

akzent

Nikolai Scheikov

# Leben und Symmetrie



---

Nikolai Scheikov

# Leben und Symmetrie

---

Urania -Verlag Leipzig Jena Berlin

Autor: Dr. med. Nikolai Scheikov  
Medizinische Akademie, Sofia

Originaltitel: **Живот и симетрия**  
Verlag Narodna Mladesh. Sofia 1977  
Für die akzent-Reihe gekürzt und bearbeitet  
Übersetzer: Leo Korniljew

Illustrationen: Gerd Ohnesorge

*1. Auflage 1982*

*1.–20. Tausend. Alle Rechte vorbehalten*

© *Urania-Verlag Leipzig/Jena/Berlin*

*Verlag für populärwissenschaftliche Literatur, Leipzig, 1982*

*VLV 212-475/17182. LSV 1309*

*Lektor: Ewald Oetzel*

*Umschlagreihenentwurf: Helmut Selle*

*Typografie: Julia Strube*

*Fotos: Foto-Clauss (8, 117, 121), Klaus-Jürgen Hofer (16, 53, 108, 118), Nedjalka E. Krapscheva (20, 21, 22), Autor (25), Deutsche Fotothek Dresden (56)*

*Printed in the German Democratic Republic*

*Satz, Reproduktion und buchbinderische Verarbeitung:*

*INTERDRUCK Graphischer Großbetrieb Leipzig – III/18/97*

*Druck: Druckhaus Karl-Marx-Stadt – III/6/15*

*Best.-Nr. 6537305*

*DDR 4,50 M*



---

# Inhalt

---

## Symmetrie überall 7

### Eine wundersame linke und rechte Welt 9

Geometrie der Natur 26

Symmetrie bei Pflanzen 33

Symmetrie bei Tieren 43

Der menschliche Körper 53

Zwillinge 61

Rhythmen – die Symmetrie der Zeit 64

Hormone und Rhythmen 75

Wachen und Schlaf 83

»Linke« und »rechte« Moleküle 91

Ein Schlüssel und ein Schloß 96

Spiralen des Lebens, Spiralen des Todes 104

Symmetrie und Evolution 115

Wie sehen denn die »anderen« aus? 122



---

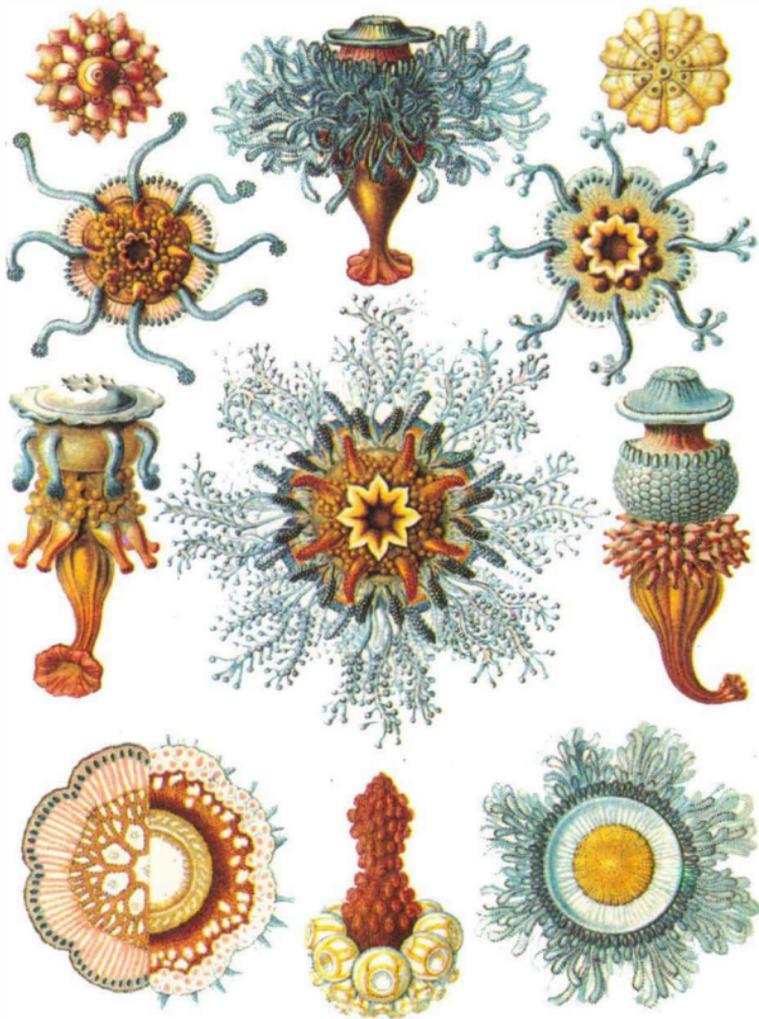
# Symmetrie überall

---

In der Natur existieren universelle Prinzipien und Gesetze. Zu diesen allgemeinen Prinzipien, durch die sich selbst die unterschiedlichsten Objekte einander in unerwarteter Weise »annähern«, gehört auch die Symmetrie. In der Wissenschaft und im Leben spielt sie eine große Rolle. So stehen beispielsweise zwei der bedeutendsten Entdeckungen unseres Jahrhunderts mit ihr in Zusammenhang: die »Entthronung« des Paritätsgesetzes in der Quantenmechanik und die Entschlüsselung des genetischen Codes lebender Organismen.

Die Biologie hat in einer der expansivsten Wissenschaftsentwicklungen der letzten Jahrzehnte zu einer Fülle neuer Erkenntnisse geführt. Vor allem die Forschungen auf den Gebieten der Molekularbiologie, Genetik und Immunologie haben einerseits zu einer enormen Wissensenerweiterung, andererseits aber auch zu der Einsicht beigetragen, daß die Anzahl der unaufgeklärten oder nicht bis ins letzte entschlüsselten biologischen Phänomene dadurch nicht kleiner, sondern eher größer geworden ist. Es ist noch alles im Fluß in der Biologie. Und dennoch besteht für den heutigen Menschen die Notwendigkeit, sich mit diesen Problemen auseinanderzusetzen, sei es, um sie für die Lösung praktischer Aufgaben zu nutzen oder um mögliche Gefahren und Schäden für sich selbst und seine Umwelt zu verhindern. Der Autor möchte dem Leser einige »Geheimnisse« der belebten Natur erschließen helfen und ihm den »tieferen Sinn« und die große Bedeutung von symmetrischen oder asymmetrischen Bauweisen in der

*Orchideenblüten (Cattleyen-Hybride)*



*Staatsquallen; aus Ernst Haeckels »Kunstformen der Natur«*

Natur deutlich werden lassen. Die dargestellten Strukturen sind das Ergebnis der Evolution. Es sind Formen, die sich als optimal unter den jeweils gegebenen Umweltbedingungen erwiesen und unter dem harten Selektionsdruck durchgesetzt haben. Auch die für zahlreiche Lebensvorgänge charakteristischen Rhythmen – allgemein in exogene und endogene<sup>1</sup> Rhythmen unterschieden – sind im Laufe einer langen Entwicklung entstanden.

<sup>1</sup> exogen: von außen stammend; endogen: von innen verursacht

---

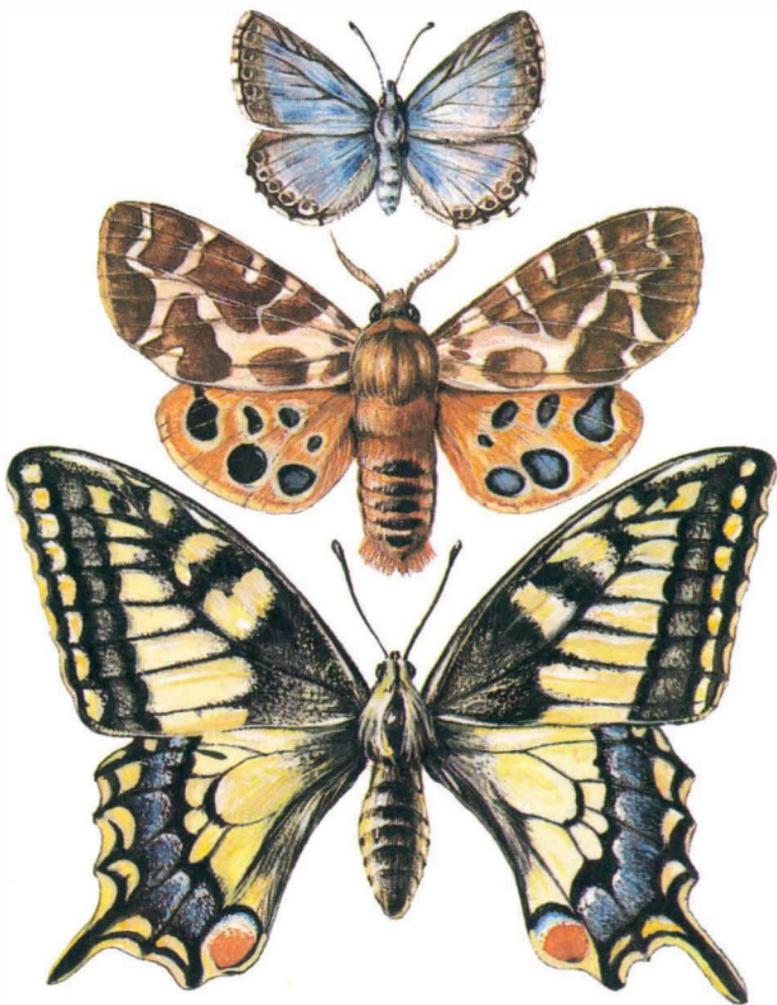
# Eine wundersame linke und rechte Welt

---

Haben Sie sich jemals darüber Gedanken gemacht, warum jeder Mensch einen linken und einen rechten Fuß hat und nicht zwei gleiche Füße? Warum haben wir zwei und nicht drei Hände, zwei Augen, zwei Ohren, aber nur einen Mund? Warum fällt es uns so leicht, einen Apfel in zwei gleiche Hälften zu teilen, während wir uns so schwer damit tun, wenn wir ihn in drei oder fünf Stücke teilen sollen? Kraft welchen Gesetzes wiederholen sich die schönen Zeichnungen und Farben des einen Schmetterlingsflügels bis ins kleinste Detail auf dem anderen? Warum haben Pferde und Hunde, Eidechsen und Schlangen, Ziesel, Fliegen, Kröten, Adler, Würmer, Bären, Igel, Nachtigallen und Haie eine »Rechts-links-Struktur«?

Ja, wir haben uns so an sie gewöhnt, daß wir sie als etwas ganz Selbstverständliches empfinden. »Rechts« und »links« ist immer rechts und links. Wir richten uns danach, und das bringt uns tausendfachen Nutzen, Ruhe und Sicherheit ... Doch halt! Das ist jetzt ganz wichtig: Haben wir uns an »rechts« und »links« gewöhnt? Oder verhält es sich gerade umgekehrt: Haben wir diese Begriffe nur geschaffen, weil wir uns darüber einigen mußten, was sich »rechts« oder »links« von uns befindet? Mit anderen Worten: Existiert diese »Zweirichtungsorientierung« objektiv, oder wurde sie vom Menschen erfunden?

Viele Gegenstände, deren wir uns bedienen, werden durch unseren Wunsch den genannten beiden Richtungen untergeordnet, obwohl sie an und für sich keine linke und rechte Seite haben. Jeder kann ganz leicht eine Armbanduhr aufziehen, die er am linken Arm trägt. Aber versuchen Sie einmal, die gleiche Uhr aufzuziehen, nachdem Sie sie



*Vollkommene zweiseitige (bilaterale) Symmetrie bei Schmetterlingen*

am rechten Handgelenk befestigt haben. Sie werden sich schnell davon überzeugen, wie schwer Ihnen das jetzt fällt, denn Armbanduhrer sind nun einmal dafür gedacht, am linken Handgelenk getragen und mit der rechten Hand aufgezogen zu werden. Sind die Uhren nun »rechts« oder »links«? Wir müssen feststellen, daß sie »Links«-Uhren sind, obwohl sich die Zeiger nach rechts bewegen. Bringen wir die Aufziehvorrichtung an der anderen Seite an, dann verwandeln wir die Uhr in eine »Rechts«-Uhr, für das rechte Handgelenk bestimmt. Sogenannte elektronische



*Großplattenseestern*

Uhren, die weder Zeiger noch Kronen zum Aufziehen besitzen, könnten hinsichtlich ihrer äußeren Beschaffenheit gleichermaßen als »rechte« oder »linke« Uhren gelten.

Diese Beispiele führen uns unvermeidlich zu der Annahme, daß »rechts« und »links« unsere rein menschlichen Begriffe sind. Ordnen wir etwa alles, was uns umgibt, der eigenen zweiseitigen Symmetrie unter? Wie wäre das bei einem Wesen, durch das wir uns mehrere Symmetrieachsen vorstellen können? Wenn ein Seestern mit Vernunft begabt wäre – wie viele Richtungen hätte die Welt für ihn? Und wenn wir selbst die Form eines fünfzackigen Seesterns hätten, wäre unsere Zivilisation dann nicht in einem bestimmten Sinn »fünfseitig«?

Nein, sagen die Physiker mit aller Entschiedenheit. Es gibt in der Natur zwei Hauptrichtungen; dies ist eine

objektive Eigenschaft der materiellen Welt, und wie viele Arme und Beine wir auch hätten, es könnte für uns doch keine andere als die »Rechts«-»Links«-Einteilung des Raumes existieren. Auch wenn wir einmal annehmen würden, daß irgendwo dreihändige Wesen lebten, hätte der Raum für sie nur zwei Seiten. Das ist so, weil die Welt im Grunde spiegelsymmetrisch ist, sagen die Physiker. Und dies bedeutet, daß es darin nicht drei, nicht fünf und auch nicht zehn, sondern nur zwei Richtungen gibt, worin sich eine Erscheinung gleichermaßen entwickeln kann, d. h., Symmetrie ist eine Eigenschaft des »leeren Raumes«. Ob wir diese Richtungen »rechts« und »links«, »vorn« und »hinten« oder »oben« und »unten« nennen, hat keine Bedeutung und hängt nur davon ab, welche Festlegung wir bezüglich der Relation unseres Standortes zu einem anderen Punkt im Raum treffen. Wenn wir einen Augenblick lang annehmen, sagen die Physiker, wir könnten sämtliche Körper aus dem Weltall entfernen – alle Planeten, Sterne, Gasnebel und umherirrende Teilchen –, dann wäre die verbleibende »Leere« ein ideales Beispiel für ein spiegelbildlich symmetrisches Objekt, und jeder physikalische – insbesondere jeder menschliche – Prozeß hätte darin nur zwei Richtungen, in denen er sich völlig gleichartig entwickeln könnte. Auch der Spiegel kann die Ereignisse, die sich vor ihm abspielen, nur »verdoppeln«, er kann sie weder verdrei- noch vervierfachen. Sobald wir eine der beiden Richtungen (die Richtung im Spiegel oder die Richtung vor dem Spiegel) mit »rechts« bezeichnen, sind wir gezwungen, der anderen Richtung in unserem Sprachgebrauch die Bezeichnung »links« zu geben.

Klar und eindeutig, nicht wahr? Wir räumen die Sonnen und die Planeten weg und erhalten einen idealen symmetrischen »leeren Raum«, dessen Eigenschaften allerdings noch nicht erklären, warum die Fliege ebenso wie der Hai zweiseitig symmetrisch sind. Es ist der gleiche leere Raum, auf dem die wichtigsten Prinzipien der gesamten klassischen Physik seit Galilei und Newton beruhen.

Wir wollen versuchen, das Symmetrieprinzip an einem einfachen Beispiel zu erläutern.

Wir begeben uns auf einen Ausflug ins Grüne. Vor uns erglänzt die spiegelglatte Oberfläche eines Sees. Rechts



*Entenjagd, symmetrisch gesehen*

davon ein Gehölz, links ebenfalls – die Zweige der Bäume spiegeln sich im Wasser. Seltsam: Wie ähnlich sie sich doch sind! Die Bäume, die Zweige und die Blätter, die sich im Wasser spiegeln, sehen verblüffend gleich aus. Während wir uns noch über diese ungewöhnliche Erscheinung wundern, kommt aus dem rechten Wäldchen ein Jäger. Aber was ist das? Gleichzeitig tritt aus dem linken Wäldchen ebenfalls ein Jäger heraus; beide tragen die gleiche

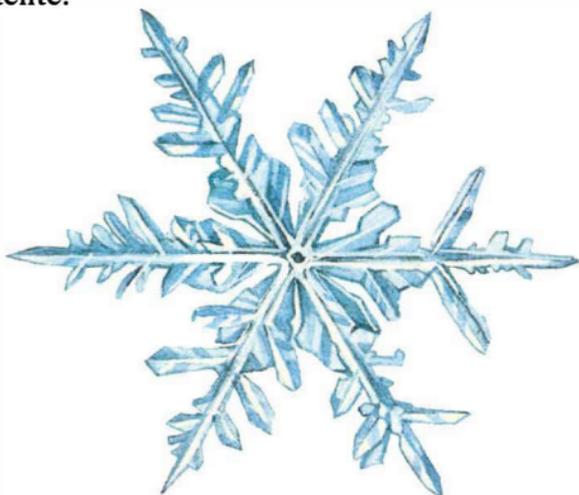
Kleidung. Sie ähneln einander wie zwei Tropfen Wasser; sie bewegen sich synchron wie auf Kommando. Noch ehe wir unsere Verblüffung überwunden haben, hören wir Flügelschlagen, und aus dem Schilf fliegen zwei Enten auf. Augenblicklich reißen die Jäger ihre Gewehre hoch, zielen, und dann knallt der Schuß. Die Bewegungen der Jäger waren so genau aufeinander abgestimmt, daß beide Schüsse nur als ein Schuß zu hören sind. Aber was ist mit den Enten? Wir schauen hin, und ... unsere Verblüffung findet ihre Erklärung: Mitten durch die Landschaft zieht sich ein riesiger Spiegel, dessen oberer Rand über die Wolken hinausreicht und dessen Seiten bis zum Horizont gehen. In Wirklichkeit hat es nur einen Jäger und auch nur eine Ente gegeben, und außerdem haben wir noch ihr Spiegelbild gesehen. Ist so etwas möglich? Natürlich gibt es einen derartigen Spiegel nicht, und unser Beispiel ist ein reines Gedankenexperiment. Das hindert uns aber nicht, folgende Frage zu stellen: Wenn alle diese Ereignisse wirklich stattgefunden hätten, wäre es dann möglich gewesen, daß der eine Jäger seine Ente getroffen, der andere jedoch verfehlt hätte? Wiederum sagen die Physiker kategorisch: Nein, das konnte nicht geschehen! Denn wenn sich vor uns wirklich ein Spiegel befunden hätte, dann wäre es unmöglich, daß der Jäger den Vogel traf, während sein Spiegelbild dies nicht fertigbrachte. So etwas hätte auch dann nicht geschehen können, wenn die handelnden Gestalten real existiert hätten, nur daß Menschen, Enten und Gewehre spiegelbildlich zueinander angeordnet waren, während die Kräfte, die sie in Bewegung setzten, und alle übrigen Bedingungen nach Charakter und Größe völlig übereinstimmten, nur eben spiegelbildlich seitenverkehrt. Unter diesen Bedingungen hätte jeder der beiden Jäger seine Ente getroffen. *Wenn die Ursachen zweier realer Ereignisse einander ähneln wie Gegenstände ihrem Spiegelbild, dann müssen auch die Folgen genau dieselben sein, als wären die einen Folgen das Spiegelbild der anderen.* Also müßten entweder beide Jäger ihre Enten verfehlen – oder treffen; und dabei an genau der gleichen Stelle treffen. Eine dritte Möglichkeit gibt es nicht. In unserer Welt gelten überall dieselben Gesetze, die es dem Spiegel »erlauben«, ein Bild ein- und desselben Gegenstandes zu entwerfen und

ihn auf diese Weise zu verdoppeln, nicht jedoch zu verdreifachen.

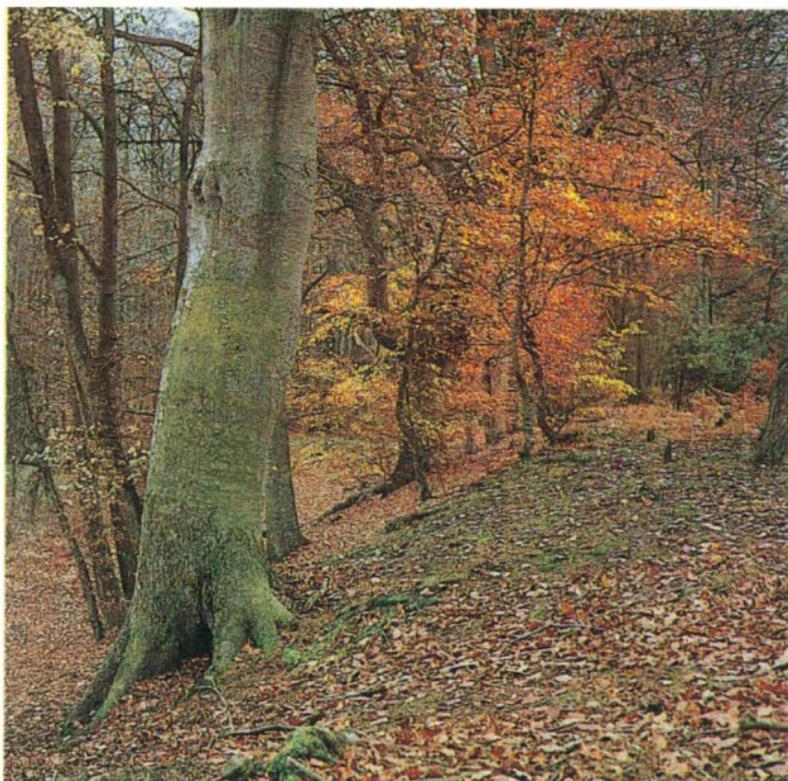
Verstehen wir nun besser, warum wir einen Apfel in zwei spiegelbildliche Hälften teilen können, nicht jedoch in drei oder fünf?

Fassen wir zusammen: Nicht der Mensch war es, der die zweiseitige Symmetrie erfand. Unsere Welt ist »links-rechts«, »vorn-hinten« oder »oben-unten« orientiert. Atome und Galaxien, Kristalle und geologische Gebilde, Pflanzen, Tiere und Menschen – sie alle stehen unter dem Einfluß dieses universellen Prinzips. Schon bald werden wir sehen, daß vieles im »Mechanismus« des Lebens, ja sogar die Eigenschaft »Leben« selbst, denkbar eng mit der Links- und Rechtseinteilung des Raumes verknüpft ist.

Aber nicht nur der Raum, auch die Zeit ist symmetrisch in dieser merkwürdigen Welt! Sehen Sie sich doch nur einmal an, in welcher Reihenfolge die Ereignisse in unserer Umgebung aufeinanderfolgen, wie unerbittlich eines nach dem anderen kommt! Nach 365,3 Tagen vollendet unser Planet einen Umlauf um die Sonne, und er beginnt den nächsten. Die Pflanzen blühen und tragen Früchte, die Zugvögel kommen und fliegen wieder weg, manche Tiere halten ihren Winterschlaf – das alles geschieht unter strenger Beachtung der Jahreszeiten. So folgt in der Natur Jahreszeit auf Jahreszeit immer in der gleichen Reihenfolge, die schon bestand, lange ehe der Mensch existierte und dies feststellte.



*Schneekristall*



*Natur im Rhythmus der Jahreszeiten: herbstlicher Wald*

Der Wechsel von Tag und Nacht wiederum diktiert andere Zyklen von Erscheinungen. Wenn der Tag erwacht, öffnen manche Blumen auf dem Feld ihre Kelche und wenden sie der aufgehenden Sonne entgegen, die Vögel erwachen, die Bienen schwärmen, und die Raubtiere der Nacht ziehen sich in ihre Höhlen zurück.

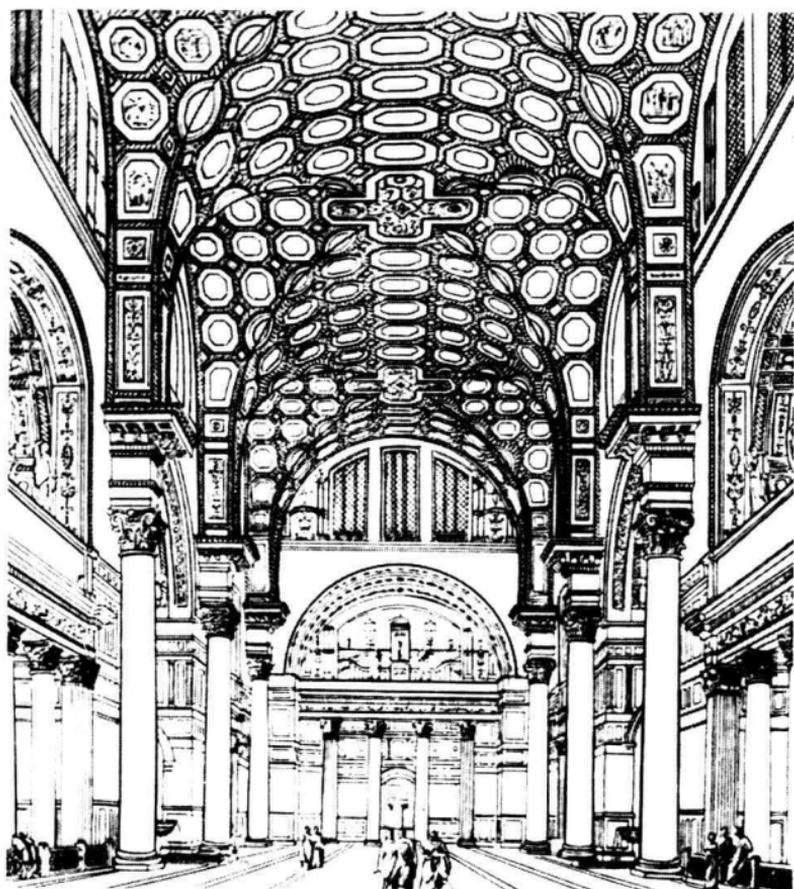
In den Zellen unseres Körpers vollziehen sich ununterbrochen die Prozesse der Synthese und des Zerfalls organischer Stoffe, der Oxydation und Reduktion, der Akkumulation und des Verbrauchs von Energie. Im eigenen Rhythmus schlägt das Herz, atmen die Lungen, arbeiten Gehirn, Magen, Nieren und die Drüsen, die ihre Hormone freisetzen.

Rhythmisch schwingen die elektrischen Ladungen der Atome ferner Sterne, und wir fangen ihre Schwingungen als Radiosignale auf. Zyklisch steigt und fällt die Luft-

temperatur im Tages- und Nachtverlauf, ebenso wie der Luftdruck, der natürliche Strahlungspegel der Erde oder die Intensität der kosmischen Strahlung. Das Dröhnen des Motors, hervorgerufen von der gleichmäßigen Kolbenbewegung, ist ein weiteres Beispiel für periodische Erscheinungen in der Zeit, wie übrigens auch der Lauf jedes Elektromotors, der mit Wechselstrom gespeist wird, streng periodisch ist.

»Zyklen«, »Rhythmen«, »Perioden« und »Jahreszeiten« – alle diese Begriffe sind uns ebenso bekannt wie »links« und »rechts« oder »oben« und »unten«, nur geben wir uns keine Rechenschaft darüber, daß wir es wiederum mit der Symmetrie zu tun haben, dieses Mal mit der Symmetrie von Erscheinungen in der Zeit. »Raum und Zeit sind symmetrisch«, das ist das Wesen des Weltalls, eine allumfassende Wahrheit, die für sämtliche Erscheinungen in der Natur, einschließlich der biologischen Erscheinungen, gilt. Aus der Symmetrie des Raumes »fließt« das Gesetz von der Erhaltung des Impulses, aus der Symmetrie der Zeit der Energieerhaltungssatz. Gibt es überhaupt ein materielles System, das diesen Gesetzen nicht unterliegt?

Architektur und angewandte Künste liefern uns Beispiele für die Symmetrie in Hülle und Fülle. Schon in der Vorzeit war den Menschen aufgefallen, daß das Auge bestimmte Kombinationen von Figuren und Formen oder Anordnungen von Linien und Farbflecken als angenehm empfindet. Die Proportionalität einer bildlichen Darstellung oder der architektonischen Silhouette eines Gebäudes gefällt uns, weil wir ihre harmonische Ganzheit und Geschlossenheit empfinden. Polyklet, einer der großen Bildhauer des Altertums im 5. Jahrhundert v. u. Z., hielt die Symmetrie für den Ausdruck der höchsten Proportionalität, für das Gesetz und die Bedingung der Vollkommenheit in der Kunst überhaupt. Ohne sich eines Fernrohrs bedienen zu können, erklärte Aristoteles die Sterne einzig deshalb für Kugeln, weil von allen geometrischen Körpern nur die Kugel absolut symmetrisch ist und darum am geeignetsten für den Ausdruck göttlicher Vollkommenheit sei. Ausgehend vom bekannten Prinzip des »aurea mediocritas«, d. h. des »Goldenen Schnitts«, verband er den Begriff »Symmetrie« auch mit jener von beiden Extremen



*Mittelsaal der Thermen des Caracalla, Rom, 3. Jh.*

gleich weit entfernten Mittellage, der die menschliche Seele zustreben müsse, wenn sich Tugend und Moral entwickeln sollten. So sei es beispielsweise am besten, wenn wir uns in der »Mittellage« zwischen Geiz und Verschwendung befänden.

Symmetrie entdecken wir bereits in den Zeichnungen des »Höhlenmenschen«: eine Kiefer, dargestellt durch einen vertikalen Strich mit mehreren schräg verlaufenden kurzen Strichen an beiden Seiten. So zeichnen Kinder einen Tannenbaum. Sowohl jener Künstler aus der Urgemeinschaft als auch die Kinder haben das Hauptelement der Baumform, nämlich ihre Symmetrie, richtig erfaßt.

Die Bildhauer, Architekten und Bauleute der Antike in

Ägypten, Griechenland, Rom, Indien und China haben wahre Meisterwerke der Kunst geschaffen, die uns noch heute in Erstaunen versetzen. Die bekannten Caracallathermen in Rom wurden im 3. Jahrhundert u. Z. erbaut. Ihre vollkommene Symmetrie im Inneren des Mittelsaals ist deutlich an unserer Zeichnung zu erkennen. Dieser Saal konnte 1 800 Personen aufnehmen. Das ganze in wahrhaft großartigem Stil gehaltene Bauwerk stellte einen großen Komplex mit Becken, Wannen, Sportplätzen, einer Bibliothek, Läden und vielen anderen Räumen dar, wo man seine Freizeit verbringen konnte.

Einen gänzlich anderen Stil, jedoch mit mindestens ebenso anspruchsvoller Symmetrie, sehen wir beim »Himmelstempel«, der 1420 in Peking erbaut wurde. Die Eigenart seiner architektonischen Konzeption steht im Zusammenhang mit der symbolischen Bedeutung seiner drei Hauptfiguren: dem Quadrat als Symbol der Erde (das

*Der Tempel des Himmels, Peking, 15. Jh.*

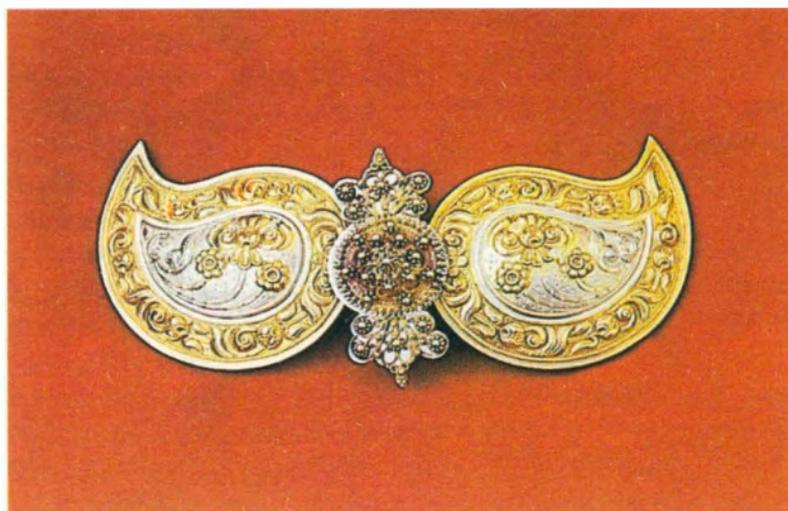


Fundament war quadratisch ausgeführt), dem Zylinder als Symbol des Menschen und dem Kegel als Symbol des Himmels.

Eine strenge zweiseitige Symmetrie finden wir auch bei Wappen, die besonders im Mittelalter verbreitet waren. Damals hatten nicht nur Staaten und Provinzen ihr eigenes Wappen, sondern auch jedes Königs- oder Adelsgeschlecht. Um ihre Macht und Größe auszudrücken, führten die Vornehmen unter den Wappeninhabern oft das Bild eines Löwen, eines Adlers oder eines anderen starken Tieres in ihrem Wappen. Gelegentlich waren formale Schönheitsvorstellungen so stark, daß die Künstler auf Wirklichkeitstreue und Ähnlichkeit mit der Natur verzichteten, nur, um zu beiden Seiten der Vertikalen das gleiche Bild zu erhalten. So kamen Adler mit zwei Köpfen auf, ein »heraldischer« Symmetrietyp, den wir in den Wappen einiger europäischer Monarchien aus der jüngeren Vergangenheit finden.

Das ästhetische Ideal und die Vorstellung vom Schönen ist auch im volkkünstlerischen Schaffen fest mit der Symmetrie verknüpft. Denken wir nur an die alten Kirchen in Târnovo, Samokov, Trjavna und Pazardžik mit ihren filigranverzierten Ikonostasen, an die Häuser der Wollweber, Händler und Steuereintreiber mit ihren durch

*Gürtelschnalle aus Kotel (VR Bulgarien)*





*Tracht einer jungen Frau aus dem Gebiet der Stadt Blagojevgrad in der VR Bulgarien*

Schnitzereien reich verzierten Schränken, den Dek-  
kenornamenten und den Wandmalereien!

Unter den geschickten Fingern bulgarischer Mädchen  
und Frauen entstanden wunderbare unwiederholbare  
Gewebe mit stilisierten Motiven, die Blumen, Früchte,  
Vögel und Tiere darstellen, entstanden farbenfrohe Läufer  
und Teppiche, Schürzen und Westen, gestickte Hemden  
und gestickte Strümpfe.

Geometrische Ordnung und Schönheit finden wir auch  
in den Mustern von Schüsseln, Töpfen und Krügen aus  
Keramik, in den Verzierungen von Truhen, Spinnrädern  
und anderen Haushaltsgegenständen, ebenso wie in Ver-  
zierungen eleganter Schnallen und sonstiger Schmuck-  
stücke.



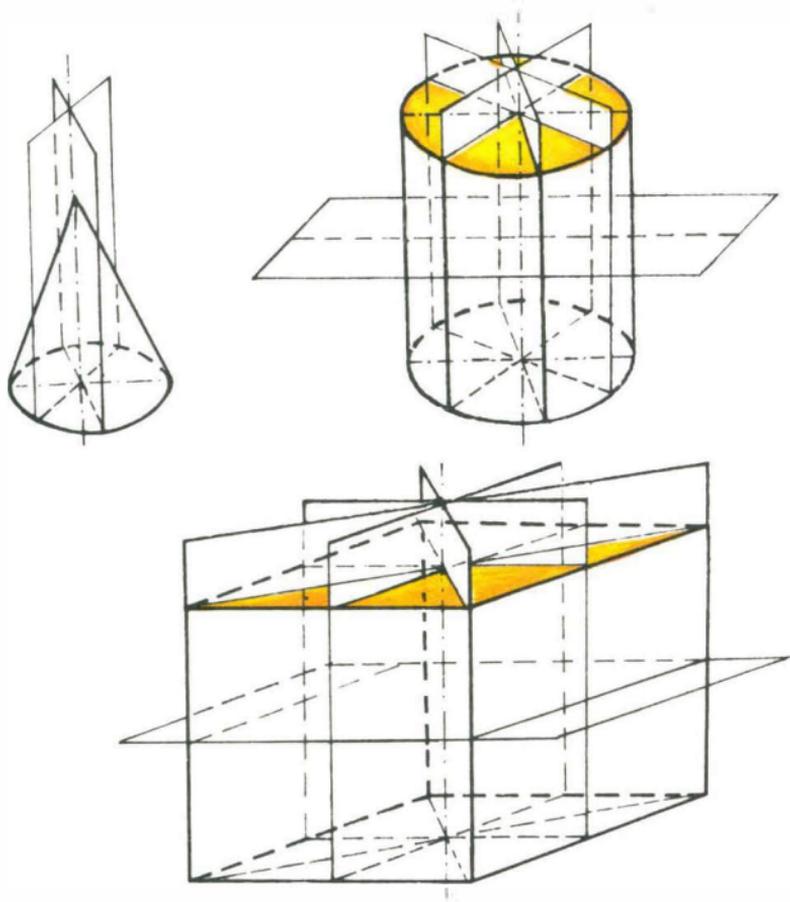
*Radialsymmetrische Gravuren auf einem Tablett aus dem Dorf Ustovo im Gebiet von Smoljan, VR Bulgarien*

Das Wort »Symmetrie« bedeutet im buchstäblichen Sinn etwa »Ebenmaß«. Im weitesten Sinn bezeichnen wir jedes Ding als »symmetrisch«, das in seinen Einzelteilen proportional und harmonisch ist. Im engeren Sinn sprechen wir von »zweiseitiger Symmetrie«, d. h. von der Links-rechts-Symmetrie. Die Mathematiker sagen, ein Körper sei in bezug auf eine gegebene Ebene symmetrisch, wenn er sich bei Reflexion an dieser Ebene »in sich selbst« verwandelt. Das gleiche gilt auch für unser eigenes Spiegelbild. Wenn wir uns vorstellen, an der Stelle des Spiegelbildes stünde ein lebendiger Mensch, und zwar als unsere absolute Kopie, dann wäre er jener »Gegenstand«, in den wir uns verwandelt haben, und der Spiegel wäre die Symmetrieebene. Unsere »Verdoppelung« wäre in diesem Fall ein Beispiel für die Symmetrie eines Körpers im drei-

dimensionalen Raum. Deshalb wird die zweiseitige (bilaterale) Symmetrie häufig auch als Spiegelsymmetrie bezeichnet, was ein und dasselbe ist.

