märkus)

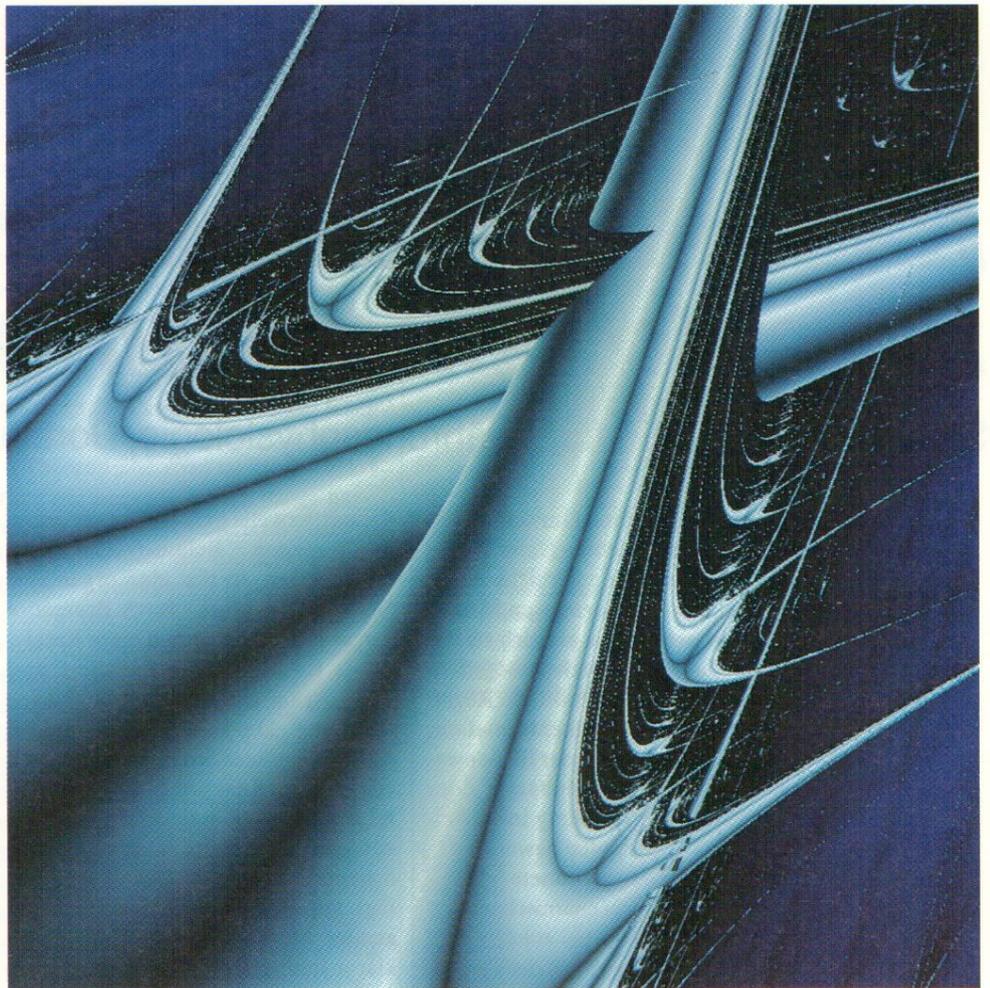


Abb. 2: Attraktion ins chemische Zentrum

Die Spiralwelle der Belousov-Zhabotinskii-Reaktion dreht sich in achtzehn Sekunden einmal um ihr Rotationszentrum. Eine Meßfolge von sechs im Drei-Sekunden-Takt aufgenommenen Bildern überdeckt also genau eine Umdrehung. Da die Bilder als Datenfelder im Rechner verfügbar sind, lassen sie sich digital so überlagern, daß in jedem Bildpunkt nur die maximale Konzentrationsänderung der vorbeiwandernden Welle festgehalten wird. Diese Technik macht eine wichtige Eigenschaft chemischer Spiralstrukturen in einem einzigen Bild augenfällig – die Wellenamplitude sinkt zum Rotationszentrum hin ab, es bildet sich ein »Konzentrationsloch«, dessen Zentrum durch das Zusammenspiel von Diffusion und Reaktion in einem stationären Zustand verharrt.

In dieser räumlichen Perspektive befindet sich das Auge des Betrachters in einer Ebene oberhalb der Konzentrationsmaxima. (Stefan C. Müller)



Räumliche Strukturen in reaktiven Lösungen

Stefan C. Müller, MPI für Ernährungsphysiologie, Dortmund

In unserer alltäglichen Umwelt, in der unbelebten und belebten Natur finden und beobachten wir zahlreiche einfache oder komplexe Formen und Strukturen. Wir sehen, wie sie sich bilden oder in ständigem Wechsel begriffen sind. Jeder hat wohl schon die Regelmäßigkeit mancher Wolkenformation, die hexagonalen Muster der Bienenwaben, spiralförmige Schneckenhäuser oder Strudel und Wirbelbildung in vorbeifließenden Wasserläufen bewundert.

Die Entstehung geordneter räumlicher Strukturen bei chemischen Prozessen, insbesondere bei solchen, die sich im flüssigen Aggregatzustand abspielen, ist allerdings ein besonders erstaunliches Phänomen, das nicht zum alltäglichen Erfahrungsschatz zu zählen ist. Denn üblicherweise finden in einem standardmäßig, z. B. in einem Becherglas durchgeführten chemischen Experiment im gesamten Volumen dieselben Reaktionen statt, wobei eine Gleichverteilung der Substanzen häufig durch kontinuierliches Rühren gewährleistet wird.

