

# Fraktale biologische Strukturen

## Bildanalyse und Rechnersynthese

Von Manfred Sernetz, Harald R. Bittner, Peter Wlczek

Ziel eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsprojekts „Wachstum offener Systeme“ der Arbeitsgruppe Angewandte Biochemie ist die kinetische und strukturelle Analyse des Wachstums von Organismen mit fraktaler Organisation. Zur Aufklärung fraktaler Strukturiertheit dienen bildanalytische Verfahren. Fraktale Organstrukturen und ihr Wachstum lassen sich durch Rechnersynthese mittels Renormierungsverfahren und rekursiver Rechnermodelle simulieren. Aus der Rekonstruktion können die von fraktal strukturierten Gewebssystemen gewonnenen rheologischen und reaktionskinetischen Kenngrößen für Transport und Verteilung von Substraten des Stoffwechsels abgeleitet werden. In diesem Beitrag werden aus diesem Forschungsprojekt Beispiele der Gefäßanalyse und Gefäßsimulation vorgestellt.

### Fraktale Strukturen

Wir beobachten in der belebten und unbelebten Natur eine Vielzahl von Formen, die uns an sich vertraut scheinen, die jedoch eine so komplexe Struktur haben, daß ihr Aufbau und Gefüge sich bis vor kurzem einer quantitativen Beschreibung entzogen und mit so vagen Begriffen wie z. B. „verästelt, zerknittert, klumpig, körnig, schwammig, porös, wolkig, verwirbelt“ umschrieben werden mußten. Diese natürlichen Formen bilden einen Gegensatz zu den geometrisch einfachen, aber daher auch eher abstrakten Körpern mit leicht definierbaren Maßen wie Volumen und Oberfläche, in dem sie überraschenderweise Eigenschaften haben, deren Größe von der zur Beobachtung gewählten Auflösung abhängen.

So haben z. B. ein Baum oder ein Mensch zwar ein eindeutiges Volumen, das man etwa aus dem Gewicht (bei gegebenem spezifischen Gewicht) oder aus der Wasserverdrängung leicht bestimmen kann. Wie aber soll man ihre Oberfläche erfassen? Auch dem Blutgefäßsystem aus Arterien, Kapillaren und Venen kann man ein durch die Blutmenge definiertes Volumen zuschreiben. Wie groß ist aber die entsprechende Oberfläche,

die in den Kapillaren den Stoffaustausch zu den Zellen vermittelt? In der Medizin lernen wir, daß zur Übertragung auf verschiedene große Organismen diagnostische Funktionswerte oder pharmakologische Dosierungen auf eine ominöse Standardoberfläche des Menschen von 1,72 m<sup>2</sup> bezogen werden müssen. Im selben Atemzug wird jedoch auch gesagt, daß allein die Oberfläche der Lunge bereits so groß wie ein Fußballfeld sei. Hier wird offensichtlich mit verschiedenem Maß gemessen. Eine Aussage über die Fläche ist in diesen Fällen nur sinnvoll, wenn gleichzeitig auch der Maßstab angegeben wird, mit dem sie ermittelt wurde.