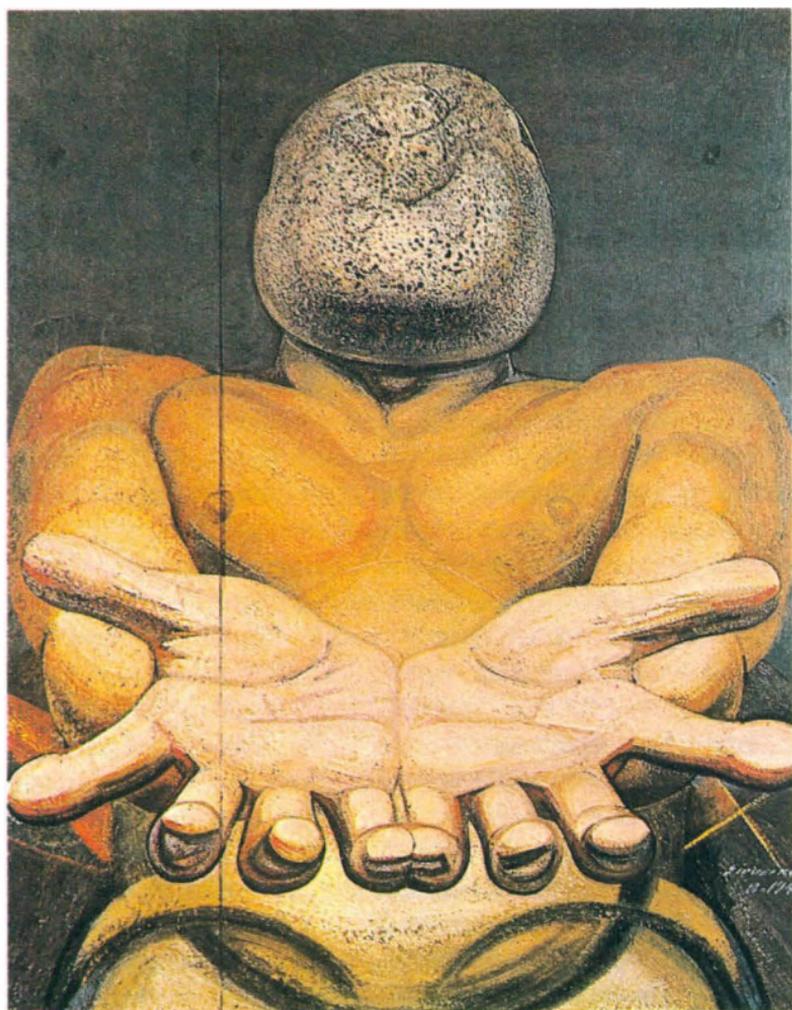
Nicht nur räumliche, dreidimensionale Figuren besitzen Symmetrie, sondern auch ebene Figuren, die nur zwei Dimensionen aufweisen. Jede ebene Figur, die mindestens eine Symmetrieachse besitzt, ist symmetrisch. Das bedeutet, wir können die beiden Hälften einer symmetrischen Figur deckungsgleich übereinanderlegen. Analog bezeichnen wir jede räumliche Figur als symmetrisch, wenn diese mindestens eine Symmetrieebene aufweist; sie kann aber auch mehrere Symmetrieebenen besitzen. In der folgenden Abbildung werden Sie leicht drei schematisch dargestellte

### *Geometrische Strukturelemente des Himmelstempels*



Elemente des früher erwähnten »Himmelstempels« wiedererkennen. Beachten Sie bitte, daß wir im Kegel eine Vielzahl von vertikalen Symmetrieebenen anordnen können, aber nicht eine einzige horizontale. Der Zylinder weist ebenfalls unzählige vertikale, darüber hinaus aber auch noch eine horizontale Symmetrieebene auf, die ihn in eine obere und eine untere Hälfte teilt; beide Hälften sind spiegelgleich. Dieser Fall trifft auch für einen runden Bleistift oder eine gewöhnliche Zigarette zu, sofern diese nicht mit einem Filter versehen ist. Der Würfel besitzt neun Symmetrieebenen, während in unserem Bild nur fünf angegeben sind. Können Sie die übrigen vier ergänzen? Zur Erleichterung der Aufgabe sei gesagt, daß nur drei der neun Symmetrieebenen an den Seiten des Würfels angeordnet sind, während die übrigen durch die Kanten verlaufen. Wieviel Symmetrieebenen hat die Cheopspyramide? Und eine Glühlampe? Eine Tasse? Betrachten Sie die Gegenstände in Ihrer Umgebung. Sie werden sich rasch davon überzeugen, daß von allen Figuren die Kugel am symmetrischsten ist, da wir durch ihren Mittelpunkt Ebenen in beliebig viele Richtungen legen können, deren jede die Kugel in zwei ideal gleiche spiegelbildliche Halbkugeln teilt.

Allerdings werden Sie auch bemerken, daß es neben symmetrischen viele asymmetrische Figuren gibt. Sie besitzen keine einzige Symmetrieachse oder -ebene; man kann sie unter keinen Umständen in gleiche linke oder rechte Hälften teilen, und kein Teil von ihnen würde sich spiegelbildlich mit dem verbleibenden Rest decken. Obwohl »Asymmetrie« das Fehlen von Symmetrie bedeutet, betrachtet man die Asymmetrie in der Mathematik als einen Sonderfall der Symmetrie und spricht von »Nullsymmetrie«. Das klassische Beispiel für eine ebene asymmetrische Figur ist die auf ein Blatt Papier gezeichnete Spirale und für den dreidimensionalen Fall die Spiralfeder oder die Schraube. Alle spiralförmig aufgebauten oder mit einem Gewinde versehenen Gegenstände sind stets asymmetrisch. Wie immer wir das Laufrad eines Lüfters, eine Uhrfeder oder eine gewöhnliche Schraube vor einem Spiegel anordnen, wie immer wir sie drehen und wenden, ihr Bild ähnelt ihnen in allen Einzelheiten und bleibt doch stets »verkehrt«.



*David Alfaro Siqueiros* Gemälde »Unser gegenwärtiges Antlitz« (1947)

Wir treffen in der Natur häufig auf asymmetrische Figuren, die sich vollständig ähneln, aber doch in dem Sinn »verkehrt« sind wie die Schraube und ihr Spiegelbild. Solche Figuren bezeichnet man als enantiomorph (grch. enantios, entgegengesetzt; ... morph, gestaltig). Das einfachste Beispiel für Enantiomorphie sind unsere Hände. Enantiomorph sind auch unsere Handschuhe und Schuhe, unsere beiden Füße und Ohren sowie unsere »Doppelgänger« im Spiegel. Eine Schraube mit Links- und eine

Schraube mit Rechtsgewinde sind enantiomorph. Die gleiche Beschaffenheit weisen auch viele Kristalle auf, ebenso wie einige chemische Verbindungen, die wir wegen ihrer außerordentlichen Bedeutung für das Leben in einem besonderen Kapitel behandeln werden.

Symmetrie und Asymmetrie gehören stets zusammen, denn sie bilden eine dialektische Einheit der Gegensätze. Äußerlich zeigt unser Körper strenge zweiseitige Symmetrie. Sehen wir jedoch genauer hin, so entdecken wir viele Einzelheiten, in denen sich unsere linke Hälfte von der rechten unterscheidet, so, als wäre das Asymmetrische ins Symmetrische »eingebaut«. Die beiden Hälften unseres Gesichts sind nicht wirklich ideal symmetrisch. Doch gerade dieser fast unmerkliche Unterschied verleiht jeder Physiognomie Individualität und unwiederholbares Aussehen. Puppengesichter sind schön, aber unpersönlich und bleiben nur schwer im Gedächtnis haften. Warum? Weil sie völlig symmetrisch sind.

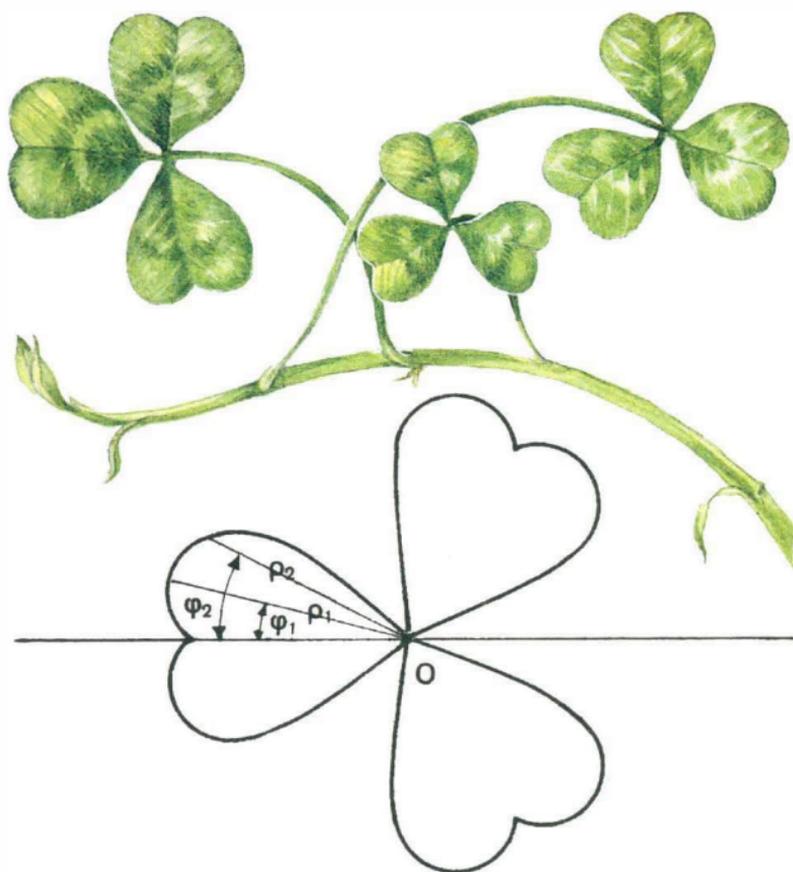
Maler und Bildhauer vermeiden oftmals strenge Symmetrie, schwächen sie bewußt ab, um ihren Gestalten mehr Leben und Individualität zu verleihen. Ihnen ist sehr wohl bewußt, daß Symmetrie unter dem Aspekt der ästhetischen Wirkung Ruhe und Sicherheit, Asymmetrie dagegen Erregung und Dynamik bewirkt. Die eine enthält strenge Ordnung und Gesetzmäßigkeit, die andere Ungezwungenheit und Spiel. Doch Ordnung und Freiheit gehören zusammen – Asymmetrie bedeutet ja nicht einfach nur das Fehlen von Symmetrie. Selbst angesichts der asymmetrischsten Form empfinden wir die Symmetrie als Form, aus der jene durch Abweichungen, durch zufällige Momente des Unerwarteten entstand, das uns den Zauber des Unwiederholbaren erschließt. Wenn Symmetrie Schönheit bedeutet, ist Asymmetrie Bewegung. Die Bewegung aber verleiht der Schönheit Leben.

## Geometrie der Natur

»Was sieht der Mensch mit seinen Augen?« lautete eine beliebte Prüfungsfrage, die einer unserer Professoren, ein bekannter Ophtalmologe (Ophtalmologie, grch. Augen-

heilkunde) seinen Studenten häufig stellte. Eine verblüffend einfache Frage. Und noch verblüffender war die Forderung, die an die Antwort gestellt wurde; sie sollte aus nur einem Wort bestehen. Wie sollte man das richtige Wort unter so vielen möglichen Worten finden? Wir sehen ja Tausende von Dingen! »Formen« war die rettende Antwort, und wer es gefunden hatte, konnte aufatmen. Die Note wurde in diesem Fall zu seinen Gunsten gerundet.

Es fällt nicht schwer zu erraten, daß der Professor mit seiner »Wunderlichkeit« auf eines der wichtigsten Dinge aufmerksam machen wollte, das wir beim Sehen wahrnehmen. Die äußeren Formen der natürlichen Körper sind es, die uns beim Erkennen der uns umgebenden Welt vor allem ins Auge fallen. Bereits als Kleinkinder erfassen wir die Umrisse der Gegenstände im Zimmer, der Bäume und Tiere, der Berge, der Steine und der Wolken. Und schon als Kinder entdeckten wir merkwürdige und gelegentlich verblüffende Ähnlichkeiten in den Formen und Gegenständen, die nichts miteinander gemeinsam haben. Gewiß ist es Ihnen schon passiert, daß sich eine Wolke vor Ihren Augen einmal in einen großen Fisch oder in ein Krokodil zu verwandeln schien, dann wieder in springende Pferde, Kamele oder Hunde bzw. in irgendwelche andere Tiere. Vielleicht sind Sie mehr als einmal vor der Silhouette eines Strauches zusammengezuckt, der im bleichen Licht des Mondes plötzlich eigenartig schemenhaft vor Ihnen stand? Wir wissen, daß diese Ähnlichkeit zwischen Gegenständen, die ihrem Wesen nach völlig verschieden sind, nur äußerlich ist und sagen darum, es handele sich um eine zufällige Ähnlichkeit. Die unterschiedlichsten Körper und Gegenstände können die gleiche geometrische Form haben, während umgekehrt Dinge mit gleichartigen Eigenschaften oft eine unterschiedliche Form besitzen. Warum ist das so? Welchen Gesetzmäßigkeiten gehorcht die Formenentstehung bei natürlichen Körpern? Und von welchen Faktoren wird sie bestimmt? Sollten derartige Gesetzmäßigkeiten und Faktoren existieren, wäre zu fragen, ob die »zufällige« Ähnlichkeit zwischen einer Wolke und einem Kamel oder zwischen einem Strauch bzw. einem Stein und einer menschlichen Figur wirklich zufällig ist? Oder geht diese Fragestellung zu weit?!



*Kleeblätter  
Geometrische Figur zur stilisierten Darstellung eines dreiblättrigen  
Kleeblattes*

Niemand wird im Ernst behaupten wollen, es sei gesetzmäßig, einen Strauch in der Dunkelheit für einen Menschen anzusehen oder eine vom Wind dahingetriebene Wolke für ein Kamel. Doch wenn wir einen nassen Fleck an der Wand aufmerksam betrachten, können wir aus seinen Umrissen eine bestimmte Figur herauslesen. Ähnlich machen es übrigens alle »Wahrsager«, wenn sie angestrengt auf den Kaffeesatz in ihrer Tasse starren.

Doch die äußere Form natürlicher Körper ist nicht zufällig. Sie entsteht unter dem Einfluß bestimmter Kräfte und wird von allgemeinen geometrischen Gesetzen charakterisiert, denen wiederum das universelle Symmetrieprinzip zugrunde liegt. Wenn wir davon ausgehen,

können wir die Rolle einiger dieser allgemeinsten Faktoren der Formenentstehung besser begreifen, und es wird uns leichtfallen, die gelegentlich verblüffende Ähnlichkeit natürlicher Körper zu erklären, die Ähnlichkeit von Gegenständen aus der unbelebten Natur und lebenden Organismen, die sich in ihrer Entstehung so sehr unterscheiden. Doch vorher wollen wir einige Beispiele betrachten.

Auf der Seite nebenan sind die Blätter einer Pflanze dargestellt, die jedem von uns wohlbekannt sind. Wer hat nicht schon vierblättrigen Klee gesucht, um das Glück zu »pflücken«, das in diesen Glücksbringer eingeschlossen sein soll? Obwohl jeder von uns Klee kennt, kämen wohl nur sehr wenige darauf, daß von Klee die Rede ist, wenn wir ihnen statt eines Kleeblatts die folgende Gleichung präsentieren:

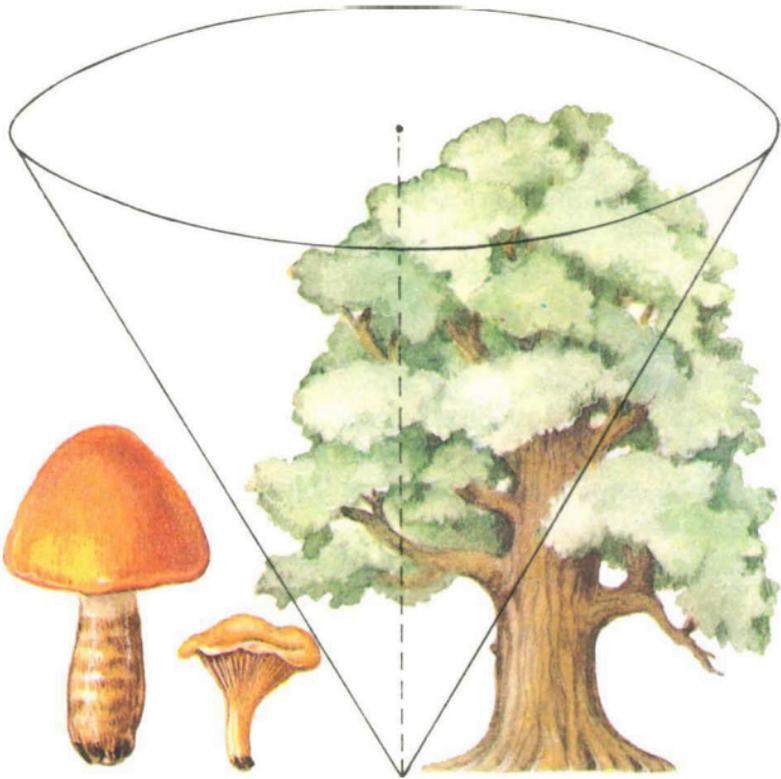
$$\varrho = 4(1 + \cos 3\varphi + \sin^2 3\varphi).$$

Diese von dem deutschen Kartographen Habenicht entdeckte Gleichung liefert in einem Polarkoordinatensystem eine Kurve, die absolut genau die Form eines einzelnen Kleeblattes nachzeichnet.

Auch jede Figur, die einem Efeublatt ähnelt, läßt sich durch eine Gleichung ausdrücken. Ähnliche Formeln haben auch die Blätter der Weide und des Holzapfels, des Ahorns und des Falschen Jasmins, Bienenwaben und Maschen von Moskitonetzen, Schneeflocken und Radiolarien, Muscheln und Metallschrauben.

Wir brauchen in dieser Darstellung keine mathematische Genauigkeit. Unsere Beispiele sollen nur zeigen, daß die äußere Form von Gegenständen – biologische Objekte eingeschlossen – gesetzmäßig ist und sich mathematisch ausdrücken läßt. Wir wollen unseren mathematischen Exkurs abbrechen und statt dessen einen Ausflug in die Berge unternehmen.

Der Pfad schlängelt sich zwischen hohen Buchen hindurch und über grüne Lichtungen bergauf an hochaufragenden Kiefern vorbei. Wir halten an und legen eine Pause ein. Zu unseren Füßen hat sich ein Teppich blühender Echter Kamille ausgebreitet. Wie glühende Kohlestückchen leuchten Klatschmohnblüten aus dem weißen Meer hervor. An einen Baumstumpf haben sich einige Maronen-



*Pflanzen, die in vertikaler Richtung wachsen, weisen stets Kegelsymmetrie auf.*

pilze angeschmiegt, die wohl gerade erst aus der Erde hervorgekommen sind. Nicht weit von uns breitet eine mächtige Eiche ihre Äste aus. Welche allgemeine geometrische Gesetzmäßigkeit könnte wohl diese schöne Vielfalt pflanzlicher Formen vereinigen? Sehen wir sie uns doch einmal etwas aufmerksamer an. Eiche, Echte Kamille und Maronenpilze wachsen senkrecht von unten nach oben. Sie besitzen einen oberen und einen unteren Teil: Beide unterscheiden sich sehr deutlich voneinander. Doch sie haben weder ein Links noch ein Rechts, keine Vorder- und keine Rückseite, ganz wie ein Kegel. Sind Maronenpilze symmetrisch? Tatsächlich! Wenn wir durch zufällige Faktoren hervorgerufene Deformationen vernachlässigen, dann sind sie vollkommen symmetrisch, und wir können sie ohne jede Mühe in zwei spiegelgleiche Hälften zer-

schneiden, wenn wir Hut und Stiel halbieren. Genau wie ein Kegel besitzen Maronenpilze keine einzige horizontale, dafür aber unzählige vertikale Symmetrieebenen. Und ist dies nicht auch bei der Echten Kamille der Fall? Ganz gewiß. Kiefern, Fichten, Pappeln und Eichen weisen alle die Symmetrie eines Kegels auf. Wohin wir uns auch wenden und welche Pflanze auch immer in unser Blickfeld gerät – sofern sie nur in vertikaler Richtung wächst –, wir werden stets den gleichen Symmetrietyp, nämlich Kegelsymmetrie, feststellen oder radiäre Symmetrie, wie die Botaniker dazu sagen.

Wie man leicht einsehen kann, ist der wichtigste Formbildungsfaktor in diesem Fall die Gravitation. Ein Baum wächst unter Überwindung der Erdanziehungskraft nach oben, und bei diesem Wachstum gelten für seine oberen und seine unteren Teile unterschiedliche Bedingungen, wodurch sich schon deshalb die Baumkronen von den Wurzeln unterscheiden. Da sich Bäume jedoch nicht wie Tiere bewegen können, sondern durch ihre Wurzeln verankert bleiben, sind die übrigen Richtungen für sie gleichwertig, und die Begriffe »links« und »rechts« oder »vorn« und »hinten« verlieren ihren Sinn. Die dünnen und weichen Zweige der Trauerweide wachsen so lange aufwärts, bis sie durch ihr eigenes Gewicht wieder nach unten gezogen werden. Doch das gleiche geschieht auch mit den Strahlen einer Fontäne, und so stellen wir erstaunt fest, daß beide einander ähneln. Der Rauch, der bei Windstille aus der Esse einer Fabrik emporsteigt, besitzt die Form und die Symmetrie eines Kegels. Und sind nicht auch die Eiszapfen, wie wir sie im Winter sehen, spitz und kegelförmig, oder die Stalaktiten, jene von manchen Höhlendecken herabwachsenden Tropfsteine? Diese schönen steinernen Gebilde weisen in der Regel radiäre Symmetrie auf, sofern nicht zufällige Faktoren ihre Deformation bewirkten und sie zu eleganten Vorhängen, Falten und anderen erstaunlichen Figuren zusammenfließen ließen. So gelangen wir zu einem allgemein auf der Symmetrie beruhenden Schluß, der für eine große Anzahl von Gegenständen und natürlichen Körpern gilt und die »zufällige« Ähnlichkeit ihrer Formen erklärt. Am einfachsten hat dies der sowjetische Wissenschaftler I. I. Schafranowski wie folgt formuliert:

»Alles, was vertikal – d. h. relativ zur Erdoberfläche von oben nach unten oder von unten nach oben – wächst oder sich bewegt, besitzt radiäre Symmetrie in Gestalt eines ›Fächers‹ in der Symmetrieebene.« Diese Symmetrie zeigen auch Quallen oder Seerosen, die aus diesem Grund Blumen ähneln, obwohl sie dem Tierreich angehören. Es handelt sich hierbei um eine Symmetrie, die vor allem für die Pflanzenwelt charakteristisch ist.

Betrachten wir aber nun einmal das Blatt eines Baumes. Ist es symmetrisch? Offenbar ja, doch handelt es sich hierbei nicht um radiäre Symmetrie mit einer Vielzahl einander schneidender Symmetrieebenen. Das Blatt hat nur eine einzige derartige Ebene, die längs der Mittellinie des Blattes verläuft und dieses in zwei spiegelgleiche Hälften (eine linke und eine rechte Hälfte) teilt, sofern wir von geringfügigen Abweichungen absehen. Demzufolge ist das Blatt bilateral symmetrisch. Das gleiche gilt auch für den Marienkäfer, der über unsere Hand krabbelt. Blüten, die nicht vertikal, sondern horizontal oder nur wenig gegen den senkrechten Stiel oder Stengel gedreht wachsen (beispielsweise Orchideenblüten), besitzen diese Symmetrie ebenso wie übrigens die meisten Tiere und auch wir selbst. Und dies ist die zweite Verallgemeinerung: »Alles, was horizontal, d. h. rechtwinklig zur Erdoberfläche, wächst oder sich bewegt, ist durch bilaterale Symmetrie charakterisiert.« Nach I. I. Schafranowski und L. M. Plotnikow<sup>1</sup> gilt diese Regel gleichermaßen für belebte und unbelebte Objekte in der Natur; ihr gehorchen nicht nur Pflanzen und Tiere, sondern auch geologische Gebilde.

Diese verallgemeinerten Aussagen über die radiäre und die bilaterale Symmetrie von Lebewesen und Objekten der unbelebten Natur sind jedoch vereinfacht; es gibt Ausnahmen, Sonderfälle. Aber auch hier sind »Ausnahmen« wie gewöhnlich nicht nur keine Widerlegung, sondern eine besonders eindrucksvolle Illustration der allgemeinen Regel.

Sicherlich werden Sie bemerkt haben, daß alle Symmetrieebenen bei Formen, wie wir sie bisher besprochen

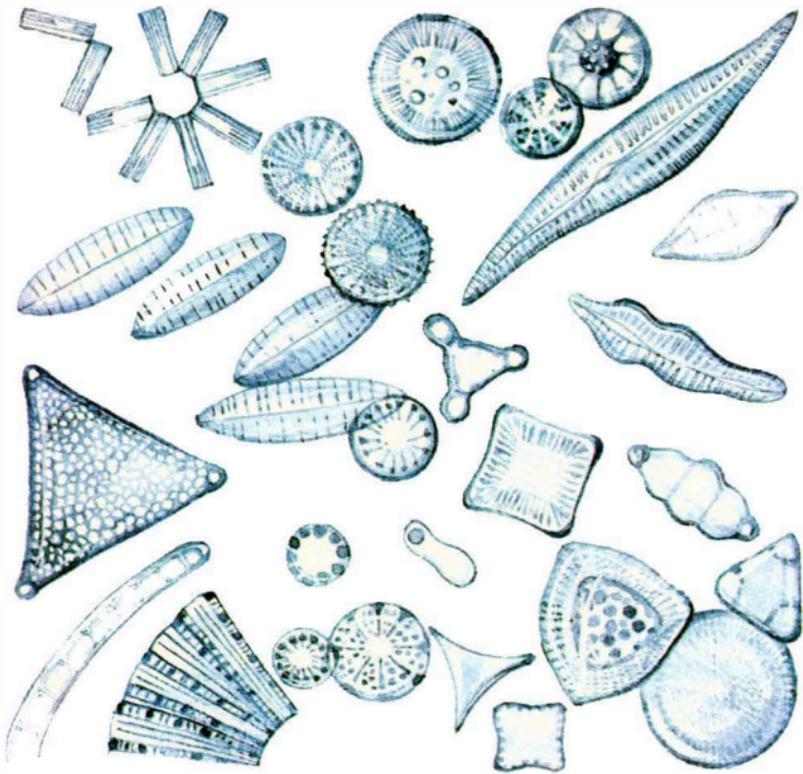
<sup>1</sup> I. I. Schafranowski und L. M. Plotnikow: Symmetrie in der Geologie. Leningrad 1975

haben, stets vertikal angeordnet sind. Wir haben uns daran so sehr gewöhnt, daß wir nicht einmal mehr einen Unterschied bemerken, wenn die linke und rechte Seite eines Bildes nach der Natur vertauscht werden, d. h., wenn man es um seine Vertikalachse dreht. Wenn wir einen See fotografieren, an dessen Ufer Bäume stehen, und vor dem Kopieren das Negativ so drehen, daß Links und Rechts ihre Plätze tauschen, so erhalten wir einen ganz normalen See und normale Bäume. Tun wir das gleiche jedoch in bezug auf die horizontale Achse, d. h., stellen wir das Bild auf den Kopf, dann bemerken wir diese Beeinträchtigung der üblichen Ordnung sofort. Es gibt nur einen einzigen Fall, wo unsere Augen eine horizontale Symmetrieebene als etwas Natürliches empfinden, dann nämlich, wenn wir die Spiegelung von Gegenständen an einer Wasseroberfläche betrachten. Und wie seltsam das auch ist, es gefällt uns sogar.

Die deutliche Bevorzugung der Vertikalen durch die Natur erklärt sich auf höchst einfache Weise: Die Schwerkraft ist von oben nach unten gerichtet. Wie wir bereits erklärt haben, bildet die Gravitation den Hauptfaktor für die Formentstehung bei natürlichen Körpern, obwohl auch viele andere Faktoren an diesem Prozeß beteiligt sind.

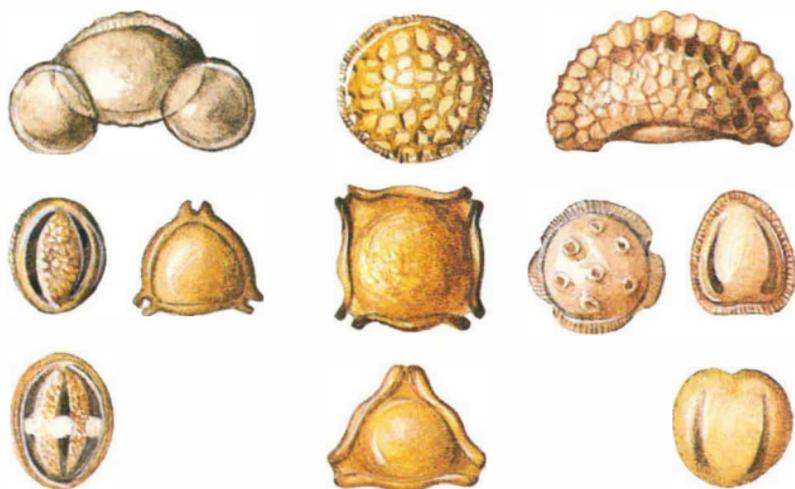
## Symmetrie bei Pflanzen

Wenn die Sonne zu Beginn des Sommers genügend Kraft gewonnen hat, so daß wir den Schatten suchen, und wenn das Wasser in den Sümpfen abzusinken beginnt, bleibt an den Rohrstengeln eine eigenartige Schicht haften. Sie besteht u. a. aus den Körpern vieler Milliarden Diatomeen, die auch als »Kieselalgen« bezeichnet werden. Wir können ein wenig von dieser Schicht abschaben, in einem Tropfen Wasser aufschwimmen und das Ganze unter ein Mikroskop bringen. Dann entdecken wir Dutzende dieser Einzeller in ihren »gläsernen Häuschen«, die sich durch eine unwahrscheinliche und erstaunliche Architektur auszeichnen. Welche Vielfalt von Figuren bietet sich unserem Blick! Regelmäßige dreieckige Prismen und fünfstrahlige



### *Kieselalgen*

Sterne, langgestreckte, schöne Ellipsen und gestauchte Formen, runde »Münzen«, reich ornamentierte Rhomben, Quader und Polyeder ... Eine verblüffende Vielfalt symmetrischer Formen, die einander durch Eleganz zu überreffen versuchen. Deshalb haben die Wissenschaftler ihnen auch Namen gegeben wie *Asterionella gracilima*, *Amphora delicatissima*, *Cymbella elegans* ... Es existieren über 10 000 Diatomeenarten, und sie sind fast überall verbreitet, wo es Wasser gibt. Wir können sie sogar im Eis der Arktis finden, in Pfützen, die sich während des kurzen Polarsommers bilden, aber auch im heißen Wasser von Mineralquellen, deren Temperatur 60°C und mehr erreicht. Die »Häuschen« sind eher als Schachteln zu bezeichnen, weil sie aus einem Boden und einem Deckel bestehen und die Schutzhülle eines einzelnen Körpers bilden, der mit dem »Kieselstoff«, d. h. Kieselsäure, getränkt ist. Durch »Fensterchen« versorgt sich die Alge mit Mineralsalzen



### *Pollenkörner*

und Kohlendioxid, während die zur Fotosynthese erforderlichen Sonnenstrahlen die durchsichtigen Wände ungehindert durchdringen. In diesem schönen Gefängnis bringen die Kieselalgen als Einsiedler ihr ganzes Leben zu, und die Schachtel öffnet sich nur, wenn die Zeit für die Teilung herangekommen ist. Innerhalb des Pflanzenreichs sind die Diatomeen wirkliche Pygmäen, denn auf einer einzigen Briefmarke finden Hunderte, ja Tausende Platz. Das hindert sie jedoch nicht, Beispiele vollkommener Symmetrie zu liefern.

In unserer Abbildung oben ist ein anderes »Patent« der Natur im Bereich der Miniaturisierung dargestellt. Dies sind aber keine Wasserpflanzen mehr, sondern Körner von ganz gewöhnlichem Blütenstaub, nur in dutzendfacher Vergrößerung. Wir können uns leicht davon überzeugen, daß auch diese nur schwer zu beschreibenden Formen der Symmetrie gehorchen.

Wohl in keinem anderen Bereich der Welt der Biologie finden wir eine derartige Kombination von Farben und schönen symmetrischen Formen wie bei den Pflanzen. Blühende Narzissen, die blauen Glocken des Enzians, die Farben der Lilien, die zarten Hahnenfußgewächse und die strahlenden Astern, die Pfingstrosen, die Rosen, die Maiglöckchen und der Stechapfel, sie alle wetteifern miteinander darum, wer wohl am schönsten ist.

Die Formen der Blütenblätter sind außerordentlich vielfältig. Sie können breit und kurz oder schmal und lang sein, gekrümmt oder gerade; sie können gespalten oder zusammengewachsen, auseinandergespreizt oder in Gruppen, zu fünf oder zu mehreren zusammengefaßt sein. Doch die meisten Blumen haben *eine* Symmetrieebene und lassen sich spiegelgleich in eine linke und eine rechte Hälfte zerlegen.

Wir hatten bereits gesagt, daß viele Pflanzen spiegel-symmetrisch sind, d. h. eine radiäre Symmetrie aufweisen.



*Geflecktes Knabenkraut*  
(*Orchis maculata* L.)

Diese Symmetrie bleibt auch bei Blüten erhalten, die sich in vertikaler Richtung entwickeln. Die Blüten von Vertretern aus der Familie der Orchideen, zu der auch das in Mitteleuropa vorkommende Gefleckte Knabenkraut (*Orchis maculata*) gehört, wachsen aber nicht vertikal und haben darum bilaterale Symmetrie. Das ist auch der Fall bei Veilchenarten und bei den Lippenblütlern, z. B. bei der Weißen Taubnessel. Blüten komplizierteren Aufbaus besitzen auch eine kompliziertere Symmetrie und werden nach der sogenannten Zähligkeit der Symmetrieachse unterschieden. Die »Zähligkeit« ist die Zahl, die angibt, wie oft ein Körper während einer vollständigen Drehung um seine Drehachse mit sich selbst deckungsgleich ist. Wenn wir eine »Kehrtwendung« (d. h. eine Drehung um 180 Grad) ausführen, stimmt unsere Stellung noch nicht mit der Ausgangslage überein, vielmehr ist ein nochmaliges »Das Ganze kehrt!« notwendig, um in die Ausgangslage zurückzugelangen, d. h., wir sind erst nach einer vollständigen Drehung »mit uns selbst deckungsgleich«. Wir haben demzufolge eine »einzählige« Symmetrie. Das Quadrat dagegen ist vierzählig, weil es im Verlauf einer vollständigen Drehung viermal mit sich selbst zur Deckung kommt; die Zähligkeit eines Kreises ist unendlich groß, denn dieser stimmt bei einer Drehung um seine Achse unendlich oft mit sich selbst überein. Fünfeinhalb sind Apfelblüten, ebenso wie viele Vertreter aus der Familie der Hahnenfußgewächse, der Lilien, der Nelken usw. Im Verlauf einer vollständigen Drehung um ihre Achse wiederholt also jede ihrer Blüten fünfmal nacheinander die eigene Figur. Bei komplizierten Blüten kann man Fünfeinhalbzähligkeit, Zwanzigzähligkeit und noch höhere Zähligkeiten beobachten.

Früchte sind gelegentlich kugelsymmetrisch, so z. B. Melonen, Apfelsinen und Kokosnüsse. Radiäre Symmetrie besitzen Äpfel, Birnen, Tomaten, Quitten usw. Gurken sind zunächst radiär-symmetrisch; da sie sich später gewöhnlich krümmen, ist ihre Symmetrie dann nur bilateral. Wegen ihrer Krümmung können sie nur noch in einer einzigen Ebene in zwei spiegelgleiche Hälften zerschnitten werden.