Überläßt man jedoch gewisse chemische Reaktionsabläufe »sich selbst«, so können sich durch ein kompliziertes Zusammenspiel zwischen den miteinander verkoppelten Reaktionsschritten und physikalischen Transportprozessen (Diffusion von reaktiven Molekülen, hydrodynamische Flüsse) räumliche Konzentrationsunterschiede ausbilden, die entweder stationäre, unbewegte Muster formen oder als scharf begrenzte Fronten wellenartig durch die Lösung wandern.

Erst in den letzten 15 Jahren haben sich Physiker und Chemiker in zunehmendem Maße mit solchen sich selbst organisierenden chemischen Systemen befaßt, und zwar besonders seit der Entdeckung chemischer Wellen in

der mittlerweile berühmt gewordenen oszillierenden Belousov-Zhabotinskii-Reaktion, in der eine organische Säure (Malonsäure) durch Bromationen und in Anwesenheit eines Katalysators (häufig Ferroin) oxidiert wird und organische Bromverbindungen entstehen. Die reichhaltigen und oft exotisch anmutenden Phänomene, welche in dieser Reaktion bisher beobachtet worden sind, haben dazu beigetragen, daß man heute über vereinheitlichende theoretische Grundlagen verfügt, mit denen man die zu Grunde liegenden Mechanismen im Prinzip aufklären und verstehen kann. Besonders wichtig sind dabei die Beiträge von I. Prigogine zur Entwicklung der Nichtgleichgewichtsthermodynamik und von H. Haken, der das Konzept der Synergetik einführte.

Eine wesentliche Voraussetzung zur Entstehung räumlicher, sog. »dissipativer« Strukturen ist die Offenheit des Systems, das heißt, es findet ein ständiger Durchsatz von Energie, beispielsweise durch Materiefluß oder Licht statt, der das System in einem Zustand fern vom thermodynamischen Gleichgewicht hält. Außerdem macht der nichtlineare Charakter der Wechselwirkungen und Verkopplungen die Vielfalt der Verhaltensweisen erst möglich.

In diesem Sinne bildet die Erforschung derartiger offener chemischer Lösungen einen Teil des umfassenden Gebiets der »Nichtlinearen Dynamik«, zu welchem Strukturbildungsprozesse in ganz verschiedenartigen Disziplinen, z. B. in Hydrodynamik, Meteorologie, Astrophysik und – in diesem Zusammenhang von besonderer Wichtigkeit – in der Biologie gehören. Jedes biologische System, sei es eine Zelle oder ein höherer Organis-

mus, ist vom thermodynamischen Standpunkt aus als offen zu betrachten und befindet sich im Nichtgleichgewichtszustand; Nährstoffe oder Licht fließen ein, verbrauchte Produkte treten aus, während durch biochemischen Umsatz z. B. die für die Lebensprozesse notwendigen Biomoleküle synthetisiert werden. Aus der Erforschung der Strukturbildungsmechanismen in der Chemie erhofft man sich daher auch, Aufschluß über die viel komplizierteren Zusammenhänge zu gewinnen, die biologische Musterbildung zur Folge haben.

Wenn auch erst die beiden letzten Jahrzehnte durch die wachsende Aufgeschlossenheit und die sich rasch fortentwickelnde Computertechnologie, die eine Berechnung der nicht linearen Zusammenhänge erst möglich gemacht hat, zu einem bemerkenswerten Ansteigen des Interesses an formbildender Dynamik in der Chemie geführt haben, so lehrt der Blick in die Vergangenheit doch, daß vieles gar nicht so neu ist, wie es oberflächlich betrachtet erscheinen mag. Sicherlich wurden manche der heute im Detail erforschten Phänomene schon vor langer Zeit beobachtet, jedoch mag so manche Beobachtung als nicht-verstehbar, als Artefakt oder ganz einfach als Meßfehler unbeachtet geblieben sein.

Runge-Bilder

Als einer der ersten Chemiker, die sich eingehend mit farbigen Formen befaßt haben, dürfte F. F. Runge gelten, der in seinem 1855 erschienenen Buch »Der Bildungstrieb der Stoffe, veranschaulicht in selbständig gewachsenen Bildern« eine Reihe von Experimenten vorführte, bei denen er

ein Reagenz in gewissen Zeitabständen auf ein mit einem anderen Reagenz imprägniertes Filterpapier auftröpfte. So entdeckte er eine große Zahl von Reaktionspartnern, für welche dieses Verfahren durch die bei der Tropfenausbreitung hervorgerufene Reaktion zu farbenprächtigen Strukturen führt. Anstatt – wie in *Abbildung 1* auf dieser Seite – eine Schwarzweiß-Photographie als Beispiel zu zeigen, illustrierte Runge jeden Band seines Werkes mit selbst hergestellten, farbigen Originalbildern auf Filterpapier [1].

Zwar ist Runges grundlegender methodologischer Beitrag zur Entwicklung der Papierchromatographie unbezweifelt, jedoch wurde sein eher künstlerisch orientiertes Interesse für die »Gemälde« von seinen wissenschaftlichen Kollegen nicht unbedingt geteilt. Jedenfalls war er der erste, der bei diesen Versuchen herausfand, daß ausfallende Reaktionsprodukte sich manchmal in ringförmigen Gebieten ansammeln – eine Beobachtung, die etwa 40 Jahre später auch R. S. Liesegang machte, nach dem dieses Phänomen benannt wurde.

