**Zeitschrift:** Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft. Wissenschaftlicher und administrativer Teil = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles. Partie scientifique et administrative = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali

**Herausgeber:** Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

**Band:** 141 (1961)

**Rubrik:** Eröffnungsrede des Jahrespräsidenten der SNG und Hauptvorträge

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 04.10.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

Anläßlich der Jahresversammlung
der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft in Biel 1961
wurden die Hauptvorträge unter dem allgemeinen Thema

# Symmetrie und Form

gehalten.

1. PD Dr. H. Schilt (Biel):
   *Eröffnungsvortrag und einleitender Vortrag zum Thema.*

2. Prof. Dr. J. M. Jauch (Genf):
   *Die Symmetrien in den Naturgesetzen.*

3. Prof. Dr. F. Laves (Zürich):
   *Symmetrie und Unordnung in der Kristallwelt.*

4. Prof. Dr. O. Schüepp (Reinach):
   *Film über Blattstellungskonstruktionen.*

5. Prof. Dr. F. E. Lehmann (Bern):
   *Symmetrie und Form der Tiere.*

6. Prof. Dr L. Plantefol (Paris):
   *Sur la genèse de formes symétriques et asymétriques chez les végétaux supérieurs.*

Leere Seite
Blank page
Page vide

# Eröffnungsansprache und einleitender Vortrag zum Thema

Von PD Dr. H. Schilt, Jahrespräsident (Biel)

Es ist mir eine große Freude, Sie hier im Namen des Jahresvorstandes begrüßen zu dürfen. Die meisten Schweizer Städte sind schon verschiedene Male Tagungsort der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft gewesen, Biel dagegen hat zum ersten Male die Ehre, diese hohe Gesellschaft zu beherbergen. Der Jahresvorstand hofft, daß Sie sich bei uns wohl fühlen und daß Sie während der drei Tage fruchtbare Arbeit leisten können.

Für die Hauptvorträge haben wir das Thema «Symmetrie und Form» gewählt. Man kann sich fragen, ob es in Anbetracht der totalen Bedrohung des Menschen heute sinnvoll ist, über ein solches Thema zu sprechen. Dieses wäre wohl besonders geeignet, wenn es darum ginge, mittelalterliche Bilder und Kirchenfassaden zu besprechen, hat man doch damals zum Entwerfen von Gemälden geometrische Netze benutzt und besondern Wert auf symmetrische Gestaltung eines Gebäudes gelegt.

Symmetrien sind in der modernen Kunst nicht erwünscht, selbst die Motive heutiger Tapeten und Stoffmuster zeichnen sich durch allerniedrigste Symmetrie aus. Obwohl man neuerdings der Form unserer Gebrauchsgegenstände wieder mehr Beachtung schenkt, spielt die Symmetrie doch nicht die Rolle wie noch zur Zeit unserer Urgroßväter. – Selbst in der Wissenschaft scheint die Bedeutung der Symmetrie eine Einbuße erlitten zu haben, wie man aus neueren physikalischen Experimenten schließen kann. Auch wichtige Eigenschaften der festen Körper beruhen auf Fehlordnungen oder im Kristallgitter eingebauten Fremdatomen. Viele, sogar die meisten Lebewesen, die äußerlich eine symmetrische Form aufweisen, weichen in ihrem Innern wesentlich von dieser Symmetrie ab.

Es wären also wohl genügend Gründe vorhanden, um sich gerade mit dem Asymmetrischen und Formlosen zu beschäftigen. Dennoch haben wir es gewagt, das Thema «Symmetrie und Form» zu wählen; wir glauben, daß der Begriff der Symmetrie auch heute noch einem Licht vergleichbar ist, das ins Unerforschte leuchtet und Erforschtes neu erglänzen läßt. Die Hauptreferate werden uns Wege zum Unbekannten weisen; lassen Sie mich, verehrte Zuhörer, nun Bekanntes mit dem Lichte der Symmetrie beleuchten.

In der Schule haben Sie sich alle einmal mit der Auflösung von quadratischen Gleichungen beschäftigt, oder etwas anders ausgedrückt: Sie haben die Nullstellen einer quadratischen Funktion bestimmt. Diese Funktion wird geometrisch durch eine Parabel dargestellt. Sie erinnern sich, daß diese Aufgabe dann besonders einfach ist, wenn die $y$-Achse des Koordinatensystems mit der Parabelachse zusammenfällt; das Koordinatensystem hat dann bezüglich der Parabel eine symmetrische Lage. Dieses einfache Beispiel ist für viele erkenntnistheoretische Fragen typisch: Wenn ein Problem eine innere Symmetrie aufweist, so besteht auch zwischen den Lösungen des Problems eine Symmetrie, und das Aufsuchen der Lösungen wird wesentlich erleichtert oder sogar erst ermöglicht dadurch, daß wir unsern Standpunkt und die Lösungsmethode der Symmetrie des Problems anpassen.

Das Wort Symmetrie wird oft nur für die Spiegelbildlichkeit benutzt. Es ist aber zweckmäßig, den Begriff Symmetrie allgemeiner zu fassen. Wir bedienen uns dazu der Vorstellung der Decktransformation. Ein spiegelsymmetrisches Gebilde kommt Punkt für Punkt zur Deckung, wenn jeder Punkt an der Spiegelebene gespiegelt wird. Die Spiegelung ist eine besondere Decktransformation. Andere Decktransformationen sind: Translationen (Schiebungen), Umklappungen, Drehungen um einen ganzzahligen Teil eines Vollwinkels, Gleitspiegelungen und Schraubungen. Geometrische Figuren, z. B. Dreiecke, Tetraeder, Würfel, Ornamente usw., besitzen Decktransformationen. So kann ein gleichseitiges Dreieck auf sechs verschiedene Arten mit sich zur Deckung gebracht werden, nämlich durch Drehungen von 120° und 240° um eine Achse senkrecht zur Dreiecksebene, Spiegelungen an den drei Höhen und ferner, nicht zu vergessen, die identische Transformation $E$, diejenige, die an der ganzen Figur nichts ändert, z. B. die Drehung um 0°. Ein schiefwinkliges Dreieck gestattet nur die identische Transformation $E$. Ein gleichschenkliges Dreieck hat zwei Decktransformationen, nämlich $E$ und die Spiegelung an der Höhe über der Basis. Vom mathematischen Standpunkt aus bilden die Decktransformationen einer bestimmten geometrischen Figur eine Gruppe; eine einzelne Transformation ist ein Element dieser Gruppe. Eine Menge von Elementen bilden dann eine Gruppe, wenn sie den vier Gruppenaxiomen genügen:

I. Zwischen je zwei Elementen ist eine Verknüpfung definiert, das Resultat dieser Verknüpfung soll wieder ein Element der Menge sein:
$A \cdot B = C$

II. Bei der Verknüpfung von drei Elementen soll es gleichgültig sein, welche zwei man zusammenfaßt: $A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C$

III. Es soll ein Einheitselement $E$ geben: $E \cdot A = A \cdot E = A$

IV. Es soll zu jedem Element $A$ der Menge ein Inverses $A^{-1}$ geben: $A^{-1} \cdot A = A \cdot A^{-1} = E$

Eine wunderschöne Darstellung von Gruppen bilden die Decktransformationen von geometrischen Ornamenten. Es ist eine bemerkenswerte Tatsache, daß es nur eine beschränkte Anzahl Symmetriemöglichkeiten gibt, trotzdem kann jede Symmetriestruktur die Grundlage zu einer beliebigen Anzahl verschiedener Ornamente bilden. Ich versuche, anhand der Streifenornamente Ihnen das Wesentliche zu zeigen. Für den einseitigen Streifen gibt es im ganzen nur sieben verschiedene Symmetrien, für die hier je ein Muster folgt:

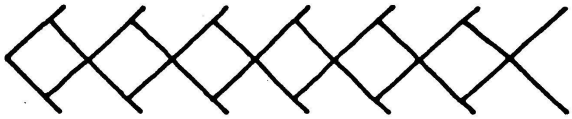
1. $T$ $E$

1. Die Translation und das Einheitselement allein

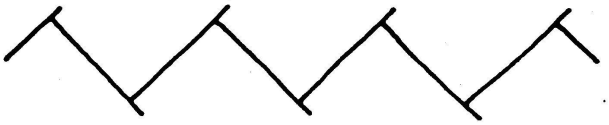
2. $T$ $A$

3. $q$

4. $l$



4a. $l'$



2. Die Translation und die 180°-Drehung $A$ um eine senkrechte Achse
3. Die Translation und Spiegelungen $q$ quer zum Streifen
4. Die Translation und Spiegelungen $l$ längs des Streifens
4a. Die Translation und die Gleitspiegelung $l'$ längs des Streifens

5. $T$ $A$ $l$

5a. $l'$

5. Die Translation, Drehung $A$, Spiegelungen $q$ und $l$
5a. Die Translation, Drehung $A$, Spiegelung $q$ und Gleitspiegelung $l'$

Wenn man von den Translationen absieht, besteht die Gruppe der Decktransformationen bei 1 aus $E$ allein, bei 2, 3 und 4 aus den Elementen $E$ und $X$, wobei $X = A$, $q$ oder $l$ sein kann und für die Verknüpfung die Tafel

$$\begin{array}{ccc} & E & X \\ E & E & X \\ X & X & E \end{array}$$

gilt $\left( \text{abgekürzt geschrieben: } \begin{array}{c} EX \\ XE \end{array} \right)$.

Die Decktransformationen von 5 bestehen aus den Elementen $E$, $A$, $q$ und $l$ mit der abgekürzten Verknüpfungstafel

$$\begin{array}{cccc} E & A & q & l \\ A & E & l & q \\ q & l & E & A \\ l & q & A & E \end{array}$$

die, wie ersichtlich, in Teile zerfällt, welche je die gleiche Struktur aufweisen wie die vorhergehende Tafel. Dies bedeutet eine innere Verwandtschaft, für die man ebenfalls das Wort Symmetrie benutzen kann. Diese Gruppe heißt Vierergruppe.

Wenn man einen zweiseitigen Streifen betrachtet, entweder indem man ein durchsichtiges Papier vorn und hinten bemalt oder indem man Bandüberdeckungen berücksichtigt, so kommen neben $E$, $A$, $q$ und $l$ noch Drehungen $Q$ um eine Querachse, Drehungen $L$ um eine Längsachse, Zentralsymmetrie $s$ und Spiegelungen $h$ an der Streifenebene dazu. Die volle Gruppe wird durch folgende Tafel wieder gegeben:

$$\begin{array}{cccccccc} E & A & Q & L & s & h & l & q \\ A & E & L & Q & h & s & q & l \\ Q & L & E & A & l & q & s & h \\ L & Q & A & E & q & l & h & s \\ s & h & l & q & E & A & Q & L \\ h & s & q & l & A & E & L & Q \\ l & q & s & h & Q & L & E & A \\ q & l & h & s & L & Q & A & E \end{array}$$

Auch diese Gruppe besitzt, wie ersichtlich, innere Symmetrien, sie enthält z.B. die Vierergruppe als Untergruppe.

Wenn man von den Gleitspiegelungen und den Schraubungen absieht, gibt es im ganzen 16 Symmetrietypen für den zweiseitigen Streifen.

Nämlich: eine Gruppe vom Typus $E$, sieben vom Typus $\begin{matrix} E & X \\ X & E \end{matrix}$ mit $X = A$, $Q$, $L$, $s$, $h$, $l$ oder $q$ (Abb. 2, Seite 16), weitere sieben vom Typus der Vierergruppe

$$\begin{matrix} E & X & Y & Z \\ X & E & Z & Y \\ Y & Z & E & X \\ Z & Y & X & E \end{matrix}$$

wobei für $(X, Y)$ die Elementenpaare $(A, L)$, $(A, l)$, $(A, h)$, $(A, l)$, $(Q, l)$, $(L, q)$ oder $(L, h)$ stehen können (Abb. 3a und 3b, Seiten 17 und 18), und endlich die volle Symmetriegruppe mit $A$, $L$ und $h$ als erzeugende Elemente (Abb. 4, Seite 18).