Man könnte darüber streiten, ob in der Pflanzenwelt



*Rechtsgängig windende Sproßachse der Feuerbohne (links) und linksgängige Windung des Kletterknöterichs (rechts)*

Symmetrie oder Asymmetrie überwiegt, und wahrscheinlich würde die Diskussion zugunsten der Asymmetrie ausgehen, wie paradox dies auch auf den ersten Blick scheinen mag. Wie Sie sich gewiß erinnern, ist die Spirale oder Schraube eine asymmetrische Figur, die nicht in ihr Spiegelbild paßt und keine einzige Symmetrieebene besitzt. Sie existiert in zwei Formen: als rechtsgängige Spirale mit der Schraubrichtung im Uhrzeigersinn sowie als deren Umkehrung, d. h. als linksgängige Spirale, die das Spiegelbild der rechtsgängigen ist. Spiralen sind im Pflanzenreich häufig anzutreffen. Als Beispiel sind an erster Stelle die Windepflanzen zu nennen. Die Waldrebe, eine Kletterpflanze aus der Familie der Hahnenfußgewächse, windet sich stets im Uhrzeigersinn und bildet eine rechtsgängige Spirale. Rechts herum um ihre Stütze windet sich auch die Liane des Efeus, der ebenfalls zu den Kletter-



*Fruchtstand einer Sonnenblume*

pflanzen gehört. Umschlingen sich zwei Pflanzen in gleicher Drehrichtung gegenseitig, dann entsteht ein Gebilde von der Art einer sehr regelmäßigen Spiralfeder; wäre ihre Drehrichtung jedoch gegenläufig, dann würde ein hoffnungsloses Durcheinander entstehen.

Die Drehrichtung ist ein Merkmal, das im allgemeinen unverändert vererbt wird.

Die Weinrebe aber hält sich nicht an »Vorschriften« und gibt keiner Richtung den Vorzug. Ihre Sproßranken winden sich ganz willkürlich einmal rechts- und einmal linksherum um die Stütze und bilden zuweilen ein unentwirrbares Knäuel.

Eine andere bei Pflanzen sehr häufig anzutreffende Erscheinungsform der Asymmetrie betrifft die Blatt-

anordnung am Stengel. Sollten Sie eine Aloe zu Hause haben, dann sehen Sie sich diese einmal recht aufmerksam an. Sie werden feststellen, daß die Aloeblätter am Stengel so übereinander angeordnet sind, daß die Ansatzstellen eine aufsteigende Schraubenlinie bilden.

Die gleiche schraubige Anordnung findet man auch bei den Blättern der Weide, Ulme und Buche und bei vielen anderen Baum- und Grasarten, wobei die Drehrichtung »rechts« überwiegt. Diese Blattanordnung hat ihren biologischen Sinn: Die schraubige Anordnung läßt es nämlich nicht zu, daß ein Blatt das andere beschattet, und so erhalten alle Blätter ihren Anteil am Sonnenlicht.

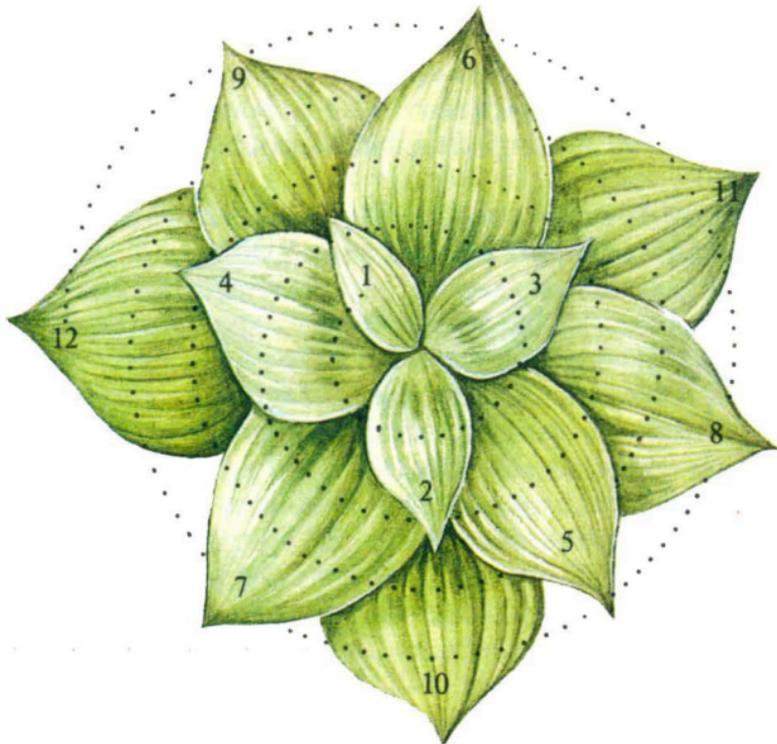
Bei einigen zweihäusigen Pflanzen<sup>1</sup> entspricht den beiden Geschlechtern der Pflanze jeweils eine andere Richtung der Schraubenlinie, in deren Verlauf die Blätter angeordnet sind. Bei den weiblichen Pflanzen der Weide, des Hanfs usw. steigen die Blätter stets von links nach rechts aufwärts, bei den männlichen Exemplaren dagegen umgekehrt. In bezug auf dieses Merkmal sind die männlichen und weiblichen Pflanzen einander enantiomorph.

Kiefernnadeln sind fast stets paarweise linksgängig angeordnet, obwohl man an jedem Baum auch Paare mit der umgekehrten Drehrichtung entdecken kann. Kiefernzapfen, die auf den ersten Blick ganz gleich aussehen, sind einmal rechts- und einmal linksgängig.

Haben Sie einmal darauf geachtet, wie die Kerne im Fruchtstand der Sonnenblume angeordnet sind? Auch hier steht die asymmetrische Spirale hoch im Kurs. Man erkennt deutlich markierte einander kreuzende Bögen, die von der Fruchtstandmitte zum Rand verlaufen.

Was aber hat das alles für eine Bedeutung? Welche Rolle spielen Symmetrie und Asymmetrie im Leben der Pflanzen? Hat die regelmäßige geometrische Form einer winzigen Diatomee oder die spiralförmige Verteilung der Sonnenblumenkerne irgendeinen biologischen Sinn? Damit sich solche streng definierten Formen im Evolutionsverlauf festigen konnten, mußten sie hinreichend »zweckmäßig« sein, sie mußten der Art bestimmte Vorzüge si-

<sup>1</sup> Pflanzenarten, bei denen sich an jeweils einer Pflanze nur männliche *oder* weibliche Blüten befinden



*Blattspirale im Gegenurzeigersinn*

chern. Leider ist dieser Bereich des Pflanzenlebens nur wenig erforscht, und wir könnten weit mehr Fragen stellen als Antworten erhalten. Kaum jemand vermag zu sagen, warum sich unter den Kieselalgen so komplizierte Konstruktionen befinden, wenn doch auch ihre einfacher aufgebauten Artgenossen dem Kampf ums Dasein erfolgreich standgehalten haben. Über die Gestalt von Pollen wissen wir allerdings mehr. Die spezifische Form der Pollenkörner auf unserer Abbildung hat große Bedeutung für die Befruchtung von Exemplaren ein und derselben Art. Wenn eine Biene von Blüte zu Blüte fliegt, sammelt sie nicht nur den Blütenstaub verschiedener Pflanzen, sondern verteilt diesen auch wieder. Dabei treten niemals »Fehler« auf; jeder Stempel nimmt immer nur Blütenstaub auf, der für ihn bestimmt ist. Warum? Weil fast jede Blütenart ihr eigenes »Patent« in bezug auf Größe und Form der Pollenkörner besitzt, so daß diese nicht in Stempel eindringen können, mit denen sie nicht übereinstimmen.

Ihr Briefkastenschlüssel paßt ja auch nicht in das Schloß des nachbarlichen Briefkastens!

In neuerer Zeit sind interessante Unterschiede zwischen links- und rechtsgängigen Pflanzen entdeckt worden, die große wirtschaftliche Bedeutung erlangen könnten. Die Kokospalme beispielsweise besitzt zwei enantiomorphe Formen: Exemplare, bei denen die Blätter im Uhrzeigersinn angeordnet sind, und Exemplare mit gegensinniger Blattanordnung. Man fand, daß der Kokosnußertrag linksgängiger Exemplare stets am größten ist. Da die Richtung der Blattspiralen ein Artmerkmal ist und bereits an den Schößlingen zutage tritt, ist es durch entsprechende Auswahl möglich, ausschließlich »linke«, d.h. besonders ertragreiche Kokospalmen, zu kultivieren. Bei anderen Pflanzen hat sich herausgestellt, daß Verteilung und Menge von Chlorophyll, Vitamin C usw. in den jeweils linken und rechten Formen nicht gleich sind. Möglicherweise zeigt die Akkumulation von Gerb- und Arzneistoffen, die wir aus verschiedenen Wurzeln, Blättern und Blüten gewinnen, eine ähnliche Abhängigkeit, so daß wir die Ressourcen des Pflanzenreichs besser und effektiver nutzen könnten.

Die Ursachen der Asymmetrie von Pflanzen sind in ihrer Mehrzahl noch unklar. Die Erddrehung und das ständig wirkende Magnetfeld zeigen hier offenbar einen Einfluß. Die meisten nördlich des Äquators angetroffenen Pflanzen besitzen eine linksgängige Blattanordnung, während die Pflanzen südlich des Äquators Rechtsgängigkeit vorziehen. Es besteht auch die Meinung, das Sonnenlicht werde bei seiner Reflexion an der Oberfläche der Meere und Ozeane infolge der Erddrehung in für uns unsichtbarer Weise »gedreht«, was sich dann auf die Pflanzen auswirke. Tatsächlich ordnen viele Bäume und Gräser ihre Organe in Richtung der Erddrehung an, doch gibt es auch gegenteilige Fälle in nicht geringer Zahl. Möglicherweise berührt dieses Problem die »intimeren« Mechanismen der Organismusstruktur bis hin zur räumlichen Orientierung der Moleküle, aus denen die Organismen aufgebaut sind.

## Symmetrie bei Tieren

Wollten wir behaupten, Tiere seien »symmetrischer« als Pflanzen, dann wäre das falsch. Wir wissen ja, daß eine außerordentliche Vielzahl von Tieren links-rechts strukturiert ist, und im Vergleich zur radiären Symmetrie stellt die bilaterale Symmetrie nun einmal den »einfacheren« Symmetrietyp dar. Doch unabhängig davon sind Reichtum und Großartigkeit der Formen keineswegs geringer als im Pflanzenreich. Das vielleicht schönste Beispiel für bilaterale Symmetrie bei den Tieren sind die Schmetterlinge. Jedermann erfreut sich an den schönen Farben eines Pfauenauges, eines Dickkopffalters, eines Trauermantels oder einer Kleinen Ahorneule. Man kann nur immer wieder darüber staunen, wie außerordentlich genau sich jede Zeichnung, jeder einzelne Strich, jeder Farbstreifen und

*Zweiseitige (bilaterale) Symmetrie herrscht fast überall im Tierreich (hier eine Schleiereule)*



jeder Punkt des linken Flügels auf dem rechten Flügel dieser farbenprächtigen Geschöpfe wiederholen. Schmetterlingsraupen sind uns zwar nicht besonders sympathisch, aber zuweilen doch nicht minder schön; sie zeigen eine deutlich erkennbare Symmetrieebene, die den Raupenkörper in Längsrichtung in eine rechte und in eine linke Hälfte teilt.

Bilaterale Symmetrie ist nicht nur für Insekten, sondern auch für Fische, Amphibien, Reptilien, Vögel und Säugetiere charakteristisch. Alles, was auf der Erde kriecht und flucht, was schwimmt oder läuft, ist bilateral symmetrisch. Nur einige Wirbellose, die am Meeresboden stehen und angewachsen sind oder sich nur langsam fortbewegen, machen hier eine Ausnahme und zeigen die radiäre Symmetrie der Pflanzen. Auch niedere, vorwiegend einzellige Tiere, die zu keiner aktiven Fortbewegung fähig sind, sondern frei im Wasser »schweben«, gehören zu den Ausnahmen; sie sind kugelförmig und entsprechen daher dem sphärischen Symmetriotyp.

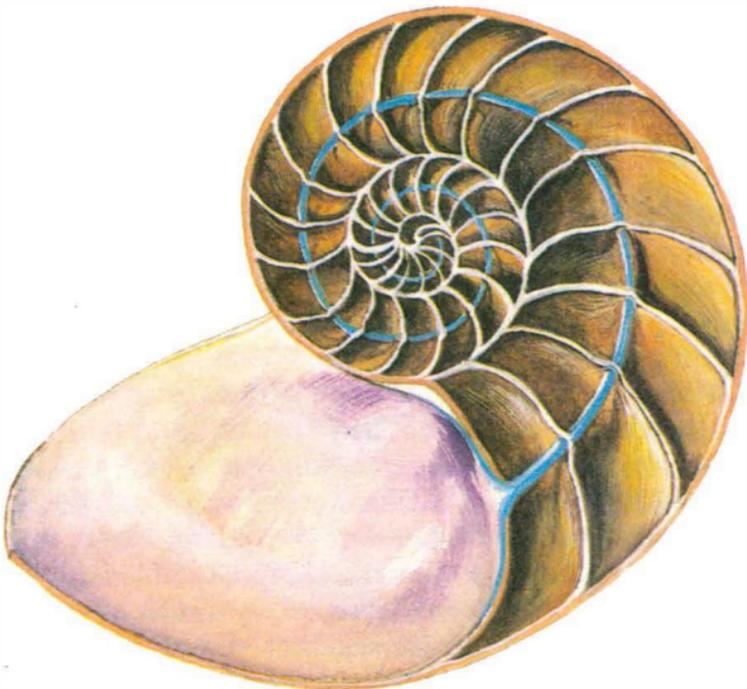
*Schale des Kopffüßlers Nautilus (rechts, Schnitt); unten: Nautilus in der Schale*

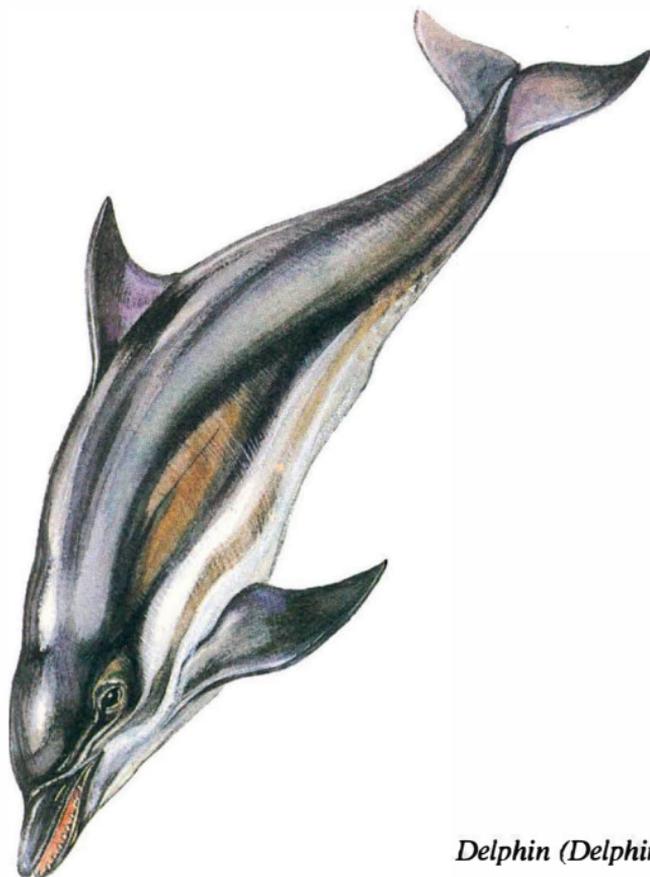


Mit zunehmender Vervollkommnung der Organismen »verarmt« deren Symmetrie, und die Asymmetrie tritt stärker hervor. Warum das so ist und warum die sphärische Symmetrie im Evolutionsverlauf der radiären Symmetrie weichen mußte, die dann ihrerseits wiederum von der bilateralen Symmetrie abgelöst wurde, soll im Kapitel »Symmetrie und Evolution« ausführlicher betrachtet werden.

Die Schraube ist ein Element, das wir in der Anatomie vieler Tiere finden. Wie bei den Pflanzen werden die strengen Gesetze der Symmetrie auch hier oft verletzt, und so finden wir bei den Tieren erstaunliche Beispiele der Asymmetrie.

Bei den Schnecken gibt es etwa 100 000 Arten, die allenthalben auf dem Festland und im Wasser angesiedelt sind und eine unwahrscheinliche Vielfalt von Schraubenformen repräsentieren. Unsere Abbildung zeigt einen Querschnitt durch das Gehäuse eines Kopffüßlers der Gattung *Nautilus*, dessen Windungen der gleichen mathematischen Gesetzmäßigkeit gehorchen wie die logarithmischen Spiralen des Sonnenblumenfruchtstandes.





*Delphin (Delphinus delphis)*

Die wohlgeformten Hörner der Bergziege oder der Antilope bilden ein Spiralenpaar. Das eine Horn besitzt stets den gegenläufigen Drehsinn des anderen, d. h., die Hörner sind zueinander enantiomorph und beeinträchtigen die Gesamtsymmetrie des Körpers nicht.

Die schnurrbartähnlichen Antennen mancher Insekten stellen gegenläufige Spiralen dar und zeigen spiegelbildliche Symmetrie.

Erfahrene Seeleute können den Pottwal an der Form des Wasserstrahls erkennen, den dieser ausstößt. Sein Atemstrahl unterscheidet sich von den »Fontänen« aller anderen Meeresriesen. Es ist stets ein einzelner Wasserstrahl, der etwa im Winkel von 45 Grad vorwärts geneigt und stets nach links gerichtet ist. Die Ursache dafür liegt in der Asymmetrie des Schädels; bei allen Pottwalen ist das rechte Nasenloch zugewachsen. Sie können also nur durch das linke Nasenloch ausatmen und erzeugen dabei diese



*Antilopenhörner können äußerlich ganz verschiedenartig sein; doch handelt es sich stets um gegenläufige Spiralen; d. h., die beiden Hörner sind zueinander stets enantiomorph.*

»Fontäne«. Die linke Schädelhälfte des Pottwals ist massiver ausgebildet als die rechte. Auch andere Zahnwale wie der Schwertwal, die Delphine und der auch als »See-Einhorn« bezeichnete Narwal besitzen einen asymmetrischen Schädel. Ihnen allen ist gemeinsam, daß die Schädelknochen links dicker und schwerer sind als rechts.



*Kreuzschnabel*

Die Wissenschaftler haben sich lange Zeit darüber gewundert, bis schließlich Beobachtungen an Delphinen zeigten, daß dies mit ihrer charakteristischen Art zu schwimmen im Zusammenhang steht. Delphine sind bekanntlich schnelle Schwimmer. Ihre Schnelligkeit erreichen sie dabei nicht nur durch kraftvolle Schwanzschläge, sondern auch durch besondere Drehbewegungen, die sie mit ihrem Körper ausführen.<sup>1</sup> Wie man fand, vollziehen die Flossen der Delphine eine Bewegung, die der Drehbewegung einer Schraube mit Linksgewinde entspricht, die sich »ins Wasser hineinschraubt«. Am erstaunlichsten ist jedoch dies: Obwohl sich der Delphin »ins Wasser hineinschraubt«, dreht er sich dabei in Wirklichkeit nicht. Als Stabilisator dient der Schwanz, mit dem das Tier schraubenförmige Bewegungen in gegenläufiger Richtung ausführt. Würde der Delphin beim Schwimmen die erwähnten Drehbewegungen mit dem Schwanz nicht ausführen, dann würde er sich nach allen Regeln der Kunst wie eine Schraube »ins Wasser hineinschrauben«. Und hier liegt das Geheimnis des asymmetrischen Schädels. Der schwere linke Kopfteil unterstützt die Stabilisierung der

<sup>1</sup> Die besondere Struktur der Delphinhaut sowie deren schleimige Absonderungen vermindern außerdem die Reibung zwischen dem Wasser und dem Delphinkörper, was eine hohe Fortbewegungsgeschwindigkeit begünstigt.

Körperlage und wirkt der Kraft entgegen, die bestrebt ist, den Körper um seine Längsachse rotieren zu lassen.

Die Asymmetrie wird bei Tieren jedoch nicht nur durch das Auftreten von Schrauben- bzw. Spiralförmigkeiten verursacht. Gelegentlich wird die bilaterale Symmetrie durch einen zwar offensichtlichen, aber nicht immer erklärbaren Unterschied zwischen der linken und der rechten Körperhälfte gestört, und zwar dergestalt, daß eines von zwei angelegten Organen übermäßig entwickelt oder auch in der Entwicklung zurückgeblieben ist.

Die zu den Finkenvögeln gehörenden Kreuzschnäbel besitzen einen kräftigen, stark gekrümmten Schnabel, den sie geschickt und schnell dazu benutzen, die Schuppen der Kiefernzapfen abzubrechen, um an die darunter sitzenden Samen zu gelangen. Die obere Schnabelhälfte ist stark nach links unten, die untere dagegen nach rechts oben gekrümmt. So kreuzen sich beide Schnabelhälften und zeigen seitlich nach verschiedenen Richtungen. Interessant ist nun, daß die Kreuzschnabelmännchen und -weibchen, die einen stark ausgeprägten sexuellen Dimorphismus aufweisen, d. h., sich in der Farbe und in der Befiederung voneinander unterscheiden, doch die gleiche »Schnabelkonstruktion« besitzen. In manchen Ländern trifft man jedoch auf Arten, deren Schnabel gerade das Spiegelbild des Schnabels unseres Fichtenkreuzschnabels darstellt. Die weiblichen Exemplare nahezu aller Vogelarten zeichnen sich durch eine Rechts-links-Symmetrie ihres Genitalsystems aus. Ihr rechter Eierstock ist unterentwickelt oder fehlt, und der zugehörige Eileiter fehlt gänzlich. Beim Schlüpfen besitzen die Jungvögel allerdings sowohl einen rechten als auch einen linken Eierstock, mit einsetzender Reife atrophieren die rechtsseitigen Organe und werden völlig nutzlos. Nur die linke Seite funktioniert; wenn die Zeit der Eiablage näherrückt, setzt hier ein ganz beträchtliches Wachstum ein.

Und nun noch ein Fall von Asymmetrie, etwas seltsam, dafür aber originell. Es ist die riesige Schere der Männchen der Winkerkrabbe, die mehrfach größer ist als die andere. Dieser zur Gattung *Uca* (*Gelasimus*) gehörige Krebs ist im Küstensand aller warmen Meere zu Hause. Die große Schere dient einem eigenartigen Winken: »Wenn

nämlich ein Weibchen in das Blickfeld des Männchens gerät, wird es durch das Winken stimuliert, und gleichzeitig steigt auch die Erregung des Männchens.« (Urania-Tierreich. Band: Wirbellose Tiere II.)

Gut bekannt ist auch die Flunder, ein flacher Grundfisch, der sein Äußeres von der Farbe hellen Sandes nach graubraun zu verändern und die Haut sehr schnell mit einer »Tätowierung«, d. h. mit allen möglichen Punkten und Streifen, zu versehen vermag, so daß er völlig mit dem Meeresgrund zu verschmelzen scheint. Erwachsene Individuen sind asymmetrisch. Sie liegen auf ihrer rechten Seite, die so die Rolle des Bauchs übernimmt, während sich beide Augen auf der linken, nach oben gerichteten Seite befinden. Beide Augen sind unabhängig voneinander beweglich; das eine kann nach vorn und das andere gleichzeitig nach hinten sehen. So kann die am Boden liegende Flunder mit scharfem Blick alles beobachten, was über ihr vorgeht, ohne sich selbst bewegen zu müssen.

Die Flunder besitzt dafür ein »listiges« Patent. Ihre Augen wandern. Ja, sie ändern ihre Lage! Wenn sie das

*Winkerkrabbe*



Licht der Welt erblicken, sind die kleinen Flundern bilateral symmetrisch wie alle anderen Fische auch. Sie schwimmen im Wasser umher, unternehmen auch Ausflüge zur Wasseroberfläche und zeigen noch keine Neigung zu sesshafter Lebensweise. Das linke Auge befindet sich dann auch noch auf der linken und das rechte auf der rechten Seite. Wenn die Flundern dann größer werden und zur Lebensweise am Meeresboden übergehen, geschieht etwas Erstaunliches. Allmählich ändert das eine Auge seine Lage; es »kriecht« über den Scheitel hinweg zum anderen Auge, bis beide sich auf der gleichen Seite des Kopfes befinden, »wie auf einem von Picasso gezeichneten Profil«.

Welche Bedeutung hat die Asymmetrie für die Biologie bei ansonsten symmetrisch strukturierten Tierarten? Wie ist sie an physiologischen Erscheinungen, Instinkten und am Verhalten beteiligt? Können Tiere überhaupt Symmetrie und Asymmetrie wahrnehmen, können sie rechts und links unterscheiden? Das sind wieder einige Fragen ohne Antwort. Es scheint, als habe neben Tönen, Farben, Gerüchen usw. auch die Körperform mit der symmetrischen Anordnung der Körperteile für die Wahrnehmung der Umwelt sowie für die Handlungsweise einiger biologischer Arten Bedeutung. Neuere Versuche von

*Glattbutt (Scophthalmus rhombus) oder Flunder (Platichthys flesus italicus)*



Ethologen<sup>1</sup> zeigen, daß nicht nur Meerkatzen, Hunde und Katzen, sondern auch verschiedene Fische und Insekten lernen können, einen Kreis von einem Quadrat oder ein Kreuz von einem Dreieck zu unterscheiden.

Im Frühjahr tauchen die während des Winters ausgehungerten Bienen ihren Saugrüssel in den frischen Nektar, oft ohne abzuwarten, bis der Salbei seine Blüten geöffnet hat. Sie reißen diese Blüten an einer bestimmten, dafür besonders geeigneten Stelle auf. Die Blütenkrone von *Salvia sclarea*<sup>2</sup> wird stets von rechts, diejenige einer anderen Salbeiart hingegen von links angebissen. Viele stachelbewehrte Insekten töten ihr Opfer durch einen einzigen Stich mit ihrem spitzen Stachel. Dieser zerstört das nervale Bewegungszentrum, das sich auf der Mittellinie des Körpers in einem ganz bestimmten Abstand vom hinteren bzw. vorderen Körperende, und zwar genau in der Mitte zwischen linker und rechter Seite, befindet. Wieso sind sie imstande, einen mikroskopisch kleinen Nervenknoten so sicher zu treffen? Möglicherweise ist es der genau symmetrische Aufbau des Opfers, der es ihnen ermöglicht, sich zu orientieren.

Symmetrie und Asymmetrie bei Tieren haben natürlich noch sehr viele weitere Aspekte. Wir haben hier nur einige Beispiele betrachtet, die ihre Erscheinungsformen und ihre Bedeutung für die Biologie der Arten, leider aber auch unseren ungenügenden Kenntnisstand in bezug auf dieses Problem illustrieren. Die angeführten Beispiele für Asymmetrie wirken gerade deshalb so verblüffend, weil sie sich so deutlich vor dem Hintergrund der allgemeinen Symmetrie der Organismen abheben. Wir sollten uns zumindest dies einprägen, daß eines der wichtigsten Merkmale von Tieren neben anderen anatomischen Besonderheiten die ihnen eigene bilaterale Symmetrie ist.

<sup>1</sup> Ethologie, die Wissenschaft vom Verhalten der Tiere; Ethologen, Wissenschaftler, die sich der Verhaltensforschung widmen

<sup>2</sup> *Salvia sclarea* ist der sogenannte Muskatellersalbei, der früher kultiviert und als Zusatz zu Wein und als Bierwürze verwendet wurde.

## Der menschliche Körper

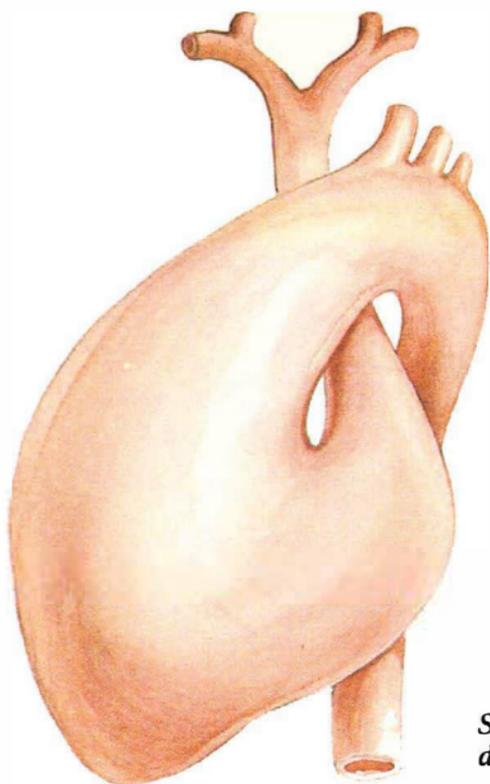
Wir alle können zwischen unserer linken und unserer rechten Gesichtshälfte Unterschiede feststellen, wenn wir uns aufmerksam im Spiegel betrachten. Doch kaum jemand vermag sich vorzustellen, wie auffällig diese Unterschiede werden und wie sehr sich ein und dasselbe Gesicht verändert, wenn man mittels Fotomontage ein Gesicht aus



*Links: das Originalfoto und darunter Aufnahmen, die durch Fotomontage hergestellt worden sind. Das Bild unten links zeigt ein montiertes Gesicht aus der linken Gesichtshälfte des Originals und dessen spiegelbildliche Wiedergabe. Das Bild rechts unten ist aus der rechten Gesichtshälfte und deren spiegelbildlicher Wiedergabe auf der anderen Seite konstruiert.*



jeweils zwei linken bzw. zwei rechten Gesichtshälften entstehen läßt, wie es in unserer Abbildung gezeigt ist. Links sehen wir das aus zwei linken und rechts das aus zwei rechten Gesichtshälften »montierte« Gesicht. Man könnte glauben, daß hier »zwei Seelen in einer Brust wohnen« oder daß wir hier die »zwei Gesichter« eines Menschen vor uns sehen, die uns die zwei Seiten seines Wesens enthüllen. Zuweilen kann das eine Gesicht größere Empfindsamkeit und Intelligenz ausdrücken, während das andere unerwartet grobe Züge annimmt. Ausgehend von derartigen fotografischen Tricks haben einige reaktionäre bürgerliche Psychologen in jüngerer Vergangenheit erklärt, daß die »linken« und »rechten« Porträts realen Persönlichkeitseigenschaften entsprechen, ja, daß man mit ihrer Hilfe sogar potentielle Verbrecher erkennen könne. Es versteht sich von selbst, daß solche Behauptungen ganz und gar unwissenschaftlich sind und daß heutzutage kein Psychologe, der sich auch nur einen Funken Selbstachtung bewahrt hat, einen derartigen Standpunkt vertritt.



*Schematische Darstellung  
des Herzens*

Die Symmetrie unseres Körpers ist vor allem durch den Aufbau unseres Stütz- und Bewegungsapparates bedingt. Die Knochen, aus denen sich unser Skelett aufbaut, sind symmetrisch angeordnet ebenso wie die Muskeln der Extremitäten und des Rumpfes. Erheblich beeinträchtigt wird diese Symmetrie jedoch durch Lage und Form der inneren Organe. Das Herz und die Milz liegen bekanntlich links, die Leber und der Wurmfortsatz dagegen rechts. Die Windungen der Därme sind gänzlich asymmetrisch. Sogar unser Herz stellt nichts anderes als eine asymmetrische Schraube dar; sie ist auf S. 54 schematisch dargestellt. Auch die Nabelschnur eines Neugeborenen ist ein Beispiel für Asymmetrie, denn sie stellt eine sehr schön ausgebildete dreifache Spirale aus zwei Venen und einer Arterie dar, die sich einander stets im Gegenuhrzeigersinn umschlingen.

Manche Anatomen vertreten die Auffassung, daß die Asymmetrie des Körpers sekundär im Ergebnis der Entwicklung eines zunächst symmetrischen Organismus entstanden sei. Die »Hauptschuld« daran trage der Verdauungskanal, der ursprünglich aus einem in der Körperachse nahezu geradlinig verlaufenden Rohr bestanden habe. Mit der Umstellung der Ernährung sei dieser Kanal länger geworden und habe seine Oberfläche vergrößert. Um jedoch auch weiterhin innerhalb bestimmter Grenzen Platz zu finden, habe er sich gekrümmt und so seine Symmetrie eingebüßt. Diese erste Asymmetrie im Aufbau unseres Körpers habe dann im weiteren Evolutionsverlauf schließlich auch zur Asymmetrie der übrigen inneren Organe und Systeme geführt.<sup>1</sup>

Die Links-rechts-Symmetrie bzw. -Asymmetrie im anatomischen Aufbau unseres Körpers spiegelt sich auch in den Organfunktionen wider. Viele unserer Handlungen und Tätigkeiten sind »symmetrisch« oder »asymmetrisch«, ohne daß wir uns dessen bewußt werden. Das bekannteste Beispiel ist der bevorzugte Gebrauch der rechten Hand. Wir schreiben mit ihr, wir geben uns die »Rechte« und führen alle komplizierten Verrichtungen damit aus. Sie ist

<sup>1</sup> Vgl. W. Ludwig: Rechts-Links-Probleme im Tierreich und beim Menschen. Berlin 1932



*Darstellung eines Menschenpaares auf einem Holzschnitt von Hans Baldung (um 1480–1545); Dresden, Kupferstichkabinett*

auch unsere stärkere Hand. Bei Linkshändern verhält es sich natürlich gerade umgekehrt.

Bei den meisten von uns ist auch eines der Beine stärker als das andere, und wir machen mit diesem Bein größere Schritte. Wenn sich ein Rechtshänder im Wald verirrt,

läuft er im Gegenuhrzeigersinn im Kreis, obwohl er meint, geradeaus zu gehen. Daran ist nichts Verwunderliches, denn wenn ein Schritt, den wir mit dem rechten Bein tun, auch nur einen Millimeter länger ist als ein Schritt mit dem linken Bein und wenn diese Differenz ständig beibehalten wird, dann bewegt sich eben ein verirrter Wanderer im Wald in einem Kreis.

Neben der Asymmetrie unserer Handlungen, die sich aus der Tatsache ergibt, daß die Menschen zum Teil Rechts- und zum Teil Linkshänder sind, gibt es auch eine künstlich erzeugte Asymmetrie, die durch Gewohnheit, Verabredung oder Tradition entsteht. Sie ist von der anatomischen Asymmetrie unseres Körpers abhängig. So ist es z. B. bedeutungslos, wie wir den Hut aufsetzen, an welches Revers wir einen Orden stecken, mit welcher Hand wir uns begrüßen, wie wir den Mantel zuknöpfen, die Beine übereinanderschlagen oder in welchem Mundwinkel wir die Zigarette haben. Alle diese Handlungen können wir in zwei spiegelgleichen Varianten ausführen; die Frage ist nur, was allgemein üblich ist oder was wir persönlich bevorzugen und was zur Gewohnheit wird. Diese Gewohnheit festigt sich schließlich so sehr, daß jemand, der sich daran gewöhnt hat, links von anderen zu gehen, sich unsicher zu fühlen beginnt, sobald sein Partner mit ihm den Platz tauscht.

Man findet deshalb auch keine befriedigende Antwort auf die Frage, warum es Links- und Rechtshänder gibt, und noch viel weniger darauf, warum die Rechtshändigkeit so sehr überwiegt. Die Bewegungen der rechten Hand werden von der linken Hirnhemisphäre gesteuert, die der linken Hand durch die rechte Hirnhemisphäre. Haben sich die für die Steuerung der Handbewegungen verantwortlichen Gehirnzentren ungleichmäßig entwickelt? Doch woher kam dann die Asymmetrie dieser Gehirnzentren? Und hier stoßen wir auf ein aktuelles Problem, das viele Wissenschaftler beschäftigte: Ist unser Gehirn eigentlich symmetrisch? Die Antwort scheint leicht zu sein, denn jeder weiß, daß wir in unserem Kopf zwei Hirnhemisphären besitzen, deren jede das Spiegelbild der anderen darstellt und worin jede Struktur der einen Hemisphäre auch in der anderen auftritt. Bis vor kurzem glaubte man, daß dieser

anatomischen auch eine funktionelle Symmetrie entspräche, d. h., daß beide Hemisphären absolut identische Funktionen ausführen ... mit einer Ausnahme: Die Sprachregion befindet sich links, stets links, unabhängig davon, ob der Betreffende Rechts- oder Linkshänder ist. Doch diese »Ausnahme« gilt, da sie allmählich entstanden und später erst zur Regel geworden ist, für alle besonders wichtigen Funktionen der Großhirnhemisphären.<sup>1</sup> Stück um Stück bringen die Forscher immer neue Tatsachen in Erfahrung, die zeigen, daß in unserem Gehirn nicht Symmetrie, sondern Asymmetrie herrscht. Dabei gelang es ihnen, Mittel und Wege zu finden, um zeitweilig die eine oder die andere Großhirnhemisphäre in ihrer Funktion »abzuschalten« und zu beobachten, wie sich ein Mensch verhält, dem nur eine »Hälfte« seines Gehirns verblieben ist. Nach Wadim Deglin vom Leningrader Institut für Evolutionsphysiologie und -biochemie gelangt man dabei zu folgenden Beobachtungen.