Liesegang-Ringe

In seinem ersten Experiment plazierte Liesegang einen Tropfen hochkonzentrierter Silbernitratlösung auf eine dünne Gelatineschicht, die Kaliumdichromat in geringer Konzentration enthielt. Während der Tropfen in die Schicht hineindiffundierte, bildete sich das dunkelrote, unlösliche und daher ausfallende Produkt Silberdichromat unerwarteterweise nicht in einer diffusen, sich nach außen ausbreitenden Zone, sondern in scharfen, konzentrisch angeordneten Ringen mit »leeren« Zwischenräumen. Später fand man, daß ähnliches bei der Verwendung vieler anderer unterschiedlicher Elektrolytpaare und auch in abgeänderter Geometrie geschehen kann. Zum Beispiel erhält man eine Reihe paralleler Bänder aus unlöslichen Bleijodid – auch wiederum in einem Gel (Agar) –, wenn man eine Bleinitratlösung zusammen mit einer gelbildenden Substanz in die untere Hälfte eines dünnen Reagenzglases gießt, das Gel erstarren läßt und dann den verbleibenden Raum mit Kaliumjodidlösung ausfüllt. Die ersten Bänder bilden sich innerhalb von Minuten, aber das endgültige Resultat, wie

in *Abbildung 2A* gezeigt, stellt sich erst nach einigen Stunden ein.

Dieser Strukturbildungsprozeß hängt übrigens nicht von der Gelsubstanz ab, die nur dazu dient, Konvektion und Sedimentation im Schwerfeld zu verhindern. Prinzipiell braucht man hier also lediglich die Koppelung zwischen Diffusion und Reaktion zweier Ionen zu betrachten und muß nicht, wie bei Runges Experimenten, auf andere Einflüsse, die von den komplizierten physikalischen Eigenschaften des Papiers herrühren, Rücksicht nehmen.

Theoretische Ansätze für die Erklärung der Liesegangschen Ringe hat es viele gegeben. Besonders zu beachten ist die kurz nach der Entdeckung qualitativ formulierte Übersättigungstheorie von W. Ostwald: Sobald an einem Ort eine ausreichend hohe Übersättigungsschwelle erreicht wird, führt der darauf folgende lokale Ausfällungsprozeß zu einer Verarmung eng benachbarter Bereiche, indem die an der Reaktion beteiligten Ionen dorthin diffundieren und am Wachsen der Kristallkeime teilnehmen. Die nächste Übersättigungsschwelle wird erst wieder in einem deutlichen räumlichen Abstand von der vorhergehenden erreicht. Bis in die zwanziger Jahre hinein folgte eine bemerkenswerte Forschungsaktivität; darüber legt das Buch »The Problem of Physico-Chemical Periodicity« von E. S. Hedges und J. E. Myers Zeugnis ab [2]. Gewiß waren es nicht nur die Ausfällungsstrukturen, sondern beispielsweise auch elektrochemische Oszillationen, welche schon damals eine wichtige Rolle spielten. Diese hatten einen frühen Vorläufer gefunden in der 1873 von Lippman publizierten Beobachtung periodisch zuckender Verformungen eines Quecksilbertropfens, der mit einer Eisennadel in Kontakt steht und von einem Oxidationsmittel umgeben ist, kurz das »schlagende Quecksilberherz« genannt.

Am Beispiel der Liesegang-Ringe läßt sich gut verfolgen, daß trotz der schon vor 60 Jahren gesammelten beachtlichen Menge von Beobachtungsmaterial eine Zeitspanne folgte, in der solche »exotischen Kuriositäten« weniger Beachtung fanden, und zwar vermutlich, weil große Erfolge der Forschung auf der Basis linearer Theorien dominierten.

Im Zuge der Entwicklung neuerer grundlegender Konzepte zum Ver-

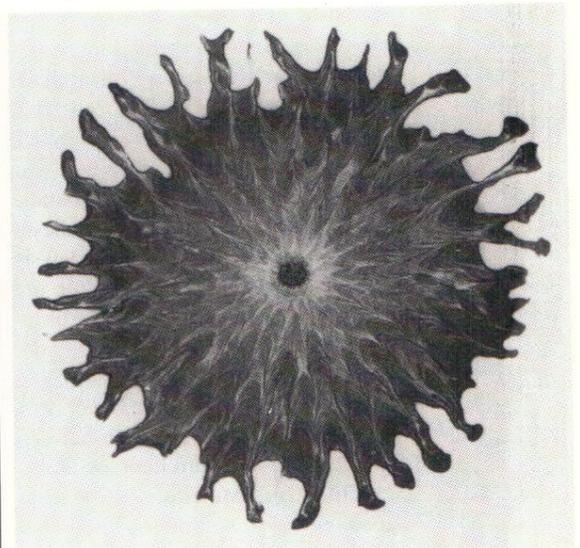


Abb. 1: Nach einem von Runge angegebenen Rezept hergestellte chemische Struktur: ein geeignetes Filterpapier wird mit Mangan- und Kupfersulfat imprägniert. Nach Austrocknen tropft man in regelmäßigen Zeitintervallen kleine Mengen Kalilauge auf die Mitte des Papiers.