Berücksichtigt man auch die Gleitspiegelung und die Schraubungen, so erscheinen die Gruppen, welche $L$, $h$ oder $l$ enthalten, in doppelter Zahl und diejenigen mit $L$ und $h$ in vierfacher Anzahl, das gibt zusammen 31 verschiedene Symmetrien für den zweiseitigen Streifen.

Zur Übersicht sei angeführt, daß es für

| | Klassen | Gruppen |
|---|---|---|
| Ornamente auf einer Geraden .... | 2 | 2 |
| einseitige Streifenornamente ..... | 5 | 7 |
| einseitige Flächenornamente ..... | 10 | 17 |
| zweiseitige Streifenornamente .... | 16 | 31 |
| zweiseitige Flächenornamente..... | 27 | 80 |
| im dreidimensionalen Raum ..... | 32 | 230 |

gibt.

Schneckenhäuser, Blattrispen, Tannzapfen usw. sind auch symmetrische Gebilde, deren Deckoperationen zu den bisherigen noch Streckungen enthalten. Gleich wie bei den Translationen muß man auch bei den Drehstreckungen von den in der Wirklichkeit notwendigen Begrenzungen der Gebilde absehen.

Ähnlich wie die Gruppentheorie eine Ordnung unter den vielen möglichen Ornamenten erzeugt, hat sie in mannigfaltiger Weise ordnende Funktion in der ganzen Naturwissenschaft; ich nenne nur: Spektralordnung, Kristallstrukturlehre, Blüten- und Blattordnungen usw.

Im Anschluß an die mächtigen Erfolge des Newtonschen Gravitationsgesetzes hat man im Anfang des letzten Jahrhunderts die Wirkungen des Magnetismus und der elektrischen Ladungen mit einem ähnlich gebauten Gesetz, dem Coulombschen Gesetz, dargestellt und verstehen wollen. Dabei erhielt man für entsprechende magnetische und elektrische Größen die gleiche geometrische Struktur. Die großartige Theorie von Maxwell, die nun bald hundert Jahre alt ist, hat wohl die Elektrodynamik auf eine ganz neue Grundlage gestellt. Aber erst E. Mach hat darauf aufmerksam gemacht, daß das Magnetfeld nicht die gleiche geometrische Struktur aufweisen kann wie das elektrische Feld. Es gibt viele Möglichkeiten, diesen Sachverhalt einzusehen. Wir benutzen dazu die Vorstellung einer ebenen, polarisierten, elektromagne-

tischen Welle (Licht- oder Radiowelle). Diese besteht aus einem elektrischen Feld $E$ und einem dazu senkrechten magnetischen Vektor $B$. Wir benutzen ein räumliches, rechtsorientiertes Koordinatensystem und richten es so ein, daß $E$ in der Richtung der $y$-Achse, $B$ in Richtung der $z$-Achse zu liegen kommt. Die Gesetze der Physik oder entsprechende Experimente sagen dann, daß die Welle in Richtung der positiven $x$-Achse fortschreitet. Wird die Welle an einem Spiegel, der normal zur $x$-Achse steht, reflektiert, so breitet sich die Welle nachher in Richtung der negativen $x$ aus. Soll die gegenseitige Orientierung der Felder $E$ und $B$ sowie die Ausbreitungsrichtung wieder dieselbe sein wie vorher, so müssen sich notwendigerweise $E$ und $B$ verschiedenartig spiegeln. Dadurch wird die früher ohne zureichende Gründe angenommene Gleichheit der geometrischen Strukturen von $E$ und $B$ widerlegt. Die Symmetrie, welche heute die Elektrodynamik beherrscht, ist etwas verborgenerer Art, als man sich das vor hundertfünfzig Jahren vorstellte, sie ist dafür auch umfassender. Magnetische Felder und Wirkungen haben immer eine Beziehung zu bewegten Ladungen oder bewegten elektrischen Feldern; sie können merkwürdigerweise nicht im zweidimensionalen Raum beschrieben werden. Es braucht dazu mindestens drei Dimensionen. Falls man eine zweckmäßige Darstellung der gesamten elektrodynamischen Vorgänge geben will, ist die vierdimensionale Raum-Zeit-Welt notwendig. In dieser werden die elektrischen und magnetischen Felder zu einem neuen Gebilde, dem elektromagnetischen Feldtensor, zusammengefaßt. Erst in dieser Darstellung kommen die physikalisch bedeutsamen Symmetrien der verschiedenen Felder und Größen sinnfällig und der physikalischen Wirklichkeit angemessen zur Geltung. Diese veränderte Auffassung der Elektrodynamik ist die Grundlage einer Symmetrisierung aller räumlich-zeitlichen Vorgänge und bedeutet auch eine Neuorientierung in erkenntnistheoretischer Richtung, so wie es uns die Relativitätstheorie lehrt. Dieses Beispiel zeigt, wie mächtig Symmetrieüberlegungen, d.h. gruppentheoretische Gesichtspunkte, sein können. Ähnliche Beispiele ließen sich aus dem Gebiete der gesamten Physik vorlegen. Weyl hat in seinem wunderschönen Buch über Symmetrie[1] denn auch die Behauptung aufgestellt, daß alle Apriori-Aussagen in der Physik ihren Ursprung in der Symmetrie haben.

Wenn wir das Wort Symmetrie benutzen, denken wir selten an ein Gebiet, in dem es in seiner allgemeinsten Bedeutung gebraucht werden dürfte, die Musik. Ich möchte mich nicht anheischig machen, eine Theorie über musikalische Kunstwerke zu entwickeln. Jedoch gestatten Sie mir, verehrte Zuhörer, Sie auf einige einfache musikalische Phänomen aufmerksam zu machen. Jedermann, auch derjenige, der von sich behauptet, er sei vollständig unmusikalisch, kann beim Anhören eines musikalischen Werkes Motive unterscheiden und feststellen, wie diese wiederholt und abgewandelt, immer wieder erscheinen. Es handelt sich hier offensichtlich um Deckoperationen in zeitlicher Folge. Genau wie beim Betrachten

[1] Weyl: Symmetrie, Birkhäuser (1955), S. 126.

eines geometrischen Ornamentes können wir stets wieder etwas Bekanntes erkennen und, was wesentlich ist, zum voraus seinen Verlauf ahnen. Natürlich beschränkt sich die Musik nicht auf diese Deckoperation, sondern enthält eine Fülle innerer Beziehungen, die durch die Harmonik, den Kontrapunkt, die Klangfarbe der Instrumente, die Dynamik und anderes mehr vermittelt werden. Das Bild von Lohse in «Kunst- und Naturform»[2] gibt Ihnen eine Ahnung, was ich damit meine. Das Band enthält keine Symmetrien, wie wir sie bei den Bandornamenten gesehen haben, und doch dürften Sie unschwer Form- und Farbbeziehungen finden, die das Band zu einem wohlklingenden Gebilde machen, das durchaus als optische Darstellung einer musikalischen Durchführung gelten darf. Sicher machen innere Beziehungen allein noch kein Kunstwerk aus, anderseits kann aber kein Kunstwerk ohne solche Beziehungen leben.

Es ist bekannt, daß Bach auf die Struktur in seinen Werken größten Wert gelegt hat. So weist der Zürcher Künstler und Musikpädagoge W. Frey darauf hin, daß in Bachs Werken oft einfache Zahlbeziehungen auftreten, die nicht zufällig entstanden sein können, sondern von Bach bewußt eingearbeitet wurden. Dieses Zahlengerüst ist für die meisten Hörer unerkennbar, und wir mögen es als eine barocke Schrulle betrachten; für Bach jedoch war dieses Gerüst etwas Ernstes und ist mit einer Verzierung zu vergleichen, wie sie mittelalterliche Künstler oft an Orten anbrachten, die kaum je ein Mensch zu Gesicht bekommt; diese Verzierungen sind da, allein zur Ehre Gottes. Daneben gibt es Beziehungen zwischen Themen, Harmonien, Tonleitern usw., die für den Hörer erkennbar und künstlerisch bedeutsam sind und die Struktur des musikalischen Werkes wesentlich bestimmen.

Sie werden in einigen Minuten das Werk hören, das Bach der Welt als Vermächtnis hinterlassen hat. Der geniale, jungvollendete W. Graeser hat bekanntlich die durcheinandergeratenen und ungeordnet überlieferten Teile der «Kunst der Fuge» nach innern Symmetrien geordnet und ihnen damit wieder Gestalt und Form gegeben, eine Form, die trotz neuern Versuchen immer noch überzeugt[3]. Ich hoffe, daß etwas von der innern Struktur dieses Werkes Wirklichkeit werde und Ihnen eine Ahnung geben wird von dem ungeheuren Reichtum, der in diesen Fugen eingefangen ist.

Meine Damen und Herren, ich komme zum Schluß. Obwohl durch meine Ausführungen das Thema «Symmetrie und Form» weder aktuell wurde noch erschöpfend zur Geltung kam, hoffe ich doch, Ihnen gezeigt zu haben, wie wesentlich die Symmetrie dazu beiträgt, unser Verständnis für die Werke der Natur und der Kunst zu vergrößern und zu vertiefen; daß es sich trotz allem lohnt, Symmetrien zu untersuchen, die den Formen der Dinge erst eine faßbare Gestalt geben und ohne die unsere Welt einem Chaos gleichen würde.

[2] Schmidt u. Schenk: Kunst- u. Naturform, Basilius-Presse, Basel (1960), S. 77.
[3] Bach-Jahrbuch, Breitkopf & Härtel (1924), S. 1–104.