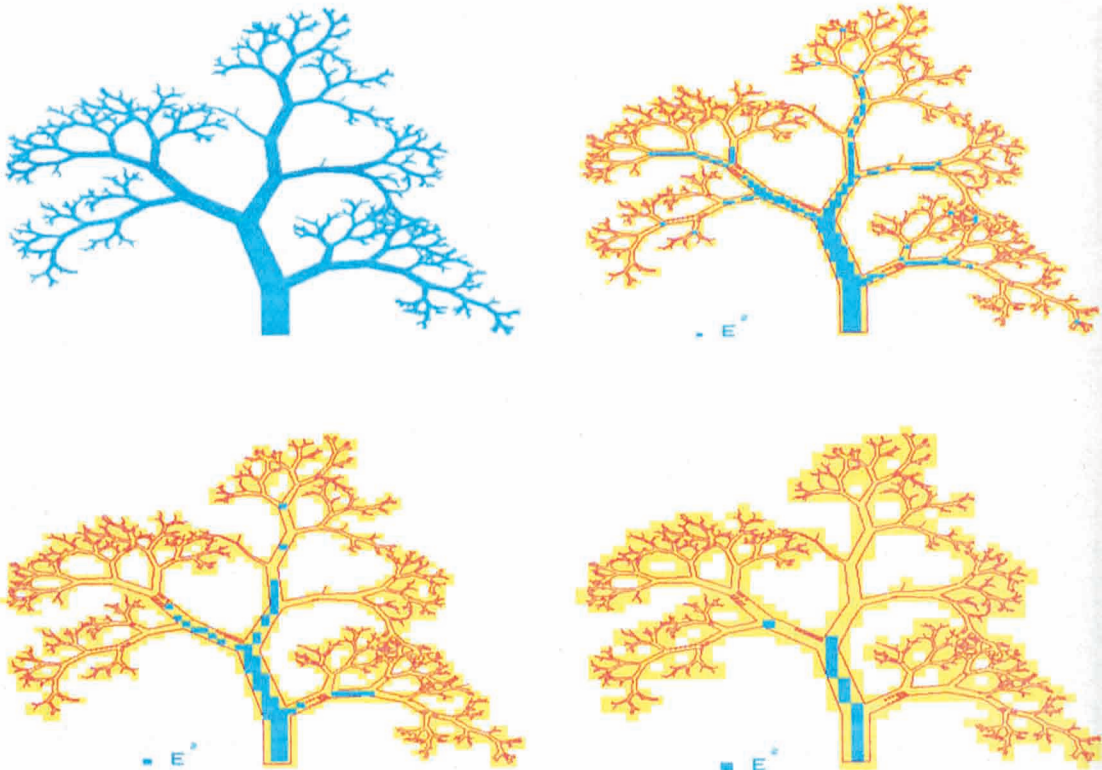


Abb. 1 a-d: Automatische Bildanalyse eines fraktal verzweigten Gefäßsystems: Bestimmung der Grenze („Oberfläche“, rot) nach der Einbettungsmethode durch Bedecken der Grenze mit Rasterelementen  $E^2$  (gelb) variabler Größe. Auf die gleiche Art erhält man das vom Maßstab abhängige innere Volumen durch Abdeckung mit den entsprechenden Rasterelementen (blau).

Das hier apostrophierte unterschiedliche Maß liefert den Schlüssel zur Lösung des Problems, zum Verständnis des Aufbaus komplexer Körper und zu ihrer quantitativen Beschreibung als sogenannte fraktale Strukturen. Die Oberfläche hochgefalteter Körper ist keine Konstante, ihr Wert hängt vielmehr ab von der Größe des zur Messung angelegten Maßstabs oder der für die Darstellung benutzten Auflösung. Je kleiner der Maßstab oder je höher die Auflösung, desto mehr Strukturdetails werden erkennbar und können erfaßt werden, und desto größer wird demnach die daraus resultierende Meßgröße „Oberfläche“. Durch maßstabsabhängige, sich dauernd wiederholende Faltung erhält man Körper von konstantem Volumen und einer mit der Auflösung gegebenenfalls unbegrenzt wachsenden „fraktalen“ Oberfläche.

Versteht man die Bestimmung der Fläche  $F(E) = N \cdot E^2$  als die Messung der Anzahl  $N$  der zur Bedeckung notwendigen Flächenelemente bekannter Größe  $E^2$  (als Maßstab), so stellt man bei solcherart strukturierten, fraktalen Flächen fest, daß sich die zu untersuchende Struktur der Messung mit einer nichtstrukturieren Fläche  $E^2$  (euklidische Dimension 2) entzieht, indem sie durch ihre Faltung in eine diesem ebenen Maßstab fremde Dimension ausweicht. Der aus der Änderung des Maßstabs folgende und meßbare Flächenzuwachs aber ist als sogenannter dimensionaler Exzeß  $b = 2 - D_f$  ein

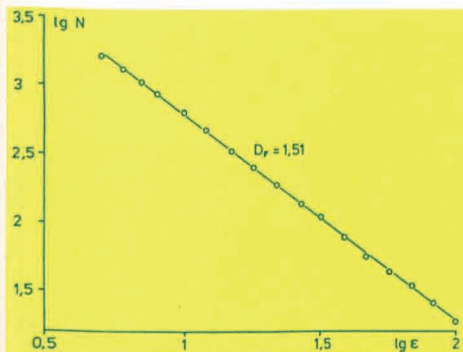


Abb. 2: Anzahl  $N$  der zur Bedeckung der Grenze benötigten Rasterelemente aus Abb. 1 als Funktion des zur Messung benutzten Maßstabs  $E$ . In der doppeltlogarithmischen Darstellung liefert die Steigung der Regressionsgeraden die fraktale Dimension  $D_F$  der untersuchten Struktur.

