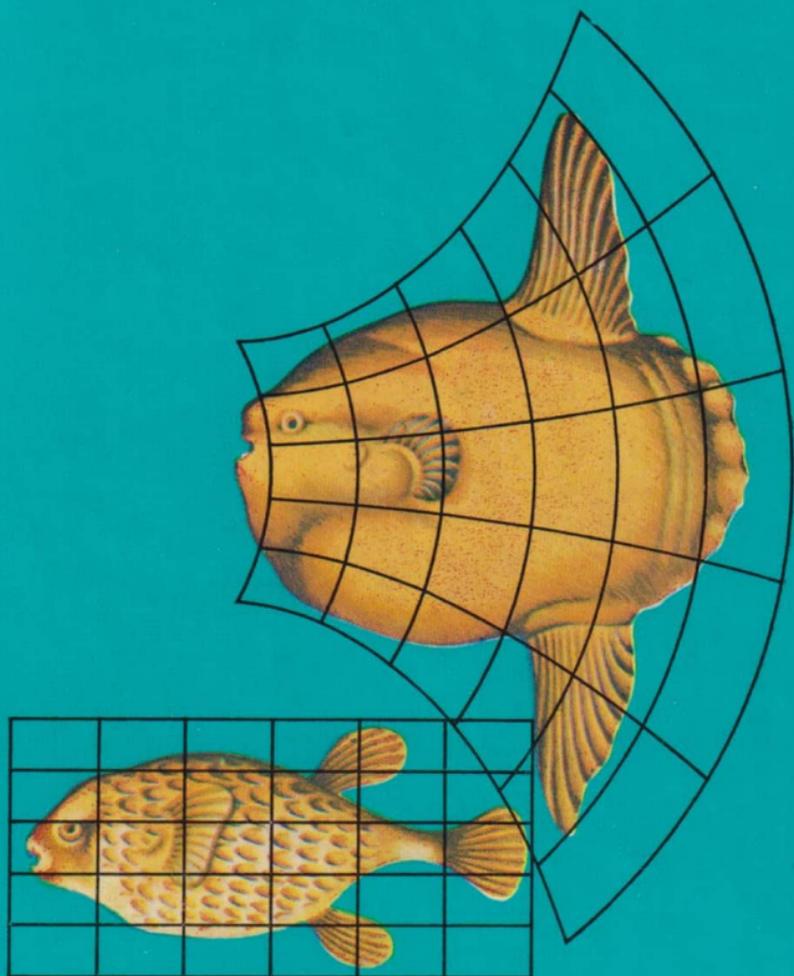


Roland Glaser

BIOLOGIE

einmal anders



Roland Glaser

BIOLOGIE
einmal anders

Urania-Verlag
Leipzig · Jena · Berlin

**Denen gewidmet,
die Biologie studieren wollen,
auch ohne die Aussicht,
einmal Zoodirektor zu werden.**

Zur Einleitung

Biologie gestern, heute, morgen. Was ist ein Biologe? Wieviel Physik und Mathematik braucht ein Biologe? Ist Biologie eine exakte Wissenschaft? Muß ein Biologe nur sammeln und vergleichen? Sollte man nicht Biologie einmal anders treiben?

Was ist eigentlich ein Biologe? Die Antworten auf diese Frage, würde man sie sammeln, sähen sicher recht bunt aus: »Ein Biologe ist ein Mensch mit Botanisiertrommel und Schmetterlingsnetz, ein Sonderling, dessen Arbeit eigentlich mehr einem Hobby gleicht.« – »Ein Biologe ist ein Forscher, der demnächst den Menschen in der Retorte züchtet, den Menschen mit sorgsam ausgewählten Erbanlagen, den Supermenschen von morgen.« Zwischen diesen in ihrer Übertreibung nach beiden Seiten absurden Urteilen würde wohl das weite Spektrum der Meinungen liegen. Kein Wunder, denn wohl kaum eine Wissenschaft hat in den letzten Jahrzehnten derartige revolutionierende Umgestaltungen erfahren wie gerade die Biologie. Wir sind noch mittendrin in dieser Entwicklung, und kaum einer ist heute in der Lage, langfristige Prognosen darüber anzustellen. Für den Biologen selbst ist es sogar oft schwer, allen neuen Entwicklungen auf diesem riesigen Gebiet des Wissens vom Leben, der höchsten Form der Bewegung, zu folgen. Wieviel schwerer hat es erst ein junger Mensch, ein Schüler etwa, der sich entscheiden soll, auf welchem Gebiet er tätig werden möchte, welcher Beruf seinen Fähigkeiten und Interessen am meisten entspricht! Studiert man Biologie, um Zoodirektor zu werden? Ist es schade um eine »Eins« in Mathematik und Physik, wenn man dann doch »nur« Biologie studiert? Ist Biologie eigentlich eine »exakte« Wissenschaft?

Es fing doch so an, daß der Mensch einer Fülle biologischer Formen – Pflanzen und Tieren – gegenüberstand und das

Bedürfnis hatte, eine Ordnung in der Vielfalt zu finden. Wir neigen heute oft dazu, den Pflanzen oder Tiere sammelnden Biologen zu unterschätzen: »Mögen sich ‚junge Naturfreunde‘ oder Erwachsene in ihrer Freizeit mit Herbarien und Schmetterlingssammlungen beschäftigen!« Vergessen wir doch nicht, daß alle Erfolge der modernen Biologie, seien es neue Neuropharmaka, Antibiotika, seien es Erkenntnisse über Erbschäden, neue Sorten von Nutztieren und -pflanzen und vieles mehr, nicht möglich wären ohne die Vorarbeit unserer unermüdlich sammelnden und klassifizierenden Vorfahren. Was wären wir heute ohne die detaillierten Kenntnisse der Vielfalt biologischer Organisation und ihre Eingliederung und Systematisierung! Wenn auch der Schwerpunkt biologischen Forschens heute nicht mehr auf dem Gebiet der Systematik liegt, so sind doch auch hier noch viele Fragen offen, und einige Forscher müssen sich auch heute noch mit ihnen auseinandersetzen.

Auf die Erforschung der Arten und deren morphologischen und anatomischen Aufbau folgten Untersuchungen der Wirkungsmechanismen ihrer Funktionen. Physiologie nennt man dieses Teilgebiet der Biologie. Warum schlägt unser Herz? Haben alle Tiere ein Herz? Wie funktioniert es bei diesem oder jenem Tier? Wie drückt sich die Lebensweise jenes Lebewesens in seinen Organfunktionen aus? In der Physiologie finden wir den Aspekt des Vergleichens, der Systematisierung noch stark ausgeprägt. Obgleich schon viel nach dem Warum eines Bauplanes gefragt wird, spielen vergleichende, ordnende Betrachtungen doch noch eine große Rolle. Im Grunde genommen finden wir sie noch ausgeprägt bis hinein in eine der modernsten Richtungen der Biologie – bis zur Biochemie. Aus welchen chemischen Bausteinen besteht der Organismus? Welche chemischen Reaktionen laufen ab und zu welchem Zweck? Welche Gemeinsamkeiten und welche Unterschiede lassen sich in der Art dieser Reaktionen und ihrer Reaktionspartner zwischen verschiedenen Organismen finden?

Mit zunehmendem Einfluß funktionellen Denkens, also Denkens über Probleme des Warum eines Mechanismus, mit zunehmender Anwendung chemischen Wissens in der Biologie drängt sich eine andere Frage mehr und mehr auf: Gelten eigentlich in der Biologie die gleichen physikalischen Gesetze wie in der unbelebten Natur? Kann uns nicht das in seiner analytischen Tiefe so solide System der Physik weiterhelfen, um Funktionsschemata im Tier und in der Pflanze zu erkennen?

Im Grunde ist dieser Gedanke so alt wie die Biologie und die Physik selbst. Immer wieder und auf jeder Stufe der Vollkommenheit bzw. Unvollkommenheit hat man versucht, physikalische Erkenntnisse auf biologische Systeme anzuwenden. Immer wieder gebot die hochkomplizierte Struktur des Belebten diesen Bemühungen ein gebieterisches Halt. Ignorierte man diese Warnung, wendete man bedenkenlos unzulässig vereinfachte physikalische Postulate zur Erklärung biologischer Phänomene an, so stieß man auf Widersprüche. Man schlußfolgerte: Die Gesetze des Organismenreiches sind offenbar besonderer Art. Lebende Systeme unterwerfen sich wahrscheinlich nicht den Gesetzen des Unbelebten. — Auf diese Weise erhielten durch schlechte Naturwissenschaft philosophische Lehren einen Nährboden, die von einer Lebenskraft, einer »vis vitalis« sprachen.

Überall fließt Wasser von oben nach unten. In lebenden Bäumen fließt es von unten nach oben, von den Wurzeln in die Blätter. Ist das Gesetz der Schwerkraft hier aufgehoben? Zu dieser Schlußfolgerung käme ein Naturwissenschaftler, der ausschließlich die Hydrostatik auf biologische Systeme anwendet. Erst die Einführung thermodynamischer Betrachtungen zeigt, daß hier keine mysteriöse »vis vitalis« physikalische Gesetze kontert, sondern daß es ganz natürliche, auch in unbelebten Systemen wirksame osmotische Kräfte sind, die hier der selbstverständlich auch in Pflanzen wirksamen Schwerkraft entgegenstehen und das Aufsteigen des Wassers im Stamm hervorrufen.

Will man also biologische Vorgänge nicht aus sich heraus einfach beschreibend untersuchen, sondern ihren Mechanismen im physikalischen Sinne auf die Spur kommen, dann muß man eine Physik anwenden, die der Kompliziertheit des Systems gerecht wird. So weit auch die Physik heute entwickelt ist, so ist sie doch leider vielen Phänomenen des Lebens noch nicht gewachsen. Tatsächlich brauchen wir die hochkomplizierte Physik, um selbst die einfachsten biologischen Phänomene zu erklären. Und nicht nur die Physik, auch die damit verbundene Mathematik läßt uns mitunter im Stich. Selbst der große Fortschritt der elektronischen Rechentechnik, der manche Berechnung biologischer Systeme überhaupt erst ermöglicht, reicht bei weitem nicht aus, die komplizierten Gleichungssysteme zu lösen.

Doch diese Situation soll uns nicht entmutigen, sondern im Gegenteil anregen, das zu rechnen, was wir heute schon rech-

nen können, was uns die moderne Physik und Mathematik heute zu rechnen erlauben. Gleichzeitig fordern wir dadurch das Äußerste von diesen nichtbiologischen Disziplinen und stimulieren damit ihre Entwicklung. Und in vielen Fällen kommen wir mit den Mitteln der Physik und Mathematik in der Biologie heute schon recht gut voran. Vielleicht ist durch verschiedene naturwissenschaftlich-technische Erfolge unseres Jahrhunderts die Schwelle überschritten, die es erlaubt, Physik und Mathematik sinnvoll auf Fragen des Lebens anzuwenden. Es sind das die großen Theoriengebäude der Wellenmechanik, der statistischen Physik, der Thermodynamik, es sind das ferner hochleistungsfähige elektronische Einrichtungen, die uns mit höchster Präzision kleinste elektrische und magnetische Größen biologischer Makromoleküle, biologischer Zellen und Organismen zu bestimmen erlauben, und es sind letzten Endes die Elektronenrechner, die mit unvorstellbarer Geschwindigkeit Rechenoperationen ausführen, für die der Mensch mit Bleistift und Papier Jahre oder Jahrzehnte benötigt hätte.

Kein Wunder also, daß sich in den letzten Jahrzehnten die Biophysik und Biomathematik stürmisch entwickelt haben. Immer größer wird der Kreis der Forscher, der sich mit diesem Grenzgebiet befaßt, immer größer die Zahl wissenschaftlicher Publikationen. Was weiß aber der Nichtbiologe heute von dieser Entwicklung?

Wollen wir doch einmal versuchen, uns in einige dieser Probleme und Theorien einzudenken. Wollen wir doch einmal Biologie ganz anders treiben, als wir es im herkömmlichen Sinne gewohnt sind. Sicherlich gehört ein ganzer Packen Mathematik und Physik dazu, der beim Leser nicht vorausgesetzt werden kann. Begnügen wir uns mit einigen Beispielen, die so ausgewählt sind, daß auch der naturwissenschaftlich wenig Vorgebildete zum Verständnis des Prinzips gelangt. Wir beginnen beim Alltäglichen, beim Sichtbaren, bei der Form und den sichtbaren Leistungen von Pflanze und Tier. Sehr bald werden wir gewahr, daß eine physikalische Erklärung von Form und Funktion nur durch tiefgreifende Betrachtungen möglich ist. So gelangen wir von Stufe zu Stufe bis zum molekularen Bereich des Lebens und erkennen den ursächlichen Zusammenhang zwischen Funktion und Form, zwischen Zeit und Größe in diesem Bereich fundiert.

Kleines und Großes in Relation

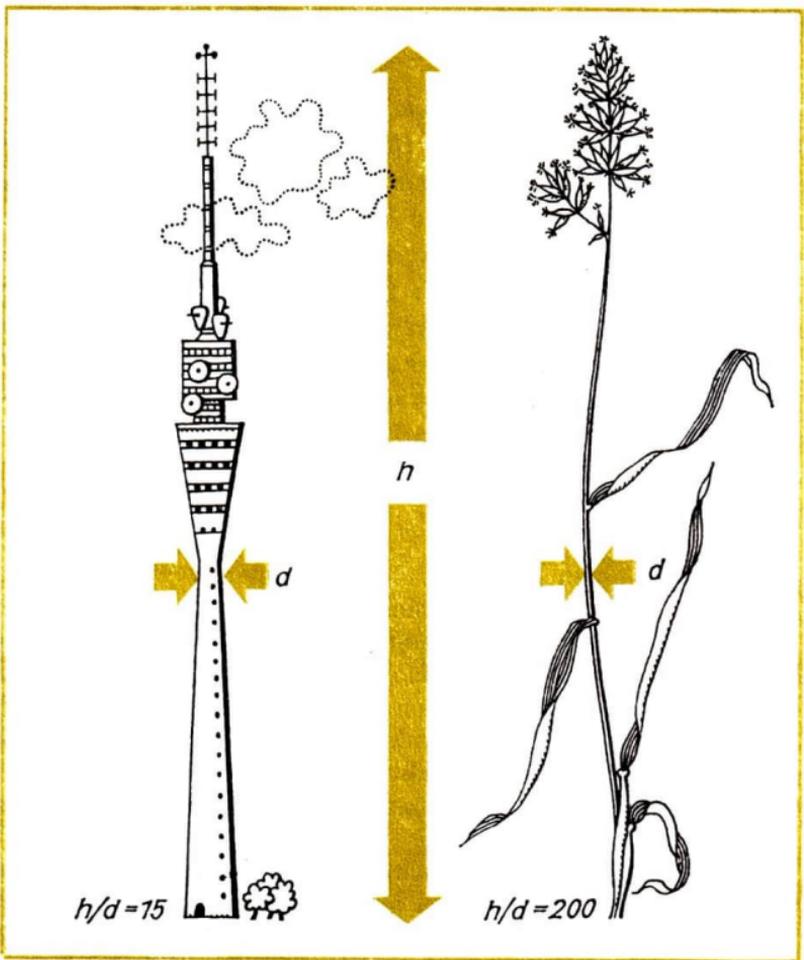
Grashalm kontra Fernsehturm! Schwebfliege kontra Düsenklipper! Laufkäfer kontra Rennwagen! — Welcher Vergleich ist sinnvoll? Was kann der Techniker vom lebenden Organismus lernen? Warum wachsen die Bäume nicht in den Himmel, und warum kann man aus einem Floh keinen Elefanten machen? Warum ist der Elefant nicht größer und die Spitzmaus nicht kleiner? Ein Floh erreicht im Sprung ein Vielfaches seiner Körpergröße. Warum schafft das ein Känguruh nicht? Ähnlichkeitsanalyse in Arzneimittelforschung, Medizin und Sportwissenschaft.

Besucher kommen und bestaunen den neuen Fernsehturm. Hoch und schlank reckt er sich in den Himmel. Ein hohler Betonmast, in dessen Innerem verschiedene Versorgungsleitungen verlaufen und ein schneller Fahrstuhl Personen und Material befördert. Hoch oben, in schwindelnder Höhe, eine Erweiterung der steilen Schlankheit. Hier haben die Techniker ihre Schalträume, in Aussichts- und Restaurantetagen erfreuen sich Besucher des schönen Ausblicks. Ein Wunder der Technik!?

Wer wundert sich heute noch, in einem Zeitalter, in dem wir mit technischen Superlativen förmlich überschüttet werden? Und doch ist er eindrucksvoll, der neue Turm; in seiner Schlankheit und Höhe. Doch ist er wirklich so schlank? Den Prospekten entnehmen wir Höhe und Durchmesser des Turmes und errechnen daraus einen Quotienten, den der Techniker Schlankheitsgrad nennt. Er liegt etwa bei 18, d. h., der Turm ist 18mal höher als breit. Ist das so viel?

Denken wir doch einmal an ein Schilfrohr, das mühelos Höhen von 2 m bei einem Durchmesser von 1 cm erreicht. Hier liegt der Schlankheitsgrad bei 200. Ein Grashalm kann noch schlanker sein! Also doch kein »Wunder der Technik«, sondern nur eine sehr unvollkommene Nachahmung dessen, was es in der Natur schon längst gibt? Auch diesen Satz sollten wir zunächst mit einem Fragezeichen versehen, die Schlußfolgerung könnte voreilig sein.

Wir wissen, daß tatsächlich die lebenden Organismen in



Das Verhältnis der Höhe (h) zum mittleren Durchmesser (d) eines Turmes nennt man Schlankheitsgrad (h/d). Der Grashalm ist um vieles schlanker als das vergleichbare Objekt der Architektur. Drückt dieser Vergleich eine Überlegenheit biologischer Organisation aus?

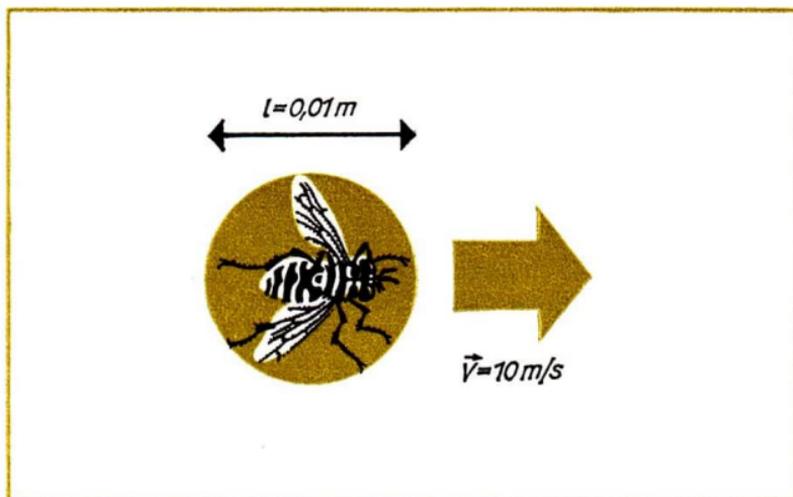
Jahrmillionen während der Evolution technische Lösungen geschaffen haben, von denen mancher Techniker lernen könnte und auch lernt. Ein ganzes Spezialgebiet baute sich auf, das diesen Vergleich zum Nutzen der Technik zum Inhalt hat. Bionik nannte man es unter Zusammenziehung der Begriffe Biologie und Technik. Heute beschäftigen sich viele Forschungsgruppen in aller Welt damit, Leistungen biologischer

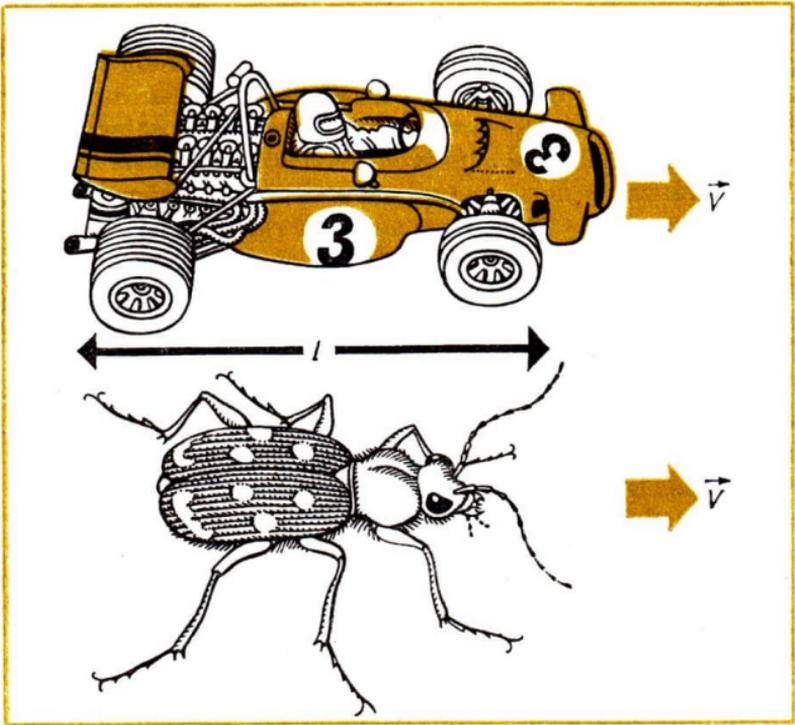
Systeme auf ihre Anwendbarkeit in der Technik zu überprüfen. Manchen Erfolg haben die Bioniker schon zu verbuchen. Unser Beispiel gehört zweifellos in diese Richtung, doch wollen wir nicht voreilig sein. Es erwachen sofort Zweifel und Fragen; sie sind allgemeiner Art; wir wollen sie zurückstellen, um zuvor noch ein anderes Beispiel zu demonstrieren.

Jedermann hat schon einmal an einem ruhigen warmen Sommertag bei einem Spaziergang ins Grüne eine Art Fliegen bemerkt, die – einem Hubschrauber gleich – fest an einem Ort in der Luft verharren. Wir nähern uns dem Tier, um es besser zu sehen, und plötzlich ist es verschwunden. Es ist einfach weg. Verwundert sehen wir uns um und entdecken es nur einen Meter entfernt, wieder schwirrend an einer Stelle. Syrphiden nennt der Zoologe diese Tiere, im deutschen Sprachgebrauch werden sie als Schwebfliegen bezeichnet. Diese Fliegen können im Schwirrfly an einem Ort verharren, um bei Gefahr blitzschnell im Geradeausflug den Platz zu wechseln. Dieser Wechsel geht so schnell, daß wir ihm mit unserem Auge nicht folgen können. Wir bemerken nur, daß das Tier, eben noch hier, jetzt plötzlich an anderer Stelle, einem Hubschrauber gleich, in der Luft steht.

Wir brauchen keine genauen Daten zur Diskussion dieses Beispiels. Nehmen wir einmal an, der Platzwechsel geschähe

Schwebfliegen (Syrphiden) können im Schwirrfly in der Luft stehen, um gleich darauf mit großer Geschwindigkeit geradeaus zu fliegen.





Ein Sandlaufkäfer, einer unserer flinksten Läufer an heißen Sommertagen. Hält ein Rennwagen dem Leistungsvergleich mit ihm stand, wenn man die Relativgeschwindigkeit – Geschwindigkeit pro Länge (v/l) berechnet? Ist ein solcher Vergleich sinnvoll und aussagekräftig?

in einer zehntel Sekunde und auf eine Entfernung von 1 m. Das würde bedeuten: Geschwindigkeit 10 m/s. Wahrscheinlich ist das zu niedrig gegriffen, doch uns genügt eine erste Abschätzung. Rechnen wir damit, daß das Insekt eine Körperlänge von 1 cm hat, dann sind das pro Sekunde 1000 Körperlängen.

Betrachten wir nun einmal ein Flugzeug, das mit einer Rumpflänge von 30 m angesetzt werden müßte. Bei proportionalem Vergleich müßte es pro Sekunde die 1000fache Länge, das sind 30 km, fliegen. Das ist etwa 100fache Schallgeschwindigkeit oder 100 M (Mach), wie der Fachmann sagt. Unser Flugzeug würde damit jede kosmische Rakete hinter sich lassen. Dieses Flugzeug müßte aber gleichzeitig auch als Hubschrauber verwendbar sein, wollte es dem Vergleich mit der Schwebfliege standhalten.

Dieser Vergleich erscheint noch phantastischer als der zwischen Fernsehturm und Grashalm. Ist denn das biologische System dem technischen wirklich so unvergleichlich überlegen? Gibt es etwa eine »Wunderkraft« im biologischen System, eine »vis vitalis«, wie sie von idealistischen Philosophen postuliert wurde, die naturwissenschaftlich nicht faßbar ist?

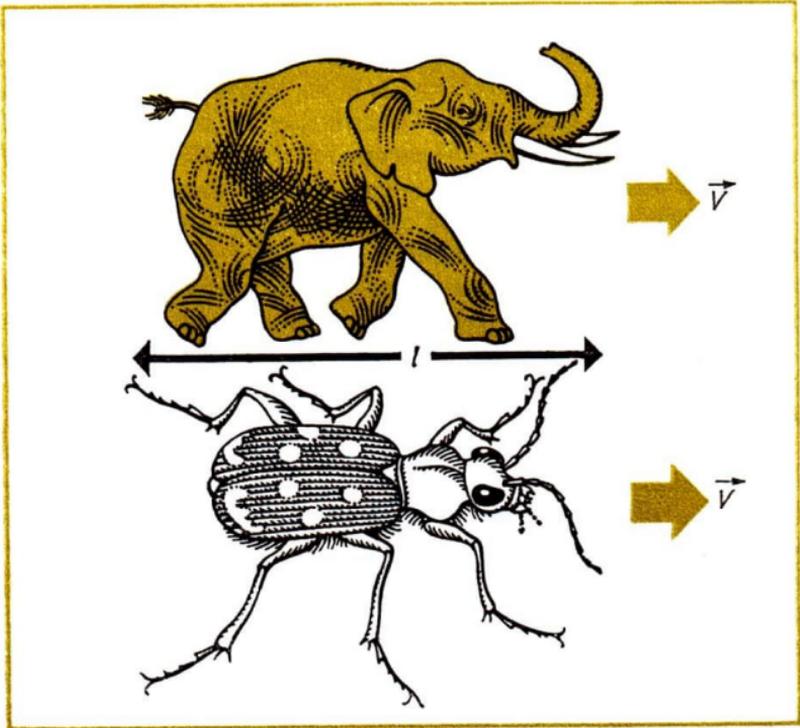
Die Liste solcher Beispiele könnte man beliebig erweitern. Der Leser möge einen schnellen Laufkäfer beobachten und einen Vergleich mit einem Kraftwagen berechnen, in der gleichen Weise, wie wir es mit Fliege und Flugzeug taten. Oder denke man an die »Müllermücken«, die schnellen Wasserläufer auf Pfützen und Teichen. Immer würden die Vergleiche Erstaunliches ergeben. Was ist nun damit?

Rechnen wir doch einmal weiter! Die Syrphide bewältigt also in einer Sekunde das 1000fache ihrer Körperlänge. Die Natur, so schlossen wir, kann Erstaunliches. Kann sie das wirklich und immer? Wie schnell fliegt eigentlich ein Vogel? Schafft er die gleiche Leistung? Betrachten wir einmal einen unserer schnellsten Flieger, beinahe Inbegriff der Schnelligkeit, die Schwalbe. Setzen wir ihre Körperlänge mit 10 cm an, dann müßte sie, um die gleiche Leistung zu vollbringen, 100 m/s fliegen, das sind 360 km/h. Die Schwalbe ist zwar schnell, aber ihre Maximalgeschwindigkeit erreicht nur etwa den vierten Teil dieses Wertes.

Wir könnten auch fragen, wie schnell dann wohl ein großer Vogel, etwa ein Schwan, ein Adler oder ein Storch fliegen müßte.

Auch hier soll die Reihe der Beispiele nicht ins Endlose fortgesetzt werden. Die Ergebnisse wären abenteuerlich. Elefanten müßten mit riesigen Geschwindigkeiten durch Afrikas Steppen rasen, Känguruhs würden im Wettstreit mit Flöhen Sprünge von Kilometerlänge machen. Liegt es nur an zu wenig Beinen, daß wir selbst nicht, den Wasserläufern gleich, die Wasseroberfläche betreten können? Sicherlich nicht! Wir können wohl mit Recht schließen, daß der einfache Proportionalitätsvergleich hinkt. Doch warum? Der Winkelsatz des Dreiecks gilt sowohl für kleine als auch für große Dreiecke. Die Gesetze der Geometrie sind anwendbar sowohl bei der Berechnung eines Atommodelles als auch zur Berechnung der Entfernung von der Erde zum Mond. Das stimmt; doch in der Wissenschaft muß man sich vor leichtfertigen Verallgemeinerungen hüten.

Jede Hausfrau weiß, daß sich ein Kilo großer Kartoffeln schneller schälen läßt als ein Kilo kleiner. Der Mathematiker



Wenn die Natur so Erstaunliches vollbringt, warum läuft ein Elefant dann nicht schneller? Wie schnell müßte er rasen, um die relative Geschwindigkeit eines Sandlaufkäfers zu erreichen? – Irgend etwas stimmt hier nicht!

rechnet es vor: Die Oberfläche einer Kugel wächst mit dem Quadrat ihres Durchmessers, das Volumen mit der dritten Potenz. Hier läßt sich also schon an einem simplen geometrischen Beispiel demonstrieren, daß es mit der einfachen Proportionalität nicht klappt. Die Techniker wissen dieses schon lange, und mancher technisch vorgebildete Leser wird schon beim ersten Beispiel die Nase gerümpft haben: »Einen Fernsehturm mit Grashalm-Schlankheit kann ich auch bauen, wenn er nicht größer sein soll als ein Grashalm.« Oder: »Warum hat dann die Natur das Gras nicht 200 m hoch wachsen lassen?« Die letzte Frage beinhaltet viel Nachdenkenswertes und ist vergleichbar mit unserem Elefantenbeispiel auf der Abbildung. Wir werden noch öfter darauf zu sprechen kommen.

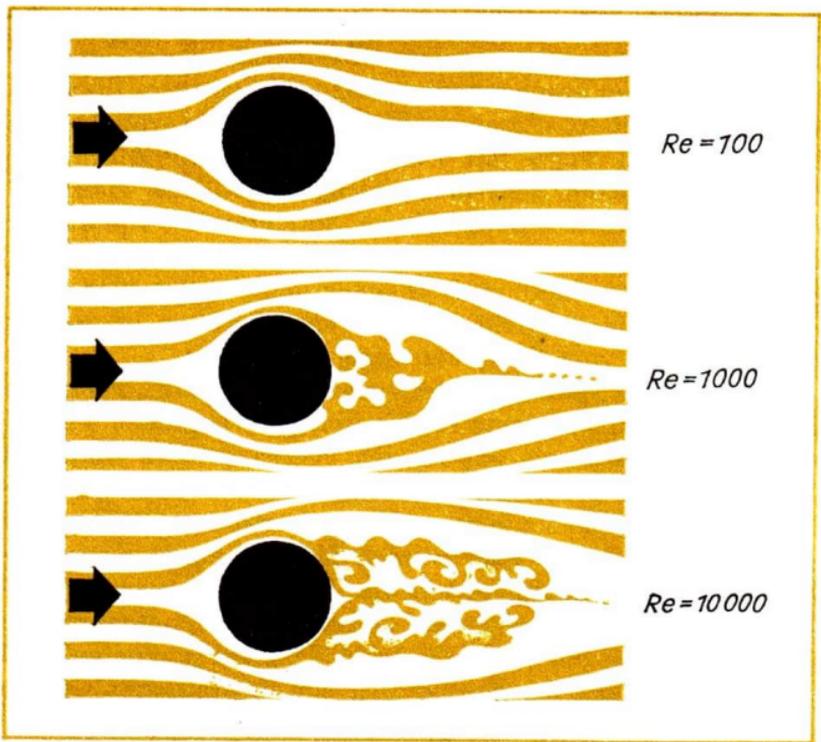
Jeder Junge hat schon einmal Modellflugzeuge gebaut. Er weiß, es gibt zwei Arten solcher Basteleien. Entweder man legt Wert auf ein proportional verkleinertes getreues Ebenbild eines tatsächlich existierenden Flugzeuges, dann erreicht man einen silbernen Vogel mit Fahrwerk, Kabinenfenstern und allen Kleinigkeiten, getreulich nachgebildet, den man sich über den Schreibtisch hängen kann. Man erwartet von diesem Modell nicht, daß es fliegt. Will man ein fliegendes Modell der gleichen Größe, dann muß es ganz anders aussehen. Das Flügelprofil, die Flügelfläche sind verändert, es ist seinem großen Bruder vom Flugplatz weniger ähnlich.

Hinter diesen Spielereien stecken ernste Probleme, Probleme in der Technik, Probleme in der Biologie! Beginnen wir bei der Technik, denn sie hat an den vergleichsweise einfachen Systemen ihrer Konstruktion theoretischen Vorlauf geschaffen, den die Biophysik heute nutzt und erweitert. Bleiben wir ruhig im Flugwesen. Hier werden Modelle neuer Konstruktionen im Windkanal getestet, um Berechnungen zu kontrollieren und notfalls zu ergänzen. Dabei muß man notgedrungen in vielen Fällen auf verkleinerte Modelle zurückgreifen, und die Notwendigkeit der Erarbeitung von theoretischen Grundlagen einer Ähnlichkeitstheorie lag nahe.

Es stellte sich sehr bald heraus, daß es Größen gibt, Zahlen, die Zustände, Formen und Verhaltensweisen besser zu charakterisieren und untereinander zu vergleichen gestatten als unsere oben angeführten Proportionalitätsfaktoren. Ein Beispiel einer solchen Größe ist die nach ihrem Erfinder benannte Reynoldszahl, die im Flugwesen und im Schiffsbau eine große Rolle spielt. Wir berechnen sie nach folgender Formel:

$$\text{Reynoldszahl} = \frac{\text{Geschwindigkeit} \cdot \text{Länge des Körpers}}{\text{kinematische Viskosität des Mediums}}$$

Als kinematische Viskosität bezeichnet man eine Größe, die ein Maß für die Zähflüssigkeit ist. Wir wollen uns mit einer näheren Charakterisierung dieses Parameters nicht aufhalten. Werden Geschwindigkeit und Länge durch Meter und Sekunde ausgedrückt, dann muß man für die kinematische Viskosität den Wert $1,06 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ für Wasser und $14,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ für Luft einsetzen. Die praktische Bedeutung dieser Größe liegt in folgendem: Ein Körper einer bestimmten Form zeigt bei einer bestimmten Reynoldszahl gleiches Strömungsverhalten, sei er nun groß oder klein. Wir sehen als Beispiel die Kugel in Bewegung. Ganz gleich, wie groß die Kugel in Wirklichkeit ist,



Stromlinien um eine Kugel bei verschiedenen Reynoldszahlen (Re). Für das Strömungsverhalten ist nicht die Größe des Objektes, sondern lediglich seine Reynoldszahl ausschlaggebend, in deren Berechnung die Größe allerdings eingeht.

bei Reynoldszahlen unter 1000 strömt die Luft, das Wasser oder was sonst glatt oder laminar, wie es in der Hydrodynamik heißt, an ihr vorbei. Überschreitet die Reynoldszahl einen kritischen Wert, wird also der Kugeldurchmesser oder die Geschwindigkeit des strömenden Mediums größer, dann gibt es Wirbel. Soll also das verkleinerte Flügelprofil eines Flugzeuges im Windkanal getestet werden, so muß man zunächst die Reynoldszahl des Originalflügels an dessen Abmessungen und der vorgesehenen Reisegeschwindigkeit der Maschine berechnen. Dann gilt es, an den Abmessungen des verkleinerten Modells die Windgeschwindigkeit des Kanals so zu ermitteln, daß die Reynoldszahl im Versuch der des Originalflugzeuges gleich wird.

Die Bioniker haben nun Reynoldszahlen vieler Tiere be-

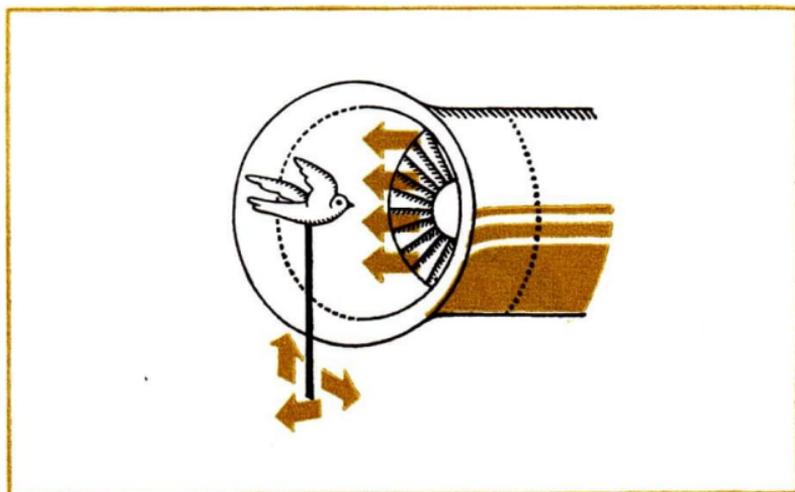
rechnet. Noch einmal zum Beispiel der Schwebfliege: Setzen wir Geschwindigkeit (10 m/s) und Körperlänge (0,01 m) ein, so ergibt sich folgende Größe:

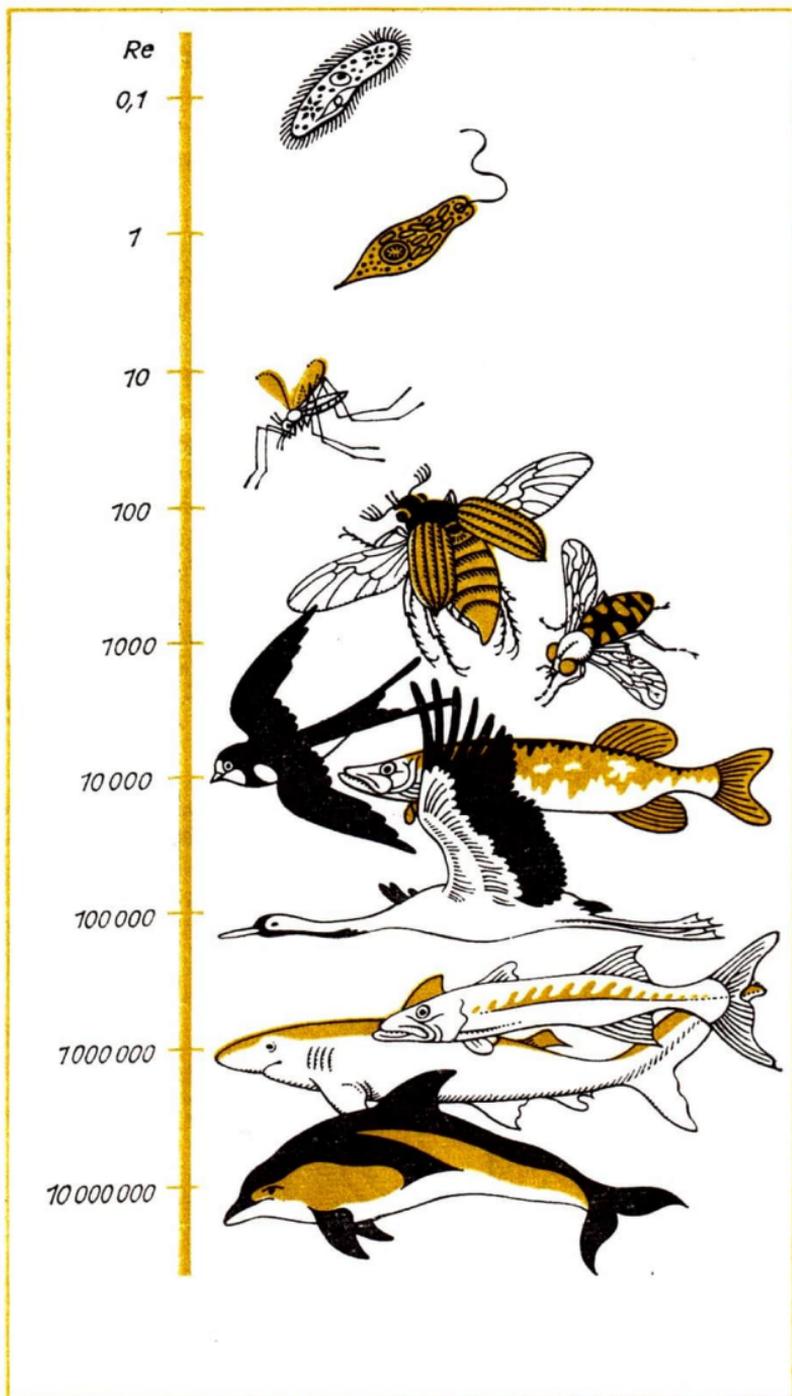
$$Re = \frac{10 \cdot 0,01}{14,9 \cdot 10^{-6}} = 6700.$$

Diese geringe Reynoldszahl interessiert die Flugzeugtechnik kaum. Setzt man einmal Größe und Geschwindigkeit eines modernen Flugzeuges in die Formel ein, so wird deutlich, daß das Interesse des Technikers erst bei sechs- bis achtstelligen Zahlen beginnt. Auf unserer Abbildung sehen wir, daß schnelle, große Schwimmer, etwa die Delphiné, mit ihren Reynoldszahlen von etwa 1000000 diese Größenordnung erreichten.

Nun, wir wollen hier keine Bionik treiben. Stellen wir doch zunächst einmal zusammenfassend fest: Selbst in der Technik mit ihren Systemen, die um vieles primitiver sind als die der belebten Natur, sind einfache proportionale Vergleiche ihrer Abmessungen unsinnig. Es wurden parameterfreie Leitzahlen geschaffen, die sich aus verschiedenen charakteristischen Größen berechnen lassen; diese erst erlauben einen Vergleich zu ziehen zwischen Systemen gleicher Form, aber verschiedener

Ein biologisches Objekt im Windkanal. Diese Geräte erlauben ein genaues Studium des Strömungsverhaltens an technischen und biologischen Flugsystemen.





Größe. Bis heute sind beinahe 100 solcher Vergleichsparameter abgeleitet und in Gebrauch.

Soviel zur Technik. Ist nun die Ähnlichkeitsanalyse in der Biologie eine interessante Spielerei, oder besitzt sie auch hier Bedeutung? Wir wissen ja, daß die Sprunghöhe eines Känguruhs nicht mit der des Flohs konkurrieren kann, ein allgemeiner Hinweis auf die Größenverhältnisse in der Technik, eine allgemeine Diskussion der technischen Ähnlichkeitsanalyse, wie wir sie hier führten, würde vielleicht ausreichen?

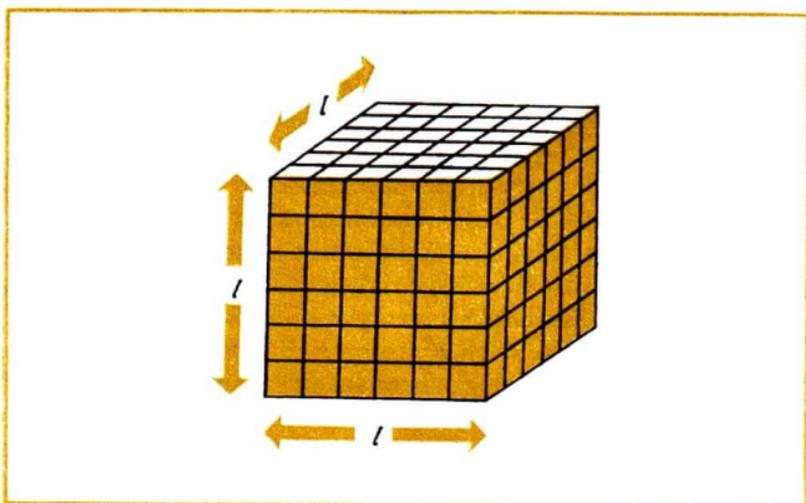
Sicher ist die Ähnlichkeitsanalyse nicht der bedeutendste Zweig der Biophysik, doch knüpfen sich hieran viele Fragen, die von allgemeinem biologischem Interesse sind. Vieles ist uns alltäglich und anscheinend fraglos klar. Es ist eben so! Kinder lassen sich mit einem solchen Hinweis nicht abfertigen. Sie fragen: warum? Diese kindliche Eigenart zeichnet viele Forscher aus. Manche große Entdeckung wurde gemacht, weil ein Mensch sich nicht scheute, nach Trivialitäten zu fragen und sich über Dinge wunderte, die für die anderen alltäglich waren.

Fragen wir nach Trivialitäten! Scheuen wir uns nicht zu fragen, warum die Maus nicht kleiner, der Elefant nicht größer ist, warum ein Känguruh nicht besser springen kann, warum die Bäume nicht in den Himmel wachsen!

Wir haben erfahren, daß proportionale Vergleiche der Abmessungen und Leistungen von Systemen unterschiedlicher Größe unsinnig sind. Warum eigentlich? Die beste Antwort gibt uns die oben schon aufgeworfene Frage: Warum können wir nicht auf dem Wasser laufen wie die »Müllermücken«? Die Antwort liegt nahe: Wir sind zu schwer, die Oberflächenspannung des Wassers hält uns nicht. Dafür, so könnten wir entgegnen, ist die Fläche des Wassers, die wir mit unseren Füßen bedecken, um vieles größer als die unter den sechs Beinen der Insekten. Wenn nötig, so schnallen wir eben Skier an, die wasserabstoßende Eigenschaften haben. Wir wissen aber, daß man Wasserski leider nur hinter einem schnellen Motorboot fahren kann. Dann hält uns nicht die Oberflächenspannung, auch nicht der hydrostatische, sondern der hydrodynamische Auftrieb.

Eines ist jedenfalls sicher: Alle Materialeigenschaften sind

Verschiedene Reynoldszahlen fliegender und schwimmender Tiere. Ihr Bereich umfaßt viele Größenordnungen.



Ein Würfel der Kantenlänge l hat eine Oberfläche von $6 \cdot l^2$ und ein Volumen von l^3 . Seine Oberfläche ist also dem Wert l^2 , sein Volumen dem Wert l^3 proportional. Diese Proportionen gelten für Körper unterschiedlicher Gestalt.

unabhängig von der Größe des Objektes! Die Oberflächenspannung des Wassers ist prinzipiell für den Wasserläufer die gleiche wie für den Menschen. Es kann nur die Flächenbelastung sein, die den Menschen »einbrechen« läßt.

Wenn wir dieser Frage näherkommen wollen, so müssen wir ein ganz klein wenig Mathematik treiben. Wir brauchen nur zwei Symbole. Mit l wollen wir eine charakteristische Länge eines Körpers bezeichnen: seine Größe zum Beispiel oder seinen Durchmesser. Ferner brauchen wir das Zeichen \sim , das proportional bedeutet. Proportional sind zwei Größen dann, wenn z. B. Verdopplung der einen Verdopplung der anderen bedeutet. Zum Beispiel braucht man nicht zu wissen, wieviel ein Kilo Kartoffeln kostet, und kann trotzdem schließen, daß zwei Kilo doppelt so teuer sind wie eines. Der Preis der Kartoffeln ist hier dem Gewicht derselben proportional. Wir haben schon einmal über Kartoffeln gesprochen, nämlich im Zusammenhang mit dem Schälen großer und kleiner Exemplare. Da haben wir auch schon Aussagen über die Relation von Oberfläche und Volumen zum Durchmesser gemacht. Den Satz – die Oberfläche wächst proportional dem Quadrat des Durchmessers – können wir jetzt schreiben:

Oberfläche $\sim l^2$.

Nun will ich wissen, welche Kartoffeln sich schneller schälen lassen. Angenommen, die Schäldauer sei wiederum der Oberfläche einfach proportional, d. h., um einen Quadratmeter Kartoffelschalen zu produzieren, brauchte ich eine bestimmte Zeit. Dann läßt sich schreiben:

$$\frac{\text{Schäldauer}}{\text{Gewicht}} \sim \frac{\text{Oberfläche}}{\text{Volumen}} \sim \frac{l^2}{l^3} = \frac{1}{l}.$$

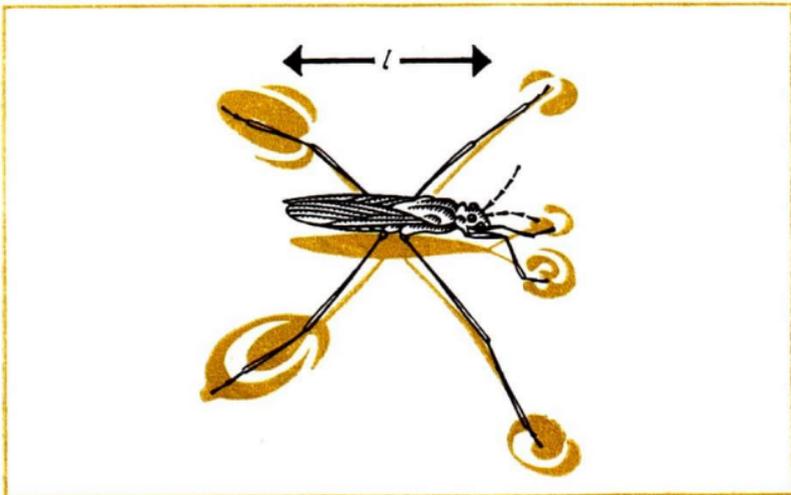
Die Arbeitsproduktivität des Schälen ist also dem Wert $1/l$ proportional. Doppelt so große Kartoffeln lassen sich in der Hälfte der Zeit schälen.

Nun soll das kein Berufsschulbuch für Küchenökonominnen werden, wir wollen uns wieder der Biologie zuwenden, speziell unseren Wasserläufern. Die Berechnung dieses Problems ist ganz ähnlich! Ein Körper liegt auf dem Wasser. Ein »bestimmter« Teil seiner Oberfläche – in unserem Fall die Sohlenfläche des Insektes – liegt dem Wasser auf. Das Wort »bestimmt« läßt sich wieder durch einen Proportionalitätsfaktor ausdrücken; da uns die Größe dieser Faktoren nicht kümmert, schreiben wir ruhig:

$$\text{Sohlenfläche} \sim l^2.$$

Die Flächenbelastung ergibt sich aus Gewicht des Körpers pro

Die Flächenbelastung des Wasserläufers ergibt sich aus Gewicht pro Fläche und ist proportional seiner Länge (l).