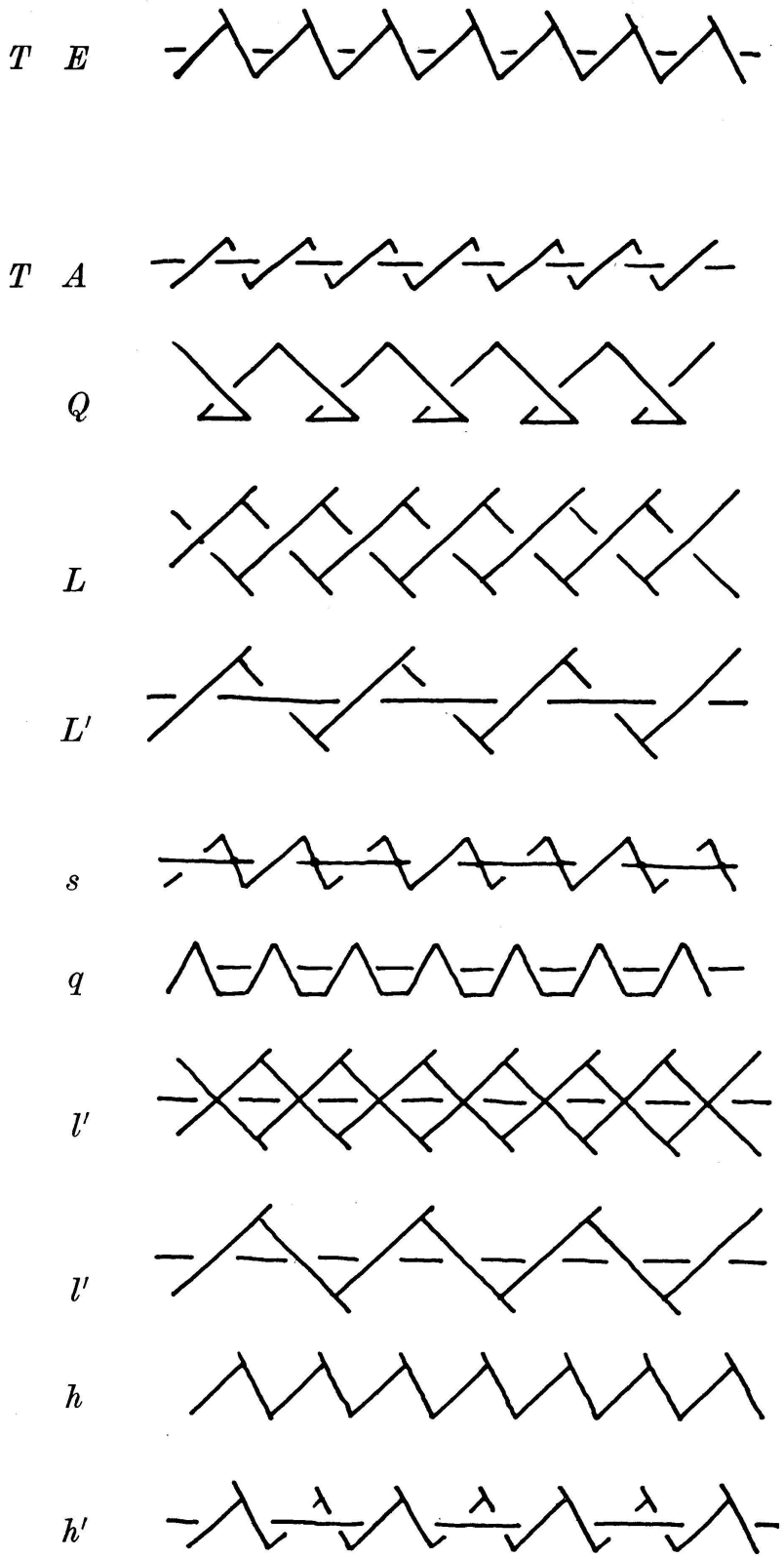



Abbildung 2

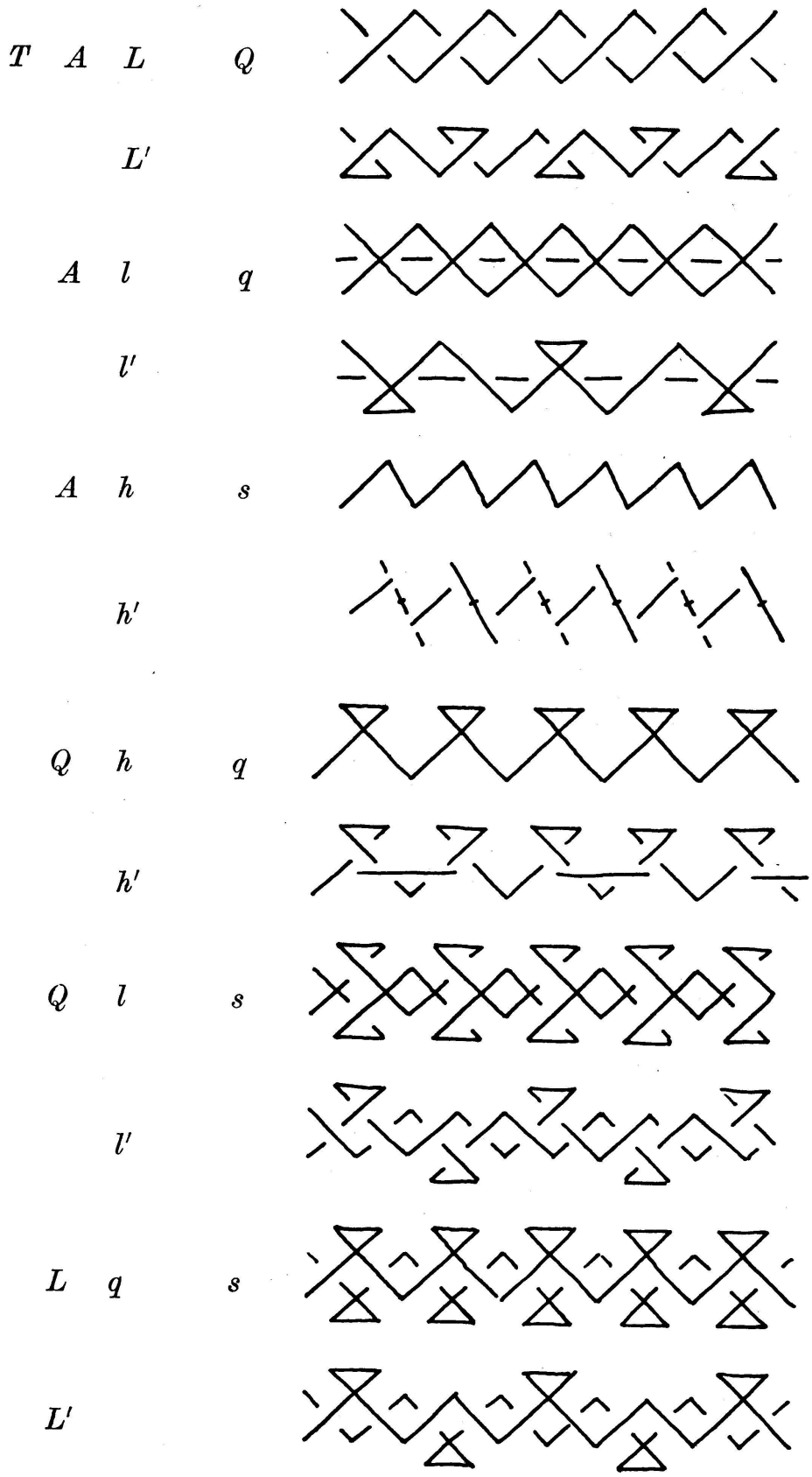



Abbildung 3a

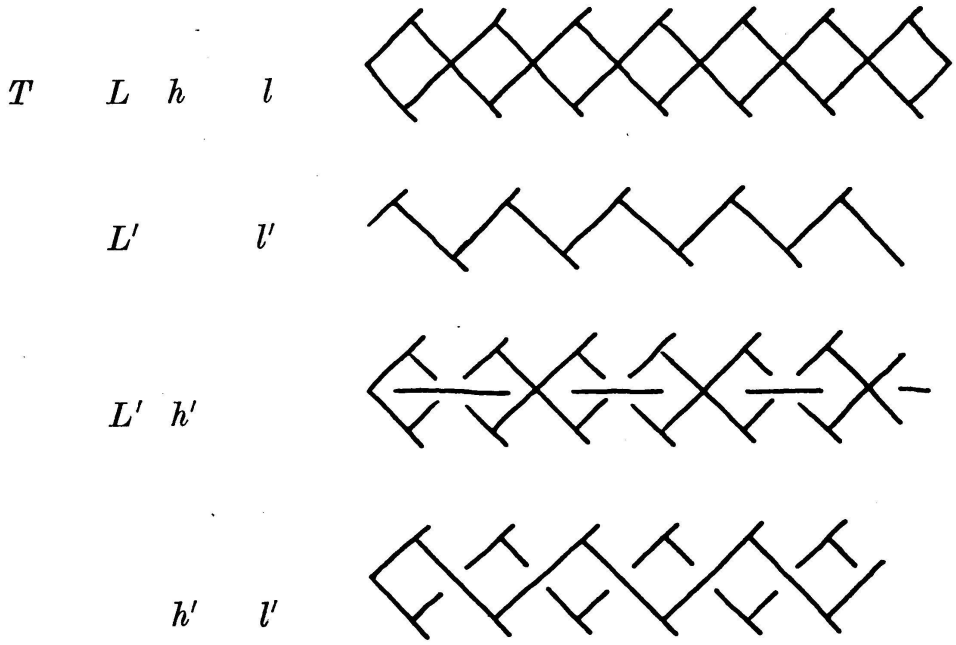



Abbildung 3b

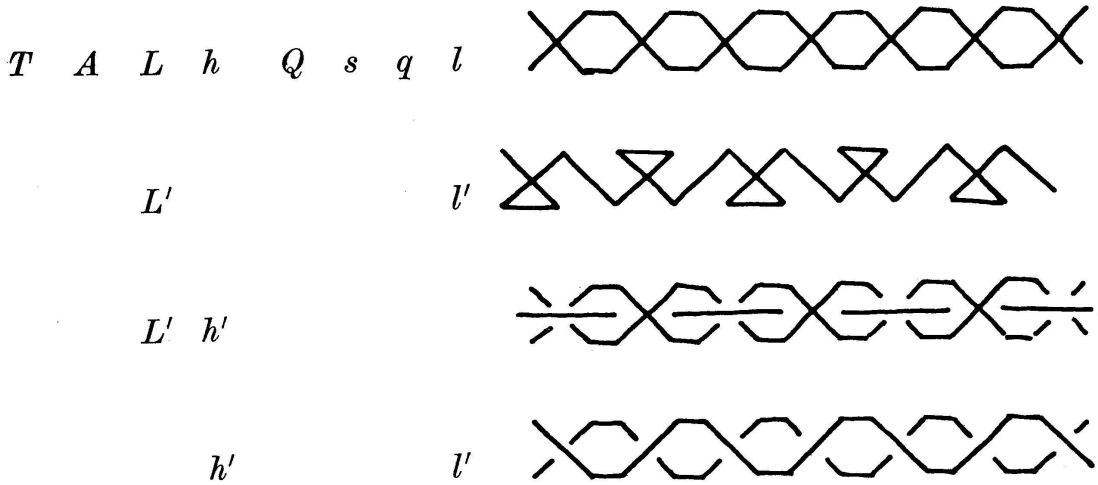



Abbildung 4

# Die Symmetrien in den Naturgesetzen

Prof. Dr. J. M. Jauch (Genf)

Der Begriff der Symmetrie, alt und ehrwürdig wie er ist, hat nicht immer dieselbe Bedeutung gehabt. Heute bezeichnen wir mit Symmetrie vornehmlich einen exakten mathematischen Begriff, der uns in diesem Vortrag fast ausschließlich beschäftigen wird und der sich in den exakten Naturwissenschaften als äußerst wichtig und fruchtbar erwiesen hat. Wir finden aber etwas von dem andern Sinn des Wortes wieder, wenn wir versuchen, das Fremdwort «Symmetrie» ins Deutsche zu übertragen. Man hat für eine solche Übersetzung das Wort «Ebenmaß» vorgeschlagen. Es ist wohl kein Zweifel, daß Ebenmaß und Symmetrie nicht genau dasselbe bedeuten. Wir sprechen einem Kunstwerk Ebenmaß zu, wenn es uns in harmonischer Ausgeglichenheit erscheint. Aber Symmetrie mit seiner harschen Präzision ist etwas, das dem lebendigen Kunstwerk fremd ist. Symmetrie in der Kunst führt zum reinen Formalismus, bestensfalls zur Dekoration.

In diesem Doppelsinn des Wortes erkennen wir etwas von dem Urboden, aus dem der Begriff gewachsen ist. Wir finden ihn mit dieser Doppelbedeutung zum Beispiel bei den Pythagoräern, wo sich in der entzückten Betrachtung der Harmonien des Kosmos die höchste Stufe menschlicher Vollkommenheit äußert, wo sich aber gleichzeitig diese Harmonien in Zahlen und Formen dargestellt finden. Für einen reinen Mathematiker heutiger Prägung wäre die Entdeckung der Irrationalzahlen ein großer Erfolg gewesen, für den Pythagoräer dagegen war es eine Katastrophe, weil sie dem Glauben an die innere Harmonie der Welt das Fundament entriß. Wenn wir die Schriften der antiken Gelehrten lesen, so sind wir erstaunt, wie oft zur Rechtfertigung einer bestimmten Vorstellung über die physikalische Welt ihre Vollkommenheit herangezogen wurde. So lehrt uns Aristoteles zum Beispiel, daß nur die Kreisbewegung mit ihrer vollkommenen Symmetrie für die ewige Bewegung der Himmelskörper in Frage kommen könne, eine Lehre, die durch Ptolemäus weiter entwickelt wurde und die für anderthalb Jahrtausende den Fortschritt in der Astronomie durch ihren dogmatischen Charakter aufgehalten hat.