charakteristisches Maß für die „Intensität“ der Faltung und für die dem Objekt dadurch eigene fraktale Dimension  $D_F$  [1]. Bleibt die fraktale Strukturierung über einen großen Maßstabsbereich sich selbst gleich, so bezeichnet man sie als selbstsimilar, und der dimensionale Exzeß  $b$  und damit die fraktale Dimension  $D_F$  sind charakteristische Konstanten. Aufgrund dieser Maßstabsabhängigkeit ist z. B. dem Organismus eine „Oberfläche“ mit der fraktalen Dimension  $D_F = 2,25$  zuzuschreiben, woraus sich eine Reihe sogenannter allometrischer Beziehungen erklären läßt [2].

### Automatische Bildanalyse

Zur quantitativen Beschreibung von Bildinhalten eignen sich die Verfahren der automatischen Bildanalyse. Hierbei wird zunächst von der zu untersuchenden Struktur mittels einer CCD-Videokamera in einem Rechner ein digitalisiertes Bild erzeugt. Auf dessen kleinste Rasterelemente (Pixel mit Graustufen) können zur Analyse ihrer gegenseitigen Verknüpfung oder zur gezielten Bildtransformation beliebige Operationen angewendet werden, z. B. die Summierung der an einer Grauwertgrenze liegenden Pixel zur Bestimmung der Länge einer Kontur. Die Größe der Rasterelemente bestimmt dabei die Grenzauflösung des aufgenommenen Bildes.

Die meisten heutigen Anwendungen der automatischen Bildanalyse in der Medizin dienen zur Erkennung spezifischer Gewebs- und Zellstrukturen für diagnostische Zwecke. Üblicherweise wird dabei jeweils die höchste sinnvolle und technisch mögliche Auflösung angestrebt. Hierbei wird jedoch die jedem Bildinhalt zugrundeliegende, maßstabsabhängige Strukturierung, d. h. der fraktale oder selbstsimilare Anteil, als unerwünschte Störung oder als Rauschen betrachtet, und es wird möglichst versucht, dies durch Festsetzung einer unteren Grenze (Schwelle) zu unterdrücken.

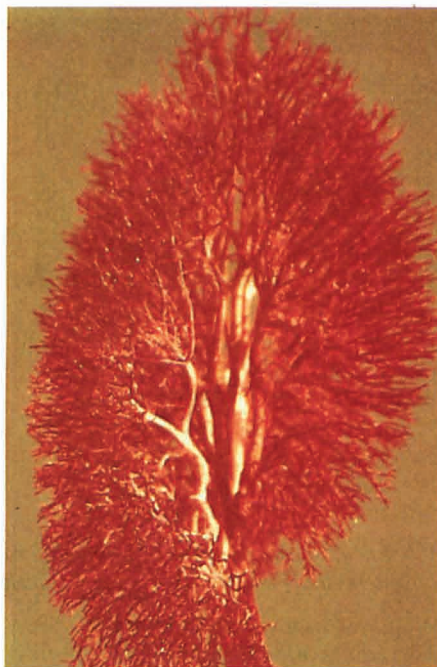


Abb. 3: Gefäßausguß von Nierenarterien, Stereoaufnahmen: Zur Erzielung des räumlichen Eindrucks betrachte man die beiden Bilder aus etwa 50 cm Abstand mit konvergierendem Strahlengang, d. h. über Kreuz (Aufnahmen J. Coenen).

Im Gegensatz hierzu kommt es uns aber gerade darauf an, die Maßstabsabhängigkeit der Strukturierung zu erfassen und daraus den dimensionalen Exzeß, die fraktale Dimension und andere Kenngrößen als Maßzahlen zu bestimmen. Diese Meßdaten kennzeichnen den allgemeinen Aufbau eines Gewebes, wie z. B. die Art der Verzweigung und Volumenfüllung des Blutgefäßsystems eines Organs. Das bildanalytische Vorgehen sei am Beispiel der Bestimmung der fraktalen Dimension des Umfangs eines zweidimensionalen Gefäßbaums (Abb. 1 a-d) mittels der sogenannten Einbettungsmethode demonstriert. Man kann die Länge  $L(E)$  einer Kontur in Abhängigkeit vom gewählten Maßstab  $E$  oder der Auflösung  $1/E$  messen, indem man die Anzahl  $N$  der Flächenelemente  $E^2$  ermittelt, die notwendig sind, um die Kontur völlig abzudecken, und die daraus gebildete Gesamtfläche  $N \cdot E^2$  durch die Länge  $E$  des Maßstabs dividiert.