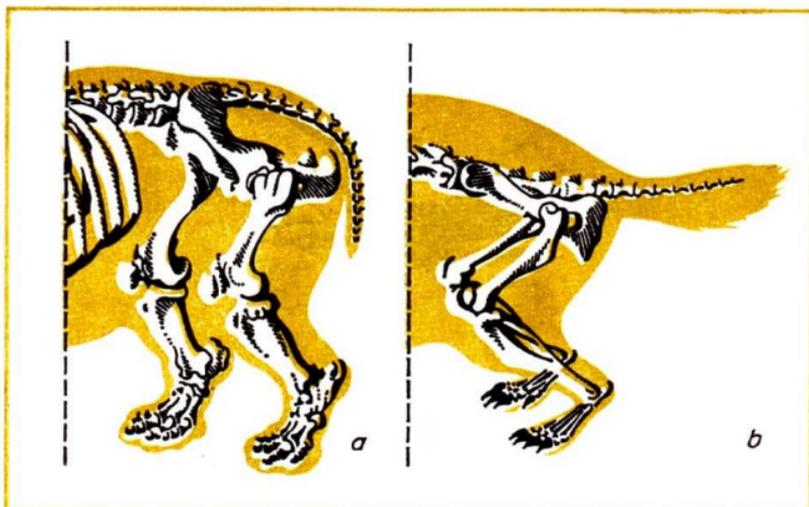
Sohlenfläche. Setzen wir nun wieder Körpergewicht \sim Körpervolumen $\sim l^3$ und Sohlenfläche \sim Körperoberfläche $\sim l^2$, so können wir schreiben:

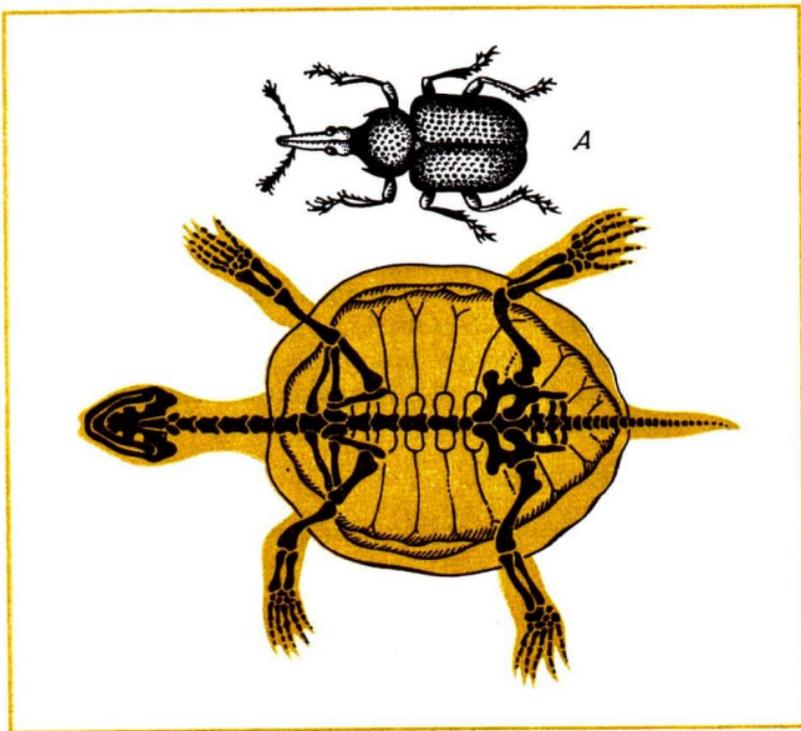
$$\text{Flächenbelastung} = \frac{\text{Körpergewicht}}{\text{Sohlenfläche}} \sim \frac{l^3}{l^2} = l.$$

Die Flächenbelastung wächst also proportional der Körperlänge. Rechnen wir ruhig, der Mensch sei 200mal so lang wie eine Müllermücke, dann brauchten wir ein Wasser mit 200-facher Oberflächenspannung, um darauf laufen zu können, oder etwa 10 m² große Wasserski, die natürlich kein Eigengewicht haben dürften! Also: Auch ein proportional vergrößerter Wasserläufer könnte nicht mehr auf dem Wasser laufen!

Genau die gleiche Rechnung könnten wir wiederholen, um zu zeigen, warum biologische Objekte nicht beliebig groß sein können. Denken wir, daß auch unsere Knochen und Muskeln nur eine maximale Belastbarkeit haben, die von ihren Materialkonstanten abhängt. Gleiches gilt für das Holz der Bäume. Auch hier ist die Flächenbelastbarkeit ausschlaggebend, die, wie wir sahen, proportional der Länge zunimmt. Eine Maus, proportional zu den Ausmaßen eines Elefanten vergrößert,

Wenn die Flächenbelastung der Körpergröße direkt proportional ist, wird also der Knochen des Nilpferdes (a) um ein Vielfaches stärker belastet als der eines Kleinsäugers (Lemming) (b). Dies wird durch einen verminderten Schlankheitsgrad des Nilpferdbeines kompensiert.





Das Konstruktionsprinzip des Außenskelettes ist nur bei kleinen Tieren realisierbar. Während das Insekt (A – Rüsselkäfer) Schutz und Stabilität durch seinen Chitinpanzer erhält, dient der Panzer der Schildkröte zwar dem Schutz vor Feinden, der Körper wird jedoch durch ein Innenskelett stabilisiert. Auch diese Schlußfolgerungen ergeben sich aus Berechnungen der Ähnlichkeitsanalyse.

würde zusammenbrechen. Nur das mächtig versteifte Knochengerüst des Riesen verleiht ihm schwerfällige Stabilität. Die Saurier der Urzeit haben offenbar das Maximale erreicht, sie starben an ihrem eigenen Gewicht. Warum aber ist die Maus nicht kleiner? Diese Frage soll später beantwortet werden. Sie hängt nicht mit den mechanischen Problemen zusammen, die uns hier zunächst beschäftigen. Mit ähnlichen Rechnungen kann man jedoch erklären, warum man aus dem Floh keinen Elefanten machen kann. Das Prinzip des Außenskelettes der Kerbtiere würde einen ungeheuer schweren Panzer bei Tieren ergeben, die Säugergröße hätten. Auch hier ist es die Materialkonstante, die diesem Konstruktionsprinzip eine Grenze setzt. Feste Schalen können sich große Tiere, wie Schildkröten und

Gürteltiere, nur als zusätzlichen Harnisch leisten, nicht als Skelettelement, das den ganzen Körper zusammenhält.

Noch ist das Känguruhproblem ungeklärt. Wie ist die Ähnlichkeitsanalyse der Sprungbewegung? Hierzu ist etwas mehr Physik notwendig. Wollen wir springen, dann gehen wir in die Knie, schnellen dann hoch, bis unsere Beine gestreckt sind (das ist die Strecke f), und erteilen dadurch unserem Körper so viel kinetische Energie, daß er für kurze Zeit die Schwerkraft überwindet und nach oben fliegt (Sprunghöhe h), bis die Erdschwere wieder Oberhand gewinnt. Die Kraft der Beine verleiht dem Springer kinetische Energie, die ihn für kurze Zeit auf ein höheres Energiepotential hebt. Man kann folgende Gleichung schreiben:

$$\text{Gewicht} \cdot h = \text{Beinkraft} \cdot f.$$

Daraus errechnet sich die Sprunghöhe h zu:

$$h = \frac{\text{Beinkraft} \cdot f}{\text{Gewicht}}.$$

Nun ist die Beinkraft dem Muskelquerschnitt, dieser dem Quadrat der Muskellänge und die Muskellänge der Körpergröße l proportional. Wir können also schreiben: Beinkraft $\sim l^2$. Der Wert f ist der Körperlänge l direkt proportional, und das Gewicht entspricht dem Wert l^3 . Eingesetzt erhalten wir etwas Erstaunliches:

$$h \sim \frac{l^2 \cdot l}{l^3} = 1.$$

Die Sprunghöhe (h) ist von der Körperlänge (l) überhaupt nicht abhängig, oder – wie der Mathematiker sagt – sie ist keine Funktion der Körperlänge! Das bedeutet: Ein gleich konstruiertes Tier erreicht eine bestimmte Sprunghöhe unabhängig von seiner Körpergröße! Ein Elefant springt genauso hoch wie eine Maus; nicht etwa proportional seiner Körpergröße, sondern absolut gesehen!

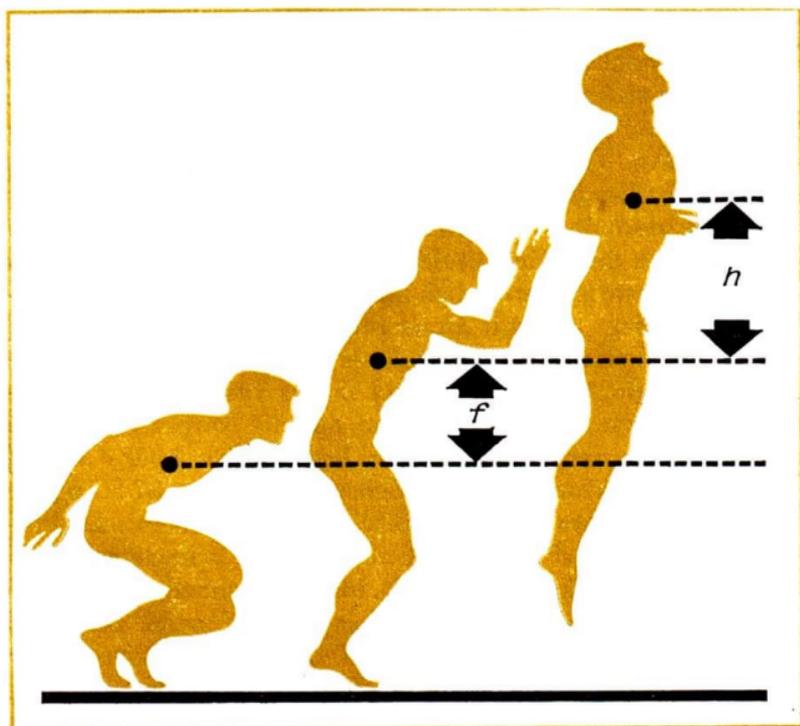
Natürlich dürfen wir über der Physik die Biologie nicht vergessen! Die Natur hat einen weiten Spielraum der Adaptation. Springtiere haben besonders stark entwickelte Sprungbeine und springen höher als andere. Wir dürfen nicht vergessen, daß wir Abschätzungen vorgenommen haben, keine exakten Berechnungen. Trotzdem besitzt unsere Ableitung große Aussagekraft. Wir wissen jetzt, warum die Sprunghöhe der

Körpergröße nicht proportional sein kann. Wieder sind physikalische Materialkonstanten in mathematischen Relationen entscheidend.

Die bisher angestellten Berechnungen und Abschätzungen beruhen auf Theorien, die aus der Mechanik stammten, aus der Statik oder Kinematik. Es gibt eine Anzahl solcher Berechnungen, sie betreffen verschiedene Bewegungsformen im Tierreich und unterschiedliche Stabilitätsbedingungen. Ähnliche Untersuchungen gibt es auch über aero- und hydrodynamische Probleme. Wir streiften sie bereits in diesem Abschnitt, als die Reynoldszahl behandelt wurde. Ähnlichkeitsparameter, wie z. B. diese Reynoldszahl, sind ja gerade durch Berechnungen dieser Art abgeleitet worden. Wir berührten hier ein Gebiet, das man als Biomechanik bezeichnet.

Unsere Erörterungen zeigten, daß der primitive Vergleich zwischen Grashalm und Fernsehturm, zwischen Laufkäfer und

Zur Biomechanik des Sprunges: In der Federstrecke f beschleunigt der Springer seinen Körper und erreicht dann im Sprung die Höhe h .



Rennwagen unzulässig ist. Jedoch bleibt noch ein guter Teil Staunens über die Leistungsfähigkeit der belebten Natur, wenn wir die Ähnlichkeitsanalyse zu Rate ziehen und physikalisch begründet vergleichen. Dies ist der Boden der Bionik, wenn sie wissenschaftlich betrieben wird. Manche Leichtbauweise wurde pflanzlicher Architektur, manche Flugzeugkonstruktion den Vögeln, Fischen oder Wassersäugern abgeguckt. Ein reiches Gebiet technischer Erkenntnisgewinne auch für den Biologen, und nicht uninteressant, wie wir sahen!

Nicht alle Fragen nach den Dimensionen biologischer Gestalt sind auf der Basis mechanischer Betrachtungen zu beantworten. Denken wir an die Größenlimitierung nach unten: Warum ist das kleinste Säugetier nicht kleiner als die Spitzmaus? Warum gibt es keine käfergroßen Mäuse? Wieder eine Frage, die in ihrer Trivialität zunächst unsinnig erscheint.

Da wir hier mit der einfachen Mechanik nicht weiterkommen, sehen wir uns gezwungen, tiefer in die biologischen Vorgänge vorzudringen. Wir gehen einen Schritt weiter auf dem Weg, der uns von Frage zu Frage, von der äußeren Gestalt des Organismus, seinem Habitus, zur Organphysiologie, zur Zellphysiologie und schließlich im letzten Abschnitt dieses Buches zum Molekül führen wird.

Was zeichnet eigentlich die Säugetiere zusammen mit den Vögeln vor anderen Tieren aus? Sie haben die höchste Stufe der Evolution erreicht durch eine Errungenschaft, die ihnen einen großen Vorsprung in vielen Funktionen des Lebens sicherte. Sie besitzen eine konstante Körpertemperatur. Man nennt sie deshalb homoiotherme Tiere (»Warmblütler«) im Gegensatz zu den »Kaltblütlern« (den poikilothermen), deren Körpertemperatur gewöhnlich nur wenig über der Umgebungstemperatur liegt und mit dieser schwankt.

Welchen Vorteil bringt nun diese Eigenschaft der Homoiothermie, die doch ein recht kompliziertes System der Thermoregulation voraussetzt? Wir wissen, daß die Körpertemperatur der meisten homoiothermen Tiere beträchtlich über der Umgebungstemperatur liegt. Der Mensch mit seinen 37 °C repräsentiert dabei etwa einen Durchschnittswert. Chemische Prozesse verlaufen bei höheren Temperaturen schneller als bei geringen. Der Zucker im Tee z. B. löst sich schneller, wenn der Tee heiß ist. Sicherlich ist ein biologisches System bei 37 °C leistungsfähiger als ein solches bei 10 oder 20 °C. Es ist schwer zu entscheiden, ob bereits die einfache Temperaturerhöhung den Aufwand der Thermostatierung der homoiothermen Tiere

rechtfertigt. Denkbar ist auch, daß die Körpertemperatur einfach deshalb über der Umgebungstemperatur liegt, weil sich die Thermostatierung des Körpers, d. h. die Konstanzhaltung der Temperatur, dann leichter realisieren läßt. Heizen ist immer leichter als Kühlen, und ein Thermostat mit einer Temperatur, wärmer als die der Umgebung, kühlt sich von selbst.

Der größte Gewinn ist sicher nicht die erhöhte, sondern die konstante Temperatur. Wir wissen, wie störanfällig unsere elektronischen Regel-, Steuer- und Rechengerte gegenüber Temperaturschwankungen sind. Jeder elektrische Widerstand verändert sich mit der Temperatur, und manche elektronische Schaltung wird bei Temperaturschwankungen instabil und störanfällig. Auch die Nerventätigkeit ist in starkem Maße auf Prozesse angewiesen, die starken Temperatureinflüssen unterliegen. Jeder weiß, wie unangenehm Temperaturschwankungen auf unser Gehirn wirken. Die Temperaturkonstanz unseres Körpers mit seinen vielen und komplizierten Regelsystemen und besonders die Temperaturkonstanz des menschlichen Gehirns ist als eine der wichtigsten Voraussetzungen des höchstorganisierten Lebens anzusehen. Die Berücksichtigung dieses neuen physikalischen Parameters des Lebens, der Temperatur, eröffnet uns Perspektiven zu neuen Fragen und neuen Antworten. Wie wirkt die Wärme? Wie wird sie erzeugt, weitergeleitet, abgegeben? Hier ist ein riesiges und außerordentlich bedeutungsvolles Gebiet der physikalischen Biologie angeschnitten, das später etwas näher beleuchtet werden soll. In diesem Abschnitt genügen uns wenige Gesichtspunkte, um unsere Frage nach der unteren Grenze der Körpergröße der Säugetiere oder allgemein der Warmblütler zu beantworten.

Die Herkunft der Körperwärme kennt jeder, der schon einmal ins Schwitzen geraten ist. Jede Energieumwandlung im Körper, sei es nun durch die Muskulatur oder die Verdauung, liefert Wärme. Wo diese Wärme nicht so »nebenbei« abfällt, dort produzieren wir sie, wenn nötig zum Selbstzweck, etwa durch das Kältezittern. Wir »verbrennen« Kalorien, wie es im gewöhnlichen Sprachgebrauch heißt.

Das ist die Heizung unseres Thermostaten. Sie muß ständig erfolgen, denn ständig fließt die Wärme in die kältere Umgebung wieder ab. Mitunter ist zuviel Wärme im Körper, wir schwitzen, schalten also einen Mechanismus der Kühlung ein.

Was hat nun der Wärmehaushalt des Organismus mit der Kleinheit einer Maus zu tun? Sehr viel! Denn auch hier können wir eine Bilanzgleichung aufstellen, ähnlich wie bei den bio-

mechanischen Beispielen zuvor. Nehmen wir einmal an, die pro Gewichtseinheit im Körper gebildete Wärmemenge sei überall etwa die gleiche. Ein Gramm Maus produziere pro Zeiteinheit ebensoviel Wärme wie ein Gramm Mensch oder ein Gramm Elefant. Nun ist das Gewicht bzw. die Masse eines Tieres proportional seinem Volumen, und dieses, wie wir sehen, entspricht der dritten Potenz seiner Länge, also dem Wert l^3 . Wie schnell wird nun die Wärme vom Körper an die Umwelt abgegeben? Diese Größe hängt von vielen Faktoren ab, kann jedoch in erster Näherung auf den Temperaturunterschied zwischen Tier und Umwelt und auf die Größe der Oberfläche des Tieres bezogen werden. Die Körpertemperatur ist bei Warmblütlern untereinander nur wenig verschieden. Wir können ruhig postulieren, daß die Wärmeabgabe proportional der Körperfläche zunimmt. Die Wärmeabgabe ist dem Quadrat der Körpergröße, also dem Faktor l^2 , proportional. Wie steht nun diese Wärmeabgabe in Relation zur Wärmeproduktion im Körper?

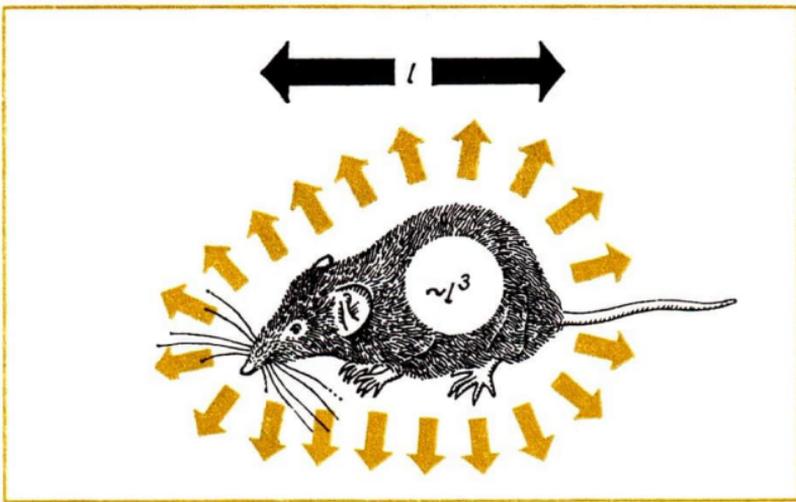
$$\frac{\text{Wärmeabgabe}}{\text{Wärmeproduktion}} \sim \frac{l^2}{l^3} = \frac{1}{l}.$$

Was sagt dieser Quotient aus? Je größer er wird, um so mehr überwiegt die Wärmeabgabe, je kleiner er ist, um so mehr überwiegt die Wärmeproduktion im Tier.

In einem Falle hat das Tier Mühe, sich genügend aufzuheizen, im anderen Falle gerät es leicht ins Schwitzen. Sicherlich gibt es Limits nach beiden Seiten, d. h., unser Quotient bewegt sich in Grenzen, die allein das Leben der homoiothermen Tiere möglich machen. Die obere Grenze interessiert nicht, denn ein Elefant ist zwar etwas phlegmatischer als eine Maus, sein Größenlimit wird aber, wie wir sahen, nicht durch die Temperatur, sondern durch mechanische Materialkonstanten bestimmt. Anders bei der Maus! Hier ist das » l « so klein, daß der Wert $1/l$ sein Maximum erreicht hat. Die Relation zwischen Körpergewicht und Oberfläche ist so ungünstig, daß eine hohe Stoffwechselaktivität erforderlich ist, um die Körpertemperatur aufrechtzuhalten.

Die Spitzmaus, ein nur dem Namen nach den Mäusen verwandter Insektenfresser, ist unser kleinster Warmblütler. Noch kleinere Warmblütler hätten ein Verhältnis Wärmeabgabe: Wärmeproduktion, das biologisch nicht mehr tragbar wäre.

Übrigens ist bei Wassersäugern dieser kritische Wert noch

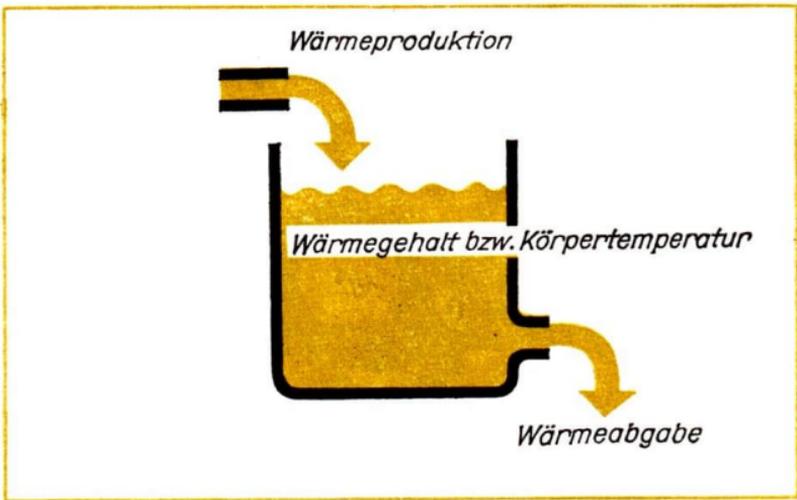


Die in einer Spitzmaus erzeugte Wärmemenge ist ihrem Volumen und damit der Größe l^3 proportional, die abgegebene Wärmemenge ihrer Oberfläche, d. h. l^2 . Die Relation beider Werte: $l^2/l^3 = 1/l$ bestimmt die kleinste noch mögliche Körperlänge eines Warmblütlers.

höher, denn trotz der isolierenden Fettschicht ist die Wärmeabgabe von Körpern im Wasser noch größer als in Luft. Die kleinsten Warmblütler im Wasser sind viel größer als ihre Verwandten auf dem Lande.

Unsere Berechnungen hatten zur Voraussetzung, daß die Wärmeproduktion des Körpers dem Körpergewicht proportional ist. Dies trifft nur in ganz grober Näherung zu! Das Phlegma der Elefanten wurde der geschäftigen Beweglichkeit der Maus schon gegenübergestellt. Hier hat es die Natur durch verschiedene Anpassungen erreicht, den kritischen Wert unseres Quotienten zu senken. Da die Wärmeproduktion bei Säugern im allgemeinen mit enzymatisch gesteuerten Verbrennungsprozessen verknüpft ist, können wir den Sauerstoffverbrauch als Meßgröße dafür ansehen. Unser Bild soll dies veranschaulichen. Man sieht folgendes: Je kleiner das Tier, um so höher ist die Stoffwechselaktivität. Herzschlag und Atemfrequenz sind im gleichen Sinne gesteuert.

Das letzte Beispiel zeigte uns, daß nicht nur rein mechanische Gesetzmäßigkeiten, sondern auch andere, wie z. B. solche der Wärmelehre, ein gewichtiges Wort zur möglichen Größe, Gestalt und Funktion biologischer Organismen mitzureden



Der Wärmehaushalt ist ein kompliziertes Regelsystem. Die Körpertemperatur als Funktion der Körperwärme ergibt sich aus der Differenz zwischen Wärmeproduktion und Wärmeabgabe.

haben. Wir streiften das Gebiet der Energetik oder, wie man es in der Physik nennt, der Thermodynamik. Später werden wir sehen, wie groß dieses Gebiet in seinem Umfang und seiner Bedeutung für biologische Fragestellungen ist. Unserem Beispiel schließt sich doch unmittelbar die Frage an: Wie wird die Wärme produziert? Ist der Muskel vielleicht einer Wärmekraftmaschine gleich, in der Wärme in mechanische Arbeit umgewandelt wird? Die Beantwortung dieser Frage würde uns vom eigentlichen Thema dieses Abschnittes ablenken, wir heben sie für später auf. Hier geht es zunächst nur um die Fragen nach Größenvergleichen und nach Größengrenzen, sowohl nach oben als auch nach unten.

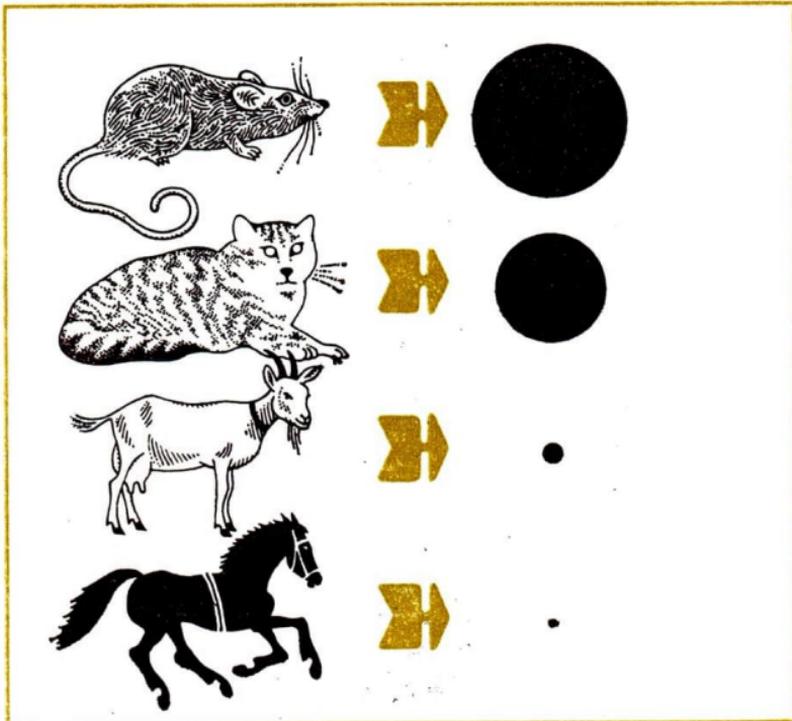
Die Ausdehnung unserer Betrachtungen auf den Energieaustausch kann nur als ein Schritt in Richtung auf den realen biologischen Organismus aufgefaßt werden. Im Rahmen dieses kleinen Ausfluges können wir die nächsten Schritte gar nicht tun, es sind dazu umfangreiche und mathematisch recht aufwendige Berechnungen notwendig. Immerhin sollen einige weitere Aspekte genannt werden.

Der Stoffwechsel von Zellen und Geweben verlangt eine Versorgung mit Sauerstoff und eine Beseitigung entstehender Kohlensäure. Bei den Insekten führen Luftröhren, sogenannte

Tracheen, direkt an die Organe, verästeln sich hier fein und gewährleisten den Gasaustausch. Dieses Prinzip ist wenig leistungsfähig. Der Gasaustausch in diesen Röhren ist träge und erlaubt nur die Belüftung auf kleine Entfernungen – einer der Gründe für ein oberes Größenlimit der Insekten! Die Wirbeltiere schalten ein flüssiges System des Gasaustausches, nämlich den Blutkreislauf, zwischen Lunge und Gewebe. Ein kompliziertes System, das jedoch auch noch die notwendige Versorgung größerer Organe erlaubt. Durch die genaue Analyse des Blutkreislaufes kann man die Herzfrequenz der Tiere unterschiedlicher Größe erklären.

Ähnliche Berechnungen führen auch zur Beantwortung vieler Fragen nach Größe und Form von Pflanzen. Hier ist es

Die Maus veratmet pro Minute ein Luftvolumen, das etwas größer als ihr Körpervolumen ist. Die Katze braucht in der gleichen Zeit nur etwa 1/10, die Ziege 2/100 und das Pferd 6/1000 des eigenen Körpervolumens. So spiegelt sich physiologisch die aus der Ähnlichkeitsanalyse errechnete Energiebilanz wider.



nicht der gelöste Sauerstoff, der durch die »Adern« transportiert wird, sondern das Wasser, das die Wurzeln dem Boden entnehmen.

Andere Beispiele könnte man aus der Neurophysiologie anführen. Ein Nervenimpuls pflanzt sich, verglichen mit der Geschwindigkeit eines Morsezeichens im Klingeldraht, recht langsam fort. Merkt eine Riesenschlange noch rechtzeitig, wenn ihr jemand auf den Schwanz tritt? Dieses Beispiel ist vielleicht nicht ganz ernst zu nehmen, aber Kommunikationsprobleme können bei großen Tieren tatsächlich auftreten.

Ein ganz neues Kapitel der Biophysik wird durch die Frage nach extremer Kleinheit aufgeworfen. Warum sind Bakterien nicht kleiner? Warum sind die Gewebezellen gerade so groß und nicht kleiner? Hier sind es wieder physikalische Gesetze, die uns Antwort geben können. Sie gehören jedoch nicht in das Gebiet der »Makrophysik«, d. h. der Physik der sichtbaren, wägbaren, direkt meßbaren Körper, sondern zur »Mikrophysik«, zur statistischen Physik des Kleinsten. Lassen wir auch diese Fragen noch etwas offen, denn bevor wir ins »Kleinste« steigen, wollen und müssen wir uns noch etwas im »Großen« umsehen.

Zum Schluß noch einmal die Frage: Mögen die hier besprochenen Probleme interessant sein, mögen sie für die Biologie selbst, für die Erklärung der Leistungsfähigkeit verschiedener Konstitutionsprinzipien der Natur Bedeutung haben, ist das aber alles? Nun, selbst wenn es so wäre, wenn diese Betrachtungen »nur« dazu dienten, unser Weltbild zu weiten, unseren Forscherdrang zu befriedigen, selbst dann hätten sie sich gelohnt!

Tatsächlich jedoch stehen hinter solchen Überlegungen auch recht praktische Interessen. Über Bionik wurde schon gesprochen. Hier sollen noch andere Anwendungsmöglichkeiten zur Sprache kommen. Zunächst die Frage: Kann eine Maus als Modell des Menschen dienen? Unsere chemische Industrie produziert täglich neue Verbindungen, deren Wirksamkeit als Pharmaka zu testen sind. Sie werden an Versuchstieren getestet, die Ergebnisse sollen aber Aussagen über ihre Wirksamkeit am Menschen zulassen. Meist vergleicht man die wirksame Dosis mit dem Körpergewicht. Ist diese Proportionalisierung richtig? Muß man bessere Ähnlichkeitsparameter wählen? Oder denken wir an die große Bedeutung der Versuchstiere im Kosmos. Wie können wir von der Wirkung veränderter Gravitation auf die Maus, den Hund oder den Affen

auf den Einfluß eines solchen Faktors auf den Menschen schließen? Andererseits müssen wir daran denken, daß der Mensch selbst auch unterschiedliche Größen und Proportionen aufweist. Wie sind physiologische oder auch sportliche Leistungen des Kindes mit denen des Erwachsenen zu vergleichen? Wie wirkt sich Fettsucht auf die Belastung des Herzens aus?

Diese praktischen Probleme der Anwendung seien am Rande notiert. Sie wollen zeigen, daß manches, was hier aus Gründen der Anschaulichkeit an recht trivialen Beispielen gezeigt wurde, in Wirklichkeit einen sehr ernstesten Hintergrund hat. Gehen wir jedoch weiter in unseren Überlegungen, repetieren wir aber zuvor den Gedankengang dieses Abschnittes noch einmal. Der Vergleich zwischen Technik und Biologie stand am Anfang. Beinahe Fragen des Alltags waren das. Wir beantworteten sie durch Anwendung verschiedener physikalischer Gesetze. Manches läßt sich mit etwas Mechanik und ein wenig Mathematik erklären. Gleichzeitig jedoch verwickelten wir uns tiefer und tiefer in Probleme und erkannten, daß auf allen Ebenen der biologischen Betrachtungen das Leben durch physikalische Gesetze bestimmt wird. Wenn auch biologische Gesetzmäßigkeiten nicht immer direkt auf physikalische Grundgesetze zurückgeführt werden können, dürfen sie ihnen doch nicht widersprechen. Viele Fragen geweckt zu haben sei Hauptzweck dieses ersten Abschnittes. Gehen wir weiter unseren Weg, den Weg vom Sichtbaren zum Unsichtbaren, den Weg vom Großen zum Kleinen, immer die Verbindung betrachtend zwischen Form und Aufgabe, zwischen Struktur und Funktion.

Die biologische Gestalt im Koordinatensystem

Ist die biologische Gestalt durch Zahlen ausdrückbar? Das Gänseblümchen – eine Punktwolke im n -dimensionalen Phasenraum. Computer speichern biologische Formmannigfaltigkeit und berechnen Evolutionsprozesse. Variation und Auslese – der Optimierungsprozeß des Lebens und was wir daraus lernen können. Läßt sich Zweckmäßigkeit berechnen? Optimierungsanalyse rückwärts – was ist wie und wonach optimiert? Optimierung und Formlabilität – Grundlage biologischer Mannigfaltigkeit.

Im vorausgegangenen Abschnitt interessierten uns Größen und Dimensionen. Jetzt soll einmal die Form, die Gestalt von Pflanze und Tier, im Mittelpunkt unserer Betrachtungen stehen. Helfen uns Physik und Mathematik hier weiter?

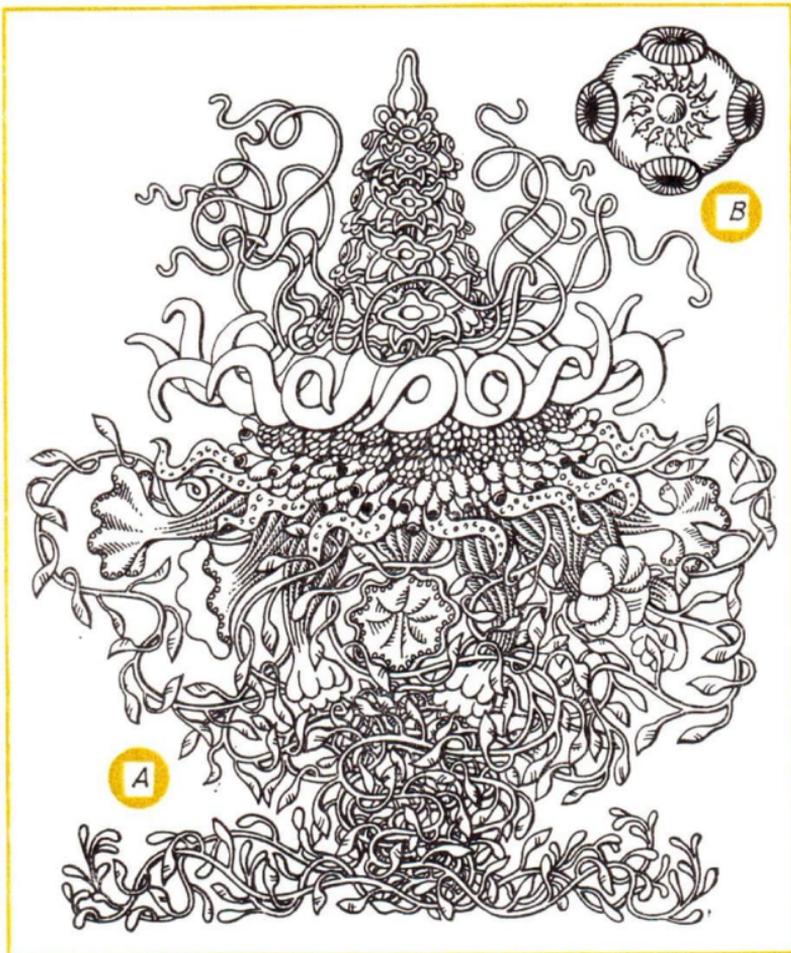
Das Formproblem in der Biologie führt leicht zu ästhetischen Fragen. Wir denken z. B. an die »Kunstformen der Natur« von Ernst Haeckel. Ästhetik soll hier jedoch nicht diskutiert werden; wir wollen auf dem sicheren Boden der Naturwissenschaften bleiben. Und doch ist nun einmal die Ästhetik eng an das Formproblem in der Biologie geknüpft. Ästhetik und Zweckmäßigkeit gehören hier offenbar zusammen. Wir kennen im täglichen Leben manches Zweckmäßige, das wir durchaus nicht »schön« finden. Mitunter glaubt man sogar, in der Technik Zweckmäßigkeit und Schönheit als Gegenpole sehen zu müssen. Biologische Objekte haben eine ganz besondere Zweckmäßigkeit, und das ist es offenbar, was uns ästhetisch schön erscheint.

Biologische Form und Zweckmäßigkeit hängen offenbar mit einem dritten Begriff zusammen: der Anpassung. Seit etwa hundert Jahren wissen wir dank der revolutionären Ideen eines Charles Darwin mehr über die Entwicklung der Vielgestaltigkeit im Tierreich. Es sind zwei Vorgänge, die in ihrem Zusammenspiel entscheidend die Entwicklung beeinflussen. Sie heißen: Variabilität und Selektion; einfacher ausgedrückt: zufällige Veränderung und Auslese. Den Begriff »Kampf ums Dasein« kennt jeder, die Darwinsche Evolutionsvorstellung

ist heute fester Bestandteil unseres naturwissenschaftlichen Weltbildes.

Veränderung und Auslese bedingen also den Prozeß der Anpassung, und Anpassung heißt Erhöhung der Zweckmäßigkeit; Zweckmäßigkeit für eine ganz spezielle Lebensform. Eine Schwalbe ist zweckmäßig als eleganter Segler angepaßt an den

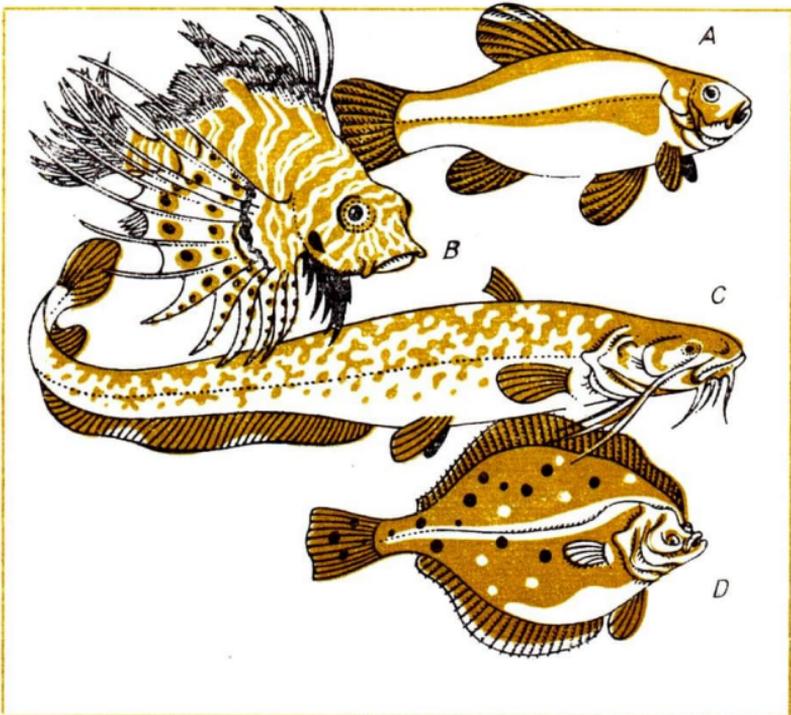
Das Formproblem in der Biologie führt leicht zu ästhetischen Diskussionen. Sind symmetrische Organismen Kunstformen? Uns kommt es heute komisch vor, wenn Ernst Haeckel selbst den Bandwurm dazu rechnet. A – eine Staatsqualle. B – Kopf des Bandwurmes. Beides aus Haeckels »Kunstformen der Natur«.

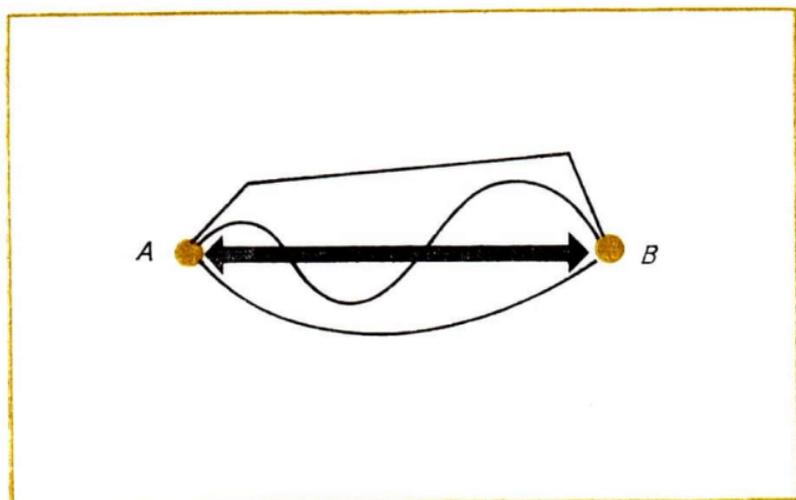


Luftraum zur Nahrungssuche; Schwan und Taucherente sind angepaßt an das Leben in flachen Gewässern. Zweckmäßigkeit ist also nichts Absolutes, sondern es ist immer eine Zweckmäßigkeit für etwas ganz Bestimmtes.

Kann man Zweckmäßigkeit berechnen? Vielleicht erscheint es weit hergeholt, wollten wir für diese, doch offenbar recht typisch biologische Frage die Mathematik bemühen. Ist das wirklich so absurd? Hat nicht der Mensch schon immer Zweckmäßigkeitsfragen erwogen? In vielen Dingen des täglichen Lebens ist uns Zweckmäßigkeit selbstverständlich, wir schütteln ungläubig den Kopf, wenn wir hören, daß schlaue Leute Alltägliches beweisen. Schon in der Geometrie Euklids steht geschrieben: Der kürzeste Weg zwischen zwei Punkten ist die Gerade.

Fische – untergetaucht schwimmende Organismen verschiedener Form. Welche Form ist die zweckmäßigste? Die Frage kann nicht losgelöst von den Lebensgewohnheiten der betreffenden Art beantwortet werden. Kann man Zweckmäßigkeit berechnen? A – Schleie, B – Rotfeuerfisch. C – Wels, D – Flunder.





Die Gerade ist die zweckmäßigste Strecke, wenn man die kürzeste Verbindung von A nach B sucht. Diese älteste und elementarste Optimierungsproblem beschäftigte schon den alten Euklid. Dies ist ein fruchtbarer Ausgangspunkt unserer Diskussion.

Ein Erfahrungssatz, eine Trivialität! Sie läßt sich mathematisch beweisen, wenn auch recht umständlich. Vielleicht war es wirklich zunächst nichts als eine spitzfindige Tüftelei, den Beweis einer lange bekannten und formulierten Trivialität anzutreten. Immerhin erkannte man dabei, daß mit dieser dabei gefundenen Methode auch anderes, bislang noch Unbekanntes, bewiesen werden konnte. Damit entstand ein neuer Zweig der Mathematik: die Optimierungsanalyse. Es ist eine komplizierte Mathematik, eine Theorie der Zweckmäßigkeit, zunächst für einfachste Prozesse. Heute, im Zeitalter elektronischer Datenverarbeitung in Wirtschaft und Technik hat diese Theorie eine große Bedeutung erhalten. Untersuchen wir einmal, ob diese Optimierungsanalyse auch Zweckmäßigkeiten im Organismenreich erklären und erfassen kann!

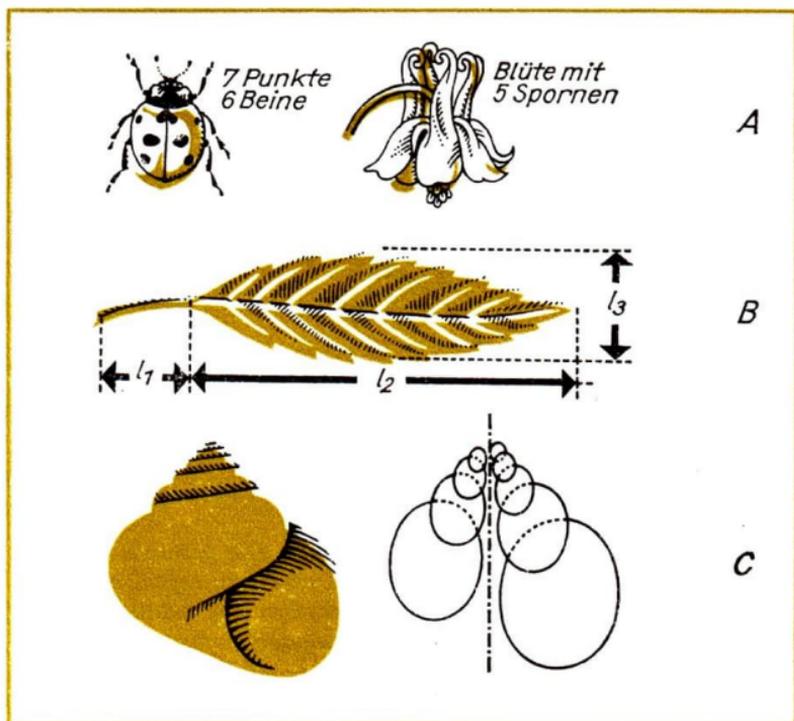
Doch soll nicht vergessen werden, daß der Prozeß der Optimierung in Technik und Biologie durchaus verschieden abläuft. In der Technik sieht es folgendermaßen aus: Angenommen, ein Ingenieur entwirft eine Brücke. Sie soll sicher sein, leicht, billig und geeignet, eine bestimmte Menge Verkehrsmittel oder Fußgänger pro Zeiteinheit passieren zu lassen. Diese Forderungen widersprechen einander. Die

sicherste Brücke ist schwer und teuer – die billigste Brücke ist leicht und unsicher. Optimierung bedeutet nun abwägen, welche Konstruktion es erlaubt, eine Brücke zu bauen, die bei genügend großer Sicherheit die geringsten Baukosten verursacht.

Die Natur ist großzügiger. Sie optimiert nicht durch Vorausberechnung, sondern durch Variation und Selektion, also Auslese. Zunächst entsteht eine große Breite an Möglichkeiten, von denen nur die übrigbleiben, die im Kampf ums Dasein bestehen. Ungeeignete Modelle werden verworfen! Tatsächlich ist es ein langsames Vortasten, ein langsames Verändern dieser oder jener Eigenschaften in diese oder jene Richtung. Optimierung ist nur dann möglich, wenn bei gleichbleibenden Umweltbedingungen die Entwicklung lange genug gelaufen ist. Ändert sich das Optimierungsziel zu schnell, so kann kein Optimum erreicht werden. Nicht jede Anpassung ist also vollständig, d. h. optimal.

Es mag einleuchten, daß Größen wie Gewicht, Baupreis, Tragfähigkeit usw. mathematisch verarbeitet und damit mathematisch optimiert werden können. Ist das aber auch mit der biologischen Form möglich? Der zweite Schritt soll nicht vor dem ersten getan werden! Vor der mathematischen Bearbeitung steht die mathematische Erfassung. Fragen wir also zunächst: Wie kann eine biologische Gestalt in Zahlen erfaßt werden?

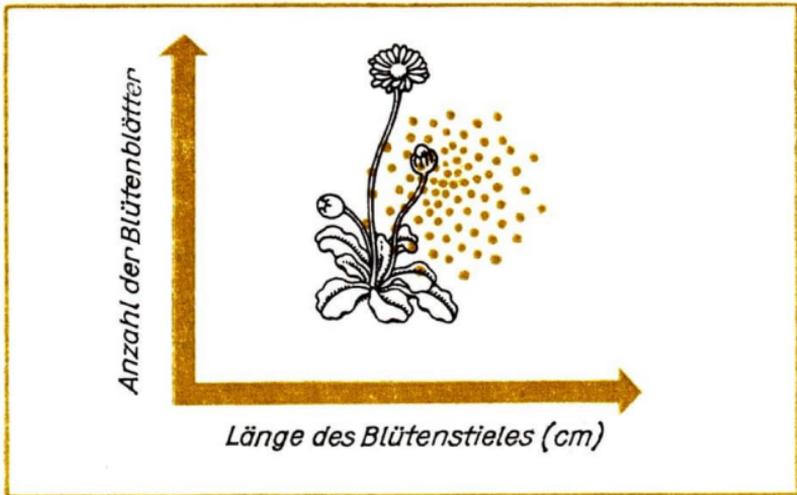
Hierzu gibt es verschiedene Wege unterschiedlicher Kompliziertheit. Am einfachsten natürlich sucht man Zahlenvergleiche: Was liegt näher, als beim Tier die Anzahl der Beine, Flügel, Augen, Fühlorglieder usw., bei der Pflanze die Zahl der Staubgefäße, Blüten, Blütenblätter, Blattkomponenten usw. zu wählen. Es gibt Diplopoden (»Doppelfüßler«), Hexapoden (»Sechsfüßler« = Insekten), Dekapoden (»Zehnfüßler« = höhere Krebse), Dipteren (»Zweiflügler« = Fliegen und Mücken). Oder denken wir an die Marienkäfer, deren häufigste Arten als Siebenpunkt (*Coccinella septempunctata*) und als Zweipunkt (*Coccinella bipunctata*) bezeichnet werden. Leicht fällt es natürlich auch, geometrische Vergleiche zu ziehen. Schlagen wir ein Bestimmungsbuch der Pflanzen auf, dann finden wir häufig die Alternative »Pflanze klein, höchstens 10 bis 15 cm hoch – Pflanze höher als 20 cm«. Die Maßsysteme können auch relativ sein, z. B. Damhirsch: »Schwanz länger als die Hälfte der Ohren«. Rothirsch: »Schwanz halb so lang wie die Ohren«. Man kann viele Maße an die biologische Gestalt legen



Zahlen (A), Maße (B) und mathematische Funktionen (C) bilden die Basis exakten Vergleiches biologischer Formen.

und erhält viele Zahlenwerte, die mathematisch verwendet werden können.

Was fangen wir nun mit den Zahlen an? Der Mathematiker hat längst gelernt, mehrere Meßgrößen oder – allgemeiner gesprochen – Zahlen zunächst so zu vereinen, daß ein geschlossenes Bild entsteht. Wird ein Gegenstand durch zwei Größen charakterisiert, so kann man diesem Gegenstand, seinem Zustand entsprechend, einen Punkt auf einer Fläche zuordnen. Nehmen wir ein biologisches Beispiel: Ein Gänseblümchen sei charakterisiert durch die Anzahl seiner Blütenblätter und die Höhe des Blütenstandes, in Zentimetern gemessen. Beide Größen können variieren, jedoch nur in bestimmten Grenzen. Wir pflücken ein Gänseblümchen (wem diese Handlung zu banal ist, der »entnehme durch Abtrennung am Rosettengrund einen Blütenstand der Spezies *Bellis perennis* L.«), zählen die Blütenblätter, messen die Länge und



Ausgewählte Parameter eines Gänseblümchens. Die gewonnenen Maßzahlen lassen sich in einem Koordinatensystem auftragen, allgemein gesprochen in einem »Phasenraum«, und ergeben eine charakteristische Punktwolke der untersuchten Art. Jeder ausgemessenen Pflanze entspricht ein Punkt dieser Wolke.

tragen beide Werte auf ein Koordinatensystem auf, dessen beide Achsen eine entsprechende Einteilung haben. Auf der gleichen Wiese wachsen noch mehr Gänseblümchen; wir wiederholen den Versuch und erhalten einen weiteren Punkt auf dem Papier. Bei einigem Fleiß läßt sich eine ganze Punktwolke zusammentragen.

Warum haben wir gerade diese beiden Merkmale ausgewählt? Sind sie besonders charakteristisch? Keinesfalls! Es könnten auch andere sein, z. B. die Anzahl der Blätter in der Rosette, die Länge der Blätter, der Durchmesser des Blütenköpfchens usw. Nachdem es also gelungen ist, zwei Parameter zu einem Punkt zu vereinen, verwirrt uns die Mannigfaltigkeit der belebten Natur aufs neue. Ein drittes Merkmal könnten wir noch hinzunehmen, wenn wir räumlich denken. Dann würde nicht ein Punkt auf der Fläche, sondern ein Punkt im Raum für unser spezielles Gänseblümchen und eine räumliche Punktwolke für alle Gänseblümchen der Wiese oder sogar für die ganze Art spezifisch sein. Aber wie weiter?