Die Priorität der Symmetrie als ein ästhetisches Prinzip in der Naturerkenntnis ist beim antiken Menschen ein tiefverwurzeltes Vorurteil. Erst nach der Befreiung von diesem Vorurteil waren diejenigen Fortschritte möglich, welche zur modernen Naturerkenntnis geführt haben.

Doch will ich hier nicht lange bei der historischen Entwicklung des Begriffes der Symmetrie in der Naturerkenntnis verweilen. Nur ganz kurz möchte ich auf einige Höhepunkte dieser Entwicklung hinweisen: Wie sich unter dem verwegenen Blick des mit dem neuerfundenen Teleskop ausgerüsteten Galilei die kristallklaren Sphären des Kosmos in korruptible Materie auflöst; wie Keplers Ellipsen der Vorherrschaft der Kreisbahnen, die noch bei Kopernikus und bei Galilei besteht, den Rang abstreiten; wie sich langsam die Erkenntnis einer ganz neuen Art Symmetrie in der Naturerkenntnis durchsetzt, welche zur Grundlage der modernen Naturerkenntnis geworden ist: der Weltraum ist homogen. Die Naturgesetze auf dem Mond, den Planeten, der Sonne und überall sind identisch. Das Gesetz, mit dem der Apfel vom Baume fällt, ist genau dasselbe wie das Gesetz, das den Mond und die Planeten auf ihren Bahnen hält. Die neugefundene Symmetrie ist selbst ihrem Entdecker Newton schwer gefallen. Aus dem berühmten Briefwechsel von Leibniz mit Clarke wissen wir, daß erst Leibniz den Sinn dieser Symmetrie erkannt hat und daß wir von ihm die erste Formulierung des Relativitätsprinzipes haben.

Die mathematisch präzise Formulierung des Symmetriebegriffes war dem Mathematiker Galois vorbehalten, der gezeigt hatte, daß der mathematische Sinn genau identisch ist mit dem der Gruppe von Transformationen, welche eine gewisse Eigenschaft invariant lassen. Eine Symmetrie im abstrakten Sinn ist erschöpfend charakterisiert durch die Struktur einer solchen Gruppe. Was die invariante Eigenschaft selbst ist und was durch die Transformationen transformiert wird, bleibt dabei unwesentlich. Eine Symmetrie kann sich also zum Beispiel in einer geometrischen Figur, einem Naturgesetz, einer algebraischen Gleichung oder in einem Kristall äußern. Wir sprechen von einer Gruppe von Automorphismen. Die Automorphismen einer ebenen geometrischen Figur sind diejenigen euklidischen Bewegungen der Ebene, welche diese Figur mit sich selbst zur Deckung bringen. Die Automorphismen eines Naturgesetzes sind diejenigen Transformationen der physikalischen Größen, welche dieses Gesetz unverändert lassen.

In dieser abstrakten Form, die wir von Galois gelernt haben, ist der Begriff der Symmetrie in die moderne Physik eingedrungen, und er spielt dort eine außerordentlich wichtige Rolle. Aber nicht nur in der Physik, sondern auch die moderne Mathematik ist ohne diesen Begriff undenkbar. So ist zum Beispiel das sogenannte Erlanger Programm von Felix Klein nichts anderes als eine Klassifikation der verschiedenen Geometrien nach ihren Automorphismengruppen. Die euklidische Geometrie ist die Invariantentheorie der orthogonalen Transformationen, die projektive Geometrie diejenige der projektiven Transformationen, die Topologie diejenige der kontinuierlichen Transformationen.

Doch gehen wir jetzt über zum Hauptpunkt unserer Betrachtungen: die Symmetrie in den Naturgesetzen. Zunächst eine Vorbemerkung, welche die zentrale Stellung des Symmetriebegriffes in der Naturerkennt-

nis eindrücklich beleuchtet. *Jedes Naturgesetz ist überhaupt schon eine Symmetrie.* Um dies zu erläutern, fragen wir uns, was wir eigentlich unter einem Naturgesetz verstehen. Ohne auf philosophisch-technische Finessen einzugehen, können wir mit einer für unsere Zwecke genügenden Präzision ein Naturgesetz etwa definieren als «eine unveränderliche Beziehung zwischen beobachtbaren physikalischen Größen».

Wenn ich also ein physikalisches Gesetz, zum Beispiel das Faradaysche Induktionsgesetz, hinschreibe

$$\nabla \times E = -\dot{B}$$

so drückt dieses Gesetz eine unveränderliche Beziehung aus zwischen dem elektrischen Feld $E$ und der magnetischen Induktion $B$. Ganz wesentlich ist dabei, daß diese Relation zu allen Zeiten dieselbe ist. Wir würden nicht von einem Gesetz sprechen, wenn diese Relation nur an einem einzigen Zeitpunkt erfüllt wäre, für einen andern Zeitpunkt aber ganz anders lauten würde.

Auf der Unveränderlichkeit des Naturgesetzes beruht ja gerade seine Verifizierbarkeit und die Möglichkeit, es mitzuteilen und zu erlernen. Reichenbach erwähnte einmal, daß bei der Vorführung eines Filmes, worin ein Felsen gesprengt wird, gerade in dem Augenblick ein Erdbeben erfolgte und die Zuschauer daher eine Erschütterung verspürten, als der Schuß abging. Es ist klar, daß diese Beziehung zwischen zwei Naturereignissen kein Naturgesetz darstellt. Es fehlt die Invarianzeigenschaft. Als der Film ein zweitesmal gespielt wurde, trat das Erdbeben nicht mehr ein. Wir sprechen dann von einem Zufall.

Ein Naturgesetz ist kein Zufall. Die Beziehung zwischen gewissen beobachtbaren Eigenschaften tritt immer und mit Notwendigkeit ein.

Die Transformationen, mit denen wir hier zu tun haben, sind die Translationen in der Zeit. Die invariante Eigenschaft ist die besondere Relation, welche zwischen den beobachtbaren Größen ausgedrückt wird. Die Naturgesetze sind also alle diejenigen Beziehungen zwischen den beobachtbaren Größen, welche unter der Translation der Zeit invariant sind.

Mit der Invarianz unter der Zeittranslation ist aber die Symmetrie des Naturgesetzes im allgemeinen nicht erschöpft. Es ist zum Beispiel klar, daß die Gleichung in den USA genau so richtig ist wie in Rußland. An einem internationalen Physikerkongreß verstehen sich die Russen mit den Amerikanern sehr gut, solange sie nur über Physik reden. Wir haben also auch eine Invarianz des Naturgesetzes gegenüber Translationen des Raumes. Das ist es, was wir als die Homogenität des Raumes bezeichnen. Ebenso finden wir, daß die Naturgesetze im allgemeinen keine Richtung des Raumes auszeichnen. Wir sprechen von Isotropie des Raumes.

Diese Symmetrieeigenschaften lassen sich durch gewisse Erhaltungssätze nachweisen. So zum Beispiel entspricht der Invarianz unter der Zeittranslation der Satz von der Erhaltung der Energie, dem der Raum-

translation die Erhaltung des Impulses, und endlich die Isotropie drückt sich durch den Satz von der Erhaltung des Drehimpulses aus. Wir sehen hier, wie tief diese Erhaltungssätze mit dem Wesen des Naturgesetzes verbunden sind. Es gibt keine Möglichkeit, diese Erhaltungssätze zu verwerfen, ohne überhaupt die Existenz des Naturgesetzes in Frage zu stellen. Dieser Zusammenhang zwischen Symmetrie und Erhaltungssatz bleibt auch in der Quantenmechanik bestehen.

Doch kehren wir zu den Symmetrien der klassischen Physik zurück. Schon Newton und Leibniz war es bekannt, daß die Gesetze der Mechanik noch weitere Symmetrien aufweisen. So zum Beispiel läßt sich eine gleichförmige Translation aus den Bewegungsgleichungen nicht erkennen. Mathematisch gesprochen: die Transformation

$$x \to x' = x + v\,t \qquad \text{mit } v \text{ konstant}$$

läßt die Newtonschen Bewegungsgleichungen

$$F = m\ddot{x}$$

invariant. Allerdings hat sich später gezeigt, daß diese sogenannten Galilei-Transformationen nur eine erste Annäherung an die richtigen Symmetrietransformationen, die sogenannten Lorentz-Transformationen, sind. Die allgemeine Invarianz der Naturgesetze gegenüber Lorentz-Transformationen wurde von Einstein zu einem Prinzip erhoben, das den Grundstein der speziellen Relativitätstheorie bildet und das zu einer großartigen Synthese von Elektrizität und Mechanik geführt hat und das damit die klassische Physik zum Abschluß brachte.

Nun zeigt sich aber weiter, daß die Gesetze der klassischen Physik sogar invariant sind unter den Spiegelungen des Raumes und unter der Transformation der Zeitumkehr.

Die zwei letztgenannten Symmetrien sind besonders beachtenswert. Versuchen wir uns einmal zu vergegenwärtigen, was sie bedeuten: Die Spiegelungssymmetrie betrifft die Unterscheidung zwischen rechts und links. Es gibt in der klassischen Mechanik keine Möglichkeit, die zwei Orientierungen des Raumes voneinander zu unterscheiden. Die Definition von links und rechts ist eine bloße Konvention, genau so willkürlich wie zum Beispiel die Wahl eines Koordinatensystems oder der Name eines Elementarteilchens. Daß in der klassischen Physik diese Symmetrie besteht, ist um so erstaunlicher, als nämlich in der organischen Welt diese Symmetrie nicht vollständig ausgenützt ist. Es ist zum Beispiel bekannt, daß der Zucker in zwei spiegelbildlich orientierten Formen auftritt, die chemisch völlig gleichwertig sind. Der lebende Körper benutzt aber nur eine dieser zwei Formen und kann die andere nicht verarbeiten. Ähnlich steht es mit den Schneckenhäusern. Die meisten sind Spiralen in einem und demselben Drehsinn. Nur ganz selten gibt es eine Abart, welche ihr Haus im umgekehrten Sinne baut. Der menschliche Körper selbst hat zwar im großen und ganzen eine Spiegelsymmetrie, die aber nicht konsequent durchgeführt ist. Das Herz ist

bekanntlich auf der linken Seite, und auch die Nervenbahnen sind im allgemeinen nicht genau spiegelsymmetrisch entwickelt, wie zum Beispiel das Phänomen der Links- und Rechtshändigkeit beweist.

Ich mache hier auf diesen Unterschied zwischen den unorganischen und der organischen Welt aufmerksam, weil es wichtig ist zu bemerken, daß die mangelnde Symmetrie der Lebewesen nicht auf eine mangelnde Symmetrie der Naturgesetze zurückzuführen ist. Wir beobachten hier ein Phänomen, das uns oft begegnet: Die Symmetrie der Naturgesetze selbst ist zu unterscheiden von der Symmetrie, welche von den Objekten realisiert werden, welche diese Naturgesetze befolgen. Zum Beispiel daß es Rechts- und Linksquarz gibt bedeutet nicht, daß jeder Quarzkristall ein Zwilling ist. Die physikalischen Objekte sind nämlich das Produkt von den Naturgesetzen und von den Anfangsbedingungen. Die Naturgesetze sind symmetrisch, aber die Anfangsbedingungen nicht notwendigerweise.