$$L(E) = dA(E)/dE = N \cdot E^2/E$$

Im Falle einer fraktal gewundenen Kontur zeigt sich, daß  $N \cdot E$  keine Konstante ist, daß vielmehr  $N$  in einem bestimmten Bereich einer Potenzfunktion des Maßstabs  $E$  mit der fraktalen Dimension  $D_F$  als Exponent folgt,  $N \sim E^{-D}$ .

Diese Einbettungsmethode läßt sich leicht mit einem Bildverarbeitungssystem realisieren: über die zu untersuchende Struktur wird ein Raster der Kantenlänge  $E$  gelegt, und es werden die Quadrate ausgezählt, die auf der Objektgrenze liegen. Mit abnehmendem Maßstab bildet das Raster die Grenze der Struktur zunehmend genauer ab (Abb. 1 a-d).

Trägt man nun die gemessene Anzahl  $N$  oder Länge  $L(E)$  gegen den Maßstab  $E$  doppeltlogarithmisch auf (Abb. 2), so erhält man eine Gerade, deren Steigung die fraktale Dimension  $D_F$  bzw. der dimensionale Exzeß  $b$  ist. Das hier an einer Längenmessung ( $D \geq 1$ ) vorgestellte Verfahren läßt sich auch auf die Messung der Strukturiertheit in anderer Dimension übertragen, wie zum Beispiel Ereignisse, Punktverteilungen ( $D \geq 0$ ) oder Flächen ( $D \geq 2$ ), und damit zur Analyse der fraktalen Struktur dreidimensionaler Datensätze des Gewebeaufbaus nutzen. Als Beispiel hierfür diene ein Ausgußpräparat der Arterienverzweigung einer Niere (Abb. 3), deren räumlicher Eindruck durch stereoskopische Betrachtung vermittelt werden kann.

### Rechnersynthese

Die aus der Bildanalyse gewonnenen Kenngrößen dienen ihrerseits zur Modellierung und Stimulation biologischer fraktaler Strukturen, hier von Gefäßsystemen, mittels Rechnersynthese und zum Vergleich morphometrischer und kinetischer Eigenschaften zwischen Original und rechnergeneriertem Modell (Abb. 4).

Die allgemeine Konstruktionsvorschrift für den Rechner zur Erzeugung eines fraktalen Verzweigungssystems geht als rekursives Verfahren von einem sog. Initiator (in unserem Fall von einem Stammgefäß) aus. Ein Generator (Entstehen einer Gabelung) wird wiederholt auf die bestehenden Verzweigungsenden angewendet, wodurch das System an den Spitzen wächst. Als Variablen dienen mit wählbaren Wahrscheinlichkeitsverteilungen die Verzweigungsrichtungen

und -winkel und die Verjüngungsverhältnisse der Längen und Querschnitte von Generation zu Generation, die durch die vorgegebene fraktale Dimension des Systems bestimmt sind. Dem Längenwachstum der bestehenden Adern wird dadurch Rechnung getragen, daß die Vergrößerung, unter der das System betrachtet wird, während des Wachstums kontinuierlich so verändert wird, daß die kleinsten, endständigen Verzweigungen (Kapillaren) jeweils mit gleicher Größe dargestellt werden.

Damit entstehen Modelle wachsender arterieller und venöser Gefäßsysteme (Abb. 4 a-d) mit definierter fraktaler Substrukturierung über einen weiten Maßstabbereich, deren Aussehen und Eigenschaften mit denen von Originalgeweben verglichen werden können. Wendet man die oben beschriebene bildanalytische Methode ihrerseits auf das berechnete fraktale Modell an, so erhält man als Ergebnis wieder die zur Synthese verwandte fraktale Dimension. Die Änderung der Strukturierungsvorschrift z. B. auf verschiedenen Generationsstufen erlaubt die Konstruktion und Simulation auch anderer komplexerer anatomischer Formen.