Diese Frage kann nur ein Nichtmathematiker stellen; ein Mensch, der noch von der Meinung geplagt wird, alles müsse

vorstellbar sein. Der Mathematiker hat diese Angel des Nichtschwimmers längst verlassen und tummelt sich im Abstrakten. Wenn 3 Dimensionen nicht reichen, warum nicht 4 oder 5, 6, 10 oder »n«, d. h. beliebig viel? Zwar wird die Rechnung mit jeder Dimension schwieriger, aber prinzipiell läßt sich jeder »Raum« berechnen. Das Wort »Raum« bedeutet jetzt natürlich etwas anderes, denn im allgemeinen verstehen wir darunter eine dreidimensionale Struktur. Auch der theoretische Physiker verwendet mehrdimensionale Räume bei seinen Berechnungen. Er bezeichnet sie als Phasenräume, wir haben keinen Grund, nach einer neuen Bezeichnung zu suchen. Die biologische Art – eine Wolke im n-dimensionalen Phasenraum!

Wieder eine Spielerei, eine mathematische Verklausulierung von Trivialitäten? Durchaus nicht! Es ist das heute heiß umstrittene Gebiet der numerischen Taxonomie, das wir hier berühren. Wolken ziehen sich in die Länge und teilen sich – es entsteht eine neue Art. Wolken wandern – die Art verändert sich. Wolken liegen näher oder weiter voneinander entfernt – ein Maß für Verwandtschaftsbeziehungen der Arten untereinander. Alle diese Prozesse sind auf der Basis unserer Überlegungen prinzipiell berechenbar. Allerdings sind dafür große und schnelle Rechenmaschinen erforderlich.

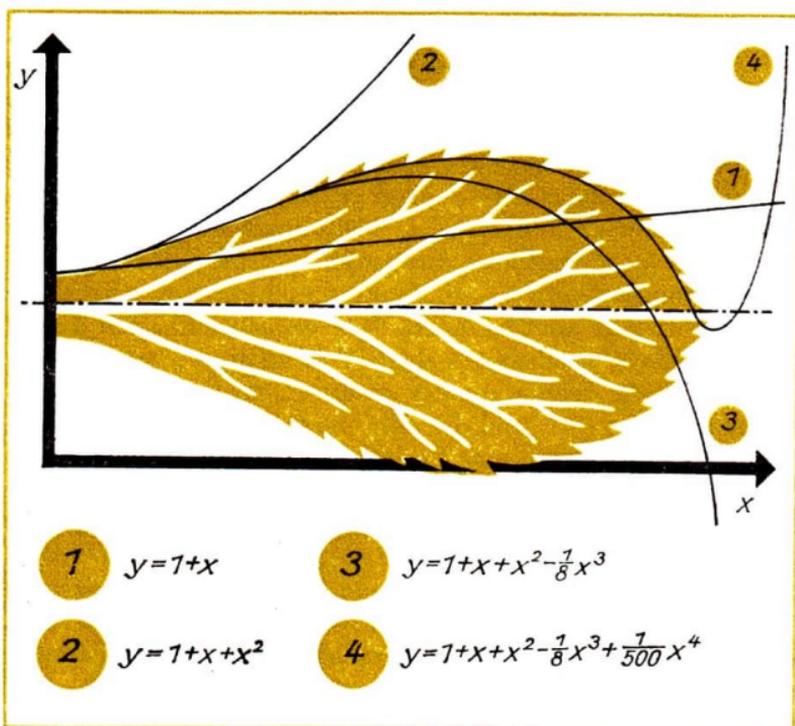
Das Messen und Zählen ist erst eine der Möglichkeiten, die biologische Gestalt zu erfassen. Wieviel Zahlen braucht man, um eine Blattform richtig abzubilden, die Umriss eines Frosches, den Panzer eines Krebses? Natürlich können wir solche Formen mehr oder weniger genau digital abtasten, d. h. durch mehr oder weniger viele Meßpunkte erfassen. Das ist aber eines Mathematikers unwürdig, und da jedes Maß eine neue Dimension unseres Phasenraumes bedeutet, würde der Rechenaufwand unnötig hoch. Wir erfassen Formen besser nicht »digital«, sondern »analog«. Das heißt, wir suchen eine mathematische Kurve, die der gewünschten Form entspricht, ihr also »analog« ist, und die sich mit möglichst wenigen konstanten Größen durch eine Formel ausdrücken läßt.

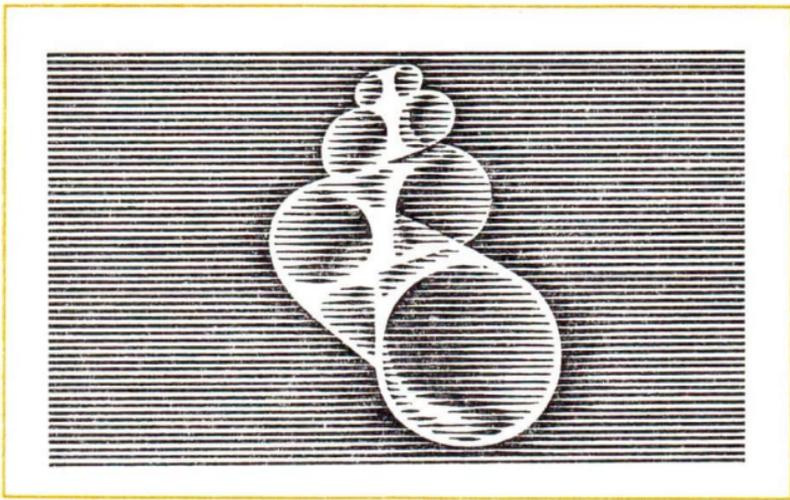
Der Mathematiker kennt eine Allerweltsformel oder, wie er es treffender nennt, eine Funktion, die es gestattet, fast jede Kurve darzustellen. Das ist das sogenannte Polynom. Es ist eine Reihenformel, die man so lang schreiben kann, wie man will, die aber der Mathematiker wohlweislich nur so lang schreibt, wie er es unbedingt braucht, denn sie wird immer komplizierter. Sie lautet:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6 + \dots$$

Es ist eine Gleichung, die zeigt, wie sich die abhängige Größe y durch Variation der unabhängigen Größe x verändert. Man sagt: » y ist eine Funktion von x «. Trägt man die Werte x und y in einem Koordinatensystem auf, dann erhält man eine Kurve. Die Buchstaben $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, \dots$ deuten Konstanten an, die positiv oder negativ, groß oder klein, eventuell auch gleich Null sein können. Durch Veränderung dieser Konstanten kann der Mathematiker nun die Kurve »biegen«, so lange, bis er seine gewünschte Form erhält. Einfache Kurven lassen sich bereits mit wenigen Gliedern dieses »Viel-Ausdrucks«, wie Polynom etwa auf deutsch heißt, beschreiben. Wieviel einzelne diskrete Meßpunkte brauchte man, um die Kurve des auf der Abbildung gezeichneten Polynoms 4. Grades, also das mit dem Glied a_4x^4 , einwandfrei auszu-

Mit einem »Polynom«, der Allerweltsformel der Mathematiker, kann man beinahe jede Kurve erhalten. Je komplizierter die Kurve, um so länger das analoge Polynom. So könnte man z. B. beginnen, um eine Blattform nachzubilden.





Die gesuchte »Computer-Schnecke«. Die Rechenmaschine hat eine Schneckenform errechnet, die der gesuchten am besten entspricht. Sie erscheint, vergrößert, auf dem Bildschirm.

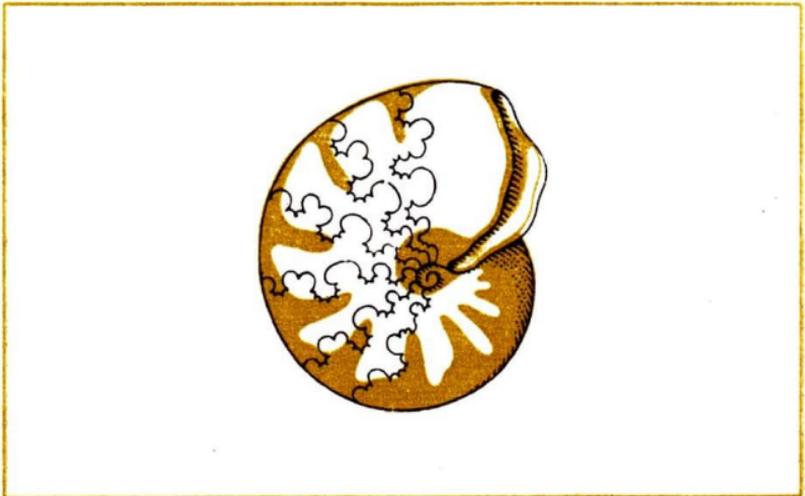
messen? Um die Formel exakt auszudrücken, sind nur 5 Werte, nämlich die Konstanten a_0 , a_1 , a_2 , a_3 und a_4 , vonnöten. Eigentlich könnte man auch auf den ersten Wert verzichten, d. h. $a_0 = 0$ setzen, dann würde die Symmetrieachse des Blattes auf die Abszisse rutschen. Wir sehen, daß jedes weitere Glied des Polynoms die Blattform etwas genauer beschreibt. Mit Hilfe des Polynoms können wir also Formen unabhängig von ihrer Größe darstellen und miteinander vergleichen.

Wollen wir geschlossene Kurven darstellen, also etwa ein ganzes Blatt, so ist es günstiger, die Formel als Funktion von Länge und Winkel eines Zeigers auszudrücken, der sich um eine Achse dreht. Man nennt so etwas »Polarkoordinaten«.

Die vorausgegangene Abbildung zeigt, wie Schneckenschalen mathematisch berechnet werden können. Auch Strukturen der Ammonshörner, sogenannte Lobenlinien, lassen sich mathematisch ausdrücken und die entsprechenden Formeln elektronisch speichern. Das hat eine Bedeutung in der Paläontologie, wo diese Lobenlinien sehr genau analysiert werden müssen, um kleinste Artverschiebungen zum Zwecke der Bestimmung des geologischen Zeitalters des Gesteins festzustellen, denn die Ammonoidea sind wichtige Leitfossilien in bestimmten Gesteinsschichten.

Wir wollen festhalten: Es lassen sich nicht nur einfache Maßzahlen von einem biologischen Objekt entnehmen, sondern ganze Kurvenverläufe durch mathematische Funktionen darstellen. Man könnte auch einen Schritt weitergehen und biologische Vorgänge, z. B. eine Wachstumskurve, durch eine Formel ausdrücken. Für den Nichtmathematiker scheint es ein großer Gedankensprung zu sein, einmal eine Form, das andere Mal einen biologischen Vorgang mathematisch darzustellen. Dieser Gedankensprung liegt aber nur an der Trägheit unseres alltäglichen Denkens oder am Haften an dem, was uns unsere Sinnesorgane bieten. Eine Form, d. h. die drei Dimensionen Länge, Breite und Höhe einer Gestalt, »sehen« wir. Die Veränderung dieser Form, sagen wir die zeitliche Verschiebung dieser drei Parameter, »erleben« wir. Wir müssen warten, müssen Geduld haben, müssen Zeit haben. Für den Mathematiker ist die Zeit in Sekunden, Stunden, Tagen usw. ausgedrückt, eine Rechengröße genau wie Länge und Breite. Wenn wir die komplizierte Gestalt einer Pflanze in n Meßzahlen ausgedrückt und dieser Gestalt einen Punkt im n -dimensionalen Phasenraum zugeordnet haben, dann tut es auch nicht mehr weh, die Zeit als $(n+1)$ -ten Parameter hinzuzufügen und die Veränderung der Pflanze, quasi ihr Wachstum als Bahnkurve

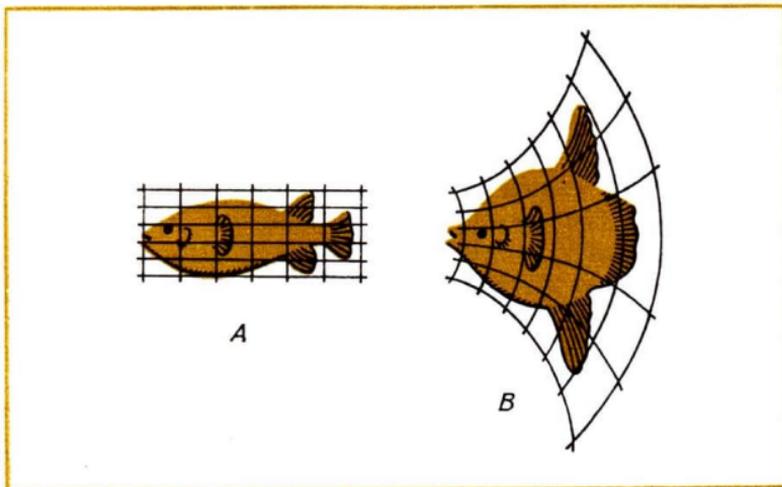
Die Lobenlinien sind »Nähte« in den Schalen der Ammonshörner. Diese Kurven lassen sich mathematisch simulieren und elektronisch speichern.



im $(n+1)$ -dimensionalen Phasenraum, zu betrachten. Aus dem Stern wird somit ein Komet, ein Schwanzstern, der seine vorgeschriebene Bahn läuft. Wir sind also einen Schritt weiter gegangen: Die numerische Taxonomie beschreibt die Art als Punktwolke im Phasenraum. Nehmen wir die Zeit hinzu, sagen wir die individuelle Lebensdauer eines Individuums, so erhalten wir keine Punktwolke, sondern eine mehr oder weniger dicht gebündelte Kurvenschar, die in ihrer Gesamtheit als Wachstums-Bahn-Kurve angesehen werden kann. Wir kommen wieder auf diese Kurven zurück, wollen jedoch zunächst einen anderen Gedanken hier kurz skizzieren.

Es gibt nichts, wovor ein Mathematiker zurückschreckt! Selbst vor der Autorität eines Descartes macht er nicht halt, wenn er beginnt, das schöne lotgerechte Koordinatensystem, das wir nach diesem großen Denker des 17. Jahrhunderts »kartesisches« nennen, zu verbiegen. Immerhin – was der Mathematiker macht, macht er gründlich. Er kann als Entschuldigung für sein Tun die Regel 4 »Zur Leitung des Geistes« von Descartes selbst anführen, die besagt: »Zur Erforschung der Wahrheit bedarf es notwendig der Methode.« Das lotrechte Liniennetz wird also systematisch und wohl berechenbar nebst Inhalt, d. h. den darin abgebildeten Figuren, ver-

*D'Arcy Thompson zeigt am Beispiel der Körperformen der verwandten Fischgattungen *Diodon* und *Orthogoriscus*, wie Formveränderungen durch Koordinatentransformation beschrieben werden können.*



bogen und verzerrt. Es gibt Formeln dafür; man nennt dies wissenschaftlich Transformation der Koordinaten.

Vor mehr als einem halben Jahrhundert schrieb D'Arcy Thompson eines der ersten Bücher über mathematische Biologie, über Wachstum und Form («On Growth and Form», Cambridge 1917) und kam zu dem Schluß, daß es gut sei, die Koordinatentransformation zur Beschreibung biologischer Formveränderungen einzusetzen. Das von ihm angeführte Beispiel, hier in der Abbildung reproduziert, betraf allerdings nicht das individuelle Wachstum eines Organismus, sondern die Formtransformation, die Formwandlung im Verlaufe des Prozesses der Stammesgeschichte. Er kam zu folgendem Schluß: Betrachtet man einen bestimmten Organismus als Bezugsform und projiziert die Parameter seiner Gestalt in ein kartesisches Koordinatensystem, so kann man die veränderte Form irgendeines nahe verwandten Organismus als Resultat einer kontinuierlichen Transformation der Koordinaten ansehen. Der gesamte Entwicklungsprozeß läßt sich durch die geeigneten Formeln der entsprechenden Koordinatentransformation beschreiben und somit mathematisch erfassen.

Was bringt uns dies? Nun, wir haben eine weitere Methode gefunden, einen Naturprozeß in Formeln und damit in Zahlen zu fassen. Zahlen können wir heute zusammen mit Programmen, also Rechenvorschriften, einem Computer übergeben, der seinerseits mit unvorstellbarer Geduld und Geschwindigkeit Kompliziertestes berechnen und kombinieren kann. Der Rechner kann uns nun mühelos alle möglichen biologischen Zwischenformen ausrechnen, ob sie einmal in früher Erdgeschichte existiert haben oder nicht. Er kann auch extrapolieren, das heißt die Evolution weitertreiben, als sie erfolgte, und uns bleibt dann, zu entscheiden, ob das errechnete Monstrum noch real lebensfähig ist oder nicht. Voraussetzung ist allerdings, daß im Verlaufe der Zeit sich nur die Form nach festen Regeln ändert, nicht jedoch die Regeln ihrerseits Änderungen, übergeordneten Naturgesetzen folgend, erfahren. Wir sehen, ein Problem gebiert im Handumdrehen neue. Wir können die Diskussion hier nicht weiter verfolgen, obgleich in letzter Zeit auch zu diesem Problem Vorstellungen entwickelt wurden.

Nun ist der erste Schritt getan, wir haben die biologische Gestalt in ein Koordinatensystem aufgenommen. Nicht nur die Gestalt haben wir abgebildet, sondern sogar deren Veränderungen. Einfach ist das nicht, konnten wir feststellen,

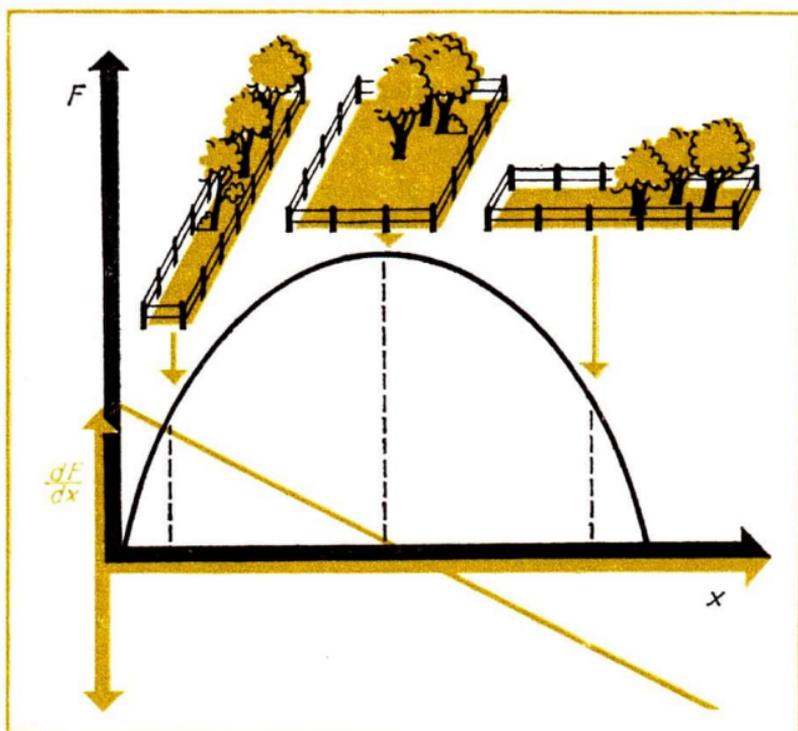
aber wenn die Möglichkeiten moderner elektronischer Datenverarbeitung voll genutzt sind, so läßt sich doch einiges erreichen. Jetzt hat der Computer die Parameter eines biologischen Organismus gespeichert und wartet auf Befehle! Was soll damit geschehen? Einiges führten wir schon an. Er soll z. B. vergleichen, wie weit ein anderer Organismus mit diesem verwandt ist. Es ist z. B. möglich, durch einen Zahlenwert die Entfernung zwischen beiden Punkten im Phasenraum auszudrücken und dadurch eine Verwandtschaftszahl zu errechnen. — Er soll feststellen, zu welcher Art ein Organismus bestimmter Formparameter gehört, welchem Rassenkreis er mit welcher Wahrscheinlichkeit angehört. — Er soll ausrechnen, wie die Form eines Organismus ausgesehen haben mag, der geologisch älter als ein bekannter und jünger als ein anderer ist, bisher jedoch noch nicht paläontologisch entdeckt wurde. Vielleicht stellt sich dabei heraus, daß die Form B gar nicht von der Form A abzuleiten ist, sondern parallel entstand. Soweit gut! Am Anfang dieses Abschnittes hatten wir jedoch noch kühnere Vorstellungen. Kann man fragen: Warum hat der Organismus diese oder jene Form?

Kommen wir wieder an unseren Ausgangspunkt zurück; zurück zu der Feststellung, daß der Organismus ein im Prozeß des Kampfes ums Dasein optimiertes System darstellt, und fragen wir nach der Anwendungsmöglichkeit der mathematischen Disziplin, die eingangs bereits als Optimierungsanalyse vorgestellt wurde. Dazu müssen wir allerdings zuerst überhaupt etwas von dieser Disziplin erfahren. Es ist eine alte Richtung der Mathematik und eine neue zugleich. Alt, weil die Mathematiker sich damit schon lange beschäftigen; neu, weil erst heute im Zeitalter schneller Rechenmaschinen der praktische Einsatz dieser Methoden lohnt und ihre Anwendung erfolgt. Ausgangspunkt dieses Theoriengebäudes ist eine Formel, die schon der große Mathematiker Leonhard Euler vor mehr als 200 Jahren aufstellte. Genaugenommen gehen jedoch die Ansätze zu dieser Theorie noch viel weiter zurück.

Eine beliebte Aufgabe aus dem Mathematikunterricht der Oberschulen, Kapitel Differentialrechnung, ist folgende: »Ein Siedler hat Material für einen Zaun einer Gesamtlänge l . Damit soll ein rechteckiger Garten mit den Kantenlängen x und y abgesteckt werden. Berechne die Proportion der Kantenlängen, die die größte Gartenfläche ergeben!«

Die Ansätze sind einfach:

Die Fläche (F) eines Rechteckes berechnet sich aus dem



Die Parabel (schwarze Kurve) zeigt an, wie sich die Fläche (F) eines Gartens mit vorgeschriebener Zaunlänge (l) durch Veränderung einer Kantenlänge (z. B. Vorderfront) (x) ändert. Die Neigung dieser Parabel drückt sich in ihrer ersten Ableitung $\left(\frac{dF}{dx}\right)$ (farbige Kurve) aus. Dort, wo diese Gerade die x -Achse schneidet, liegt das Maximum, die Kantenlänge des größten (quadratischen) Gartens bei $x = l/4$.

Produkt seiner Seiten x und y nach der Formel: $F = x \cdot y$. Die Gesamtlänge des Zaunes, d. h. der Umfang des Gartens, sei l ; folglich gilt: $l = 2x + 2y$, also $x + y = \frac{l}{2}$; $y = \frac{l}{2} - x$.

Ersetzen wir in der Flächenformel das y durch diesen Ausdruck, so folgt:

$$F = x \left(\frac{l}{2} - x \right) = \frac{l}{2} x - x^2.$$

Diese Formel erlaubt uns, die Fläche F in Abhängigkeit von einer Seitenlänge x zu berechnen. Diese Abhängigkeit kann man graphisch darstellen. Unsere Abbildung zeigt uns diese

Kurve. Ist die Seite x des Gartens sehr klein, muß die Länge y entsprechend der oben angegebenen Formel gegen $\frac{l}{2}$ gehen.

Der Garten wird ein schmales »Handtuch« mit geringer Fläche. Dasselbe, wenn x sehr groß wird. Größer als $\frac{l}{2}$ kann x

nicht werden, selbst bei diesem Extrem bliebe für die Längszäune kein Material mehr, der »Garten« bestände aus zwei gegeneinander genagelten Zäunen ohne Fläche. Wie uns unser logischer Verstand bereits sagt, zeigt die Kurve in der Mitte ein

Maximum, und zwar an dem Punkt, wo x den Wert $\frac{l}{4}$ annimmt.

Leicht läßt sich errechnen, daß dann auch $y = \frac{l}{4}$ sein muß, d. h.,

der größte Garten ist der quadratische. Jeder Oberschüler weiß, daß sich der Ort des Maximums durch die sogenannte erste Ableitung der Fläche F nach der Seitenlänge x berechnen läßt. Diese mathematische Operation erlaubt uns, eine neue Beziehung abzuleiten, die uns die Neigung der ersten Funktion

an jedem Punkt x angibt: $\frac{dF}{dx} = \frac{l}{2} - 2x$.

Unser Maximum liegt an der Stelle, wo die Neigung der Kurve gerade gleich Null ist, d. h. $\frac{dF}{dx} = 0$. Setzen wir dies ein,

so folgt $\frac{l}{2} = 2x$, also $x = \frac{l}{4}$. Eine leichte Aufgabe! Eigentlich

ist dies schon eine Aufgabe der Optimierungsanalyse. Die Fläche des Gartens wurde bei vorgegebener Zaunlänge optimiert.

Eine typische Optimierungsaufgabe wurde schon eingangs formuliert. Welches ist die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten? Läßt sich mathematisch beweisen, daß es eine Gerade sein muß, oder gibt es vielleicht sogar eine andere Kurve, die dem Alltagssinn bisher entgangen ist?

Hier kommt der Oberschüler nicht weiter. Es wird nicht nach einem maximalen oder minimalen, sagen wir allgemein-optimalen Wert gefragt, sondern nach einer optimalen Funktion! Wie läßt sich eine Maximum-Minimum-Aufgabe mit einer Funktion rechnen?

Erinnern wir uns des oben angeführten Umstandes, daß Funktionen, also Kurven, im allgemeinen durch mehr oder weniger umständliche Polynome angleichbar und dann durch einige Zahlen, nämlich die Konstanten $a_0, a_1, a_2 \dots$, darstell-

bar sind. Diese Zahlen können wir wie zuvor die Maßzahlen des Gänseblümchens in ein Koordinatensystem eintragen. Die Kurve schrumpfte zum Punkt im Phasenraum zusammen. Verschiebt sich der Punkt, so heißt es: Die Kurve wechselt ihre Gestalt, die Funktion verändert sich.

Betrachten wir einmal folgende Gleichungen:

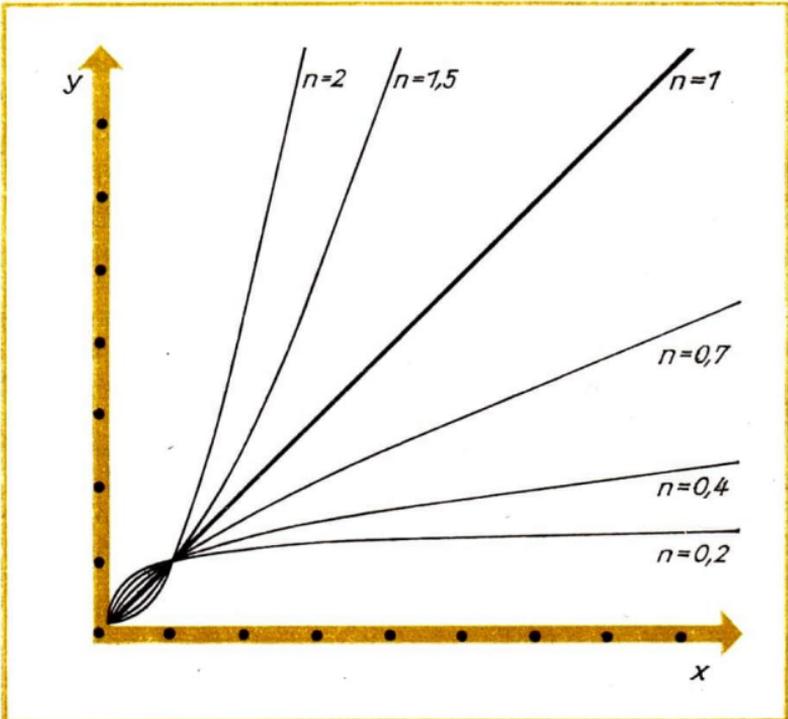
$$y = x^1 \quad y = x^{\frac{1}{3}}$$

$$y = x^2 \quad y = x^{\frac{1}{2}}$$

$$y = x^3$$

Hier ist aus dem Polynom nur jeweils ein Glied herausgenommen. Wir nennen eine solche Gleichung Potenzfunktion. Man schreibt allgemein: $y = x^n$, also »y ist gleich x in der n-ten Potenz«. Durch Änderung dieses Wertes n verändert sich die ganze Form dieser Kurve.

Das ist die Kurvenschar $y = x^n$. Durch Veränderung der Größe n ändert sich die Form der Kurven. So kann man sich prinzipiell vorstellen, daß die Evolution einer biologischen Form durch die Veränderung von Zahlen darstellbar ist.



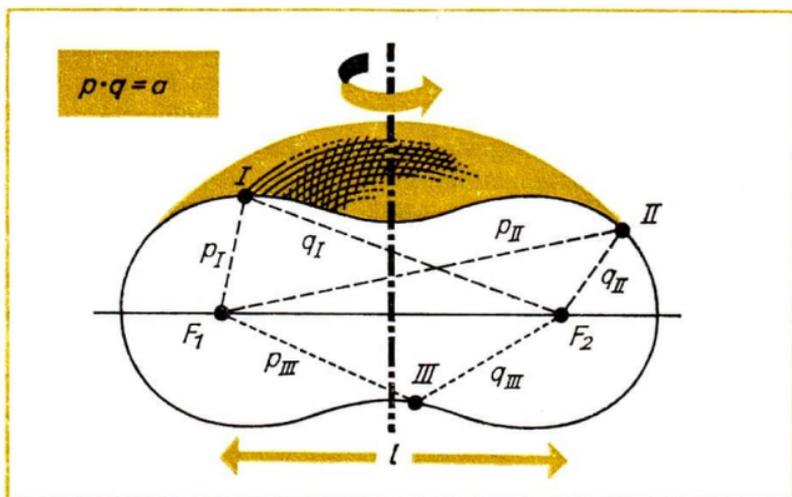
Angenommen, unsere Gleichung würde irgendeine biologische Form beschreiben und der Wert n hätte Bedeutung für eine biologische Funktion, in ähnlicher Weise etwa, wie im vergangenen Abschnitt die Körpergröße in Abhängigkeit von der Wärmeabgabe dargestellt wurde. Dann haben wir einen Fall, der der Gartenzaunaufgabe ähnelt. Gesucht wird zunächst die mathematische Abhängigkeit des Wertes n von dem zu optimierenden Parameter, dann wird das Maximum dieser mathematischen Funktion durch Differentialrechnung bestimmt, der günstigste Wert von n erhalten und daraus die Kurve der günstigsten Form konstruiert.

Hier müssen wir zunächst einhalten und bedenken, was wir erreicht haben. Eine mathematische Funktion als Ausdruck eines Naturgesetzes spiegelt die Abhängigkeit einer Größe von einer anderen wider. Diese mathematische Funktion ist nun also darstellbar durch eine Formel mit charakteristischen Konstanten, also Zahlen, die ihren Charakter bestimmen. Eine Verschiebung dieser Zahlen bedeutet eine Veränderung der Funktion.

Nun gibt es wieder Zusammenhänge dieser charakteristischen Konstanten untereinander. Es existiert eine mathematische Funktion, die der ersten übergeordnet ist, die die erstere beeinflusst; eine »Superfunktion« – der Mathematiker nennt sie »Funktional«.

Somit bedeutet Optimierungsanalyse Auffindung eines Funktionals und anschließend des Maximums oder bei entsprechender Fragestellung auch mitunter des Minimums dieses Funktionals. So einfach sich dieser Vorgang hier verbal beschreiben läßt, so kompliziert ist er in seiner mathematischen Realisierung. Handelt es sich doch bei solchen Funktionalen zumeist um Beziehungen zwischen mehreren Veränderlichen.

Ein konkretes Beispiel soll diese Verhältnisse veranschaulichen. Die roten menschlichen Blutzellen haben eine eigenartige Gestalt. Sie ähneln Gummibällen, die von beiden Seiten eingedrückt sind. Diese Form ist eine typische Optimierungsform, denn sie erlaubt eine schnelle Diffusion des Sauerstoffes zum Hämoglobin, dem Blutfarbstoff in diesen Zellen. Diese Optimierung soll uns hier nicht beschäftigen, sondern vielmehr ein damit zusammenhängendes Problem. Man kann in Lösungen, die etwas weniger Salz enthalten als das Blut, in sogenannten hypotonischen Lösungen, diese Blutzellen »aufblasen«. Es dringt Wasser ein, und die Zellen werden kugelförmig. Bringt man sie vorsichtig in die alte isotonische Lösung zurück, so



Die Cassinische Kurve ist der geometrische Ort aller Punkte, für die das Produkt der Abstände von zwei festen Punkten F_1 und F_2 konstant ist. Mit Hilfe dieser Kurve läßt sich die Form der menschlichen roten Blutzelle angenähert beschreiben.

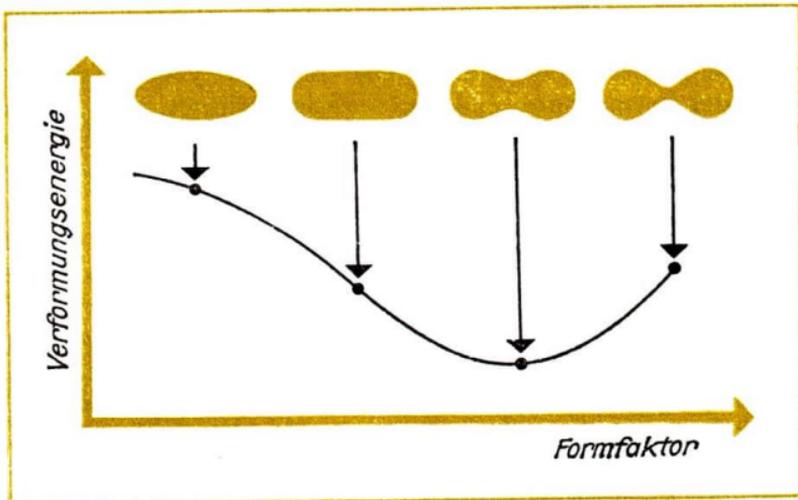
nehmen sie ihre ursprüngliche bikonkave Form wieder an. Wie kommt es zu dieser Form? Warum bilden sich nicht andere Eindellungen der Kugel? Die Frage interessiert, weil bei bestimmten Krankheiten tatsächlich solche Fehlformen auftreten. Offenbar muß die Normalform der menschlichen roten Blutzellen sich durch das optimale Wechselspiel verschiedener Kräfte ergeben.

Der erste Schritt der Analyse dieses Problems ist die Überführung der Form in ein Koordinatensystem durch eine geeignete Formel. Sicherlich ließ sich ein geeignetes Polynom dafür finden, es geht jedoch eleganter. Die Mathematiker kennen eine Kurve, die durch den geometrischen Ort aller der Punkte gegeben wird, für die das Produkt des Abstandes von zwei vorgegebenen Orten F_1 und F_2 immer konstant ist. Nach ihrem Entdecker wird diese Funktion Cassinische Kurve genannt. Entsprechend unserer Abbildung muß also für jeden Punkt auf der Kurve die Gleichung gelten $p \cdot q = a$, wobei p und q die Entfernungen eines beliebigen Ortes auf der Kurve von den beiden vorgegebenen Punkten F_1 und F_2 sind. Natürlich erhalten wir mit dieser Gleichung nur einen Querschnitt durch eine Blutzelle. Die ganze Zelle läßt sich darstellen, wenn

dieser Querschnitt um die Mittelachse rotiert. Die Form der menschlichen Blutzelle läßt sich somit durch zwei Größen beschreiben, nämlich durch die Konstante a und die Entfernung der beiden Punkte F_1 und F_2 voneinander, die mit dem Buchstaben l bezeichnet werden soll. Verschiebt sich nun das Verhältnis von a zu l , so ändert sich die Kurvenform. Man kann das Schwellen der Zellen dadurch gut modellieren.

Nun läßt sich durch verschiedene physikalische Ansätze die Energie berechnen, die bei vorgegebenem Volumen und Oberfläche der Zelle notwendig ist, um die elastische Zellmembran zu verformen. Die Berechnung ist schwierig, aber mit einer Rechenmaschine in guter Näherung möglich. Wir erhalten eine Beziehung zwischen Verformungsenergie und einem Faktor, der das Verhältnis der Größen a und l zueinander ausdrückt und folglich verantwortlich für die Form der Blutzellen ist. Unsere Abbildung zeigt, daß sich diese Beziehung, dieses Funktional, als Kurve darstellen läßt. Diese Kurve hat an einer Stelle ein Minimum. In diesem Minimum ist die Energie, die aufgewendet werden muß, um die elastischen Zellmembra-

Die Form der menschlichen roten Blutkörperchen ist diejenige Form eines Körpers mit gegebener Oberfläche und gegebenem Volumen, bei dem die Verformungsenergie der Hülle ein Minimum hat. Diese Formrelation ist zwar um vieles komplizierter, aber prinzipiell ähnlich der Berechnung des optimalen Gartenzaunes in der vorausgegangenen Abbildung.



nen zu verformen, am geringsten. Wir sehen, daß an dieser Stelle der Formfaktor tatsächlich einen Wert annimmt, der eine Kurve beschreibt, die der Erythrozytenform entspricht. Unsere Zellform ist demnach optimal, wir wissen jetzt, welche Faktoren optimiert sind, und können Störungen krankhaften Abweichens richtig verstehen. Das ist ein Weg, der neben anderen dazu führen könnte, die Ursachen der Krankheit zu beseitigen!

Wir dürfen nicht vergessen, daß mit dieser Analyse eigentlich nur die Hälfte des Problems geklärt ist. Wir haben eine Verformungsenergie angenommen, die irgendwelche Ursachen im molekularen Aufbau der Zellmembran hat, jenem Film von etwa $1/100000$ mm Dicke, der die Zelle umgibt. Genaugenommen, müßten die biophysikalischen Hintergründe dieses Phänomens jetzt behandelt werden. Das würde uns vom eigentlichen Thema ablenken. Wir wollen uns zum Schluß des Buches mit einigen Problemen der molekularen Biophysik beschäftigen. Das hier angeschnittene Problem ist jedoch viel zu speziell, um es im Rahmen einer solchen allgemeinen Plauderei abhandeln zu können.

bleiben wir doch beim Thema »Die biologische Gestalt im Koordinatensystem«! Wir sahen, daß sich die Gestalt nicht nur mathematisch darstellen läßt, sondern daß man, ist sie erst einmal in Zahlen und Kurven erfaßt, mit Hilfe mathematischer Ansätze und physikalischer Gesetzmäßigkeiten sogar ihre Veränderung, Entwicklung, Anpassung oder – mathematisch gesprochen – ihre Optimierung berechnen kann. Das Beispiel der menschlichen roten Blutzellen war vergleichsweise einfach. So einfach, daß es ein guter Computer durchaus erschöpfend berechnen kann. Die meisten vorkommenden Fälle der Formgebung sind weitaus komplizierter. Wenn auch noch nicht exakt berechenbar, so ergeben sich doch mitunter interessante allgemeine Gesichtspunkte und Ausblicke, die wir zum Schluß dieses Abschnittes noch diskutieren wollen.

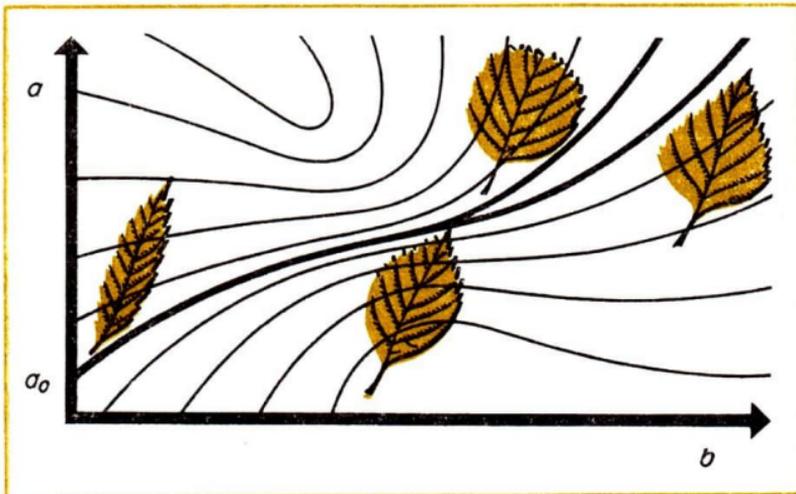
Man kann z. B. die Gestalt einer Pflanze durch sechs Gleichungen beschreiben, die teilweise physikalischen Stabilitätsbedingungen, teilweise Produktivitäts- oder Transportgesetzen entsprechen. Solche Gleichungen sahen wir schon im ersten Abschnitt. Wird ein Grashalm zu lang, so knickt er ab. Ähnliches gilt von Ästen, Blattachsen usw. Andererseits kann durch lange, ausladende Äste eine große Lichtfläche genutzt werden. Die Blätter müssen jedoch mit Wasser versorgt werden, das, von den Wurzeln kommend, die äußersten Zweig-

spitzen erreichen muß, ohne zuvor verdunstet zu sein. Jedes dieser Postulate läßt sich in biophysikalischen Gleichungen ausdrücken. Das Optimum aller dieser Gleichungen ergibt die Gestalt der Pflanze. Welches Optimum? Gibt es nur eines oder mehrere?

Viele Bedingungen sind optimierbar. Erinnern wir uns an das eingangs erläuterte Beispiel des Brückenbaues. Es sollte die billigste, sicherste, leichteste Brücke gebaut werden. Auch eine Pflanze kann ein Optimum an Verdunstungsschutz, ein Optimum an Höhe, ein Optimum an Windstabilität erreichen, um im Kampf ums Licht andere Pflanzen zu überragen usw. Unter bestimmten Bedingungen wird jedem Optimierungskriterium ein Gewicht verliehen; optimiert wird nach dem schwerwiegendsten Kriterium. Ein Kaktus zeigt optimalen Verdunstungsschutz, ein Baum optimale Lichtausnutzung. Es gibt also nicht nur eine Pflanzenform, ein Optimum par excellence, sondern die Vielgestaltigkeit der uns umgebenden Flora.

Bleiben wir bei dem Beispiel der Pflanzen! Machen wir uns ein weiteres Charakteristikum der Entwicklung klar, das etwas

Die Berechnung einer Entwicklungskurve einer Art durch Lösung der Differentialgleichung in der Optimierungsanalyse liefert eine unendlich reichhaltige Kurvenschar. Erst die Wahl eines Anfangswertes a_0 bestimmt eine dieser Kurven als »partikuläre Lösung«. Gibt es »kritische« Punkte, an denen die Kurven sich dicht drängen, dann kann es zur Verzweigung des Stammbaumes kommen. a und b sind willkürlich gewählte Meßgrößen der Individuen.



mehr mathematischen Einblick erfordert! Eine Art gleicht sich einer gegebenen Umweltbedingung an, nach vorgegebenem Optimierungsschwerpunkt. Die Entwicklung dieser Form ist, wie wir jetzt wissen, durch eine mathematische Gleichung, durch die Lösung einer Optimierungsaufgabe, berechenbar. Gleichungen dieser Art heißen Differentialgleichungen. Wir werden im übernächsten Abschnitt auf das Charakteristikum derselben noch zurückkommen, wenn wir uns über die mathematische Formulierung von biologischen Vorgängen unterhalten. Lösen wir nun die Differentialgleichung einer Optimierungsaufgabe, so erhalten wir nicht wie bei normalen mathematischen Gleichungen einen oder mehrere Zahlenwerte, sondern eine ganze Schar von Kurven. Wir bekommen nicht nur eine Entwicklungskurve, sondern unendlich viele, die sich untereinander in Form und Richtung etwas unterscheiden. Erst wenn wir uns festlegen, welchen Punkt der Fläche wir als Ausgangspunkt wählen, fallen alle Kurven, die diesen Punkt nicht schneiden, weg, und es bleibt eine einzige übrig, die wir dann als tatsächliche oder »partikuläre« Lösungskurve unseres Problems ansehen. Es wandert also die Entwicklung unserer Pflanze auf dieser Optimierungskurve, d. h., die Entwicklung erfolgt entlang dieser Kurve, einem Optimum entgegen.

Nun kann es passieren, daß die an und für sich uninteressant gewordene Schar der übrigen Kurven so verläuft, daß wir an irgendeinem Punkt der tatsächlichen Lösungskurve bedenklich nahe kommen. Dann streben sie vielleicht wieder auseinander. An diesem einen Punkt wird nun die Evolution instabil. Durch kleine, zufällige Veränderungen, sagen wir durch eine Mutation, macht ein Individuum einer Art einen kleinen »Seitensprung«. Schon landet sie auf einem »Nebengeleis« und fährt ab in andere Richtung. Die Evolution hat sich verzweigt.

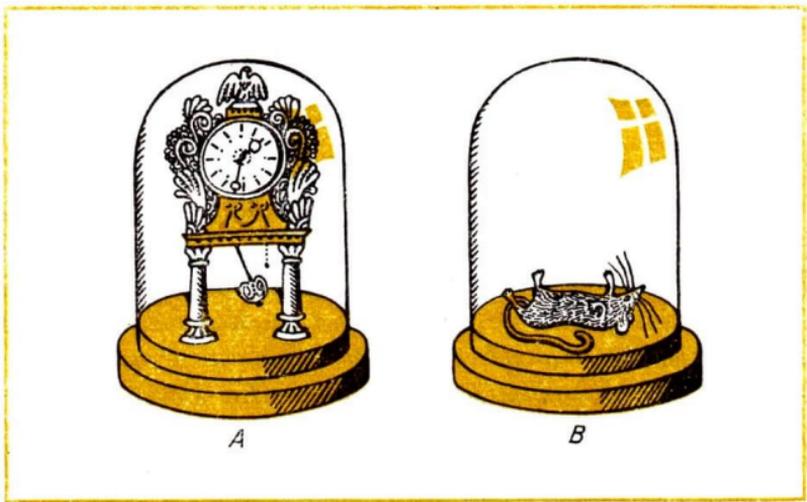
Das Ganze muß man sich natürlich nicht als Vorgang in der Fläche vorstellen, wie wir es hier der größeren Anschaulichkeit halber angenommen haben, sondern als Geschehen im n -dimensionalen Phasenraum. So leicht sich das alles diskutieren läßt und so verhältnismäßig leicht man das hier verbal Dargestellte auch mit mathematischen Formeln allgemeiner Art fundieren könnte, unsere Computer reichen heute nicht dazu aus, solche Vorgänge in hochgradigen Phasenräumen tatsächlich exakt zu berechnen. Trotzdem ist der Weg gezeigt, wie selbst das komplizierteste Phänomen der belebten Natur, das der Evolution, der Entfaltung, der Entwicklung zum Höheren, Vollkommeneren, den Berechnungen prinzipiell zugänglich ist.

»Panta rhei« – die Gestalt des Unbeständigen

Die Kümernisse des Naturaliensammlers oder: Wie konserviere ich eine dynamische Struktur? Das »Alles fließt« des Heraklit und das Fließgleichgewicht der lebendigen Natur. Dynamische Strukturen auf allen Niveaus biologischer Organisation. Lassen sich dynamische Strukturen berechnen? Computer steuern Prozesse der technischen Mikrobiologie, berechnen die Dosierung von Pharmaka und die Funktion der Organe in unserem Körper, überwachen das biologische Gleichgewicht in unseren Gewässern.

Im Anfang unserer Plauderei ging es um den Vergleich zwischen Fernsehturm und Grashalm, den Vergleich zwischen technischer und biologischer Form. Die Gestalt des Belebten beschäftigt uns seitdem fortwährend. Wir lernten, daß die Gestalt von Tier und Pflanze eng verbunden ist mit deren Funktion und Leistungen. Wir sahen, daß es Zahlen und Formeln gibt, diese Gestalten zu beschreiben, ihre Veränderungen, ihre Ähnlichkeiten. Schon im ersten Abschnitt wurde deutlich, daß ein tiefes Verständnis der biologischen Gestalt nur über Kenntnisse verschiedener Lebensprozesse möglich ist. Schreiten wir diesen Weg weiter! Versuchen wir, die biologische Gestalt von ihrer Funktion her zu verstehen!

Einen Zusammenhang zwischen Gestalt und Wirkungsweise, d. h. zwischen Struktur und Funktion, gibt es natürlich auch im Unbelebten. Eine Armbanduhr ist so lange nur ein sinnloses Gebilde aus Messing und aus Stahl, wie wir nicht begreifen, wie ein Zahnrad sinnvoll in das andere greift, wie die Feder den Gang des gesamten Mechanismus antreibt und zu welchem Zweck sich eigentlich die Zeiger auf dem Zifferblatt bewegen. Kennen wir diesen Zusammenhang, dann verstehen wir auch, warum gerade so viel und nicht mehr oder weniger Zahnräder vorhanden sind, warum dieses Zahnrad gerade eine bestimmte Größe hat, jenes eine andere usw. Ähnlich hatten wir im ersten Abschnitt auch die Struktur-Funktion-Wechselwirkung biologischer Systeme verstehen gelernt: Warum haben die Knochen eine bestimmte Stärke, warum kann eine Maus



Die statische Struktur der Technik (A) wird am besten bewahrt durch hermetische Abschirmung gegen Umwelteinflüsse, d. h. Luftfeuchtigkeit, Temperaturschwankungen, Licht usw. Die dynamische biologische Struktur ist auf den Stoffwechsel mit der Umwelt angewiesen. Ihre Isolierung führt zum sicheren Tod.

nicht kleiner sein usw. Das ist also eine Seite des Struktur-Funktions-Zusammenhanges, der technischen und biologischen Gebilden im Prinzip gleichermaßen eigen ist.

Dringen wir weiter ein in das Prinzip der biologischen Gestalt, so entdecken wir einen ganz anderen Aspekt, der von ganz entscheidender Bedeutung ist. Bleiben wir beim Vergleich Technik – Biologie. Angenommen, wir kaufen uns eine ganz besonders kostbare Armbanduhr. Ein Schmuckstück, ein Muster an Eleganz und Präzision, ein Repräsentationsstück, nicht für alle Tage. Wir bewahren die Uhr an einem staubfreien, trockenen Ort möglichst konstanter Temperatur auf. Zu besonderen Anlässen holen wir sie hervor, ziehen sie auf, stellen sie und repräsentieren damit in der Öffentlichkeit. Dann wird sie wieder verpackt. Die Funktionstüchtigkeit der Uhr wird somit außerordentlich lange erhalten. Nichts verändert ihre Zahnräder; ihre Rubinlager sind noch nach Generationen wie neu.

Nun zu einem biologischen Beispiel: Wie oft ist es schon vorgekommen, daß ein Sammler einen überaus seltenen Käfer, Schmetterling, eine kostbare Pflanze fand und sie seinem privaten oder einem öffentlichen Museum einverleiben möchte.

Möglichst lebensgetreu sollte dieses Stück aufbewahrt werden, möglichst sogar lebend. Wir wissen, daß dies nicht geht. Eine begrenzte Zeit lang lebt ein Tier noch bei guter Pflege, hält sich eine abgeschnittene Pflanze im Wasser, die natürliche Lebensdauer läßt sich jedoch nicht wesentlich verlängern. Der tiefere Grund dafür ist folgender: Die Struktur des Organismus ist an seine Funktion gebunden. Diese Struktur ist ohne Funktion nicht aufrechtzuerhalten. Die Zahnräder des Belebten zerfallen, wenn das Uhrwerk steht!

Wir wollen gelten lassen, daß man heute in wachsendem Maße die Technik beherrscht, Zellen und Organteile über lange Zeit einzufrieren und lebensfähig zu konservieren. Spermien können lange Zeit in flüssigem Stickstoff bei -196°C aufbewahrt werden und sind nach Auftauen wieder lebens-, d. h. befruchtungsfähig. Man spricht auch schon von »Organ-Banken«, die eingefrorene »Ersatzteile« des menschlichen Körpers lagern. Noch ist kein höherer Organismus als Ganzes eingefroren und lebensfrisch wieder aufgetaut worden, aber das ist eine Frage des wissenschaftlichen Fortschrittes. Wir können heute nicht ganz ausschließen, daß es einmal möglich sein wird, einen Dornröschenschlaf im flüssigen Helium anzutreten.