Dieser Unterschied wird besonders deutlich, wenn wir uns die Symmetrie der Zeitumkehr vor Augen führen. In der klassischen Mechanik war diese Symmetrie Newton schon bekannt. Sie zeigt sich zum Beispiel darin, daß es zu jeder vorgegebenen Planetenbahn genau zwei Bewegungen gibt, welche Lösungen der Bewegungsgleichungen sind und welche durch die Zeitumkehr ineinander transformiert werden.

In der Hamiltonschen Form der allgemeinen mechanischen Systeme drückt sich die Symmetrie der Zeitumkehr ganz einfach aus: Wenn $q(t)$ und $p(t)$ eine Lösung ist, dann ist

$$q'(t) = q(-t)$$

$$p'(t) = -p(-t)$$

auch eine Lösung. Alle bekannten mechanischen Systeme erfüllen diese Bedingung. Es ist ganz leicht, mathematisch Systeme zu konstruieren, welche diese Bedingung nicht erfüllen. Sie kommen aber in der Natur nicht vor. Das ist die Symmetrie der Zeitumkehr.

Sie sehen, es ist mit der Symmetrie der Zeitumkehr nicht wesentlich anders als mit der Symmetrie der Spiegelung, und doch sträubt sich unser Gefühl dagegen. Gibt es in dieser Welt etwas Eindrucksvolleres, als daß die Zeit für uns abläuft, daß wir ein unvermeidliches Schicksal erfüllen. Wo spiegelt sich in den Naturgesetzen die Evolution ?

Es gibt in der ganzen Physik nur ein einziges Gesetz, das einen Unterschied zwischen der Vergangenheit und Zukunft macht. Das ist der berühmte zweite Hauptsatz der Thermodynamik. Dort wird zum Beispiel ausgesagt, daß die Wärme immer vom warmen zum kalten Körper fließt, und dieses Gesetz ist offenbar nicht invariant bei der Transformation der Zeitumkehr. Das Merkwürdige an diesem Gesetz ist, daß es weder fundamental noch allgemein richtig ist. Es ist erstens nicht fundamental in dem gleichen Sinne, wie zum Beispiel die klassische Mechanik fundamental ist, denn es läßt sich auf die Mechanik zurückführen. Es

ist also bloß eine logische Konsequenz eines anderen Gesetzes und gewisser statistischer Zusatzannahmen und sagt daher im wesentlichen nicht mehr aus, als was schon implizite in der Mechanik und diesen Annahmen enthalten ist.

Es ist aber auch nicht allgemein richtig, denn es ist genau betrachtet ein statistisches Gesetz, das bloß Aussagen macht über das mittlere Verhalten von Systemen, welche aus einer großen Zahl von Molekülen bestehen und von denen wir nur unvollständige Kenntnisse haben. Es gibt beobachtbare Abweichungen von diesem Gesetz, welche sich zum Beispiel in dem Phänomen der Brownschen Bewegung äußern.

Für das tatsächliche Verhalten makroskopischer Systeme sind zwar diese Abweichungen von geringer Bedeutung. Für das prinzipielle Verständnis der irreversiblen Prozesse in einer Natur, welche nur Gesetze hat, die bei der Zeitumkehr invariant sind, ist der statistische Charakter des zweiten Hauptsatzes aber ganz wesentlich. Denn nur weil der zweite Hauptsatz statistischer Natur ist, ist er in der Tat trotz seiner Irreversibilität mit der Zeitumkehrsymmetrie vereinbar.

Etwas extrem gesprochen könnte man sagen: Es gibt keine Irreversibilität in der Natur, es gibt nur statistische Schwankungen, die unter Umständen äußerst unwahrscheinlich sein können.

Wir sind heute sicher, daß diese Auffassung der Irreversibilität für die abgeschlossenen mechanischen Systeme richtig ist. Ob sich diese Auffassung auch auf das Verhalten der organischen Natur und den Kosmos als Ganzes übertragen läßt, bleibt noch offen.

Die Symmetrie der Zeitumkehr ist nicht etwa eine Erfindung der Physiker, um sich das Leben einfacher zu machen, sondern es ist ein durch viele Erfahrungen bewährtes Naturgesetz. Es ist in der klassischen sowie in der Quantenmechanik gültig.

Ich will hier einige dieser Tatsachen erwähnen, durch welche sich dieses Gesetz empirisch verifizieren läßt.

Als erstes Beispiel erwähne ich die sogenannten Onsager-Relationen. Wenn ein thermodynamisches System durch äußere Einflüsse aus dem Gleichgewicht gebracht wird, so sucht es dieses Gleichgewicht wieder zu erreichen, indem die thermodynamischen Variablen eine zeitliche Veränderung aufweisen.

Zum Beispiel ein Stab kann durch Zufuhr oder Abfuhr von Wärme unter einem konstanten Temperaturgradienten gehalten werden, es fließt dann ein konstanter Strom von Wärme vom wärmern zum kältern Ende. Nun gibt es die Möglichkeit, daß zwei oder mehrere solche äußern Kräfte gleichzeitig auftreten können, und dementsprechend kann es zwei oder mehrere thermodynamische Variablen geben, welche sich unter dem Einfluß der äußeren Bedingungen verändern können. Wenn wir diese Varablen mit $\alpha_1, \ldots, \alpha_n$ bezeichnen, zum Beispiel so gewählt, daß $\alpha_1 = \ldots = \alpha_n = 0$ den Gleichgewichtszustand bezeichnet, dann ist die Entropie eine gewisse Funktion $S(\alpha_1, \ldots, \alpha_n)$ dieser Variablen. Zu jedem

Wert der Variablen gehören gewisse äußere Kräfte $X_i$, welche man folgendermaßen definieren kann

$$X_i = \frac{\partial S}{\partial a_i} \, (i = 1, \ldots, n)$$

Diese äußern Kräfte bewirken eine zeitliche Veränderung der Variablen $a_i$ und in der Nachbarschaft des Gleichgewichtes wird diese zeitliche Veränderung eine lineare Funktion der Kräfte:

$$\frac{da_i}{dt} = \sum_k L_{ik} X_k$$

Onsager hat nun die wichtige Entdeckung gemacht, daß die Koeffizienten $L_{ik}$ nicht von einander unabhängig sein können, wenn die Symmetrie der Zeitumkehr besteht. Sie erfüllen die sehr einfache Beziehung

$$L_{ik} = L_{ki}$$

Das sind die berühmten Onsager-Relationen, welche man auf viele verschiedene Arten experimentell nachweisen kann.

Als ein zweites Beispiel nenne ich die sogenannte Kramers-Verdoppelung. Es handelt sich um folgendes Phänomen: Wenn man ein Ion mit einer ungeraden Anzahl von Elektronen in ein äußeres elektrisches Feld bringt, so spalten sich die möglichen Zustände in verschiedene Energieniveaus auf. Kramers hat gezeigt, daß wegen der Symmetrie der Zeitumkehr diese Aufspaltung nie vollständig sein kann. Jedes Niveau muß mindestens aus zwei (oder einer geraden Anzahl) von Zuständen bestehen. Dieses Phänomen läßt sich experimentell sehr schön nachweisen, indem man die Ionen in ein Kristallgitter mit starken elektrischen Feldern einbettet und die Aufspaltungen durch die paramagnetische Resonanz mißt.

Eine dritte Möglichkeit, die Symmetrie der Zeitumkehr nachzuweisen, besteht auf dem Gesetz des sogenannten «detailed balancing». Wenn wir einen Streuprozeß betrachten, wobei zwei Teilchen $A$ und $B$ gestreut werden, die nach der Streuung in zwei neue Teilchen $C$, $D$ übergehen, so können wir den Streuprozeß auch immer in der umgekehrten Richtung betrachten, also entweder

$$A + B \rightarrow C + D \tag{1}$$

oder

$$C + D \rightarrow A + B \tag{2}$$

A priori ist nicht der geringste Grund vorhanden, weshalb die zwei Prozesse etwas miteinander zu tun haben sollten. Ganz anders aber, wenn die Symmetrie der Zeitumkehr zu Recht besteht. Dann sind die beiden Prozesse nicht unabhängig voneinander. Diese Abhängigkeit kann man folgendermaßen anschaulich ausdrücken. Man betrachte den Prozeß (2), lasse aber darin die Zeit rückwärts laufen. Es kommt dann ein

Prozeß vom Typus (1) zustande. Die zwei Streuvorgänge, welche durch diese Operation auseinander hervorgehen, treten immer mit gleicher Häufigkeit auf. Das ist das Prinzip des «detailed balancing».

Es gibt viele Möglichkeiten, dieses Prinzip nachzuweisen. Ich erwähne als Beispiel nur den Prozeß

$$\pi^+ + d = p + p$$

welcher in einem berühmten Experiment zur Bestimmung des Spins vom $\pi$-Meson benutzt worden war.

Diese drei Beispiele mögen genügen. Es gibt noch viele andere. Wir wollen aber nicht dabei verweilen. Wichtig ist für uns, daß die Symmetrie der Zeitumkehr der Naturgesetze eine empirisch gesicherte Tatsache ist, daß in dem reichen Erfahrungsmaterial der modernen Physik kein einziges Faktum bekannt ist, welches dieser Symmetrie widerspricht.

Die Symmetrien, welche ich bis jetzt betrachtet habe, sind alles solche, welche auf den Eigenschaften des Raum-Zeit-Kontinuums beruhen. Sie haben also sozusagen eine natürliche Ursache, die man als die «Strukturlosigkeit» dieses Kontinuums bezeichnen könnte. Die Unterscheidung verschiedener Punkte, Richtungen und Orientierungen in Raum und Zeit ist bloße Konvention und hat kein physikalisches Korrelat. Wenn die Symmetrien der fundamentalen Naturgesetze damit erschöpft wären, so könnte ich hier abbrechen. Dem ist aber nicht so. Es zeigt sich nämlich, daß es noch andere Symmetrien gibt, deren Existenz wir zwar empirisch feststellen können, für die wir aber keine so natürliche Erklärung haben wie diejenigen, welche mit dem Raum-Zeit-Kontinuum zusammenhängen.

Die Betrachtung dieser Symmetrien führt uns mitten in die aktuellsten Probleme der modernen Physik. Ich will hier im zweiten Teil meines Vortrages einige dieser Symmetrien erwähnen sowie einige der Spekulationen, welche sich daran knüpfen.

Als erstes Beispiel nenne ich die Symmetrien des gewöhnlichen Wasserstoffatoms. Als zentralsymmetrisches System haben wir natürlich eine Symmetrie, welche durch die dreiparametrige Gruppe der euklidischen Drehungen mit einem festen Zentrum dargestellt werden. Die Folge dieser Symmetrie ist ein Phänomen, welches wir in der Quantenmechanik als Entartung bezeichnen. Das bedeutet folgendes: In der Quantenmechanik eines Einelektronensystems zeigt man, daß der Zustand eines solchen Systems durch drei Quantenzahlen $n$, $l$, $m$ beschrieben wird. In allgemeinen Systemen ist die Energie des stationären Zustandes eine Funktion aller drei Zahlen. Wenn dagegen Rotationssymmetrie besteht, dann beweist man allgemein, daß die Energie von $m$ unabhängig sein muß. Daraus folgt, daß jeder Energiewert genau $2\,l + 1$ Zustände enthalten muß, und das nennen wir eine $2\,l + 1$-fache Entartung.