#### Kinetische Konsequenzen

Die Simulation des Aufbaus des Gefäßsystems mittels Rechnersynthese dient aber nicht allein zur morphologischen Beschreibung des Systems als fraktale Struktur. Vielmehr erlaubt die Analyse z. B. aller Weglängen und der Laufzeiten in den Iterationen auch die Beschreibung der Verweilzeitverteilungen und liefert damit die Übertragungsfunktion des Organs (Abb. 5). Diese zeigt, wie effektiv z. B. eine Bolusinjektion in die zuführende Arterie durch das Gefäßsystem vermischt wird und in der abführenden Vene als breite Verteilung das Organ verläßt. Sie charakterisiert damit auch das pharmakokinetische Verhalten des Organs oder des Gefäßsystems als Kompartiment des Organismus. Aus der Zusammenfassung und Überlagerung der Verweilzeitverteilungen immer größerer Gebiete der fraktalen Verzweigungsbahn resultiert schließlich die Verweilzeitverteilung oder das Clearance-Verhalten des gesamten Organismus. Damit können auch maßstabsabhängige (allometrische) Beziehungen stoffwechselphysiologischer Größen aus der fraktalen Organisation des Organismus erklärt werden [2, 3].

Wichtigste kinetische Konsequenz des fraktalen Aufbaus des Gefäßsystems ist, daß dieser dem Körper eine turbulente Verteilungscharakteristik und damit einen höchstmöglichen Wirkungsgrad der transportabhängigen Stoffwechselprozesse verleiht, obwohl alle Strömungen und Konvektionen im Kleinen laminar sind. Im Organismus ist die fraktale und selbstsimilare



Abb. 4 a-d: Rechnersynthese und Simulation des Wachstums eines arteriellen und venösen Gefäßsystems mit Vorgabe der fraktalen Dimension  $D_F = 2,88$ .

Organisation der Gewebe und Transportsysteme das strukturelle Äquivalent und morphologischer Träger der Turbulenz, die selbst ein dynamisch selbstsimilares Phänomen ist.

In der fraktal verzweigten Blutbahn ist der Weg eines Erythrozyten trotz laminarer Strömung nicht berechenbar, sondern chaotisch. Die Rückkopplung der Iterationen seines periodischen Umlaufs im Körperkreislauf zeichnet seinen chaotischen Weg nach und bildet bei hinreichend langer, stroboskopischer Beobachtung das Gefäßsystem und die Anatomie des gesamten Körpers ab. Dieser komplizierte Weg der Erythrozyten stellt mathematisch einen „strange attractor“ dar. Schnitte aus dreidimensionalen Datensätzen der vom Rechner generierten fraktalen Gefäßbahn, ebenso wie beliebige anatomische Schnitte durch den Körper können daher als „Poincaré-Karten“ oder Phasendiagramme des nicht vorhersagbaren, „ergodischen“ Wegs eines Erythrozyten betrachtet und analysiert werden. In einem solchen Poincaré-Schnitt des Attraktors wird die fraktale Hierarchie der Gewebe als Inseln gemeinsamer Gefäßversorgung, gleicher Weglängen und gleicher Verweilzeiten aufgeschlüsselt.

#### Fachübergreifende Bedeutung nichtlinearer Dynamik

Die hier am Beispiel fraktalen Gewebsaufbaus beschriebene Strukturbildung ist dadurch gekennzeichnet, daß bestimmte Rechenvorschriften über einen großen Maßstabbereich immer wieder auf sich selbst angewendet werden. Dies sind rekursive Prozesse, bei denen das aus dem  $n$ -ten Schritt (Iteration) erhaltene Ergebnis  $F(X_n)$  erneut zum Eingang der nächsten Rechnung  $n+1$  benutzt wird.

$$X_{n+1} = F(X_n)$$

Eine derartige Rückkopplung liefert bei linearen Funktionen  $F$  einfach beschreibbare Ergebnisse, wie z. B. stetiges exponentielles Wachstum. Bei nichtlinearen Funktionen jedoch kann bei bestimmten Parameterwerten Rückkopplung und Wechselwirkung zu höchst komplexem oder quasi deterministisch-chaotischem Verhalten führen [2]. Dieser mathematische Zusammenhang führt in seiner Bedeutung für die Beschreibung komplexer Systeme weit über die hier benutzten speziellen Beispiele aus der Biologie hinaus und beeinflusst in jüngster Zeit das Verständnis für das Verhalten komplexer Wechselwirkung in vielen Bereichen der Wissenschaft. Beispiele hierfür sind Strukturbildung durch chemische Rückkopplung, von der Belousov-Zhabotinski-Reaktion bis zur biochemischen Rückkopplung im Zellstoffwechsel mit der Fähigkeit zu periodischem oder aperiodischem Verhalten des Systems, oder die Rückkopplung und Regelung in Bioreaktoren bei heterogenkatalytischen, biochemischen und biotechnologischen Prozessen. Nichtlineare Dynamik bildet die Basis zum Auffinden höherer Ordnung in komplexen Biosignalen (EKG, EEG, Tremor).