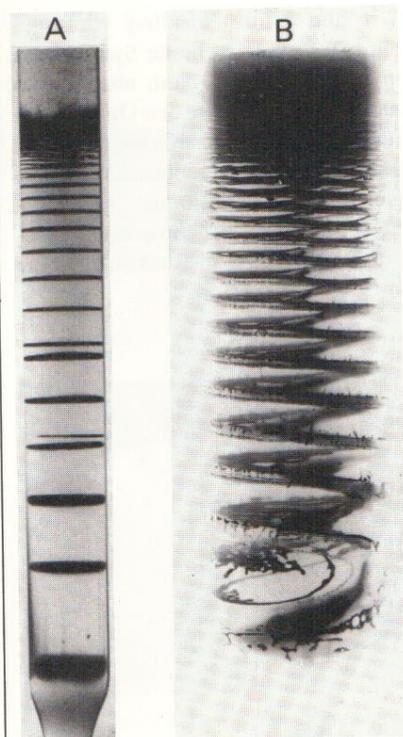


Abb. 2: Liesegangsche periodische Ausfällungsstrukturen aus Bleijodid, die während des Diffundierens von Kaliumjodidlösung in eine Bleinitratlösung in Agar-Gel entstehen.

(A) Parallele scharfe Bänder; (B) helixförmiges, zusammenhängendes Band.

ständnis der dynamisch strukturellen Effekte, die durch nichtlineare Wechselwirkungen zustande kommen, entstand als Gegenspieler zur klassischen, inzwischen mathematisch aus-

gearbeiteten Übersättigungstheorie vor wenig mehr als zehn Jahren das Modell einer chemischen Instabilität. In diesem steht die Konkurrenz zwischen dem durch nichtlineare Gesetze bestimmten Wachstum einzelner, vorerst mikroskopisch kleiner Kristalle im Vordergrund [3]. Die Stärke dieser modernen Fassung liegt darin, daß sie mit größerer Aussicht auf Erfolg auf die Bildung von Ausfällungsstrukturen höherer Komplexität angewendet werden kann. Ein Beispiel ist in *Abbildung 2B* gezeigt. Statt der gewohnten Folge von diskreten Bändern hat sich während der fortschreitenden Diffusion reaktiver Moleküle ein zusammenhängendes, schrauben- oder helixförmiges Band gebildet, dessen mechanistische Aufklärung ein Gegenstand aktueller Forschung bleibt.

Chemische Wellen

Wir sind der Entwicklung vorausgeeilt. Das experimentelle System, das in erst zögernder, dann aber um so nachhaltiger Weise den Durchbruch für die Bedeutung zeitlich-räumlicher Musterbildung in chemischen Nichtgleichgewichtssituationen herbeigeführt hat, war die schon erwähnte Belousov-Zhabotinskii-Reaktion, die

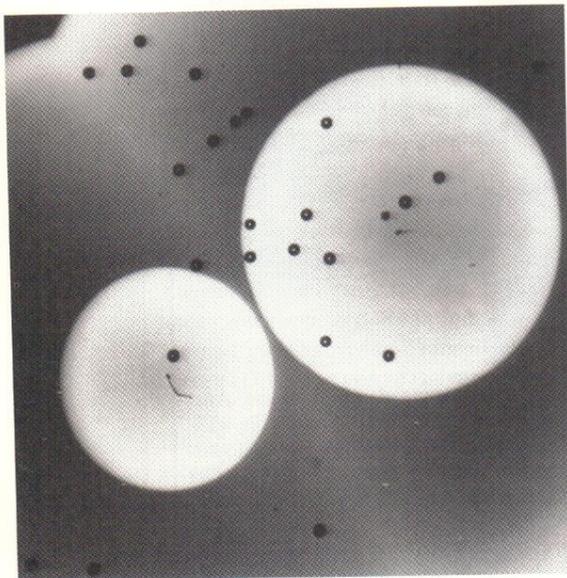


Abb. 3: Kreisförmige Wellen chemischer Aktivität in einem erregbaren Medium der durch den Farbstoff Ferroin katalysierten Belousov-Zhabotinskii-Reaktion. Das digitale Bild eines $16 \times 16 \text{ mm}^2$ Ausschnitts besteht aus 450×450 Bildelementen und gibt die räumliche Konzentrationsverteilung des Redox-Paares Ferroin (reduziert, dunkel) und Ferriin (oxidiert, hell) wieder.

Anfang der fünfziger Jahre erstmals beschrieben wurde. Der russische Chemiker B. P. Belousov mußte allerdings acht Jahre warten, bevor eine kurze Notiz über seine Versuche zu chemischen Oszillationen in flüssiger Phase erschien. Erst die Arbeiten seines Landsmanns Zhabotinskii etwa zehn Jahre später erregten weitverbreitete Aufmerksamkeit. Inzwischen ist eine große Zahl recht unterschiedlicher chemischer Systeme bekannt, die zeitlich-periodische Veränderungen in den Konzentrationen zeigen. Die Reaktionsmechanismen, die solches traditionell als unmöglich betrachtetes Verhalten hervorbringen, sind zum Teil aufgeklärt oder werden intensiv untersucht, ihre Existenz im Rahmen der Nichtgleichgewichtsthermodynamik begründet.