Diese Entartung ist nun beim Wasserstoffatom tatsächlich der Fall. Aber es ist nun merkwürdigerweise eine zusätzliche Entartung vorhanden, welche nur beim Wasserstoffatom auftritt und sonst bei keinem anderen

zentralsymmetrischen System. Die Energie hängt auch nicht von $l$ ab, ist also nur eine Funktion von $n$ allein, und jedes Energieniveau ist $n^2$-fach entartet (wir vernachlässigen hier den Spin des Elektrons, welcher die Entartung noch einmal verdoppelt).

Dieses merkwürdige Phänomen hat eine gewisse Ähnlichkeit mit der oben erwähnten Kramers-Verdoppelung, und genau wie in jenem Fall, so ist die Ursache dieser Entartung eine zusätzliche Symmetrie, welche in diesem Falle nichts mit der Raum-Zeit-Symmetrie zu tun hat. Diese zusätzliche Symmetrie ist nun vom russischen Physiker Fock tatsächlich entdeckt und von mir in meiner Dissertation weiter untersucht worden. Ich konnte zeigen, daß es noch mehrere andere Systeme gibt, wo solche unerwarteten zusätzlichen Symmetrien auftreten können.

Diese Beispiele zusätzlicher Symmetrien sind aber meines Erachtens nicht von fundamentaler Bedeutung. Sie drücken ganz spezielle Eigenschaften der Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Teilchen des Systems aus.

Viel tiefergehend ist eine Symmetrie, welche man als Ladungssymmetrie bezeichnet. Die Bedeutung dieser Symmetrie wird uns klarer, wenn wir uns die gegenwärtige Situation der Elementarteilchen rasch vor Augen führen. Man kennt heute etwa dreißig Elementarteilchen. Sie unterscheiden sich in der Masse, dem Spin, der Lebensdauer, dem Zerfallsschema und weiteren Eigenschaften, die man als Isotopenspin und Seltsamkeit bezeichnet. Dieser erstaunlichen Vielfalt steht eine ebenso erstaunliche Uniformität gegenüber bezüglich ihres Verhaltens im elektromagnetischen Feld. Die elektrische Ladung aller dieser Teilchen ist auf genau drei Werte beschränkt, nämlich $o$ und $\pm e$, wo $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ Coulomb, das elektrische Elementarquantum der Ladung ist.

Aber noch mehr: Zu jedem Teilchen mit der Ladung $+e$ gehört ein Partner mit der Ladung $-e$ und umgekehrt. Die Vertauschung dieser Partner nennen wir die Ladungskonjugation, und die Ladungssymmetrie sagt aus, daß diese Vertauschung eine Symmetrietransformation ist. Das heißt also, die Naturgesetze sind gegenüber dieser Vertauschung invariant.

Diese Symmetrie ist deshalb nicht trivial, weil die uns bekannte Welt die Ladungsträger durchaus nicht symmetrisch enthält. So ist zum Beispiel in den Atomen und Molekülen die positive Ladung immer an die schweren Atomkerne gebunden, während die negative Ladung immer an den viel leichtern Elektronen auftritt. Also von Ladungssymmetrie ist da keine Rede. Das Prinzip dieser Symmetrie sagt aber aus, daß es neben dem negativen Elektron (das wir auch kürzer Negaton nennen) noch ein Gegenstück, ein Positon, geben muß, das sich in nichts vom Negaton als in seiner Ladung unterscheidet. Dieses von der Theorie vorausgesagte Teilchen existiert in der Tat und ist in den dreißiger Jahren von Anderson und Neddermeyer in den kosmischen Strahlen entdeckt worden. Ebenso muß es neben dem gewöhnlichen positiven

Proton das negative Antiproton geben, und auch dieses ist vor etwa sechs Jahren von Segré und Chamberlain entdeckt worden. Seither sind noch mehrere Antiteilchen entdeckt worden, und die erwähnte Symmetrie der Ladungskonjugation ist für ein großes Gebiet der Physik bestätigt.

Sie sehen, daß wir es hier mit der gleichen Situation zu tun haben wie mit den Symmetrien in den Lebewesen. Die tatsächlich bekannte physikalische Welt realisiert nicht die volle Symmetrie, welche in den Naturgesetzen selbst enthalten ist.

Das gibt Anlaß zur Frage, ob vielleicht andere Spiralnebel existieren, welche die andere ladungskonjugierte Hälfte der Welt realisieren. Wegen der Ladungssymmetrie ist diese Frage nicht leicht zu entscheiden, denn diese Symmetrie sagt ja eben aus, daß sich die zwei konjugierten Weltsysteme in keinem physikalischen Gesetz unterscheiden und deshalb physikalisch völlig gleich erscheinen. Erst wenn zwei konjugierte Weltsysteme miteinander in Zusammenstoß gerieten, würde sich eine Katastrophe von kosmischem Ausmaß ereignen, indem sie sich gegenseitig unter Verwandlung in Photonen und Neutrinos vernichten würden.

Die Ladungskonjugation ist nun allerdings nicht eine vollkommene Symmetrie. In jüngster Zeit ist, durch eine Betrachtung von Lee und Yang angeregt, diese Symmetrie einer experimentellen Prüfung unterzogen worden, und es hat sich dabei herausgestellt, daß bei den sogenannten schwachen Wechselwirkungen, welche zum Beispiel den radioaktiven Zerfalls des Neutrons vermitteln, diese Symmetrie in der Tat verletzt ist. In gleicher Weise ist bei denselben Wechselwirkungen die Spiegelsymmetrie verletzt, und nurmehr die Kombination dieser zwei Transformationen läßt die Wechselwirkung invariant. Diese wichtige Entdeckung kam als eine große Überraschung für viele, denn sowohl die Ladungskonjugation als auch die Spiegelsymmetrie haben sich in einem weiten Gebiet der Physik als Symmetrietransformation neu bewährt.

Dieses letzte Resultat muß im Zusammenhang mit einem von Schwinger und Lüders entdeckten Theorem betrachtet werden, welches unter dem Namen $TCP$-Theorem in die Literatur eingegangen ist. Die drei Buchstaben stehen für die drei Transformationen der Zeitumkehr ($T$), Ladungskonjugation ($C$) und Raumspiegelung ($P$). Das Theorem sagt aus, daß unter sehr allgemeinen Voraussetzungen (die ich hier nicht genauer charakterisieren kann) das Produkt dieser drei Transformationen immer eine Symmetrietransformation sein muß. Daraus folgert man zum Beispiel, daß aus der Symmetrie der Zeitumkehr ($T$) immer auch die Symmetrie bezüglich $CP$ folgt.

Zum Schluß dieses Vortrages will ich noch auf eine Klasse von Symmetrien hinweisen, welche von mir Supersymmetrien genannt werden. Diese Symmetrien gibt es nur in der Quantenmechanik. In der klassischen Mechanik hat es nichts Analoges. Ein Prototyp dieser Symmetrie ist in der Quantenmechanik schon längst bekannt. Er entspricht der

Symmetrie, welche die Identität der Elementarteilchen ausdrückt. In der Quantenmechanik ist diese Identität eine viel radikalere Aussage als in der klassischen Mechanik. Es heißt dort nämlich nichts weniger, als daß es im Prinzip unmöglich ist, zwei identische Elementarteilchen (z.B. zwei Elektronen) durch irgendeine Beobachtung voneinander zu unterscheiden.

In der klassischen Mechanik läßt sich eine solche Unterscheidung zwar etwas künstlich immer durch ein Gedankenexperiment durchführen. Man braucht bloß an einem beliebigen Zeitpunkt eine willkürliche Identifizierung der zwei Teilchen vorzunehmen und dann diese Identifizierung auf ihrer klassischen Bahn zu verfolgen. In der Quantenmechanik läßt sich eine solche Identifizierung auch angeben, sie läßt sich aber nicht in die Zukunft oder die Vergangenheit ausdehnen, da es in der Quantenmechanik keine stetigen Bahnkurven gibt, welche von den Teilchen durchlaufen werden. Es gibt statt dessen nur Wellenpakete, welche sich immer zum Teil etwas überlappen. Unter solchen Umständen weiß man nie, ob die zwei Teilchen nicht plötzlich ihre Rollen vertauscht haben. Sie lassen sich also prinzipiell nicht dauernd voneinander unterscheiden.

In einem quantenmechanischen System mit genau $n$ identischen Teilchen ist die Symmetriegruppe die Gruppe der Permutation der $n$ Teilchen. Sie besteht also aus $n!$ Elementen. Die Operationen der $n!$ Permutationen stellen Symmetrien dar, das heißt sie lassen das dynamische Gesetz des Systemes invariant. Nun haben diese Symmetrien aber noch eine besondere zusätzliche Eigenschaft, welche sie von den bis jetzt erwähnten gewöhnlichen Symmetrien unterscheidet. Die oben erwähnte prinzipielle Ununterscheidbarkeit heißt nämlich, daß auch jede observable Größe unter der Permutation der $n$ Teilchen invariant sein muß, denn nur auf diese Weise kommt die vollständige Identität der Teilchen zum Ausdruck. Ich nenne eine solche Symmetrie mit dieser zusätzlichen Eigenschaft eine Supersymmetrie. Das Studium der Supersymmetrien, welches ich mit meinem Mitarbeiter in Genf, Herrn Misra, durchgeführt habe, hat einige interessante Eigenschaften zutage gefördert, welche ich hier ganz kurz erwähnen möchte.

Wiederum wie beim $CPT$-Theorem von ganz allgemeinen Voraussetzungen ausgehend, konnten wir zeigen, daß die Supersymmetrien im Darstellungsraum der Zustandsvektoren eine abelsche, unitäre Gruppe sein müssen. Ferner läßt sich der Darstellungsraum auf eindeutige Weise in eine direkte Summe von Unterräumen aufspalten, derart daß in jedem dieser Unterräume die Observablen ein irreduzibles System von Operatoren bilden.

Wenn wir diese Resultate auf die Supersymmetrien der Vertauschung von $n$ identischen Teilchen anwenden, so ergibt sich sofort ein Resultat, welches man schon längst als empirische Tatsache kennt, das aber bis jetzt keine befriedigende Erklärung gefunden hat. Zunächst bemerkt man, daß die Gruppe der Permutationen von $n$ Objekten nur

für $n=1$ und $n=2$ abelsch ist. Unser Theorem bedeutet nun nicht etwa, daß es Systeme mit mehr als zwei identischen Teilchen nicht gibt – das wäre offensichtlich Unsinn –, sondern bloß, daß in der Quantenmechanik nur die abelschen Darstellungen dieser Symmetriegruppe auftreten können. Man hat also unter allen möglichen Darstellungen der Permutationsgruppe alle abelschen aufzusuchen. Zum Glück ist die Darstellungstheorie der endlichen Gruppen ein vollständig bekannter Zweig der modernen Algebra. Es gibt für jedes $n \geqq 2$ genau zwei abelsche Darstellungen der Permutationsgruppe. Bei der ersten, der symmetrischen, bleibt die Wellenfunktion unverändert, wenn man zwei Teilchen vertauscht, bei der zweiten wechselt sie das Vorzeichen.

Man kommt also hier zwangsläufig auf die beiden Fälle, welche man in der Physik als Einstein-Bose- beziehungsweise Fermi-Dirac-Statistik bezeichnet. Es gibt nur zwei Symmetrieklassen der identischen Teilchen. Diese Anwendung unseres Theorems ist von dem spanischen Mathematiker G. Tixaire zuerst angegeben worden.

Es hat nicht an Versuchen gefehlt, die Statistik solcher Teilchen zu verallgemeinern, entsprechend den nichtabelschen Darstellungen der Permutationsgruppe. Einer der neuesten dieser Versuche ist von Glaser und Fierz für eine mögliche Erklärung des $\mu$-Mesons in Betracht gezogen worden. Nach dem obigen Theorem verstehen wir jetzt besser, wieso alle diese Ansätze nicht gelungen sind.