Ein Mensch, dem nur die linke Großhirnhemisphäre verblieben und der vorher möglicherweise von Natur aus schweigsam war, wurde nun plötzlich sehr geschwätzig. Er knüpfte mühelos und leicht Gespräche an, griff alle möglichen Themen auf, suchte und fand selbst Anlässe zum Plaudern. Sein Wortschatz wurde dabei merklich reicher und vielfältiger. Allerdings war eine Unterhaltung mit ihm nicht besonders angenehm. Er sprach monoton und farblos; die Stimme verlor ihre Ausdruckskraft und hatte einen dumpfen unnatürlichen Klang. Ein »linker« Mensch dieser Art war nicht imstande, sich in der Bedeutung der Intonation zurechtzufinden. Er konnte Sätze aufmerksam anhören und genau wiederholen, war jedoch außerstande zu sagen, ob sie in zornigem Tonfall gesprochen worden waren oder Freude zum Ausdruck bringen sollten. Me-

<sup>1</sup> Sicher ist heute, daß eine strenge Lokalisation von Hirnleistungen nicht möglich ist. Richtig ist, daß bei Rechtshändern die Sprachregionen immer in der linken Hemisphäre liegen, bei Linkshändern aber sowohl links als auch rechts oder sogar beidseitig vorkommen können. Es ist deshalb zutreffender, von einer sich gegenseitig ergänzenden Spezialisierung der beiden Hirnhälften zu sprechen, wobei die linke im allgemeinen sprachdominant ist. (Anm. d. Red.)

lodian, die er kannte, vermochte er nicht wiederzuerkennen, und er sang auch falsch; ihm klang alles gleich. Auch das Sehen klappte bei diesem »linken« Menschen nicht. So war er nicht imstande, gleichgeformte, aber verschiedenfarbige Figuren, z. B. Dreiecke und Quadrate, nebeneinanderzulegen, weil er nicht fähig war, farbige Figuren schnell zu unterscheiden. Er bemerkte es auch nicht, ob in einer ihm vorgelegten Zeichnung etwas fehlte, etwa der Schwanz eines Hundes oder der Bügel einer Brille usw. Seine Fähigkeit zum logischen Denken dagegen war sehr gut erhalten geblieben oder hatte sich sogar verstärkt. Er befand sich stets in gehobener Stimmung, lachte und scherzte ununterbrochen. Mit anderen Worten: Einige Elemente der psychischen Tätigkeit im Zusammenhang mit dem anschaulichen (bildlichen) Denken hatten beim »linken« Menschen gelitten bzw. waren ganz ausgefallen. Erhalten geblieben bzw. verstärkt waren dagegen die Elemente des abstrakten Denkens und die positiven Emotionen.

Ein Mensch mit nur der rechten Großhirnhemisphäre verhielt sich auffallend anders. Vor allem war er schweigsamer. Sehr schweigsam, ja sogar finster. Man mußte ihn anschreien, damit er überhaupt etwas sagte, und die Antworten fielen sehr kurz aus. Gesten zog er Worten vor, die er oft vergaß. Lange Sätze verstand er nicht; er erfaßte ihre Intonation dagegen ausgezeichnet und reagierte empfindlich auf Intonationsänderungen. Melodien wurden behalten und genau wiedergegeben. Die Aufgabe mit den verschiedenfarbigen Dreiecken und Quadraten wurde rasch bewältigt, Fehler in einer Zeichnung wurden sofort herausgefunden. Dieser Mensch konnte sich die kompliziertesten Figuren merken und sie aus einem Haufen ähnlicher Figuren sofort herausuchen. Große Schwierigkeiten hatte er dafür bei allen Aufgaben, die Logik und Verallgemeinerungsfähigkeit erforderten. Bei einem »rechten« Menschen ist demnach das anschauliche (bildliche) Denken verstärkt, das abstrakte jedoch geschwächt.

Diese Asymmetrie der beiden Hemisphären unseres Großhirns ist allmählich im Verlauf der Evolution entstanden, als die linke Großhirnhemisphäre den »Dienst der höheren Kategorie«, d. h. das verbale und abstrakt-logische

Denken, übernahm, das ausschließlich für Menschen charakteristisch ist. Beim Tier ist auch die andere Großhirnhemisphäre mit konkret-anschaulicher Tätigkeit befaßt, und in diesem Sinn sind sie beide symmetrisch. Man könnte sagen, das Tier besitzt zwei »rechte« menschliche Großhirnhemisphären, sollte aber nicht unbeachtet lassen, daß die Leistungen einer rechten Hemisphäre des menschlichen Gehirns deutlich besser sind als die jedes tierischen Gehirns. Das Kind kommt noch mit »zwei rechten« Hemisphären auf die Welt; noch besitzt es keine »verbale« Großhirnhemisphäre. Im Verlauf der Entwicklung, Ausbildung und Erziehung, d. h. dann, wenn das Kind schon sprechen, nachdenken und verallgemeinern kann, bildet sich die Asymmetrie seines Gehirns heraus.

Werden zu diesem Zeitpunkt die Sprachregionen der linken Hemisphäre zerstört, kommt es zunächst zu einem völligen Ausfall der Sprachfähigkeit. Nach etwa einem Jahr lernt das Kind erneut das Sprechen, und die sich nun ausprägenden Sprachregionen sind dann rechtsseitig lokalisiert. Diese Fähigkeit zum »Umlernen« geht nach dem zehnten Lebensjahr verloren.

Wie wir sehen, liegt hier eine optimale Evolutionsstrategie vor. Um unsere »Vorrichtungen« zum anschaulichen (bildhaften) und zum abstrakten Denken getrennt aktivieren zu können, wurden diese getrennt, so daß unser Gehirn die Möglichkeit hat, je nach Bedarf einmal die eine und ein anderes Mal die andere seiner beiden Hälften maximal zu nutzen. So mobilisiert die Lösung einer komplizierten mathematischen Aufgabe die Gesamtkapazität unseres abstrakten Denkens. Setzen wir uns dagegen ans Lenkrad eines PKW, wo wir alle konkreten Einzelheiten einer Verkehrssituation erfassen müssen, nutzen wir unsere anschauliche Wahrnehmungsfähigkeit bis an die Grenzen ihrer Möglichkeiten. Wie W. Deglin schreibt, gibt es jedoch »keine Haupt- und keine Neben-, keine ›große‹ und ›kleine‹ Großhirnhemisphäre«. Die rechte Großhirnhemisphäre als Basis des anschaulichen Denkens umfaßt die Welt der Erscheinungen in ihrem ganzen Reichtum, ihrer ganzen Vielfalt. Die linke Großhirnhemisphäre als Basis des abstrakten Denkens sucht und findet in dieser Welt die Harmonie von Ursache und Wirkung. Eine vollwertige

menschliche Psyche setzt die abgestimmte und gleichgewichtige Funktion beider Hemisphären des Großhirns voraus.

Wir dürfen allerdings nicht vergessen, daß alle diese Beobachtungen noch ganz am Anfang stehen und wir nur mit größter Vorsicht Schlüsse ziehen dürfen. Fehler in der Wissenschaft haben ihren Ursprung im Übereifer. Sind beide Großhirnhemisphären funktionell tatsächlich so sehr voneinander geschieden? In welcher Wechselbeziehung stehen sie zueinander? Wie und in welchem Maße »schaltet« sich die eine von ihnen funktionell ab, während die andere arbeiten muß? Ist es möglich, daß bei Erkrankung der einen Großhirnhemisphäre die andere deren Funktionen zusätzlich übernimmt? Könnte es, falls unser Beruf eine verstärkt einseitige Belastung erfordert, in einem gewissen Sinn zur funktionellen oder gar anatomischen »Atrophie« der anderen Großhirnhemisphäre kommen? Solche Fragen, auf die gegenwärtig kaum jemand eine Antwort weiß, ließen sich noch zu Dutzenden stellen. Sicher ist, daß unsere heutigen Vorstellungen erhebliche Veränderungen erfahren werden. Das Problem der Gehirnsymmetrie harret noch seiner Lösung.

## Zwillinge

Es gibt in der ganzen Natur vielleicht kein eindrucksvolleres Beispiel spiegelbildlicher Symmetrie der Anatomie und Physiologie zweier Individuen als eineiige Zwillinge. Manchmal ist deren Ähnlichkeit so groß, daß sich selbst die Eltern irren können. Noch interessanter ist es, wenn sich gewisse asymmetrische Merkmale des einen Zwillinges spiegelbildlich beim anderen wiederholen, so daß wir zwei nahezu exakt enantiomorphe Individuen vor uns haben. So kann der eine Rechts-, der andere Linkshänder sein; die Kopfhaare des einen sind im Uhrzeigersinn, die des anderen im Gegenuhrzeigersinn verwirbelt. Oder die Fingerabdrücke der rechten Hand des einen Zwillinges ähneln denen der linken Hand des anderen stärker als den Fingerabdrücken der eigenen linken Hand. Das gilt natürlich analog auch für die jeweils andere Hand.

Warum aber ähneln eineiige Zwillinge einander wie Spiegelbilder und zweieiige nicht? Die Entstehung zweieiiger Zwillinge läßt sich leicht erklären. Die häufigste Ursache dafür ist die Polyovulation, d. h. die gleichzeitige Reifung von zwei oder mehr Eizellen, die dann später nahezu gleichzeitig befruchtet werden. Komplizierter und weniger klar ist die Entstehung eineiiger Zwillinge. Hier beginnt alles mit nur einer einzigen Eizelle, die sich jedoch nach der Befruchtung nicht wie üblicherweise in nur einen, sondern in zwei oder mehr Keimlinge verwandelt. Die nun als Zygote bezeichnete Eizelle durchläuft eine Reihe von Teilungen unter Bildung kleinerer Zellen, der sogenannten Blastomeren. Daraus entstehen im weiteren Verlauf immer kompliziertere Strukturen, die den Körper des Keimlings und die Keimhüllen bilden. Bei ihrer Teilung überträgt die Zygote auf jede Tochterzelle den Gesamtkomplex ihrer Erbanlagen; die Tochterzellen reichen diesen »Stoffkasten« ihrerseits an die nächste Generation weiter. Mit anderen Worten: Alle während der Keimlingsentwicklung aus der Zygote entstandenen Zellen besitzen den gleichen Satz von Erbmerkmalen. Daher rührt die große Ähnlichkeit eineiiger Zwillinge, denn sie stammen aus Zellen, die Nachkommen *einer* Zygote sind und somit völlig identische Kopien ihrer Erbanlagen enthalten.

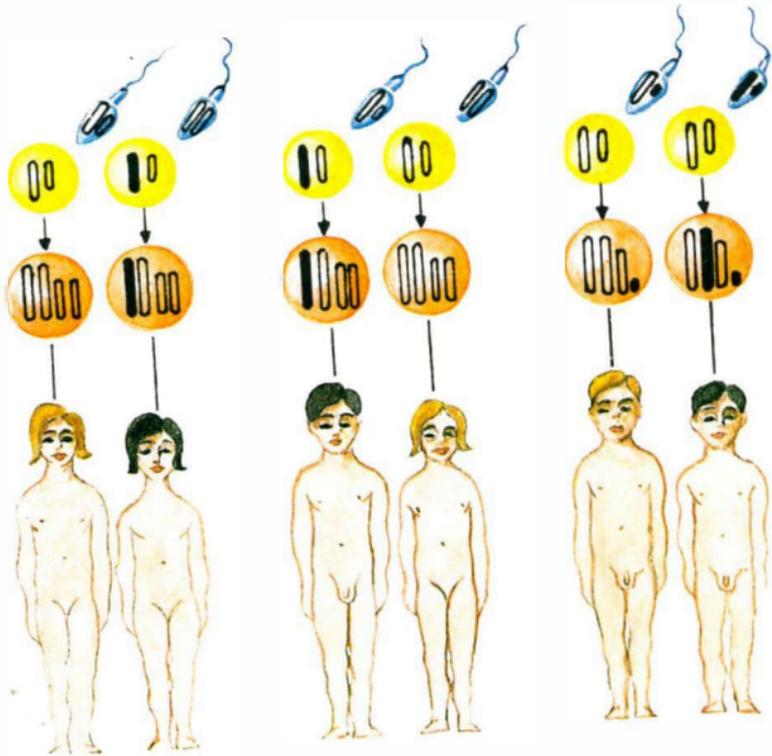
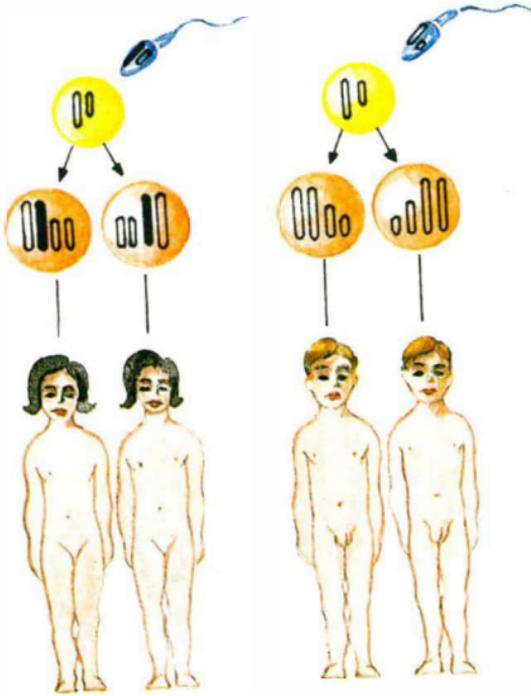
Allerdings kann sich die Zygote noch im Stadium der ersten beiden Blastomeren, d. h. ihrer ersten Tochterzellen, verdoppeln, wonach jede von ihnen ihren eigenen Entwicklungsweg antritt und sich in jeweils ein selbständiges Individuum verwandelt. Eine derartige Verdopplung kann aber auch später eintreten. Nisten sich die beiden eineiigen Zwillinge genügend weit voneinander entfernt in der Gebärmutter ein, so daß sie sich gegenseitig nicht beeinträchtigen, dann entstehen normal entwickelte Kinder. Im gegenteiligen Fall kann einer von beiden Zwillingen (wenn er sich in einer ungünstigen Lage befindet) in seiner Entwick-

*Das genetische Material, das eineiige Zwillinge von den Geschlechtszellen des Vaters und der Mutter erhalten, verteilt sich so, daß es als spiegelbildliche Kopie eines Zwillinges vom anderen angesehen werden kann. Bei zweieiigen Zwillingen kann dieses Material nicht spiegelbildlich auf die beiden Individuen verteilt werden.*

Spermatozoen

Eizelle

Körperzelle



lung zurückbleiben; ist der Abstand sehr gering, können die Keimlinge zusammenwachsen und Verwachsungszwillinge, sogenannte siamesische Zwillinge, entstehen. Somit bilden der Entstehungsmechanismus eineiiger Zwillinge und deren Ähnlichkeit eines der außergewöhnlichen Beispiele für die Symmetrie lebender Organismen. Warum sich die befruchtete Eizelle, d. h. die Zygote, verdoppelt und auf diese Weise zum Ursprung zweier symmetrischer Organismen wird, wissen wir jedoch bis heute nicht.

In allen Fällen von eineiigen Zwillingen wurde neben der äußeren Ähnlichkeit auch eine nahezu vollständige Identität einer ganzen Reihe anderer Parameter festgestellt, so etwa in bezug auf die Blutzusammensetzung, die Blutgruppe, die Immunreaktion usw.

Die spiegelbildliche Symmetrie erfaßt bei eineiigen Zwillingen auch die Sphäre ihres intellektuellen Lebens, ihrer Gaben und Talente. Johann Ambrosius Bach, der Vater des großen Komponisten Johann Sebastian Bach, besaß einen Zwillingbruder, der ebenfalls Johann (richtig: Johann Christoph; Anm. d. Übers.) hieß und ebenfalls Musiker war. Johann Sebastians Sohn Philipp Emmanuel schreibt über seinen Großvater und dessen Bruder, sie seien sich so ähnlich gewesen, daß selbst ihre Frauen sie nicht auseinanderhalten konnten.

Ungeachtet der großen Anzahl von Beobachtungen darf das Problem der Ähnlichkeit und der spiegelbildlichen Symmetrie bei Zwillingen längst nicht als gelöst angesehen werden. Vielmehr birgt es noch viele Unklarheiten und schwer erklärbare Details. Erst, wenn wir eines Tages dahintergekommen sein werden, was die befruchtete Eizelle veranlaßt, zwei, drei oder vier Keimlinge zu bilden, werden wir die »scharfsinnige« Frage beantworten können, wieviel Küken aus einem Ei zu schlüpfen vermögen.

## Rhythmen – die Symmetrie der Zeit

Rhythmen stellen eine Grundeigenschaft der Natur dar. Eine außerordentlich große Anzahl physikalischer, chemischer, mechanischer und biologischer Prozesse laufen

mit einer bestimmten Periodizität ab, wiederholen sich zyklisch in der Art von Pendelschwingungen, sozusagen im Takt eines unsichtbaren Metronoms; diese Rhythmik ist ein untrennbarer Bestandteil der Materie. Rhythmen finden wir in der Welt der Atome und der elektrischen Erscheinungen. Rhythmen begleiten quantenmechanische Prozesse. Rhythmisch verläuft die Bewegung der Himmelskörper; die Drehung der Erde um sich selbst erzeugt den Tag-und-Nacht-Zyklus und ihre Drehung um die Sonne den Jahreszyklus; der Umlauf des Mondes um die Erde dauert etwa einen Monat, und die Bewegung des ganzen Sonnensystems um das Zentrum der Milchstraße umfaßt eine Periode von 180 bis 200 Millionen Jahren. Es gibt Gründe für die Annahme, daß sogar das Weltall ein rhythmisch pulsierendes System darstellt. Wie ein riesiges Herz zieht es sich zusammen, um sich danach wieder auszudehnen, und jeder dieser Vorgänge beansprucht einen Zeitraum von etwa 40 Milliarden Jahren. Vor nicht allzu langer Zeit haben Wissenschaftler des Krim-Observatoriums entdeckt, daß auch die Sonne pulsiert, und ihre Kollegen von der Universität Birmingham haben es bestätigt. Die Sonnenoberfläche führt eine streng periodisch pulsierende Bewegung aus, die eine Frequenz von 2 h und 20 min besitzt; die Schwingungsamplitude beträgt etwa 10 km und die Bewegungsgeschwindigkeit des Sonnenmaterials während der Pulsationen 2 m in der Sekunde. Periodische Erscheinungen sind die Sonnenfinsternis und die Mondzyklen, die Gezeiten des Meeres, der Wechsel der Jahreszeiten usw.

Auch biologische Prozesse verlaufen rhythmisch. Diese Symmetrie in der Zeit besitzt keine geringere Bedeutung für den lebenden Organismus als die räumliche Symmetrie seiner Form und Struktur. Biologische Rhythmen sind der wichtigste Faktor für unsere Existenz in der Zeit.<sup>1</sup> Sie sind ein Ergebnis der Evolution und entstanden allmählich unter dem Einfluß zyklischer Veränderungen der Umgebung, mit denen sie synchron verlaufen. Bekannt sind zirkadiane Rhythmen (circa, lat. = ungefähr; dies, lat.

<sup>1</sup> Siehe auch I. Mletzko/H.-G. Mletzko: Die Uhr des Lebens. Reihe: akzent. Leipzig 1982



*Wanderweg der Alaska-Pelzrobbe zum Paarungstreffen auf den Pribilow-Inseln. Die im Juni geborenen Jungtiere ziehen dann im Herbst mit südwärts.*

= Tag), Monatsrhythmen, jahreszeitliche Rhythmen, Jahresrhythmen und Rhythmen, die mehrere Jahre umfassen.

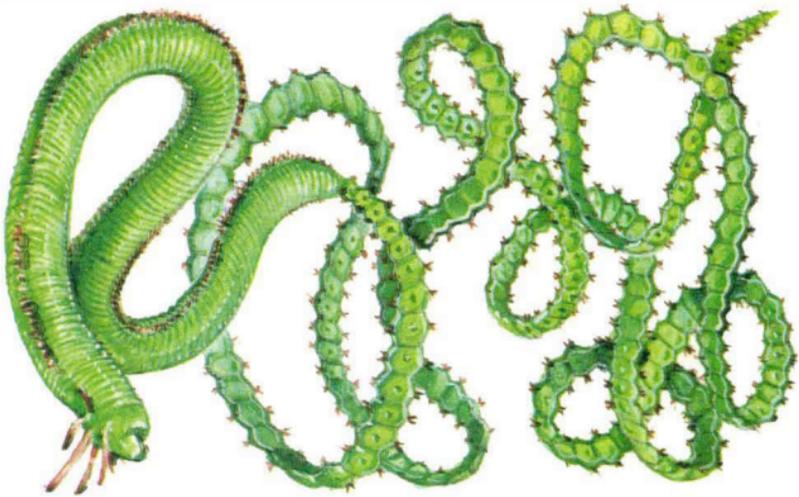
Die Änderungen in der Pflanzenwelt stellen eines der bekanntesten Beispiele für einen jahreszeitlichen Rhyth-

mus dar. Er spiegelt sich auch an jahreszeitlich bedingten Erscheinungen bei den Tieren wider, insbesondere bei den Wanderungsprozessen. Die Verschlechterung der Ernährungsbedingungen in der herbstlichen Tundra treibt das Rentier südwärts in die Taiga, wo sich unter dem Schnee noch leichter Nahrung finden läßt. Im Gefolge der Rentiere macht sich auch der Tundrawolf nach dem Süden auf – und etwas später auch der Schneehase. Im Frühjahr verläuft die Wanderung in umgekehrter Richtung. Die grasfressenden Tiere des Gebirges ziehen im Sommer hoch hinauf in die Berge zu ihren Weiden, im Winter dagegen, wenn die Gipfel und Almen mit einer dicken Schneeschicht bedeckt sind, ziehen sie in die Täler hinunter. Jahreszeitlich bedingte Wanderungen sind eine sehr häufige Erscheinung bei Vögeln, Fischen und Insekten, die dabei wahre Rekorde in bezug auf die zurückgelegten Entfernungen und auch hinsichtlich ihrer erstaunlichen Orientierungsfähigkeit vollbringen.

Monatszyklen werden durch die Umlaufperioden des Mondes um die Erde sowie die Rotation der Sonne um ihre eigene Achse bestimmt. Die Gravitationseinflüsse, denen die Erde während dieser Zeit ausgesetzt ist, wirken sich auch auf die Lebewesen aus. Das gilt beispielsweise für den Vermehrungsrhythmus des Pazifischen und des Atlantischen Palolowurms (*Eunice viridis* bzw. *Eunice fucata*), die im Pazifik bzw. im Atlantischen Ozean leben. Die Generationen dieser Würmer »schwärmen« ausschließlich während des letzten Mondviertels, d. h., sie kommen zu dieser Zeit an die Wasseroberfläche.

Ein eindrucksvolles Beispiel für den Tag-und-Nacht-Rhythmus sind Ebbe und Flut der Ozeane; sie folgen einander in strenger Periodizität. Selbst die Muscheln haben ihren Lebenszyklus exakt dem »Fahrplan« von Ebbe und Flut angepaßt. Ihre Schalenöffnung und der Sauerstoffverbrauch vergrößern oder verringern sich im Takt der Bewegung der Wassermassen.

Die schönen, farbenprächtigen Aktinien folgen ebenfalls dem Tag-und-Nacht-Rhythmus des Ozeans. Bei Flut entfaltet sich ihr symmetrischer sechsstrahliger Körper, um sich bei Ebbe zusammenzuziehen. Diese »Fertigkeit« ist so beständig, daß die Tiere dieses Verhalten auch dann



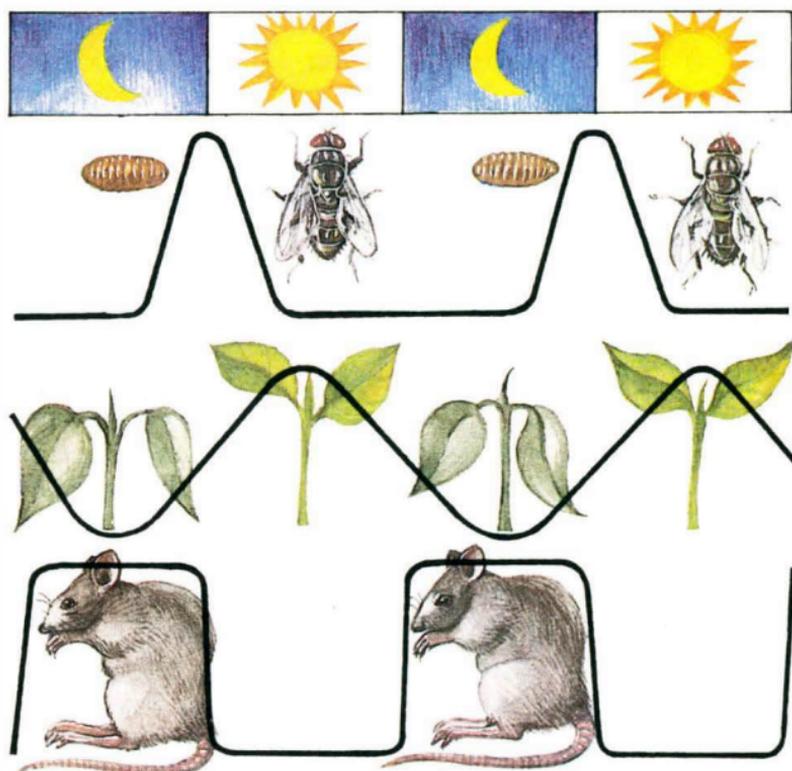
*Palolowurm. Zu bestimmter Zeit – einmal im Jahr zur Zeit eines letzten Mondviertels – trennt sich der hintere Teil vom Körper und treibt an der Oberfläche, wo die Befruchtung erfolgt. Dann geht der hintere Teil zugrunde; am vorderen Stück, das in der Riffzone am Meeresgrund verbleibt, wächst das abgetrennte Teil mit den Fortpflanzungsorganen nach.*

noch sechs bis acht Tage lang fortsetzen, wenn man sie in ein Aquarium gebracht hat, in dem es weder Ebbe noch Flut gibt.

Sogar die abgetrennte Schere einiger Krebsarten, die ihre Farbe bei Flut ändern, fuhr fort, im gleichen Rhythmus nachzudunkeln bzw. zu verblassen wie der Körper, von dem man sie abgetrennt hatte. Die großartigste unter allen biologischen Erscheinungen mit zirkadianem Rhythmus ist jedoch wohl die vertikale Wanderung des Zooplanktons. Bei Einbruch der Abenddämmerung steigen Millionen von Tonnen dieser Kleinorganismen aus der Tiefe des Ozeans auf, um die ganze Nacht über an der Oberfläche zu leben. Bei Sonnenaufgang sinken sie wieder in die Tiefe hinab. Diese Massenbewegung erfaßt über zwei Drittel der Oberfläche des Weltozeans und hat in ihrem Maßstab tatsächlich nichts Vergleichbares in der gesamten Biosphäre. Der Rhythmus wird hier allerdings nicht durch die Gezeiten bestimmt, sondern durch das Licht, und darum wird die vertikale Migration des Planktons als »fotoadaptive Reaktion« bezeichnet.

Zirkadiane Rhythmen sind von außerordentlicher Bedeutung für die Tiere und Pflanzen des Festlandes. Wer schon einmal im Gebirge unter freiem Himmel übernachtet hat, dem ist wohlbekannt, daß die Geräusche des Waldes zu bestimmten Nachtstunden verstummen, daß die Blätter aufhören zu rauschen und der Wind verschwindet, als habe er sich in den Zweigen aufgelöst. Mit Einbruch der Morgendämmerung erwacht der Wald geräuschvoll zu neuem Leben. Diese Änderungen sind regelmäßig jede Nacht zu beobachten, ebenso wie sich mit der Windstärke und -richtung der barometrische Druck zyklisch ändert, die Ionisation der Luft, ihre Feuchtigkeit, elektrische Leitfähigkeit, Temperatur usw. Der Wechsel von Tag und Nacht berührt also nicht nur die Lichtverhältnisse, sondern auch alle meteorologischen Faktoren, die die Klima-Umwelt des Lebens bilden, und die Funktionen der Organismen haben sich dem Rhythmus dieser Änderung angepaßt. Die kleine Taufliede *Drosophila*, für die auch ein dichtes Netz am Fenster keinerlei Hindernis darstellt und die wir deshalb oft auf der Schale überreifer Früchte im Obstkorb sehen können, kommt fast stets eine Stunde vor Sonnenaufgang zur Welt. Dies erlaubt es ihr, den Vorzug der höchsten morgendlichen Luftfeuchte auszunutzen. Mit ihrer Hilfe dehnt das Insekt seinen weichen Körper aus, entsteht seine äußere wasserundurchlässige Hülle, die es tagsüber vor der Wärme schützt und der trockenen Luft nicht gestattet, den geringfügigen Feuchtigkeitsvorrat aufzubauchen. Die Mücken in Äquatorialafrika stechen nur während einer ganz bestimmten Zeit im Verlauf des Tages, und zwar während eines Intervalls von höchstens 30 Minuten. Bei einigen Arten liegt dieses Intervall am Abend bei Einbruch der Dunkelheit, bei anderen um Mitternacht, und eine dritte Gruppe schließlich zieht es vor, die tägliche Ration früh am Morgen »zum Frühstück« einzunehmen.

Arbeitsbienen halten während der ganzen Nacht eine ungestörte Nachtruhe im Stock, doch sobald die Zeit gekommen ist, wo ihre Lieblingsblumen die Blüten, gefüllt mit Nektar, öffnen, fliegen sie aus, um den süßen Saft einzusammeln. Die Pflanzen zeigen im übrigen auch einen deutlich ausgeprägten zirkadianen Rhythmus. Einige von



»Biologische Uhren« richten sich nach der Sonne als „Zeitgeber“.

ihnen, beispielsweise die Mimose und die Akazie, legen ihre Blätter während der Nacht zusammen, um sie tagsüber wieder zu entfalten. Andere wieder heben und senken ihre Blätter. Und vielleicht haben Sie bemerkt, daß die blühenden Linden gegen Abend besonders stark duften?

Die meisten Pflanzen besitzen einen eigenen Rhythmus der Verstärkung oder Abschwächung ihres Duftes, ebenso wie beim Öffnen und Schließen ihrer Blütenkelche. Dieser Rhythmus ist erstaunlich konstant, und Carl von Linné (1707-1778) hat diese Tatsache seinerzeit ausgenutzt, um eine Blumenuhr anzulegen. Das »Zifferblatt« der Uhr bestand aus einem kreisrunden Beet, das der große schwedische Naturforscher in seinem Garten angelegt hatte; anstelle der Zahlen waren darin eigens ausgesuchte Pflanzen angeordnet worden.

Eine Fülle an Fakten wirkt überzeugend, wenn auch

gelegentlich sogar ein wenig ermüdend. Trotzdem haben wir noch keine Antwort auf die wichtigste Frage erhalten, worauf die merkwürdige Fähigkeit von Organismen zur Zeitbestimmung zurückgeht. Wieso »erinnert« sich die Aktinie an die Stunde des Eintritts der Flut, um ihren strahlenförmigen Körper auch im ruhigen Wasser des Aquariums zu entfalten? Wieso ist das Lebensprogramm der kleinen *Drosophila* so eingerichtet, daß diese nur dann schlüpft, wenn die Luftfeuchtigkeit am größten ist? Wieso lassen Vögel bereits kurz vor Einsetzen der Morgendämmerung ihre Stimmen ertönen, als wüßten sie, daß die Sonne in Kürze aufgehen wird? Wie läßt es sich erklären, daß Blumen ihre Blüten zu bestimmten Tageszeiten öffnen? Auch wenn wir das Licht abdecken, fahren sie doch fort, ihre Blüten zur gewohnten Zeit zu öffnen.

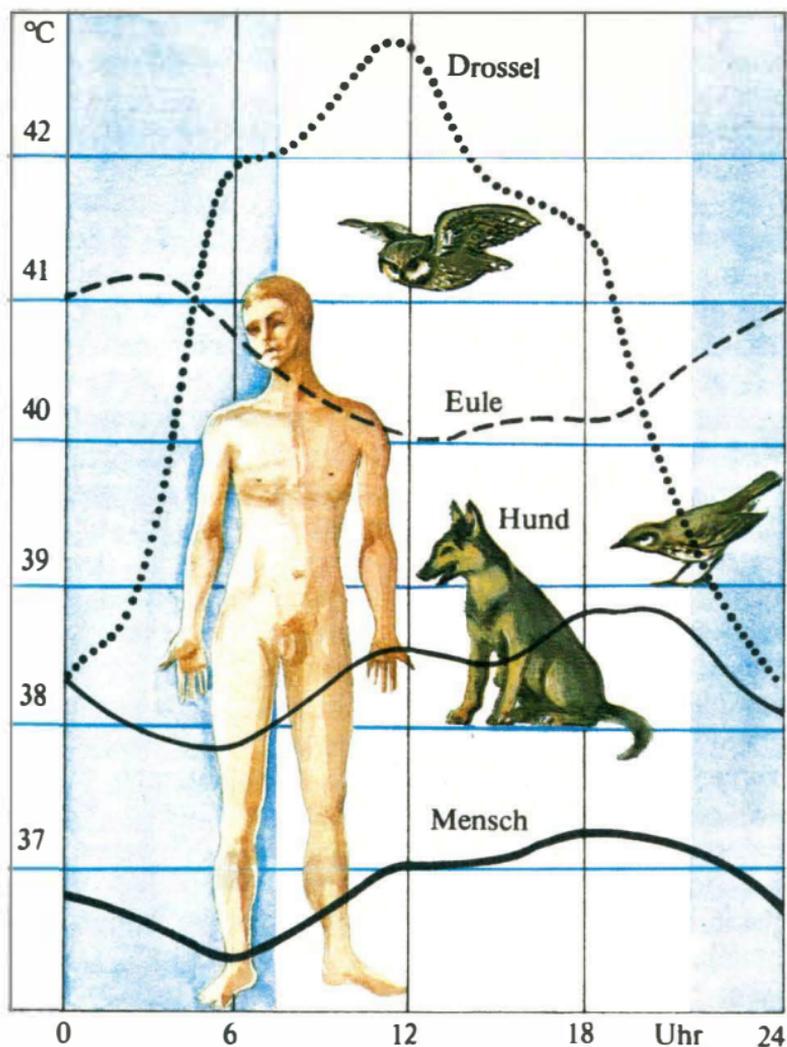
Heute ist bekannt, daß der belebten Natur tatsächlich ein »Zeitgefühl« innewohnt und daß in jedem Organismus eine komplizierte biologische Uhr in Tätigkeit ist, die den Arbeitsrhythmus der verschiedenen Organe und Systeme steuert. Die »Feder« dieser Uhr wird durch zyklisch verlaufende Prozesse in der unbelebten Natur – und hier an erster Stelle durch das Sonnenlicht – »aufgezogen«. In einer Vielzahl von Fällen bildet der periodische Wechsel von Tag und Nacht, d. h. von Helligkeit und Dunkelheit, verursacht durch die Erddrehung, den Hauptfaktor, durch den die Rhythmen von Lebewesen synchronisiert werden. In der Reihenfolge ihrer Bedeutung schließen sich dann Schwankungen der Temperatur, der Feuchtigkeit sowie andere Faktoren an, die wir bereits erwähnt haben. Dem Einfluß dieser äußeren (exogenen) Rhythmen war bereits jener erste elementarste Tropfen lebender Materie ausgesetzt, der vor Milliarden von Jahren im Urozean entstand. Dem gleichen Einfluß unterlagen später alle weiterentwickelten Formen des Lebens, und es ist nicht schwer, einzusehen, daß die natürliche Auswahl nur jene Organismen begünstigte, die imstande waren, sich den Veränderungen der Umwelt – die zyklischen mit eingerechnet – anzupassen. Im Ergebnis der Anpassung entstand und festigte sich ein synchroner, pendelartig verlaufender Rhythmus der Prozesse und auch des Verhaltens. Doch wir haben gesehen, daß die Organismen sich an den Rhythmus

der exogenen Faktoren »erinnern« und fortfahren, sich in ihren Aktivitäten an diesen Rhythmus sogar dann zu halten, wenn die betreffenden Faktoren gar nicht mehr auf sie einwirken. Wie führt die biologische Uhr in diesen Fällen den »Zeitvergleich« aus?

Die Antwort liegt in den komplizierten Mechanismen der sogenannten inneren (endogenen) Rhythmen und in einer weiteren, noch weniger erforschten Erscheinung, dem »Zeitgedächtnis«.

Endogene Rhythmen werden vererbt; es handelt sich um »Eigenrhythmen« des Organismus, die von inneren Ursachen diktiert werden. Sie entstanden offenbar unter dem Einfluß äußerer Rhythmen und automatisierten sich in der Folgezeit, ohne die Verbindung zu jenen zu verlieren. Die belebte Materie entwickelt vor allem chemische, d. h. Stoffwechselrhythmen. Bekanntlich besitzt jedes Gewebe innerhalb des Organismus seinen eigenen Stoffwechselrhythmus, der durch die Aufeinanderfolge zweier gegensätzlicher Prozesse, nämlich der Assimilation und der Dissimilation, zum Ausdruck kommt. Unter Assimilation versteht man den Aufbau neuer Stoffe, die als Energiequelle oder als Bausteine für eigene Gewebe benötigt werden. Die Dissimilation ist der Prozeß, in dessen Verlauf fertige Stoffe, die entweder mit der Nahrung aufgenommen wurden oder durch Synthese im Organismus entstanden, in einfachere Produkte zerlegt werden, um einen Teil der in ihnen enthaltenen Energie zu gewinnen oder um sie zur Synthese und zum Aufbau neuer Stoffe zu verwenden. Die Rhythmen dieser beiden Prozesse sichern die wechselseitige Beziehung und Abstimmung zwischen Hunderten und Tausenden chemischen Reaktionen, die im Gewebe und in den Zellen des Körpers ablaufen.

Aus den Stoffwechselrhythmen entstanden allmählich auch andere kompliziertere physiologische Rhythmen, die die Funktion einzelner Organe und Systeme betreffen. Die periodischen Bewegungen der Lungenflügel beispielsweise sichern den ununterbrochenen Zustrom von Sauerstoff ins Blut, und die rhythmischen Pulsationen des Herzens erlauben es diesem, ungeachtet seines kleinen Volumens, nahezu 300 Liter Blut je Stunde zu fördern. In höheren Organismen ist die Vielzahl der Rhythmen des



*Tagesrhythmik der Körpertemperatur beim Menschen und bei verschiedenen Tieren*

Organismus zusammengefaßt, der sich abhängig vom Zustand der Aktivität oder der Ruhe verstärkt bzw. abschwächt.