Diese Tatsache widerspricht in keiner Weise unserem Postulat von der Verbindung zwischen Struktur und Funktion. Wir werden später noch eingehend von der Wärme und Temperatur zu sprechen haben. Bei niedrigster Temperatur erstirbt jede Bewegung, also auch die Zersetzungsprozesse biologischer Strukturen. Die Strukturen einer Armbanduhr jedoch bleiben selbst bei Temperaturen weit oberhalb und unterhalb ihrer normalen Betriebstemperatur erhalten.

Dieses Prinzip der Strukturerhaltung durch Funktion drückt sich auch direkt im Aufbau des biologischen Systems aus. Es gibt nur wenige Zellen, wie z. B. die schon einmal erwähnte menschliche rote Blutzelle, die, einmal »angefertigt«, nun nur noch »abgewirtschaftet« werden können. Alle anderen Zellen haben Mechanismen, die ständig in der Lage sind, verbrauchte Moleküle neu aufzubauen, d. h. alte Moleküle durch neue zu ersetzen.

Fassen wir zusammen: Die biologische Struktur unterscheidet sich von der technischen dadurch, daß sie durch die Funktion des ganzen Systems nicht abgenutzt, sondern in gewissen Grenzen ständig regeneriert und aufrechterhalten wird, d. h., dieses Funktionieren des Systems ist für sie Existenzbedingung.

In poetischer Form drückt Thomas Mann diesen Gedanken aus, wenn er schreibt, das Leben balanciere durch »diesen verschränkten Prozeß von Zerfall und Erneuerung«. Tatsächlich ist die Dynamik biologischer Strukturen schon viel länger bekannt. Bereits der alte Dialektiker Heraklit (500 J. v. u. Z.) schrieb: »Wir steigen in denselben Fluß und doch nicht in denselben, wir sind es, und wir sind es nicht.« Zweihundert Jahre später faßte Aristoteles diese Gedanken zusammen zu dem berühmten »Panta rhei« (*παντα ρει*) – alles fließt.

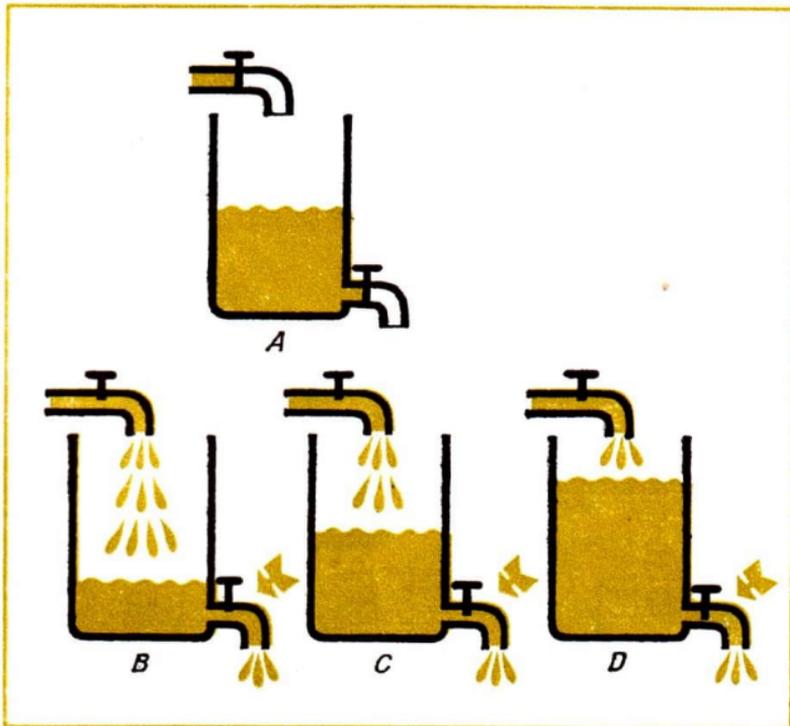
Wir können als moderne Naturwissenschaftler den Dingen auch moderne Namen geben. So sprechen wir im Falle des Zahnrades, eines unbelebten technischen Gebildes, von einer »statischen« Struktur, während wir ein biologisches System, z. B. eine Zelle, als »dynamische« Struktur bezeichnen. Eine Struktur ist ja eben etwas »Sichtbares«, etwas relativ Beständiges. Von einer statischen Struktur kann man diese Eigenschaften von vornherein verlangen. Ein Zahnrad wird hergestellt und unterliegt dann eben dem Verschleiß. Seine Form, sein Gewicht sind »stationär«, d. h. beständig, zeitunabhängig (in gewissen Grenzen natürlich). Wie ist das mit einer dynamischen Struktur? Wenn diese Struktur ständig zerfällt und ständig wieder aufgebaut wird, wenn ihre Beständigkeit nur darin besteht, daß Zerfall und Erneuerung sich gegenseitig genau kompensieren, dann bedeutet irgendeine Beeinflussung dieser Prozesse eine Veränderung der Struktur.

Denken wir uns eine Gummifigur zum Aufblasen. Etwa eine der abenteuerlichen Gestalten, die an heißen Sommertagen in unseren Freibädern verwendet werden. Ist ein solches Produkt dicht, dann genügt ein einmaliges Aufblasen, und es entsteht eine statische Struktur, die bestimmte, zeitunabhängige Formen hat. Anders dagegen, wenn an irgendeiner Stelle ein Loch die eingeblassene Luft wieder herausläßt. Normalerweise kleben wir das Loch zu oder werfen das Schwimmtier als unbrauchbar weg. Theoretisch jedoch könnte man es als dynamische Struktur verwenden. Bläst man ständig Luft hinein, so wird der Ausstrom kompensiert, und das Gummitier erhält mehr oder weniger feste Konsistenz. Die durch das Loch ausströmende Luft wird kontinuierlich durch neue ersetzt. Der Ausstrom durch das Loch ist nicht konstant, sondern druckabhängig. Blasen wir intensiv, so erhöht sich der Druck im Gummitier, und der Ausstrom wird schneller. Für jede Aufblasgeschwindigkeit gibt es einen Zustand gleichen Abblasens, jeweils bei unterschiedlichem Innendruck.

Wir stellen also fest: Im Gegensatz zur statischen Struktur ist die dynamische Struktur regelbar durch die Prozesse, die ihren Aufbau und ihren Abbau bewirken. Dieser Gesichtspunkt ist sehr wichtig und erklärt uns, warum ein biologischer Organismus viel anpassungsfähiger ist als jedes technische System.

Übrigens ist auch für den Zustand ausgewogenen Auf- und Abbaus ein Begriff gefunden worden. Man nennt ihn Fließgleichgewicht. Dieser Begriff wurde vor etwa 50 Jahren durch Ludwig von Bertalanffy geprägt. Die Theorie des Fließgleichgewichtes hat seitdem in der Biologie eine große Bedeutung erlangt.

Am Beispiel eines Wasserreservoirs mit regelbarem Zu- und Ausfluß kann man verschiedene stationäre, d. h. zeitunabhängige Zustände eines Systems beschreiben. A – beide Hähne sind zu; das Modell repräsentiert eine statische Struktur, die ohne energieverbrauchende Prozesse konstant bleibt. B, C, D – die Bilder zeigen dynamische Strukturen, deren Fließgleichgewichtszustand je nach Position der Schieber verschieden ist.





Verschiedene Niveaus biologischer Fließgleichgewichte. A – molekulare Ebene, B – subzelluläre Ebene (Mitochondrien), C – zelluläre Ebene, D – Organ- und Organismus-Ebene, E – Biocoenose.

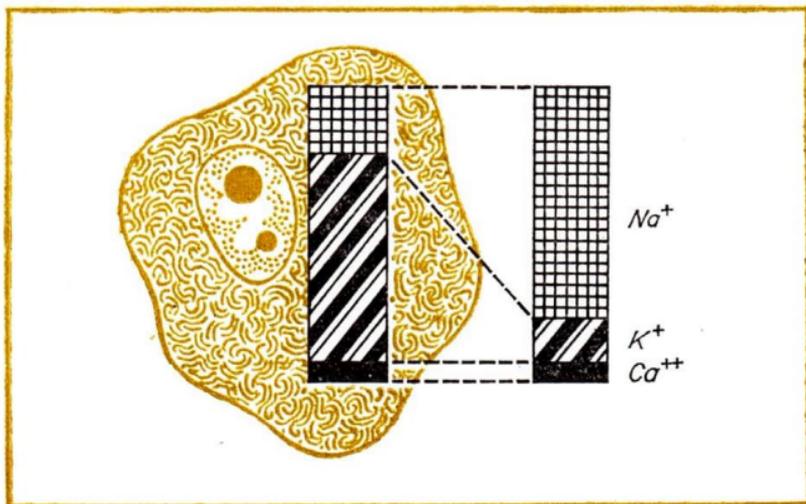
wir nun Entsprechendes konkret in der belebten Natur? Wir müssen feststellen, daß dieses Grundprinzip lebender Systeme auf allen Stufen biologischer Organisation realisiert ist.

Beginnen wir im Bereich des Moleküls. In den letzten Jahren hat man gelernt, radioaktive Isotope aller Elemente herzustellen. Von den meisten biologisch wichtigen Atomarten haben wir brauchbare Isotope, die sich chemisch und biochemisch in nichts von den »normalen« unterscheiden, jedoch ihre An-

wesenheit durch leicht meßbare Strahlung verraten. Mit solchen Atomen, den sogenannten Radionukliden (Nuklid bedeutet Kernart), kann man nun Moleküle »markieren« und dadurch den individuellen Austausch des einen gegen ein neues feststellen, ja sogar Regeneration von einzelnen Molekülteilen verfolgen und messen. Diese Experimente haben uns gelehrt, daß alle Moleküle mehr oder weniger schnell durch neue ersetzt werden, daß die Beständigkeit der biochemischen Zusammensetzung eben nur der zeitunabhängige Zustand eines Fließgleichgewichtes ist.

Wenn die Moleküle erneuert werden, so sind auch die aus großen Molekülen zusammengesetzten Zellbausteine selbst, also die Mitochondrien, die Chloroplasten, der Kern, die äußere Zellmembran usw., keine statischen Elemente, technischen Produkten vergleichbar, sondern dynamische Strukturen im Fließgleichgewicht zerstörender und aufbauender Prozesse. Aber auch in der Ionenzusammensetzung des Zellinneren

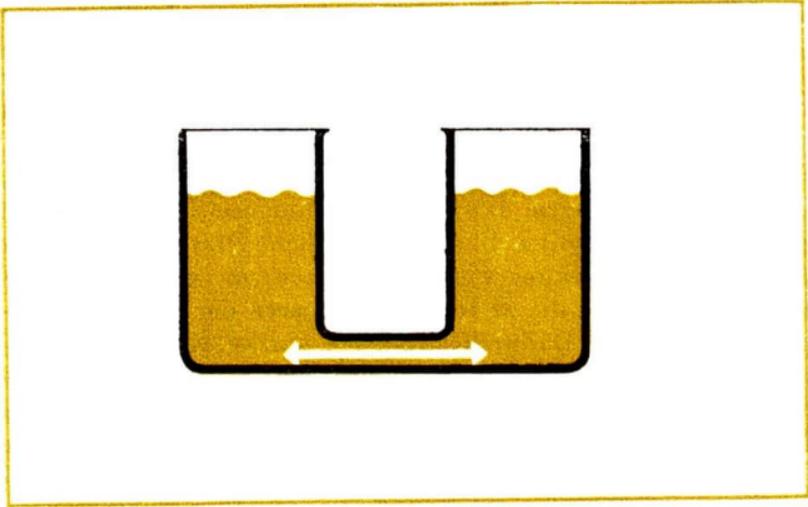
Während die Summenkonzentration der Ionen in der Zelle die gleiche ist wie im Umgebungsmilieu, ist die Zusammensetzung, besonders in bezug auf die Kationen Kalium (K) und Natrium (Na) sehr unterschiedlich. Diesen lebensnotwendigen Unterschied aufrechtzuerhalten, ist Aufgabe spezieller Ionenpumpen in der Zellwand. Getrieben durch die Konzentrationsdifferenzen, fließen die Ionen jedoch ständig zurück, so daß ein Fließgleichgewicht entsteht, ähnlich wie bei den Wasserreservoirs auf der Abbildung Seite 63.



spiegelt sich die Dynamik wider. Aus Gründen, die später behandelt werden, hält die Zelle ein Ionenmilieu aufrecht, das ganz andere Zusammensetzung hat als seine Umgebung. Zwar ist in den meisten Fällen die Summenkonzentration der Zelle gleich der Umgebung, sie ist der Umgebung »isotonisch«, sonst würden hohe Drücke, freigesetzt durch Prozesse der Osmose, die Zelle zersprengen. Die Ionenzusammensetzung jedoch ist ganz anders. Enthält z. B. das menschliche Blutserum beinahe 10mal soviel Natrium- wie Kaliumionen, so ist das Konzentrationsverhältnis dieser Ionen im Inneren der Blutzellen gerade umgekehrt. Dadurch entstehen starke Konzentrationsgradienten, die die Kaliumionen aus der Zelle heraus- und die Natriumionen hineinströmen lassen. Um zu verhüten, daß das lecke Schiff vollläuft, arbeiten Ionenpumpen ständig gegen den Natriumeinstrom und den Kaliumausstrom. Die ziemlich konstant gehaltene Ionenkonzentration in der Zelle ist also ein Fließgleichgewicht. Ähnliche Verhältnisse ließen sich auch für andere Stoffe im Inneren der Zelle nachweisen. Ein anderes Fließgleichgewicht liegt für verschiedene organische Moleküle vor, die in der stoffwechselnden Zelle abgebaut werden. Man nennt sie Metaboliten. Solche Stoffe, wie z. B. Zucker verschiedener Art, strömen in die Zelle passiv ein oder werden eingepumpt und unterliegen hier einem Abbau. Es ist also nicht Ein- und Ausstrom, der sich kompensiert, sondern Einstrom und Abbau. Ähnliche Vorgänge lassen sich noch mehr finden.

Im nächsten Abschnitt soll noch etwas zur Energiebilanz dieser Vorgänge gesagt werden. Hier sei nur festgestellt, daß nicht alles, was austauscht, ein Fließgleichgewichtssystem ist. Denken wir an zwei kommunizierende Gefäße. Hat sich ihr Niveau ausgeglichen, so tauscht sich zwar das Wasser durch Selbstdiffusion weiterhin aus; da dieser Vorgang jedoch nicht mit Energieumsetzung verbunden ist, handelt es sich nicht um eine dynamische, sondern um eine statische Struktur.

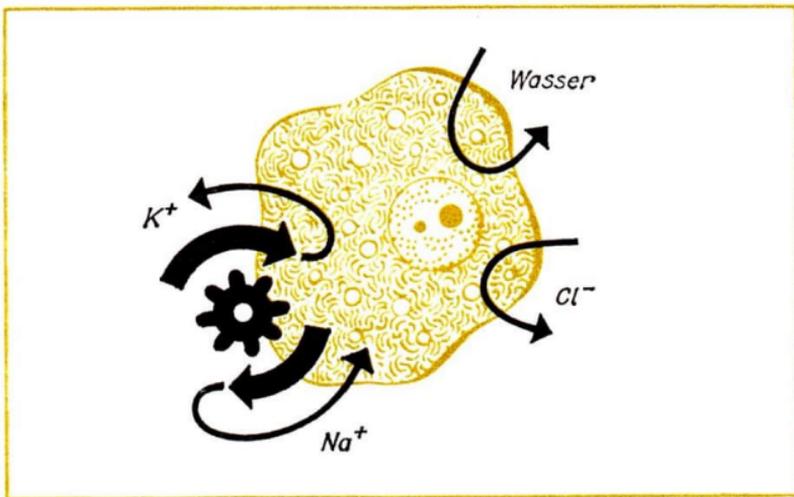
Wenn auch die lebende Zelle insgesamt als Baustein von Tier oder Pflanze eine dynamische Struktur im Zustand des Fließgleichgewichtes ist, so sind einige ihrer Teile durchaus statischer Natur. In vielen Fällen regelt sich der Wassergehalt der Zellen passiv durch dessen energetisches Niveau. In dieser Beziehung ist die Zelle durchaus mit den kommunizierenden Gefäßen zu vergleichen. Allerdings wird das energetische Niveau nicht einfach durch die Gravitationskraft bestimmt, sondern ist auf komplizierte Weise mit anderen Energieniveaus gekoppelt. Doch davon später.



Auch zwei kommunizierende Gefäße tauschen noch, nachdem sich ihre Niveaus ausgeglichen haben, gegenseitig Wasser aus. Man kann sich durch Anfärben des Wassers in einem der beiden Reservoirs leicht davon überzeugen. Trotzdem ist dies eine statische Struktur, kein Fließgleichgewicht, denn der Austauschprozeß verbraucht keine Energie.

Erläuterten wir eingangs den Unterschied zwischen statischer und dynamischer Struktur durch den Vergleich der Konservierungsmöglichkeit technischer und biologischer Systeme, so läßt sich doch zeigen, daß auch manche Bestandteile der Zelle und somit des Organismus statisch sind. Gehen wir in ein Naturkundemuseum. Hier finden wir Pflanzen und Tiere wohlkonserviert in Form und teilweise auch in Farbe. Jedes Kind hat schon einmal biologische Objekte gesammelt. Eine gepreßte, getrocknete Pflanze ist jahrzehntelang mühelos aufzubewahren, ebenso ein getrockneter Käfer, Krebs, Schmetterling, Seestern oder Fisch. Wir schließen daraus, daß manche Bestandteile biologischer Organisation, zumeist solche, die formerhaltend sind, Skelettelemente im weitesten Sinne des Wortes, zwar Produkte dynamischer Strukturen, selbst aber statische Strukturen sind. Zum Teil besitzt der Organismus Möglichkeiten, diese Strukturen bei Bedarf, etwa bei Verletzungen, wieder zu aktivieren und damit ihre Veränderung und Restauration zu ermöglichen.

Wir sind vom Thema etwas abgekommen und haben ein Nebenproblem behandelt, das sich an die Besprechung von



Während Kalium (K^+)- und Natrium (Na^+)-Ionen von vielen Zellen aktiv gepumpt werden (das Zahnrad und die dicken Pfeile sollen das andeuten) und passiv (dünner Pfeil) zurückfluten, unterliegen Wasser und Chlorid (Cl^-) nur dem passiven Austausch, ähnlich dem Wasser in den kommunizierenden Gefäßen.

Fließgleichgewichten auf zellulärem Niveau günstig anschließen und erörtern ließ. Wir wissen also jetzt, daß der biologische Organismus zwar als Ganzes eine dynamische Struktur ist, daß jedoch Teile davon durchaus statischer Natur sein können. Jetzt wollen wir zum ursprünglichen Thema zurückkehren und weitere, höhere Strukturniveaus biologischer Organisation suchen.

Die nächste Ebene bilden biologische Systeme, die aus Zellen im Verband gebildet werden. Es seien hier zusammenfassend Gewebe, Organe und ganze Organismen genannt. Ständig sterben in unserem Körper Zellen ab und werden durch neue ersetzt. Lediglich das Nervensystem bildet eine Ausnahme. Offenbar ist die Spezialisierung dieser Zellen zu hoch, als daß sie leicht ersetzt werden könnten. So hat man abgeschätzt, daß von den ursprünglich vorhandenen zehn Milliarden Nervenzellen täglich etwa 10000 unersetzbar verlorengehen. Ein bislang ungelöstes Rätsel, wie unser Gehirn diesen kontinuierlichen Verlust störungsfrei verkraftet.

Andere Zellen werden nachgebildet. Typisches Beispiel hierfür ist sicherlich unser Blut. Menschliche rote Blutzellen haben

eine mittlere Lebensdauer von 100 bis 120 Tagen, ähnlich liegen die Verhältnisse bei den anderen zellulären Komponenten des Blutes. Das Blut in seiner Zusammensetzung kann aber als dynamisches System betrachtet werden. Stellt ein Arzt krankhafte Änderungen im Blutbild eines Menschen fest, so können die Ursachen hierfür sowohl in der Blutbildung als auch in den gesteuerten Prozessen des Blutzellenabbaus liegen.

Der Begriff »gesteuert« ruft sicherlich bei den meisten Lesern die Assoziation »Kybernetik« hervor. Tatsächlich handelt es sich hier teilweise um kybernetische Probleme. Über Kybernetik ist schon sehr viel geschrieben worden, auch über biologische Kybernetik, so daß dieses Gebiet hier nicht behandelt werden soll. Wir kommen jedoch später noch einmal kurz auf kybernetische Fragestellungen zurück, gleichsam um die Brücke dorthin zu bauen.

Es soll nicht unerwähnt bleiben, daß das Krebswachstum als gestörtes Fließgleichgewicht betrachtet werden kann. Eine plötzlich einsetzende Zellvermehrung erhöht bei gleichbleibender Abbaurate den Pegel der Zellzahl ähnlich, wie sich der Wasserspiegel in den beschriebenen Wasserreservoirs erhöht. Auch hiervon soll weiter unten die Rede sein.

Am Beispiel der Blutzellen haben wir bereits den Übergang zur nächsten Ebene, der Ebene der Biozönose, vorweggenommen. Eine Biozönose ist eine Lebensgemeinschaft gleichartiger oder verschiedenartiger Organismen. Ein Dorfteich mit seinen Wasserpflanzen, Algen, Einzellern, Würmern, Wasserflöhen, Insektenlarven und Fischen ist eine Biozönose, eine Wiese mit Pflanze und Tier, ein Wald, ein Moor usw. auch. Durch bittere Erfahrungen mußte der Mensch erkennen, daß diese Ökosysteme komplizierte biologische Strukturen sind, nachdem er durch Abholzen von Wäldern, Ausrotten bestimmter Tierarten usw. manche Rechnung teuer bezahlte.

Wir haben nun schon so viel über das Wesen des Fließgleichgewichtes gesprochen, daß wir unschwer auch in dieser Struktur den dynamischen Charakter im Zu- und Abwandern von Tieren, in Vermehrung und Tod sehen. Bemerkenswert ist die Tatsache, daß die Wechselwirkung der Tiere und Pflanzen untereinander, das Fressen und Gefressenwerden, eine große Rolle spielt. Auf diesem Niveau wird demnach die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Elementen des Systems besonders deutlich. Ferner ist selbstverständlich, daß in diesem System, dessen Elemente ausnahmslos aus lebenden Einzel-

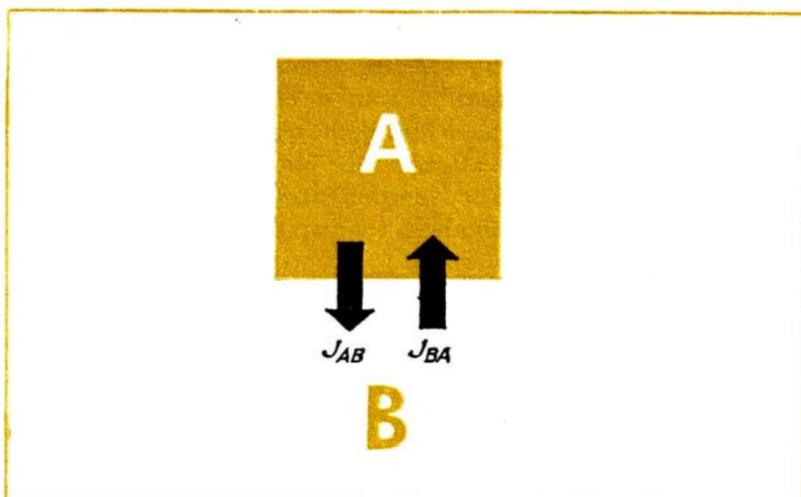
objekten bestehen, alle Strukturen dynamischer Art sein müssen. Statische Strukturen, wie wir sie noch auf der Ebene des zellulären Niveaus, ja sogar noch auf dem Organniveau kennen und besprochen haben, sind hier nicht denkbar. Natürlich bestimmen statische Strukturen das ökologische Fließgleichgewicht mit. Das sind aber Komponenten der unbelebten Umwelt, wie Bodenbeschaffenheit, Umwelttemperatur, Wassertiefe usw.

Der Leser mag den Eindruck gewonnen haben, daß dieses Kapitel mit Physik und Mathematik im Gegensatz zu den Ausführungen der vorausgegangenen Abschnitte nichts zu tun habe. Es ist wahr, wir haben uns bisher mit sehr summarischen und allgemeinen Feststellungen begnügt. Diese waren nötig, um zunächst das Wesen des Fließgleichgewichtes selbst zu erläutern und zu illustrieren. Wir sahen im Fließgleichgewicht einen stationären und trotzdem dynamischen Zustand des biologischen Systems. Im Fließgleichgewichtszustand ist z. B. die normale Zusammensetzung des Zellinneren, die bei der Herzzelle die regelmäßige Kontraktion, bei der Nervenzelle die Bereitschaft zur Erregung, bei der Drüsenzelle die Möglichkeit der Sekretproduktion und -ausschüttung ermöglicht. Die lebensnotwendige Zahl und Zusammensetzung der Blutzellen, das »Blutbild«, wie es der Arzt nennt, ist ein Fließgleichgewicht ebenso die Algenblüte eines Sees, die Zahl der Mikroorganismen in einer technologischen Anlage zur kontinuierlichen Produktion von Alkohol, Penicillin usw. Diese Beispiele illustrieren uns gleichzeitig, wie wichtig es ist, Fließgleichgewichte, ihre Entstehungsbedingungen, Stabilitätskriterien und Veränderungen genau zu kennen und vorauszuberechnen. Auch die Analyse von Fließgleichgewichten mit »markierten« Komponenten erfordert viel mathematisches und physikalisches Wissen. Große Rechenmaschinen sind heute zur Lösung solcher Aufgaben eingesetzt. Wir wollen versuchen, auch hier einige Prinzipien der Theorie dynamischer Systeme zu erläutern, ohne zu tief in die Mathematik einzutauchen.

Ein Fließgleichgewicht, so stellten wir fest, ist ein dynamischer Zustand, in dem sich Zufluß und Ausfluß, Geburt und Tod, Aufbau und Abbau die Waage halten. Wir können deshalb eine einfache Gleichung als Fließgleichgewichtsbedingung definieren:

$$J_{AB} \stackrel{!}{=} J_{BA}.$$

Das Ausrufezeichen über dem »ist gleich« bedeutet: J_{AB} soll



Schematische Darstellung eines Fließgleichgewichtssystems mit dem Influx J_{AB} (Einstrom) und dem Efflux J_{BA} (Ausstrom).

gleich J_{BA} sein! Die Größe J wird in der Biophysik als Flux bezeichnet. Wir wollen damit die Zuflußgeschwindigkeit, Ausflußgeschwindigkeit, Geburtenrate, Absterberate, Aufbaugeschwindigkeit und Abbaugeschwindigkeit ausdrücken. Manchmal ist es also eine gerichtete Größe, ein »Vektor«, wie der Mathematiker sagt, manchmal nur eine Zahl, ein »Skalar«. In jedem Falle ist es ein zeitbezogener Parameter: Einstrom pro Zeit, Geburten pro Zeit, Aufbau pro Zeit usw. Die kleinen Buchstaben AB und BA , die Indizes an den Fluxsymbolen, charakterisieren diese Größen. Hier sollen sie nur bedeuten: $AB =$ »von A nach B « und $BA =$ »von B nach A «. Das heißt einfach, beide Flüsse sind gegenläufig, weiter nichts. Natürlich sind die meisten Fließgleichgewichte durch eine ganze Reihe solcher Flüsse bestimmt, die Größen J_{AB} und J_{BA} repräsentieren also die Summe der entsprechenden Flüsse in der einen oder der anderen Richtung.

Wir haben eine Angel ausgeworfen, an der der Biophysiker anbeißt. Es geht nicht mehr um allgemeine Diskussionen, jetzt geht es um definierte Größen. Wie berechnen wir die Flüsse? Ein Flux ist eine Bewegung, und jede Bewegung muß ihre Ursache in einer Kraft haben. Zunächst setzen wir ruhig Kräfte voraus und fragen nach den dadurch entstehenden Fluxen, ohne uns Gedanken nach dem Woher dieser Kräfte zu

machen. Letzteres ist ein Problem biologischer Energetik oder der Thermodynamik, der Wissenschaft von Energieumsetzungen, auf die wir im nächsten Abschnitt eingehen wollen. Zunächst brauchen wir das nicht. Gehen wir schrittweise vor.

Gegeben sei eine »generalisierte« Kraft, eine mechanische, elektrische oder auch irgendeine andere Kraft, für die wir uns zunächst nur insofern interessieren, als wir postulieren: Sie sei eben da! Sie ist die Ursache der Bewegung, und diesen ursächlichen Zusammenhang wollen wir klären.

Am übersichtlichsten ist wieder unser Wasserreservoir. Nehmen wir an, der Influx sei konstant und nur abhängig davon, wie weit der Schieber geöffnet ist. Anders der Ausstrom. Selbst wenn hier der Schieber während des gesamten Versuches unveränderlich fest steht, ist der Wasserflux veränderlich. Bei günstiger Strömung im Ausflußrohr ist die Ausstromgeschwindigkeit proportional dem hydrostatischen Druck im Gefäß. Bei doppeltem Druck fließt doppelt soviel aus dem Loch. Ist das Gefäß zylindrisch, so ist der Druck direkt proportional dem Wasservolumen im Gefäß. Doppeltes Wasservolumen bedingt doppelte Pegelhöhe, also doppelten Druck. Wir formulieren:

$$J_{AB} \sim V_A.$$

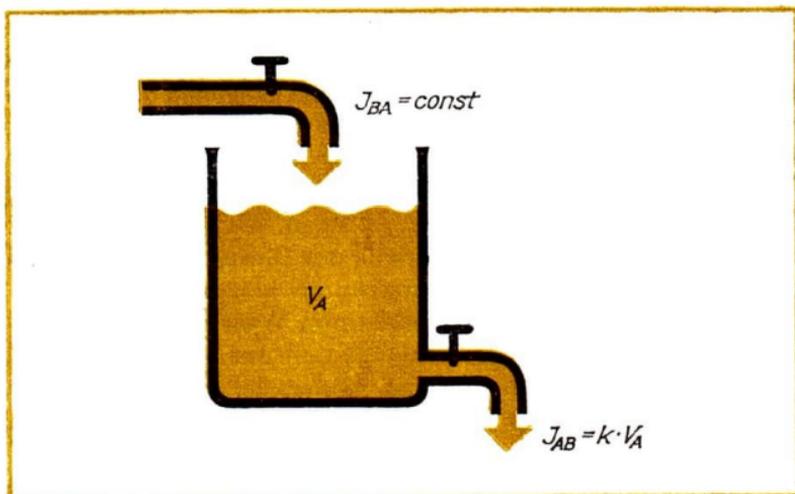
Der Ausfluß, also der Flux von A nach B, sei proportional dem Wasservolumen im Reservoir. Natürlich kann man das Proportionalitätszeichen (\sim) durch ein Gleichheitszeichen ersetzen, wenn man eine Konstante einführt. Diese Fluxkonstante, Austauschkonstante oder wie wir sie sonst bezeichnen wollen, hat die Dimension 1/Zeit, also z. B. 1/Minute, sie soll ja multipliziert mit dem Volumen V_A einen Flux, in diesem Falle eine Strömungsgeschwindigkeit (Volumen/Zeit), ergeben. Es gilt also:

$$J_{AB} = k \cdot V_A.$$

Dies ist der sogenannte lineare Ansatz der Fluxberechnungen; linear, weil die variable Größe V_A nur in der ersten Potenz auftritt, d. h. weder im Quadrat noch im Produkt mit anderen Variablen. Da das Volumen V_A zeitabhängig, also eine Funktion der Zeit ist, wollen wir mit V_{Agl} das Volumen im Gleichgewicht (gl) bezeichnen – oder umgestellt:

$$V_{Agl} = \frac{J_{BA}}{k}.$$

Diese einfache Überlegung hat uns ein wichtiges Gesetz linearer



Der Fließgleichgewichtszustand des Wasserreservoirs läßt sich am leichtesten berechnen. Hier einige Größen und Beziehungen: J_{BA} – Einstromgeschwindigkeit (sie sei konstant), J_{AB} – Ausflußgeschwindigkeit, V_A – Wasservolumen im Reservoir, k – Ausflußkonstante.

Fließgleichgewichtssysteme offenbart – das Gesetz der Äquifinalität!

Das Volumen V_A im Reservoir ist vollkommen hinreichend bestimmt durch die Geschwindigkeit des Einflusses (J_{BA}) und die Ausflußkonstante k . Diese Größe ist völlig unabhängig von der Vorgeschichte des Reservoirs. Wir können uns im Experiment leicht davon überzeugen. Stellen wir einen Topf mit einem Loch unter eine gleichmäßig fließende Wasserleitung. Es wird sich bald ein Fließgleichgewicht entsprechend unseren Zeichnungen einstellen. Markieren wir das Niveau mit einem Strich und gießen jetzt, ohne die Einstellung des Wasserhahnes zu ändern, in kräftigem Schwung aus einem anderen Gefäß zusätzlich Wasser in unseren Topf. Der Pegel steigt sprunghaft. Er bleibt aber nicht auf diesem Niveau, sondern sinkt allmählich auf den vorigen Stand zurück. Ähnlich, wenn wir das Niveau künstlich senken. Äquifinalität bedeutet »gleiches Ende«, d. h., unabhängig vom Ausgangspunkt des Systems stellt sich nach einiger Zeit immer wieder ein und derselbe Endzustand ein. Unsere Abbildung veranschaulicht diese Verhältnisse.

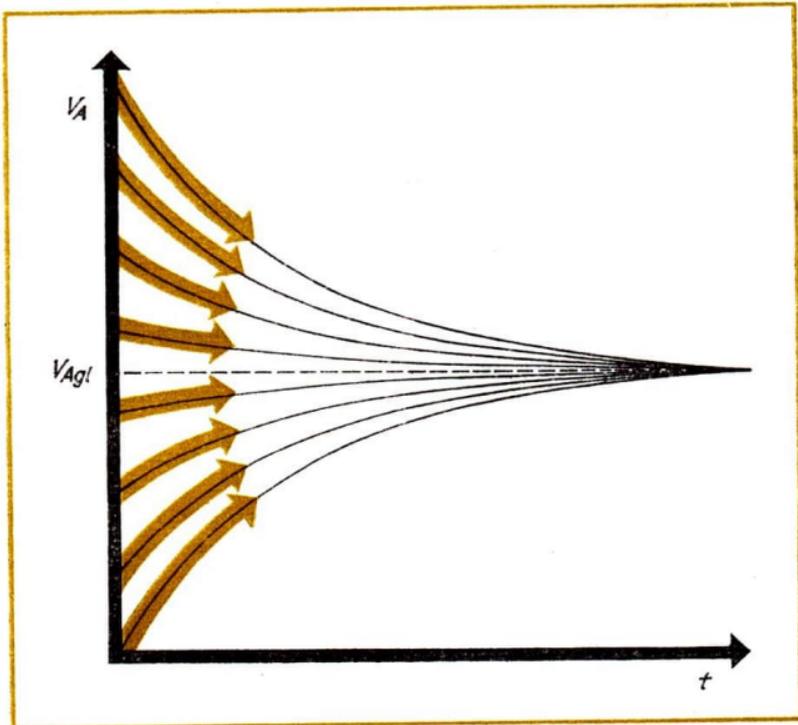
Übertragen wir dieses Gesetz auf das biologische System.

Die vielen von uns besprochenen Fließgleichgewichte antworten demzufolge auf kurzzeitige Störungen von außen durch ein Wiedereinpegeln in eine Lage, die bestimmt wird durch körpereigene Geschwindigkeitsparameter. Wir werden später sehen, daß manche nichtlinearen Systeme sich nicht an dieses Gesetz halten.

Doch weiter zum Fluxverhalten. Bisher haben wir nur den Endzustand errechnet, daß V_{AgI} . In unserer Abbildung sind verschiedene zeitliche Veränderungen von V_A gezeichnet. Das ist ein Vorgriff, dessen theoretische Untermauerung wir nachholen müssen.

Schließen wir einmal den Schieber am Einstrom unseres

Das Gesetz der Äquifinalität sagt, daß ein System unabhängig vom Ausgangszustand in seiner Entwicklung ein und demselben Ziel zustrebt. Dieses Ziel (hier das Gleichgewichtsvolumen V_{AgI}) ist durch die Geschwindigkeitsparameter des Austausches allein bestimmt. Viele Kurven streben, ausgehend von verschiedenen Anfangswerten, diesem Ziel zu.



Reservoirs. Dann sinkt der Wasserspiegel im Gefäß. Die Sinkgeschwindigkeit könnten wir durch den Quotienten $\frac{\text{Volumen}}{\text{Zeit}}$

ausdrücken. Zunächst sinkt der Pegel schnell, dann langsamer. Der errechnete Quotient ändert sich also laufend, und es ist besser, die »ganz kleine« Volumenänderung in einer »ganz kurzen« Zeitspanne abzustoppen. Dieser »ganz kleine« Unterschied von »vorhin« bis »jetzt« ist eine »ganz kleine« Differenz. Der Mathematiker hat dafür einen Begriff definiert. Er nennt »ganz sehr kleine« Differenzen Differentiale und schreibt ein »d« zur Kennzeichnung dieser vor die Größe. dV_A heißt also Volumendifferential und bezeichnet eben diese »ganz kleine« Volumenänderung. dt ist das entsprechend kleine Zeitinter-

vall. Bilden wir den Quotient $\frac{dV_A}{dt}$ (der Mathematiker spricht

hier bekanntlich nicht » dV_A durch dt «, sondern aus bestimmten Gründen » dV_A nach dt «), so erhalten wir den jedem Ober-
schüler bekannten Differentialquotienten.

Verdunstet nichts in unserem Gefäß, so vermindert sich V_A nur um so viel, wie es unten ausströmt. Wir können also schreiben:

$$- \frac{dV_A}{dt} = J_{AB}.$$

Das Minus drückt aus, daß ein positiver Ausstrom eine negative Volumenänderung, d. h. eine Verminderung des Volumens, bewirkt. Aus unserer Fluxgleichung wird demnach:

$$- \frac{dV_A}{dt} = k \cdot V_A.$$

Das ist eine Grundgleichung, die für viele Prozesse in der belebten und unbelebten Natur zutrifft. Sie besagt einfach, daß die Veränderungsgeschwindigkeit einer Größe, nichts anderes drückt nämlich der Differentialquotient $\frac{dV_A}{dt}$ aus, der Größe

selbst (also V_A) direkt proportional ist. Je größer V_A , je weiter also diese Kurve von der Abszisse entfernt ist, um so steiler fällt sie ab.

Das ist die Gleichung für unser System, wenn der obere Hahn geschlossen ist. Öffnen wir ihn, lassen wir also eine konstante Wassermenge pro Zeiteinheit zufließen, den Zufluß J_{BA} also, dann müssen wir schreiben:

$$\frac{dV_A}{dt} = -kV_A + J_{BA}.$$

Das ist nun die Gleichung, welche die zeitliche Veränderung des Wasserpegels nach bestimmten Auslenkungen beschreibt.

Ist ein Fließgleichgewicht erreicht, so verändert sich V_A nicht mehr, folglich wird $\frac{dV_A}{dt} = 0$, und unser V_A in der Gleichung wird zum Gleichgewichtsvolumen V_{Agl} . Wir erhalten die spezielle Form der Gleichung:

$$0 = -kV_{Agl} + J_{BA}.$$

Es läßt sich unschwer sehen, daß man daraus dieselbe Beziehung erhält, die wir oben schon diskutierten.

Doch bleiben wir bei der allgemeinen Gleichung für das dynamische System!

Da die Variable V_A darin nicht nur als direkte Größe, sondern darüber hinaus auch noch als Differentialquotient $\frac{dV_A}{dt}$ auftritt, nennt man diese Gleichungen Differentialgleichungen. Die Mathematik der Differentialgleichungen ist ein großes Gebiet, wir können es hier natürlich nicht behandeln. Lediglich einige Besonderheiten dieser Gleichungsart wollen wir besprechen. Gewöhnlich gilt eine Gleichung als gelöst, wenn eine Zahl gefunden wird, die, eingesetzt in die Gleichung, diese verifiziert. Im Gegensatz zur normalen algebraischen Gleichung ist die Lösung der Differentialgleichung nicht eine Zahl, sondern selbst eine Funktion. Man spricht deshalb auch häufig nicht von der »Lösung« dieser Gleichung, sondern von ihrer »Integration«. Bekanntlich ist Integration die Umkehroperation zur Differentiation oder Ableitung. Integration bedeutet also hier eine Umformung der Gleichung derart, daß der Differentialquotient verschwindet.

Die Integration ist bei Schülern eine unbeliebte Rechenoperation. Während man noch Ableitungen nach feststehenden Regeln sauber und folgerichtig durchführen kann, ist Integration nur möglich, wenn man den richtigen »Trick« kennt. Man probiert eben, wenn auch nach festgesetzten Regeln, aber man kann keinen allgemeingültigen Rechengang formulieren. Mitunter ist eine Integration auch nicht möglich. Diese Eigenschaften des Integrationsprozesses treffen in verstärktem Maße auch für die Differentialgleichungen zu.

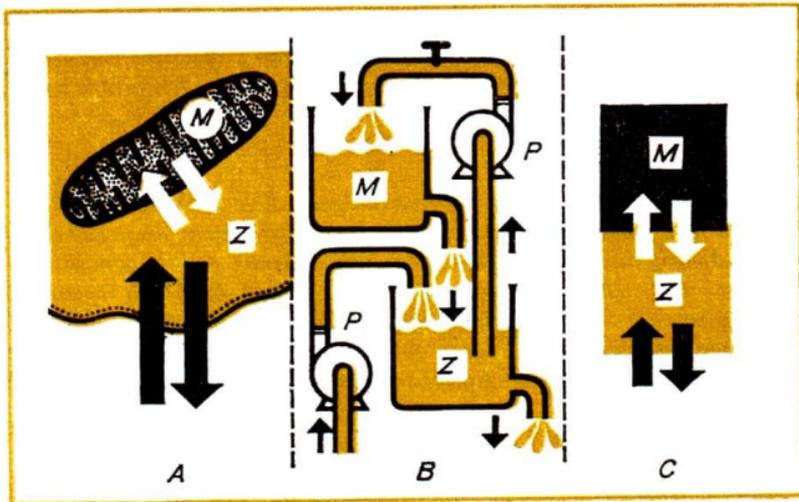
Nicht jede Differentialgleichung ist analytisch lösbar, manchmal helfen nur angenäherte Computerlösungen.

Jeder, der sich mit den Anfangsgründen der Integralrechnung vertraut gemacht hat, weiß, daß dabei Integrationskonstanten eingeführt werden müssen. Nur bei »bestimmten Integralen«, solchen, die sich auf ganz bestimmte, deutlich begrenzte Funktionsbereiche beziehen, fallen sie weg. Auch diese Eigenart charakterisiert die Lösung von Differentialgleichungen. Zunächst liefert uns die Integration eine »allgemeine Lösung«: eine Kurvenschar, d. h. unendlich viele Kurven bestimmten Charakters. Erst nach Festlegung von Anfangsbedingungen können wir aus dieser Menge eine »partikuläre Lösung« herausfischen.

Die anschauliche Bedeutung dieser Eigenschaft wurde schon am Beispiel des Wasserreservoirs im Zusammenhang mit der Eigenart der Äquifinalität erläutert. Die verschiedenen auf der Abbildung gezeichneten Kurven stellen verschiedene partikuläre Lösungen dar, die zu unterschiedlichen Anfangsbedingungen gehören. Sie laufen alle zum Schluß auf denselben Punkt V_{AgI} zu.

Um die Übersichtlichkeit in diesem etwas trockenen Stoff zu bewahren, wollen wir erst einmal wieder Rückschau halten: Zunächst stellten wir fest, daß ein dynamisches System, z. B. der Stoffaustausch der Zelle, anschaulich durch ein Wasserreservoir mit Zu- und Ausfluß darstellbar ist. Dann versuchten wir die Berechnung. Dazu schufen wir uns Größen: verallgemeinerte oder, wie wir sie auch nannten, generalisierte Flüsse und Kräfte, stellten Proportionen auf. Es ließ sich zeigen, daß die Veränderung einer Größe des dynamischen Systems durch einen Differentialquotienten und das ganze Verhalten als Differentialgleichung zu formulieren ist. Die Lösung, d. h. die Integration dieser Gleichung, ergibt zunächst unendlich viele Kurven gleichen Charakters, eine Kurvenschar, die uns zeigte, wie sich das System, von einem beliebigen Anfangszustand ausgehend, entwickelt, bis es den stationären, d. h. zeitunabhängigen Zustand des Fließgleichgewichtes erreicht. Von besonderer Bedeutung war der Befund, daß alle diese verschiedenen Kurven schließlich ein und denselben Wert anstreben. Wir nannten dieses Streben einfacher linearer Systeme nach dem gleichen Ziel Äquifinalität. Diese Eigenschaft hat große Bedeutung für die Stabilität biologischer Systeme.

Was läßt sich nun mit diesen theoretischen Ansätzen anfangen? Zunächst kann man auf der Basis dieser einfachen



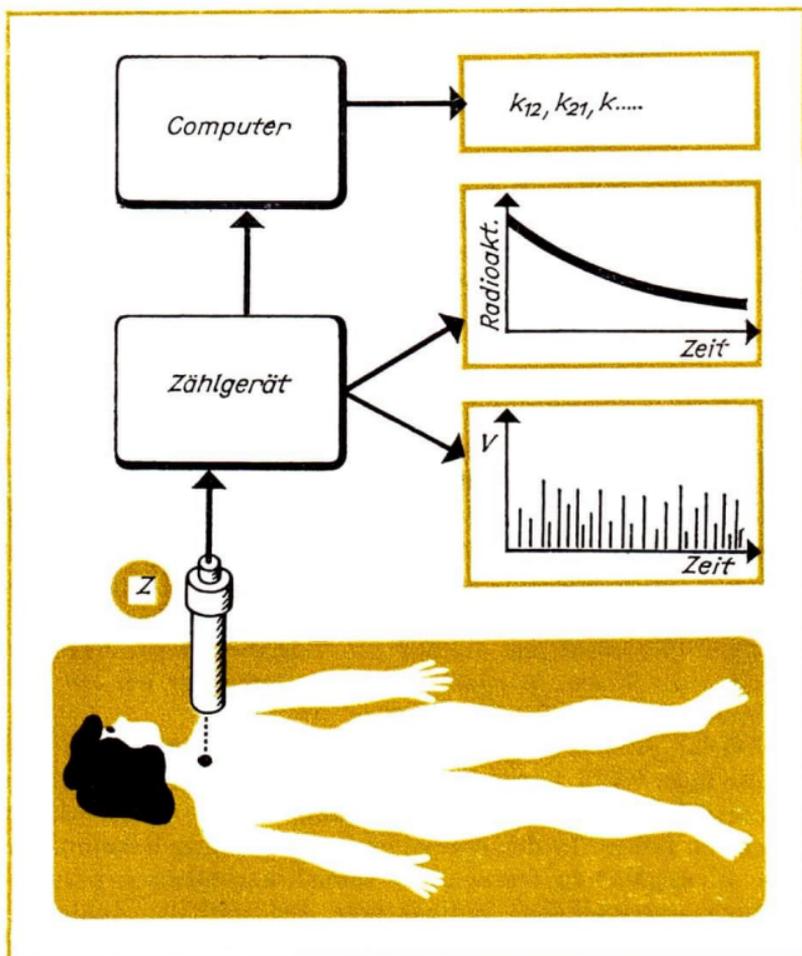
Irgendein Stoff wird vom Außenmedium durch die Zellmembran in die Zelle (Z) transportiert und von hier aus weiter in einen Bestandteil der Zelle, ein »Zellorganell« (M), z. B. ein Mitochondrium. Dieser in A dargestellte Fall kann durch ein System zweier Wasserreservoirs (in B) mit Pumpen (P) modelliert werden. Schematisch ist das gleiche sehr übersichtlich in C dargestellt. Die Abbildungen A, B und C stellen somit eine Richtung zunehmender Abstraktion dar.

Bausteine beliebig komplizierte Systeme aufbauen. Unser Bild zeigt uns, wie sich beispielsweise der Stoffaustausch durch eine Zelle und eine ihrer Organellen, z. B. ein Mitochondrion, durch ein hydraulisches Modell oder leichter noch rein schematisch darstellen läßt. Summieren wir hier für jedes dieser Compartments, wie man die einzelnen Reservoirs nennt, die Fluxes in allen Richtungen und drücken diese durch unsere linearen Ansätze aus, so erhalten wir wieder Differentialgleichungen mit Lösungen, die uns das Verhalten dieses Systems beschreiben lassen. Wieder helfen uns Computer bei der Berechnung dynamischer Systeme.

Welche praktischen Anwendungen haben nun diese Berechnungen? Ein Patient meldet sich in der Klinik mit Beschwerden, die auf eine Funktionsstörung der Schilddrüse schließen lassen. In der radiologischen Abteilung bekommt er eine Flüssigkeit zu trinken, die schnell zerfallendes, gesundheitlich unschädliches radioaktives Jod enthält. Zählrohre registrieren die Strahlung an verschiedenen Körperteilen, ein

Computer berechnet aus diesen Werten die Geschwindigkeitskonstanten der Aufnahme des Jods in das Blut und die Speicherung in der Schilddrüse. Auf der Basis dieser Angaben kann der Arzt die Diagnose stellen.

Ein Beispiel angewandter Systemanalyse. Ein Zählrohr (Z) registriert die Radioaktivität des in der Schilddrüse angereicherten Radio-Jodes, das einem Patienten zum Zwecke der Diagnose verabreicht wurde. Die Meßimpulse werden durch ein Zählgerät registriert und ergeben die Kurve der zeitlichen Veränderung der Radioaktivität. Ein Computer analysiert nach vorgegebenem Programm die Kurve und liefert dem Arzt die Austauschparameter k_{12} , k_{21} . . . , die eine Diagnose ermöglichen.

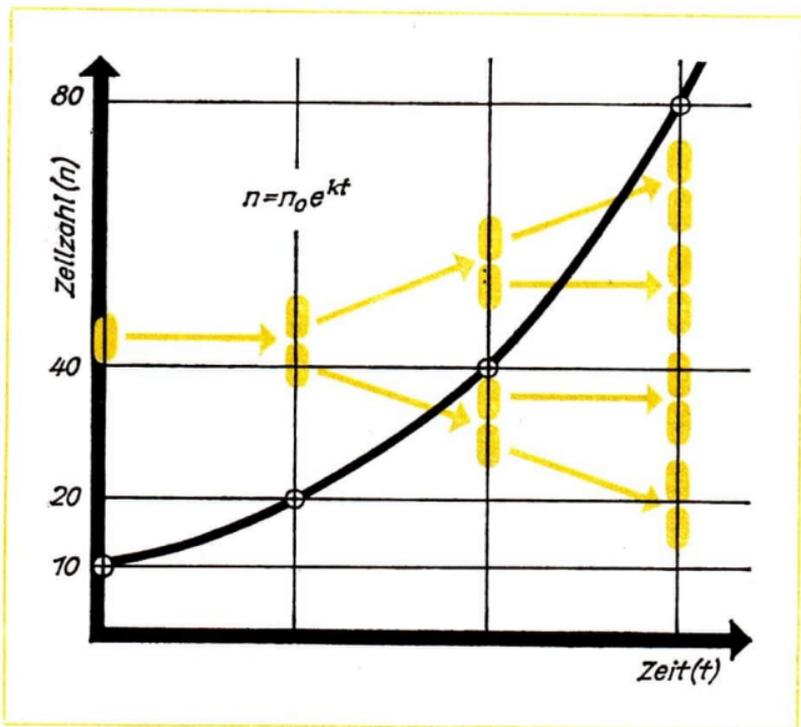


In der Medizin gibt es viele Beispiele solcher Berechnungen. Wie muß ein Medikament appliziert, d. h. in welchen Abständen welche Menge geschluckt oder injiziert werden, damit dieser Wirkstoff am richtigen Ort im Organismus in optimaler Konzentration vorliegt? Er wird aufgenommen und anschließend abgebaut. Das Angebot, d. h. die Aufnahme- geschwindigkeit bestimmt die Höhe der Fließgleichgewichtskon- zentration. — Wie wirkt erhöhte Atemaktivität auf das Sauer- stoffangebot bestimmter Organe? — Wie kann die Ausschei- dung giftiger Stoffe aus dem Körper beschleunigt werden?