Zhabotinskii verdanken wir auch eine der ersten Untersuchungen über wellenförmige Ausbreitung zeitlich-räumlicher Strukturen in einer zu Oszillationen befähigten Lösung [4]. Während bei der oszillierenden Belousov-Zhabotinskii-Reaktion ein rhythmischer Farbumschlag des Katalysators von rotem, reduziertem Ferroin zu blauem, oxidierten Ferriin erfolgt, kann man die Anfangskonzentrationen dieses Systems auch so einstellen, daß die Lösung in einem tiefroten, reduzierten Zustand verharrt – ohne also von selbst zu oszillieren –, sich aber durch eine kleine Störung zu einem Übergang in den oxidierten Zustand anregen läßt. Eine solche Störung können ein heißer Platindraht, fokussiertes Laserlicht oder auch nur ein sehr kleines Staubkorn sein. Breitet man nun ein solches erregbares Medium als dünne Flüssigkeitsschicht in einer Petrischale aus, so pflanzt sich diese kleine Störung als blauer Ring mit scharfer Front nach außen aus, während im inneren Bereich graduell der ursprüngliche rote Zustand wiederhergestellt wird. Er kann erst nach einer gewissen Refraktärzeit zu einem neuen Übergang angeregt werden.

Ein Beispiel chemischer Wellen ist in *Abbildung 3* gezeigt. Zwei Kreiswellen stehen kurz vor ihrer Kollision, durch welche sie sich gegenseitig auslöschen werden. Es gibt also keine Interferenzerscheinungen, wie wir sie von vielen Wellen in der Physik kennen. Die Abbildung ist ein digitales, von einem Fernsehschirm abphotografiertes Bild mit etwa 200 000 Bildpunkten. Es wurde mit einer moder-

nen Apparatur, einem digitalen zweidimensionalen Spektrophotometer aufgenommen [5]. In diesem Gerät wird durch eine Videokamera die Intensität eines monochromatischen Lichtfeldes gemessen, das durch die Lösungsschicht hindurchgetreten ist. Die Lichtwellenlänge ist so gewählt, daß nur die rote Form des Katalysators absorbiert, die blaue jedoch nicht. Die Signale der Kamera werden digitalisiert, von einem Computer übernommen und als Datenfeld für die Weiterverarbeitung abgespeichert. Aus der Lichtintensität wird die lokale Konzentration des Ferroins in der Lösung berechnet.

Die meß- und darstellungstechnischen Möglichkeiten der rechnergesteuerten Datenverarbeitung wurden auf eine strukturelle Besonderheit in dieser Reaktion angewendet, nämlich die Ausbildung von spiralförmigen Wellen. Solche entstehen, wenn man die Front einer Kreiswelle zerstört, wie A. T. Winfree zum ersten Mal gezeigt hat [6]. Dies kann durch einen schwachen Luftstoß aus einer Pipettenspitze erreicht werden, und es führt dazu, daß die offenen Enden der Wellenfront sich im Laufe der Zeit zu sehr regelmäßigen Spiralen entwickeln. Ein digitales Bild einer aus mehreren Spiralen zusammengesetzten Struktur gibt *Abbildung 4A* wieder.

Die hier untersuchten Wellen drehen sich in etwa 18 Sekunden einmal um ihr jeweiliges Rotationszentrum. Eine Meßfolge von sechs im Drei-Sekunden-Takt aufgenommenen Bildern überdeckt also genau eine Umdrehung. Da im Rechner eine Folge von Bildern in digitaler Form gespeichert ist, läßt sich durch Überlagerungsalgorithmen feststellen, wie hoch in jedem Bildpunkt die maximale Konzentrationsänderung während einer Wellenumdrehung ist. Das Resultat ist in *Abbildung 5* gezeigt, die eine wichtige Eigenschaft chemischer Spiralen verdeutlicht: die Wellenamplitude sinkt innerhalb des dunklen Flecks zum Rotationszentrum hin ab. Dieser Abfall mündet in einem sehr kleinen Punkt, in dem die Chemie durch das Zusammenspiel von Diffusion und Reaktion in einem quasi-stationären Zustand verharrt. Dies ist genau der Drehpunkt der Spiralwelle, der in diesem Experiment eine zeitlich sehr stabile Position in der Flüssigkeit einhält. Wir haben also ein Beispiel vor uns, in dem ein kleiner, ruhender Pol einer Lösung