Ich möchte noch hinzufügen, daß nach dem obenerwähnten Theorem nur die symmetrische oder antisymmetrische Darstellung auftreten kann. Das Theorem sagt aber nichts darüber aus, welche der beiden möglichen Darstellungen für eine gegebene Teilchensorte nun auch tatsächlich auftritt. Darüber gibt ein anderes Theorem Aufschluß, das von Pauli vor etwa zwanzig Jahren gefunden wurde. Dieses sagt aus, daß Teilchen mit halbzahligem Spin antisymmetrische, solche mit ganzzahligem Spin dagegen symmetrische Wellenfunktionen haben. Alle Elementarteilchen, welche man bis jetzt in der Natur gefunden hat, befolgen diese Gesetzmäßigkeiten.

Misra und ich haben noch auf weitere Anwendungen des obigen Theorems über Supersymmetrien hingewiesen, welche die Rolle der Eichtransformationen in der Quanten-Elektrodynamik aufklären. Ich möchte hier auf die etwas technischen Resultate nicht weiter eingehen. Es sei bloß festgehalten, daß der Begriff der Supersymmetrie in der Theorie der Elementarteilchen ein nützlicher Begriff ist, der auf mehrere bekannte Tatsachen ein neues Licht wirft und bisher unbekannte Zusammenhänge aufzeigt.

Ich komme zum Schluß meiner Darstellung, in der ich zu zeigen versuchte, welche Rolle der Begriff der Symmetrie in der modernen Physik spielt und wie sich durch Symmetriebetrachtung neue Einsichten gewinnen lassen in die vielen noch wenig bekannten Gesetzmäßigkeiten der Physik.

Ich muß aber nun zugestehen, daß ich etwas einseitig vorgegangen bin, um die Bedeutung der Symmetrien besonders eindrucksvoll vor Augen zu führen. Von meinen Ausführungen könnten Sie leicht die Überzeugung gewinnen, daß die Aufzeigung der fundamentalen Symmetrien zum wesentlichen Teil der Naturerkenntnis gehört. Um diesen Eindruck etwas abzuschwächen, möchte ich hier auf zwei wichtige Einschränkungen hinweisen in den Anwendungsmöglichkeiten des Symmetriebegriffes.

Zunächst muß betont werden, daß die Kenntnis der Symmetrien der physikalischen Systeme die Struktur dieser Systeme nicht eindeutig bestimmt. Symmetriebetrachtungen allein genügen nie, um das dynamische Grundgesetz aufzufinden. So zum Beispiel kann man durch Symmetriebetrachtungen wohl feststellen, in welche Termsysteme ein atomares System aufspalten kann. Die Größe dieser Aufspaltung selbst aber ist durch Symmetriebetrachtungen allein nie festzustellen. Dazu gehört eine Kenntnis des dynamischen Gesetzes selbst.

Eine zweite Einschränkung kommt daher, daß unter Umständen Symmetrien nur eine angenäherte Gültigkeit haben können. Ein eindrucksvolles Beispiel ist die Symmetrie der Ladungskonjugation, welche sich in der ganzen Physik bewährt hat, mit Ausnahme der ganz schwachen Wechselwirkungen, welche um mehrere Zehnerpotenzen schwächer sind als die elektromagnetischen oder gar die Kernkräfte.

Es scheint allgemein so zu sein: je feinere Einzelheiten man experimentell unterscheidet, desto geringer wird die Symmetrie eines physikalischen Systems. Dieser Umstand zeigt besonders deutlich, daß der scharfe, mathematisch formulierte Symmetriebegriff dem wahren Sachverhalt nicht vollkommen entspricht. Es ist deshalb zweckmäßiger, zum vorneherein auf eine vollständige Beschreibung des physikalischen Systems zu verzichten und das wahre System durch ein Modellsystem zu ersetzen, das sich nur in gewissen gröbern Zügen mit dem wahren System deckt, das aber in den feinern Einzelheiten davon abweicht. In der Kristallographie ist dieses Vorgehen schon längst angewendet worden, und man unterscheidet dort den Idealkristall vom realen Kristall, der mit allen seinen Kristallfehlern bloß eine Annäherung an den Idealkristall darstellt. Solche Modellsysteme zeigen dann wohl die Symmetrien in ihrer vollen Präzision, sie sind aber eben nur Modelle und haben deshalb nur eine eingeschränkte Bedeutung.

Ich komme abschließend zum Ausgangspunkt meiner Betrachtungen zurück, in der ich auf den andern Sinn des Wortes Symmetrie hingewiesen habe, der dem ästhetischen Bedürfnis des Menschen entspricht, in seiner Umwelt nicht nur eine chaotische Ansammlung von Ereignissen zu sehen, sondern eine Verwirklichung eines unfaßbar großen Kunstwerkes, das seine innern Gesetzmäßigkeiten durch seine Symmetriestrukturen kundgibt.

Zwar sprechen wir heute nicht mehr von einer «Harmonie der Sphären», und viele Erfahrungen haben uns gelehrt, daß die Symmetrien

nicht als a priori gegeben betrachtet werden können, sondern erst aus den Naturgesetzen selbst abgelesen werden müssen.

Die Priorität des ästhetischen Erlebnisses ist also aus der Naturwissenschaft sicher entfernt. Und doch hat dieses Erlebnis immer und immer wieder die innere Antriebskraft geliefert, um von den sichern Gefilden der Alltagswelt aus immer tiefer in die unfaßbaren Geheimnisse des Naturgeschehens vorzudringen. In diesem Sinne ist der Pythagoräische Standpunkt also auch heute noch nicht vollständig aus der Wissenschaft verschwunden. Das ästhetische Erlebnis als Motiv der Forschung bleibt bestehen und stellt ein wichtiges Gegenstück dar zum extremen Pragmatismus, der uns heute von allen Seiten umgibt und dessen Überhandnehmen den Tod allen wahren Forschens bedeuten würde.

# Symmetrie und Unordnung in der Kristallwelt

Prof. Dr. F. LAVES, (Zürich)

Gesetz ist nur, daß keines ist.
(F. Dürrenmatt in «Frank der Fünfte»)

Seit Jahrtausenden haben Kristalle und ihre Verwachsungen den Menschen fasziniert. Er spürt Gesetzmäßiges, welches sich hinter einer ungesetzmäßigen Variation der sich dem Auge bietenden Gestaltenmannigfaltigkeit verbirgt. Die Spannung zwischen Gesetz und Ungesetz empfindet er als schön, auch wenn er von dem Gesetz nichts weiß, dessen Existenz er aber ahnt.

Um das Ungesetzmäßige oder die Unordnung in der Kristallwelt diskutieren zu können, ist es zweckmäßig, sich zunächst darüber zu einigen, was unter Gesetz oder Ordnung verstanden werden soll. Jede Abweichung von der Ordnung kann dann als «Unordnung» aufgefaßt werden. In diesem Sinne gibt es viele Grade und Typen der Unordnung, von denen später die Rede sein wird.

«Ordnung» kann in einfacher Weise durch Symmetriebedingungen definiert werden, denen ein idealer Kristall genügen sollte: Ein Körper (oder eine Anordnung von Punkten bzw. eine Anordnung von irgendwelchen Motiven) besitzt im kristallographischen Sinne *Symmetrie*, wenn es möglich ist, die Anordnung durch kristallographisch mögliche *Symmetrieoperationen* mit sich selbst zur Deckung zu bringen.

Welche kristallographischen Symmetrieoperationen möglich sind, läßt sich aus einer Diskussion der wichtigsten Symmetrieeigenschaft von Kristallen ableiten, nämlich der *Translation*. Das heißt, zu jedem Atom eines Kristalles muß es andere gleiche Atome des Kristalles geben, welche die Punkte eines Translationsgitters besetzen. Unter *Translationsgitter* versteht man eine dreidimensional ausgedehnte Anordnung diskreter Punkte, welche folgender Bedingung genügt: Verschiebt man die Anordnung parallel mit sich selbst derart, daß nach der Verschiebung irgendein Punkt der Anordnung auf irgendeinen Platz zu liegen kommt, an welchem vor der Verschiebung ein Punkt der Anordnung lag, so müssen alle Punkte der Anordnung auf Plätze zu liegen kommen, die vor der Verschiebung Punkte der Anordnung waren. Die im vorstehenden Satz erwähnte Verschiebung ist eine Symmetrieoperation im obigen Sinne, sie wird Translationsoperation (oder oft auch kurz Translation) genannt. Bei einem «idealen Kristall» muß jede in dieser Weise definierte

Translationsoperation die gesamte Atomanordnung des Kristalles mit sich selbst zur Deckung bringen. Die Punkte eines Translationsgitters werden *identische Punkte* genannt.

Die vorstehend beschriebene Translationssymmetrie hat eine bemerkenswerte Konsequenz: Ein idealer Kristall sollte unbegrenzt sein! Die Kristalle unserer Welt sind aber begrenzt. Es gibt große und kleine Kristalle, oft dicht nebeneinander auf der gleichen Stufe sitzend. Die «unordentliche» Abweichung vom Symmetriegesetz der Translation äußert sich hier in einer dem Zufall unterworfenen Verschiedenheit der Kristallgrößen.

Außer dieser sich im *Makroskopischen* äußernden Abweichung von der Translationssymmetrie, die man vielleicht als eine triviale Abweichung bezeichnen könnte, seien hier gleich noch zwei weitere triviale Abweichungen kurz erwähnt, die sich im *Atomaren* äußern: 1. Die Atome von Kristallen führen Wärmeschwingungen aus und genügen daher nicht exakt den Forderungen der Translationssymmetrie. 2. Die meisten chemischen Elemente sind Isotopengemische. Kristalle, welche derartige Elemente als Komponenten enthalten, werden deswegen nicht exakt den Forderungen der Translationssymmetrie genügen, da auf identischen Punkten zwar ähnliche, aber nicht identische Atome liegen.

Nach Besprechung dieser trivialen Abweichungen von idealer Translationssymmetrie, Abweichungen, welche man bei allen Kristallen antrifft, wollen wir uns folgenden Fragen zuwenden: 1. Inwieweit ist es möglich, die endlich begrenzten Kristalle wenigstens als «Ausschnitte» aus unendlich ausgedehnt zu denkenden, der Translationssymmetrie genügenden Kristallen aufzufassen? 2. Welche Folgerungen ergeben sich aus der Translationssymmetrie für die Symmetrie der endlich begrenzten Kristallgebilde? – Wir wollen uns zunächst der zweiten Frage zuwenden.

Die Translationssymmetrie der Kristalle bedingt, daß kristallisiertes und kristallisierendes Material in verschiedenen Richtungen verschiedene Eigenschaften haben kann, sofern die betrachteten Richtungen nicht «gleichwertig» sind. Gleichwertig nennen wir Richtungen dann, wenn sie durch Symmetrieoperationen zur Deckung gebracht werden können. Da Wachstumsgeschwindigkeiten auch «Eigenschaften» sind, werden diese richtungsabhängig sein, und es ist zu erwarten, daß sich die Symmetrie der Atomanordnung in der Symmetrie der Kristallbegrenzung äußert.

Um die Symmetriemöglichkeiten, welche bei Kristallen als beobachtbar in Frage kommen, zu überblicken, kann man in folgender Weise vorgehen:

Versteht man unter «Symmetrieoperation» eine Operation, mit Hilfe derer sich eine Anordnung in sich selbst überführen läßt, so kann man die Translationsgitter (siehe oben) daraufhin untersuchen, wieviel bezüglich Symmetrie verschiedene es gibt. Kristallbegrenzungen sollten dann höchstens solche Symmetrieoperationen erkennen lassen, welche auch bei Translationsgittern erkennbar sind.