Jedoch nicht nur medizinische Probleme sind es, die mit Hilfe dieser sogenannten kinetischen Ansätze berechnet wer- den. Überall, wo biologische Prozesse von wirtschaftlicher Be- deutung sind, in der Land-, Forst- und Wasserwirtschaft, in der Gärungsindustrie und allgemein überall dort, wo wachsende Mikroorganismen zur Produktion von bestimmten Stoffen ein- gesetzt werden, berechnet man mehr und mehr optimale Bilanzen auf diese Weise.

Wir haben uns bisher allerdings nur auf die einfachsten An- sätze, die sogenannten linearen Ansätze, beschränkt. Diese Ansätze gehen davon aus, daß die Geschwindigkeit der Ver- änderung einer Größe, also der Flux, mit der Größe selbst durch einen konstanten Faktor verbunden ist. Wie aber, wenn dieser Faktor selbst sich ändert? Diese Frage, die zu den nichtlinea- ren Ansätzen führt, wollen wir am Beispiel des Bakterien- wachstums erläutern. Zwar kommen solche Nichtlinearitäten auch in reichhaltiger Anzahl im Bereich biochemischer Reak- tionen und Prozesse des Stofftransportes, also auf dem mole- kularen Niveau, vor, am Beispiel der Bakterienvermehrung läßt sich dieses Phänomen jedoch am anschaulichsten demon- strieren. Außerdem hatten wir eingangs postuliert, daß Fließ- gleichgewichtsprozesse auf allen Niveaus biologischer Organi- sation auftreten, so daß es jetzt recht und billig ist, auch das ökologische Geschehen etwas zu beleuchten.

Nehmen wir eine gute, sterile Nährlösung, wie sie die Mikro- biologie heute für jede Mikrobenart zubereitet, und injizieren eine geringe Menge Bakterien oder Hefezellen. Sagen wir, es schwimmen zu Anfang 10 Zellen, stoffwechsel- und teilungs- aktiv, in der Lösung. Wir wissen, daß sich jede von ihnen bei bestimmten Bedingungen in einer bestimmten Zeitspanne ein- mal teilt. Nach dieser Zeit haben wir also 20 Zellen in der Lö- sung. Verstreicht die durchschnittliche Teilungszeit noch ein- mal, dann sind es 40 ... 80 ... 160 ... 320 ... 640 ...



So sieht die exponentielle Wachstumsphase von Mikroorganismen aus: Aus 1 werden 2, aus 2—4, aus 4—8 usw. Bei unbegrenztem Nahrungsvorrat wäre das ein Wachstum ohne Ende.

1280 . . . Dieses Wachstumsverhalten läßt sich ebenfalls durch eine lineare Differentialgleichung ausdrücken. Die Zuwachsrates, d. h. der »Individuenflux« J , ist der zur Zeit gerade vorhandenen Individuenmenge wieder proportional. Wir können genau wie bei dem zuvor erläuterten Beispiel diese Zuwachsrates durch einen Differentialquotienten ausdrücken. Bezeichnen wir die Anzahl der Zellen im Versuchsfäß mit dem Buchstaben n , so können wir schreiben:

$$\frac{dn}{dt} = k \cdot n.$$

Diese Gleichung ähnelt dem linearen Fluxansatz von vorhin. Tatsächlich ist es wieder ein linearer Ansatz, allerdings diesmal ohne Minuszeichen. Das ist wichtig, denn während dort das Wasser im Topf weniger wurde, steigt hier die Zahl der Mikro-

organismen mit der Zeit. Wir wollen uns die Erörterungen über den Integrationsweg sparen. Auf unserer Abbildung ist die partikuläre Lösung für den Fall angegeben, in dem zu Versuchsbeginn, d. h. zum Zeitpunkt $t = 0$, eine bestimmte Bakterienzahl vorhanden ist, die wir mit n_0 bezeichnen wollen. In der auf der Abbildung dargestellten Formel taucht eine neue Größe auf, nämlich die Zahl e . Das ist eine irrationale Zahl, also eine Zahl, die sich durch einen Bruch zweier ganzer Zahlen nicht darstellen läßt, eine Zahl, die sich für die Mathematik als sehr praktisch erwies und zur Basis des sogenannten »natürlichen« Logarithmus gemacht wurde. Sie beträgt: $e = 2,718\dots$ Wir wollen uns hier in die sicherlich sehr interessante Diskussion über die Bedeutung der Zahl e nicht einlassen, denn das hat mit Biologie nichts zu tun. Anstelle von e könnte man in unsere Gleichung auch jede andere Zahl einsetzen, dann müßten wir aber gleichzeitig unser k ändern.

Wir sehen, die Zellzahl n ist hier als Funktion der Zeit t ausgedrückt, wobei die Zeit t im Exponenten der Formel steht. Man nennt deshalb eine solche Funktion Exponentialfunktion. Übrigens sind die Gleichungen, die die Kurven der vorausgegangenen Experimente darstellen, auch Exponentialfunktionen, wobei allerdings zum größten Teil das k negatives Vorzeichen trägt, also kein Anwachsen, sondern ein Abnehmen mit der Zeit symbolisiert.

Bleiben wir beim Zellwachstum! Zunächst erscheint uns das Geschehen sinnvoll. Mit jeder Zeiteinheit verdoppelt sich die Zellkonzentration. Doch wie soll das enden? Die Kurve steigt steiler und immer steiler an; es führt zu dem berühmten Hirsebrei, der überkocht, das Haus überschwemmt und die Straße füllt. Solches ist weder mit Mutters Hefeteig noch mit Vaters gärenden Weinballons geschehen! Unsere Gleichung beschreibt also bestenfalls den Beginn eines Prozesses, später verläuft dieser Vermehrungsvorgang offenbar anders. Was haben wir bei unserem Ansatz vergessen? Nun – die biologische Realität, daß nämlich ab einer gewissen Zellkonzentration Nahrungsmangel auftritt und die Bakterien sich langsamer, vielleicht sogar überhaupt nicht mehr vermehren. Wie drückt sich das im Ansatz unserer Gleichung aus?

Wir hatten postuliert: k sei der Proportionalitätsfaktor, der die Teilungsgeschwindigkeit der Zellen unter bestimmten Bedingungen repräsentiert. Wenn sich die Bedingungen aber verschlechtern, dann muß k geringer werden; k ist also mathematisch gesprochen keine Konstante mehr, sondern selbst ab-

hängig von der Zellzahl n . Um weiterzukommen, müssen wir nun Aussagen über diese Funktion k von n machen. Nehmen wir an, diese Größe setzt sich aus zwei Summanden zusammen. Ein Summand sei konstant, wir bezeichnen ihn mit k_1 und nehmen z. B. an, es handele sich um eine erblich bedingte Eigenart, die unabhängig von den Außenbedingungen ist. Der andere Summand sei negativ und wachse mit steigender Zellzahl. Wir bezeichnen ihn mit $k_2 n$ und stellen uns darunter eine hemmende Komponente vor, die etwa den Kampf ums Dasein, also in unserem Falle den Kampf um die Nährstoffe, repräsentiert. Dann erhalten wir für unser k :

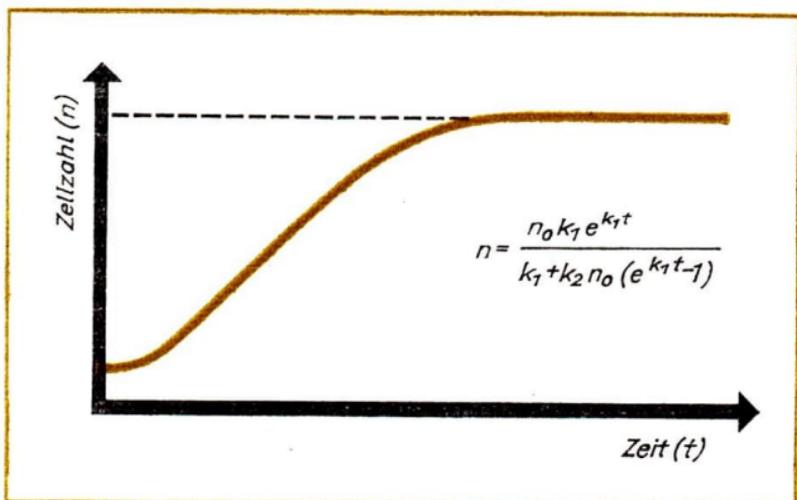
$$k = k_1 - k_2 n,$$

und die Differentialgleichung lautet nun:

$$\frac{dn}{dt} = (k_1 - k_2 n) n = k_1 \cdot n - k_2 \cdot n^2.$$

Schon haben wir eine nichtlineare Differentialgleichung, denn es kommt n^2 darin vor. Nur um zu zeigen, wie diese kleine Änderung gleich die Lösungsfunktion kompliziert, ist die neue

Das ist die »logistische« Funktion des Zellwachstums, die die gegenseitige Hemmung der Vermehrung nach anfänglicher exponentieller Phase zeigt. Die dazugehörige Gleichung ist die einfachste ihrer Art und doch um einiges komplizierter als die der vorigen Abbildung (siehe vergleichsweise Seite 82).

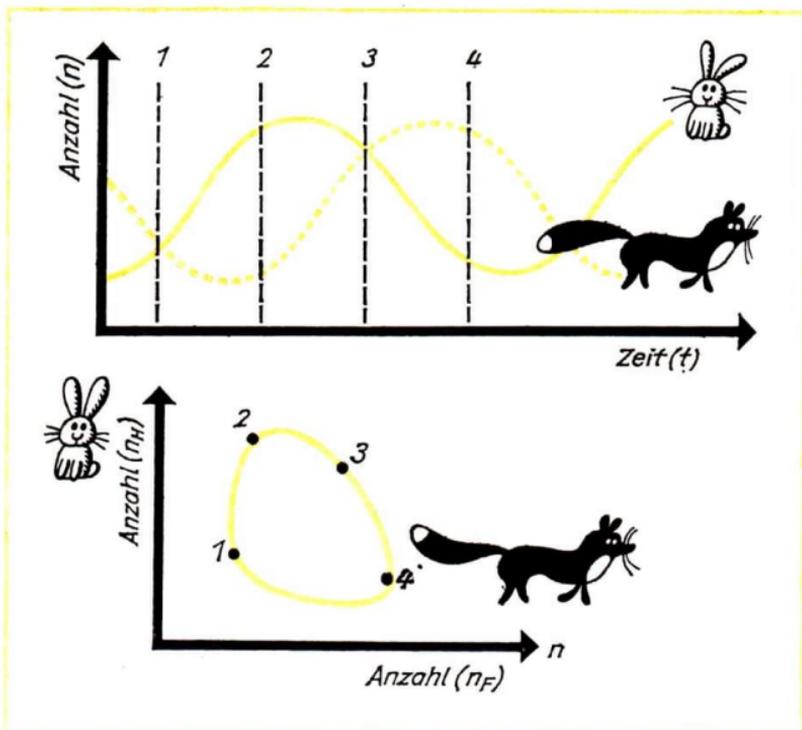


Exponentialgleichung in der Abbildung einmal aufgeschrieben. Wichtiger ist aber der neue Kurvenverlauf, der tatsächlich zeigt, daß die Kurve nach anfänglich schnellem Anstieg wieder flacher wird und in ein Gleichgewichtsniveau einbiegt. Wer Lust hat und einige Kenntnisse der Algebra besitzt, kann eine Kurvendiskussion mit dieser Gleichung durchführen. Es läßt sich leicht nachweisen, daß diese Gleichung für kleine Werte von t in die einfache Gleichung des exponentiellen Wachstums übergeht. Wir wollen uns hier damit begnügen, einmal möglichst anschaulich den Charakter nichtlinearen Verhaltens gezeigt zu haben.

Dieses nichtlineare Verhalten wachsender, sich vermehrender Individuenzahlen oder ganzer Biozönosen, also Lebensgemeinschaften, ist typisch für dieses höchste Niveau biologischer Organisation. Besonders interessant werden die Verhältnisse dort, wo eine Tierart sich von einer anderen ernährt. Das Räuber-Beute-Verhältnis ist schon vor beinahe einem halben Jahrhundert durch den französischen Gelehrten Volterra berechnet und seitdem viel diskutiert worden.

Stellen wir uns einen geschlossenen Garten vor, in dem Hasen und Füchse leben. Angenommen, es gibt dort so viel Gras, daß die Hasen nie in Futternot geraten, so daß die Grasvermehrung uns nicht zu interessieren braucht. Das vereinfacht die Rechnung. Die Hasen leben und vermehren sich. Die Füchse haben gut zu fressen und vermehren sich auch. Steigt nun aber die Anzahl der Füchse, so werden mehr Hasen ausgerottet, die Hasenzahlen sinken. Daraufhin müssen die Füchse Hunger leiden, einige verhungern, die Vermehrungsgeschwindigkeit sinkt. Es kommt zur Abnahme der Füchse. Dies wiederum vermindert die Anzahl gefressener Hasen, die Hasenzahl steigt, die Füchse haben wieder zu fressen, vermehren sich, vernichten die Hasen usw.

Wir sehen aus diesem beinahe humoristisch anmutenden Gedankenexperiment, daß hier kein zeitunabhängiger konstanter Pegel des Fließgleichgewichts vorkommt, sondern daß periodische Schwankungen auftreten. Natürlich läßt sich das auch mathematisch beweisen, leichter noch mit Hilfe eines Computers modellieren und berechnen. Wir wollen uns jedoch diese komplizierten Diskussionen hier ersparen. Unsere Abbildung demonstriert die eben erläuterten Verhältnisse. Die graphische Darstellung ist auf zweierlei Art und Weise möglich. Entweder werden die Organismenzahlen gegen die Zeit aufgetragen, man erhält regelmäßig schwingende Kurven, oder



Die Individuenzahl im Räuber-Beute-Verhältnis erreicht keinen konstanten Pegel, sondern schwankt periodisch. Man kann das als Funktion $n(t)$ darstellen oder durch eine Ortskurve $n_1(n_2)$. Im zweiten Fall erhält man einen sogenannten »Volterra-Zyklus«. Die numerischen Punkte des Zyklus entsprechen den im obigen Bild angezeigten Zeitpunkten.

man trägt einfach die Zahl der Beute-Individuen gegen die der Räuber auf und erhält eine sogenannte Ortskurve. Sind viele Räuber und wenig Beutetiere vorhanden, so rutscht der Punkt auf der Ortskurve nach rechts unten, erholen sich die Hasen, so schiebt er sich nach links oben. Wenn immer wieder gleiche Zustände erreicht werden, so erhalten wir eine geschlossene Kurve. Man nennt diese Bilder nach dem bereits genannten Forscher Volterrazyklen. Selbstverständlich darf ein solcher Volterrazyklus nie die Koordinatenachse berühren, denn das würde bedeuten, daß eine Individuenzahl ausgestorben ist. Das Spiel hätte somit ein natürliches Ende gefunden. Andererseits gibt es Fälle, in denen die Kurve nicht in sich zurückläuft,

sondern eine Spirale bildet. Dann verschiebt sich das Verhältnis zugunsten einer Art.

Wir sind hier wieder an die heutige Grenze sinnvoller und möglicher Berechnungen gekommen. So bedeutungsvoll es ist, Lebensgemeinschaften auf dem Lande und im Gewässer zu berechnen, so kompliziert sind diese wirtschaftlich sicherlich bedeutungsvollen Probleme für die mathematische Biologie. Im Moment versucht man, solche Berechnungen lediglich in der Mikrobiologie und in der Hydrobiologie, d. h. in Fragen der Fischwirtschaft, Abwasserreinigung und im Gewässerschutz einzusetzen. Die Schwingungen dieser Systeme sind seit langem bekannt und durch die Arbeiten Volterras lediglich theoretisch bewiesen worden. Schon seit dem Mittelalter wußte man, daß Pest- und Choleraepidemien, denen man damals noch hilflos ausgesetzt war, in Wellen auftraten und abflauten. Auch aus der Ökologie sind solche Schwankungen hinlänglich bekannt. Hier spielen allerdings jahreszeitliche Klimaschwankungen noch eine große Rolle.

Die Berechnung solcher Phänomene in realer Umgebung erfordert die Bewältigung sehr umständlicher Gleichungssysteme, und nicht immer ist es nur eine Frage der Rechen-technik, eine richtige Berechnung durchzuführen. Je komplizierter die Gleichungen werden, um so vieldeutiger werden sie auch. Kleine Änderungen der vielen Koeffizienten bewirken große Schwankungen im Kurvenbild. Um hier zu wirklich brauchbaren Lösungen zu kommen, ist noch viel theoretischer Vorlauf nötig.

Diese wegen ihrer Anschaulichkeit am ökologischen Beispiel dargestellten Phänomene finden wir natürlich auch auf molekularer und zellulärer Ebene. Hier sind es besonders enzymatische Reaktionen, die Nichtlinearitäten hervorrufen können. Das Spektrum beobachteter und theoretisch berechneter Phänomene ist groß. So führen z. B. Oszillationen im Zellgeschehen, also z. B. periodische Konzentrationsänderungen, zu Schwankungen, die der Unruhe einer Uhr gleichen. In vielen Fällen sind es wirkliche Zeitgeber biologischer Rhythmen. Sicherlich ist auch die sogenannte »biologische Uhr«, d. h. die tages- und jahreszeitliche Schwankung biologischer Aktivitäten, auf solche Phänomene zurückzuführen.

Im vorausgegangenen Abschnitt hatten wir bereits etwas über Stabilitäten gesagt. Es sind nichtlineare dynamische Systeme bekannt, die nicht dem Gesetz der Äquifinalität genügen, deren End-(»Final«-)Zustand also nicht bei jedem

Anfang gleich (»äqual«) ist. Hier entscheidet mitunter eine kleine Änderung eines Anfangswertes, ob die Systementwicklung diesen oder jenen Gang nimmt, ähnlich einem Regentropfen, der nur wenige Meter neben einem anderen auf der anderen Seite einer Wasserscheide niederfällt und deshalb nun seinen Weg die Donau entlang ins Schwarze Meer und nicht die Elbe entlang in die Nordsee nimmt.

Dieses Kapitel ist überschrieben: Die Gestalt des Unbeständigen! Wir betrachteten das biologische System in seiner Dynamik, Fließgleichgewichtszustände auf verschiedenem Niveau biologischer Organisation, Übergangszustände, Schwingungen. Wir lernten, daß unter biologischer Struktur sehr Verschiedenes zu verstehen ist, sowohl mikroskopisch oder elektronenmikroskopisch »sichtbare« Bausteine der Zelle als auch Konzentrationsverteilungen verschiedener Stoffe, Zellmengen, Organismenverteilungen in Populationen und manches mehr. Diese Strukturen haben nur Bestand durch kontinuierliche Prozesse des Auf- und Abbaues. Dadurch sind sie unbeständiger als die statischen Strukturen der Technik. Andererseits unterliegen sie keinem Verschleiß, da sie kontinuierlich »repariert« werden. So ist ihre Dynamik Voraussetzung für das Funktionieren des lebenden Systems.

Am Beispiel der linearen und nichtlinearen Ansätze konnten wir auch eine gewisse Wertung entsprechend der Kompliziertheit treffen. Am Beispiel der Äquifinalität linearer Systeme und der Vieldeutigkeit nichtlinearer, bzw. ihrer Schwingungszustände, konnte wenigstens andeutungsweise eine Entwicklung aufgezeigt werden.

Mancher Leser hat vielleicht in diesen Erörterungen den Begriff Kybernetik vermißt. Es gibt heute viele Bücher über biologische Kybernetik, so daß wir uns sparen wollen, diesen beinahe zur Modedisziplin degradierten Wissenszweig hier zu behandeln. Prinzipiell würde sich eine Besprechung kybernetischer Probleme hier anschließen. Wir wissen, daß viele biologische Vorgänge durch Rückkopplung gesteuert werden. Die Grenze zu ziehen, die den Anfang der Kybernetik kennzeichnet und diese Disziplin von der Theorie der Fließgleichgewichte absperrt, ist nicht möglich. Vieles, was hier behandelt wurde, kann ohne weiteres als Kybernetik bezeichnet werden. Jedenfalls ist die Kybernetik nicht, wie es leider oft praktiziert wird, ein Spiel mit mehr oder weniger hochtrabenden Begriffen, sondern ernste Mathematik auf der Basis von Differentialgleichungen.

Ein Blick ins Räderwerk des Lebens

Das Uhrwerk des Lebens – wer zieht es auf? Wie läuft es ab? Wo ist die treibende Kraft biologischer Bewegungen? Was hat die Dampfmaschine des Monsieur Carnot mit der Photosynthese zu tun? Die Thermodynamik – die allmächtige Lehre von der Energie. Von der Strahlungsenergie zur chemischen, elektrischen, mechanischen Energie. Der chemische Akkumulator des Adenosinphosphats. Elektrische Potentiale aus Stoffwechselenergie. Ein Zahnrad greift ins andere.

Mehr und mehr ziehen uns unsere Betrachtungen in die Tiefe der Problematik. Eine Frage induziert hundert neue. Wir gingen aus von der Gestalt und kamen zur Bewegung. Wir erkannten den Zusammenhang zwischen Form und Bewegung, betrachteten letztere jedoch zunächst nur als vorgegebenes Phänomen; es bewegte sich eben etwas, angetrieben durch eine Kraft, über deren Herkunft wir uns noch keine Rechenschaft ablegten. Wir stellten fest, bildlich gesprochen, daß die Zeiger der Uhr sich bewegen, daß ihre Bewegung gesetzmäßig erfolgt. Jetzt wollen wir einen Schritt weitergehen: Was ist die Ursache der Bewegung? Was veranlaßt die Zahnräder zur Bewegung? Woher kommt die Kraft? Wie setzt sie sich um?

Die Uhr als Muster mechanischer Präzision hat uns schon verschiedentlich als Beispiel gedient. Bei der Uhr ist die Frage nach der Energiebilanz leicht beantwortet. Mechanische Energie wird in der Feder gespeichert und als mechanische Energie zum Antrieb des Uhrwerks wieder freigesetzt. Die energetischen Umsetzungen in einem biologischen System sind unvergleichlich komplizierter. Dies ist schon an der Vielzahl biologischer Bewegungsformen zu sehen, die im vorausgegangenen Abschnitt besprochen wurden.

Um zum Verständnis biologisch wichtiger Energieumsetzungen zu kommen, müssen wir etwas weiter ausholen. Im vergangenen Jahrhundert entstand ein Wissenschaftszweig, der ursprünglich nichts weiter vorhatte, als bessere und leistungs-

fähigere Dampfmaschinen zu bauen. Es handelt sich um die Wissenschaft von der Energie, die damals als Lehre von der Wärmebewegung Thermodynamik getauft wurde. Wie hoch ist der Wirkungsgrad einer Dampfmaschine, und wie läßt er sich erhöhen? Kann man ein Perpetuum mobile bauen? Warum erwärmt sich ein Werkstück, etwa ein Kanonenrohr, beim Bohren? – Dies waren die ersten Fragen, die sich diese Wissenschaft stellte. Seit ihrer Begründung hat die Thermodynamik einen mächtigen Aufschwung erfahren und entwickelt sich stürmisch weiter. Sie bildet heute das theoretische Fundament für die Berechnung aller energetischen Vorgänge in der Natur.

Schon immer hat man versucht, dieses umfangreiche Theoriengebäude auf das komplizierte Räderwerk des Lebens anzuwenden. Zumeist scheiterten die Versuche an der Kompliziertheit des Problems. Erst in den letzten Jahrzehnten hat die Thermodynamik einen Stand erreicht, der es erlaubt, wichtige biologische Aussagen zu treffen. Zunächst sind diese Aussagen für den zellulären und molekularen Bereich gesichert. Heute diskutiert man jedoch schon über die Thermodynamik des Wachstums, der Evolution, ja sogar des Denkens.

Die Thermodynamik ist eine bemerkenswerte Leistung menschlichen Geistes. Sie basiert auf wenigen Trivialitäten, d. h. empirisch erkannten Selbstverständlichkeiten, auf die dann ein logisch strenges Gebäude hoher Abstraktion aufbaut, das in sich stabil und sicher ist. Es ist wie ein aus einem System von mathematischen Masten und Streben auf dem Fels gesicherter Erfahrungen errichteter Turm, der ordnende Übersicht und planende Prognose erlaubt.

Wir wollen und können natürlich hier nicht auf Einzelheiten der Thermodynamik, ihr Werden und ihren Stand heute eingehen. Zum Verständnis einiger großer Zusammenhänge braucht man das auch nicht. Es genügt ein Blick aus der Vogelschau, doch auch dazu muß etwas weiter ausgeholt werden.

Zunächst zu den »Selbstverständlichkeiten«, den Pfeilern der Thermodynamik, die man als »Hauptsätze« bezeichnet. Von diesen sind zwei besonders wichtig. Sie wurden mit den Nummern 1 und 2 belegt. Wir wollen auf strenge Mathematik und tiefsinnige Definition verzichten und sie inhaltlich folgendermaßen formulieren:

1. Es existiert etwas, das wir »Energie« nennen und folgende Eigenschaften hat: Es kann nicht aus dem Nichts entstehen, noch kann es sich in Nichts auflösen. Es existiert in verschie-

denen Erscheinungsformen und kann sich von einer Form in eine andere verwandeln.

2. Alle Prozesse der uns umgebenden Natur haben eine bestimmte Richtung. Spontane Prozesse in abgeschlossenen Systemen verlaufen immer so, daß von mehreren möglichen Zuständen der Zustand größter Unordnung erreicht wird.

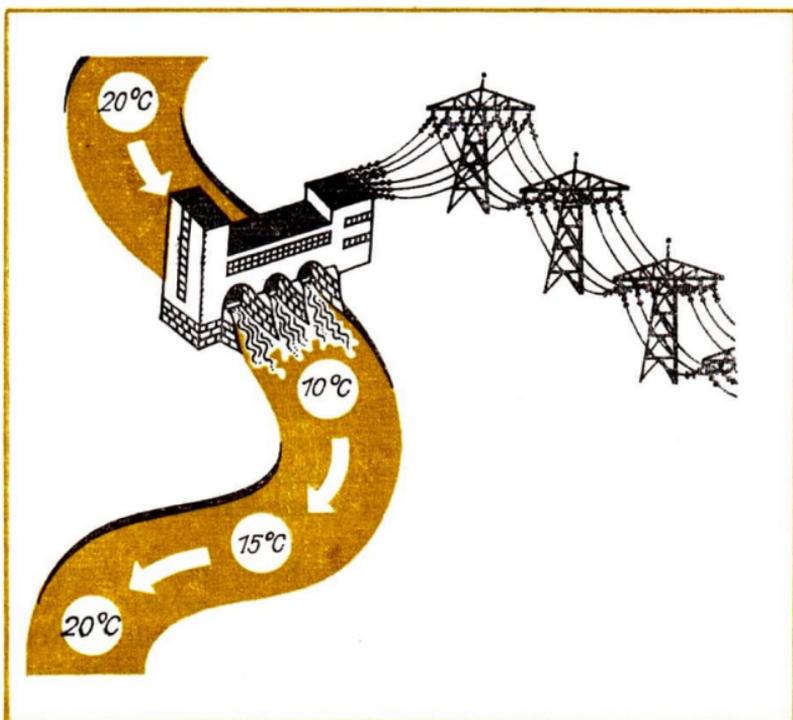
Das sind keine Definitionen, sondern es ist ein Versuch, diese Hauptsätze in möglichst plausibler Art und Weise zu beschreiben.

Beide Hauptsätze, nämlich der Energieerhaltungssatz, wie der erste auch bezeichnet wird, und der zweite, welcher Aussagen über mögliche Richtungen spontaner Prozesse erlaubt, erwiesen sich als außerordentlich fruchtbar für viele Berechnungen. Der 1. Hauptsatz verbietet ein Perpetuum mobile »1. Art«, d. h. die Realisierung des alten Menschheitstraumes von einer sich ständig von selbst bewegendem Maschine, die sogar noch nützliche Arbeit leistet.

Der 2. Hauptsatz ist in seiner ungeheuer großen Aussagekraft und seinem breiten Geltungsbereich schwer zu verstehen. Wer weiß nicht, daß aus Ordnung von selbst immer nur Unordnung wird? Was hat das aber mit Energie zu tun? Nun, ein hoher Turm aus Bausteinen, ein geordnetes System also, kann umfallen und sehr wohl dabei Energie freisetzen. Eine solche geordnete Struktur kann sich jedoch wohl kaum von selbst aus einem Haufen willkürlich zusammengewürfelter Bausteine bilden, auch dann nicht, wenn die mittlere potentielle Energie der Bausteine in beiden Fällen die gleiche ist.

Der Zusammenhang zwischen Ordnung und Energie, also der letzte Teil der unter Punkt 2 getroffenen Aussage, ist tatsächlich erst viele Jahre später als der 2. Hauptsatz durch Ludwig Boltzmann entdeckt worden. Dieser 2. Hauptsatz der Thermodynamik spielt für biophysikalische Fragestellungen eine außerordentlich große Rolle. Wir wollen im nächsten Abschnitt darauf noch näher zu sprechen kommen, zunächst jedoch die energetische Seite dieses Postulates etwas erläutern. Der 2. Hauptsatz verbietet das Perpetuum mobile »2. Art«, d. h. eine Maschine, die einem beliebigen Körper Wärme entzieht und diese in nützliche Energie, sagen wir in Elektrizität, verwandelt.

Illustrieren wir dies an einem Beispiel: Ein Fluß habe im Sommer eine Temperatur von 20 °C, etwas kühler also als die sommerliche Luft. Dieser Fluß möge nun durch ein »Perpetuum-mobile-Kraftwerk« fließen, das ihn auf 10 °C abkühlt.



Ein »Perpetuum-mobile-Kraftwerk«. Es funktioniert, indem es das Wasser eines Flusses abkühlt, ihm Wärmeenergie entzieht und diese in Elektroenergie umwandelt. Solch ein Kraftwerk kann es nicht geben, denn die spontane Abkühlung eines Körpers unter seine Umgebungstemperatur verbietet der 2. Hauptsatz. Es müßte sich schon um eine heiße Quelle handeln, wenn man die Wärmeenergie des Wassers nutzen will!

Die gewonnene Wärmeenergie wird in elektrische Energie verwandelt. Wenige Kilometer stromabwärts hätte der Fluß wieder seine Normaltemperatur, nachdem sich mancher in seiner Nähe in wohlthuender Kühle von der sommerlichen Hitze erholt hat. Dem 1. Hauptsatz ist hier Genüge getan! Die Elektroenergie stammt nicht aus dem Nichts, sondern aus der Wärmeenergie des Flußwassers. Scheinbar ist alles in bester Ordnung! Trotzdem gibt es ein solches Kraftwerk nicht und kann es auch nicht geben. Die durch den 2. Hauptsatz vorgeschriebene spontane Richtung eines Prozesses verbietet dieses Prinzip.

Es läßt sich nämlich nachweisen, daß die Wärme eine Son-

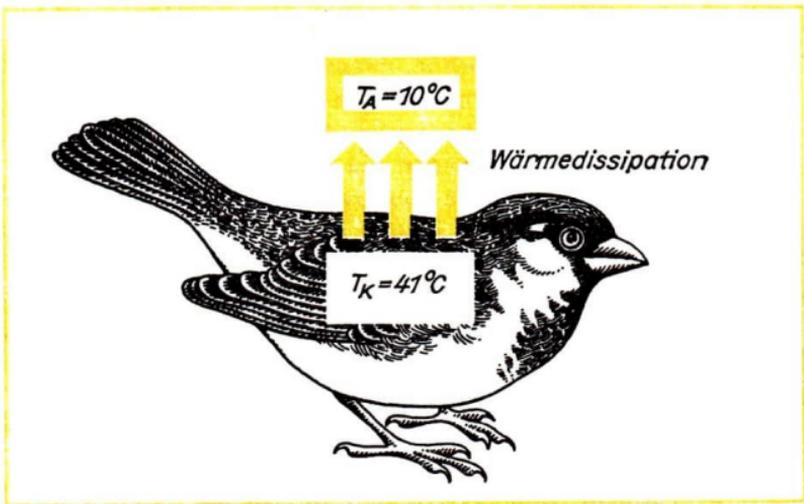
derstellung im Ensemble der Energiearten einnimmt. Jede Energieform, sei es elektrische, chemische, mechanische usw., läßt sich vollständig und verlustlos in Wärmeenergie umsetzen. Wärmeenergie hingegen verwandelt sich nur dann wieder in eine andere Energieform, wenn ein Temperaturgradient vorliegt. Selbst dann gelingt die Umsetzung nur zum Teil. — Auch das ist eine Trivialität, die jedoch im 2. Hauptsatz schon erfaßt ist! Jeder von uns hat schon erlebt, daß ein Glas Tee kalt wurde, d. h. seine Wärme an die Umgebung abgab. Noch nie aber ist von einem Menschen beobachtet worden, daß sich ein Glas Tee auf Kosten seiner Umgebungswärme über die Zimmertemperatur hinaus erwärmt!

Über solche und ähnliche Phänomene ließe sich noch lange diskutieren. Die Naturwissenschaft will aber nicht diskutieren, sondern rechnen. Zum Rechnen sind exakte Definitionen, Größen und Beziehungen notwendig. Wir müssen es als eine Pioniertat der Physiker des letzten Jahrhunderts ansehen, daß es gelungen ist, die allgemeinen Aussagen der Thermodynamik in Formeln zu verwandeln, mit denen sich exakte Berechnungen anstellen lassen. Doch bevor es zu den Formeln kommt, sind Parameter nötig, mit denen man rechnen und die man zuverlässig messen kann.

Das Problem beginnt mit der Energie! Was ist das? Welche Rechengröße können wir dafür einsetzen? Welches Phänomen unserer Alltagserfahrung verdient diesen Namen? Zur Beantwortung dieser Fragen müssen wir uns zunächst im klaren darüber sein, welche Eigenschaften wir diesen Größen zuschreiben müssen. Wir konstatierten, daß es verschiedene Formen von Energie geben soll, verlangten aber, daß diese Formen miteinander vergleichbar, verrechenbar, summierbar sein müssen. Unsere Rechengröße »Energie« muß ein Parameter sein, der unabhängig von dem Phänomen »Energie«, d. h. der Art ihres Erscheinungsbildes, ein System charakterisiert. Dieser Parameter muß den Systemzustand charakterisieren, ohne Rücksicht darauf, wie dieser Zustand erreicht wurde. Lediglich die Koordinaten desselben, also z. B. die Höhe eines Körpers über Normalnull, seine Temperatur, seine elektrische Ladung, sein innerer Druck usw., sollen den Energiegehalt bestimmen.

Wir wollen und müssen uns hier kurz fassen, um vom eigentlichen Anliegen nicht allzuweit wegzukommen.

Akzeptieren wir einfach, daß es die Physiker tatsächlich erreicht haben, energetische Zustandsgrößen zu definieren, die sich messen lassen und mit denen man rechnen kann.



Unser Haussperling hat eine Körpertemperatur von $T_K = 41^\circ\text{C}$. Sie liegt über der Außentemperatur $T_A = 10^\circ\text{C}$. Dieses Temperaturgefälle ruft einen ständigen Wärmeverlust, eine Energie-Dissipation, wie es in der Sprache der Thermodynamik heißt, hervor.

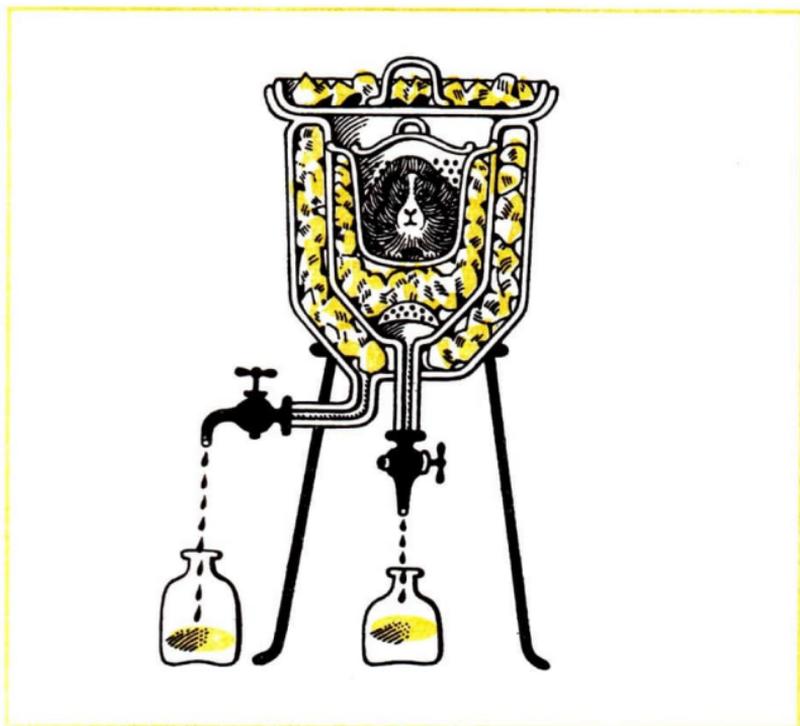
Leider sind wir mit der trockenen Theorie nicht ganz zu Ende! Neben diesen energetischen Zustandsgrößen braucht man noch einen weiteren wichtigen Parameter, um den 2. Hauptsatz quantitativ formulieren zu können. Vor etwa 100 Jahren formulierte der Physiker Clausius eine Größe, die als Qualitätsmaß der Wärme gelten kann. Er nannte diese Größe Entropie. Später brachte sie Ludwig Boltzmann mit dem Begriff der Wahrscheinlichkeit und damit der Ordnung in Zusammenhang. Die Definition der Entropie wird oftmals falsch verstanden und viel mißbraucht. Wir werden diesen Begriff deshalb so sparsam wie möglich verwenden und nur dort, wo seine Bedeutung sich anschaulich machen läßt. Merken wir uns einfach folgendes: Entropie ist eine Größe, die als Maßeinheit Kalorien pro Grad Kelvin hat und deren Veränderung in abgeschlossenen Systemen richtungweisend für jeden spontanen Vorgang ist. Laufen nämlich in einem solchen System Prozesse ab, so sind sie stets so orientiert, daß die Entropie des Systems zunimmt. Auch diese Aussage könnte als Definition des 2. Hauptsatzes aufgefaßt werden.

Die erwähnte Maßeinheit der Entropie macht uns deutlich, daß das Produkt Entropie \times Temperatur = Wärme ist. Diese

Wärme ist quasi der Tribut, der bei jeder Energieumsetzung an die Umgebung bezahlt werden muß. Jeder Elektromotor wird warm, Benzinmotoren verlangen eine Kühlung. Bremsen laufen heiß. Jeder energieumsetzende Prozeß »dissipiert«, d. h. verstreut Wärme in seine Umgebung, die sich nicht wieder einfangen läßt.

An dieser Stelle wollen wir nun endlich den Schritt zum biologischen Objekt tun. Es wird Zeit; mit Recht mag der Leser fragen: »Was solls?« Hier erleichtert uns eine Alltagserfahrung diesen Schritt. Wer hat nicht schon die Wärmedissipation am eigenen Leib verspürt, wenn er schwitzend einen Berg erklimm, Holz hackte oder Sand schaufelte? Diese Erfahrung war es auch, welche die Thermodynamiker bewog,

Mit diesem Eiskalorimeter bestimmten Lavoisier und Laplace im Jahre 1780 die Wärmeproduktion eines Meerschweinchens. Die von dem Tier abgegebene Wärme bringt das Eis des inneren Gefäßes zum Schmelzen. Der äußere Eismantel dient dazu, die von außen eindringende Wärme abzufangen.

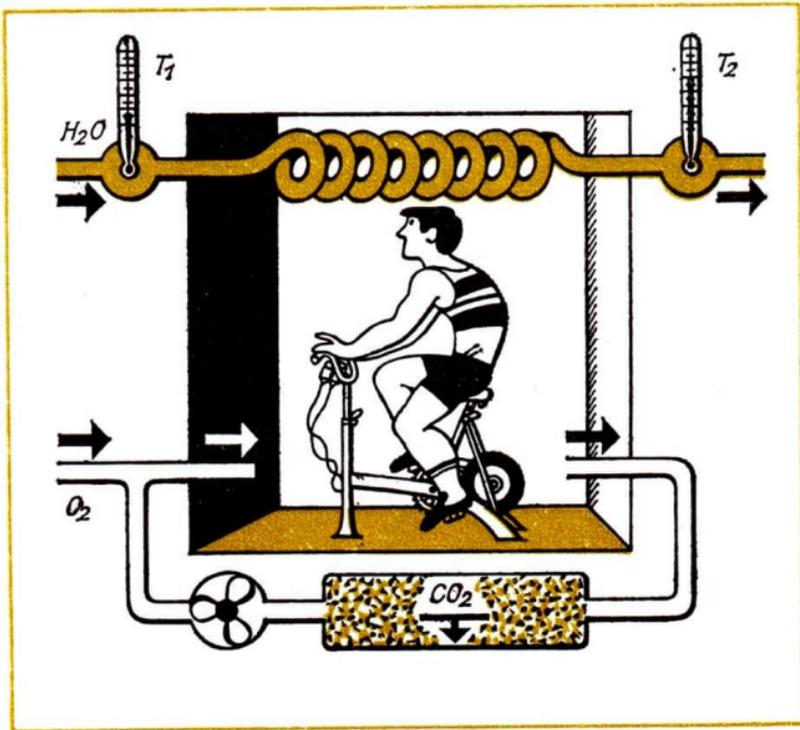


die Energiedissipation des lebenden Organismus einmal etwas genauer unter die Lupe zu nehmen.

Im Grunde genommen sind diese Untersuchungen schon älter als der 1. Hauptsatz der Thermodynamik selbst. Bereits im Jahre 1777 regte der französische Naturforscher Lavoisier an, den Zusammenhang zwischen der Wärmeproduktion eines Tieres und seiner Atmung zu untersuchen. Drei Jahre später führte er diese Versuche mit Unterstützung seines Kollegen Laplace durch. Die Forscher brachten ein Meerschweinchen in ein sogenanntes Eiskalorimeter und konnten feststellen, daß das Tier in 10 Stunden so viel Wärme erzeugte, daß 341 g Eis zum Schmelzen gebracht wurde. Unter der Voraussetzung, daß diese Wärme das Resultat von physikalischen Verbrennungsprozessen ist, bestimmte Lavoisier die von einem Meerschweinchen im gleichen Zeitraum erzeugte Menge an Kohlendioxid und errechnete eine Verbrennungswärme, die mit der gemessenen ziemlich gut übereinstimmte.

Diese erste Pionierleistung in der Anwendung der Gesetze der Thermodynamik auf biologische Systeme wurde bald darauf von anderen Wissenschaftlern nachvollzogen und präzisiert. Mit vollkommeneren Geräten untersuchte man den Wärmehaushalt verschiedener Tiere, selbst des Menschen, und ermittelte daraus äußerst wichtige Parameter des Energiestoffwechsels.

In den letzten Jahren haben solche Messungen wieder stark an Aktualität gewonnen. Es zeigte sich nämlich, daß die Wärmedissipation pro Gramm Körpergewicht im Verlaufe der Entwicklung eines Organismus nicht konstant ist. So kann man beispielsweise bei der Entwicklung von Kröteneiern zuerst einen starken Anstieg der Kurve, dann den Angleich an einen Minimalwert nachweisen. Diese Befunde bilden heute die vielumstrittenen Grundlagen der Thermodynamik von Entwicklungsprozessen. Es gibt eine theoretisch begründbare Theorie in der Thermodynamik, die besagt, daß sich ein offenes, d. h. Energie und Stoff austauschendes System, wie es der Organismus ist, immer so entwickelt, daß seine Energiedissipation, also die Geschwindigkeit »ausgeschwitzter« Wärme, einem Minimum zustrebt. Kann dieses Gesetz auf die Keimesentwicklung oder sogar die Stammesentwicklung der Organismen angewendet werden? Die zweite Hälfte der Kurve der Krötenentwicklung spricht dafür. Sie kann als repräsentativ angesehen werden für viele andere Messungen, die Gleichartiges zeigen. Leicht könnte es aber auch eine Erscheinung

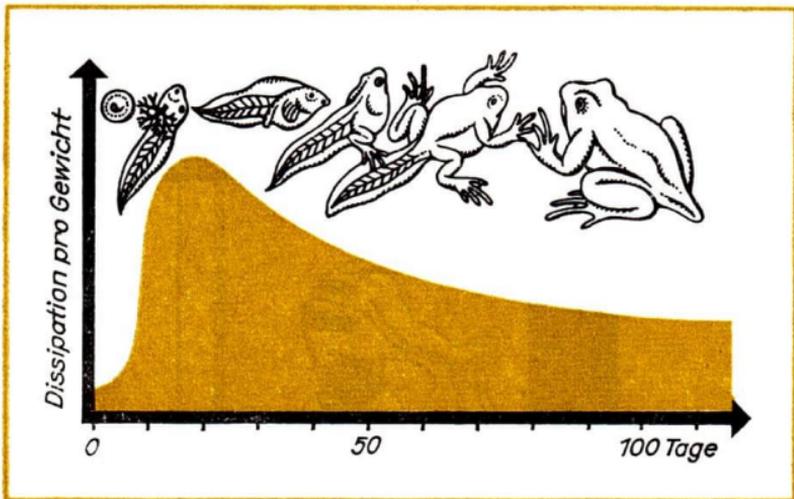


Moderne Kalorimeter gestatten eine präzise Bestimmung der Wärmeabgabe verschiedener Objekte, Versuchstiere und selbst des Menschen.

sein, die nur äußerlich Ähnlichkeit mit dem erwarteten Phänomen aufweist, in Wirklichkeit aber ganz andere Ursachen hat.

Dies ist hier tatsächlich die derzeitige Grenze thermodynamischer Betrachtungen in der Biologie. Wir wollen vorsichtig sein mit Urteilen und die weitere Entwicklung dieser Wissenschaft mit Spannung abwarten. Schon zeichnet sich ein völlig neuer Zweig der Thermodynamik ab, die sogenannte nicht-lineare Thermodynamik, die viel Interessantes verspricht. Die Jahre werden uns zeigen, ob sie es halten kann. Bis heute sind die kompliziertesten biologischen Vorgänge, d. h. die Vorgänge embryonaler und stammesgeschichtlicher Entwicklung, der Berechnung nur in einem sehr unbefriedigenden Grade zugänglich. Bleiben wir daher zunächst bei den elementaren Prozessen des Lebens.

Wir haben uns zunächst nur mit einem Teil der Energie-



Die Energie-Dissipation, oder analog die Entropieproduktion der Organismen, nimmt mit der Embryonalentwicklung zunächst zu und strebt dann einem Minimum entgegen. Das Gesetz der Entwicklung zu minimaler Entropieproduktion wird in seiner Gültigkeit und Anwendbarkeit auf biologische Objekte heute heiß umstritten.

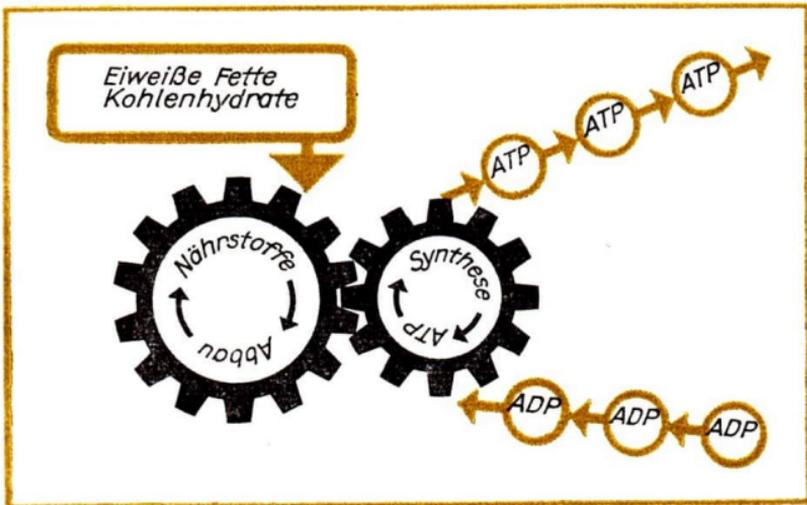
bilanz eines Körpers beschäftigt, mit seinem Wärmeausstoß, seiner Energiedissipation, wie wir es nannten. Diese Seite des Energiestoffwechsels beansprucht mit Recht besonderes Interesse, denn wenn bei jedem Vorgang der Energieumwandlung der Wärmetribut entrichtet wird, dann läßt die Wärme-Produktion oder entsprechend die Energiedissipation Rückschlüsse auf die energetischen Prozesse im Körper zu, ähnlich wie das Ticken die Funktion einer Uhr verrät. Wenn uns jedoch die ganze Energiebilanz interessiert, dann dürfen wir nicht nur den Energieausstoß eines Organismus betrachten, sondern sind gezwungen, uns auch mit der Herkunft der Energie im lebenden Organismus auseinanderzusetzen. Das Ticken allein belehrt uns zwar, daß die Uhr geht, sagt aber wenig über den Mechanismus der Uhr aus.

Bleiben wir zunächst bei der Energiebilanz die Tiere. Die Frage nach der Quelle der Energie ist hier leicht beantwortet. Der Organismus »verbrennt« organische Moleküle wie ein Benzin- oder Spirituskocher, wie ein Verbrennungsmotor im Auto und nutzt die freiwerdende Energie. Der Vergleich im vorausgegangenen Satz, das »wie ein«, bezieht sich allerdings

nur auf das Prinzip der Energienutzung, nicht auf den Mechanismus dieses Prozesses. Im biologischen Organismus erfolgt diese »Verbrennung« nicht auf heißem Wege wie in den genannten technischen Einrichtungen. Durch eine verwirrend komplizierte Anordnung von Enzymen, d. h. biologischen Katalysatoren, wird die Energie dieses Stoffes Schritt für Schritt entnommen und in eigens dafür vorhandene chemische »Akkumulatoren« geleitet. Es entstehen sogenannte körpereigene »energiereiche Verbindungen«. An verschiedenen Orten gibt es wieder spezifische Enzyme, die in der Lage sind, diese chemischen Akkumulatoren anzuzapfen, d. h. sie zu entladen und die freiwerdende Energie einem spezifischen Vorgang zuzuführen und nutzbar zu machen.

Es gibt viele solche Stoffe, die als interne Energiespeicher wirken. Der bekannteste unter ihnen ist das Adenosinphosphat. Am energiereichsten ist es als Adenosintriphosphat, abgekürzt ATP genannt, am energieärmsten als Adenosinmonophosphat (AMP), dazwischen gibt es noch die Abbaustufe des Adenosindiphosphates (ADP). Zumeist wird der ATP-Kondensator nur bis zur ADP-Stufe entladen. Der Energiereichtum dieser Ver-

So kann man sich in sehr groben Zügen den energieliefernden Prozeß im tierischen Körper vorstellen. Energiereiche Nahrungsmittel werden in einer Fermentkette abgebaut. Die freiwerdende chemische Energie dient der Aufladung des ADP-ATP-Akkumulators.



bindung drückt sich demnach in der Anzahl der gebundenen Phosphatreste aus. Ein (AMP), zwei (ADP) oder drei (ATP) gebundene Phosphate bestimmen die Höhe des Energiepegels dieser Verbindung.