Sie liegt auch dem Wachstum und der Clusterbildung in gesellschaftlichen Systemen durch Wechselwirkung zwischen Individuen zugrunde. Damit liefert die nichtlineare Dynamik auch die analytische Grundlage für die Beschreibung komplexer soziologischer, ökologischer, wirtschafts- und finanzpolitischer, aber z. B. auch epidemiologischer oder linguistischer Entwicklungen. Fraktale Strukturierung betrifft in der Physik die Erklärung kritischer Phänomene, die Be-

Konzentration

Verweilzeit

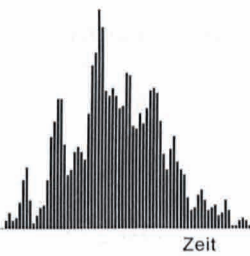


Abb. 5: Verweilzeitverteilung des Arterien-Venen-Systems aus Abb. 4 d.

schreibung von Turbulenzen und von räumlicher und zeitlich verteilter Clusterbildung wie der fraktalen Materieverteilung im Kosmos. In den Material- und Geowissenschaften dient sie zur Analyse der Struktur und des Bruch- und Fließverhaltens heterogener, poröser und viskoser Materialien.

Die von uns hier vertretenen Beispiele stellen somit nur einen Anwendungsbereich aus den biologischen und medizinischen Wissenschaften innerhalb einer fachüber-

## Haben „Seltene Erden“ bei neuen Supraleitern ausgedient?

(dpa) – Einen neuen Hochtemperatur-Supraleiter auf der Basis von Wismut-Strontium-Calzium-Kupferoxid haben japanische Wissenschaftler des Science and Technology Agency's National Research Institute for Metals in Tsukuba entwickelt. Alle bisher gefundenen Hochtemperatur-Supraleiter enthalten Elemente der Gruppe der „Seltene Erden“, etwa Yttrium und Lanthan, die nicht gerade häufig in der Erdkruste vorkommen. Beiden Substanzgruppen gemeinsam ist jedoch das Kupferoxid.

Wie die in London erscheinende Zeitschrift „nature“ kürzlich berichtete, hatte das japanische Ministerium für Internationalen Handel und Industrie (MITI) ein Programm zum Ersatz von „Seltene Erden“ in Hochtemperatur-Supraleitern durchgeführt. Experten befürchten, daß die Vorkommen „Seltene Erden“ auf der fernöstlichen Inselgruppe gerade dann erschöpft sein könnten, wenn die neuen Stoffe anwendungsreif seien.

Das neue Oxid beginnt bei minus 153 Grad Celsius seinen elektrischen Widerstand zu verlieren, bei minus 165 bis 168 Grad ist er fast und bei minus 198 Grad vollständig auf Null abgesunken. Dr. Hiroshi Maeda, dessen Arbeitsgruppe das Oxid gefunden hat, glaubt deshalb, daß die neue Keramik aus zwei Phasen besteht. Die genaue kristalline Struktur ist bislang noch nicht bestimmt worden.



*Zum Autor: Professor Dr. Manfred Sernetz (rechts) ist Leiter der Arbeitsgruppe Angewandte Biochemie und klinische Laboratoriumsdiagnostik im Fachbereich Veterinärmedizin. Seine Hauptforschungsgebiete sind Biotechnologie und vergleichende Stoffwechselphysiologie, Entwicklung von Zellreaktoren und Bioreaktoren mit immobilisierten Enzymen, die Entwicklung impulsfluorometrischer und mikrointerferometrischer Verfahren für Zellanalysen, die automatische Bildanalyse und Rechnersimulation fraktaler Gefäßsysteme und ihres Wachstums im Organismus sowie die Analyse fraktaler Oberflächen poröser Materialien. Wie das Photo zeigt, ist mit dem damaligen hessischen Wirtschaftsminister Steger-Professor Sernetz kein Unbekannter auf der Hannovermesse: Bereits 1986 stellte er einen gemeinsam mit seiner Arbeitsgruppe entwickelten Bioreaktor auf dem Stand der Universität Gießen vor.*

## Der erste Supraleitungsmotor läuft

(dpa) – Der erste Elektromotor der Welt, bei dessen Bau die neuen supraleitenden Keramiken verwendet werden, ist in den USA entwickelt worden. Forscher des Argonne National Laboratory der Universität Chicago wollten ihn Anfang Februar der Öffentlichkeit vorstellen.