Bedauerlicherweise wissen wir bislang sehr wenig oder, genauer gesagt, fast nichts über die zellulären und molekularen Mechanismen der biologischen Uhr. Selbst die einfachste Amöbe besitzt eine derartige Uhr, die in dem kleinen einzelligen Körper verborgen ist. Aber wir können

nicht sagen, warum und wie diese Uhr arbeitet. Kürzlich konnte jedoch etwas sehr Wichtiges geklärt werden, nämlich, wer die »Feder« der Uhr »aufzieht«. Dieses erste Glied in der Kette des Unbekannten entdeckten Wissenschaftler im Kopf der Schabe! Ja, es handelt sich um die gewöhnliche Küchenschabe, die nur in dunklen Ecken lebt und sich in Speisekammern verbergen kann. Man fand, daß die Schabe eine außergewöhnlich genaue innere Uhr besitzt und sich streng an diese hält. Ihr Rhythmus wird durch vier Spezialzellen bestimmt, die sich unter dem Miniaturgehirn der Schabe befinden. Wenn das Licht in der Speisekammer gegen 18 Uhr ausgeht und gegen 6 Uhr wieder eingeschaltet wird, dann entwickeln die Uhrzellen einen entsprechenden Rhythmus für die Aktivität, und der Schabe stehen genau 12 Dunkelstunden zur Verfügung, die sie nutzt, um ungestört ihr Unwesen treiben zu können. In der übrigen Zeit ruht sie sich aus. Wissenschaftler unternahmen folgenden Versuch: Sie »erzogen« Schaben zur Tagesaktivität, indem sie das Labor von 6 Uhr bis 18 Uhr verdunkelten und den Schaben während dieser Zeit Futter zur Verfügung stellten. Von 18 Uhr bis 6 Uhr schalteten sie eine starke Beleuchtung ein und zwangen die Schaben, sich zu verstecken. Nunmehr nahmen sie Küchenschaben mit »normalem« Lebensrhythmus (d. h. nachaktive Schaben) und ihre (tagaktiven) Laborschaben und vollbrachten etwas Phantastisches: Mittels feinsten chirurgischer Instrumente entnahmen sie die »Uhrzellen« aus dem Kopf gewöhnlicher Schaben und pflanzten sie ihren Laborexemplaren anstelle der vorher entfernten eigenen »Uhrzellen« ein. Nach der erfolgreichen Operation begannen die Laborschaben, sich am Tage zu verstecken und in der Nacht aktiv zu werden, d. h., sie übernahmen den Rhythmus jener anderen Schaben, deren Zellen sie nun in ihren Köpfen trugen!

Heute wissen wir noch etwas mehr: Die biologische Uhr besteht aus zwei Teilen. Der eine erzeugt und bestimmt den Rhythmus; er bildet das »Pendel« der Uhr. Der andere Teil registriert die Frequenz der rhythmischen Schwingungen etwa so, wie die Zeigerstellung der Schwingungszahl des Uhrpendels gehorcht. Handelt es sich dabei jeweils um bestimmte Spezialzellen, so erzeugen die ersteren dem-

nach Impulse einer bestimmten Frequenz, beispielsweise zehn gleichmäßige Impulse je Sekunde. Die zum zweiten Teil der biologischen Uhr gehörenden Zellen sind Zählerzellen und stellen fest, wieviel derartige Impulse das Gewebe (von Zellen, Organen, Nerven usw.) je Zeiteinheit durchlaufen. Sind wir faul, gelangweilt, untätig, dann verlangsamen diese Zellen ihre Tätigkeit und senden ihre Impulse in größeren Intervallen aus: Die Zählerzellen zählen nun beispielsweise nicht mehr zehn, sondern sechs Impulse in der Sekunde. Mit anderen Worten: Unsere innere Uhr geht nach, und im Ergebnis fallen alle Zeitabschätzungen fehlerhaft aus; uns scheint es, als ob die Zeit langsam abliefe. Das Gegenteil tritt ein, wenn wir aktiv tätig sind. Dann haben wir die Empfindung, als eilten die Stunden wie im Flug dahin. Im Verlauf des Tag-und-Nacht-Zyklus des Menschen, der aus einer Folge von Wachen und Schlafen, von Aktivität und Ruhe besteht, werden über 50 physiologische Funktionen nach Bedarf beschleunigt oder verlangsamt und jede davon entsprechend den Impulsen ihres »Uhrwerks«. Fünfzig Uhren ticken ununterbrochen in unserem Organismus und legen die unterschiedlichen zirkadianen Rhythmen unserer inneren Organe fest. Beziehen wir in unsere Betrachtung auch die Rhythmen der biochemischen Prozesse ein, dann wächst die Anzahl der Uhren auf einige tausend an. Damit diese komplizierte Kombination von Pendeln als einheitliches, harmonisch organisches System in der Zeit existieren kann, bedarf es einer denkbar vollkommenen Regelung. Die Rolle des obersten Reglers der Lebensprozesse, einschließlich der biologischen Rhythmen, übernimmt bei den höheren Tieren und beim Menschen das sogenannte neuroendokrine oder neurohormonale System. Einige seiner Funktionen, die insbesondere Rhythmen betreffen, werden wir im folgenden Kapitel kennenlernen.

## Hormone und Rhythmen

Vieles in unserem Körper erfolgt »genau rechtzeitig«, um nützlich zu sein. Verantwortlich für die einwandfreie Funktion der physiologischen Uhr sind die Hormone. Alle

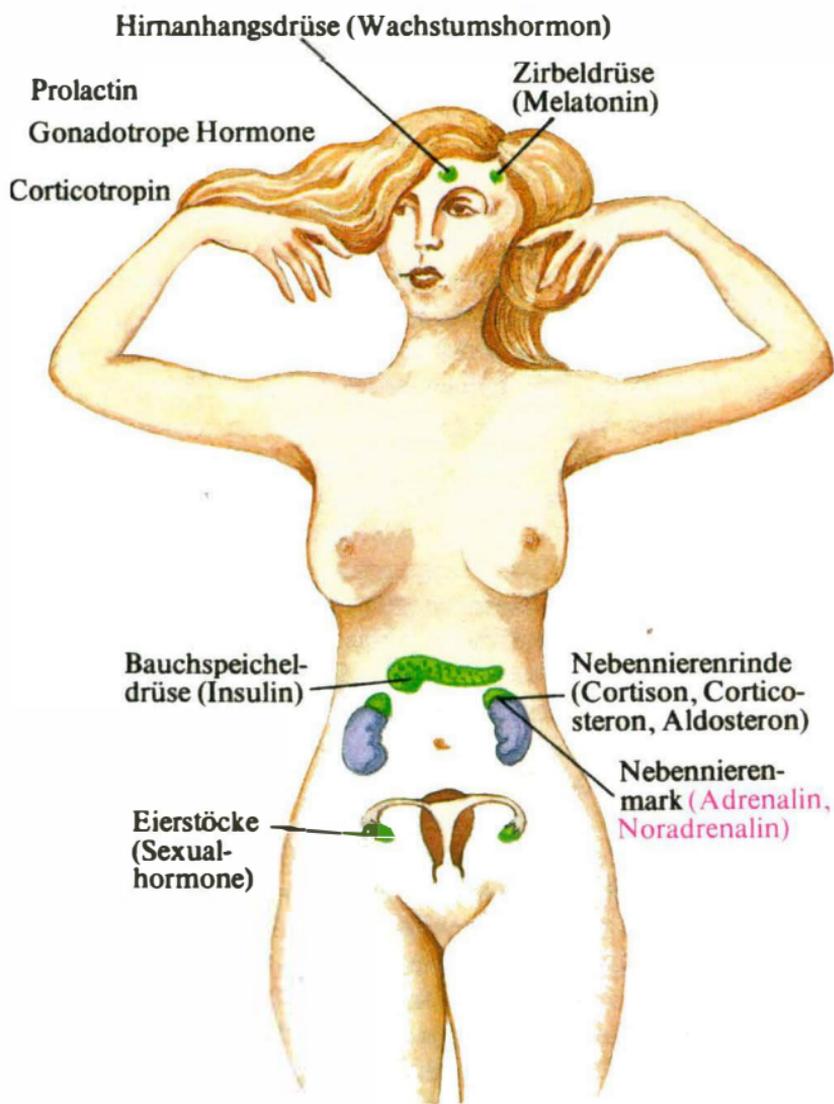
Drüsen mit innerer Sekretion<sup>1</sup> funktionieren in einem bestimmten Rhythmus und halten sich mit pedantischer Genauigkeit an ihren Zeitplan.

Die Menge der Hormone im Blut ändert sich im Verlauf von Tag und Nacht rhythmisch; und davon, ob alle Hormone »wissen, wann ihre Stunde geschlagen hat«, hängt der Rhythmus der übrigen Organe und Systeme ab. Morgens gelangt beispielsweise bevorzugt das Hormon Adrenalin ins Blut. Seine Aufgabe besteht darin, den Apparat für das Wachsein betriebsbereit zu machen und den Organismus auf den bevorstehenden Zeitraum der Tagesaktivität vorzubereiten. Unter dem Einfluß des Adrenalins verstärkt das Herz seine Kontraktionen, der Puls beschleunigt sich allmählich; der Blutdruck steigt, die Atmung wird tiefer, und die Muskeln nutzen den Sauerstoff besser; der gesamte Stoffwechsel wird aktiviert. Zwischen 15 und 17 Uhr, genau in der Mitte der Wachphase, erreichen der Puls und die Körpertemperatur ihren höchsten Wert. Danach beginnt ein allmähliches Absinken, und zwischen 3 und 5 Uhr werden die niedrigsten Werte erreicht.

Im Gegensatz zum Adrenalin steigt der Gehalt des Hormons Melanotropin im Verlauf der Nacht, um bei Tagesanbruch abzunehmen. Sein zirkadianer Rhythmus ist dem Zyklus des Sonnenlichts streng untergeordnet, und dieses Hormon seinerseits prägt allen Prozessen, die es kontrolliert, den gleichen Rhythmus auf. Dieses Hormon spielt eine wichtige Rolle in der Physiologie vieler Tiere und ist unmittelbar verantwortlich für den rhythmischen Farbwechsel, den einige Tiere synchron mit der Beleuchtung vollziehen.

In jedem Frühjahr können wir das unveränderliche Programm der Vögel beobachten, die, kaum angekommen,

<sup>1</sup> Die Drüsen mit innerer Sekretion, die man auch als »endokrine« Drüsen bezeichnet, haben ihren Namen deshalb bekommen, weil sie keine Ausführungskanäle besitzen und ihre Sekrete (Hormone) direkt in die Blutgefäße, d. h. ins Blut, abgeben. Im Unterschied dazu haben Drüsen mit »äußerer« Sekretion Kanäle, durch die sie ihre Sekrete abgeben, ohne daß diese in den Blutkreislauf, d. h. ins Blut, gelangen; Beispiele solcher Sekrete sind Tränen, Speichel und Schweiß.



*Hormonsystem in enger Verbindung zum Rhythmus Wachen – Schlafen. Rot erscheinende Hormone: verstärkt im Wachzustand (Aktivitätsphase)*

sofort darangehen, das Heim für die zukünftige Familie vorzubereiten. Wir müssen uns jedoch darüber im klaren sein, daß es sich hier um ein Programm von Instinkten handelt, das genetisch im Nervensystem verankert ist und von den Hormonen im Blut in Gang gesetzt wird. Der »Wecker«, der am ersten warmen Tag nach einem schnee-

reichen Winter im Gehirn des abgemagerten und hungrigen Bären »klingelt«, um ihn zu wecken und auf die Fährte seines Opfers zu schicken, besitzt ebenfalls hormonalen Charakter. Hormone werden das Tier wieder einschläfern, sobald die Kälte einsetzt und nachdem es genügend Fett in seinem Körper gespeichert hat, um den Energiebedarf während der Winterruhe zu decken.

Hormone regulieren auch die Metamorphose bei den Insekten, in deren Verlauf sich das Ei während einer ganzen Reihe höchst sonderbarer Verwandlungen unter genauer Beachtung der Jahreszeiten in den reifen Organismus umbildet. Es ist, als gäbe es in dem winzigen Körper nicht nur eine Uhr, sondern einen ganzen Kalender. Auch bei den Pflanzen wurden Hormone oder Stoffe mit hormonartiger Wirkung entdeckt, die die Lebensprozesse regeln. Kürzlich wurde sogar mitgeteilt, daß derartige Stoffe, die in der Zusammensetzung den Sexualhormonen der Tiere ähneln, aus der Luzerne, aus den Blüten der Bohne und aus anderen Pflanzen isoliert worden sind.

Hormone sind chemische Stoffe mit außergewöhnlich starker biologischer Wirkung. Sie lösen die von ihnen verursachten Effekte auch dann aus, wenn sie in geringfügiger Menge vorliegen.

Während eines Tages und einer Nacht werden im menschlichen Körper 4 mg Wachstumshormon produziert, das zur Deckung des Gesamtbedarfs vollständig ausreicht. Während des gleichen Zeitraums beträgt die notwendige Menge an Thyroxin, das von der Schilddrüse produziert wird, ein Zehntelmilligramm, und beim Insulin, dem Hormon der Bauchspeicheldrüse, sind es 2 mg. Einige Hormone werden in so geringer Menge gebildet, daß wir sie mittels unserer bisherigen Untersuchungsverfahren nicht erfassen können und ihre Konzentration im Blut deshalb bis heute unbekannt ist.

Die Kontrolle aller Funktionen ist einer der wichtigsten Drüsen mit innerer Sekretion, der Hypophyse, übertragen, die die Tätigkeit fast aller übrigen hormonproduzierenden Drüsen aufeinander abstimmt. Die Hypophyse ist ein kleiner ovaler Körper; sie ähnelt einer Bohne. An der Basis des Gehirns angeordnet, liegt die Hypophyse im Zentrum des Kopfs, und zwar – wie es ihrer Stellung entspricht –

in einem bequemen, thronähnlichen knöchernen Sessel. Von hier aus »verfolgt« sie die Arbeit der übrigen Drüsen und steuert sie durch Entsendung eigener, besonderer Hormone. Entsteht beispielsweise ein höherer Bedarf an Schilddrüsenhormonen, so gibt die Hypophyse unverzüglich eine größere Menge eines eigens für die Schilddrüse bestimmten Spezialhormons ab. Über das Blut gelangt dieses Hormon in die Schilddrüse, und diese verstärkt ihre Tätigkeit. Doch auch die Hypophyse hat einen »Chef«. Es ist der Hypothalamus, ein außerordentlich wichtiges Gebilde im Gehirn, das sich unter den Großhirnhemisphären befindet, und zwar – der Rangordnung gemäß – genau über der Hypophyse. Der Hypothalamus ist das Zentrum der gesamten vegetativen Regulation in unserem Körper, und seine Macht ist ungeheuer groß. Faktisch vereinigt und koordiniert der Hypothalamus die Funktion aller inneren Organe und Systeme zur ganzheitlichen und harmonischen Tätigkeit des Organismus. Er nimmt auch im System der innersekretorischen Drüsen die Schlüsselposition ein. Die Kontrolle über die Hypophyse bewerkstelligt der Hypothalamus durch die Abgabe besonderer Stoffe, von Neurohormonen, die unmittelbar für die Hypophyse bestimmt sind und deren Tätigkeit steuern. Und um nun mit der Hierarchie des neuroendokrinen Systems zu Ende zu kommen, sei gesagt, daß der Hypothalamus (wo es ein »hypo« gibt, was soviel wie »unter« heißt, existiert in der Regel auch ein »über«) seinerseits der höchsten Repräsentanz der Körperregulation untergeordnet ist, die sich in der Großhirnrinde befindet. Wenn unsere Sinnesorgane eine Änderung in der Umwelt registrieren, z. B. das Ende des Tages und den Anbruch der Nacht, dann ist die Großhirnrinde die erste Instanz, die darüber informiert wird. Sie analysiert die Situation und erteilt sofort die notwendigen Befehle. Sofern diese Befehle Handlungen betreffen, von denen das neuroendokrine System berührt wird, schaltet sich der Kreis Großhirnrinde – Hypothalamus – Hypophyse ein, und über die vom Blut beförderten Hormone erhalten jedes Organ und jede Zelle die erforderliche Anweisung. So wird die Einheit von nervalem und endokrinem System gewährleistet; daher sprechen wir vom neuroendokrinen System. Damit wird ein adäquates Verhalten des Organismus bei

Veränderungen in der Umgebung garantiert. Den gleichen Weg nehmen auch die Signale für die rhythmische Tätigkeit unserer Organe und Systeme, die zyklischen Prozessen in der Umwelt entsprechen.<sup>1</sup>

Sicherlich haben Sie schon oft den Ausdruck gehört, jemand sei »nicht in Form« gewesen. Wenn der Spielmacher einer Mannschaft glücklos spielt und die Anhänger enttäuscht sind, lautet der beruhigende Kommentar nach dem Spiel, daß »er nicht in Form war«. Das heißt jedoch keineswegs immer, daß der betreffende Sportler Fehler in der persönlichen Lebensführung gemacht hat oder beim Training faul gewesen ist. Gelegentlich kann es geschehen, daß uns ein Wettkämpfer enttäuscht. Hatte er keine Chance, oder war es ein Spiel des Zufalls? Weder das eine noch das andere. Sein »Versagen« war die objektive Erscheinungsform eines machtvollen Rhythmus, dessen wellenförmiger Verlauf seine gesetzmäßigen Berge und Täler aufweist. Jeder von uns ist diesem Rhythmus untergeordnet, und im Leben eines jeden einzelnen gibt es Schwankungen. Sie können die Körperkraft, die Stimme oder die geistige Arbeitsfähigkeit betreffen. Ihre Periode kann einmal kleiner oder auch einmal größer sein; sie können schwach und unmerklich oder schroff und nur schwer zu überwinden sein.

Die Rhythmen der physiologischen Prozesse sind also sehr unterschiedlich, und Einflußfaktoren gibt es in sehr großer Anzahl.

Wohlbekannt ist beispielsweise die Tatsache, daß die zyklischen monatlichen Veränderungen im weiblichen Organismus eine charakteristische Kurve der Arbeitsfähigkeit, der Emotionen sowie des physischen und psychischen Befindens bedingen. Dieser hormonale Zyklus durchdringt die gesamte Physiologie der Frau und erfaßt sämtliche Organe.

Auch bei Männern wurde ein monatlicher Rhythmus der physischen Arbeitsfähigkeit und der Stimmung beobachtet. Wenn auch noch vieles auf diesem Gebiet ungeklärt ist, so können wir dennoch von der Tatsache ausgehen, daß

<sup>1</sup> Vgl. M. Nichelmann: Licht und Leben. Reihe: akzent. Leipzig 1982

die physische und geistige Arbeitsfähigkeit ebenso wie alle Erscheinungsformen physiologischer und schöpferischer Tätigkeit einer strengen Periodizität in der Zeit gehorchen; sie unterliegen jährlichen, jahreszeitlichen, monatlichen, wöchentlichen oder auch täglichen Schwankungen. Es ist für niemanden ein Geheimnis, daß die Arbeitsproduktivität am Montag nach einem arbeitsfreien Tag niedriger ist als in der Wochenmitte. Besonders schroff ist der Arbeitsproduktivitätsabfall während der Nachtschicht, und zwar am stärksten im Intervall zwischen 1 und 3 Uhr, wenn das Funktionsniveau des Organismus stark herabgesetzt ist. Eine Untersuchung zeigte, daß bei Krankenschwestern, die jahrzehntelang ununterbrochen in Nachtschicht gearbeitet hatten, entgegen allen Erwartungen die »Gewohnheit« des nächtlichen Abfallens der physiologischen Prozesse erhalten geblieben war, unabhängig davon, daß sie sich während dieser Zeit im aktiven Wachzustand befanden. Aus dem bisher Gesagten können wir uns leicht erklären, warum das so ist; ergänzt sei, daß einige Jahrzehnte eine viel zu kurze Zeit sind, um den in Jahrtausenden gefestigten Rhythmus des Stoffwechsels sowie der hormonalen und nervalen Tätigkeit des Organismus abzuändern.

Bei den meisten Menschen ist der zirkadiane Rhythmus mit zwei Anstiegen der Arbeitsfähigkeit verknüpft, die eine Kurve mit zwei Maxima beschreibt. Das erste Maximum liegt etwa zwischen 9 und 13 Uhr und das zweite nach 16 Uhr. Dann ist die Aktivität der Gehirnzellen groß, und die eingehenden Informationen werden am produktivsten verarbeitet. Die Muskelkraft steigt an und die Empfindlichkeit der Sinnesorgane auch. Wir sehen und hören besser, wir nehmen auch die schwächsten Gerüche wahr, und die Empfindlichkeit der Haut steigt.

Aufgrund detaillierter Untersuchungen über den zirkadianen Rhythmus haben Wissenschaftler festgestellt, daß es zwei Typen von Menschen gibt, die man als »Lerchen« und »Eulen« bezeichnet. »Lerchen« erwachen früh und schlafen zeitig ein; sie sind in der ersten Hälfte des Tages munter und energiegeladener. »Eulen« schlafen erst nach Mitternacht ein und haben große Schwierigkeiten mit dem Wachwerden, weil ihr Schlaf frühmorgens am tiefsten ist.

Die Arbeitsfähigkeit solcher Menschen erreicht ihr Maximum erst in der zweiten Tageshälfte. Das heißt natürlich ganz und gar nicht, daß »Eulen« morgens arbeitsunfähig wären, aber ihr größter Wirkungsgrad liegt in der zweiten Tageshälfte, bei den »Lerchen« dagegen in der ersten.

Zirkadiane Rhythmen sind nicht nur für unsere Arbeitsaktivität von Bedeutung, sondern auch für den normalen Ablauf aller Prozesse im Organismus, für unsere Gesundheit. Wenn wir gesund bleiben wollen, sollten wir auf die Signale dieser inneren Uhr hören und die natürliche Synchronisation mit den Rhythmen der Umwelt nicht vernachlässigen. Das heißt, unsere Lebensweise muß mit den Anforderungen der natürlichen Rhythmen übereinstimmen. Menschen, die ein geordnetes Leben führen und sich an eine feste Ordnung halten, sind meist munter und lebensfroh; sie besitzen hohe Arbeitsfähigkeit und gute Laune. Andere dagegen, die ihrer eigenen Uhr nicht die notwendige Aufmerksamkeit widmen und dies für unwichtig halten, sollten die Schuld an ihrer Mißstimmung, Kraftlosigkeit, an Kopfschmerzen oder »unerklärlicher« Müdigkeit bei sich selbst suchen.

Die unangenehmen Symptome, die aus der Nichtübereinstimmung von inneren und äußeren Rhythmen resultieren, können Sie dann bemerken, wenn Sie mit dem Flugzeug in westlicher oder östlicher Richtung geographische Zonen mit unterschiedlicher astronomischer Zeit überfliegen. Bei guter Gesundheit ist die Anpassung eine Frage von einigen Tagen, aber wenn die geistige und physische Belastung groß genug ist, kann sich der Rhythmuswechsel außerordentlich unangenehm auf den gesamten Organismus auswirken.

Die biologische Uhr ist ein unersetzlicher und wertvoller Begleiter in unserem Leben, der uns viele Vorzüge sichert. Das ist der Grund, warum wir den rhythmischen Gang dieses »Gesundheitsreglers« nicht durcheinanderbringen dürfen. Der Tag und die Nacht haben genügend Stunden, um einen vernünftigen Wechsel von intensiver Arbeit und vollwertiger Erholung zu gewährleisten. Am wichtigsten von allen ist der Hauptrhythmus des Lebens: Wachen und Schlafen.

## Wachen und Schlaf

Der Wechsel von Wachen und Schlafen ist der Aktivitätsrhythmus des Menschen. Unser ganzes Leben ist eine unaufhörliche Folge dieser beiden Zustände, die es gewissermaßen in zwei Teile teilen: den Tag, in dessen Verlauf wir wahrnehmen, denken und arbeiten, und die Nacht, während der wir das Gehirn »abschalten« und uns von der Wirklichkeit »losreißen«. Dieser Rhythmus entstand irgendwann einmal vor langer Zeit, und seine Wurzeln verlieren sich in den Anfängen der Evolution. Er festigte sich, da unsere fernen Vorfäter nur während des Tages aktiv sein konnten. Das Steinbeil und ihr entwickeltes Gehirn sicherten ihnen nur bei Tageslicht einen Vorteil im harten Kampf ums Dasein. Sobald die Nacht hereinbrach, mußten sie Schutz suchen, um sich auszuruhen, aber auch um bis zum nächsten Tag ungeschoren zu bleiben. Trotz zahlreicher Versuche, den Wach-Schlaf-Rhythmus auf der Grundlage normaler physiologischer Prozesse zu erklären, ist unser Wissen auch auf diesem Gebiet noch recht lückenhaft. Es hat sich gezeigt, daß die Regulation des Wach-Schlaf-Verhaltens von Mensch und Tier ein ausgesprochen komplexer, schwer zu durchschauender Vorgang ist.

Dabei glaubten französische Forscher schon zu Beginn unseres Jahrhunderts, die Lösung gefunden zu haben. Sie hielten abwechselnd vor einem Hundezwinger Wache, um die Tiere am Einschlafen zu hindern. Sie erlaubten den Hunden im Verlauf von elf Tagen nicht »ein Auge zuzutun«; danach entnahmen sie aus dem Gehirn dieser Hunde einen Extrakt und injizierten ihn anderen, ausgeruhten und ausgeschlafenen Hunden. Das Ergebnis war verblüffend: Die Tiere zeigten sogleich alle Anzeichen äußerster Müdigkeit, ließen sich auf den Boden sinken und fielen rasch in tiefen Schlaf. Ein aus dem Blut der wachgehaltenen Hunde extrahiertes Serum rief den gleichen Effekt hervor. Was konnte das bedeuten? War das eine Bestätigung der Annahme, daß sich im Organismus im Zustand der Aktivität (als Ergebnis der Ermüdung) toxische Stoffwechselprodukte anhäufen? Diese »Schlafgifte« oder »Hypnotoxine«, wie man sie zunächst nannte, ver-

ursachten den Schlaf, in dessen Verlauf sie selbst zerstört werden, so daß auf diesem Wege die Handlungsfähigkeit zurückgewonnen wird. Der Schlaf sei demzufolge die Zeit, während der sich der Organismus von den Ermüdungsprodukten »reinigt«.

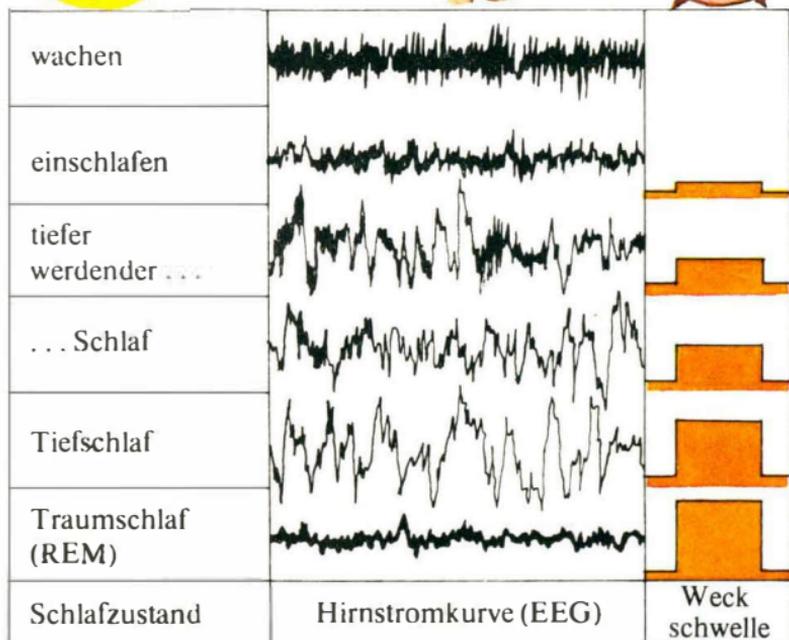
Diese chemische Theorie des Schlafs stimmt mit der Tatsache überein, daß Menschen nach angestrenzter physischer Arbeit tiefer und länger schlafen als sonst. Allerdings vermag dies nicht zu erklären, warum wir häufig einschlafen, ohne ermüdet zu sein, und warum uns andererseits starke Übermüdung daran hindert, sofort einzuschlafen. Auch bei siamesischen Zwillingen mit gemeinsamem Blutkreislauf stellte man fest, daß der Schlaf nicht unbedingt gleichzeitig eintrat. Wäre die Anhäufung irgendwelcher chemischer Stoffe im Blut die einzige Ursache des Schlafs, dann wäre es unmöglich gewesen, daß der eine dieser Zwillinge wach blieb, während der andere schlief.

Wenn der Schlaf eine reversible rhythmisch verlaufende Unterbrechung des Wachzustandes, also ein »Abschalten« unseres Bewußtseins gegenüber der Umwelt darstellt, dann muß sich der »Schalter« dafür, unabhängig von den Ursachen, die ihn in Tätigkeit setzen, auf jeden Fall in unserem Kopf befinden. Im Gehirn muß ein Mechanismus existieren, der die Nervenimpulse unterbricht, die in die Gehirnrinde gesandt werden und uns wachhalten, ein Mechanismus, der diese Impulse auch später wieder in Gang setzt. Dieser Gedanke beschäftigte die Wissenschaftler einige Jahrzehnte lang. Durch einige interessante Beobachtungen aus der medizinischen Praxis wurde er immer wieder gestützt. Während des ersten Weltkriegs z. B. brach eine Epidemie der sogenannten Schlafkrankheit aus. Es handelt sich dabei um eine Viruserkrankung, die charakteristische Veränderungen im Gehirngewebe hervorruft. Bei der Untersuchung seiner Patienten bemerkte der österreichische Neurologe Economo, daß der Zustand pathologischer Schläfrigkeit stets mit der Schädigung einer streng definierten Zone tief im Gehirn verbunden ist. Wird dagegen eine andere benachbarte Zone angegriffen, dann ist Schlaflosigkeit die Folge. 1943 behandelte der sowjetische Neurochirurg Graschenko einen Verwundeten, in

dessen mittlerem Gehirnteil ein Granatsplitter steckte. Als der Arzt versuchte, den Fremdkörper zu entfernen, bemerkte er eine seltsame Erscheinung. Bei jeder Berührung der betreffenden Stelle mit der Pinzette fiel der Patient augenblicklich in tiefen Schlaf. Er erwachte sofort wieder, wenn man das Instrument wegnahm.

Diese und ähnliche Beobachtungen führten zwangsläufig zu der Annahme, daß im tiefen, unterhalb der Rinde gelegenen Teil des Gehirns, im sogenannten Hirnstamm, ein Zentrum unmittelbarer Beziehung zum Schlaf- bzw. Wachzustand steht. Bekannt war, daß die Natur hier die Steuerung aller Lebensfunktionen des Organismus konzentriert hat: die Zentren für die Atmung und die Herzstätigkeit, für Hunger und Durst, für den Wärmehaushalt, für die hormonale Regelung usw. Welchen Anteil aber hatte der Hirnstamm an der Entstehung des Schlafs? Der erste, der darauf eine Antwort erhielt, war der schweizerische Physiologe Walter Rudolf Hess (geb. 1881). Freilich stellte er seine Fragen in nicht sehr delikater Form. Er trieb Drahtelektroden in den Hypothalamus von Katzen und ließ dann Strom hindurchfließen. Doch damit konnte er beweisen, daß die Tiere bei der Reizung bestimmter Punkte in diesem Gebiet einschlafen, und er konnte diese Punkte bestimmen.

Die zweite Möglichkeit der »Befragung« besteht in der Aufzeichnung der bioelektrischen Aktivitäten des Gehirns. Im Jahre 1929 zeigte der deutsche Psychiater Hans Berger einige seltsam gebrochene Linien und erklärte, er habe die Aktionsströme des Gehirns aufgezeichnet. »Bioströme«? »Gehirnwellen«? Niemand glaubte das damals, ja man lachte sogar über ihn und vergaß ihn dann. Doch 25 Jahre später entstand aus den bescheidenen Versuchen Bergers die Elektroenzephalographie, ohne die wir uns heute die neurologische Wissenschaft nicht vorstellen können. Sehr schnell erkannte man, daß sich die Bioströme im Wachzustand von den Schlafrhythmen ganz auffällig unterscheiden, wenn auch in unerwarteter Weise. Je munterer und aktiver ein Mensch ist, um so unauffälliger ist sein Elektroenzephalogramm (abgekürzt: EEG). Und umgekehrt, je tiefer der Schlaf ist, um so klarer und größer wird der Kurvenzug.



### Elektroenzephalogramm im Wach- und Schlafzustand

Im Jahre 1949 lüfteten der Italiener G. Moruzzi und der Amerikaner H. W. Magoun als erste den Schleier über der physiologischen Rolle der *Formatio reticularis* und legten damit den Grundstein für eine Reihe glänzender Experimente, deren Ergebnisse die Basis für die »Reticularis-Theorie« von Wachen und Schlafen darstellen. Beide Wissenschaftler benutzten wie Hess die Elektrodentechnik zur Reizung bestimmter »Punkte« im Gehirn, kombinierten sie jedoch mit dem elektroenzephalographischen Verfahren nach Berger, das es ihnen erlaubte, »die Antworten« der betreffenden Punkte aufzuzeichnen. Sie fanden, daß die Reizung der *Formatio reticularis* bei schlafenden Katzen zu einer Weckreaktion und deutlichen Änderungen im EEG führte. Später zeigten H. W. Magoun und einige weitere Neurophysiologen aus Kalifornien, daß

leerkatzen einschlafen, wenn man die Verbindung zwischen der *Formatio reticularis* und der Großhirnrinde zerstört. Und sie schlafen bis an ihr Lebensende, gleichgültig gegenüber allem und ohne auf irgendetwas zu reagieren, obwohl ihre Sinnesorgane funktionieren und die Großhirnrinde ständig mit Informationen über ihre Umwelt überschütten.

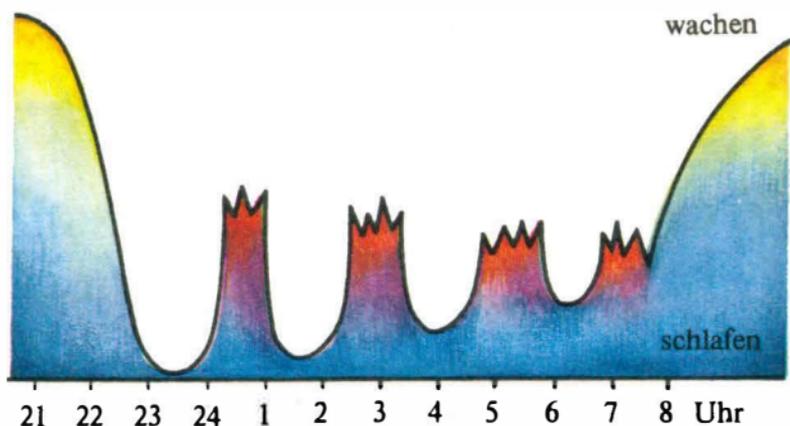
Daraus folgt ein höchst interessanter Schluß, nicht wahr? Wir handeln und denken (oder wir denken zuerst und handeln dann, wenn Ihnen das lieber ist) dank der Großhirnrinde. Sie empfängt und verarbeitet die gesamte eingehende Information und legt in Übereinstimmung damit unsere zweckmäßigen Handlungen fest. Doch wenn die Verbindung mit dem Hirnstamm zerstört wird, »schläft« das Gehirn »ein«, und die Großhirnrinde spürt nichts; die Impulse, die sie von den Rezeptoren erhält, werden nicht umgesetzt. Das heißt, die Großhirnrinde kann ganz nach »Wunsch« der *Formatio reticularis* aktiv oder »außer Betrieb« sein!

Die große Bedeutung der *Formatio reticularis* steht auch heute noch außer Frage, jedoch schränken neuere Befunde die Annahme, daß dieser Gehirnbezirk das alles entscheidende Zwischenhirn ist, beträchtlich ein. So folgten auf gezielte Reize der *Formatio reticularis* nicht nur Weck-, sondern unter bestimmten Bedingungen auch Schlafreaktionen. Andererseits konnte experimentell überzeugend nachgewiesen werden, daß auch Gehirne, denen eine *Formatio reticularis* fehlt, einen Schlaf-Wach-Rhythmus besitzen. Es muß demnach noch andere, möglicherweise im Zwischenhirn liegende Regulationszentren geben.

Auf der Grundlage neuerer Untersuchungsergebnisse beginnt sich eine weitere, eine »biochemische« Theorie von Wachen und Schlafen in den ersten Umrissen abzuzeichnen. An Versuchstieren fand man, daß die Konzentration von Serotonin und Noradrenalin einen regulierenden Einfluß auf den zyklischen Ablauf der Nachtschlafperiode hat. Diese Substanzen werden von Nervenzellen produziert, die in gut abgrenzbaren Bereichen des Hirnstammes (Serotonin) bzw. der *Formatio reticularis* (Noradrenalin) liegen. Wer aber unter natürlichen, d. h. nicht experimen-

tell erzeugten Bedingungen den Produzenten das Kommando zur Freisetzung gibt und damit letztlich für die Rhythmussteuerung verantwortlich zeichnet, ist noch völlig unbekannt.