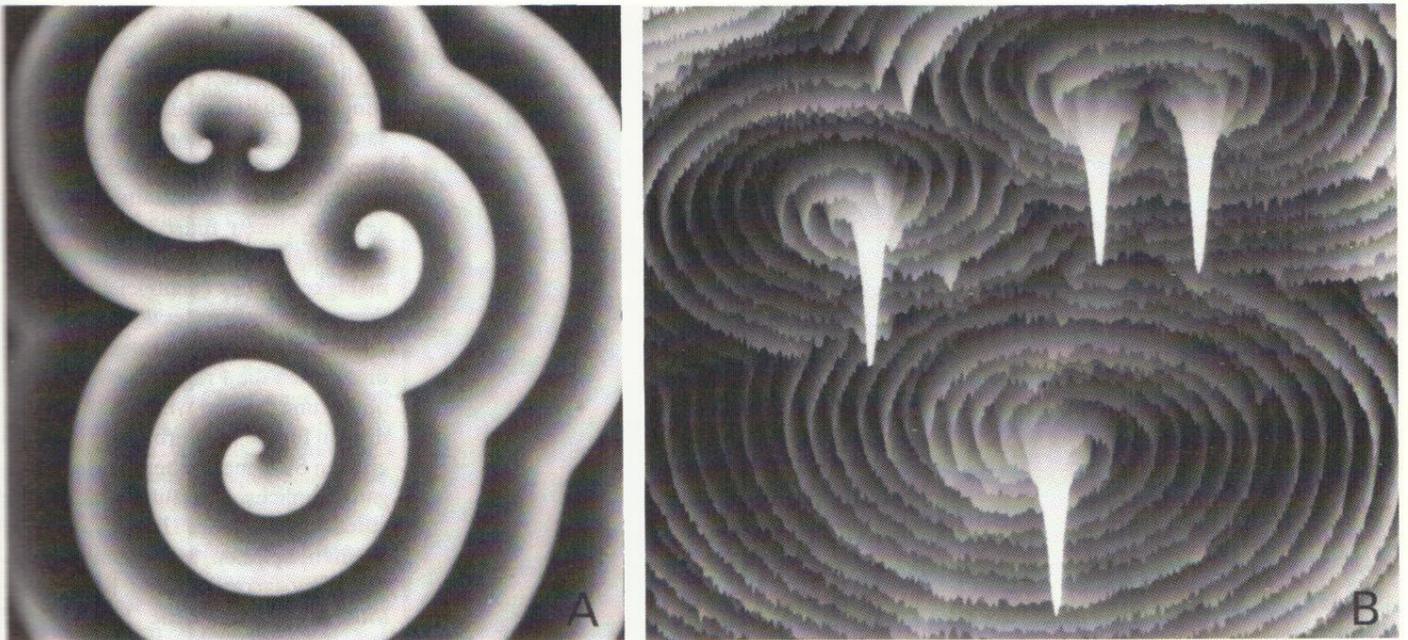


Abb. 4: (A) Momentaufnahme eines Spiralwellenmusters in der Belousov-Zhabotinskii-Reaktion ($10 \times 10 \text{ mm}^2$). (B) Eine durch Überlagerung von sechs unmittelbar auf das Bild A folgenden digitalen Aufnahmen entstandene zusammengesetzte Struktur (vgl. Abb. 5) ist in räumlicher Perspektive dargestellt. Die dritte Raumkoordinate ist durch den Helligkeitswert des jeweiligen Bildpunktes gegeben. Der Betrachter befindet sich an einem Punkt, der unterhalb der oberen Kante in Bild A gelegen ist. Die Helligkeit der Bildpunkte ist gegenüber dem überlagerten Originalbild invertiert, weshalb die einem Tornado ähnliche Struktur der jeweiligen Spiralkerne heller erscheint als ihre Umgebung.

singuläre Eigenschaften aufweist, nämlich stationäres Verhalten, während der gesamte sich außen anschließende Bereich durch die Wellenausbreitung periodischen chemischen Änderungen unterworfen ist.

Ordnet man die in der Schicht gemessene Konzentration der dritten Dimension einem Koordinatensystem zu, so kann durch Interpolationsalgorithmen ein Konzentrationsrelief, eine Fläche in dreidimensionalem Raum berechnet werden. Mittels Verfahren der Computergraphik werden das gesamte Relief oder Ausschnitte unter jedem beliebigen Blickwinkel auf einem Videomonitor abgebildet. So macht man u. a. chemische Gradienten in räumlicher Perspektive sichtbar [7]. Diese graphische Methode wurde in *Abbildung 4B* auf ein Überlagerungsbild – ähnlich wie in *Abbildung 5* – angewendet, das von der in *Abbildung 4A* gezeigten Struktur abgeleitet ist. Der Betrachter sieht sich das Bild in einer räumlichen Perspektive von »unten« an und erkennt die umhüllenden Kernbereiche der vier mit linkem oder rechtem Drehsinn rotierenden Spiralen der *Abbildung 4A*. Die Form dieser singulären Bereiche erinnert stark an einen Tornado.

Diese Beispiele zeigen in etwa den Stand der Meßtechnik an solchen

räumlichen chemischen Strukturen. Wir können hier nicht auf theoretische Einzelheiten eingehen, sondern wollen nur betonen, daß es sich bei den chemischen Wellen auch um Phänomene handelt, die mit gutem Erfolg durch gekoppelte Reaktions-Diffusions-Gleichungen verstanden werden können. Computersimulationen auf der Grundlage dieser Gleichungen lassen sich zum Teil in befriedigender Weise mit der experimentellen Wirklichkeit vergleichen. Sowohl Liesegangsche Strukturen als auch diese Wellen implizieren also im wesentlichen die Diffusion als Transportprozeß. Aber auch andere Transportprozesse können an solcher struktureller Selbstorganisation beteiligt sein, nämlich hydrodynamische Flüsse und Oberflächenspannungen, wie im folgenden kurz erläutert.