Das Demonstrationsmodell ist noch zu klein für eine praktische Nutzung, es schafft 50 Umdrehungen pro Minute und verwendet als Keramikmaterial Yttrium-Barium-Kupfer-Oxid. Es läuft bei 94 Kelvin oder minus 179 Grad Celsius. Diese Temperatur wird durch Abkühlung mit flüssigem Stickstoff erreicht. Mit einer kommerziellen Nutzung rechnet Roger Poepfel von Argonne erst in etwa zehn Jahren.

Grundprinzip des Motors ist der sogenannte Meissner-Effekt. Damit wird das Herausdrängen des Magnetfeldes aus einem Supraleiter bei Unterschreiten der Sprungtemperatur bezeichnet. Unterhalb der Sprungtemperatur wird das Material schlagartig supraleitend, das heißt es leitet einen fließenden Strom praktisch widerstandslos.

Bei dem Versuchsmodell sind auf einer drehbar gelagerten Aluminiumscheibe 24

greifenden, durch die gemeinsame mathematische Sprache verbundenen Forschungsthematik dar.

### Die Arbeitsgruppe

Die hier vorgestellten biologischen Beispiele sind Ergebnisse der Arbeitsgruppe Angewandte Biochemie, in der Chemiker, Physiker, Ingenieure, Biologen und Tierärzte mit ihrem eigenen Fachwissen zu diesem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten, interdisziplinären Forschungskonzept „Wachstum offener Systeme“ beitragen.

### Literatur

1. B. B. Mandelbrot: Die fraktale Geometrie der Natur. Birkhäuser, Basel 1987
2. M. Sernetz, H. R. Bittner, H. Willems: Organismen als Bioreaktoren. Umschau 86, 582 (1986)
3. M. Sernetz: Organismen als Bioreaktoren. JLU-Forum 4 (1985), 26
4. W. Seifritz: Wachstum, Rückkopplung und Chaos. Hanser, München 1987

kleine Elektromagnete montiert. Darunter befinden sich zwei kleine, auf 94 K abgekühlte Blöcke aus supraleitender Keramik. In dem Moment, wo sich ein Elektromagnet einem Supraleiter nähert, wird er eingeschaltet. Dabei baut sich ein elektrisches Feld auf, auf das der Supraleiter mit einem eigenen Magnetfeld antwortet. Als Folge stoßen sich beide Felder ab, und die Scheibe beginnt zu rotieren. Der erste Elektromagnet schaltet sich aus, der Schwung treibt die Scheibe aber weiter, bis sich der nächste Magnet nähert. Der schaltet sich an, und das Spielchen beginnt von vorn.

## Supermärkte schon im alten Pompeji

(df) – Überraschende Parallelen zwischen dem Geschäftsleben der Antike und heutigen Handels-Gebräuchen förderte die Alt-historikerin Verena Gassner über den Handel im alten Pompeji zutage. Schon in der zweiten Hälfte des ersten nachchristlichen Jahrhunderts gab es ähnliche Einrichtungen wie die modernen Supermärkte und auch Großgeschäftshäuser, die sich über mehrere Häuserblocks erstreckten. Ähnlich den legendären Fuggern, gab es auch damals schon Kaufmannsdynastien, die kräftig die regionale Politik mitbeeinflussten. Die Geschäftslokale, in denen unter anderem Gemüse, Wein, eine spezielle Fischarte und Mühlsteine angeboten wurden, befanden sich durchwegs zu ebener Erde, während die Obergeschosse der Kaufhäuser als Magazine dienten. Die meisten Geschäftsbesitzer waren sogenannte Freigelassene, die Verkäufer größtenteils Sklaven. Staatsbeamte wachten streng über die Einhaltung der Lebensmittelgesetze.