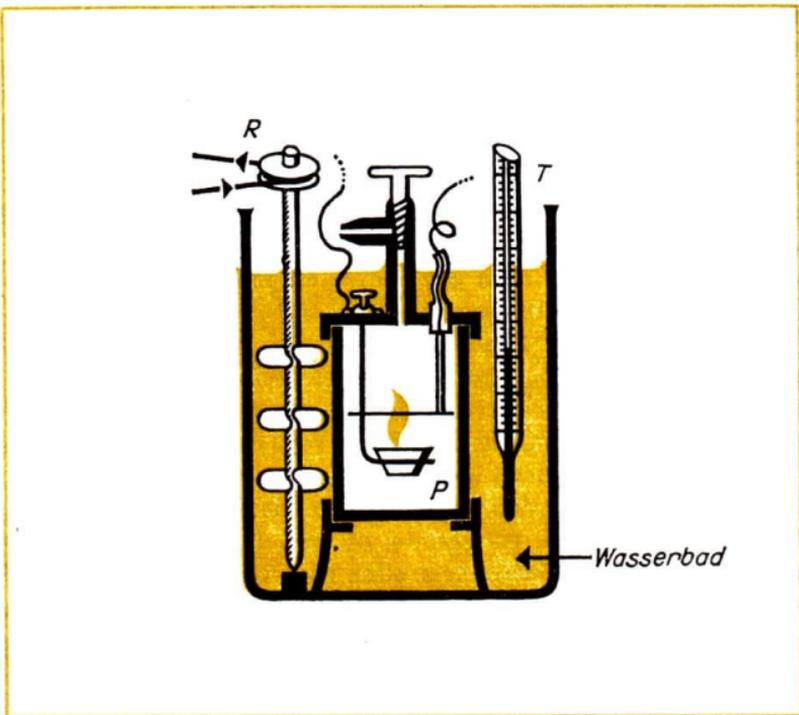
Hier wäre es natürlich an der Zeit, etwas über die Natur der chemischen Energie zu sagen. Dieses Problem gehört nicht in die Thematik dieses Buches, aber schließlich waren wir auch genötigt, über Wärmekraftwerke zu sprechen, die mit Biologie ebenfalls nichts zu tun haben. In möglichst kurzen Worten wollen wir also versuchen, uns das Wesen dieser Energieform klarzumachen. Einleuchtend ist die Feststellung, daß die chemische Energie an Atome, Moleküle, Ionen gebunden ist. Die Energiemenge, die wir berechnen wollen, müßte sich also ergeben aus der Energie eines einzelnen Moleküls, Atoms, Ions, multipliziert mit der Anzahl dieser Teilchen. Daraus folgt: die chemische Energie ist konzentrationsabhängig! Das ist eine wichtige Feststellung! Woraus ergibt sich aber die Energie des einzelnen Teilchens? Diese Frage ist exakt nur auf der Basis der Wellenmechanik zu beantworten. Der Versuch, wellenmechanische Gesichtspunkte hier zu erörtern, würde den Rahmen unseres Themas sprengen. Verzichten wir darauf, so bleibt uns nur die Möglichkeit, ein grobes Vorstellungsbild der Erscheinungen auf der Basis des Bohrschen Atommodelles zu entwerfen.

Ein Atom besteht demnach aus einem Kern und um diesen auf verschiedenen Bahnen kreisenden Elektronen. Die negativen Elektronen würden vom positiven Atomkern sofort eingefangen, wenn nicht ihre Zentrifugalkraft die Anziehung kompensierte. Bereits dieses System enthält also gespeicherte Energie, ähnlich einem Stein, den wir, an einen Faden gebunden, über unserem Kopf schwingen. Treten jetzt zwei Atome zu einem Molekülverband zusammen, reagieren also chemisch miteinander, so verformt sich dabei die Bahn der äußeren Elektronen, der Valenzelektronen, wie man sie auch nennt. Mitunter kreisen jetzt Elektronen um beide Kerne gemeinsam auf stark verzerrter Bahn. Es ist leicht verständlich, daß sich die Energie, die diesem Schleudersystem innewohnt, dadurch ändert. Nun bestehen die Moleküle biologischer Systeme aus vielen – sehr vielen – Atomen. Wir sind heute noch nicht in der Lage, quantenmechanisch den Energiegehalt dieser Moleküle zu berechnen. Wir können aber sehr wohl die Energiefreisetzung messen oder den Energiebedarf, der auftritt, wenn sich ein Stoff in einen anderen umwandelt. Wir haben uns ja schon

daran gewöhnt, daß Energien zumeist nicht in Absolutbeträgen, sondern in Relativwerten ausgedrückt sind, also Werten, die sich auf irgendeinen von uns willkürlich festgelegten Standardzustand beziehen.

Welchen Standardwert verwenden wir für unsere chemische Energie? Am einfachsten bestimmen wir den Energiegehalt einer chemischen Verbindung als derjenigen Energie, die notwendig ist, sie aus ihren Elementen aufzubauen. Die meisten Verbindungen kann man experimentell jedoch gar nicht aus ihren Elementen aufbauen, die Reaktionen würden nicht ablaufen. Das schadet nichts. Jetzt kommt uns die Forderung zugute, die wir anfangs bei der Energiedefinition in diesen Begriff steckten. Wir forderten, daß die Energie eine Zustandsgröße sei, die unabhängig von dem Weg, der zur Realisierung eines Zustandes führte, den Zustand selbst charakterisiert. Ganz gleich, wie wir den Weg von den Elementen bis zur Verbindung beschreiten, ob gerade, ob auf verschlungenen Umwegen, ja selbst ob vorwärts oder rückwärts, wenn wir nur immer gewissenhaft die Energiebilanz eines jeden Schrittes addieren bzw. subtrahieren, wenn die Richtung gewechselt ist: die Bilanz wird stimmen! Kann man eine Substanz aus ihren Elementen nicht synthetisieren, so läßt sie sich doch zerlegen. Es muß dabei genausoviel Energie frei werden, wie bei der Synthese hineinzustecken ist. Die beste Möglichkeit der Zerlegung ist das Verbrennen. Dabei erreichen wir zwar nicht ein Zerlegen in die Elemente, wohl aber in sehr einfache Verbindungen. Bei organischen Molekülen entstehen dabei zumeist Wasser, Kohlendioxid und Stickstoffoxid. Diese anorganischen Verbindungen wiederum lassen sich leicht aus den Elementen synthetisieren. So ist der Kreis vom Element zum Molekül geschlossen.

Zusammenfassend aus diesem Abschnitt können wir folgendes feststellen: Wenn zu den kalorimetrischen Messungen am ganzen Tier noch der Verbrauch an Nahrungsmitteln und Sauerstoff und die Produktion von Kohlendioxid registriert werden, wenn man gleichzeitig die Verbrennungsenthalpie, so heißt die entsprechende Meßgröße, der Nahrungsmittel kennt sowie die Bildungsenthalpie von molekularem Sauerstoff und CO_2 , dann ist die Energiebilanz des gesamten Körpers möglich, dann kann festgestellt werden, ob die Rechnung mit Soll und Haben aufgeht, ob der 1. Hauptsatz der Thermodynamik stimmt. Er stimmt! Das haben ohne Zweifel die Berechnungen im Rahmen der Meßgenauigkeit erwiesen.



Zur Bestimmung der Verbrennungswärme oder »Verbrennungsenthalpie« verwendet man Spezialkalorimeter. Die zu untersuchende Probe wird in einen Platintiegel (P) in einem abgeschlossenen Raum mit Sauerstoffatmosphäre elektrisch gezündet und verbrannt. Die Erhöhung der Temperatur des Wasserbades wird mit einem empfindlichen Thermometer (T) gemessen. Ein Rührwerk (R) sorgt für die Durchmischung.

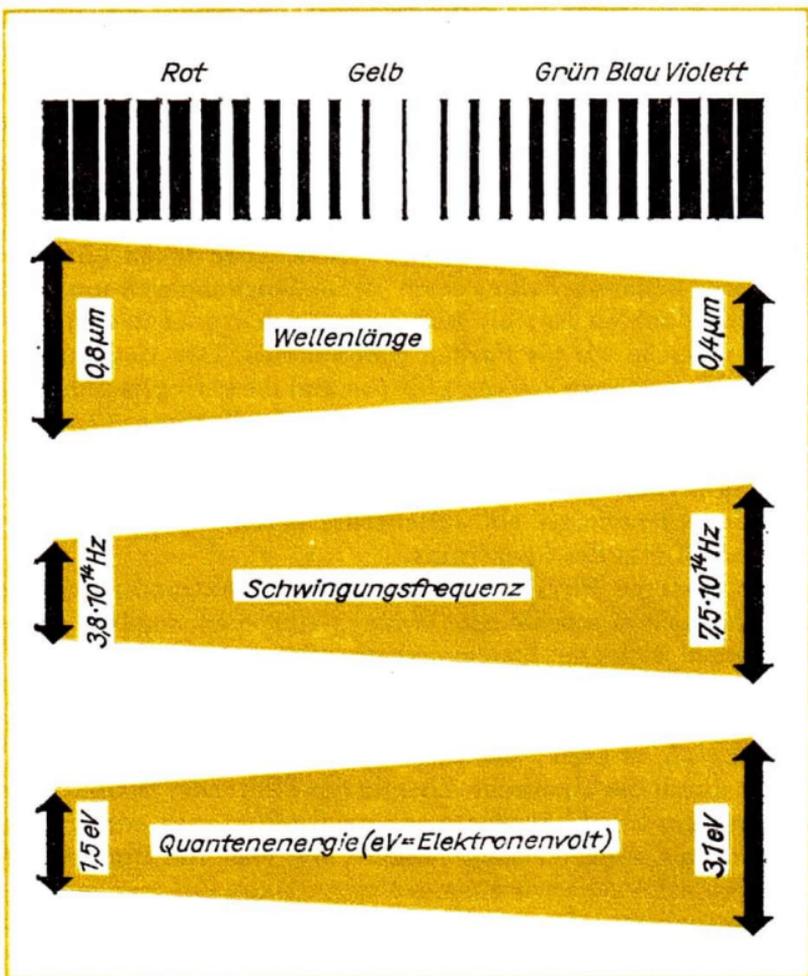
Wir haben bislang nur eine Antriebsfeder des biologischen Räderwerkes kennengelernt, den Abbau organischer Moleküle. Später wollen wir uns noch mit den Folgezahnradern etwas beschäftigen, mit dem Gang einzelner Energieumsetzungen. Zuvor jedoch die Frage: Wo kommen die organischen Moleküle überhaupt her? Nun, wir wissen, es gibt autotrophe und heterotrophe Organismen. Die ersten ernähren sich selbst, wie der Name autotroph sagt, die zweiten benötigen andere Organismen zu ihrer Ernährung. Kurz gesagt, die autotrophen Organismen sind die grünen Pflanzen, die, wie uns unsere Hydrokulturen am Fenster lehren, in der Regel keine orga-

nischen Substanzen zum Wachstum benötigen, sondern mit anorganischen Salzen, sogenannten Mineralien, auskommen. Wo kommt in diesem Falle die zum Stoffwechsel notwendige Energie her? Nun, wir wissen, daß Pflanzen nur bei Licht gedeihen. Unser Tageslicht stellt eine elektromagnetische Schwingung mit einem breiten Spektrum an Wellenlängen bzw. Frequenzen dar. Bezeichnen wir als »Licht« das Spektrum, welches wir mit unserem menschlichen Auge sehen können, so ist uns bekannt, daß es einen Wellenlängenbereich umfaßt, der vom dunklen Rot bis zum Violett reicht und dessen einzelne Bereiche wir als Farben wahrnehmen. Das Rot hat die größte Wellenlänge von etwa $0,8 \mu\text{m}$ und die geringste Schwingungsfrequenz; das Violett die kürzeste Wellenlänge ($0,4 \mu\text{m}$) und die höchste Frequenz. Wir kennen auch das Infrarot als jenseits des sichtbaren roten Lichtes liegende Wärmestrahlung und das Ultraviolett als unsichtbare Strahlung jenseits des violetten Teiles des Spektrums.

Die moderne Physik erlaubt uns nun, elektromagnetische Strahlung nicht nur als eine Welle darzustellen, sondern auch als Strom kleinster Energiepakete, die man hier Photonen nennt. Wenn wir eben feststellten, daß Farben des Lichtes durch Schwingungsfrequenzen oder Wellenlängen charakterisierbar sind, so ergibt sich in der Quantentheorie diese Eigenschaft durch die kinetische Energie der Photonen. Blaues, also kurzwelliges Licht hat sehr energiereiche Photonen, rotes, d. h. langwelliges, dagegen energieärmere. Das Hell und Dunkel, die Lichtintensität, die wir etwa mit einem photoelektrischen Belichtungsmesser erfassen, drückt den Gesamtenergiestrom aus, also das Produkt von Quantenenergie und Quantenstrom.

Was haben nun diese Überlegungen mit der Photosynthese zu tun? Sie schaffen die Verbindungen zu den thermodynamischen Erörterungen dieses Abschnittes. Wir lernten, daß Wärme nur dort genutzt werden kann, wo eine Temperaturdifferenz besteht. Unsere technischen Sonnenbatterien nutzen zumeist die Wärmekomponente des Lichtes, d. h. den energiearmen Teil. Die Sonnenstrahlung wird fokussiert und die Erwärmung im Brennpunkt genutzt. Denken wir jedoch an unseren photoelektrischen Belichtungsmesser, so sehen wir, daß es auch in der Technik Energiewandler gibt, die Licht ohne den Umweg über die Wärme in elektrischen Strom verwandeln.

Auch die Pflanze nutzt nicht die Wärmekomponente des Sonnenlichtes. Dieses Prinzip ist nicht nur unrationell, es verbietet sich auch deshalb, weil eine Erwärmung des biologischen



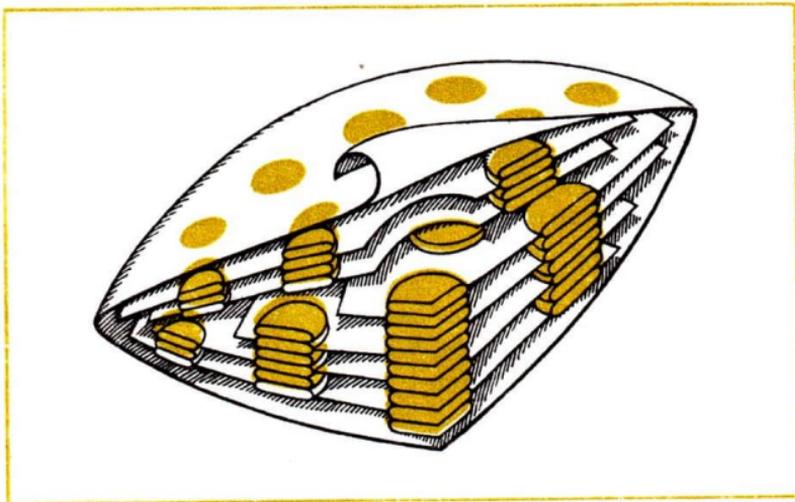
Das Spektrum des sichtbaren Lichtes setzt sich, entsprechend seinen Spektralfarben, aus Komponenten unterschiedlicher Qualität zusammen. Das kann durch Wellenlänge, Frequenz oder Quantenenergie ausgedrückt werden.

Objektes über die Umgebungstemperatur hinaus nur in einem sehr begrenzten Rahmen möglich ist. Rationelle Wärmenutzung setzt jedoch große Temperaturgradienten voraus, und diese würden die biologische Zelle zerstören. Viel besser läßt sich das Licht kürzerer Wellenlängen und demnach höherer Quantenenergie verwenden. Diese Energie wirkt nicht mehr als Wärme, einfach deshalb nicht, weil die Temperatur eines

Stoffes Ausdruck ist für die kinetische Wärmebewegung seiner Moleküle und Atome. Bedingt durch die Masse dieser Teilchen können sie nicht beliebig schnell schwingen. Die hochfrequente Strahlung des sichtbaren Lichtes kann höchstens noch Teile der Moleküle zu Schwingungen anregen, etwa Elektronen der äußeren Hülle, nicht jedoch das ganze Molekül. Trotzdem bedeutet Strahlung höherer Energie, formal gesehen, eine höhere Temperatur. Man spricht sogar teilweise von Strahlungstemperatur und meint damit das spezifische Strahlungsspektrum heißer Körper. Sie reicht von der Rotglut bis zur Weißglut des Metallfadens in unseren Glühbirnen.

Die belebte Natur hat eine wichtige Erfindung gemacht. Es ist das Chlorophyll, jenes magnesiumhaltige Chromoprotein oder Farbeiweiß, wie es übersetzt heißen würde, das als Blattgrün in unseren Pflanzen weit verbreitet ist. Es absorbiert das Licht in zwei Wellenlängenbereichen. Am stärksten im Bereich des roten Lichtes bei $0,68 \mu\text{m}$ und etwas weniger im violetten Bereich einer Wellenlänge von $0,44 \mu\text{m}$. Dieses zweite Absorptionsmaximum ist für die Photosynthese von entscheidender Bedeutung. Hier wird Energie einer hohen »Qualität« geschluckt, hier filtert die Pflanze aus dem Sonnenspektrum die Energiequanten heraus, die am effektivsten umsetzbar sind.

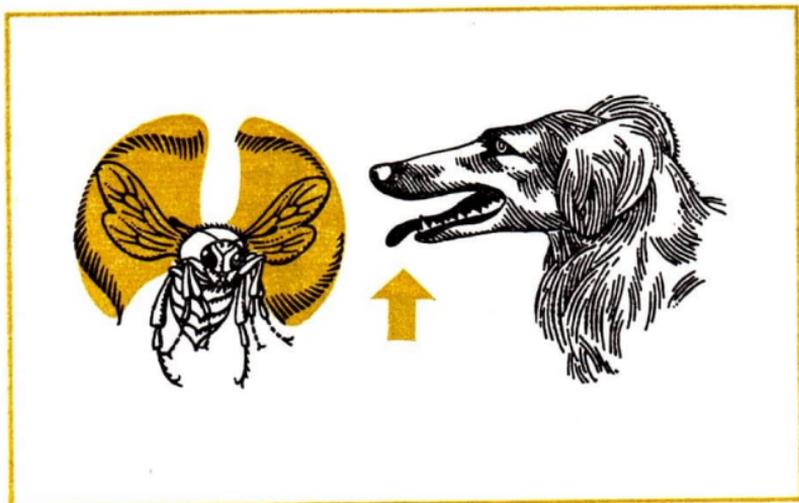
Das Chlorophyll ist nicht im Plasma der Pflanzenzelle gelöst, sondern liegt wohlgeordnet in submikroskopischer Struktur der Chloroplasten vor.



Wie haben wir uns diese Energieumsetzung vorzustellen? Wir sagten oben, daß bei der Absorption von Licht höherer Energie nicht mehr die Molekülbewegung, die Molekülschwingung insgesamt angeregt wird, sondern nur noch Teile eines Moleküls schwingen. Bei hohen Energien sind es sogar nur Elektronen, die energetisch beeinflußt werden. Erinnern wir uns an die Erörterung des Wesens der chemischen Energie und die vereinfachte Darstellung des Bohrschen Atommodelles mit seinen Elektronenbahnen: Jeder Elektronenbahn ist ein Energieniveau zuzuschreiben. Die Energieaufnahme, bedingt durch die Absorption eines Photons, drückt sich nun in der Veränderung der Bahn der Elektronen in der äußersten Hülle aus. Ein Elektron wird auf eine höhere Bahn gehoben. Normalerweise fällt es dabei sehr schnell auf sein ursprüngliches Niveau zurück und gibt dabei Energie als Fluoreszenzlicht ab. Die Besonderheit des Chlorophyllmoleküls und seiner enzymatischen Umgebung im Chloroplasten der Pflanzenzelle besteht nun darin, daß dieser Rückfall des Elektrons über eine Art Stoffwechselfmühle geht. Die freiwerdende Energie des zurückschwingenden Elektrons wird kanalisiert, genutzt. Unter anderem entsteht dabei das ATP, das Adenosintriphosphat, das wir als chemischen Akkumulator bereits kennenlernten. Die eigentlich als Photosynthese bekannte Traubenzuckersynthese aus dem Kohlendioxid der Luft und Wasser ist ein sekundärer Prozeß, der die chemische Energie der entstandenen ATP-Moleküle nutzt.

Dieser Mechanismus, wie er hier geschildert wurde, erscheint sehr einfach und übersichtlich. Von diesem Bild aus der Vogelschau dürfen wir uns jedoch nicht täuschen lassen. Die exakte Berechnung der Energieniveaus der unterschiedlichen Anregungszustände ist eine außerordentlich schwierige Frage der Quantenbiophysik und Wellenmechanik. Sicher wird es notwendig sein, die Quantenphysik wesentlich weiter zu entwickeln, um derartig komplizierte Moleküle in ihren Zuständen und Veränderungen exakt zu berechnen. Überlassen wir jedoch diese Frage der Zukunft, und fahren wir fort, das Uhrwerk des Lebens zu durchforschen.

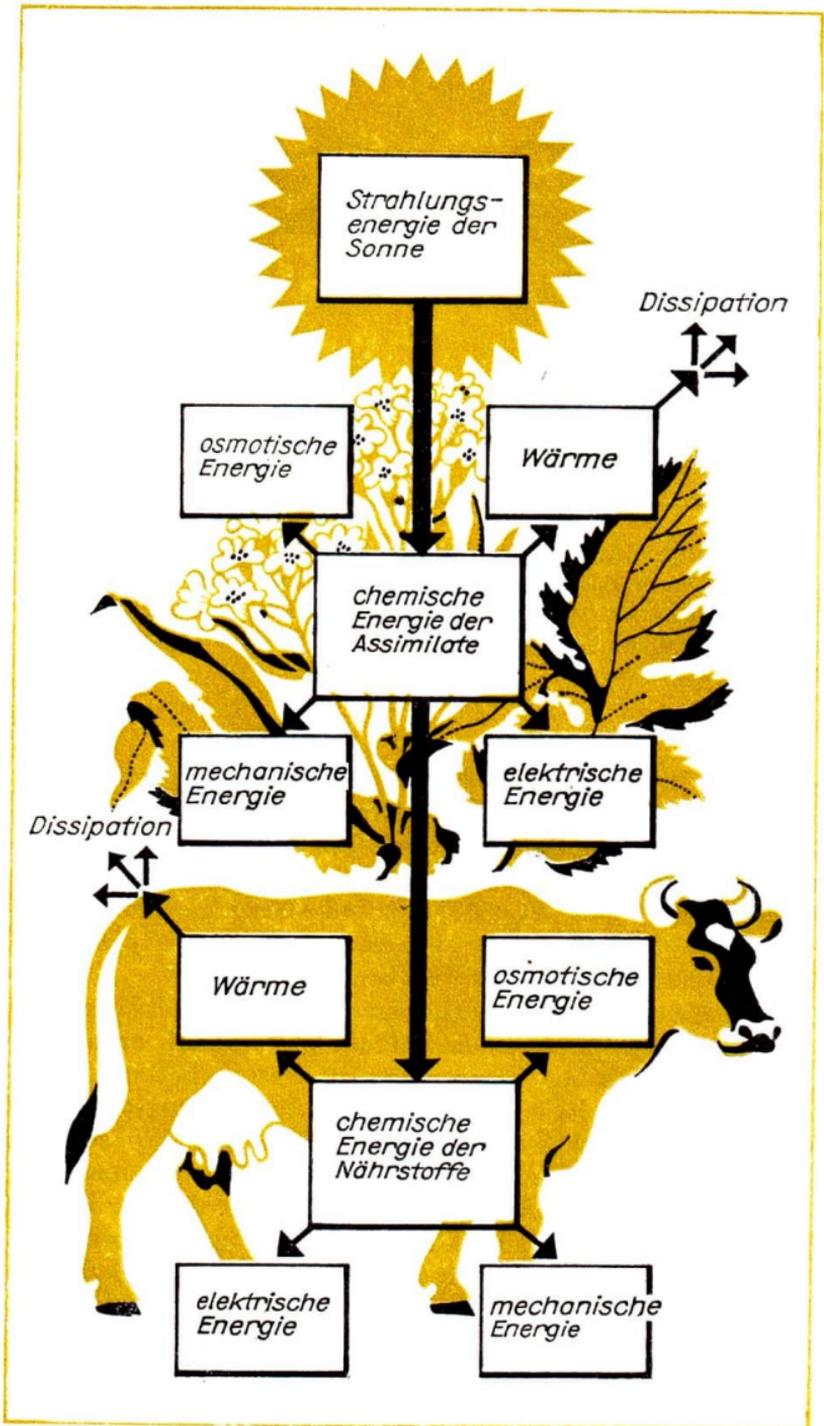
Bisher konzentrierten wir uns bei unseren Betrachtungen auf zwei Energieformen: die Wärmeenergie und die chemische Energie. Beide Energieformen haben wir recht einseitig beleuchtet. Die Wärmeenergie sehen wir nur als notwendiges Übel an, als eine Art der Energiedissipation. Es braucht wohl nicht unterstrichen zu werden, daß die Wärme selbstverständ-



Mannigfaltige Mechanismen in der Natur regeln die Wärmedissipation. Schwirrbewegungen fliegender Insekten heizen den Körper bis zur nötigen Betriebstemperatur auf. Das Hecheln des Hundes fördert die Dissipation überflüssiger Wärme, um die Körpertemperatur konstant zu halten.

lich kein notwendiges Übel, sondern lebenserhaltende Notwendigkeit ist. Das lebende System benötigt eine optimale Körpertemperatur, die bei Warmblütlern in strenger Konstanz über der durchschnittlichen Umgebungstemperatur gehalten wird. So wird die Wärmedissipation streng geregelt, damit weder zuviel noch zuwenig abgegeben wird. An verschiedenen Stellen sprachen wir schon darüber.

Auch die chemische Energie kam etwas zu kurz! Bisher taten wir so, als synthetisiere die Pflanze nur deshalb organische Moleküle, damit die Tiere etwas zu fressen hätten. Dieses »damit . . . daß« ist eine teleologische Betrachtungsweise, die naturwissenschaftlich natürlich unhaltbar ist. Wo sie auftaucht in diesem Buch, sind es nur Gründe bequemerer und leichterer Ausdrucksweise. Unabhängig von diesem Lapsus wäre jedoch die oben aufgestellte Behauptung aus einem ganz anderen Grunde falsch. Komplizierte organische Moleküle sind nicht nur Metaboliten, sondern vor allem und z. T. auch gleichzeitig Baustoffe des lebenden Organismus. Wir müssen also ergänzen: Chemische Energie muß der Organismus vorwiegend aufwenden, um das Räderwerk des Lebens selbst zu schaffen.

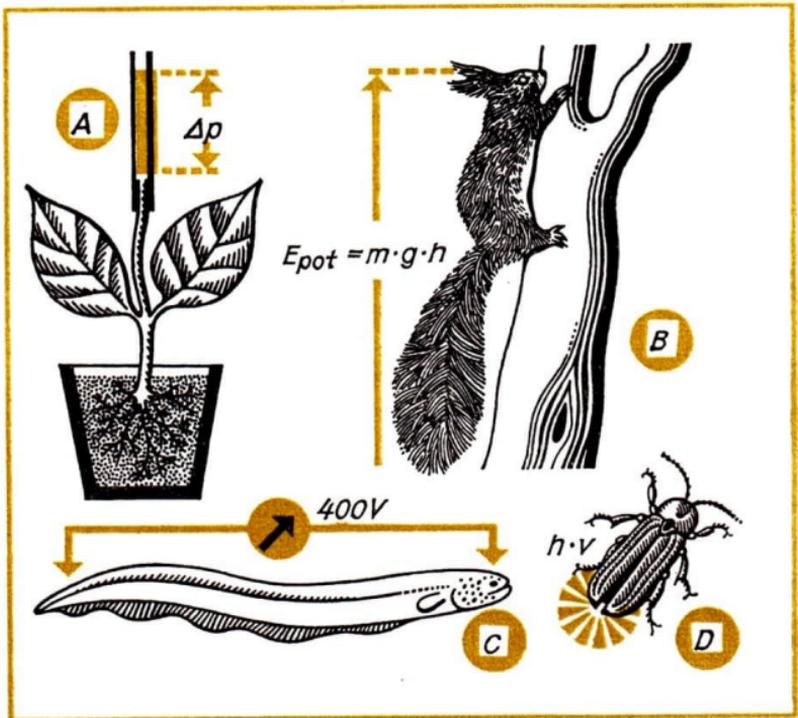


Die Zahnräder der Uhr, ja diese selbst, müssen synthetisiert werden und als dynamische Struktur erhalten bleiben. Daß auch dieser Erhaltungsprozeß energieaufwendig ist, stellten wir bereits unter dem Stichwort »panta rhei« im vorausgegangenen Abschnitt fest.

Doch nach dieser notwendigen Korrektur zur chemischen und Wärmeenergie wollen wir uns die Frage stellen, welche anderen Energieformen im lebenden Organismus von Bedeutung sind. Am leichtesten verständlich ist die mechanische Arbeitsleistung des lebenden Organismus. Energieaufwendige Bewegungen mechanischer Art sind bei Pflanzen und Tieren bekannt. Die Mechanismen dieser Bewegungen sind nicht einheitlich. Auf die spezielle Art vieler pflanzlicher Bewegungsformen kommen wir gleich noch zu sprechen. Am meisten ist natürlich die Erzeugung mechanischer Energie durch den Skelettmuskel untersucht worden. Wir wollen auf dieses Problem hier nicht näher eingehen. Trotzdem sei der Stand unserer heutigen Kenntnisse dazu kurz erläutert.

Bereits eine anatomische Untersuchung des Skelettmuskels zeigt, daß er aus vielen länglichen Muskelfasern, sogenannten Myofibrillen, besteht. Unter dem Mikroskop, besonders mit Hilfe polarisierten Lichtes, sieht man, daß diese Struktur eine Querstreifung aufweist. Elektronenmikroskopische Untersuchungen führten zu folgendem Modell des molekularen Aufbaues: An stabilen Querwänden, den sogenannten Z-Membranen, sind lange, fädige Eiweißmoleküle in strenger Ordnung fixiert. Man stelle sich eine Bürste vor mit regelmäßig hexagonaler Anordnung der Einzelborsten. Die Abstände der Borsten untereinander seien viel größer als ihre Durchmesser. Jetzt denken wir uns zwei Bürsten, die so angebracht sind, daß ihre Borsten gegeneinander zeigen. Sie sollen sich nicht berühren, aber der Abstand zwischen den Borstenspitzen sei kleiner als die Borstenlänge. Nun stecken wir Streichhölzer regelmäßig zwischen die Borsten, parallel zu ihnen, so daß sie mit dem einen Ende in die eine Bürste, mit dem anderen in die andere ragen. Das Modell wäre fertig! Die Borsten repräsentieren die dünnen Aktinfäden, die Streichhölzer die dazwischenliegenden

So etwa hat man sich stark vereinfacht den Energiehaushalt von Pflanze und Tier vorzustellen. Die angeführten Energieformen sind Beispiele, jeder Pfeil beinhaltet eine Kette der kompliziertesten Reaktionen.



Wir können sehr verschiedene Energieformen bei Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen physikalisch messen.

Hierfür einige Beispiele:

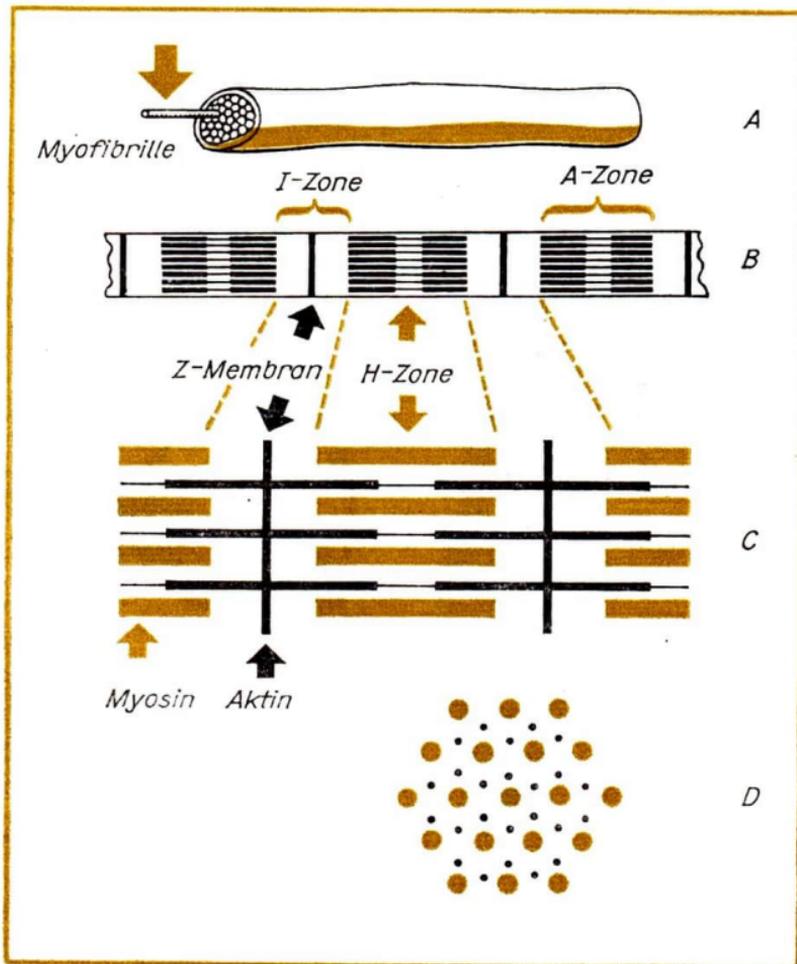
A: Durch osmotische Arbeit erzeugt die Pflanze einen hydrostatischen Überdruck Δp , der das Wasser im Stamm aufwärts treibt; B: Überall leisten Organismen mechanische Arbeit. Hier ein Eichhörnchen, das seine potentielle Energie (E_{pot}) erhöht, indem es seine Körpermasse (m) gegen die Erdbeschleunigung (g) um die Höhe (h) am Baumstamm hebt. C: Elektrische Fische (hier: Zitteraal) erzeugen Spannungen von mehreren 100 Volt. D: Leuchtkäfer beherbergen Mikroorganismen, die Licht aussenden, dessen Quantenenergie sich durch die Frequenz (ν) und die Plancksche Konstante (h) ergibt.

dickeren Myosinmoleküle. Unsere Bürsten sind jetzt senkrecht gegeneinander verschiebbar; dabei dringen die Streichhölzer mehr oder weniger tief in die Bürstenregion ein.

Im Muskel gibt es nun intensive, stoffwechselgesteuerte Wechselwirkungen zwischen den Aktin- und Myosinmolekülen. Diese parallel zueinander gelagerten Moleküle knüpfen Querverbindungen untereinander. Das sind chemische Bindungen,

die selbstverständlich nur an ganz bestimmten sogenannten aktiven Bezirken der Moleküle angreifen können. Unter dem Einfluß von Stoffwechselenergie, z. B. des bereits mehrfach genannten Akkumulators chemischer Energie, des Adenosin-

Aufbau und Modell des Muskels. Der Muskel besteht aus Myofibrillen (A), die unter dem Mikroskop eine Querstreifung (B) zeigen. Man kann sich modellmäßig (C) eine regelmäßige Anordnung von dünnen Aktin-Molekülen mit dazwischenliegenden Myosin-Molekülen vorstellen. Im Querschnitt (D) sieht man die geometrische Anordnung derselben. Durch ein Gleiten dieser Moleküle aufeinander läßt sich ein Annähern der Z-Membranen und damit eine Muskelverkürzung erklären.

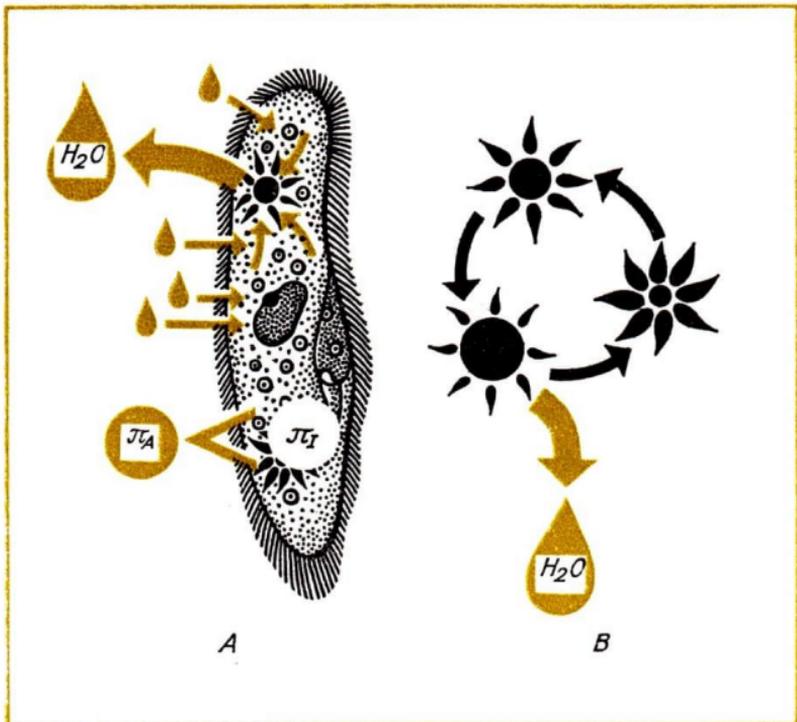


triphosphats (ATP), wechseln die Bindungsorte dieser Brücken; das Myosinmolekül holt das Aktinmolekül ein wie eine Kette von Seeleuten ein langes Tau. Die Aktinfäden gleiten, getrieben von den wechselnd angreifenden Bindungen, zwischen den Myosinfäden hindurch; der Muskel kontrahiert sich. Diese Gleittheorie der Muskelbewegung ist heute die wahrscheinlichste Erklärung des Mechanismus der Muskelkontraktion.

Doch verweilen wir nicht zu lange bei dieser speziellen Art der Arbeitsleistung des biologischen Systems. Sehen wir uns weiter um! Etwas weniger bekannt als die mechanische Energiefreisetzung ist die osmotische Leistung lebender Organismen.

Osmotische Arbeit im Einzeller.

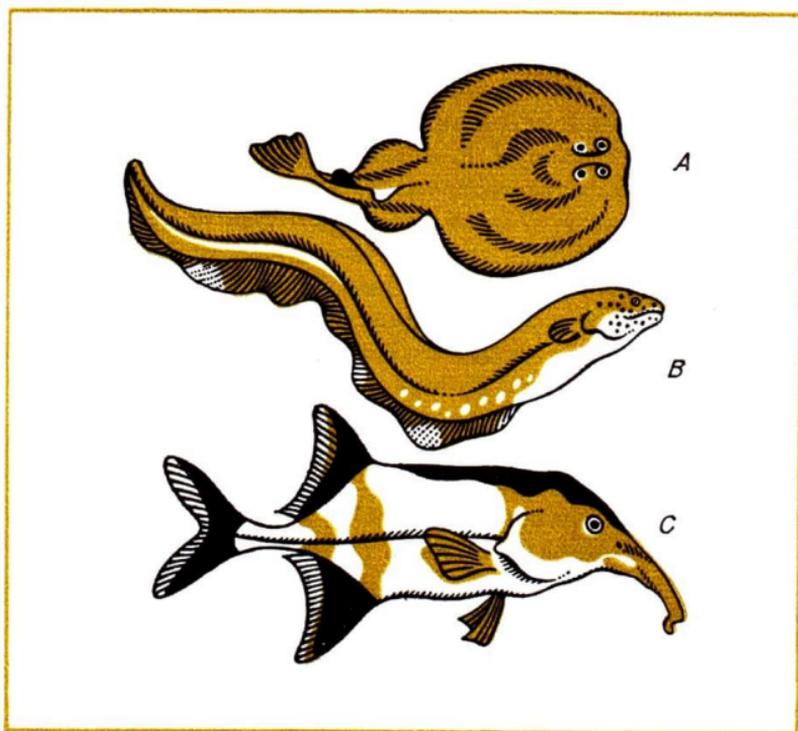
Bedingt durch den osmotischen Gradienten zwischen Außenmedium (π_A) und Innenmedium (π_I) strömt laufend Wasser durch die Plasmamembran des Pantoffeltierchens. Es wird durch die kontraktile Vakuole gesammelt und ausgepumpt. A – schematische Darstellung des Fließgleichgewichtes, B – Funktionszyklus der kontraktilen Vakuole.



men. Bei Pflanzen hängen beide Phänomene mitunter zusammen. Die Blattbewegung einer Mimose, das Drehen der Sonnenblume nach dem Licht, der Schließvorgang einer Blüte am Abend – das alles sind mechanische Bewegungen, die hydraulisch gesteuert werden, d. h. durch Veränderung des Wassergehaltes bestimmter Gewebspartien. Grundlage dieser Hydraulik sind osmotische Wasserbewegungen. Das klassische Beispiel osmotischer Arbeit ist der Wasseranstieg von der Wurzel zur Spitze einer Pflanze. Besonders eindrucksvoll kann man die osmotische Arbeitsleistung einer Zelle unter dem Mikroskop verfolgen. Pantoffeltierchen und andere einzellige Tiere des Süßwassers besitzen eine Pumpe, die sie, ähnlich wie die Harvariepumpe eines Schiffes, vor dem Vollaufen – Schwellen – Platzen schützt. Im Gegensatz allerdings zu einem Schiff, das normalerweise dicht ist, strömt in den Einzeller, durch den osmotischen Gradienten zwischen Umgebung und Zellinnerem bedingt, unaufhörlich Wasser ein. Dieses wird durch die sternförmige kontraktile Vakuole kontinuierlich ausgepumpt. Übrigens ist das wieder ein schönes Beispiel für ein biologisches Fließgleichgewicht auf zellulärer Ebene.

Wir können und wollen uns nicht an einer Aufzählung verschiedener Erscheinungsformen energiewandelnder Prozesse aufhalten. Es sind viele und die ihnen zugrunde liegenden Mechanismen größtenteils unbekannt. Es geht uns um prinzipielle Gesichtspunkte der Energietransformation. Unter diesem Gesichtspunkt dürfen wir die Elektroenergie nicht vergessen, die ähnlich der chemischen Energie eine ganz zentrale und spezifische Rolle im biologischen Geschehen spielt. Sicherlich denkt jeder in diesem Zusammenhang zuerst an die elektrischen Fische, den Zitteraal, Zitterwels, Zitterrochen usw., die empfindliche elektrische Schläge aussenden können und sich auf diese Weise vor Feinden schützen. Hat sich aber nicht jeder von uns schon einmal von den elektrischen Feldern seines eigenen Körpers überzeugen können? Man denke nur an das EKG, das Elektrokardiogramm, die Kurve der elektrischen Potentialunterschiede zwischen verschiedenen Teilen unseres Körpers, bedingt durch die Tätigkeit des Herzens. Ähnliche elektrische Felder erzeugen alle tätigen Muskeln sowie unser Gehirn und die Sinnesorgane!

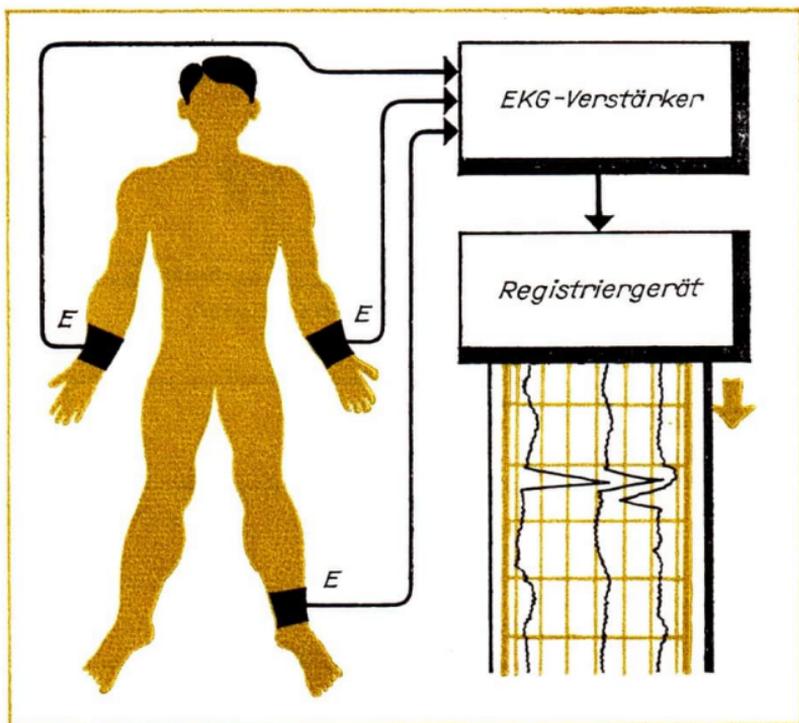
Mit verfeinerter Meßtechnik, mit Elektroden, deren empfindliche Spitze kleiner ist als ein Mikrometer (μm), d. h. ein tausendstel Millimeter, kann man feststellen, daß eine jede lebende Zelle ein elektrisches Potential gegen ihre Umgebung



Elektrische Fische sind in der Lage, mit Hilfe elektrischer Organe Spannungsimpulse bis zu mehreren 100 V zu erzeugen. Diese Stromschläge dienen in erster Linie der Abschreckung von Feinden. Neuerdings ist bekannt, daß kurze Stromimpulse auch zur Elektroortung von Gegenständen in trübem Wasser dienen.

A – Zitterrochen, B – Zitteraal, C – Nilhecht

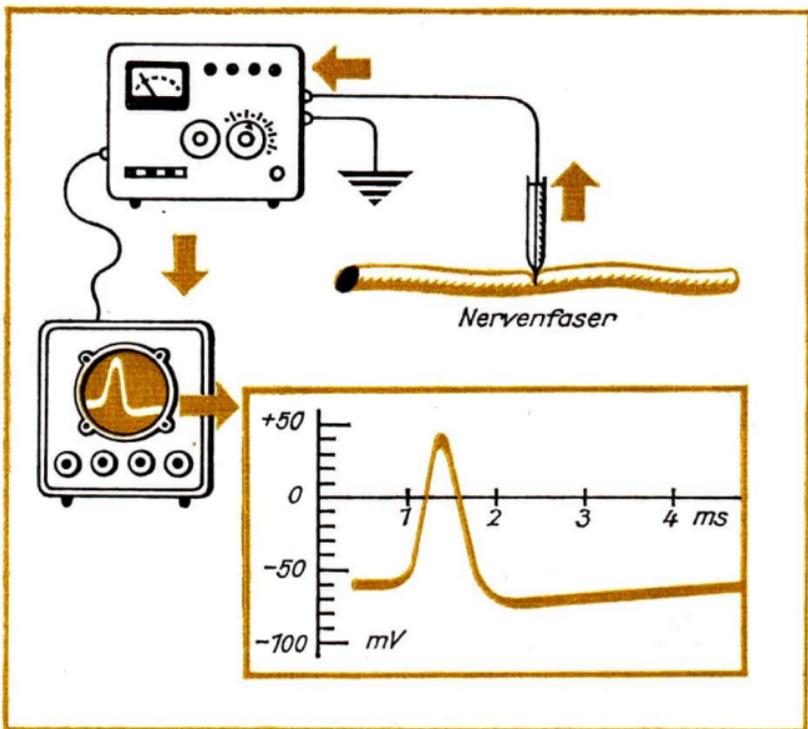
aufweist. Es sind zwischen 0,01 und 0,08 V, die das Zellinnere als negatives Potential gegen seine Umgebung erzeugt. Der Isolator zwischen diesen beiden Polen ist die Zellmembran, jene seifenblasenähnliche Struktur, etwa 100 Å (0,00001 mm) dick, die jede Zelle umschließt. Nervenzellen können durch kurzfristige Membranveränderungen während der Erregung dieses elektrische Membranpotential sprunghaft verändern, ja sogar umpolen. Dies ist die elektrische Grundlage des Nervenimpulses, dieses Morsezeichens biologischer Kommunikation der Organe, des geheimnisvollen Rechenimpulses in der Datenverarbeitung unseres Gehirnes. Damit ist jedoch die Bedeutung des elektrischen Zellpotentials noch längst nicht



Der arbeitende Herzmuskel erzeugt ein elektrisches Feld, das an der Körperoberfläche abgeleitet werden kann. Mit registrierenden Meßverstärkern, die eine Empfindlichkeit bis zu 0,00001 V haben, kann dieses Elektrokardiogramm registriert werden. Es gibt dem Arzt Auskunft über die Funktion unseres Herzens.

erschöpft. Diese elektrische Potentialdifferenz erzeugt in der extrem dünnen Zellmembran ein starkes elektrisches Feld wie im Inneren eines dünnen Plattenkondensators. Dieses Feld bestimmt die Eigenschaften der Membran, ihre Permeabilität, d. h. Durchlässigkeit für verschiedene Stoffe, die Tätigkeit der Enzyme in ihr und in ihrer Nähe und vieles andere mehr.

Wir können mithin feststellen, daß die elektrische Energie im biologischen Organismus von großer Bedeutung als Informationsträger bei allen möglichen Regel- und Steuermechanismen ist. Nur selten, wie im Falle der elektrischen Fische, hat sich im Resultat der phylogenetischen Selektion ein Mechanismus herausgebildet, der den energetischen Aspekt elek-



Eine Mikroelektrode, in einer Nervenfaser eingeführt, erlaubt es, das elektrische Potential dieser Zelle zu messen.

Dieses »Ruhepotential« beträgt gegen außen etwa -50 mV ($1\text{ mV} = 0,001\text{ V}$). Wird der Nerv erregt, so entsteht kurzzeitig ein »Aktionspotential«, das Zellinnere ist positiv gegen außen.

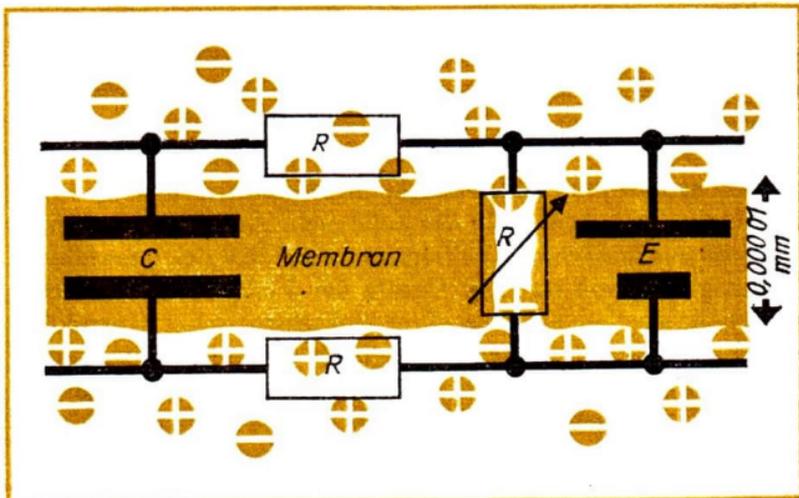
trischen Impulses nutzt. Hier handelt es sich um eine Parallel- und Serienschaltung vieler erregbarer Elementarzellen.

Natürlich reizt es, über die Natur dieser elektrischen Vorgänge Näheres zu erfahren. Welcher Art sind sie? Wie entstehen sie? Wie sind sie steuerbar? Wir wollen uns an das Grundsätzliche halten und nur einige Aspekte dieses außerordentlich großen Fragenkomplexes hier betrachten.