Wie vorhergehend schon einmal erwähnt, ist der Schlaf kein Zustand der Ruhe und »Untätigkeit«, sondern eine rhythmisch verlaufende Unterbrechung des Wachzustandes. Dabei werden im Gehirn eine Reihe höchst interessanter Prozesse vollzogen, die nacheinander ablaufen, wie nach einem eigens dafür geschriebenen Drehbuch. Wir schlafen in jeder Nacht »nach zwei verschiedenen Verfahren«, die rhythmisch aufeinander folgen; wir haben zwei Arten des Schlafs, die sich überhaupt nicht ähneln. Die Nacht beginnt mit dem »langsamen« Schlaf; wir schlafen ein, und die Kurve der Gehirnwellen des Wachzustandes ändert sich: Die Häufigkeit der in einer bestimmten Zeiteinheit ablaufenden und im EEG gut nachweisbaren Wellen nimmt ab, ihre Schwingungsweite (Amplitude) hingegen nimmt zu. Außerdem werden sogenannte Schlafspindeln, das sind kleine und etwa vierzehnmal in der Sekunde auftretende Wellenzüge, erkennbar. Der Körper ist entspannt und ruhig, er bietet ein Bild, das unserer klassischen Vorstellung vom Erholungsschlaf entspricht. Doch nur ein bis eineinhalb Stunden später tritt ein schroffer Wechsel ein: Die langsamen Gehirnwellen werden plötzlich schnell und ähneln denen des Wachzustandes; die Amplitude der Wellen nimmt deutlich ab, und das EEG erscheint flach. Beobachtet man einen schlafenden Menschen während dieser Zeit, dann bemerkt man, wie er unruhig wird, er führt mit den Extremitäten gleitende Bewegungen aus, und seine Augäpfel bewegen sich rasch von rechts nach links hin und her. Gerade die schnellen Augenbewegungen sind für diese Schlafphase so charakteristisch, daß sie als REM-Stadium (REM ist die Abkürzung des englischen Begriffes *Rapid Eye Movements*, schnelle Augenbewegungen) bezeichnet wird. Im Unterschied dazu nennt man die Tiefschlafphase auch NREM-Schlaf (von Non-REM-Schlaf). Trotzdem schläft der Mensch im REM-Stadium sehr fest. Ihn aufzuwecken ist in der REM-Phase viel schwieriger als in der Phase des »langsamen« Schlafs. Deshalb hat man diesen zweiten

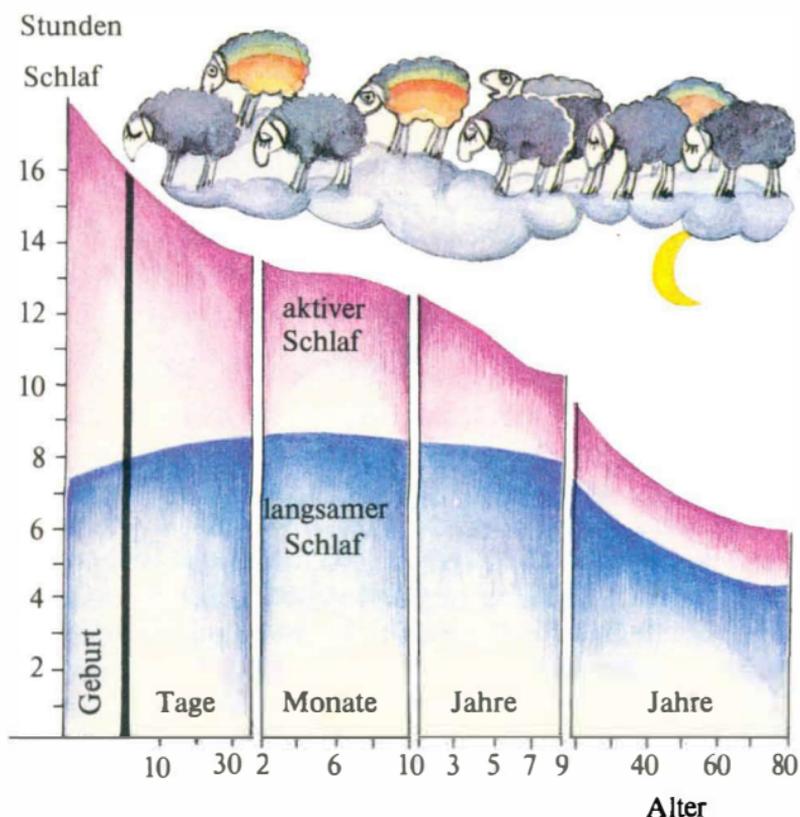


*Schlafen – ein Wechsel zwischen paradoxem Schlaf mit den Traumphasen (gezackt) und dem langsamen (tiefen) Schlaf*

Schlaf, der gleichzeitig tief und aktiv ist, als »paradoxen« oder »schnellen« Schlaf bezeichnet; es ist zugleich die Zeit, während der wir träumen. Man hat die Bewegungen des Körpers und der Extremitäten während des paradoxen Schlafs mit den Bewegungen eines Zuschauers im Theater verglichen, der sich möglichst bequem auf seinem Stuhl »breit macht«, und die Augenbewegungen damit, wie der Schlafende seine Träume »betrachtet«.

Die Schlafzyklen oder NREM-REM-Stadien wiederholen sich bis zu fünfmal in der Nacht. Die Dauer eines REM-Stadiums beträgt 10 bis 20 Minuten und nimmt im Verlaufe der Nacht zu. Während also zu Beginn der Nacht der Tiefschlaf vorherrscht, dominiert gegen Morgen der Traumschlaf. Welche Bedeutung haben diese beiden Schlafarten?

Menschen, die durch physische Arbeit ermüdet sind, verbringen die Nacht hauptsächlich in langsamem Schlaf. Dieser NREM-Schlaf überwiegt auch bei Kindern. Es wurde festgestellt, daß das Wachstumshormon während der langsamen Schlafphase in das Blut eingeführt wird. Während dieser Zeit ist auch die Synthese von Proteinen und Nukleinsäuren in den Zellen verstärkt; es erfolgt eine intensivere Erneuerung der Gewebe, und die verbrauchte Energie wird aufgefüllt. Der NREM-Schlaf ist die Periode der allgemeinen physischen Reproduktion des Organis-



*Veränderung der täglichen Schlafdauer und der Schlafformen beim Menschen im Laufe seines Lebens*

mus. Und der paradoxe Schlaf? Zunächst glaubte man, daß ihn das Gehirn »für sich selbst reserviert« hat, und zwar als die Zeit der Reproduktion des Nervensystems und der Gehirnstrukturen. Entsprechende Untersuchungen konnten diese Annahme aber nicht bestätigen. Auch bei einem längeren REM-Schlaf-Entzug – die Personen wurden sofort aufgeweckt, wenn sie in diese Schlafphase gelangten – konnten keine psychischen Folgen, wie verminderte geistige Arbeitsfähigkeit, nachlassendes Gedächtnis oder herabgesetztes Aufnahmevermögen, festgestellt werden.

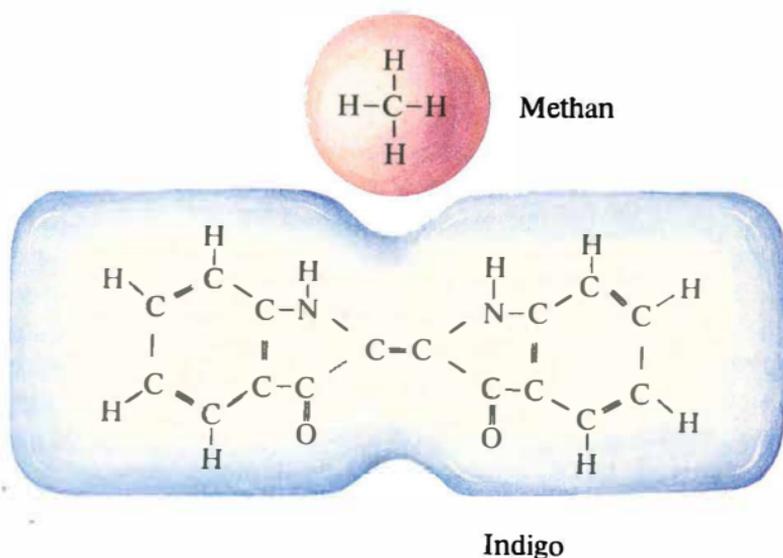
Die Frage nach der eigentlichen Notwendigkeit des rhythmischen Wechsels der Schlafphasen kann heute noch nicht schlüssig beantwortet werden. Sicher dürfte aber sein, daß er in einem engen Zusammenhang mit der

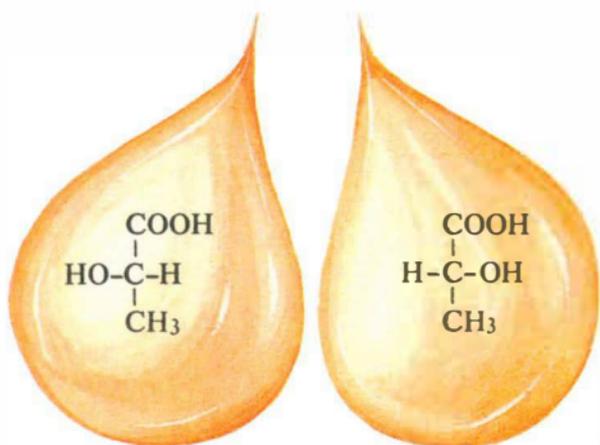
physischen und psychischen Vorbereitung des Organismus auf die Wachphase steht. Unsere Arbeitsfähigkeit beruht also nicht auf einer »Ausschaltung des Bewußtseins«, sondern auf der aktiven Tätigkeit des Nervensystems, während wir schlafen, auf dem konsequenten Wechsel der beiden Schlafphasen und auf der Möglichkeit zu träumen. Träume, sogar die unangenehmen, sind ein Zeichen dafür, daß die Müdigkeit aus unserem Gehirn entfernt wird und wir wieder zu geistiger Arbeit taugen.

## »Linke« und »rechte« Moleküle

Gibt es wirklich »linke« und »rechte« Moleküle? Ja, unter den natürlich vorkommenden chemischen Verbindungen gibt es Hunderte und Tausende von Stoffen, aufgebaut aus Molekülen, die spiegelgleiche Doppelgänger sind. Vergleichen Sie einmal die dargestellten chemischen Formeln des Methans und des bekannten blauen Farbstoffs Indigo. Diese beiden Moleküle sind mit ihren Spiegelbildern völlig deckungsgleich, und das bedeutet, daß sie nur in einer Form, gewissermaßen nur mit einer räumlichen »Physiognomie« existieren können, nämlich derjenigen, die auf

*Strukturformel des Methans und des Indigos*

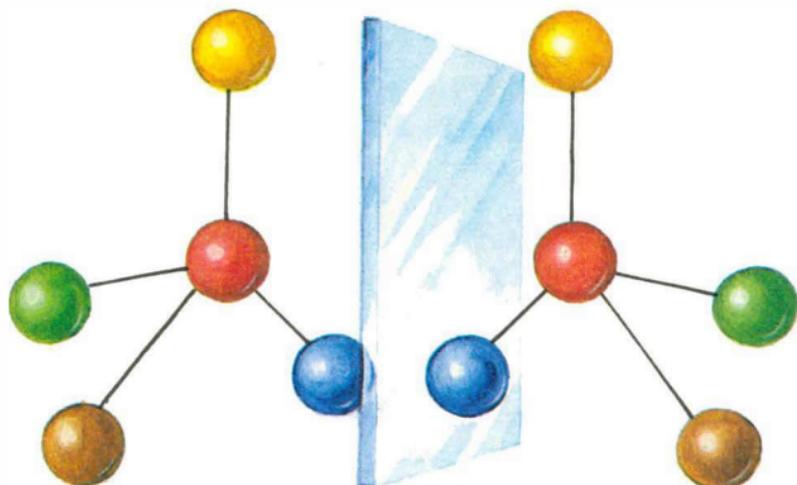




*Stereoisomere  
der Milchsäure*

dem Bild dargestellt ist. Wenn ein Molekül dagegen asymmetrisch ist wie im Fall der Milchsäure, deren Formel ebenfalls dargestellt ist, dann haben seine Atome die Möglichkeit, sich in spiegelbildlich vertauschter Form anzuordnen. Solche Moleküle verhalten sich ebenso enantiomorph zueinander wie unsere beiden Hände. Infolgedessen können asymmetrische Moleküle in zwei räumlichen Varianten, einer linken und einer rechten, existieren. Die Chemiker bezeichnen diese Erscheinung als »Stereoisomerie«, und die »linken« und »rechten« Moleküle heißen Stereoisomere. In der folgenden Abbildung sind die beiden Stereoisomere eines einfach aufgebauten Moleküls dargestellt. Sie sind so gezeichnet, als stünde jedes von ihnen vor einem Spiegel und »betrachte« seinen Doppelgänger. Freilich werden wir uns rasch davon überzeugen, daß das eine Molekül »links«, das andere dagegen »rechts« ist. Wie immer wir das eine auch drehen und wenden – es ist mit seinem Doppelgänger niemals deckungsgleich.

In der Natur sind »linke« und »rechte« Moleküle in den Stoffen oft miteinander vermischt. Wenn es gelingt, sie zu trennen, erhalten wir anstelle eines Stoffs zwei Stoffe; jeder einzelne dieser Stoffe besteht dann jeweils aus nur einer Molekülart. Doch selbst die empfindlichsten Instrumente sind nicht imstande, einen Unterschied in den physikalischen Eigenschaften der beiden Stoffe zu erfassen. Beide gleichen einander völlig in der Farbe, der



*Stereoisomere eines einfach gebauten Moleküls und sein Spiegelbild*

Dichte, dem Siede- oder Festpunkt usw. Es ist ganz so wie bei eineiigen Zwillingen. Das ist leicht einzusehen, wenn man beispielsweise die Schmelztemperatur des einen Stoffes mißt und das gleiche unter Betrachtung im Spiegel mit dem anderen Stoff macht. In beiden Fällen werden, wenn der Schmelzvorgang einsetzt, sowohl das wahre Thermometer als auch sein »Spiegelbild« im Spiegel ein und denselben Wert anzeigen. Trotzdem haben die Wissenschaftler eine Möglichkeit gefunden, solche Zwillinge unter den Stoffen voneinander zu unterscheiden. Es zeigte sich, daß Moleküle, die ein asymmetrisches Atom enthalten, »optisch aktiv« sind, d. h. die Schwingungsebene von polarisiertem Licht ändern; diese ihre Fähigkeit läßt sich mit einem sogenannten Polarimeter feststellen.

Unser Körper ist aus etwa 100 000 verschiedenen Proteinarten aufgebaut. Die Proteine bestehen aus Atomen von Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und – oft, aber nicht immer – Schwefel. Es handelt sich um Riesenmoleküle mit außerordentlich kompliziertem Aufbau; sogar die einfachsten unter ihnen enthalten Tausende von Atomen, die Molekülriesen und -überriesen dagegen Hunderttausende oder Millionen. Diese Atome sind in relativ selbständige Kollektive, die Aminosäuren, gruppiert und wie die Perlen an einer Kette aneinandergereiht.

Ungeachtet ihrer ganzen unerschöpflichen Vielfalt sind die Proteine jedoch nur aus 20 Arten von Aminosäuren aufgebaut, von denen 19 ein asymmetrisches Kohlenstoffatom enthalten, d. h. in einer rechten und einer linken Form existieren. Synthetisiert man eine Aminosäure künstlich, dann entsteht stets ein Gemisch ihrer beiden Formen, das anschließend aufgetrennt werden muß, weil die »lebendigen« Aminosäuren des Organismus immer nur links<sup>1</sup> sind. Infolgedessen sind alle Proteinmoleküle asymmetrisch und aus linken Bausteinen<sup>2</sup> aufgebaut.

Allerdings könnten Lebewesen mit dem gleichen Recht auch als »rechts« bezeichnet werden, weil es neben der von der Konfiguration der Aminosäuren herrührenden »linken« Asymmetrie noch eine andere – unter dem Aspekt der Proteinfunktion möglicherweise noch wichtigere Asymmetrie gibt, die »rechts« ist. Es handelt sich hier um das im Raum als Ganzes betrachtete Proteinmolekül. Bei Ausbildung der langen Polypeptidketten »schrauben« sich die Aminosäuren so nach rechts, daß das Proteinmolekül insgesamt am vorderen Ende das Aussehen einer Spirale hat, deren Drehrichtung dem Uhrzeiger folgt. Diese Tatsache wurde 1951 von Linus Pauling und Robert Corey vom Californischen Technologischen Institut festgestellt, und der Name, den die Entdecker der asymmetrischen rechtsgängigen Proteinschraube gegeben haben, ist Alpha-

<sup>1</sup> »Links« und »rechts« wird nicht anhand der Drehrichtung der Polarisationssebene, sondern anhand der absoluten Konfiguration des asymmetrischen Kohlenstoffatoms im Raum bestimmt; von diesem Standpunkt aus betrachtet sind alle Aminosäuren des Organismus links. Ist die absolute Konfiguration einer asymmetrischen Verbindung nicht bekannt, dann bezeichnet man deren »linke« bzw. »rechte« Form entsprechend der Drehrichtung der Polarisationssebene, wobei die Drehrichtung rechts durch das Zeichen »+« und die Drehrichtung links durch »-« vor dem Namen des Stoffs angegeben wird. Nach diesem Merkmal ist ein Teil der Aminosäuren unseres Organismus linksdrehend, ein anderer rechtsdrehend; ihrer Konfiguration nach sind sie jedoch, wie bereits gesagt, alle links.

<sup>2</sup> In Proteinmolekülen sind meist nur »linke« Aminosäuren enthalten. In seltenen Fällen trifft man auch »rechte« Formen an, beispielsweise in den Zellwänden einiger Mikroorganismen oder in deren Produkten wie den Antibiotika Gramicidin oder Actinomycin D.



*»Superspiralisierung« der Alphaspiralen im Haarprotein von Ziegen und Schafen*

Helix ( $\alpha$ -Helix). Allmählich wurde klar, daß die Alpha-Helix charakteristisch ist für den Aufbau des größten Teils der Proteinmoleküle und daß unser Organismus in diesem Sinne »rechts« ist. Viele Gewebe erhalten unter diesem Einfluß einen gänzlich asymmetrischen Aufbau, der sich mit der Struktur von Sprungfedern vergleichen läßt. Das Sehngewebe besteht beispielsweise aus Proteinmolekülen, die aus drei umeinander gewickelten Alpha-Helixen besteht. Zehn solcher »Federn« wickeln sich wiederum umeinander und bilden eine Helix mit noch größerem Durchmesser. Dieser Vorgang wiederholt sich »auf immer höherer Ebene« so lange, bis große Fasern entstehen, die unter dem Mikroskop erkennbar sind. In der gleichen Weise gedrehte »Federn« bilden die Proteinmoleküle von Haaren, Nägeln und verhornten Schuppen, von Wolle usw. Im Kapitel »Spiralen des Lebens ...« werden wir noch sehen, daß rechtsgängige Spiralen auch ein Bestandteil von Nukleinsäuren, der Träger der Erbeigenschaften, sind.

Um sich zu ernähren, benötigt die lebende Zelle vor allem linke Moleküle, und so hat sie gelernt, diese aus einem Gemisch beider Formen herauszufinden. In vielen Fällen nehmen wir mit der Nahrung ein Gemisch linker und rechter Isomere auf. Sobald ein asymmetrischer Stoff in den Magen oder in das Blut gelangt, tritt er dort in Wechselwirkung mit asymmetrischen Verbindungen, aus denen der Organismus aufgebaut ist. Jeweils das eine Stereoisomer wird dabei aufgenommen (assimiliert, verdaut), ein spiegelgleicher Doppelgänger dagegen als unnötiges Abfallprodukt ausgeschieden. In anderen Fällen nimmt der Organismus beide Formen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit auf und reagiert mit jeder der beiden Formen auf unter-

schiedliche Weise. Deshalb haben die linken und rechten Moleküle ein und desselben Stoffs sehr oft einen unterschiedlichen Einfluß auf die Rezeptoren der Zellen und auf ihre Funktionen. Zigaretten enthalten beispielsweise die linke Form des Nikotins. Linkes Nikotin ist überhaupt in allen Tabaksorten vorhanden, während man seinen rechten Doppelgänger in der belebten Natur niemals antrifft. Man hat es synthetisch dargestellt und fand, daß dieses Nikotin erheblich weniger toxisch ist als sein Zwillingbruder.

Asymmetrische Kohlenstoffverbindungen, die von den Organismen aufgebaut werden, existieren fast immer nur in einer ihrer Formen. Das ist der Grund, warum diese am häufigsten im Organismus gebildet werden. Die Zelle modelliert immer nur dasjenige von zwei Isomeren, dessen sie bedarf. Wir sehen jedoch, daß solche spiegelgleichen Formen gelegentlich eine stark ausgeprägte biologische Wirkung besitzen, die sich für die praktischen Bedürfnisse des Menschen nutzen läßt. Dies haben die Wissenschaftler zum Anlaß genommen, nach Wegen zur Synthese jener Stereoisomere zu suchen, die die spiegelgleichen Doppelgänger der in der belebten Natur vorkommenden Stoffe sind, und die in dieser Richtung erzielten Ergebnisse werden zunehmend besser. Durch geschickten Umgang mit den Molekülen haben viele Chemiker die Doppelgänger eines Teils der »lebendigen« Stereoisomere geschaffen und sind dabei, noch mehr davon zu synthetisieren. Noch wissen wir nicht, wie der menschliche Organismus oder wie andere Organismen auf diese Doppelgänger reagieren und ob sie evtl. nützlich sein können. Doch allein die Tatsache, daß wir gelernt haben, sie nach unserem Wunsch zu erzeugen, ist bereits ein Erfolg, und ihre Untersuchung bzw. Erforschung stellt für die Zukunft ein neues und interessantes Gebiet dar, voll von Möglichkeiten für unerwartete Entdeckungen.

## Ein Schlüssel und ein Schloß

Jede lebende Zelle innerhalb eines Organismus ist der Mittelpunkt einer lebhaften chemischen Tätigkeit. In ihnen vollziehen sich Hunderte der unterschiedlichsten che-

mischen Reaktionen, in deren Ergebnis Moleküle aufgebaut werden, während andere zerfallen. Daran ist nichts weiter verwunderlich, mit Ausnahme dieser Tatsache: Wenn wir zwei Stoffe, die sich in der Zelle in Sekundenbruchteilen zu einem neuen Molekül verbinden, in einem Reagenzglas zusammenbrächten, dann könnten wir stundenlang warten, ohne auch nur das geringste Anzeichen einer Reaktion zwischen ihnen zu bemerken. Da rührte sich auch nichts, wenn wir genau die Temperatur und den Druck gewährleisteten, wie er in der Zelle vorliegt. Auch »extreme« Maßnahmen, wie etwa sehr hohe Temperaturen oder Drücke, würden kaum helfen. Soll beispielsweise Glukose zerfallen, müßte sie auf einige 100°C erhitzt werden. Dieselbe Glukose jedoch »verbrennt« innerhalb weniger Minuten bei nur 37°C in unserem Körper und versorgt ihn so mit der erforderlichen Energie. Wie bewältigt die Zelle diese Aufgabe? Welche Technologie benutzen ihre Miniaturabteilungen?

»Biologische Katalyse« – so heißt das »Geheimpatent« der Zelle, und die Katalysatoren, die die chemischen Reaktionen darin auf das Tausend-, ja sogar Millionenfache beschleunigen, kennen wir unter dem Namen Fermente bzw. Enzyme. Kein einziger physiologischer Prozeß und keine einzige chemische Reaktion in der Zelle kann ohne Beteiligung dieser hochleistungsfähigen Katalysatoren des Lebens stattfinden.

Eine ihrer außergewöhnlichen Eigenschaften ist ihre Selektivität. Sie katalysieren nicht »alles und jedes«, sondern bewirken nur ganz bestimmte Reaktionen von ganz bestimmten Stoffen, die als Enzymsubstrate bezeichnet werden. Würde jedes Enzym wahllos die in der Zelle ablaufenden chemischen Reaktionen beschleunigen, würden die Zellen zerstört werden.

Einige Enzyme katalysieren die Umsetzungen einer ganzen Gruppe ähnlicher Substrate, andere dagegen sind absolut spezifisch. Sie greifen nur in eine einzige Reaktion eines und nur eines Substrats ein. In dieser Beziehung machen die Enzyme keine Fehler. Sie »erkennen« ihre Substrate in solchem Maße genau, daß sie sogar zwei Moleküle gleichen Aufbaus, jedoch mit »linker« bzw. »rechter« Konfiguration voneinander unterscheiden kön-

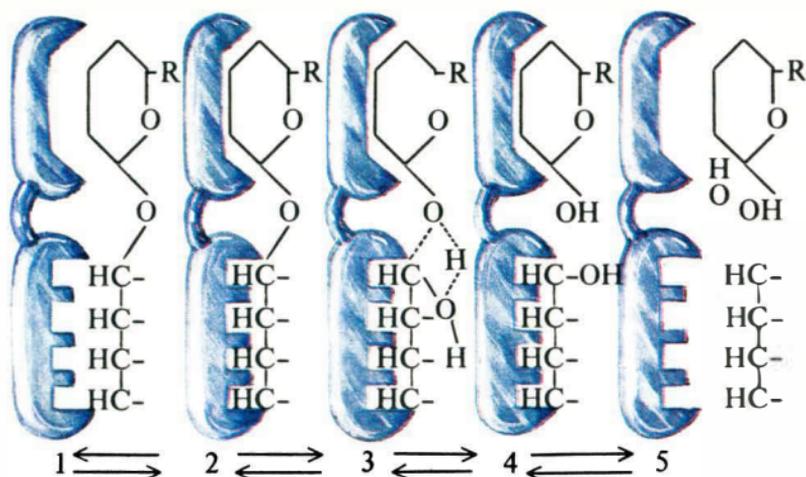
nen. Beispielsweise greift das Enzym, das die Milchsäure in den Muskeln abbaut, nur deren »linkes« Isomer an, hat aber keinerlei Einfluß auf das »rechte«.

Worauf geht nun die hohe Selektivität der Enzyme zurück, dank der sie ihre so wichtigen Funktionen im Organismus verrichten? Die Antwort auf diese Frage ist eng verknüpft mit dem eigentlichen Mechanismus der enzymatischen Wirkung und führt uns wiederum zur Symmetrie bzw. Asymmetrie der Moleküle. Wir können sagen, daß wir im Fall der Symmetrie, richtiger gesagt: im Fall der Asymmetrie, in einen der intimsten Prozesse der Zelle eingedrungen sind, der dem eigentlichen Wesen des Lebens zugrunde liegt. Der Schlüssel zum Verständnis dieses Mechanismus liegt in der räumlichen Konfiguration der Proteinanteile der Enzyme. Dabei ist das Wort »Schlüssel« nicht im übertragenen, sondern in seinem ganz direkten Sinne gemeint. Ein Enzym und sein Substrat verhalten sich zueinander wie ein Schlüssel zu seinem Schloß; dies jedenfalls besagt eine der gegenwärtig verbreitetsten Theorien zur Erklärung der Enzymwirkung.

Wie »arbeiten« die Enzyme?

Man nimmt an, daß der erste Schritt bei der Realisierung der Katalysewirkung eines Enzyms im »Erkennen« seines Substrats und in der Bindung an dieses besteht. Damit dies geschieht, müssen die Oberflächen der Enzymmoleküle und die des Substrats so ineinandergreifen wie das Profil eines Sicherheitsschlüssels mit den entsprechenden Ausschnitten im Schloß. Und so wie jeder Schlüssel nur sein »Schloß« aufschließen kann, vermag auch das jeweilige Enzym nur mit seinem spezifischen Substrat eine Bindung einzugehen. Demzufolge erklärt sich die selektive Wirkung der Enzyme aus der Übereinstimmung zweier asymmetrischer räumlicher Konfigurationen.

Nun sind Enzym und Substrat miteinander verbunden. Die Übereinstimmung ist vollständig, und der Schlüssel steckt im Schloß. Dies aber bedeutet, daß sich jeweils eine der chemischen Bindungen des Substrats genau über dem aktivsten Teil des Enzymmoleküls befindet. Im Grunde genommen ist es dieses »aktive« Zentrum, das im betrachteten Fall die wichtigste Funktion erfüllt. Wegen des engen Kontakts der beiden Moleküle kommt es zu einer An-

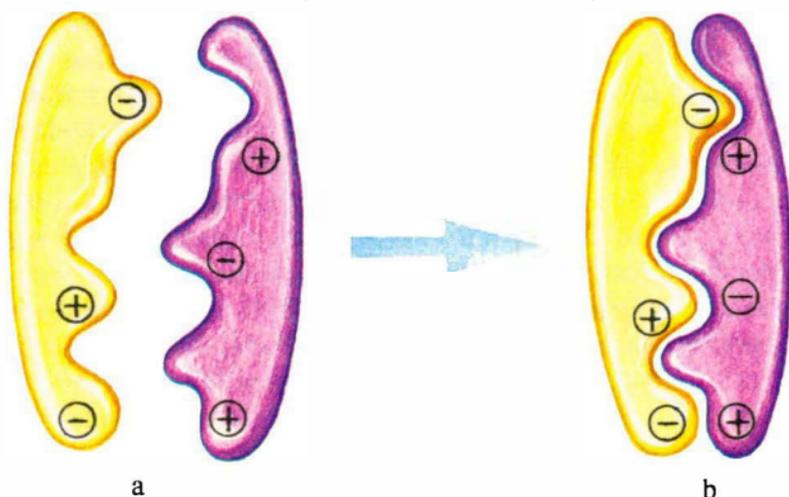


So »arbeiten« die Fermente: 1 – ein Fermentmolekül beim »Erkennen« seines Substrats. Aus der Entsprechung der beiden Konfigurationen ist zu sehen, daß der »Schlüssel-Schloß«-Mechanismus schnell in Tätigkeit getreten ist; 2 – das Ferment und das Substrat haben sich »erkannt« und einander eng »umschlungen«; hier ist ein Ferment-Substrat-Komplex entstanden; 3 und 4 – das Ferment spaltet die Bindung zwischen zwei Teilen des Substratmoleküls; 5 – das Substrat hat sich in zwei Teile gespalten, in unserem Fall in Zucker und Alkohol.

regung der Elektronen. Die Energie in den Atomen des Substrats wird umverteilt, an der Stelle der oben erwähnten chemischen Bindung entsteht eine »Spannung«, und die Bindung zerreißt. Damit spaltet sich das Substratmolekül, wie in unserer Abbildung dargestellt. Seine Hinwendung zum Enzym verschwindet damit augenblicklich; beide trennen sich, so daß der Platz für die Bearbeitung der nächsten Moleküle frei wird. So spalten oder binden die Enzyme, ohne selbst strukturelle Änderungen zu erleiden, andere Moleküle, ordnen diese in einer bestimmten Weise an, bewirken eine Umverteilung ihrer Atome usw. Und der Sinn ihrer katalytischen Wirkung besteht darin, daß sie dem Substrat helfen, jene hohen energetischen Forderungen zu »umgehen«, die für den Ablauf der betrachteten chemischen Reaktion erfüllt sein müssen. Diese Reaktionen laufen dadurch bei einem niedrigen Niveau der Aktivierungsenergie und ohne eine länger anhaltende Erwärmung auf Temperaturen ab, die für den Organismus unzulässig wären.

Was aber passiert, wenn statt des spezifischen Substrats ein »Schlüssel« mit ähnlicher Konfiguration, eine Art »Duplikatschlüssel«, in das »Schloß« eindringt, jedoch nicht »richtig« funktioniert? Solche »falschen« Substrate konkurrieren erfolgreich mit den »richtigen«; sie binden das Enzym und bewirken eine dauernde Blockierung seiner Funktion. Wenn dies ein lebenswichtiges Enzym betrifft, dann sind mehrere Schädigungen und der Untergang des Organismus die Folge. Genau diesen Wirkungsmechanismus haben einige der stärksten Gifte. Viele Pestizide, Präparate, die heutzutage im Kampf gegen landwirtschaftliche Schädlinge eingesetzt werden, blockieren die Cholinesterase. Dieses Enzym ist von außerordentlicher Bedeutung für die Funktion des Nervensystems von Insekten und Warmblütern. Bei seiner Blockade hört der Abbau des dafür spezifischen Substrats Azetylcholin auf, das sich rasch in den Geweben ansammelt. Im Ergebnis wird die Übertragung von Nervenimpulsen entscheidend beeinträchtigt; die Körperbewegungen laufen unkoordiniert ab; es kommt zu Zittern, Muskelkrämpfen und Konvulsionen und schließlich zum Tode, weil die Atmung und die Herztätigkeit völlig paralysiert werden.

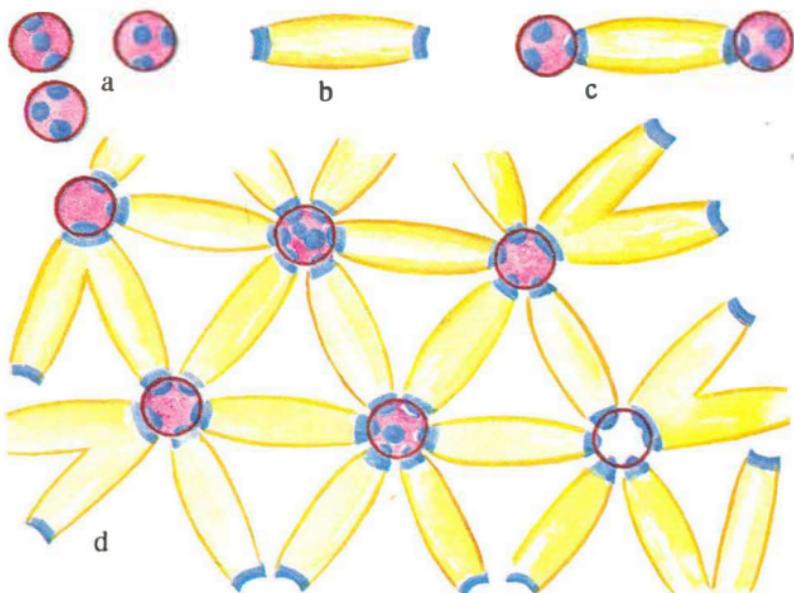
*Erste Phase der Bildung eines Antigen-Antikörper-Komplexes: Die beiden Moleküle gehen nur dann eine feste Bindung miteinander ein, wenn ihre Konfigurationen einander genau entsprechen. a-links: Antigen; rechts: Antikörper; b- Antigen-Antikörper-Komplex*



Glücklicherweise verfügen wir über ein sicheres Gegengift, das sich des gleichen Tricks bedient wie der toxische Stoff, nur noch erfolgreicher als dieser. Seine Konfiguration paßt viel besser für die Cholinesterase als die Konfiguration des Giftes selbst. Daher fällt es diesen Molekülen leicht, die giftigen Moleküle »zu verdrängen« und ihren Platz einzunehmen. Der erhaltene Enzym-Gegengift-Komplex ist unbeständig; er zerfällt rasch und setzt das Enzym frei, so daß dieses nun wieder normal funktionieren kann.

Auf dem Konkurrenzprinzip beruht auch der Effekt eines Teils der Arzneimittel, die wir im Kampf gegen Krankheitserreger einsetzen (Sulfonamide, Antibiotika u. a.). Die Moleküle einiger dieser Stoffe entsprechen der räumlichen Konfiguration wichtiger Enzyme im bakteriellen Organismus so genau, daß die Enzyme sie ihrem eigenen Substrat dann »vorziehen«, wenn sie in höherer Konzentration vorliegen. Das aber nun ist bereits der dritte Duplikatschlüssel, der, einmal ins Schloß gesteckt, nicht mehr herausgezogen werden kann. Die Enzyme büßen ihre Funktionsfähigkeit ein für allemal ein, und die Mikroben gehen zugrunde. Gegenwärtig existiert eine außerordentlich große Anzahl von Arzneimitteln mit antimetabolischer Wirkung, und es ist gar keine Frage, daß die Möglichkeit zur Schaffung von Molekülen einer ganz bestimmten Konfiguration denkbar erfreuliche Perspektiven zum Wohle des Menschen eröffnet.

Wir finden den »Schlüssel-Schloß-Mechanismus« nicht nur bei den Enzymen. Sie erinnern sich gewiß an die Blütenstaubkörner und an deren Form, die die Bestäubung der Pflanzen sichert. Wie sich in den letzten Jahren herausgestellt hat, beruht auf dem gleichen Prinzip auch eine der wichtigsten Schutzreaktionen des Organismus, nämlich die Wechselwirkung zwischen »Antigen« und »Antikörper«. Wieder einmal bestätigt sich die Regel, wonach die Natur, wenn sie erst einmal eine glückliche Lösung gefunden hat, diese überall dort anwendet, wo sie nützlich sein kann. Wir wissen, daß der Organismus im Kampf mit den Erregern ansteckender Krankheiten über ein spezielles Schutzsystem verfügt, das unter dem Namen »Immunität« bekannt ist. Dank diesem System sind wir imstande, den



*a- Antigenmoleküle; b- Antikörpermolekül; c- Antigen-Antikörper-Komplex; d- unlösliche Struktur, ein Gittertyp, der aus dem Antigen-Antikörper-Komplex entstanden ist*

unaufhörlichen Angriffen krankheitserregender Mikroben und Viren zu widerstehen.