Muster in der oszillierenden Glykolyse

Dazu stellen wir einen biochemischen Prozeß vor, den enzymatisch regulierten Abbau von Zucker in der Zelle (Glykolyse). Schon mehr als 20 Jahre weiß man, daß im Zytoplasma von Hefezellen bei bestimmten Flußraten der Glykolyse periodische Vorgänge auftreten, und seither ist die Glykolyse



Abb. 5: Sechsfache Überlagerung eines kleinen Ausschnitts ($1 \times 1 \text{ mm}^2$) des inneren Bereichs einer der rotierenden Spirallen, wie sie in *Abb. 4A* gezeigt sind. Der schwarze Fleck weist auf die besonderen Eigenschaften des Spiralkerns hin, in dessen Mitte das Rotationszentrum der Spirale liegt.

der am eingehendsten untersuchte biochemische Oszillator [8].

In einer dünnen, offenen Schicht des aus den Hefezellen extrahierten Zytoplasmas bilden sich in regelmäßigen Zeitabständen reguläre Muster, wie *Abbildung 6* zeigt. Allerdings benötigt man hierfür eine Fernsehka-

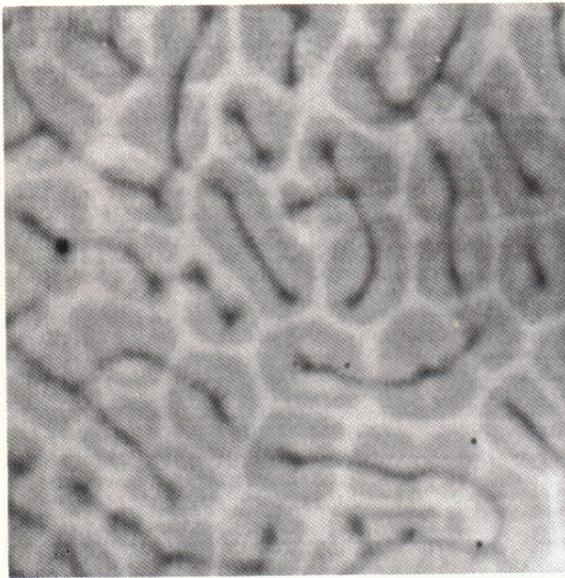


Abb. 6: Mosaikartige Musterung in einer Zytoplasmaschicht, in der glykolytischer Zuckerabbau oszillatorisch erfolgt. Die Strukturen rühren von einem Zusammenwirken von biochemischer Reaktion und konvektiven Flüssen her.

mera, die auch im ultravioletten Spektralbereich empfindlich ist. Denn für unser Auge bleibt die Zytoplasmaschicht unstrukturiert, da keine der biochemischen Substanzen sichtbares Licht absorbiert. Der wesentliche Grund für die Bildung dieser mosaikartigen Struktur liegt darin, daß der lokale Wert der Oberflächenspannung von Veränderungen in der biochemischen Zusammensetzung und der Temperatur an der Oberfläche abhängt. Durch das Zusammenspiel von Verdunstung und oszillierenden Reaktionen geraten daher Oberflächenspannungskräfte aus der Balance und arrangieren sich mit der darunter liegenden Flüssigkeitsschicht in häufig erstaunlich regelmäßigen Mustern. Die in der Abbildung auftretenden hellen und dunklen Linien stellen die Grenzen sogenannter Konvektionszellen dar, an denen langsame und direkt nicht zu beobachtende Flüssigkeitsströme aus verschiedenen Richtungen zusammenstoßen, was einen erhöhten Stofftransport in diesen Bereichen zur Folge hat.

Wenn hydrodynamische Flüsse in einer Lösungsschicht entstehen, in der sich chemische Wellen ausbreiten, bringt das Zusammenwirken beider Transportmechanismen, Diffusion und Konvektion, eine Strukturierung hoher Komplexität hervor, die einen weiten Bereich von ausgeprägter Symmetrie bis hin zu chaotisch anmutenden Formen überspannt.

Tropfenausbreitung mit enzymatischer Aktivität

Schließlich sei noch ein Experiment erwähnt, in dem die Oberflächenkräfte in etwas anderer Weise zu regelmäßiger Strukturbildung beitragen. Dazu benötigt man eine Schicht einer Substratlösung und einen Tropfen Enzym. Sobald dieser Tropfen mit der Oberfläche der Substratlösung in Berührung kommt, wird er durch Unterschiede in der Oberflächenspannung beider Lösungen explosionsartig in alle Richtungen auseinandergerissen [5]. Wie die Abbildung 7A demonstriert, entsteht in reproduzierbarer Weise eine erstaunlich symmetrische, sternförmige Verteilung des Enzyms. Sie kann mit dem zweidimensionalen Spektrophotometer als Erniedrigung der Konzentration des im Ultravioletten absorbierenden Substrats beobachtet werden. Je höher die Enzymkonzentration, desto schneller findet diese Erniedrigung statt. Im Lauf der Zeit verschwimmt die Anfangsgeometrie auf Grund der sich langsam durchsetzenden Wirkung der Diffusion der Moleküle, die dazu neigt, alle Inhomogenitäten in der Konzentration auszugleichen. Während in Abbildung 7B die sternförmige Ausbreitung noch deutlich bewahrt ist, bleibt zu späteren Zeiten nur noch ein heller, diffuser Fleck übrig.

Zum Schluß

Die Reihe chemisch reaktiver Systeme, in denen sich räumliche oder räumlich-zeitliche Muster dynamisch ausbilden, ließe sich fortsetzen. Je-

doch veranschaulichen die angeführten Beispiele wohl in ausreichendem Maße, daß selbst in chemischen Lösungen verhältnismäßig einfacher Zusammensetzung die nichtlineare Verkopplung mit physikalischen Transportprozessen zur Entfaltung komplexer Strukturen führt, vorausgesetzt, das System ist offen und den Gesetzmäßigkeiten der Nichtgleichgewichtsthermodynamik unterworfen.