Wieder liegt die Parallele zur Technik nahe. Unwillkürlich verglichen wir schon. Es war die Rede von »Morsezeichen biologischer Kommunikation«, vom »Plattenkondensator«, von »elektronischer Datenverarbeitung«. Tatsächlich interessieren sich die Techniker heute sehr für diesen Vergleich und erhoffen daraus Anregungen zur Vervollständigung elektronischer Ge-

räte. Hier muß jedoch gleich auf einen sehr wichtigen Unterschied zwischen den elektrophysiologischen und elektronischen Phänomenen hingewiesen werden. Wenn auch heute der Draht in der Elektronik nicht mehr die alte Monopolstellung besitzt, so sind es doch nach wie vor metallische Leiter oder zumindestens kristalline Halbleiter, in denen der Strom fließt. Demzufolge ist dieser Strom ein Elektronenstrom, d. h. ein Strom kleinster, nahezu masseloser Einheiten. Das biologische System hat keine Metallbereiche, lediglich kleine Bezirke, in denen organische Halbleitereffekte auftreten können, sind bekannt. Der elektrische Strom in der Zelle kann folglich kein Elektronenstrom sein, es muß ein Strom sein, wie er durch eine Ionenlösung fließt. Ionen, d. h. positiv und negativ geladene Atome und Moleküle, transportieren die Ladungen, erzeugen den Strom und die elektrischen Potentiale. Natürlich spielen die kleinsten und damit schnellsten Ionen die Hauptrolle in diesem Prozeß. Es sind vor allem die Ionen des Natriums, Kaliums und Chlors. Hier muß gesagt werden, daß sich hin und wieder auch die Elektroniker der Ionenleitfähigkeit bedienen. Das ist ein Spezialzweig der Elektronik, der sich »Soliontechnik« oder

Die Zelle ist von einer außerordentlich dünnen Membran, bestehend aus gut isolierenden fettähnlichen Lipiden und Eiweißen, umgeben, die wenige Poren besitzt. Sie wirkt als Isolator, Widerstand, Batterie. Auf beiden Seiten befinden sich Ionenlösungen unterschiedlicher Zusammensetzung.



»Chemotronik« nennt. Unser Elektrolytkondensator ist ein Beispiel dafür.

Ist die Soliontechnik der lebenden Zelle nun unbedingt nachahmenswert? Sind die Techniker einen Holzweg gegangen mit der Entwicklung der Elektronik auf der Basis der Elektronenleitfähigkeit? Wenn in jüngster Zeit die Soliontechnik an Bedeutung gewonnen hat, so wird sie doch ganz bestimmt nicht die herkömmliche Elektronik verdrängen. Nur in wenigen speziellen Bereichen kann man hoffen, mit ihrer Hilfe bessere und billigere Bauelemente der Elektronik herstellen zu können. Daß sich das Leben auf der Basis wäßriger Lösungen entwickelt hat, ist natürlich nicht elektronisch bedingt. Lebewesen aus Metall mit Elektronenmilieu sind aus molekularbiologischen Gründen absurd. Die Soliontechnik ist die notwendige Folge dieser Entwicklung. Unbestritten hat sie Nachteile gegenüber der Elektronentechnik. Diese Nachteile liegen hauptsächlich in der Geschwindigkeitsbegrenzung der ablaufenden Prozesse. Ein Nervenimpuls dauert einige Millisekunden, d. h. tausendstel Sekunden. Schneller geht es nicht, denn die Ionen sind unverhältnismäßig viel größer und träger als die Elektronen. Der Elektronik, die heute schon mit Nanosekunden ($0,000\,000\,001$ s) rechnet, kommt die Soliontechnik nicht nach! Und doch arbeitet unser Gehirn schneller, energieärmer und zuverlässiger als ein moderner Computer. Dieses Rätsel fasziniert die Bioniker heute am meisten.

Wie entsteht nun das elektrische Potential an der Membran der Zelle? Im vorausgegangenen Abschnitt betrachteten wir schon die Zelle als Fließgleichgewichtssystem: Kaliumionen werden gegen ihren Konzentrationsgradienten hineingepumpt und strömen entsprechend diesem Gradienten wieder heraus. Im Gegenteil dazu sorgt eine Pumpe für eine kontinuierliche Verarmung der Zelle an Natriumionen. Sehen wir uns die Bilder im vorigen Abschnitt nochmals an: Hineingepumptes Kalium strömt heraus, herausgepumptes Natrium strömt wieder hinein. Trotzdem ist in der Zelle mehr Kalium und weniger Natrium als außerhalb. Es herrscht ein Fließgleichgewicht.

Nun gibt es ein strenges Gesetz der Elektrostatik, welches besagt, daß – bei Strafe riesiger elektrostatischer Korrekturkräfte – in einer Lösung immer gleich viel positive wie negative Ladungsträger vorhanden sein müssen. Es ist dies das Gebot der Elektroneutralität. Es »dürfen« also positive Kationen nur dann die Zelle verlassen, wenn sie ihren negativen Partner, das Anion, mitnehmen. (»Positiv« und »negativ« drückt hier

wirklich nur die elektrische Ladung und auch im Zusammenhang mit dem Partner nichts anderes aus!) Die Zellmembran erlaubt jedoch den Kationen einen weit leichteren Durchtritt als den Anionen. Würde das negative Chloridion nicht nach seinem guten elektrostatischen Recht den flüchtigen Partner energisch zurückholen – die Zelle würde an Kationen verarmen. Die zurückhaltenden Kräfte sind stark! Sie verhindern das Schlimmste. Und doch eilt das Kation, das zögernd verharrende Anion nach sich ziehend, etwas voraus. Um ein klein wenig ist es früher auf der anderen Seite. Diese kleine Differenz reicht schon aus, um ein meßbares elektrisches Potential zu erzeugen. Da nun das Kalium- heraus-, das Natriumion dagegen hineinströmt, so müßten sich beide Tendenzen gegenseitig eigentlich aufheben. Dies geschieht nicht, denn der Kaliumausstrom ist normalerweise viel stärker als der Natriumeinstrom. Die Zellmembran bremst das Natrium so, daß selbst das Chlorid schneller diffundieren könnte. Es kommt also zunächst nur das elektrische Potential zur Wirkung, welches durch das Kaliumion erzeugt wird. Bei erregbaren Membranen, beispielsweise im Nerv und im Muskel, kann die Membran blitzartig umschalten und ihre Natriumdurchlässigkeit stark erhöhen. In diesem Falle wird das Natrium potentialbildend, und entsprechend seiner Diffusionsrichtung kehrt es das Potential um. Dies ist das sogenannte Aktionspotential der erregbaren Zelle, welches im Gegensatz zum Ruhepotential das Zellinnere positiv werden läßt. Diese bildhafte Erläuterung mag für eine orientierende Vorstellung von der Natur der bioelektrischen Erscheinungen genügen.

Wir sahen, daß das elektrische Potential an der Membran eine Folge des Fließgleichgewichtszustandes der Zelle ist. Bleibt die Frage: Wie werden die Ionen nun gepumpt? – So wichtig dieses Problem für viele Fragestellungen der reinen Biologie sowie deren Anwendung in der Landwirtschaft und Medizin auch ist, so viel schon darüber gearbeitet wurde – wir wissen es noch nicht! Feststeht, daß hier chemische Energie, z. B. die des Adenosintriphosphats (ATP), in Konzentrierungsarbeit umgewandelt wird. Irgendwie wird dieser chemische Akkumulator angezapft, um ein Fließband anzutreiben. Dieses Fließband oder Ionenpumpe, wie man es auch nennt, ist eines der großen Fragezeichen der heutigen molekularen Biologie.

Diese Probleme lenken uns auf eines der bedeutendsten Gebiete der modernen Biophysik – die Biophysik der Mem-

branen. Solche Pumpmechanismen haben nicht nur für die Entstehung des elektrischen Potentials Bedeutung. Sie treten auch auf zum Transport von Nährstoffen, Wasser, Spurenelementen. Sie erzeugen die osmotischen Kräfte, von denen wir schon sprachen. Diese Transportflüsse sind miteinander gekoppelt. Ein Strom reißt den anderen mit, beeinflußt ihn, lenkt ihn, liefert u. U. die Energie zum Antrieb des anderen. Die Membran, in der dies geschieht, ist nicht nur der passive Ort dieser Vorgänge, durch ihre molekularen Eigenschaften werden diese Wechselwirkungen gesteuert, katalysiert.

Hier liegen Fragestellungen verborgen, die den Arzt interessieren, welcher Kreislaufmittel verschreibt, Resorptionsstörungen kuriert oder die Nierenfunktion wieder in Gang bringen will. Hierfür interessiert sich der Landwirt bei der Frage der Aufnahme von Düngemitteln durch die Pflanze. Aber auch der Techniker gewinnt zunehmendes Interesse an diesen Wunderleistungen der biologischen Membran. In der chemischen Industrie werden Stoffe vorwiegend durch Destillation getrennt. Das ist recht energieaufwendig und umständlich. Könnte man hier großflächige Membranen einsetzen, um Produkte von Ausgangsstoffen oder Nebenprodukten zu trennen, so wäre viel gewonnen. Auf dem wirtschaftlich überaus wichtigen Gebiet der Meereswasserentsalzung werden solche Membranen schon eingesetzt.

Die theoretischen Impulse in diesen Fragen erwartet man heute von der Thermodynamik irreversibler Prozesse. Dies ist ein moderner Zweig der Thermodynamik, der sich erst in den letzten Jahrzehnten auf der Basis der klassischen Thermodynamik reversibler Vorgänge, die wir eingangs kurz streiften, entwickelt hat. Die Probleme und Ansätze dieses Gebietes sind jedoch so speziell, als daß wir sie in diesem Rahmen abhandeln könnten.

Hat sich der Blick in das Räderwerk des Lebens gelohnt? Es war nur ein flüchtiger Blick einem erklärenden Uhrmacher über die Schulter. Nur Prinzipielles konnte besprochen werden. Sicherlich wurden mehr Fragen aufgeworfen als geklärt. Das schadet nichts. Wir wollen nicht das Wagnersche »und habens doch zum Schluß so herrlich weit gebracht« lehren, allerdings auch nicht das Faustsche »und seh, daß wir nichts wissen können«. Wir wollen zunächst das Staunen erregen, ein Staunen, aus dem der Forscherdrang resultieren soll – die schöpferische Neugierde.

Im Reich der Moleküle

Makrophysik und Mikrophysik. Kann man Moleküle sehen? Wie groß ist ein Ion? Die Zellmembran als Ionen-sieb. Das Spiel mit den Billardkugeln. Was ist ein statistisches Knäuel? Das Leben: ein Kosmos im Chaos. Wie konnte es entstehen? Leben bedeutet Ordnung – das Chaos ist einkalkuliert; gezähmt und gelenkt kann es nützen. Chaotische Energie + biologische Information = biologische Funktion. Große Zahlen und kleine Räume. Warum sind die Zellen nicht kleiner? Das Dreieck von Raum, Zeit und Zuverlässigkeit im molekularbiologischen Geschehen. Ord nende Felder.

Wir begannen mit dem Größten, mit dem Sichtbaren, Fühlbaren, wir knüpften an Alltagserfahrungen, an die Vorstellung vom fliegenden Insekt, vom schlanken Grashalm, vom schwerfälligen Elefanten. Diese Vorstellungen und Kenntnisse ließen sich erweitern, korrigieren, vieles konnten wir in Zusammenhang bringen und erklären. Manches bedurfte einer komplizierten Erörterung, mitunter war es nötig, etwas tiefer in die Theorie einzusteigen und höhere Anforderungen an das Abstraktionsvermögen zu stellen.

Jetzt müssen wir Abschied nehmen von vielen Vorstellungen des Alltags, müssen bereit sein, alles neu zu überdenken. Wir wollen eindringen in das Reich der Moleküle. Das bedeutet nicht einfach eine Maßstabsverschiebung, d. h. eine Verkleinerung des Beobachteten oder eine Vergrößerung des Gegenstandes unserer Betrachtungen als Gedankenexperiment, das bedeutet vielmehr einen Einstieg in eine neue Welt, in die Welt der Mikrophysik. Dort wurzelt das Leben! Manches, was wir als Äußerung lebender Organismen makroskopisch sichtbar wahrnehmen – einen Erbsprung beispielsweise, d. h. eine neue Färbung, Form oder Verhaltensweise, bestimmte Krankheitsbilder, wie z. B. eine Krebsgeschwulst, eine Blutkrankheit und vieles mehr –, hat seine Ursache in molekularen Veränderungen. Das ist einer der Gründe, warum die molekulare Biologie und Biophysik in den letzten Jahrzehnten mehr und mehr an Bedeutung gewinnt.

Es soll einmal einen Architekten gegeben haben, der seine

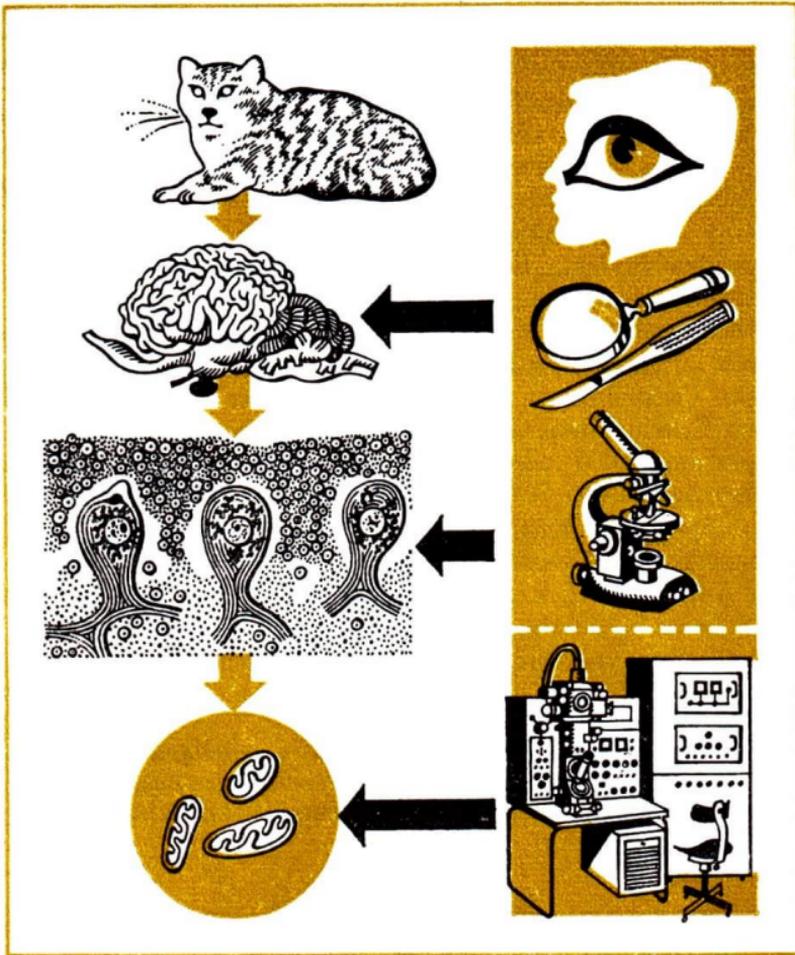
Schüler veranlaßte, sich Häuser und Wohnungseinrichtungen auszudenken für Menschen, die völlig anders gebaut sind als wir, die auf vier Beinen laufen, die den Kopf seitlich tragen usw. Ein sinnloser Unfug? Keineswegs! Die Schüler sollten lernen, alles Gewohnte über Bord zu werfen, alles neu zu überdenken, sich von jeder Konvention zu lösen.

Wir haben es nicht nötig, uns in eine Phantasiewelt zu versenken, die Physik wartet mit ganz konkreten Vorstellungen auf. Wir müssen nur unsere Alltagserfahrungen an der Garderobe abgeben, bevor wir das Reich der Moleküle betreten. Dafür wird uns beim Eintritt als Wegweiser ein Lehrbuch der statistischen Physik oder der Wellenmechanik in die Hand gedrückt, in dem zumindest so viel steht, wie die Physiker heute wissen. Die Physiker kennen sich schon etwas aus in diesem Bezirk.

Begierig treten wir ein; wissensdurstig stellen wir die erste Frage: Wie sieht so ein Eiweißmolekül aus, von dem wir so Erstaunliches wissen: daß es Energie- und Stoffumwandlungen katalysiert, daß es Elektronen transportiert, mechanische Arbeit leistet und vieles mehr? Enttäuscht erfahren wir, daß schon die erste Frage eine dumme war: Ein Molekül sieht nicht aus!

Wir sind gewohnt, daß wir die Dinge, die uns umgeben, betrachten können. Wir stellen bei Festkörpern Färbung, Form und Größe fest, bei Flüssigkeiten zumindestens die Färbung und Konsistenz. Eine Maus ist grau und mit Schwanz 15 cm lang. Es gibt zwar auch braune und weiße Mäuse, große und kleine, aber wir können Form und Farbe einer jeden Maus eindeutig feststellen. Präparieren wir die Maus, dann finden wir z. B. im Kopf das Gehirn. Auch das hat definierbare Farbe und Form, wir unterscheiden die Hirnbezirke und können mit einer Lupe auch deutlich die Hauptnerven erkennen. Mit speziellen Methoden fertigen wir dünne Schnittpräparate des Gehirnes an und betrachten diese unter einem Mikroskop. Wir erkennen Nervenzellen in ihrer Verästelung und mit ihren Organellen, dem Kern, dem Golgiapparat, den Mitochondrien. Um letztere zu sehen, brauchen wir schon ein gutes Mikroskop mit einer 1300fachen Vergrößerung. Dann hört das »Sehen« auf!

Es liegt nicht an der optischen Industrie, daß Mikroskope höherer Auflösung nicht gebaut werden! Es liegt am Licht, das wir zum Sehen gebrauchen. Das blaue, gerade noch sichtbare Licht hat eine Wellenlänge von $0,4 \mu\text{m}$. In dieser Größenordnung liegt das maximale optische Auflösungsvermögen. Eben-



Verschiedene Vergrößerungsstufen biologischer Geräte. Das exakte »Sehen« hört bereits beim lichtmikroskopischen Bild auf. Bei Hochleistungs-Elektronenmikroskopen wird dann auch das »Messen« zweifelhaft.

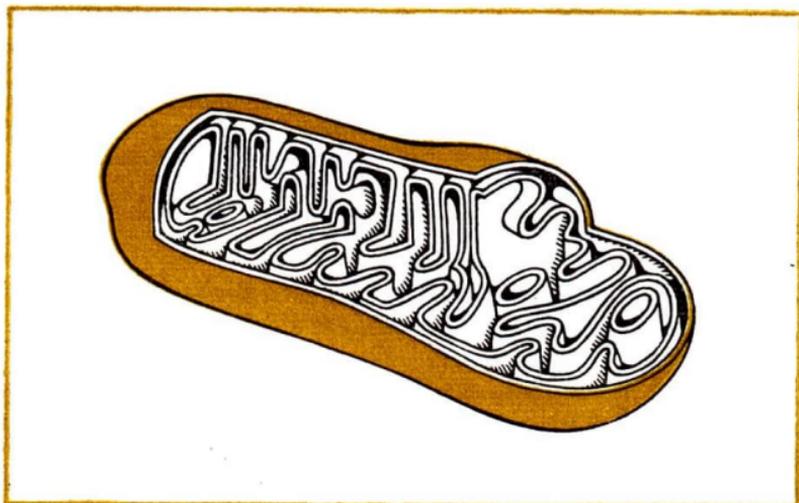
sowenig, wie es gelingt, mit einer Axt einen Bleistift zu spitzen, kann man Objekte »sehen«, die kleiner als die Wellenlänge des Lichtes sind.

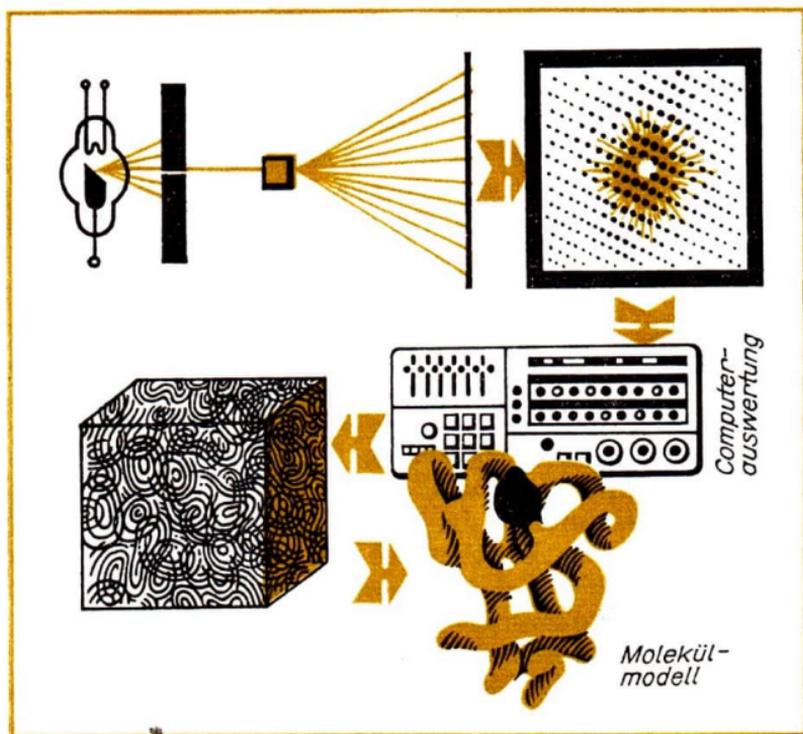
Was nun? Jeder weiß, es gibt Elektronenmikroskope. Es ist verständlich, daß man diese Instrumente, die in der Lage sind, die Elektronendichte eines sehr kleinen Objektes auf einen Zinksulfidschirm sehr stark vergrößert darzustellen, »Mikro-

skope« nannte. Verständlich und doch schade, denn im Wort »Mikroskop« steckt das »Sehen« drin. Sehen können wir aber nur das Bild auf dem Leuchtschirm eines solchen Gerätes. Hier wird der Elektronenstrahl in Licht verwandelt. Bestenfalls können wir sagen: wir haben irgendeine kleine Struktur mit Hilfe einer sinnreichen Methode stark vergrößert abgebildet. Von »Sehen« kann hier keine Rede sein!

Wird hier Wortklauberei betrieben? Leider nein! Der Mensch neigt dazu, Erfahrungen, die er an einem Vorgang, einem Objekt gewonnen hat, auf andere Vorgänge und Objekte zu übertragen, die ihm bisher unbekannt sind und mit denen er sich auseinandersetzen muß. Das Objekt wird ihn lehren, falsche Vorstellungen zu korrigieren, und er bereichert somit seinen Erkenntnisstand. Ein Molekularbiologe »sieht« Bilder, die um das 10000- oder 100000fache vergrößert sind, er sieht in aller Schärfe, er formt sich vielleicht ein greifbares Modell aus Pappe. Jetzt sieht er das Modell, vergißt die tatsächlichen Dimensionen und wendet die Gesetze der Physik an, die er aus dem Alltag kennt, z. B. das Newtonsche: Ein Körper ruht, wenn keine Kraft ihn von außen anstößt. Zweifellos stimmt dieses Gesetz, und sein Pappmodell vor seinen Augen auf dem

Ein Plastmodell eines cytologischen Objektes, 10000fach vergrößert. Es ist anschaulich und steigert unser Vorstellungsvermögen. Leider verführt es uns aber dazu, das Modell mit der Wirklichkeit zu verwechseln.





Mit Hilfe der Röntgenbeugung kann man die Gestalt von biologischen Makromolekülen ermitteln. Der Weg ist lang und aufwendig. Bisher sind es nur wenig Moleküle, deren Strukturmodell man kennt.

Schreibtisch liegt ganz still. Auch die Originalstruktur, zehntausendmal kleiner, würde sehr ruhig liegen, wenn sie nicht beeinflusst würde. Da es aber keine Materie ohne Bewegung gibt, wird sie pausenlos durch schwingende, rotierende, sich fortbewegende Moleküle von allen Seiten gestoßen. Auch die Moleküle, aus denen diese Struktur selbst besteht, sind ständig in Bewegung. Dem Pappmodell auf dem Tisch macht das nichts aus, die Originalstruktur vibriert, rotiert ständig und bleibt keinen Augenblick an einem Ort.

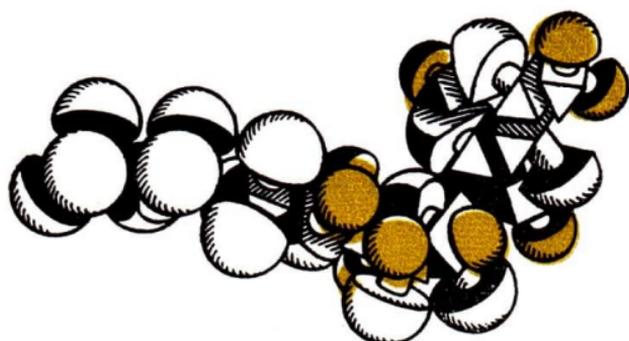
Was für diese sehr kleinen, aber noch aus vielen Molekülen zusammengesetzten Objekte gilt, trifft noch viel stärker für das Molekül selbst zu! Molekülstrukturen kann man mit einem Elektronenmikroskop im allgemeinen nicht abbilden. Um Vorstellungen über die Struktur biologischer Makromoleküle zu erhalten, bedient man sich der Methoden der Röntgenbeugung.

Röntgenstrahlen haben eine Wellenlänge von wenigen Ångström, mit ihrer Hilfe sind folglich molekulare Strukturen durchaus noch darstellbar. Ein scharf gebündelter Röntgenstrahl, durch eine möglichst reine Probe eines makromolekularen Stoffes, eines Eiweißes beispielsweise, geschickt, erzeugt auf einer Fotoplatte ein Beugungsbild; sinnlos verteilte Schwärzungsstellen, wie es dem Laien erscheint, werden mit großem Aufwand vermessen und berechnet. Das Resultat ist das Bild der Elektronendichteverteilung im Molekül. Es sieht aus wie das Meßtischblatt einer gebirgigen Landschaft. Aus dieser Karte konstruiert der Molekularphysiker das Modell. Hier handelt es sich nicht, wie in der Elektronenmikroskopie, um ein fixiertes, ein »eingefrorenes« Bild, jedoch ist auch aus diesen Ergebnissen die dynamische Struktur des Molekularen nicht ersichtlich. Zwar sind die Bewegungsabläufe nicht »eingefroren«, was wir sehen, ist jedoch ein Mittelwert über viele, sehr viele Moleküle. Ein Prototyp des Moleküls also, in seiner Starrheit ähnlich unverbindlich wie die Modepuppe im Schaufenster eines Kaufhauses.

Halten wir also fest: »Sehen« können wir ein Molekül nicht, vom »Aussehen« eines Moleküls kann keine Rede sein. Anstelle des Bildes tritt die wissenschaftlich begründete Vorstellung, die nicht identisch ist mit einem bekannten Bild aus der uns sichtbaren und gewohnten Welt der Makrophysik.

Wenn das Molekül also ein dynamisches Gebilde darstellt, kann man dann wenigstens, ausgehend vielleicht von einem Modell der Röntgenbeugungsanalyse, seine mittlere Größe und Gestalt bestimmen? Selbstverständlich geht das. Doch auch da erwachsen Schwierigkeiten. Sie sind am deutlichsten an Atomen zu demonstrieren oder an Ionen, d. h. Atomen, die durch eine gestörte Elektronenbilanz Ladungen tragen. Wir haben schon an verschiedenen Beispielen über die Bedeutung dieser Ladungsträger, also z. B. der Ionen des Natriums und Kaliums, der Kationen, wie man sie ihrer positiven Ladung wegen nennt, gesprochen. Wie groß ist so ein Ion?

Wir sind gewohnt, daß Größen unserer Umwelt auf verschiedene Weise gemessen werden können. Denken wir an die Länge eines Sportplatzes. Wir können ein Bandmaß anwenden, wir können aber auch mit Hilfe eines optischen Entfernungsmessers seine Länge bestimmen. Prinzipiell könnte man auch die Zeit stoppen, die der Schall braucht, um diese Strecke zu überwinden, und bei Kenntnis der Schallgeschwindigkeit deren Länge berechnen, wie wir bei Gewitter aus der Zeitdiffe-

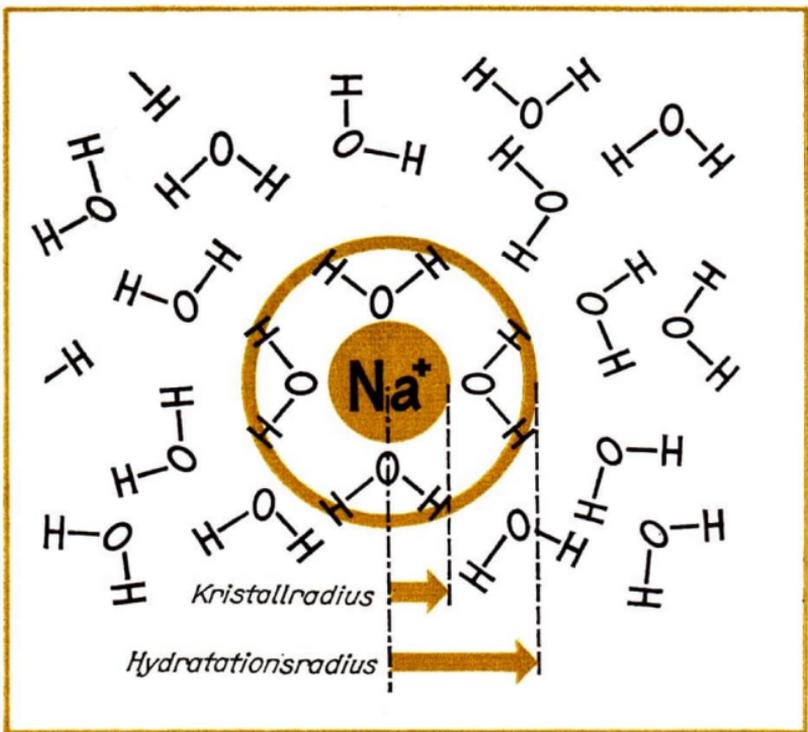


Das Kalottenmodell eines Moleküls. Solche Modelle tragen die Gefahr mechanistischen Denkens in sich.

renz zwischen Blitz und Donner die Entfernung des Einschlages ermitteln. Die Methoden geben die Länge des Sportplatzes zwar mit verschiedener Genauigkeit an, das Meßergebnis wäre jedoch nicht unterschiedlich.

Diese triviale Erfahrungstatsache müssen wir nun vergessen! Sie ist im molekularen und atomaren Bereich nicht anwendbar! Messen wir den Ionenradius mit unterschiedlichen Methoden, so erhalten wir unterschiedliche Resultate. Dafür ein Beispiel: In einem Kochsalzkristall liegen Natrium- und Chlorionen in strenger Ordnung; verpackt wie Weihnachtskugeln in einem Kasten. Mit Hilfe der Röntgenbeugung lassen sich die Gitterabstände des Kristalles, d. h. also die Abstände vom Zentrum eines Ions zum anderen, sehr exakt messen. Das Resultat wäre ein Ionenradius, den man Kristallradius nennt und der für Natrium z. B. $0,95 \text{ \AA}$ beträgt.

Kontrollieren wir diesen Befund auf andere Weise. Wird eine Kugel durch eine Flüssigkeit gezogen, so ist ihre Geschwindigkeit von der angewendeten Kraft, von der Zähflüssigkeit der Umgebung und vom Radius der Kugel abhängig. Bringt man Ionen in Lösung zwischen zwei Elektroden, so werden sie im elektrischen Feld bewegt. Man nennt diesen Effekt Elektrophorese. Die Geschwindigkeit der Bewegung kann man messen, sie ergibt sich aus dem elektrischen Wider-



Wie groß ist ein Ion? Man kann die Schublehre exakt nirgends anlegen. Nur effektive Radien oder Durchmesser, d. h. genau meßbare Parameter, die einen bestimmten Effekt hervorrufen, können definiert werden.

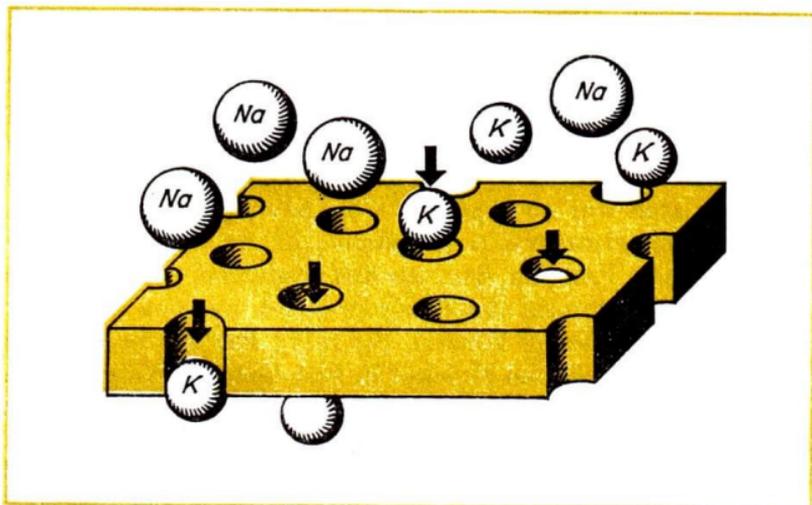
stand der Lösung. Die Zähflüssigkeit, Viskosität genannt, des Wassers ist auch bekannt, und somit kann man den Radius der Ionen errechnen. Zum Erstaunen ergibt sich für das gleiche Natriumion ein Wert von $1,85 \text{ \AA}$, ein Radius also, der um das Doppelte größer ist als der Kristallradius. Ist es ein Fehler im Meßsystem? Keineswegs! Es ist einfach ein anderer Parameter, den wir gemessen haben. Man nennt ihn Hydratationsradius. Das Ion lagert Wasser an und bewegt sich, eingehüllt in einen Wassermantel. Dann ist es also doch ein Fehler, wir haben diesmal den Durchmesser der Weihnachtskugeln mit Einwickelpapier gemessen?! So einfach ist es nicht, denn unsere Ionen sind keine Weihnachtskugeln, sie haben keine feste Oberfläche. Selbst wenn wir uns in grober Näherung Kern und Elektronen des Atoms als Massenpunkte vorstellen, müs-

sen wir das Ganze als einen Raum stärkster elektrischer Felder betrachten. Wo will man da die Schublehre ansetzen?

Wir müssen uns einfach daran gewöhnen, Größen als »effektive« Parameter aufzufassen, als Meßwerte also, die unter ganz bestimmten Umständen ermittelt werden, wie es die Bestimmung von Kristallradius und Hydratationsradius demonstrierte. Gerade der Hydratationsradius hat für biologische Systeme eine große Bedeutung. Schließlich liegen Ionen im biologischen System immer in wäßriger Umgebung vor und sind deshalb von einem Wassermantel umgeben. Aber auch dieser Wassermantel hat ja keine feste Grenze, wie die Atmosphäre der Erde nicht irgendwo sprunghaft aufhört. Obgleich wir den »effektiven« Hydratationsradius sehr genau und reproduzierbar bestimmen können, darf er uns nicht verleiten, ihn als absolut anzusehen.

Vielleicht sollten wir diesen Gesichtspunkt an einem Beispiel illustrieren: Bis heute weiß man noch nicht recht, wie die Tatsache zu erklären ist, daß die Zellmembran für Ionen eine sehr spezifische Durchlässigkeit besitzt. Schon im vorausgegangenen Abschnitt sprachen wir darüber, daß durch eine

So sieht die Porentheorie der selektiven Membrandurchlässigkeit für Ionen aus, wenn man sie mechanistisch deutet. Die kleinen K-Ionen passen durch die Löcher, die Na-Ionen mit ihrem dicken Wassermantel dagegen nicht. Ein Blick auf das Bild der Ionenparameter macht die Beschränktheit dieses Modelles deutlich.

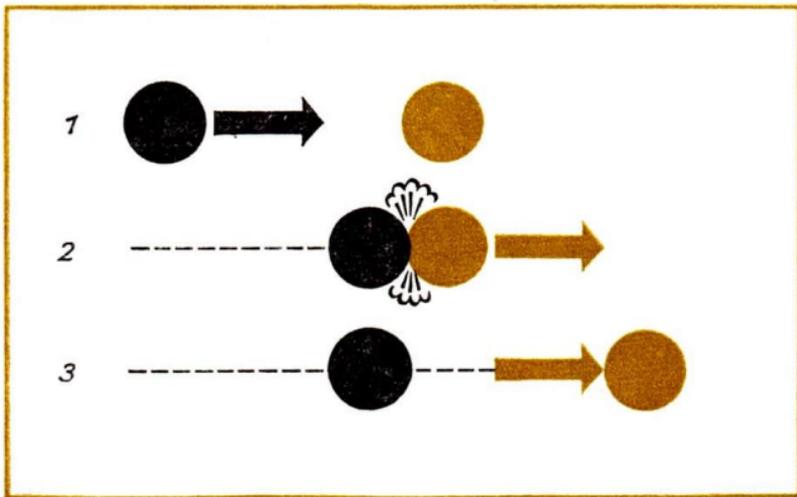


Zellmembran das Kaliumion viel leichter durchdringt als das Natriumion. Eine heute wieder viel diskutierte Theorie ist die sogenannte »Porentheorie«. Die ursprüngliche Idee ist sehr einfach und ebenso mechanistisch. Stellt man sich die Membran als Fläche mit Poren definierter Größe und die Ionen als Kugeln bestimmten Durchmessers vor, so ist das Ganze eben ein Sieb, wie es die Kinder im Sandkasten gebrauchen. Wie wir sahen, sind die Ionen aber keine gut gedrechselten Kugeln, und ein Loch eines Durchmessers von wenigen Ångström ist ebenfalls nicht vergleichbar mit einem solchen, das mit einem Spiralbohrer in ein Stück Sperrholz gebohrt wurde. Für beides, sowohl für die Pore als auch für das Ion, gilt das oben Gesagte, daß nämlich nur effektive Größen definierbar sind. Denkt man realer im molekularen Bereich, so kommt man zu folgendem Schluß: Selbstverständlich kann ein kleineres Teilchen leichter durch ein kleines Loch als ein größeres. Im Gegensatz aber zu einer festen Kugel von 4,3 cm Durchmesser, die durch ein Loch von 4,1 cm mit aller Gewalt nicht hindurchpaßt, kann ein Ion mit einem Hydratationsdurchmesser von 4,3 Å sehr wohl durch eine Pore eines effektiven Durchmessers von 4,1 Å, wenn auch die dazu notwendige Kraft größer ist als bei einem kleinen Ion. Biologisch gesehen, führte diese Erkenntnis von der falschen Theorie der Halbdurchlässigkeit (»Semipermeabilität« nach dem Alles-oder-Nichts-Prinzip) zur Theorie der Auswahldurchlässigkeit (»Permeaselektivität« nach dem Mehr-oder-Weniger-Prinzip).

Keine Frage ist so dumm, als daß man nicht etwas daran lernen könnte. Wenn wir bisher begriffen haben, warum Moleküle und Ionen nicht »aussehen« können, wenn wir unser Vorstellungsvermögen von diesen Elementarteilchen des Stoffes, aus dem das Leben besteht, etwas erweitert haben, dann war die erste Lektion in unserem magischen Theater des Molekularen erfolgreich. Die Ausbeute an biologisch anwendbarem Wissen war noch gering, wir können sie erst erhöhen, wenn wir uns etwas weiter umgesehen haben.

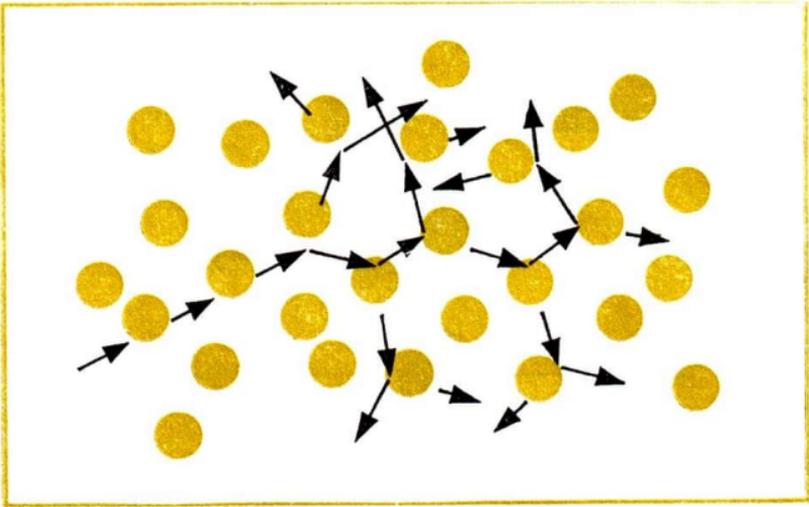
Das nächste Problem, dem wir uns annehmen wollen, ist die Dynamik der Materie. Es klang ja schon an, daß wir zwar Molekülmodelle bauen können, die ruhig vor uns liegen, daß jedoch das tatsächliche Molekül in ständiger Schwingung ist. Wie verläuft nun diese Bewegung? Welche Bedeutung hat sie für unsere Betrachtungsweise?

Beginnen wir wieder beim Anschaulichen, bei einem Modell aus unserer Erfahrungswelt. Wir schrauben in unsere Zimmer-



Beim elastischen Stoß wird der Impuls eines Körpers auf einen anderen übertragen. Man kann das an Billardkugeln leicht demonstrieren. Die stoßende Kugel bleibt liegen, die angestoßene Kugel bewegt sich weiter.

decke in unregelmäßigen Abständen Haken, nicht zu weit voneinander entfernt, und hängen an dünnen, aber festen Fäden Billardkugeln daran. Sie mögen alle in der gleichen Höhe hängen, in unregelmäßigem Abstand voneinander, so daß sie sich zwar mehr oder weniger nahe sind, jedoch nicht berühren. Wir schließen Fenster und Tür, damit kein Luftzug uns stört, setzen uns ruhig unter unser Werk und harren aus, bis auch die letzte Kugel ausgependelt hat und ruhig und unbeweglich von der Zimmerdecke hängt. Jetzt soll das Experiment beginnen! Mit einem kräftigen Schwung stoßen wir eine Kugel in eine beliebige Richtung. Die angestoßene Kugel fliegt nicht weit. Kurz darauf stößt sie mit einer anderen zusammen. Billardkugeln sind aus gutem Holz, sie stoßen sich elastisch. Der Physiker versteht unter einem elastischen Stoß eine vollständige Übertragung des Impulses eines Körpers auf einen anderen. Die erste Kugel würde stillestehen, hinge sie nicht an einem Faden als Pendel. Daß sie zurückpendelt, ist ein Schönheitsfehler unseres Modelles, wir wollen uns dadurch nicht stören lassen. Die zweite Kugel jedenfalls wird mit dem gleichen Impuls wie die erste fortbewegt, bis sie auf eine weitere trifft. So geht das fort. Nicht immer gibt es einen »Volltreffer«.



Wird eine Kugel in einem mechanischen System gestoßen, so pflanzt sich der Impuls weiter fort. Bei zentralem Stoß wird der gesamte Impuls übertragen, bei exzentrischem Stoß gibt es einen »Querschläger«, ein Teil des Impulses wird übertragen, die stoßende Kugel selbst wird abgelenkt. Bald sind alle Kugeln in Bewegung.

Häufig streifen sich zwei Kugeln, die sich jede mit einem Bruchteil des Impulses fortbewegen. Es bedarf sicher keiner großen Anstrengung, um sich vorzustellen, daß bald alle Kugeln an unserer Zimmerdecke in Bewegung geraten sind.

Wie lange geht das so fort? Das hängt von der Masse der Kugeln und von der Dicke der Fäden ab. Jedenfalls ist irgendwann wieder Ruhe, die Kugeln haben sich ausgependelt und hängen unbeweglich an ihren Fäden. Wo ist die Energie geblieben? Sie kann doch nicht verschwunden sein? Ist sie auch nicht. Genaue Thermometer würden uns anzeigen, ideale wärmeisolierende Wände in unserem Zimmer vorausgesetzt, daß sich die Zimmertemperatur um ein wenig erhöht hat. Die mechanische Energie hat sich, bedingt durch Luftreibung und doch nicht ganz zu vernachlässigende Plastizität der Kugeln, in Wärme verwandelt.

Jetzt wird es Zeit, nach dem Sinn dieses Experimentes zu fragen: Was soll das Ganze? Was ist daran zu lernen? Auch Moleküle, Atome, Ionen sind im Raum beweglich. Sie bewegen sich, stoßen an, tauschen gegenseitig Impulse aus. Wir haben ein grobes Anschauungsbild eines molekularen Systems,

wenigstens in seiner flächenhaften Ausdehnung, an der Zimmerdecke. Daß sich die Moleküle in allen drei Dimensionen des Raumes bewegen können, wie die Pendel in zweien, läßt sich leicht einsehen und vorstellen. Hatten wir uns nicht aber gerade bemüht, zu begreifen, daß Moleküle keine Billardkugeln en miniature sind, Körper glatter, fester, definierbarer Oberfläche? Sicher, das hatten wir! Und dabei wollen wir auch bleiben! Trotzdem verhalten sich Moleküle im Stoß ähnlich wie große Körper. Hier sind es nicht die harten Flächen, die sich berühren, sondern elektrische Felder, die Abstoßungskräfte hervorrufen.

Bleiben wir dabei: Die Moleküle und Atome sind zwar keine kleinen Billardkugeln, sie tauschen aber ähnlich wie diese Stöße aus und geben Impulse weiter. Wir sind inzwischen vorsichtig geworden mit der Übertragung makrophysikalischer Phänomene ins Mikrophysikalische und tun gut daran. Fragen wir lieber vorsichtig: Kommen auch die Moleküle nach einiger Zeit zur Ruhe, ähnlich wie unsere Billardkugeln? Überlegen wir einmal: Die Luftreibung fällt weg, denn die Moleküle sind ja die kleinsten Stoffbausteine, sie schwingen nicht in Luft, sondern im Nichts. Wenn wir an gelöste Moleküle denken, so entspricht das eben einer Mischung verschiedener Kugeln an unserer Zimmerdecke, die den gelösten Stoff und das Lösungsmittel repräsentieren. In der Lösung tauschen dann die Moleküle des gelösten Stoffes untereinander und mit denen des Lösungsmittels Impulse aus; ein Bremsmittel, vergleichbar der Luft zwischen den Billardkugeln, gibt es nicht.

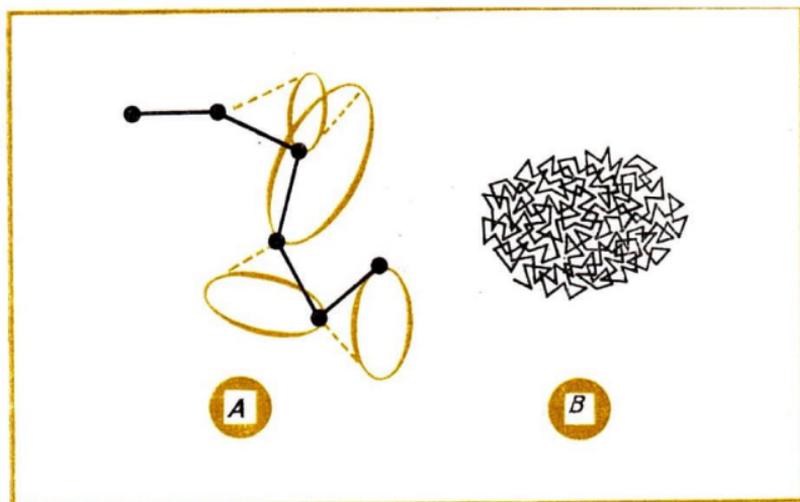
Wie steht es aber mit dem Energieverlust durch Plastizität? Obgleich man von Plastizität eines Moleküls nicht sprechen kann, ist doch eine gewisse Zustandsänderung des Moleküls durch den Stoß bedingt möglich. Es kann um die eigene Achse rotieren, es können Teile desselben rotieren, es können innere Schwingungen auftreten. In schlimmen Fällen kann sogar ein Molekülteil abgespalten werden. Dies sind aber auch Bewegungsenergien, die sich gegebenenfalls wieder als Translationsenergie (so nennt man die freie Fortbewegung der Moleküle) äußern können.

Warum erwärmen sich die Moleküle nicht wie die Billardkugeln? Nun einfach deshalb, weil der Wärmebegriff hier wieder einmal nicht anwendbar ist. Wärme, Temperatur sind Begriffe der Makrophysik. Wärme ist Ausdruck der Translationsenergie eines Systems aus vielen Molekülen. Ein heißer Körper besteht aus sich sehr schnell bewegenden und stoßen-

den Teilchen, in einem kalten Körper erfolgt die Bewegung langsamer. Unsere Billardkugeln verwandeln die grob mechanische Energie ihrer Bewegungen durch Reibung und plastischen Stoß in die molekulare Bewegung der Wärme. Im Reich der Moleküle ist diese Translation selbst Wärme. Die Moleküle schwingen unaufhörlich fort, vorausgesetzt, die Wärme wird nicht nach außen abgeführt.

Diese Translationsbewegung als Wärmebewegung sowie die anderen Bewegungsformen der Moleküle induzieren eine Fülle physikalischer Fragestellungen. Wir wollen darauf verzichten, obgleich sie auch biophysikalisches Interesse beanspruchen. Immerhin seien einige genannt. Kann die Geschwindigkeit einer Translation, Rotation oder Schwingung eines Moleküls genauso stufenlos verändert werden wie vergleichbare Bewegungen im Makrophysikalischen? Keineswegs! Auch hier liegt eine Besonderheit der Mikrophysik vor. Wir wissen seit der großen Entdeckung des Wirkungsquants durch Max Planck, daß Energie in Münzen zahlbar ist, dessen kleinste Währungseinheit unteilbar ist. Man kann 1 kg Zucker abwägen, auch 1 g, 1/100 g oder gleichbedeutend 10^{-2} g, 10^{-4} g, 10^{-8} g usw. Dieses »usw.« hat seine Grenze. Wenn ich 10^{-22} , also 0,000 000 000 000 000 000 000 1 g, abwägen wollte, müßte ich schon ein Zuckermolekül teilen, und das geht nicht, denn ein geteiltes Zuckermolekül ist kein Zucker mehr. Ähnlich ist es mit der Energie. Bewegt sich ein makroskopischer Körper, so drückt sich seine Energie in einer so hohen Zahl von Energiequanten aus, daß ein Quantum mehr oder weniger keine physikalisch meßbare Differenz bedingt. Man kann den Energiegehalt eines großen Körpers folglich kontinuierlich ändern. Dies trifft mit guter Näherung sogar noch für die Translation einzelner Moleküle zu. Bei anderen molekularen Bewegungen jedoch, bei der Rotation und Vibration z. B., geht es um den Pfennig! Hier rastet der Energieregler ein. Ein Quantum mehr oder weniger heißt eine Stufe schneller oder langsamer. Hier schließt sich ein ganzer Zweig der Biophysik, die sogenannte Quantenbiophysik, an, es werden Fragen der Photosynthese, des Sehvorganges, der Strahlenwirkung und anderes behandelt.

Eine andere Frage: Lange Moleküle sind mit Gliederketten vergleichbar. Jedes Glied ist beweglich. Wie sieht eine solche Kette aus, wenn sie ins Chaos der Wärmebewegung gerät? Treten keine zusätzlichen Kräfte auf, dann gibt es ein statistisches Knäuel. Wie groß ist so ein Knäuel bei bekannter

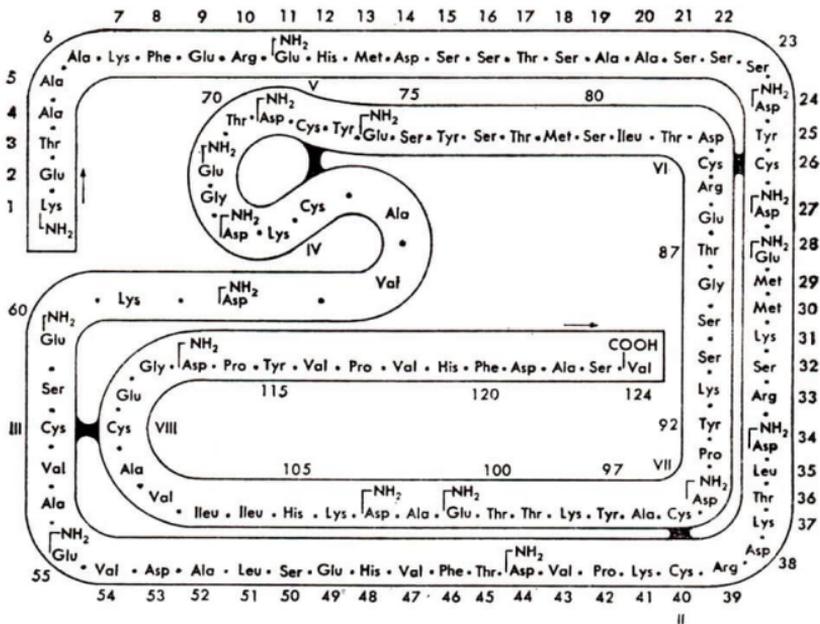


Stellen wir uns ein langes Fadenmolekül, bestehend aus Atomen, vor, die miteinander chemisch gebunden sind. Die Winkel von Bindung zu Bindung sind bestimmt, die Bindungsachse selbst ist jedoch verdrillbar. Durch Stöße induziert, kann sich diese Kette beinahe beliebig verdrillen (A). Der wahrscheinlichste Zustand dieser Zufallsbewegung ist das »statistische Knäuel« (B).