Das Schutzsystem des Organismus wird durch zwei einander ergänzende Systeme gewährleistet, gewissermaßen durch »zwei Waffengattungen«. In der ersten Staffel kämpfen die Leukozyten. Diese Mikrobenjäger finden sich im Blut aller Tiere – vom Menschen hinunter bis zum Wasserfloh, in dessen durchsichtigem Körper Metschnikow zum ersten Mal mit Erstaunen gesehen hat, wie eine Zelle von einer anderen »gefressen« wird; er nannte diese Erscheinung Phagozytose. Die Leukozyten umfassen das Bakterium, umhüllen es mit ihrem eigenen Körper und »verschlingen« es, um es dann mit Hilfe besonderer Enzyme »aufzulösen«. Doch die Bakterien sind keineswegs schutzlose Wesen und vernichten in diesem Zweikampf oftmals viele Tausende, ja Millionen Leukozyten. Ungeachtet ihres Nutzens, ist die Phagozytose doch das weniger wirksame Schutzverfahren und kann hinsichtlich seiner Effektivität mit dem Nahkampf verglichen werden. Deshalb besitzen die höheren Organismen noch andere

»strategische« Möglichkeiten, so z. B. die Antikörper, die zur Verteidigung der inneren Linien bestimmt sind. Die Antikörper greifen nicht in jedem Fall und auch nicht bei allen Gegnern in den Kampf ein. Sie werden als Antwort auf das Eindringen organismusfremder Bakterien, Viren, Toxine, Proteine und anderer hochmolekularer Stoffe gebildet, die unter dem Begriff Antigene zusammengefaßt werden. Dabei wird gegen jedes einzelne Antigen ein Antikörper entwickelt, der nur für dieses Antigen eine spezifische »Paßform« besitzt. Die Aufgabe dieses Antikörpers ist dabei stets unverändert ein und dieselbe. Sobald im Organismus »sein« Antigen auftaucht – woher auch immer – verbindet sich der Antikörper mit diesem und macht es so unschädlich. Infolgedessen sind die Antikörper streng spezifisch und besitzen ähnlich wie die Enzyme eine Selektionsfähigkeit in bezug auf ihr »Substrat«. Sie müssen ihre Antigene erkennen; hier stoßen wir erneut auf das »Schlüssel-Schloß-Prinzip«.

Was stellen die Antikörper eigentlich dar, und auf welchem Wege erfüllen sie ihre Schutzfunktion?

Antikörper sind Proteinmoleküle, die nach allen Regeln der Proteinsynthese aus Aminosäuren aufgebaut werden. 1969 erfolgte erstmals die Analyse eines freilich nicht allzu komplizierten Antikörpermoleküls. Man fand, daß es sich dabei um vier in Längsrichtung miteinander verdrillte Polypeptidketten handelte, die 19996 Atome, gruppiert zu 1220 Aminosäuren mit einem Gesamtmolekulargewicht von 150000, enthalten. Dies war ein Erfolg von großem Wert, weil dadurch Zusammensetzung und Struktur, wenn auch nur eines Antikörpers, bekannt wurden. Er erbrachte die Erkenntnis der Wirkungsweise von Antikörpern überhaupt. Schon bald wurde nachgewiesen, daß die spezifische Aktivität der Antikörper, d. h. ihre Fähigkeit, sich selektiv mit einem bestimmten Antigen zu verbinden, wiederum auf der asymmetrischen räumlichen Konfiguration des Proteinmoleküls beruht. Doch nicht das Molekül insgesamt, sondern nur ein bestimmter Abschnitt davon ist für das »Einfangen« des Antigens verantwortlich, und stets gibt es in einem Molekül mindestens zwei derartige Abschnitte. Jeder von ihnen entspricht exakt einer spezifischen Strukturgruppe des Antigenmoleküls, wovon es

wiederum mehrere gibt. Durch Bindung nach dem »Schlüssel-Schloß-Prinzip« blockieren die Antikörper die aktiven Gruppen des Antigens, so daß eine unlösliche und unschädliche Gitterstruktur entsteht, die rasch ausgefällt wird. Einige Antikörper binden die Antigene in Gestalt großer unförmiger Klumpen, andere erzeugen feine Niederschläge, und wieder andere ziehen es vor, die Antigene nicht in Form von Niederschlägen zu binden, sondern sie geradewegs aufzulösen. Doch in allen Fällen beruht die Bindung auf der Übereinstimmung asymmetrischer Molekülgruppen. Auch das Endziel ist das gleiche: die Neutralisierung der Feinde des Organismus. In dieser Neutralisierung besteht der biologische Sinn der »Antigen-Antikörper-Reaktion«.

## Spiralen des Lebens, Spiralen des Todes

Jeder lebendige Organismus ähnelt seinen Eltern. Die charakteristischen Merkmale der Arten, der Varianten dieser Arten und aller Individuen einer betrachteten Art sind im Erbgut verankert und werden meist zuverlässig von Generation zu Generation weitergegeben. Das »Programm« für den Aufbau des Organismus – von der Farbe jedes einzelnen Haares bis zum instinktiven Verhalten – ist das Monopol der Moleküle, die für die Erbinformation verantwortlich sind. Es sind Moleküle von Nukleinsäuren, und zwar von Desoxyribonukleinsäure (abgekürzt DNS) und Ribonukleinsäure (RNS).

Nukleinsäuren sind keine Eiweißverbindungen; doch ebenso wie die Eiweiße gehören sie in die »schwerste Gewichtsklasse« der Moleküle. Es sind sogenannte Biopolymere, Riesenmoleküle, und die DNS ist das größte Molekül unter allen, die wir kennen. Sein Molekulargewicht liegt in der Größenordnung einiger Millionen (während das Molekulargewicht von Wasser beispielsweise nur 18 beträgt).

Die DNS stellt einen sehr langen und sehr dünnen Faden dar (ihr Querschnitt beträgt nur das 50fache vom Durchmesser eines Wasserstoffatoms), und sie hat ihren Platz im Zellkern.

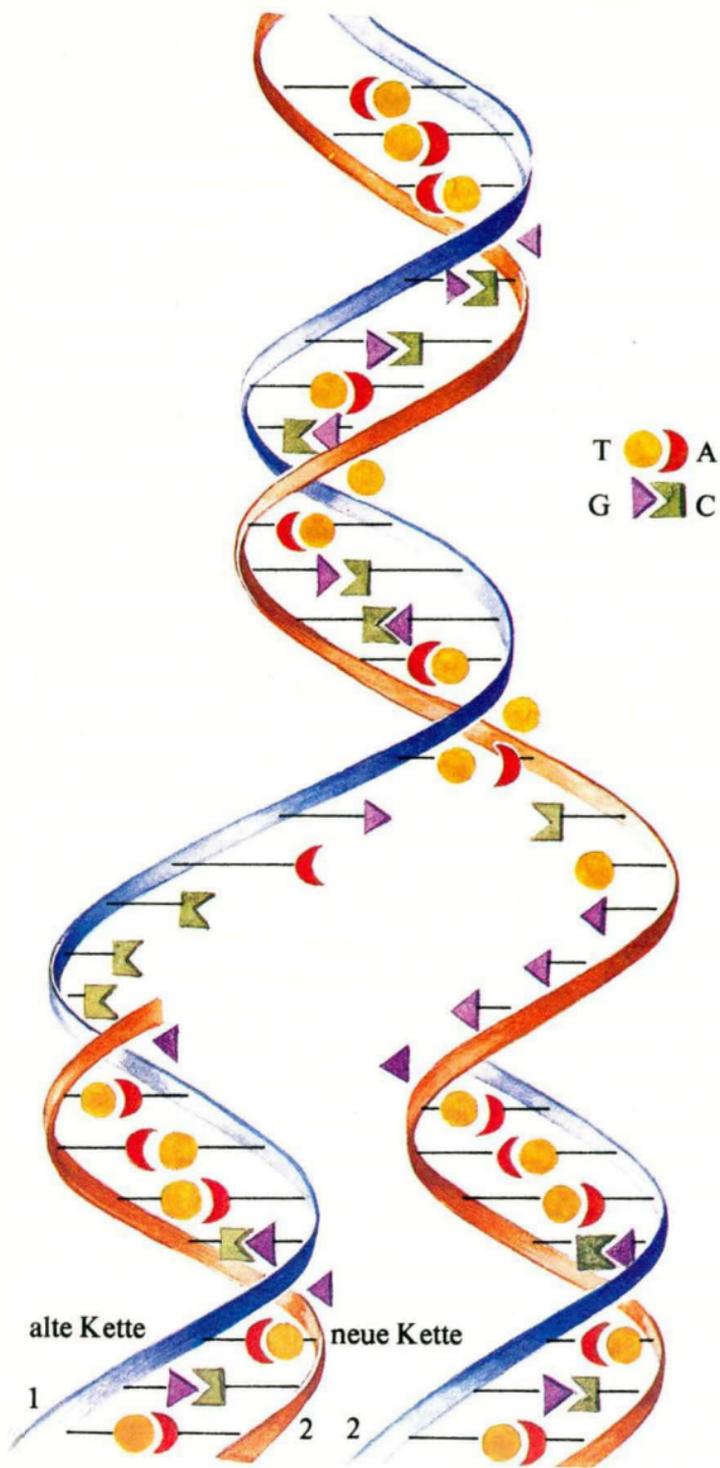
Im Kern jeder Zelle unseres Körpers befinden sich je 46 stäbchenartige Gebilde, die wir unter der Bezeichnung Chromosomen kennen. Sie bilden den genetischen Apparat der Zelle. Ein einzelnes Chromosom enthält mindestens ein zusammengeknäultes DNS-Spiralenpaar. Würde man das Knäuel aufwickeln, dann hätten die Spiralen aus einer einzigen Zelle eine Länge von 180 cm. Jeder von uns trägt also 160 000 000 000 km DNS mit sich herum!

Das fadenförmige DNS-Riesenmolekül ist aus kleineren Molekülen anderer Verbindungen aufgebaut, die wie die Perlen einer Kette aneinandergereiht sind. Die »Perlen« sind Nukleotide; jedes von ihnen enthält Zucker, Phosphorsäure und jeweils eine besondere Stickstoffverbindung, eine Stickstoffbase. Insgesamt kommt es im DNS-Molekül zur vielfachen Wiederholung von nur vier Stickstoffbasen: Adenin, Thymin, Guanin und Cytosin. Zur Vereinfachung werden sie von den Biochemikern nur mit ihren Anfangsbuchstaben A, T, G und C bezeichnet, und wirklich spielen sie die Rollen von »Buchstaben« im »Alphabet« der Vererbung. Durch ihre Wiederholung in unterschiedlichster Reihenfolge erhält man eine unabsehbare Vielfalt verschiedener DNS-Moleküle.

Die Gene selbst sind nun nichts anderes als Einzelteile des langen DNS-Moleküls, und sie unterscheiden sich infolgedessen durch die Reihenfolge der Nukleotide, aus denen sie bestehen. Jedes einzelne Gen ist verantwortlich für die Synthese eines bestimmten Proteins oder eines Teiles eines Proteins, und wir wissen, daß alle Lebewesen – vom Bakterium bis zum Elefanten – unterschiedliche, in ihrer Struktur nicht identische Proteine besitzen.

Ist es denn wirklich durch Aneinanderreihung von nur vier Nukleotiden möglich, eine so große Vielfalt asymmetrischer Kombinationen zu gewährleisten, daß niemals zwei gleiche auftauchen, und wird durch sie tatsächlich die unerschöpfliche Vielfalt der belebten Natur bedingt?

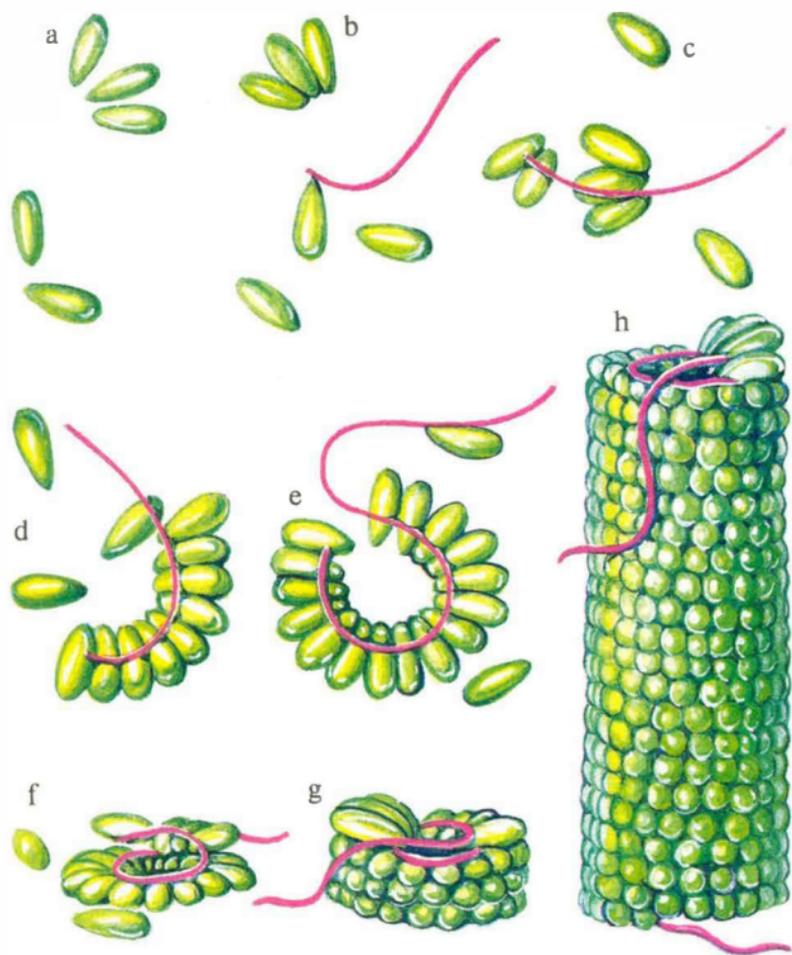
Es ist möglich. Wissenschaftler haben ausgerechnet, daß ein DNS-Molekül mit einem Molekulargewicht von 10 Millionen etwa 40 000 Nukleotide enthält und daß es  $4^{2000}$  verschiedene, sich nicht wiederholende Varianten davon gibt. Dies aber ist eine Zahl, die »größer ist als die Anzahl von Atomen im gesamten Sonnensystem«!



Wollten wir versuchen, in Form der vier Buchstaben A T G und C das DNS-Molekül eines gewöhnlichen Colibakteriums aufzuschreiben, dann wären über 2000 Seiten, also rund 16 akzent-Bände dafür erforderlich, und für die DNS einer menschlichen Zelle 1 Million Buchseiten. Denken Sie bitte daran, daß sich hinter jedem Buchstaben eine ganze chemische Formel verbirgt, und dann werden Sie vielleicht eine gewisse Vorstellung davon gewinnen, was für ein kompliziertes Ding die DNS ist!

Anders als alle übrigen Biopolymere besteht die DNS nicht aus einem, sondern aus zwei Strängen, die spiralförmig umeinandergewunden sind. Jedem Nukleotid des einen Stranges steht ein Nukleotid des anderen Stranges gegenüber, und beide sind sie über die Stickstoffbasen miteinander verknüpft. Dies geschieht aber nicht willkürlich, sondern streng nach bestimmten Regeln. Gegenüber dem Adenin kann nur Thymin angeordnet sein, und gegenüber dem Guanin das Cytosin. So bilden die beiden asymmetrischen Stränge eine Struktur, die aus zwei spiegelbildlich verkehrten Hälften besteht, ohne daß die Symmetrie vollständig wäre, denn A entspricht T, und G entspricht C. Diese Besonderheit hat gewöhnlich große Bedeutung für die »gerechte« Verteilung der Erbanlagen auf die Nachkommen. Jede Zelle teilt sich in zwei neue Zellen, und jede davon sollte eine völlig identische Kopie der Mutter-DNS erhalten. Zu diesem Zweck werden die Stränge der Doppelspirale der Mutter-DNS entspiralisiert und getrennt, und zwar nach einer Art Reißverschlußmechanismus. Jede Hälfte lagert nun Stickstoffbasen an den freigewordenen Stellen an, wobei das Komplementaritätsprinzip streng eingehalten wird: An jedes A geht ein T und an jedes G ein C. Und schon bald entsteht eine völlig gleiche Kopie des Stranges anstelle des verlorenen Partners, der seinerseits auch keine Zeit verliert, sondern genau das gleiche tut. Die »Reißverschlüsse« – nun sind es ja bereits zwei – werden wieder »zugezogen«. An der Stelle des einen DNS-Moleküls sind zwei mit der Mutter-DNS

*DNS-Verdopplungsmechanismus: Zwei Stränge eines Muttermoleküls (»alte Kette«) sind »aufgezogen«, und jeder Strang dient als Matrix zur Bildung der neuen Tochterhälfte. 1 – alte Kette; 2 – neue Kette*



völlig identische Doppelspiralen entstanden. Nun kann sich die Zelle teilen; die »Schwestern« für die Tochterzellen sind vorhanden, und jede von ihnen wird einen vollständigen Satz Erbinformation erhalten. Diese wird dann nach dem gleichen Mechanismus immer weiter auf die folgenden Generationen übertragen, und so überträgt die asymmetrische Spiralstruktur, die sich unaufhörlich durch Erzeugung von spiegelbildlichen Kopien an der jeweils anderen Hälfte verdoppelt, die gesamte Information von Generation zu Generation, die der lebende Organismus braucht, um zu existieren und seinesgleichen erzeugen zu können. »Wenn die Proteine das wichtigste Baumaterial des Lebens sind«, schrieb Francis Crick, »dann sind die Nukleinsäuren dafür die Arbeitszeichnungen. Sie sind die Moleküle, in denen die *Geheimnisse des Lebens* eingeschrieben sind, sofern wir überhaupt von etwas Derartigem sprechen können.«

Die Frage der Vererbung ist jedoch bisher nicht völlig klar. Im biochemischen Sinn bedeutet die »Realisierung der Erbinformation« die Synthese organismusspezifischer Proteine. Nachdem sich die Zelle bereits geteilt hat, fällt die DNS nicht etwa bis zur nächsten Teilung in einen Ruhezustand. Im Gegenteil, sie entfaltet jetzt eine noch aktivere Tätigkeit.

Oder braucht die Zelle vielleicht keine Proteine, um sich selbst weiter aufzubauen, um zu funktionieren und um die neue Reproduktion vorzubereiten? Wieder wird der Reißverschluß geöffnet, diesmal aber, um anhand der RNS-Form Duplikate zu »pressen«. Die RNS ist eine Zwillingsschwester der DNS.

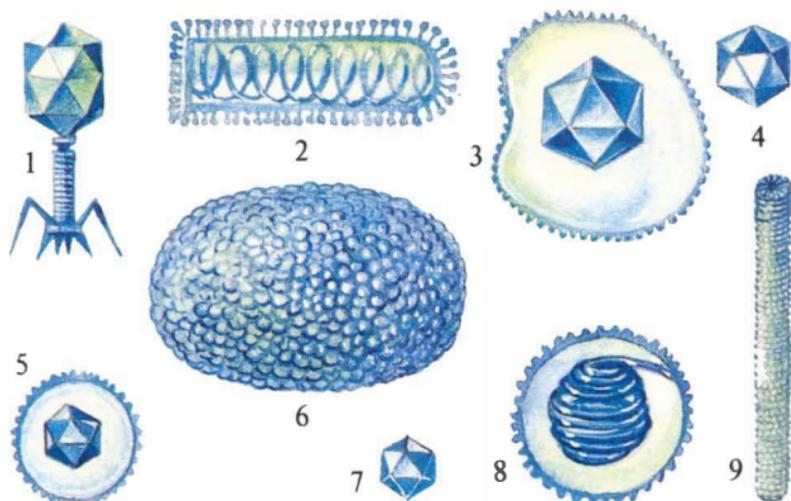
Betrachteten wir Zwillinge etwas genauer, würden wir

*Diese Figuren, die an Blüten erinnern, haben mit der Botanik nur gemeinsam, daß sie jenes Virus darstellen, das die Tabakmosaikkrankheit verursacht. Jedes Einzelbild (a-h) stellt eine Entstehungs-  
etappe des Virus dar: Wir sehen, wie die Nukleinsäure (dargestellt durch den roten Faden) die Proteinuntereinheiten (die »Blütenblätter«) »aufreißt« und sie spiralförmig aufwickelt. Ein Viruskörper enthält 2200 derartige »Blütenblatt«-Untereinheiten, und jede Untereinheit ist aus 158 Aminosäureresten aufgebaut. Bis das vollständige Virus entstanden ist, muß die Nukleinsäure 130 Spiralwindungen ausführen. Das fertige Virus sieht dann so aus, wie im elektronenmikroskopischen Foto gezeigt ist.*

feststellen, daß die Symmetrie selbst bei bildlich ähnlichen, eineiigen Zwillingen nicht vollständig ist. Auch im Fall der RNS wird diese anhand des DNS-Stranges nicht als deren spiegelbildliche Kopie »abgepaust«, sondern mit einem kaum merklichen Unterschied in der chemischen Zusammensetzung. Der Zucker, d. h. die Desoxyribose, ist hier durch Ribose ersetzt, und die Stickstoffbase Thymin durch Uracil. Außerdem ist die RNS kürzer als ihre Schwester, doch dafür werden an einem DNS-Strang viele kleine RNS-Stränge synthetisiert.

Sobald die RNS die entsprechende Erbinformation an ihrer Schwester abgeschrieben hat, verläßt sie den Zellkern und gelangt in das Zytoplasma, wo sie sofort die Proteinproduktion in Gang bringt. Die hierfür verantwortliche »Betriebsabteilung« sind die Ribosomen, kleine Teilchen, die bei mittlerer Vergrößerung im Elektronenmikroskop wie Punkte aussehen. Doch unabhängig von ihrer geringen Größe gehören die Ribosomen zu den wichtigsten Organellen der Zelle. Hier werden die 20 Aminosäuren, aus denen unser Körper besteht, in Gestalt langer Ketten von Proteinmolekülen in der Reihenfolge aufgereiht, die durch die Nukleotidreihenfolge im RNS-Strang diktiert wird. Diese Reihenfolge aber entspricht, wie Sie sich erinnern werden, der Reihenfolge, die am DNS-Strang abgeschrieben worden ist. Auf diese Weise unterscheiden sich die Proteine der Tochterzellen in nichts von den Proteinen der Mutterzelle, ebensowenig wie diese sich von ihren Eltern und Großeltern unterschieden hat. So hat es die Natur über unzählige asymmetrische Varianten der von ihr geschaffenen DNS-Moleküle fertiggebracht, die Unwiederholbarkeit des Individuums zu gewährleisten, und durch eine Reihe »spiegelbildlicher« Abdrücke dieser Struktur wird das große Geheimnis des Lebens realisiert: die Vererbung. Wir sind also im Recht, wenn wir die DNS-Spiralen als »Spiralen des Lebens« bezeichnen.

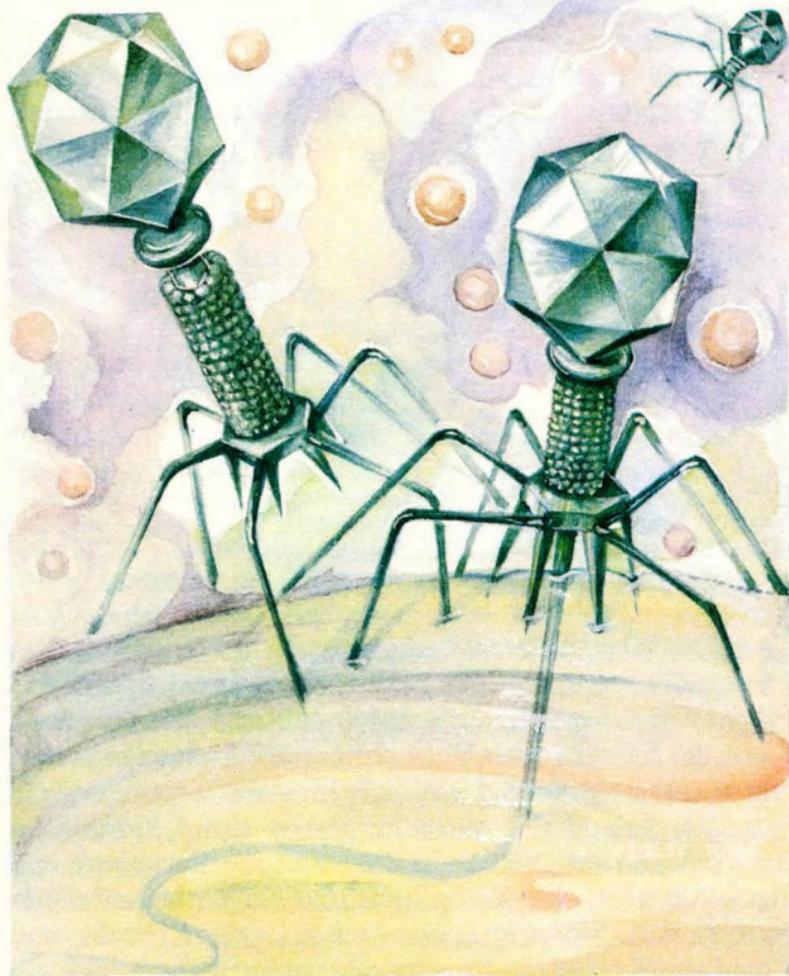
Doch eine derartige Spirale kann auch den Tod verursachen. Erinnern Sie sich an die heimtückischen Unglücksbringer, die Viren, die kleinsten Bewohner unseres Planeten? Sie haben nur einen Bruchteil der Größe von Bakterien. Die Bakterien selbst werden von Viren infiziert, so wie wir von Bakterien; auf einer Nadelspitze hätten



*Verschiedene Viren. 1 – Bakteriophage; 2 – Tollwutvirus; 3 – Kückenpockenvirus; 4 – Adenovirus; 5 – Gelbfiebertvirus; 6 – Pockenvirus; 7 – Kinderlähmungsvirus; 8 – Grippevirus; 9 – Tabakmosaikvirus*

einige 10000 von ihnen bequem Platz. Lebewesen? Die Wissenschaftler haben bis heute keine Antwort auf diese Frage. Wie jeder andere lebende Organismus besitzen auch Viren die Fähigkeit zur Vermehrung. Sie können sich aber nur vermehren, sobald sie sich in einer lebenden Zelle befinden. Sobald sie von dieser getrennt sind, kristallisieren die Viren aus. Viruskristalle haben die Form regelmäßiger Polyeder, sind völlig inert und zeigen keinerlei Lebenszeichen. Sie sind ebenso tot wie die Kristalle von Kochsalz, Zucker oder Quarz. Es genügt jedoch, daß ein solches Kristall in lebendes Gewebe gelangt, und schon wird es lebendig und beginnt seine Fortpflanzungstätigkeit.

Wie gelingen dem Virus seine seltsamen Verwandlungen? Noch eine Frage ohne Antwort. Aber etwas wissen wir bereits, wie nämlich die Nukleinsäure eines Virus eine lebende Zelle tötet. Ja, es gibt keinen Zweifel daran, ein durch ein Virus infizierter Organismus wird durch nichts anderes getötet als durch eine »Spirale des Lebens«. Der Aufbau eines Viruspartikels ist einfach; es handelt sich um einen DNS- oder RNS-Strang, der durch eine Schicht von Proteinmolekülen geschützt wird. Das Tabakmosaikvirus



*Die aggressive Natur von Viren und Bakteriophagen läßt sich an ihrem Aufbau demonstrieren. In unserer Abbildung ist der Bakteriophage T4 dargestellt. Sein Kopf besteht aus 30 gleichseitigen Dreiecken, die die »Spule« mit der darauf aufgewickelten DNS-Spirale umgeben. Der zylinderförmige Schwanzteil ist hohl und besteht aus einem kontraktiven Protein. Im Hohlraum des Zylinders befindet sich ein Stachel, und die sechs Schwanzfasern dienen zum Erkennen der Rezeptorzelle und zur Befestigung an dieser. Rechts im Bild sieht man, wie der Aggressor die Zellwand durchschlagen hat, wie die Kontraktion des zylinderförmigen Proteinschwanzes erfolgt ist, wobei der Stachel ausgefahren wurde, durch den im nächsten Augenblick die Nukleinsäure des Phagen in den Zellkörper »strömt«.*

beispielsweise stellt ein Stäbchen dar, das aus einem spiralförmigen RNS-Strang besteht und von einer Proteinhülle umgeben ist. Die Moleküle der Hülle sind ebenfalls spiralförmig angeordnet, und die Rolle des Baumeisters spielt eine Nukleinsäure.

Außer dem Schutz erfüllt die Proteinhülle noch zwei andere wichtige Funktionen. Sie »erkennt«, ob eine Zelle für den Angriff des betreffenden Virus geeignet ist, und geht unmittelbar darauf in bester Piratenmanier zum »Kapern« über. Diesem Prozeß liegt eine Wechselwirkung zwischen spezifischen Rezeptoren der Zelle zugrunde, die sich an deren Oberfläche befinden, und den dazu passenden Strukturen des Virusproteins. Die eine und die andere chemische Struktur verhalten sich zueinander komplementär, und der Erkennungsvorgang läuft nach dem »Schlüssel-Schloß-Prinzip« ab. Haftet das Virus erst einmal an seinem Opfer, dann dringt es sehr rasch in die Zelle ein und nimmt blitzartig seine Tätigkeit auf. Zuerst nimmt es die »Befehlszentrale« der Zelle, d. h. den genetischen Apparat, in Besitz und setzt dabei die zelleigene DNS außer Funktion. Währenddessen hat das Virus bereits Zeit gefunden, »die Maske fallenzulassen«, d. h. seine Nukleinsäure von der Proteinhülle zu befreien und sofort die Produktion von Kopien anhand dieser Nukleinsäure zu organisieren. Die unter dem Diktat des Usurpators synthetisierte RNS gibt nun neue Anweisungen an die Ribosomen, und diese beginnen gehorsam die Produktion der spezifischen Virusproteine. So veranlaßt das Virus die Zelle zur Ausnutzung der vorhandenen Vorräte und des ganzen energetischen und synthetischen Apparats zur Reproduktion nicht der zelleigenen Komponenten, sondern jener des schrecklichen Eindringlings. Hunderte seiner Duplikate, vollständig ausgerüstet mit Proteinhülle und spiralförmiger Nukleinsäure, verlassen alsbald die Zelle, breiten sich aus und dringen in die Nachbarzellen ein.

Nach diesem rationellen Verfahren handeln auch die Bakteriophagen, außerordentlich kleine Viren, die selbst Bakterien infizieren und in diesem Sinn gelegentlich unsere Bundesgenossen sind. Die Bakteriophagen bestehen aus einem Kopf, einem Kragen und einem Schwanz. Der

Kopf enthält ein DNS-Molekül, das ganz fest aufgewickelt ist wie auf eine Spule. Der Schwanz ist ein kontraktionsfähiger Hohlzylinder, in dem sich ein »Stachel« befindet. Mit Hilfe fadenartiger Auswüchse, die sich am Schwanz befinden, wählt der Bakteriophage sein Opfer aus. Er heftet sich mit dem Schwanzende am Opfer an und schlägt mit Hilfe des Stachels ein Loch in dessen Zellmembran. Danach erfolgt eine starke Kontraktion, und ein Ende des DNS-Strangs dringt in das Loch ein. Die Spule im Kopf des Bakteriophagen beginnt sich nun rasch im Uhrzeigersinn zu drehen, so lange, bis das gesamte DNS-Molekül in den Körper der überfallenen Zelle eingedrungen ist, während die nun überflüssige Proteinrüstung draußen bleibt. Zwanzig Minuten später wimmelt das Opfer bereits von aggressionsbereiten Bakteriophagen.

Was bringen uns nun all diese erstaunlichen, erst in den letzten Jahren entdeckten Tatsachen? Sehr viel, und zwar sowohl in theoretischer als auch in praktischer Hinsicht. Die Viren stehen allem Anschein nach am Kreuzungspunkt der wichtigsten Probleme von Biologie und Medizin. Vor allem bilden sie ein vorzügliches Modell zum Studium der molekularen Mechanismen von Vererbung und Proteinsynthese. Auch die Wechselwirkung zwischen einem Phagen und einem Bakterium vermag uns noch viele »Geheimnisse« zu enthüllen, die in der Doppelspirale der DNS eingeschlossen sind, wenn sie uns nicht vielleicht sogar die genauen Gesetzmäßigkeiten aufzeigen wird, wonach deren linke und rechte Hälfte ihre spiegelgleichen Doppelgänger erzeugen und so die Weitergabe des Stafettenstabes, d. h. des genetischen Codes, gewährleisten. Bei dieser Wechselwirkung kann man gelegentlich den »Einbau« von Phagen-DNS in bakterielle DNS beobachten, wobei dann beide gemeinsam funktionieren – eine Tatsache, die die gefährliche Perspektive der Entwicklung neuer gefährlicher Mikroorganismen und unbekannter Krankheiten eröffnet, gleichzeitig aber auch Wege zur bewußten Lenkung der Vererbung zum Nutzen des Menschen. Vielleicht, daß wir es bereits in nicht allzu ferner Zukunft lernen werden, dieses erstaunliche und großartige asymmetrische Molekül nicht nur zu verstehen, sondern auch zu steuern, um so einen großen Teil der

weltweit bestehenden Gesundheitsprobleme zu lösen, einschließlich der Krebsbekämpfung und der Lebensverlängerung des Menschen. Wirklich, wie recht hatte Pasteur, als er lange vor der Entdeckung der Nukleinsäuren eine große Wahrheit aussprach, als er sagte, daß in der Links-rechts-Symmetrie der Schlüssel zu den Geheimnissen des Lebens läge! Heute können wir hinzufügen, im bestimmten Sinne vielleicht auch des Todes.

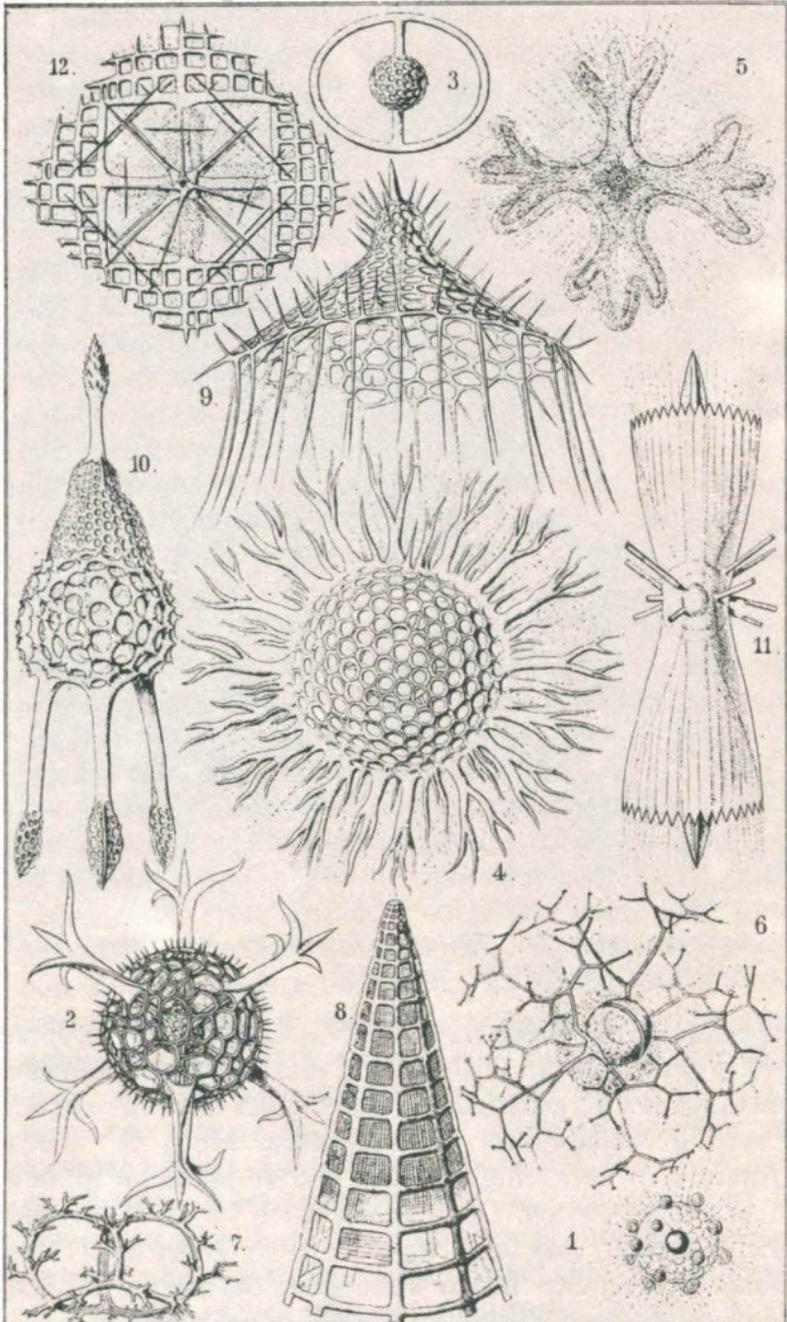
## Symmetrie und Evolution

Um das Jahr 450 v. u. Z. lehrte der griechische Philosoph Empedokles, daß alles Werden und Vergehen auf der »durch Haß oder Liebe bewirkten Mischung oder Entmischung der vier ewigen Elemente Feuer, Wasser, Luft und Erde« beruhe. Seiner Lehre zufolge war die Erde zu Beginn tot, und es herrschte ein unvorstellbares Durcheinander; alle Stoffe und Elemente waren miteinander vermischt und im allgemeinen Chaos nicht voneinander zu unterscheiden. Allmählich aber änderte sich das Chaos und nahm immer geordnetere Formen an, die Elemente verbanden sich miteinander und bildeten unmittelbar die Organe der Tiere. »Die Köpfe entstanden ohne Hälse, die Arme bewegten sich ohne Schultern, und die Augen irrten ohne die Stirn umher.« In der Luft und im Wasser schwammen einzeln Füße, Arme, Herzen und die schwarzgefärbten Lungen umher. In den brodelnden Wirbeln des chaotischen Gemischs hatten diese Einzelteile Chancen, oftmals »aufeinanderzustoßen« und gelegentlich unter Bildung der unterschiedlichsten Kombinationen aneinander hängenzubleiben. Der Kopf eines Stiers beispielsweise konnte sich mit dem Arm eines Menschen und dem Fuß eines Hahnes vereinigen, und am Rücken eines Bären konnten sich Adlerflügel etablieren. »Die Teile vereinigten sich miteinander, wie es gerade kam, und zur Vielzahl der bereits existierenden kamen unaufhörlich immer neue hinzu ... So entstanden viele Wesen mit zwei Gesichtern und zwei Rücken. Stiere mit einem Menschenkopf entstanden und umgekehrt ...« In ihrer Mehrzahl waren diese verunstalteten Wesen nicht lebensfähig und gingen rasch

zugrunde; doch manchmal erwies sich die Kombination als gelungen, und es entstanden existenzfähige Tiere, lebens- und vermehrungsfähige Arten.