Wie schon zu Beginn angesprochen, drängt sich die Frage auf, welche Mechanismen für die Musterbildung in biologischen Systemen haben, in denen wir ganz ähnliche strukturelle Elemente entdecken: scharfe Bänder, diffuse Streifen, Spiralen, helixförmige Strukturen, mosaikartige oder hexagonale Muster, konzentrische Kreise oder Verzweigungspunkte von Linien. Zu wieviel mehr strukturellen Variationen sollten dann biologische Systeme fähig sein, in denen Makromoleküle mit viel spezifischeren Eigenschaften in Aktion treten. Beispiele in biochemischen Lösungen haben wir genannt, und in der wissenschaftlichen Literatur der letzten Jahre finden wir immer häufiger Anwendungen der in der Nichtgleichgewichtsthermodynamik entwickelten Modellansätze auf biologische Systeme, die beispielsweise zur Erklärung von spiralförmigen Aggregationsmustern gewisser Schleimpilzkolonien oder in der Morphogenese von Muscheln mit ihren vielfältigen Mustern herangezogen werden. Dies steckt einen Rahmen ab, der über das Interesse des Physikochemikers an formbildender Dynamik in reaktiven Lösungen weit hinausreicht.

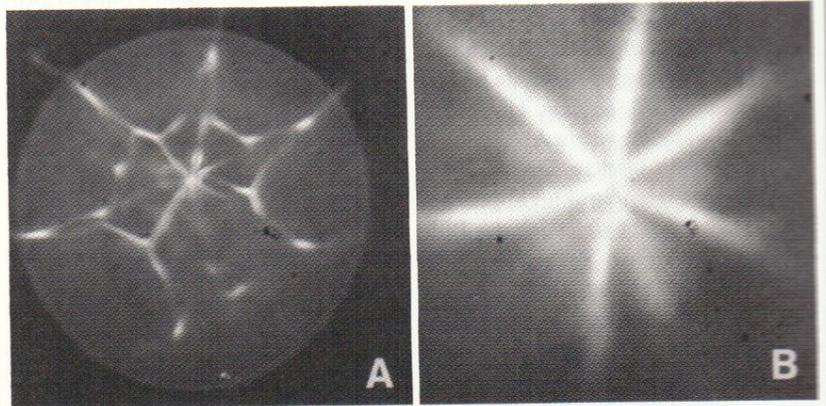


Abb. 7: Ausbreitung enzymatischen Umsatzes nach Zugabe eines Tropfens Lactatdehydrogenase in eine die Enzymsubstrate NADH und Pyruvat enthaltende Lösungsschicht. Die Anfangsgeometrie wird durch Oberflächenspannungskräfte erzeugt (Bild A). Später werden die scharfen Konturen durch diffusen Transport verwaschen (Bild B).

Literatur

- 1 Hersch, G., Bursenas, H. H., 1985, Bilder, die sich selber malen. Der Chemiker Runge und seine Musterbilder für Freunde des Schönen (Studio Du Mont, Köln)
- 2 Hedges, E. S., Myers, J. E., 1926, The Problems of Physico-Chemical Periodicity (E. Arnold & Co., London); K. H. Stern, 1954, The Liesegang Phenomenon. Chem. Rev. 54, 79)
- 3 Kai, S., Müller, S. C., Ross, J., 1982, Measurements of Temporal and Spatial Sequences of Events in Periodic Precipitation Processes. J. Chem. Phys. 76, 1392
- 4 Zhabotinskii, A. N., Zaikin, A. N., 1970, Concentration Wave Propagation in a Two-Dimensional, Liquid-Phase Self-Oscillating System. Nature 225, 535
- 5 Müller, S. C., Plesser, Th., Hess, B., 1986, Two-dimensional Spectrophotometry and Pseudo-Color Representation of Chemical Reaction Patterns. Naturwissenschaften 73, 165
- 6 Winfree, A. T., 1974, Rotating Chemical Reactions. Sci. Amer. 230, 82
Müller, S. C., Plesser, Th., Hess, B., 1985, The Structure of the Core of the Spiral Wave in the Belousov-Zhabotinskii Reaction. Science 230, 661
- 7 Müller, S. C., Plesser, Th., Hess, B., 1987, Three-dimensional Representation of Chemical Gradients. Biophys. Chem. 26, 357
- 8 Hess, B., Boiteux, A., 1980, Oscillations in Biochemical Systems. Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 84, 392
Hess, B., Markus, M. 1987, Ordnung und Chaos in chemischen Uhren. In: Ordnung aus dem Chaos (Hrsg. B. O. Küppers, Serie Piper 743, München, Zürich) Seite 157



Eine Collage aus Darstellungen dynamischer Vorgänge in Chemie und Mathematik, die für das Plakat zur auf Seite 38 erwähnten Ausstellung gemacht wurde.

Der Bergkegel mit seinen Ausläufern ist die dreidimensionale Darstellung des Kernbereichs einer Spiralwelle der Belousov-Zhabotinskii-Reaktion; ein Beispiel aus der Mathematik ist durch die verschlungenen Strukturen im oberen Bereich des Bildes gegeben (siehe auch Abb. 1 auf S. 39).