Kettenlänge, wie weit sind seine Enden statistisch voneinander entfernt? Wie verhält es sich bei Strömung?

Wir sehen, daß wir Gefahr laufen, uns im Labyrinth der Wissenschaft hoffnungslos zu verstricken. Das wollen wir nicht! Bleiben wir beim roten Faden und bei der Tradition dieses Buches, nicht alle Wege zu gehen, sondern auf einem der interessantesten dieses Gebiet unbeschwert zu durchwandern! Es hat uns immerhin einige Mühe gekostet, die ersten Anstandsregeln der Mikrophysik zu begreifen. Wir sind müde geworden, diesen Knigge molekularer Anstandslehre zu studieren, begierig, das Leben zu sehen, es zu bestaunen, zu begreifen.

Hat sich ein neues, ein realeres Bild von der Welt der Moleküle bei uns geformt? Moleküle, Ionen unscharfer Abgrenzung in unaufhörlicher Bewegung und Wechselwirkung, vergleichbar einem immerfort wogenden Meer – ein Chaos! In diesem Chaos entstand und existiert der Kosmos des Lebens, der Mikrokosmos biologischer Organisation! Wie ist das möglich? Die Frage ist nicht nur so alt wie das Denken der Menschen überhaupt, sie kann auch heute noch nicht als ge-



In strenger Reihenfolge sind in einem Eiweiß die Bausteine (Aminosäuren) aneinandergesetzt. Man nennt dies die »Primärstruktur« des Eiweißes, oder Aminosäuresequenz. (Die Symbole stehen für die einzelnen Aminosäuren, z. B. Gly = Glycin)

löst betrachtet werden. Wie entstand der Kosmos aus dem Chaos, wie kann er sich erhalten?

Wir wissen, daß das Leben an ein Höchstmaß von Ordnung und Organisation gebunden ist. In strenger Ordnung sind die Aminosäuren, die Bausteine der Eiweiße, aufgereiht und bestimmen in dieser ihrer Reihenfolge oder Sequenz, wie man in der Molekularbiologie sagt, die Funktion derselben, beispielsweise ihre hochspezifische Wirkung als Enzym, d. h. als Katalysator eines ganz bestimmten Typs einer biochemischen Reaktion. Wird hier die Reihenfolge der Bausteine gestört, so funktioniert das Enzym genausowenig wie ein Fernsehgerät, wenn es von einem Affen montiert wird. Nun sind die Aminosäuren so fest aneinander gebunden, daß die Brandung der Wärmebewegung sie nicht durchmischen kann. Aber irgendwo müssen sie doch aneinandergesetzt worden sein? Die Fabrik dieser Zahnräder im biologischen Uhrwerk sind die Ribosomen. Hier wird nach festem Bauplan, einer Kopie der in jeder Zelle, im Tresor oder Zellkern, gelegenen

Erbanlagen, Aminosäure an Aminosäure gereiht. Wir wollen auf die Einzelheiten dieses Prozesses, soweit wir ihn heute kennen, nicht näher eingehen. Der Leser möge sich darüber in einem der vielen Bücher über Molekularbiologie orientieren. Für uns ist wichtig: hier kommt Ordnung aus Ordnung. Die biologische Organisation schafft es, an bestimmten Punkten sich des Chaos zu erwehren und Ordnung zu übertragen und fortzupflanzen.

Näherliegend ist die Frage nach der Herkunft der Ordnung. Es bedeutet schon Meisterschaft, Konstruktionspläne zu kopieren und nach ihnen zu bauen! Wieviel komplizierter ist es jedoch, diese Pläne zu entwerfen. Wir haben heute bereits gut begründete Vorstellungen davon, wie sich durch Variation und Selektion ein anatomisch-morphologischer Bauplan eines Organismus entwickeln konnte, wie das erste lebende System entstand. Der Weg vom anorganischen zum organischen Molekül in einer Welt ohne Lebewesen ist uns heute ebenfalls weitgehend klar. Die Raumfahrt hat Spuren organischer Verbindungen auch außerhalb unserer Erde nachgewiesen. Ein erster

Im Ribosom erfolgt die Synthese des Eiweißmoleküls (E). Hier wird die Ordnung der Erbanlage, vertreten durch ihre Kopie in Gestalt der m-RNS in Ordnung der Aminosäuresequenz umgemünzt. Die Unterschiede der Aminosäure sind durch symbolische Zeichen demonstriert. Kleine t-RNS-Moleküle bringen die zum entsprechenden m-RNS-Kod passenden Aminosäuren und knüpfen diese im Ribosom an das entstehende Eiweißmolekül an.



Erfolg zur wissenschaftlichen Klärung der Entstehung des Lebens. Doch selbst, wenn wir ein Meer aus organischen Molekülen, Aminosäuren z. B., annehmen, wie kam es zum ersten Eiweiß, zum ersten vermehrungsfähigen Makromolekül? Hier kluft zur Zeit noch ein tiefer Graben, eine entscheidende Erkenntnislücke. Wir wissen es noch nicht. Offenbar fehlt uns hier noch die Kenntnis wichtiger Gesetzmäßigkeiten, denn ein Zufall kann es nicht gewesen sein, der die erste sinnvolle Sequenz dieser Aminosäuren schuf. Dann wäre das Leben ein Phänomen mit einem riesigen Grad an Unwahrscheinlichkeit.

Bleiben wir bei dem Kampf des Lebens mit dem Chaos, dem Kampf der biologischen molekularen Ordnung mit der thermischen Bewegung. Führt die thermische Bewegung immer zu Zerstörung? Prinzipiell ja, denn der Zufall kreierte nun einmal das Wahrscheinlichste, und das Wahrscheinlichste ist die Unordnung. Das kann jeder ausprobieren. Er nehme eine Handvoll Bausteine und schütte sie aus. Wie selten geschieht es, daß ein Stein zufällig ordentlich auf einem anderen liegt. Werden etwa einmal drei Steine aufeinanderstehen? Ein sinnvolles Gebilde jedenfalls, wie es schon unsere Zweijährigen zuwege bringen, schafft der Zufall mit winzigster Wahrscheinlichkeit. Das ist übrigens auch eine Aussage des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik, den wir im vorigen Abschnitt erwähnten.

Ist Statistik, d. h. die thermische Bewegung, nun tatsächlich immer lebensfeindlich? Wir wollen jetzt zunächst sehen, daß das Leben diese Eigenschaft des molekularen Verhaltens in alle seine Funktionen nicht nur als Störfaktor einkalkuliert hat, sondern daß das Leben ohne Translation unmöglich ist. Später wollen wir uns mit Möglichkeiten zur Zähmung des Zufalls beschäftigen.

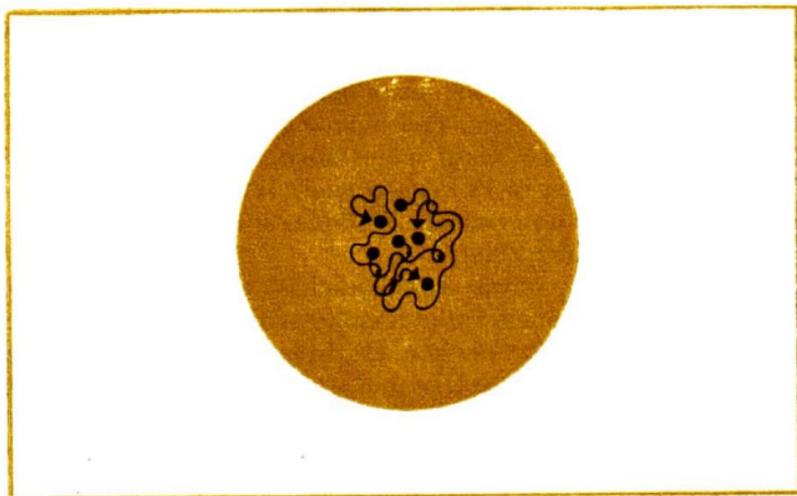
Hier können wir zunächst ein anschauliches Beispiel wählen, Anschaulich ist nur, was wir schauen können, und das Sehen, so stellten wir anfangs fest, hört im mikroskopischen Bereich auf. Tatsächlich können wir jedoch bereits mit einem guten Lichtmikroskop ein mikrophysikalisches Phänomen beobachten.

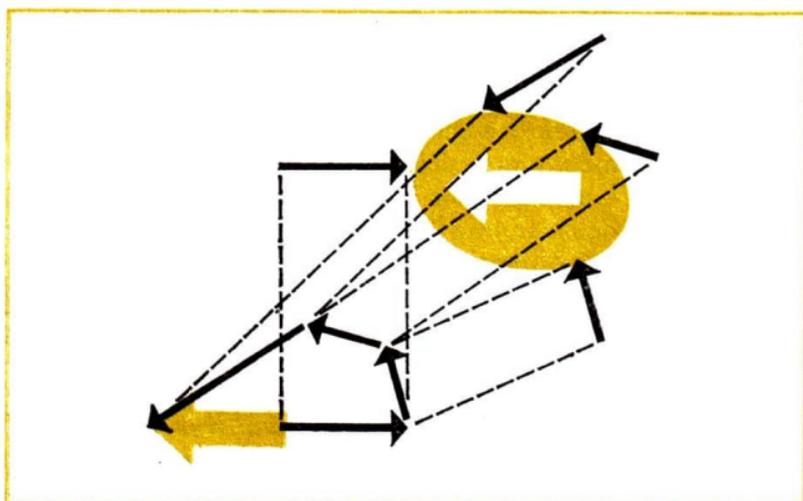
Vor eineinhalb Jahrhunderten bemerkte der englische Naturforscher Robert Brown, daß Pollenkörner, suspendiert in Wasser, eigenartige Bewegungen ausführen. Selbst in Präparaten ohne jede Wasserströmung ist ein Zittern jedes einzelnen Körnchens zu beobachten: ein ständiges sinnloses Hin und Her, Auf und Ab. Leicht konnte sich der Forscher davon

überzeugen, daß diese Erscheinung keine Lebensäußerung des botanischen Objektes war. Winzigste Schmutzteilchen in der Umgebung der lebenden Pollen, die ebenfalls frei im Wasser schwebten, bewegten sich ebenso. Erst viel später, etwa um die Jahrhundertwende, nahm sich Albert Einstein dieses Phänomens an, das inzwischen als Brownsche Molekularbewegung bekannt geworden war, und schuf das theoretische Fundament einer exakten Interpretation und Berechnung.

Ein kleines Teilchen, eine Pilzspore, ein Pollenkorn, ein kleines Bakterium oder auch ein totes Stäubchen befindet sich in wäßriger Umgebung. Von allen Seiten ist es dem Bombardement der Wassermoleküle ausgesetzt, der thermischen Translationsbewegung, wie wir sie eben nannten. Nun ist das Teilchen sehr klein, die Stöße, die es in einer kleinen Zeiteinheit erhält, sind abzählbar wenig, die Summe aller dieser Stöße oder Impulse, wie der Physiker sagt, ist nicht gleich Null. Irgendwie heben sie sich gegenseitig nicht ganz auf. Das Resultat ist eine Fortbewegung der Spore. Im nächsten Moment sieht die Resultierende der Impulse jedoch wieder ganz anders aus. Die Spore bewegt sich in eine andere Richtung. So geht das im ständigen Wechsel hin und her. Im Durchschnitt kommt das

Die Brownsche Molekularbewegung kleinster mikroskopisch sichtbarer Teilchen. Verfolgen wir die Spur dieser Teilchen, so sehen wir, daß ihre Bewegung völlig ungerichtet und ständig wechselnd ist.





Die Ursache der Brownschen Molekularbewegung sind die Stöße durch die thermische Translationsbewegung der Umgebung. Die einzelnen Impulse summieren sich entsprechend dem Vektordiagramm und ergeben den dick gezeichneten Summenvektor.

Teilchen nicht vom Fleck, obgleich es sich über einen gewissen Aktionsradius hin taumelnd bewegt. Einstein stellte fest, daß dieser Aktionsradius um so größer ist, je kleiner das Teilchen, je höher die Temperatur und je geringer die Zähflüssigkeit (Viskosität) des Umgebungsmediums. Größere Körper erhalten nämlich eine so große Anzahl von Stößen, daß sie sich in ihrer Wirkung gegenseitig aufheben. Viele Köche verderben den Brei!

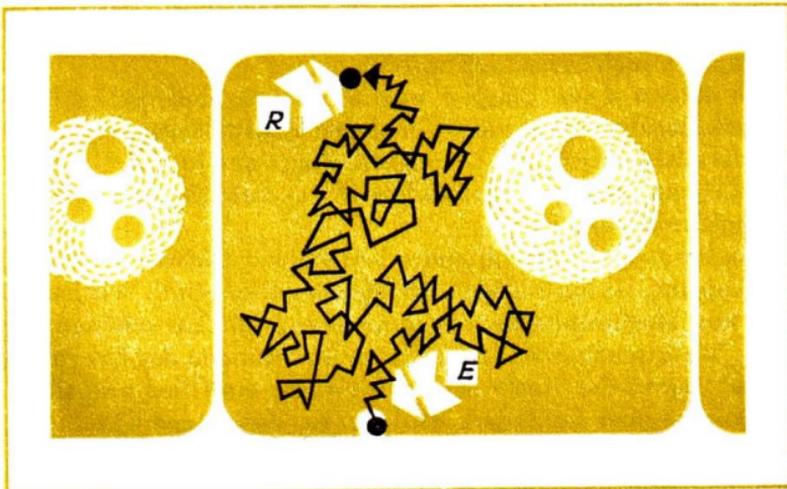
Bleiben wir bei dem Phänomen der Brownschen Molekularbewegung. Wir verstehen, daß nicht nur die einzelnen Moleküle, sondern, durch diese angestoßen, auch kleinste Zellbestandteile ständig in Bewegung sind. Jetzt gehen wir einen Schritt weiter und untersuchen die Bedeutung dieser Bewegung für die Funktion der Zelle.

Zunächst wieder etwas Anschauliches! Ein Wassersportler hißt an einem schönen Sonntagmorgen die Segel, stößt vom Bootssteg ab und fährt bei frischer Brise davon. Der Wind am Tage möge wechseln, in Stärke und Richtung, jedoch, Geschick des Seglers und etwas Seemannsglück vorausgesetzt, am Abend ist er wieder am Bootssteg. Wie ist das möglich bei völlig zufällig wechselndem Wind? Ein Wasserball, zu gleicher Zeit

morgens Wind und Wellen überlassen, ist längst irgendwo abgetrieben! Man braucht nicht Segler zu sein, um die Antwort auf diese Frage zu finden. Ein Segelboot hat ein Schwert, ein Ruder und bewegliche Segel. Es kann in verschiedenen Winkeln zum Wind fahren, kann sogar gegen den Wind kreuzen! Allerdings gehört schon einiges Können dazu. Dieses Können oder, anders ausgedrückt, die im Gehirn des Seglers gespeicherte Information nutzt die blinde Willkür des Windes; der Segler steuert sein Boot wohin er will, wenn es sein muß, auch mit der Kraft des Windes gegen diesen!

Suchen wir jetzt die Parallele dazu in der biologischen Zelle! Eine Darmzelle nimmt Nahrungsstoffe auf. Kleinere Moleküle gelangen einzeln durch die Zellmembran, größere werden aufgenommen, indem die Membran sich einstülpt und eine winzige Blase um die Nahrungsmoleküle bildet. Pinozytose nennt man diesen Vorgang, die Zelle »trinkt«. Die Bläschen wandern durch die Zelle und werden am gegenüberliegenden Pol wieder ausgeschieden; der Stoff ist vom Körper aufgenommen! Welche Kraft treibt diese Nahrungspakete? Man nimmt heute mit Recht an, daß diese Partikeln, getrieben vom »Wind der Brownschen Molekularbewegung«, durch die Zelle »segeln«.

So kann man sich schematisch den Mechanismus der Bewegung eines Pinozytose -Bläschens durch eine Zelle vorstellen. Vom Entstehungsort (E) an führt es in der Zelle zufallsgesteuerte Brownsche Bewegungen aus, bis es am Rezeptor (R) festgehalten und aufgelöst wird.



Allerdings nicht so elegant wie der Segler auf dem Wasser. Vielleicht sind bestimmte »Schienen« gelegt, d. h. innere Grenzflächen, die die Bewegung nach unsinnigen Richtungen hemmen. Wir wissen das noch nicht, jedenfalls gibt es an den Stellen, wo die Nahrungsstoffe wieder ausgeschieden werden sollen, bestimmte Rezeptoren, die die Teilchen festhalten. Stoßen die Nahrungspakete auf unspezifische Stellen, so werden sie wieder abgewiesen. Unsinnig, ziellos torkeln sie in der Zelle hin und her, bis sie schließlich auch einmal an die richtigen Empfänger kommen. Diese halten sie fest, »wickeln« sie auf und verarbeiten den Inhalt. Nicht die schnellste Post! Zweifellos, aber eine sichere und eine billige, denn bezahlt wird sie von der Wärmebewegung. Wo liegt hier die »Segelkunde«, die richtende Information? Nun, in der »Adresse« des Paketes und im Erkennen des Empfängers. Hier ist also den Bläschen eine molekulare Information aufgeprägt, die an der entsprechenden Rezeptorstelle erkannt wird. Diese Information liegt in der spezifischen Struktur eines Eiweißes, stammt also wieder aus der Erstinformation.

Wir wollen uns jetzt nicht für die vielen Beispiele ähnlicher Mechanismen im zellulären Geschehen interessieren. Für uns ist das Prinzip wichtig! Chaotische Energie + biologische Information = biologische Funktion!

Bis heute sind wir noch nicht recht in der Lage, die Information zahlenmäßig auszudrücken und einzurechnen. Lange Zeit glaubte man, das »bit« der Nachrichtentechnik wäre das geeignetste Informationsmaß. Diese Konzeption erwies sich nicht als tragfähig. Heute gibt es verschiedene verbesserte Ansätze, befriedigende Lösungen oder Lösungswege sind allerdings noch nicht gefunden worden.

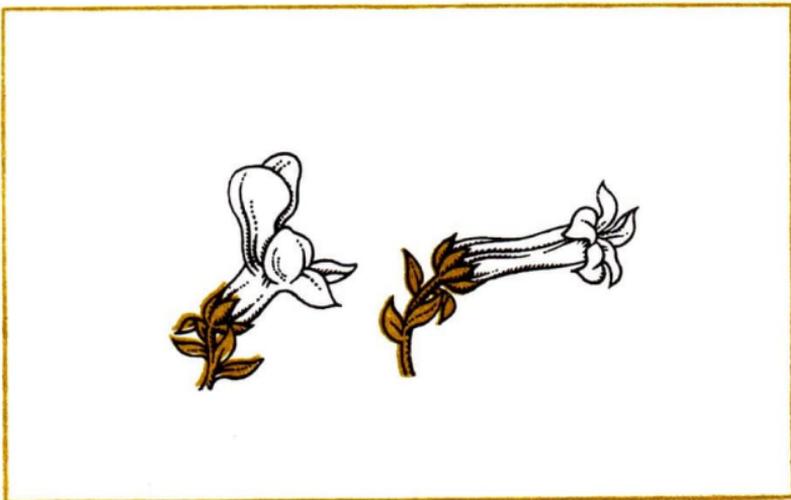
An diesem einen Beispiel wurde deutlich, daß die sinnlose Translationsbewegung, das Chaos der Wärmebewegung, nicht nur lebensfeindlich wirkt, sondern eingebaut in das Konzept des Lebens, ja sogar notwendige Voraussetzung der meisten Lebensfunktionen ist.

Ein besonders einleuchtendes Beispiel zur Illustration dieser Behauptung ist die Darwinsche Idee der Evolution. Wir haben viel von Mutationen im Zusammenhang mit Erbschäden gehört. Mutationen sind sprunghafte Änderungen des Erbgutes. Sei es, daß in der Kette des DNS-Fadens ein Glied ausbricht, vertauscht oder verändert wird, sei es, daß ganze Chromosomen sich ändern. Die meisten Mutanten, so müssen wir annehmen, sind nicht lebensfähig, sie treten in der Population

nicht in Erscheinung. Viele Mutationen werden jedoch durch Abnormität in Körperbau und Funktion sichtbar. Ursache solcher Mutationen sind in den meisten Fällen Zufallsereignisse. Hier ist es zwar weniger die Wärmebewegung, sondern mehr die Molekülveränderung durch Energiequanten hoher Energie, etwa der kosmischen Strahlung, dennoch bleibt es ein Einbruch der Statistik in die biologische Ordnung. Überhandnehmen darf diese Erscheinung nicht, sie würde jede Organisation zunichte machen. Organismen mit verschiedenen Sicherheitsmaßnahmen zur Minderung dieses Einflusses haben daher dominiert. Gleichzeitig weiß man seit Darwin jedoch, daß nur durch diese ständige Variation mit anschließender Selektion eine Entwicklung bis zum Menschen möglich war.

Doch bleiben wir bei dem konkreten Fall der statistischen Wärmebewegung der Moleküle. Das Beispiel der Brownschen Molekularbewegung ist eigentlich sehr speziell und erscheint weit hergeholt. Wir führten es an, einmal, weil es recht anschaulich ist, andererseits, weil es demonstriert, daß die Wärmebewegung sogar lichtoptisch wahrnehmbare Körper ergreift. Es ist ein sichtbarer Modellfall für jede Molekularbewegung.

Eine Mutante: Einbruch der Statistik des mikrophysikalischen Chaos in die genetische Ordnung des Lebens. Mikrophysikalische Veränderungen sind makroskopisch sichtbar. Das Darwinsche Konzept der Evolution wäre ohne Mutationen nicht denkbar.



Im Grunde genommen ist jedoch die Molekularbewegung selbst viel wichtiger und interessanter. Sie bildet die Ursache von Stoffbewegungen im weitesten Sinne. Stoff kann transportiert werden, Stoff kann aus einem anderen entstehen oder in einen anderen umgewandelt werden.

Dafür wieder ein Beispiel: Jeder weiß, daß sich Zucker in heißem Tee viel schneller löst als in kaltem! Auch jede chemische Reaktion läuft bei höheren Temperaturen schneller ab. Warum? Weil jede Stoffumsetzung, jeder Lösungsprozeß ein Resultat von Molekülstößen ist. Je höher die Temperatur, je häufiger also die Stöße, um so schneller verläuft die Reaktion. Bleiben wir beim Lösungsprozeß unseres Zuckers im Tee! Unübersehbar viele Zuckermoleküle liegen wohlgeordnet in einem Zuckerkristall und werden hoffnungslos durch Wassermoleküle beschossen. Hoffnungslos, weil der Lösungsprozeß ohne Einhalt bis zum letzten Zuckermolekül erfolgt. Selbst wenn der Lösungsprozeß langsam verläuft, sind es doch pro Sekunde ungeheuer viele Moleküle, die aus dem Kristallverband herausgeschlagen werden und in Lösung gehen.

Was sind das für Zahlen, die wir so allgemein mit »unübersehbar«, »ungeheuer« bezeichneten? Wir wissen heute sehr genau, daß 1 Mol eines Stoffes $6 \cdot 10^{23}$ Moleküle enthält, also eine 6 mit 23 Nullen. Wieviel ist ein Mol? Man bezeichnet damit so viel Gramm eines Stoffes, wie sein Molekulargewicht beträgt, und das Molekulargewicht ist, grob gesprochen, die Zahl, die angibt, um wievielfach das betreffende Molekül schwerer als ein Wasserstoffatom ist. Kennt man die chemische Formel einer Verbindung, so kann man das Molekulargewicht aus Tabellen leicht errechnen. Das H_2O -Molekül ist 18mal schwerer als Wasserstoff, 18 g Wasser ist folglich ein Mol und enthält also $6 \cdot 10^{23}$ Moleküle. Die gleiche Anzahl von Rohrzuckermolekülen befindet sich in 342 g Zucker. Diese Molekülzahl gibt eine Vorstellung von dem, was wir als »ungeheuer viel« bezeichnen.

Ungeheuer viele Wassermoleküle bombardieren ständig den Zucker und lösen selbst bei langsamstem Lösungsvorgang eine sehr große Zahl von Zuckermolekülen aus dem Kristallverband. Was interessiert uns eine Zehnerpotenz mehr oder weniger bei solchen Zahlen!

Wir haben auf der Erde größenordnungsmäßig 10^9 Menschen. Das sind zugleich viel und wenig im Vergleich zu den 10^{23} Molekülen pro Mol. Wir können ausrechnen, wieviel Menschen pro Minute geboren werden, wieviel sterben! Es sind so viele,

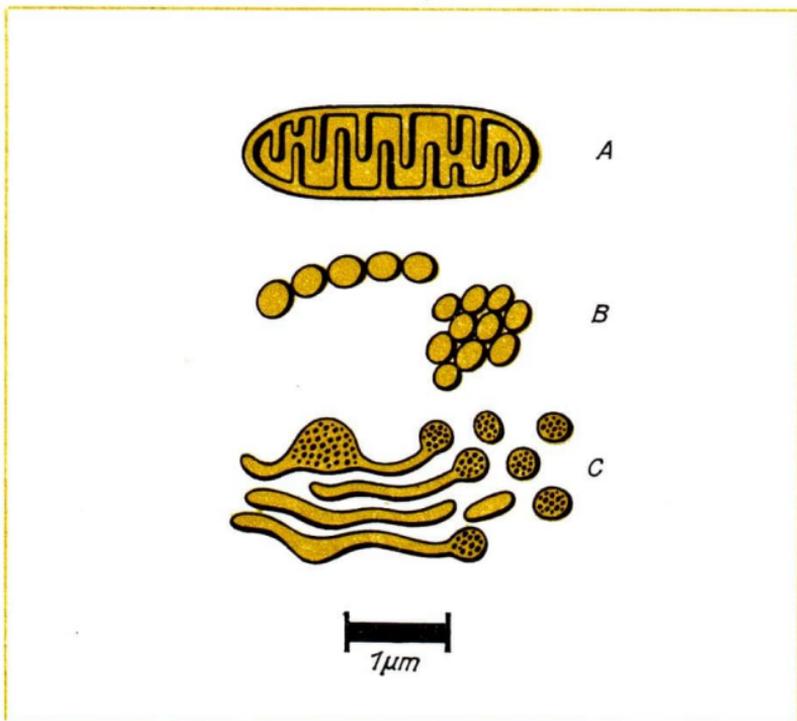
daß wir beinahe noch von einer kontinuierlichen Zu- und Abnahme sprechen können. Über große Zeiträume hinweg kann man das auch bei Betrachtung der Bevölkerung einer Großstadt.

Engen wir den Personenkreis ein, beispielsweise auf die Anzahl von 30 bis 40 Menschen, die zum näheren und fernerem Bekanntenkreis eines jeden von uns gehören, so ist eine Geburt oder ein Todesfall ein außergewöhnliches Ereignis. Wir sehen, daß wir beim Übergang von der großen zur kleinen Zahl gleichzeitig von der Kontinuität zum statistischen Einzelergebnis kommen.

Auch in der Molekularbiologie wird die große Zahl 10^{23} klein, wenn der interessierende Raum klein wird, den wir betrachten. Es gibt Lebenseinheiten, deren Durchmesser kleiner als $1 \mu\text{m}$ ist. Denken wir an ein Mitochondrium, diese kleine, durch eine Doppelmembran gegen das Zellvolumen wohl abgegrenzte Zellorganell, dem Kraftwerk der Zelle mit seinem komplizierten Enzymsystem. Betrachten wir uns doch einmal diesen Fall näher. Die Enzyme in diesem Mitochondrium sind in ihrer Funktion eng an das Vorhandensein vieler Substanzen gebunden. Eine besondere Rolle spielt der sogenannte pH-Wert des Milieus, d. h. der Säurewert des Mediums. Ist das Innere des Mitochondriums neutral, so sind gleichviel Wasserstoff- wie Hydroxylionen vorhanden, genaugenommen 10^{-7} Grammionen pro Liter, oder sagen wir allgemein 10^{-7} Mol/l. Wie wir jetzt wissen, sind in einem Mol $6 \cdot 10^{23}$ Moleküle (bzw. Atome oder Ionen), d. h., in einem Liter einer neutralen Lösung sind $6 \cdot 10^{16}$ H^+ -Ionen vorhanden.

Nehmen wir der Einfachheit halber an, das Mitochondrium habe einen Rauminhalt von $1 \mu\text{m}^3$, das sind 10^{-15} Liter. Dann schwimmen in diesem Zellorganell folglich nicht mehr als $6 \cdot 10^{16} \cdot 10^{-15} = 6 \cdot 10^1 = 60$ Wasserstoffionen herum! Aus einer großen Zahl wurde eine kleine! Was sind 60 Ionen, wenn von dem Zufall, daß eines davon mit einem Enzymmolekül im rechten Moment an der rechten Stelle zusammenstößt und eine chemische Reaktion auslöst, ein biologischer Vorgang abhängt? Ist die Kontinuität der Funktion, die »Betriebssicherheit« des Mitochondriums, noch gewährleistet? Schließlich kann dem Zufall in einem derart durchorganisierten System wie dem biologischen kein großer Raum eingeräumt werden.

Wir stoßen hier auf ein fundamentales biologisches Problem. Im ersten Abschnitt dieses Buches hatten wir gefragt, warum der Elefant nicht größer, die Maus nicht kleiner sein kann. Es



Kleinste Räume biologischer Organisation, durch Membranen wohl abgegrenzt von ihrer Umgebung. Wieviel Moleküle eines Stoffes beinhalten sie? Kann man hier die Begriffe der Reagenzglas-Chemie, wie Konzentration, Viskosität, pH-Wert usw. überhaupt noch anwenden? A – Mitochondrium B – Kokken C – Golgi-Apparat mit Sekretbläschen.

waren Fragen, die mit Hilfe der Makrophysik und der Physiologie beantwortet werden konnten. Jetzt fragen wir: Warum kann die Zelle, ein Einzeller, ein Bakterium nicht kleiner sein? Diese Frage hängt offenbar tatsächlich mit dem Kampf um Betriebssicherheit, um Zuverlässigkeit des Funktionierens, zusammen. Eine Zelle ist gerade so groß, daß sie den statistischen Fluktuationen des thermischen Chaos noch standhalten kann. Das kann sie aber nur, wenn in der für einen biologischen Prozeß zur Verfügung stehenden Zeitspanne eine notwendige Stoßzahl mit genügender Sicherheit erfolgt. Hier kommt also die Zeit mit ins Spiel! Wir sahen es schon in unserer Bevölkerungsstatistik. Mit Sicherheit können wir behaupten, in eben dieser Minute, noch ehe sich der Sekundenzeiger an unserer Uhr

einmal gedreht hat, wird irgendwo auf der weiten Welt ein, mindestens ein Kind geboren. Sehr unsicher wird die Aussage schon, wenn wir sie auf unser Land beziehen. Erweitern wir aber die Zeitspanne auf eine Stunde, einen Tag, so können wir auch dann Sicherheit in unsere Aussage stecken.

Wieder zurück zur Molekularbiologie! Wenn die Wahrscheinlichkeit eines günstigen Zusammenstoßes mit kleiner werdenden Volumina geringer wird, dann muß eben das Zeitintervall länger gewählt werden. Oder sagen wir allgemeiner: kleinere Zellen müssen langsamer sein! Es gibt also eine Raum-Zeit-Korrelation im Molekularen.

Natürlich sind wir jetzt neugierig, den Raum-Zeit-Faktor zu kennen. Wie klein und wie schnell ist ein bestimmtes System? Hier liegen jedoch noch Probleme, die uns bisher ein gebieterisches Halt zurufen. Was wissen wir schon über die Reaktionen in diesen Räumen? Die Chemie hat mit großem Fleiß Reaktionen im Reagenzglas erforscht. Auch dort gibt es noch viele Fragezeichen, doch einiges ist uns recht gut bekannt. In einer Lösung gibt es viele, ungeheuer viele Moleküle und Ionen. Sie sind gleichartig, ungerichtet, durchmischt. Anders in der Zelle! Die Zelle besteht praktisch nur aus Grenzflächen und kleinsten kapillaren Räumen dazwischen. Diese Grenzflächen sind wohlorganisiert. Wir sprachen schon von der Zellmembran als einem Beispiel dafür. Auf den meisten Grenzflächen sitzen Enzymmoleküle. Sie tragen Ladungen. Andere Moleküle dazwischen sind auch elektrisch geladen. Diese Ladungen ziehen Ionen an, die sich in einer mehr oder weniger kompakten Schicht anlagern. Es entsteht eine sogenannte Doppelschicht positiver und negativer Ladungen. Dazwischen spannt sich ein elektrisches Feld unvorstellbar hoher Intensität aus. Man rechnet mit einer Feldstärke bis zu 10 Millionen Volt pro Zentimeter! Gerade so viel, daß die Moleküle nicht auseinandergerissen, ionisiert werden. Doch diese Felder wirken mit starker Kraft auf die Moleküle. Sie richten geladene Moleküle aus und polarisieren ungeladene.

Noch wissen wir fast nichts über die Wirkung dieser Felder im biologischen Bereich, noch ahnen wir nur, daß auch hier der Kampf des Kosmos gegen das Chaos tobt. DNS-gespeicherte Informationen, realisiert in der Struktur der Eiweiße und ihrer Lage zueinander, organisiert ein elektrisches Feld, das dem Chaos Einhalt gebietet. Hier herrscht eine Ordnung, die uns das Elektronenmikroskop nicht abbildet, die wir berechnen müssen. Wir brauchen heute schon Rechenmaschinen,

um die Gleichungen für die elektrischen Felder an glattesten Metallelektroden, dem Quecksilbertropfen z. B., zu berechnen. Über die Verhältnisse an einer biologischen Oberfläche mit einer zum größten Teil noch unbekanntem Struktur können wir bisher nur Spekulationen anstellen.

Natürlich sind es nicht nur die elektrischen Felder im Mikroskopischen, die uns heute rätselhaft sind. Viele physikalische Größen, wie die Viskosität, die Oberflächenspannung, die Elastizität, ja sogar die Temperatur, sind für große Systeme definiert. Sie lassen uns im Stich, wenn wir kleine und kleinste Systeme, inhomogene Systeme, Systeme im ausgelenkten Gleichgewicht, arbeitend, funktionierend, entropieproduzierend, betrachten. Hat das biologische System überhaupt eine Temperatur? So unsinnig diese Frage scheint, sie ist bisher nicht zu beantworten. Temperatur ist die Eigenschaft einer »kanonischen Gesamtheit« von Teilchen, wie der Physiker sagt. Einer Teilchengesamtheit, die sich durch gegenseitige Stöße untereinander angeglichen hat. In einem biologischen System kommt es vielleicht gar nicht zu einem solchen Ausgleich, die Reaktionsprodukte werden von einem Molekül zum anderen weitergeschleust, beschleunigt und gelenkt vom elektrischen Feld der in der Struktur geordneten Moleküle. Jedes Teilchen hat eine andere »Temperatur«.

Wir kommen in den Bereich der Spekulationen. Ein solcher Exkurs ins Phantastische ist nur vertretbar, wenn wir daraus Anregungen zu neuen, kritischen Untersuchungen schöpfen. Auch hier ist er nur zu verstehen als ein Ausblick auf die vielen ungelösten Probleme, die den Molekularbiologen erwarten, die er jedoch nur lösen kann in enger Gemeinschaft mit dem Physiker, dem Spezialisten der Quantentheorie, der statistischen Physik der Wellenmechanik.

Zum Ausklang

»Der Vorhang zu, und alle Fragen offen!« Ist überhaupt ein Biologe ein Biologe? Vom Spezialisten, der über nichts alles weiß. Die Sintflut der Information. Kollektives Forschen als einzige Rettung. Kann man ein Pferd von hinten aufzäumen? Oder: Wie werde ich ein Biologe? Soll sich die Biologie vor ihren Nachbarn fürchten? Das neue Bild der Biologie. Es gibt sie also doch!

Was ist eigentlich Biologie? – Mit dieser Frage begannen wir unsere Diskussion. Es war nicht das Ziel dieses Buches, diese Frage zu beantworten. Andererseits ist es möglich, daß der Leser jetzt, am Ende der Lektüre, darüber mehr Unklarheit hat als zuvor. Muß ein Biologe gleichzeitig Chemiker, Kybernetiker, Quantenphysiker, Elektroniker, Thermodynamiker usw. sein? Kann er das überhaupt? Gibt es aus diesem Grund vielleicht überhaupt keinen Biologen mehr, sondern nur noch Physiker, Chemiker, Mathematiker, Techniker, die sich mit Fragen des Lebens beschäftigen?

Diese Fragen sind ernst und wichtig. Sie lassen sich nicht mit einem einfachen Ja oder Nein beantworten. Es erscheint notwendig, daß wir uns hier, am Schluß dieses Buches, noch einmal mit ihnen beschäftigen. Sicherlich sind es viele Probleme, die angeschnitten wurden. Wir wollen versuchen, sie etwas zu ordnen und nacheinander zu behandeln.

Zweifellos ist der Eindruck richtig, daß Biologie heute nur zu betreiben ist, wenn Kenntnisse vieler naturwissenschaftlicher, mathematischer und technischer Disziplinen Berücksichtigung finden. Ein Student der Biologie widmet heute mehr als die Hälfte seiner Studienzeit nichtbiologischen Nachbardisziplinen. Das gehört einfach zu seinem Rüstzeug; ganz gleich, auf welchem Gebiet der Biologie er einmal arbeiten wird. Hat er besondere Neigungen zu den Grenzgebieten, dann spezialisiert er sich entsprechend; er wird Biochemiker, Biophysiker.

Unser naturwissenschaftliches Wissen ist heute so umfangreich, daß nur noch Spezialisten Aussicht auf Erfolg in der Forschung haben. Es gibt heute keinen Physiker oder Chemiker mehr, der alle Gebiete seines Faches so überblickt, daß er über spezielle Probleme und neueste Forschungsergebnisse überall informiert ist. Deshalb ist es nicht verwunderlich, daß auch ein Biologe dies nicht kann; ein Biologe, dessen Untersuchungsobjekt die am höchsten entwickelte und komplizierteste Struktur der Natur darstellt. Die Zersplitterung in Spezialgebiete geht weit, die Spezialgebiete, die ein einzelner heute noch verantwortlich überblicken kann, werden immer enger.

Vielleicht ein Beispiel dazu: Eine grobe Abschätzung ergibt, daß täglich auf der Welt etwa 10 wissenschaftliche Veröffentlichungen erscheinen, die speziell die neuesten Forschungsergebnisse über die biologische Zellmembran mitteilen. Selbst wenn jeder dieser Artikel nur 5 Seiten lang wäre, die meisten sind länger, so müßte ein auf diesem Gebiet arbeitender Forscher täglich 50 Seiten anspruchsvollen wissenschaftlichen Textes lesen und geistig verarbeiten. Das ist kein Romantext! Da sind zum Teil im Telegrammstil Versuchsanlagen beschrieben, mathematische Formeln abgeleitet, Kurven diskutiert, und das Ganze natürlich fast ausschließlich fremdsprachig. Selbst wenn er dies schaffen würde, dann wüßte er zwar, was andere auf diesem Gebiet tun, hätte aber selbst keine Minute Zeit zu eigener Forschungsarbeit.

Die Folgen dieses Umstandes sind, daß man sich aus diesen 10 Artikeln pro Tag etwa 1 bis 2 herausucht, die ganz speziell das eigene eng umgrenzte Arbeitsthema betreffen. Membranbiologie ist noch zu weit gefaßt. Man unterteilt weiter: Biochemie des aktiven Transportes durch die Membran, elektrochemische Erscheinungen des Aktionspotentials, Zuckertransport durch die Membran von Darmzellen usw. Hat man diese Einschränkung getroffen, so ist man nicht nur auf dem laufenden, es bleibt auch noch Zeit, selbst zu forschen. Doch führt diese Spezialisierung nicht am Ende zu einem Fachidioten, zu einem Menschen, der, wie man in extrapolierender Überspitzung sagt, über ein immer kleiner werdendes Gebiet immer mehr weiß, bis er schließlich über alles nichts weiß? Diese Gefahr ist heute groß!

Eine Erfordernis moderner Forschung ist die Gemeinschaftsarbeit von Wissenschaftlern sehr unterschiedlicher Spezialisierung an einem gemeinsamen Problem. Elektroniker

entwickeln und überwachen die komplizierte Meßanlage, Biologen präparieren das biologische Objekt, Chemiker analysieren die Zusammensetzung desselben, Physiker und Mathematiker verrechnen die Meßdaten. — Das klingt sehr einfach und überzeugend, so kann man es jedoch nur in starker Vereinfachung sehen.

Die Forschung ist nicht vergleichbar mit der Produktion eines Gebrauchsgegenstandes. Ein jeder Gegenstand unseres Alltags ging, bevor er zum Verbraucher gelangt, durch die Hände vieler Spezialisten. Dabei braucht nicht unbedingt jeder dieser Facharbeiter Kenntnis von der Art des fertigen Produktes zu haben. Stellt beispielsweise ein Arbeiter Scharniere her, so weiß er nicht, ob diese in einem Schrank, einer Musiktruhe, einem Gerätebehälter, einem Klavier oder sonstwo eingebaut werden. Es interessiert ihn nicht, es braucht ihn nicht zu interessieren; für ihn ist nur wichtig zu wissen, daß Scharniere dieser Ausmessungen irgendwo benötigt werden.

Im Gegensatz dazu muß im Forschungskollektiv jeder über das Ganze genau unterrichtet sein. Der Elektroniker muß die elektrischen Parameter des zu untersuchenden biologischen Objektes kennen, um die Meßtechnik effektiv und fehlerfrei einsetzen zu können. Der Physiker muß eine Übersicht über die Vielzahl biologischer Erscheinungen haben, die die Meßergebnisse verfälschen können. Der Biologe muß auf Grund der Anforderungen seiner Kollegen in der Lage sein, das günstigste Versuchsobjekt zu wählen. — Doch vor allem: Alle müssen das Problem kennen, müssen wissen, was bisher in der Welt auf diesem Gebiet getan wurde, welches die sinnvollste Fragestellung ist, nämlich die Fragestellung, die den schnellsten und effektivsten Erkenntnisgewinn verspricht. Auch müssen die Meßergebnisse ausgewertet und die neuen Erkenntnisse in Arbeitshypothesen oder Theorien formuliert werden. Alle treiben also Biologie! Sind deshalb alle Mitarbeiter dieses Teams Biologen?

Wenn wir denjenigen Forscher einen Biologen nennen, der das lebende System untersucht, dann sind tatsächlich alle Mitarbeiter einer solchen Forschungsgruppe Biologen — unabhängig von ihrer Ausbildung. Bezeichnen wir jedoch als Biologen einen Wissenschaftler, der die derzeitigen bekannten allgemeinen Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten des Phänomens Leben beherrscht, unabhängig davon, auf welchem Spezialgebiet er gerade arbeitet, so muß die Frage verneint werden.

Damit sind wir schon mitten in der zweiten Problematik, die eingangs angeschnitten wurde: Gibt es wirklich eine echte Biologie mit einem spezifischen Denkgebäude, typischen Gesetzmäßigkeiten usw., oder löst sich alles auf in spezielle Probleme der Physik und Chemie des Lebens? Auch dazu ein konkretes Beispiel mit Gegenbeispiel: Ein mathematisch wenig Vorgebildeter stellt fest, daß sich manches Problem des Alltags durch Differentialgleichungen beschreiben läßt. Das interessiert ihn; er beschließt, sich näher damit zu befassen. Zunächst kauft er sich ein Lehrbuch über Differentialgleichungen, um sich zu informieren. Sogleich stellt er fest, daß seine Kenntnisse der Differentialrechnung nicht ausreichen, das Buch zu verstehen. Er kauft sich ein Lehrbuch dieses neuen Gebietes. Nach den ersten Seiten stößt er auf das »lim«-Zeichen. Was ist das? Er wird verwiesen auf die Infinitesimalrechnung, auf Grenzwertprobleme, Reihenentwicklung. Wieder Lehrbücher! Dann folgen Funktionen, Vektoren – kurz, sehr bald ist er von einem Berg Lehrbücher umgeben und stellt fest: da hilft nur die Volkshochschule! Hier muß systematisch von der Pike auf gelernt werden!

Ein ähnliches Beispiel könnte man auch aus der Physik erbringen. Auch hier ist ein sicherer Grundstock Voraussetzung für jedes Verständnis eines Spezialproblems. Das ist der Grund dafür, warum ein Biologe so selten den Weg zur Physik und Mathematik findet. Wer hat schon Zeit, systematisch von vorn zu beginnen?

Doch nun das Gegenbeispiel: Ein Physiker, Chemiker, Mathematiker oder auch ein Laie obengenannter Art interessiert sich für ein spezielles Problem der Biologie – beispielsweise für das Bakterienwachstum. Er hat es leichter als sein Kollege vom ersten Beispiel. Zwar tauchen auch in einem Lehrbuch der Bakteriologie viele Begriffe auf, die er nicht kennt. Bei manchen muß er nachsehen, manche kann er überlesen. Mit einigem Fleiß weiß er nach relativ kurzer Zeit genügend über die Bakterien, um sein mathematisches, physikalisches oder sonstiges Spezialwissen darauf loszulassen. Ist er damit ein Biologe geworden? Sicherlich kann er Wertvolles leisten, wenn er sich mit einem »klassischen« Biologen zusammentut. Er hat jetzt mehr Verständnis für biologische Probleme. Seine unvoreingenommene, durch eine andere Disziplin geprägte und geschulte Denkweise kann sehr fruchtbar sein. Doch kann es auch vorkommen, daß er sich in der Biologie aufführt wie der berühmte Elefant im Porzellanladen. Seine unbefangene Igno-

ranz kann ihn dazu verleiten, wilde Theorien aufzustellen, die der Überprüfung an weiteren biologischen Sachverhalten nicht standhalten oder einfach intellektuelle Spielereien ohne jede Bedeutung sind. Beispiele gibt es die Fülle. Wie oft schießt man mit Kanonen nach Fliegen und dann noch daneben. Ist der Formelapparat genügend kompliziert, dann findet sich auch nicht so schnell ein Biologe, der die Spiegelfechterei durchschaut.

Es ist einfach so, daß die Biologie im Gegensatz zur Mathematik und Physik nicht über jene Schranken verfügt, die dem Fremden den Eintritt an jeder beliebigen Stelle verwehren. Und doch setzt schöpferische Arbeit die Kenntnis der Grundlagen dieses Wissensgebietes genauso voraus wie in Mathematik und Physik. Ein Bakteriologe muß auch die tierische Zelle kennen, er muß die Evolution in seine Betrachtungen einbeziehen und deshalb über eine gewisse Formenkenntnis verfügen. Evolution heißt heute nicht nur Formenvergleich, sondern auch Funktionsvergleich: Wie entwickelten sich bestimmte Enzymsysteme? Wo treten erstmals bestimmte biochemische Reaktionsmechanismen auf?

Es gibt also eine Biologie! Das Bild der Biologie ist nicht zerfressen, zersetzt worden durch das Eindringen von Ideen aus den Nachbardisziplinen. Im Gegenteil: Die moderne Biologie ist reicher geworden; reicher an Möglichkeiten, Einsichten und Erkenntnissen. Auch reicher an Forschern, denn das eben dargelegte Beispiel soll keineswegs den Physiker vor der Biologie warnen oder gar die Leistungen der Physiker auf diesem Gebiet herabsetzen! Die Liste der Nobelpreisträger der letzten Jahrzehnte würde diese Meinung widerlegen. In vielen Laboratorien arbeiten Physiker Seite an Seite mit Biologen, und viele Physiker sind Biologen im echten Sinne des Wortes geworden. Gleiches gilt für Chemiker, Mathematiker, Techniker. Die moderne Biologie hat wie jede Wissenschaft Ideenreichtum nicht zu fürchten.

Was wir hier in diesem kurzen Abriß darstellten, ist keine Konzeption einer modernen Biologie. Es ist eben Biologie einmal anders! Es sind Probleme, Anschauungen diskutiert, die sonst meist zu kurz kommen. Es sind Beispiele aus dem Bereich, den man heute mit dem Begriff der Biophysik zu umreißen sucht, unbeschadet der Tatsache, daß dieser Umriß sehr ungenau ist. Gerade die oben erwähnte Bereicherung der Biologie durch diese Spezialrichtung sollte zum Ausdruck gebracht werden. Es sollte versucht werden, zu zeigen, daß eine

allgemeine Biologie, also eine Bilanz allgemeingültigen, spezifisch biologischen Gedankengutes heute ohne die Berücksichtigung dieser Beiträge nicht möglich ist. Wenn der Leser geweckt, angeregt, agitiert wurde, so hat der Autor sein Ziel erreicht.

Der Autor ist ordentlicher Professor für Biophysik an der Sektion Biologie der Humboldt-Universität zu Berlin. Nach beendetem Biologiestudium arbeitete er in verschiedenen Instituten über Probleme des Strahlenschutzes, des Ionen-transportes und der Membranforschung. Durch Zusatzausbildung, vor allem in Mathematik, Physik und physikalischer Chemie, wurde er zum Biophysiker. Seit 1965 lehrt er dieses Fach und leitet seit 1970 ein Kollektiv, das Biologen der Fachstudienrichtung Biophysik ausbildet. (Siehe: »Einführung in die Biophysik«, VEB Gustav-Fischer-Verlag Jena, vom gleichen Autor.)

Nachweis umgezeichneter Originalabbildungen

Bauer, E.: Einführung in die Vererbungslehre, Berlin 1930
(Seite 143)

Canham, P. B.: J. Theoret. Biol. 26 (1970) 61 (Seite 55)

Haeckel, E.: Kunstformen der Natur, Leipzig 1904 (Seite 37)

Hesse, R., F. Doflein: Tierbau und Tierleben, 1. Bd., Leipzig
1910 (Seite 24)

Raup, D. M.: Science 138 (1962) 150 (Seite 41, 45)

Thompson, D'Arcy, W.: On growth and form, 2. Aufl. Cam-
bridge 1942 (Seite 47 und Einband)

Inhalt

- 7 Zur Einleitung
- 11 Kleines und Großes in Relation
- 36 Die biologische Gestalt im Koordinatensystem
- 59 »Panta rhei« – die Gestalt des Unbeständigen
- 89 Ein Blick ins Räderwerk des Lebens
- 121 Im Reich der Moleküle
- 149 Zum Ausklang

2. Auflage 1979, 11. bis 16. Tausend

Alle Rechte vorbehalten

© Urania-Verlag Leipzig · Jena · Berlin,

Verlag für populärwissenschaftliche Literatur, Leipzig, 1974

VLN 212-475/63/79 · LSV 1379

Lektor: Bernd Scheiba

Schutzumschlag, Einband und Illustrationen: Gerhard Bläser

Typographie: Claus Ritter

Printed in the German Democratic Republic

Satz und Druck: Gutenberg Buchdruckerei, Weimar

Buchbinderei: VOB Papier- und Plastverarbeitung Leipzig

Best.-Nr. 653 319 5

DDR 6,80 M