So phantastisch Empedokles' Vorstellungen des Lebens auch erscheinen, wir können nicht umhin, eine Analogie festzustellen zwischen seinem Gedanken von einer zufälligen Kombination »geeigneter« Teile zu lebensfähigen Organismen und der heutigen Lehre von der Entstehung organischer Moleküle durch »Zusammenstoß« der Atome, aus denen sie bestehen. Doch das Wichtigste in der Lehre dieses alten Philosophen ist die Idee von der *natürlichen Auswahl*, vom Überleben der »gelungenen« Kombinationen und vom Verschwinden der mißlungenen, die keine gesunde Nachkommenschaft hinterlassen können. 2000 Jahre später wurde dieser außerordentlich wichtige Gedanke von Charles Darwin (1809-1882) erneut ausgesprochen und zur Grundlage seiner Evolutionslehre.

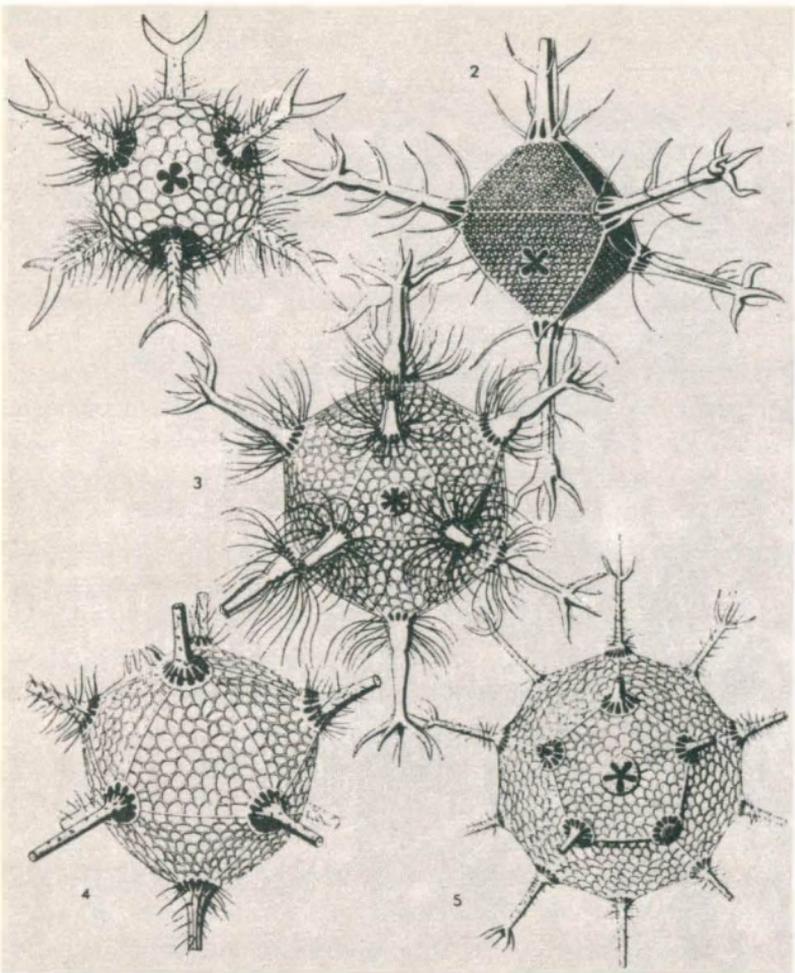
Darwin wies wissenschaftlich begründet nach, daß alle gegenwärtigen hochorganisierten Lebewesen auf dem Wege der Evolution aus einfacher aufgebauten Organismen entstanden, d. h. auf dem Weg der folgerichtigen Entwicklung und Verbesserung. Darwin gab auch die Triebfeder dieser Entwicklung an: den Kampf ums Dasein und das Überleben der am besten angepaßten Organismen. Die Wissenschaft von heute hat die Bedeutung der Mutation für die Evolution erklärt. Wir wissen nun, daß die Nukleinsäure ein unabdingbarer Bestandteil der Zelle ist, ebenso wie beim einfachsten Virus, und daß in ihrer asymmetrischen Spiralstruktur die gesamte Information der komplizierten lebenden »Maschine« eingeschlossen ist. Während der Organismus die Kopien seiner selbst vorbereitet, achtet er darauf, daß sie genau ausfallen. Und das DNS-Molekül ist bei dieser Arbeit sehr »aufmerksam«! Man hat ausgerechnet, daß es über 4 Millionen Kopien seiner selbst produzieren kann, ehe ihm ein unbedeutender Fehler unterläuft. Eine Mutation jedoch ist nichts anderes als eine derartige »fehlerhafte« Kopie, d. h. eine »Abschrift«, die sich ein wenig von ihrem Original unterscheidet. Meist unter dem Einfluß äußerer Faktoren, etwa der UV-Strahlung der Sonne, der kosmischen Strahlung oder der Strahlung radioaktiver Elemente, kann sich die



E. Haeckel del.

A. Goltzsch lith.

Tiefseeradiolarien nach einer Zeichnung Ernst Haeckels



*Radiolarien, auch Strahlentierchen genannt, von Haeckel als »Kunstformen des Meeres« bezeichnet*

Reihenfolge der Nukleotide im DNS-Molekül ändern; dann tritt in der Kopie ein »Fehler« auf, und der Mutant, ein neu entstandener Organismus, unterscheidet sich von seinen Eltern in bestimmten Eigenschaften. Meist ist dieser Unterschied nachteilig, und der Mutant hat keine großen Überlebenschancen. Doch gelegentlich ist die Änderung auch nützlich, und dann wird die neue Eigenschaft von Generation zu Generation weitergegeben, und der Mutant gewinnt so einen Vorteil im Kampf ums Dasein.

Das Leben auf der Erde entstand in sphärischen Symmetrieformen. Die anfänglichen einzelligen Lebewesen

waren nicht imstande, sich aktiv zu bewegen, weil sie nicht die dafür erforderlichen Organe besaßen. Weil ihre Dichte der des Wassers nahekam, »hingen« sie einfach im Wasser. Sie schwammen darin, ohne eine bestimmte Richtung zu bevorzugen, und wurden ständig durch die Wasserströmung herumgewirbelt. Die Richtungen »oben« und »unten«, »links« und »rechts« oder »vorn« und »hinten« hatten für sie keinerlei Bedeutung, weil die zur Befriedigung ihrer bescheidenen Bedürfnisse erforderlichen Nährstoffe gleichmäßig überall in ihrer Umgebung verteilt waren. Die sphärische Form war unter diesen Bedingungen daher ganz natürlich. Wir können gleiche Form auch heute bei den meisten einzelligen Vertretern der Protozoen feststellen, die in Flüssigkeiten leben und keine speziellen Fortbewegungsvorrichtungen besitzen. Durch den Körper eines solchen Tieres können wir wie durch eine Kugel unzählige Symmetrieebenen legen, die alle gleichwertig sind: Jede von ihnen teilt den Körper in zwei spiegelgleiche Hälften.

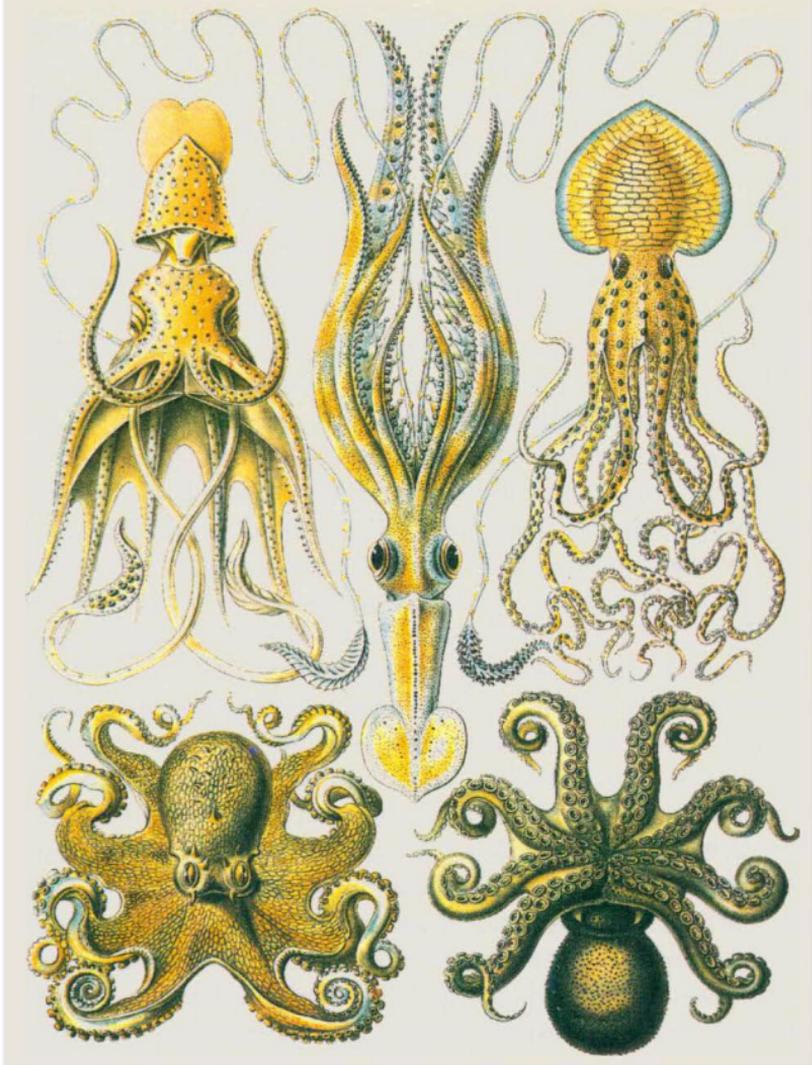
Von dieser gewohnten kugelsymmetrischen Form ausgehend, entwickelten sich später zwei große Gruppen. Es entstand die Welt der Pflanzen mit radiärer Symmetrie und die Welt der Tiere mit ihrer zweiseitigen (bilateralen) Symmetrie. Die ersten Änderungen im Symmetrietyp traten ein, als sich ein Teil der Organismen am Meeresboden festsetzte, während andere die Fähigkeit zur aktiven Bewegung erwarben. Die am Boden haftenden sphärischen Organismen erhielten somit eine von oben nach unten verlaufende Achse. Nunmehr hatte diese Richtung auch eine Bedeutung, denn der untere Teil des Körpers, der den Organismus festhielt, mußte neue Funktionen erfüllen und unterschied sich vom oberen Teil. Doch weder das Meer noch die Luft als Lebensraum haben irgend etwas anzubieten, was einen fest verankerten Organismus veranlassen könnte, die Richtungen links und rechts bzw. vorn und hinten zu unterscheiden. Für die Seeanemone ist das Wasser in ihrer Umgebung in allen Richtungen ein und dasselbe, genau wie für den Baum die Luft, die ihn umgibt. Aus diesem Grund ging die sphärische Symmetrie von Lebewesen mit einem festen Standort in die radiäre Symmetrie über, die heutzutage nahezu für die gesamte

Pflanzenwelt charakteristisch ist. Unbewegliche Tiere oder Tiere, die sich langsam bewegen (Quallen, Seesterne usw.), zeigen ebenfalls radiäre Symmetrie und erinnern daher äußerlich an Pflanzen. Doch sobald ein Tier sich fortbewegte, und sei es auch nur in der Weise, daß es rasch über den Meeresboden dahinkriecht, änderte sich auch sein Aufbau. Es erhielt eine von vorn nach hinten verlaufende Achse. Nun können wir bereits nicht nur die Ober- und Unterseite des Körpers unterscheiden, sondern auch seinen vorderen und hinteren Teil.

Die Fähigkeit zur Fortbewegung gab den betreffenden Arten im Vergleich zu den unbeweglichen oder wenig beweglichen Organismen einen großen Vorteil. Dabei war die Anordnung der Augen vorn in Bewegungsrichtung zweifellos am zweckmäßigsten. Das gilt auch für die Ausbildung des Mundes in der vorderen Körperhälfte, also in der Nähe der Augen und des sich entwickelnden Gehirns. Die Bewegung im Medium Wasser, ob nun kriechend oder schwimmend, führte nun unvermeidlich zur evolutionären Festigung der »Vorn-hinten«-Asymmetrie, während sich die »Oben-unten«-Asymmetrie unter dem Einfluß der Schwerkraft in dem Maße vergrößerte, wie Volumen und Masse des Tieres zunahmen.

Warum aber blieb nur die Links-rechts-Symmetrie des Körpers erhalten, so daß der sich bewegende Organismus bilateral symmetrisch wurde? Wir erwähnten bereits, daß für ein im Meer lebendes Tier im allgemeinen kein Unterschied zwischen der linken und der rechten Seite besteht. Doch die Richtung »vorwärts«, in die er sich bewegt, ist von der Richtung »rückwärts« verschieden, ebenso wie die Richtung »nach oben«, d. h. zur Oberfläche, sich von der Richtung »nach unten«, d. h. zum Grund, unterscheidet. Wäre eine »Links-rechts«-Asymmetrie (z. B. beim Vorhandensein nur des rechten Auges) biologisch gerechtfertigt, dann wäre auch der Fisch asymmetrisch. Doch diese Asymmetrie brächte keinerlei Vorzüge, im Gegenteil. In diesem Fall könnte das in Bewegung befindliche Tier von der Seite her, wo das Auge fehlt, leichter überrascht und erbeutet werden.

Es liegt also auf der Hand, daß die Zweckmäßigkeit des anatomischen Aufbaus im engen Zusammenhang steht mit



*Trichterkraken; aus Ernst Haeckels »Kunstformen der Natur«*

dem Symmetrie- bzw. Asymmetriegrad, den die betreffende Art besitzt, und daß dieser von den Existenzbedingungen bestimmt wird. Erinnern wir uns nur an die Flunder, die bilateral symmetrisch ist und deren Augen sich an den beiden Seiten des Kopfs befinden. Dies ist so lange der Fall, wie sie sich wie alle anderen Fische bewegt. Bei den erwachsenen Individuen dagegen, die sich an die bodennahe Lebensweise in relativer Unbeweglichkeit angepaßt haben, erweist sich die zweiseitige Symmetrie als

weniger zweckmäßig, die Augen sind nun nur noch an einer Seite des Kopfes angeordnet.

Fassen wir zusammen: Wegen der allgemeinen Symmetrie der Erde und der hier wirkenden Kräfte haben sich im Verlauf der Evolution drei Symmetrietypen bei den lebenden Organismen herausgebildet: die sphärische Symmetrie, charakteristisch für frei im Wasser schwebende niedere Organismen; die radiäre Symmetrie bei unbeweglichen Pflanzen und Tieren; die bilaterale Symmetrie bei den Organismen, die sich bewegen. Mit fortschreitender Entwicklung der biologischen Arten »sinkt« die Symmetrie und macht der Asymmetrie Platz. Die ideale Symmetrie der Kugel wird abgelöst durch die radiäre Symmetrie und diese wiederum durch die bilaterale Symmetrie. Diese Gesetzmäßigkeit entspricht gewöhnlich exakt den Bedürfnissen und der Entwicklung der Pflanzen- und Tierwelt im Verlauf der Evolution; bei den am höchsten organisierten beweglichen Wesen hat sich als deren ständiges Merkmal die zweiseitige Symmetrie gefestigt. Es ist auch gar nicht zu erwarten, daß es anders sein könnte, wir sehen, daß es die Gravitation und die Bewegung sind, die den Typ unserer Symmetrie bestimmen. Der sowjetische Wissenschaftler G. V. Wulf schreibt: »Es gibt nur einen Fall von Symmetrie, der die Vorwärtsbewegung nicht nur nicht behindert, sondern sie sogar im höchsten Maße fördert. Es ist jene Symmetrie, bei der das Tier beiderseits seiner Bewegungsrichtung gleich aufgebaut ist, also eine Symmetrie mit einer vertikalen Symmetrieebene bzw. die Symmetrie, die bei den Zoologen bilaterale Symmetrie heißt.« Und da wir allen Grund haben, anzunehmen, daß die Evolution auf jedem anderen Planeten nach den gleichen Gesetzen ablaufen muß, können wir uns nur schwer vorstellen, mit außerirdischen Wesen zusammenzutreffen, die irgendwelche Abweichungen von diesem fundamentalen Symmetriotyp zeigen.

## Wie sehen denn die »anderen« aus?

Wenn wir annehmen, daß Leben nur unter Bedingungen entstehen kann, die den Bedingungen auf der Erde nahekommen, so wären derartige Planeten in einem Fall von

einer Million Fällen anzutreffen; allein im Bereich unserer bescheidenen Milchstraße, zu der etwa 150 Milliarden Himmelskörper gehören, könnten 150 000 davon bewohnt sein.

In wissenschaftlich-phantastischen Erzählungen sind wir bereits mit Mars- und Mondmenschen zusammengetroffen, haben mit Eindringlingen von unbekanntem Planeten gekämpft und ferne Welten besucht, die von den unterschiedlichsten Geschöpfen bewohnt werden. Die einen Autoren begnügen sich damit, nur über erdähnliche Planeten zu berichten, deren Bewohner dem Menschen nahe stehen. Andere beschreiben irgendwelche alptraumhafte Wesen mit ungewöhnlichen Eigenschaften. Erinnern Sie sich an das schöne Marsmädchen Aelita aus der gleichnamigen Erzählung von Alexei Tolstoi? Ein bezauberndes Bild! Doch ganz anders Herbert Wells. Er erfand seltsame insektenähnliche »Seleniten« (»Die ersten Menschen auf dem Mond«) und bössartige Marsbewohner mit unförmigem Körper und riesigen Augen (»Der Krieg der Welten«).

Nachdem aber klargeworden war, daß es weder auf dem Mond noch auf dem Mars überhaupt irgendwelche Lebewesen geben kann, siedelten die Verfasser utopischer Romane und Erzählungen auf anderen Sternen noch fürchterlichere Bewohner an: riesige gallertartige Medusen, die sich in klebrige, erstickende Wolken verwandeln, kristalline mit einem Gehirn versehene Asterioden, Delphinmenschen, bewegungsfähige vernunftbegabte Nebel, »denkende« Schimmelpilze, Wälder aus »genialen« Bäumen, unvergängliche Superhirne oder den einem Ameisenhaufen ähnlichen »pluralistischen« Verstand. Stanislaw Lem hat uns ein denkendes Wesen in Gestalt eines riesengroßen Protoplasmahirns vorgestellt, das sich als Ozean über den ganzen Planeten erstreckt (»Solaris«).

Wer wird recht behalten? Werden die außerirdischen Wesen uns oder irgendwelchen Organismen ähneln, die wir kennen?

Ja, sie werden uns ähneln.

Nein, es werden gänzlich andere Wesen sein.

Für jede dieser beiden Antworten kann man etwa gleich viele Für und Wider nennen. »Ein denkendes Wesen aus einer anderen Welt . . . ist ebenfalls vollkommen, universell

und schön. Es kann keine vernunftbegabten Ungeheuer, keine Pilzmenschen und auch keine Oktopus-Menschen geben«, schreibt I. Jefremow. »Im Zeitalter der Raumfahrt ist die Annahme nicht unbegründet, daß wir mit anderen Lebewesen zusammentreffen werden, die sehr hochorganisiert sind und sich gleichzeitig völlig von uns unterscheiden. Warum sollte ein hochorganisiertes Wesen nicht beispielsweise die Gestalt einer dünnen Membran haben, die wie Schimmel an den Steinen haftet?« schreibt Akademiemitglied A. Kolmogorow.

Einige Wissenschaftler nehmen an, daß wir überhaupt auf derartige Vorstellungen verzichten müssen, wenn wir von vernunftbegabten Wesen sprechen. Ihre Argumente sind folgende: Um einen hohen Intellekt zu besitzen, muß das Gehirn jedes Individuums imstande sein, eine erhebliche Informationsmenge aufzunehmen; deshalb muß es im Verhältnis zum Körper auch relativ groß sein. Dies setzt »automatisch« einen Körper voraus, der zum Schutz und zur Sicherung der Funktion dieses Gehirns geeignet ist. Es liegt nun aber auf der Hand, daß Wesen in der Art von Insekten, Viren, Schimmelpilzen usw. hinsichtlich ihrer Konstruktion diesen Forderungen nicht genügen.

Gelegentlich wird die Existenzmöglichkeit von Organismen diskutiert, die nicht aus Kohlenstoffketten und Proteinen, sondern aus Verbindungen anderer Elemente, z. B. Silizium, aufgebaut sind. In der Tat steht das Silizium dem Kohlenstoff in seiner Reaktionsfähigkeit und seiner Neigung zur Bildung vielfältiger Verbindungen am nächsten; aber seine Ketten sind verhältnismäßig kurz und unbeständig. Deshalb vertreten die meisten Biochemiker die Auffassung, daß die selbständige Reproduktion und die Veränderlichkeit der Organismen als sehr komplizierte Erscheinungen nicht von Molekülen realisiert werden können, die nicht die ungeheure Vielfalt, Sensibilität und Plastizität der Kohlenstoffverbindungen besitzen. Gewiß, wenn wir auf Unterhaltung aus sind, hindert uns nichts daran, daß wir uns Menschen aus Silizium und Fluor vorstellen, die statt Limonade Ammoniak trinken und Ätznatronkristalle anstelle von Bonbons knabbern. Aber wir dürfen nicht vergessen, daß die chemischen Elemente, auf welchem Himmelskörper auch immer, genau die glei-

chen sind wie auf der Erde und daß unter diesen Elementen, wie wir gesehen haben, einzig der Kohlenstoff Konstruktionen bildet, die den Anforderungen des Lebens entsprechen. Darum ist es wenig wahrscheinlich, vom Organismus der »anderen« eine grundsätzlich andere Zusammensetzung zu erwarten.

Schließlich wird hartnäckig von »grünen Menschen« geschrieben, d. h. von Wesen mit hochentwickelter Vernunft, die Chlorophyll enthalten und sich unter Ausnutzung der Lichtenergie durch Photosynthese ernähren. Viele Autoren phantastischer Werke sind auf diese Idee verfallen. Tatsächlich bestreitet die Wissenschaft nicht, daß beim Menschen oder einem anderen Tier zumindest grundsätzlich Mutationen auftreten könnten, in deren Ergebnis der Organismus beginnt, statt Hämoglobin Chlorophyll zu produzieren. Beide Verbindungen sind einander sehr ähnlich, und eine geringfügige Veränderung im Molekül würde den roten Blutfarbstoff in das grüne Pigment der Pflanzen verwandeln. In diesem Fall müßte sich das Chlorophyll an der Oberfläche der Haut anordnen, um dem Licht Zutritt zu gewähren, und die Menschen würden tatsächlich grün aussehen.

Könnte jedoch die übliche eigene Photosynthese dieser Menschen deren Bedarf an Nahrung und Energie sichern? Ja, natürlich – schließlich sind die Pflanzen ein lebendes Beispiel dafür. Der »grüne Mensch« würde sogar billiger leben als wir, nämlich nur von Kohlendioxid und Salzen. Und er würde Mineralwasser jedem anderen Getränk vorziehen. Doch weil die Oberfläche des menschlichen Körpers zu klein ist, um die erforderliche Kapazität der Photosynthese zu gewährleisten, müßte die Haut Falten bilden und außerdem mit einer Vielzahl von »Auswüchsen«, d. h. Blättern, besetzt werden. Das Spaziergehen einschließlich jener angenehmen Beschäftigung, die wir als höhere intellektuelle Tätigkeit bezeichnen, erfordern aber viel mehr Energie, als sie die Photosynthese selbst bei diesem »Leben vom Blatt« gewährleisten könnte. So müßte der Mensch, da er die Situation »ganz und gar nicht in den Griff bekommt«, aufhören, sich zu bewegen. Er müßte einfach auf einer sonnigen Wiese stehenbleiben und den ganzen Tag hier verharren, denn er brauchte immer Licht.

Dafür brauchte er allerdings keinen Magen-Darm-Kanal; statt dessen wäre es zweckmäßiger, weitere Auswüchse zu erwerben, die – Wurzeln vergleichbar – in den Boden eindringen und den Organismus mit Wasser und Salzen versorgen. Und nachdem er nun auch mit Wurzeln versehen wäre, handelte es sich bei diesem unbeweglichen, die Photosynthese praktizierenden Organismus mit grünen Blättern nicht mehr um einen Menschen, auch nicht um ein Tier, sondern um eine Pflanze.

Die Sinnesorgane gehören zu den Dingen, denen die Phantastikschriftsteller bei der Beschreibung außerirdischer Wesen besondere Aufmerksamkeit widmen, speziell dann, wenn sie darauf hoffen, uns durch das ungewöhnliche Aussehen dieser Wesen zu verblüffen. Möglicherweise werden sich die Sinnesorgane dieser Wesen tatsächlich nach Aufbau und Anordnung von den unseren unterscheiden. Könnten wir etwa behaupten, daß der Mensch hier die günstigste Lösung vorweisen kann? Befände sich unser Mund oben auf dem Schädel, hätten wir den Vorteil, ein belegtes Brot unter die Mütze stecken und weiter frühstücken zu können, wenn wir schon mit der Straßenbahn fahren. Allerdings würden wir in diesem Fall niemals sehen können, was wir zu uns nehmen. Unsere Ohren würden im Winter nicht frieren, wenn sie beispielsweise unter den Armen in den Achselhöhlen säßen. Um besser zu hören, wären wir freilich gezwungen, ständig die Arme hochzuheben. Wäre das alles wirklich besser? Die Bewohner fremder Welten werden uns häufig als Wesen ohne Augen, Ohren oder Nasen vorgestellt, doch handelt es sich dabei nur um die Wiederholung von Modellen, die die Natur bereits geschaffen hat und die seit uralten Zeiten die Erde bewohnen. Die Amöbe lebt und ernährt sich ohne Mund, der Oktopus besitzt kein Gehör, die Vögel haben keinen Geruchssinn, dem Seestern fehlt sogar der Kopf, und niemand wundert sich darüber. Überall in der phantastischen Literatur ist man bestrebt, auf möglichst große Unterschiede zwischen uns und den »anderen« aufmerksam zu machen, doch können wir mit nicht geringerem Recht auch die umgekehrte Frage stellen: Wie groß wird die Ähnlichkeit sein?

Und da gibt es einiges, das mit Bestimmtheit zutrifft.

Denken wir nur an die Links-rechts-Struktur der Ameise und des Hais oder an die radiäre Symmetrie des Seesterns und der Kamille. Erinnern wir uns an die »Geometrie der Natur« und die Gesetzmäßigkeiten der Formbildung, an die im Evolutionsverlauf gefestigten Symmetrietypen. Wirkt etwa nur auf der Erde die Gravitationskraft? Natürlich nicht. Herrscht nur auf der Erde die Symmetrie? Selbstverständlich nicht. Wie immer ein außerirdischer Organismus lebt, welche chemische Organisation er auch besitzt und welchen Himmelskörper er auch bewohnen mag, stets wird er doch der Wirkung der Gravitation unterliegen und immer dem Einfluß der vertikalen Anziehungskraft ausgesetzt sein. Etwas anderes gibt es nicht. Dies aber bestimmt, wie wir wissen, die entsprechende Symmetrieform. Alles, was sich bewegt, was kriecht oder horizontal bzw. unter einem bestimmten Winkel zur Oberfläche wächst, besitzt bilaterale Symmetrie. Alles, was unbeweglich ist oder vertikal emporwächst, ist radiär symmetrisch. Die Naturgesetze sind auf allen Himmelskörpern gleichermaßen gültig, und hier ist wohl kaum ein Eingriff vorstellbar, der einen völlig unerwarteten Symmetrietyper im Aufbau der lebenden Organismen erzeugen könnte. Handelt es sich um die Bewohner eines flüssigen Mediums und bewegen sich diese darin, dem Hai vergleichbar, aktiv durch Schwimmen fort, dann besitzen sie, entsprechend der Bewegungsrichtung, einen vorderen Körperteil, der vom hinteren Teil des Körpers verschieden ist. Unterschiedlich werden auch der obere und der untere Teil des Körpers sein, die auf zwei voneinander verschiedene Dinge, nämlich auf den Boden und zur Oberfläche gerichtet sind. Die linke und die rechte Hälfte dagegen werden gleich sein, weil das Medium links und rechts im allgemeinen das gleiche ist. Aus analogen Gründen werden Wesen, die fliegen oder sich auf dem Festland fortbewegen, in den Richtungen von vorn nach hinten und von oben nach unten körperliche Unterschiede aufweisen, während die linke und die rechte Seite auch in diesem Fall ihre Symmetrie bewahren.

Wir können uns hier auch noch eine weitere gedankliche Gegenüberstellung irdischer und außerirdischer Lebewesen erlauben. Wenn wir nur ein wenig darüber nach-

Dafür brauchte er allerdings keinen Magen-Darm-Kanal; statt dessen wäre es zweckmäßiger, weitere Auswüchse zu erwerben, die – Wurzeln vergleichbar – in den Boden eindringen und den Organismus mit Wasser und Salzen versorgen. Und nachdem er nun auch mit Wurzeln versehen wäre, handelte es sich bei diesem unbeweglichen, die Photosynthese praktizierenden Organismus mit grünen Blättern nicht mehr um einen Menschen, auch nicht um ein Tier, sondern um eine Pflanze.

Die Sinnesorgane gehören zu den Dingen, denen die Phantastikschriststeller bei der Beschreibung außerirdischer Wesen besondere Aufmerksamkeit widmen, speziell dann, wenn sie darauf hoffen, uns durch das ungewöhnliche Aussehen dieser Wesen zu verblüffen. Möglicherweise werden sich die Sinnesorgane dieser Wesen tatsächlich nach Aufbau und Anordnung von den unseren unterscheiden. Könnten wir etwa behaupten, daß der Mensch hier die günstigste Lösung vorweisen kann? Befände sich unser Mund oben auf dem Schädel, hätten wir den Vorteil, ein belegtes Brot unter die Mütze stecken und weiter frühstücken zu können, wenn wir schon mit der Straßenbahn fahren. Allerdings würden wir in diesem Fall niemals sehen können, was wir zu uns nehmen. Unsere Ohren würden im Winter nicht frieren, wenn sie beispielsweise unter den Armen in den Achselhöhlen säßen. Um besser zu hören, wären wir freilich gezwungen, ständig die Arme hochzuheben. Wäre das alles wirklich besser? Die Bewohner fremder Welten werden uns häufig als Wesen ohne Augen, Ohren oder Nasen vorgestellt, doch handelt es sich dabei nur um die Wiederholung von Modellen, die die Natur bereits geschaffen hat und die seit uralten Zeiten die Erde bewohnen. Die Amöbe lebt und ernährt sich ohne Mund, der Oktopus besitzt kein Gehör, die Vögel haben keinen Geruchssinn, dem Seestern fehlt sogar der Kopf, und niemand wundert sich darüber. Überall in der phantastischen Literatur ist man bestrebt, auf möglichst große Unterschiede zwischen uns und den »anderen« aufmerksam zu machen, doch können wir mit nicht geringerem Recht auch die umgekehrte Frage stellen: Wie groß wird die Ähnlichkeit sein?

Und da gibt es einiges, das mit Bestimmtheit zutrifft.

Denken wir nur an die Links-rechts-Struktur der Ameise und des Hais oder an die radiäre Symmetrie des Seesterns und der Kamille. Erinnern wir uns an die »Geometrie der Natur« und die Gesetzmäßigkeiten der Formbildung, an die im Evolutionsverlauf gefestigten Symmetrietypen. Wirkt etwa nur auf der Erde die Gravitationskraft? Natürlich nicht. Herrscht nur auf der Erde die Symmetrie? Selbstverständlich nicht. Wie immer ein außerirdischer Organismus lebt, welche chemische Organisation er auch besitzt und welchen Himmelskörper er auch bewohnen mag, stets wird er doch der Wirkung der Gravitation unterliegen und immer dem Einfluß der vertikalen Anziehungskraft ausgesetzt sein. Etwas anderes gibt es nicht. Dies aber bestimmt, wie wir wissen, die entsprechende Symmetriehorm. Alles, was sich bewegt, was kriecht oder horizontal bzw. unter einem bestimmten Winkel zur Oberfläche wächst, besitzt bilaterale Symmetrie. Alles, was unbeweglich ist oder vertikal emporwächst, ist radiär symmetrisch. Die Naturgesetze sind auf allen Himmelskörpern gleichermaßen gültig, und hier ist wohl kaum ein Eingriff vorstellbar, der einen völlig unerwarteten Symmetrietyp im Aufbau der lebenden Organismen erzeugen könnte. Handelt es sich um die Bewohner eines flüssigen Mediums und bewegen sich diese darin, dem Hai vergleichbar, aktiv durch Schwimmen fort, dann besitzen sie, entsprechend der Bewegungsrichtung, einen vorderen Körperteil, der vom hinteren Teil des Körpers verschieden ist. Unterschiedlich werden auch der obere und der untere Teil des Körpers sein, die auf zwei voneinander verschiedene Dinge, nämlich auf den Boden und zur Oberfläche gerichtet sind. Die linke und die rechte Hälfte dagegen werden gleich sein, weil das Medium links und rechts im allgemeinen das gleiche ist. Aus analogen Gründen werden Wesen, die fliegen oder sich auf dem Festland fortbewegen, in den Richtungen von vorn nach hinten und von oben nach unten körperliche Unterschiede aufweisen, während die linke und die rechte Seite auch in diesem Fall ihre Symmetrie bewahren.

Wir können uns hier auch noch eine weitere gedankliche Gegenüberstellung irdischer und außerirdischer Lebewesen erlauben. Wenn wir nur ein wenig darüber nach-

denken, so müssen wir zugeben, daß es wohl kaum eine einfachere Vorrichtung zur Fortbewegung in einem flüssigen Medium gibt als die Flosse des Fisches oder den Flügel des Vogels zur Fortbewegung durch die Luft. Viele Beispiele überzeugen uns davon, daß die Natur gelungene Modelle mehrfach »nachnutzt«, und eine Bestätigung dafür ist die Tatsache, daß bei einigen Säugetieren, als sie ins Meer zurückkehrten und sich in Wale bzw. Robben verwandelten, ihre Extremitäten sich wiederum in Flossen wandelten. Und wer könnte eine einfachere Vorrichtung zur Fortbewegung auf dem Festland nennen als paarweise angeordnete Extremitäten? Unsere Beine unterscheiden sich, als mechanische Konstruktion betrachtet, nicht grundsätzlich von den Beinen eines Tausendfüßlers, obwohl sie sich auf unterschiedlichen Wegen entwickelt haben. Und da die Evolution vermutlich auf unüberwindliche anatomische Schwierigkeiten gestoßen wäre, falls sie das Rad als Fortbewegungsorgan hätte entwickeln wollen, so dürfen wir wohl kaum erwarten, jemals auf fahrradähnliche Tiere zu treffen. Dagegen ist es sehr wohl möglich, daß wir solche Fortbewegungsorgane finden wie die Flosse, den Flügel und das Bein.

Fassen wir zusammen: Die »anderen« werden ebenfalls symmetrisch sein, wenn es sie gibt. Das aber ist offenbar alles, was wir mit Sicherheit sagen können. Die Liebhaber der Phantastik werden dadurch jedoch nicht im geringsten daran gehindert, ihnen alle erdenklichen Formen zu verleihen; denn die Symmetrie hat ja auch in keiner Weise die Vielfalt der belebten Natur auf unserem Planeten eingeschränkt. Alle möglichen »seltsamen« Wesen könnten andere Planeten bewohnen; es fiel schwer, zu glauben, daß angesichts der Unterschiede in den konkreten Bedingungen und unter dem Einfluß einer Vielzahl zufälliger Faktoren irgendwo die genaue Kopie einer konkreten irdischen Art modelliert worden wäre. Doch wir stimmen der Auffassung zu, daß es wohl kaum so große Unterschiede gegenüber irdischen Lebewesen geben wird, daß wir das, was wir vielleicht einmal sehen, nicht auch als Lebewesen erkennen würden.

»akzent« – die Taschenbuchreihe  
mit vielseitiger Thematik:  
Mensch und Gesellschaft,  
Leben und Umwelt, Naturwissenschaft  
und Technik. – Lebendiges Wissen  
für jedermann, anregend und aktuell,  
konkret und bildhaft.

---

**Weitere Bände:**

Nichelmann, Licht und Leben

Mletzko/Mletzko, Die Uhr des Lebens

Marcinek, Droht eine nächste Kaltzeit?

Kehnscherper, Hünengrab und Bannkreis

Müller/Pötsch,

Vom Schneckenpurpur zum Jeansblau

Katona,

Interessantes aus der Medizintechnik