Eine systematische Untersuchung zeigt, daß es 14 bezüglich Symmetrie verschiedene Translationsgitter gibt (14 «Bravaisgitter»), welche folgende (für diese morphologische Betrachtung wichtige) Symmetrieoperationen erkennen lassen:

a) *Drehungen* um 360°, 180°, 120°, 90°, 60° und um deren Vielfache. Die Richtungen, um die man derart drehen kann, daß Deckung erreicht wird, nennt man Drehungsachsen, und zwar $n$-zählige Drehungsachsen, wenn der zur Deckung führende Drehwinkel $360°/n$ beträgt. Man kann also 1-, 2-, 3-, 4- und 6zählige Drehachsen unterscheiden.

b) *Spiegelung*. Ebenen, an denen sich die zur Deckung führende Spiegelung vollzieht, nennt man *Spiegelebenen*.

c) *Koppelung von Drehung und Spiegelung an einer Ebene senkrecht zur Drehung: Drehspiegelung* bzw. *Drehspiegelachsen*. Als mögliche Drehwinkel für diese Symmetrie erkennt man 360°, 180°, 120°, 90°, 60°. Entsprechend kann man 1-, 2-, 3-, 4- und 6zählige Drehspiegelachsen unterscheiden. Da 1zählige Drehspiegelung identisch ist mit Spiegelung und da 3zählige Drehspiegelung identisch ist mit einer Kombination von 3zähliger Drehung und Spiegelung, bedeuten nur die 2-, 4- und 6zähligen Drehspiegelungen gegenüber den unter a und b genannten Operationen etwas Neues.

Die Operation der 2zähligen Drehspiegelung kann auch als «Spiegelung an einem (Zentral-) Punkt» aufgefaßt werden und wird deswegen meist *Inversion* genannt. Jede Richtung wird durch diese Operation gleichwertig mit ihrer Gegenrichtung. Der (zentrale) Punkt, an dem «gespiegelt» wird, hat als Symmetrieelement den Namen *Inversionszentrum* oder *Symmetriezentrum*. Nach Einführung dieses Begriffes «Inversions- oder Symmetriezentrum» kann die vorstehend erwähnte 6zählige Drehspiegelung auch als eine Kombination von 3zähliger Drehung und Inversion aufgefaßt werden.

d) *Koppelung von Drehung und Inversion: Drehinversion* bzw. *Drehinversionsachsen*. Wieder kommen als Drehwinkel nur 360°, 180°, 120° 90°, 60° in Frage. Im speziellen gilt: 1zählige Drehinversion = Inversion = 2zählige Drehspiegelung; 2zählige Drehinversion = Spiegelung; 3zählige Drehinversion = 6zählige Drehspiegelung = 3zählige Drehung kombiniert mit Inversionszentrum; 4zählige Drehinversion = 4zählige Drehspiegelung; 6zählige Drehinversion = 3zählige Drehung kombiniert mit Spiegelung.

Kombiniert man die unter a bis d aufgeführten Symmetrieelemente miteinander, so ergeben sich 32 «widerspruchsfreie» Kombinationen von Symmetrieelementen, welche man auch die *32 Kristallklassen* nennt. Jeder Kristall kann im Prinzip eindeutig einer dieser Kristallklassen zugeordnet werden (praktisch ist es manchmal schwierig), und seine Begrenzung *sollte im Idealfall* dieser Kristallklassensymmetrie genügen.

Im Rahmen jeder Kristallklasse gibt es eine kleine, und zwar bestimmte Anzahl von sogenannten kristallographischen Formen, welche als Begrenzungsflächen für Kristalle der betreffenden Kristallklasse

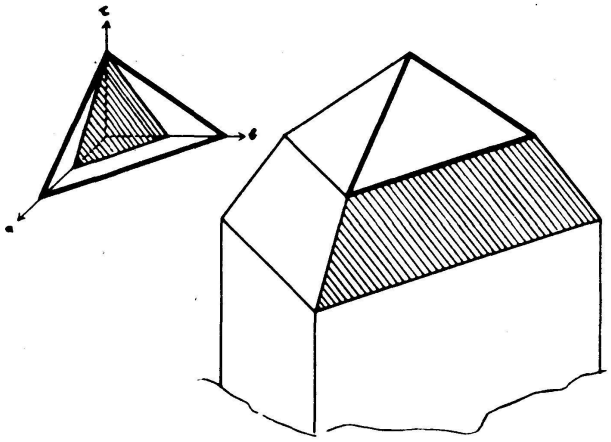


Abb. 1
Die Achsenabschnitte der stark umrandeten und der schraffierten Fläche verhalten sich in den a-, b- und c-Richtungen wie 2:1, 2:1 und 1:1.

möglich sind. Oft wird statt des Ausdruckes «kristallographische Form» kurz «Form» gesagt. In diesem Sinne versteht man unter einer *Form* die Summe gleichwertiger, das heißt ununterscheidbarer Flächen. Im ganzen gibt es 47 Formen. Die Form mit der kleinsten Flächenanzahl – nämlich 1 – nennt man Pedion, die Form mit der größten Flächenanzahl – nämlich 48 – nennt man Hexakisoktaeder. Als weitere Formen gibt es unter anderem Pyramiden, Prismen, Tetraeder, Oktaeder und Würfel.

Den relativ kleinen Zahlen von *32 Kristallklassen* und *47 Formen* steht eine unbegrenzte Vielfalt der kristallographischen *Gestalten* gegenüber. Sie ergibt sich daraus, daß an den *Gestalten* meist mehrere *Formen* beteiligt sind. Man spricht dann von (Formen-) *Kombinationen.*

Die Winkel, welche die Flächen einer Gestalt miteinander bilden, sind nicht beliebig, sondern entsprechen einem wichtigen kristallographischen Gesetz: dem sogenannten Rationalitätsgesetz. Dieses Gesetz, eine Folge von Translationssymmetrie und Wachstumsvorgang, verlangt folgendes: Es muß möglich sein, die Flächen einer Gestalt derart parallel zu verschieben, daß sie die Achsen eines sinnvoll gewählten Koordinatensystems in rationalen Verhältnissen schneiden (Abb. 1). Als Folge davon lassen sich dann für die Verhältnisse der reziproken Achsenabschnitte einer jeden Fläche drei ganze Zahlen (meist kleine ganze Zahlen, positive und negative, inklusive 0) ableiten, welche man die Indizes der betreffenden Fläche nennt. Durch ein mit diesem Rationalitätsgesetz verträgliches Koordinatensystem ist für jede Kristallart eine bestimmte Metrik festgelegt, welche, unabhängig von der Symmetrie, im allgemeinen von Kristallart zu Kristallart variiert und durch fünf Größen – zwei Längen und drei Winkel – charakterisiert werden kann.

Obwohl es also vom Symmetriestandpunkt aus nur 32 verschiedene Kristallgestalten geben kann, gibt es für das Auge beliebig viele: erstens infolge der 47 verschiedenen Formen sowie deren zahllosen Kombinationsmöglichkeiten und Verschiedenheiten der relativen Ausbildungsgröße und zweitens infolge der beliebig großen Variabilität der Metrik, für deren fünf Werte überhaupt keine Bedingungen bestehen. Diese fünf Werte sind lediglich durch die Kräfte bestimmt, welche die den Kristall aufbauenden Atome aufeinander ausüben, also letzten Endes durch die chemische Zusammensetzung und die physikalischen Umweltbedingun-

gen (zum Beispiel Temperatur, Druck, elektrische und magnetische Felder).

Nennen wir die Gestalten, die den vorstehenden Bedingungen genügen, *ideale* Kristallgestalten, so erkennen wir bereits bei diesen *idealen* Kristallgestalten eine faszinierende Mischung von Gesetz und Unordnung: 32 Kristallklassen und Rationalitätsgesetz einerseits, beliebig viele Kombinationsmöglichkeiten von Formen und Variationen der Metrik anderseits. Der *Zufall* der Wachstumsbedingungen spielt eine ausschlaggebende Rolle dafür, welche Formen oder welche Kombinationen von Formen ein wachsender Kristall als seine Gestalt wählt.

Zu dieser durch kein Gesetz erfaßbaren Mannigfaltigkeit bereits der «idealen Kristallgestalten» («ideal» im Sinne des oben, im dritten Absatz, definierten Symmetriebegriffes) gesellt sich eine zusätzliche «Unordnung» dadurch, daß die Symmetrie der Kristallgestalten oft – und, wenn man es genau nimmt, meist – erheblich niedriger ist, als sie theoretisch auf Grund der Kristallklassensymmetrie sein müßte. Man beschreibt diese Tatsache mit dem Wort «Verzerrung» (Abb. 2).

Da der Ausdruck «Verzerrung» sprachlich nicht sehr glücklich ist, soll er durch ein Beispiel illustriert werden. Man stelle sich einen in einer strömenden NaCl-Lösung wachsenden NaCl- (Stein- oder Kochsalz-) Kristall vor. Die Atomanordnung des NaCl ist «kubisch» und derart, daß man Begrenzungen kristallographisch höchstmöglicher Symmetrie erwarten sollte. Sie sollte im Idealfall derart hochsymmetrisch sein, daß man 4zählige Drehungsachsen erkennen kann, zum Beispiel einen Würfel, dessen Flächen bekanntlich Quadrate sind und dessen Kanten alle gleich groß sein sollten. Infolge spezieller Wachstumsbedingungen ist das oft nicht der Fall. Der Kristall wächst in den verschiedenen Würfelnormalenrichtungen verschieden schnell, und es mag eine «würfelartige» Begrenzung resultieren mit Kantenlängenverhältnissen etwa ähnlich denen einer Streichholzschachtel.

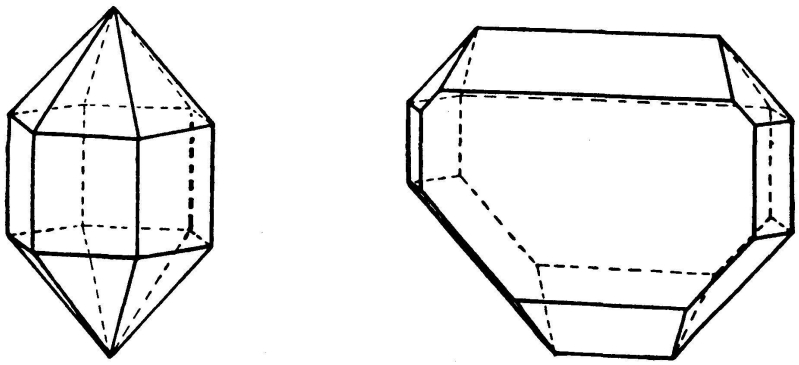


Abb. 2. Links: ideale Ausbildung eines hexagonalen (Hochtemperatur-Form-) Quarzkristalles. Rechts: «verzerrte» Ausbildung. (Man beachte die Parallelität korrespondierender Kanten.) In beiden Fällen besteht die «Gestalt» aus der Kombination von zwei und nur zwei «Formen»: hexagonales Prisma plus hexagonale Bipyramide.

Obwohl man bei einem solchen Körper *drei verschieden große* Flächen unterscheiden kann, werden diese kristallographisch als *gleichwertig* angesehen, also «ununterscheidbar», weil sie nur «zufällig» verschieden groß sind, bei idealem Wachstum aber gleich groß sein könnten, und weil sie, kristallphysikalisch gesehen, gleiche Eigenschaften haben. Die kristallographische Gleichwertigkeit der Flächen und die hohe Symmetrie des Würfels (zum Beispiel 4zählige Drehungsachsen) kommen natürlich sofort dann zum Ausdruck, wenn man von den Flächen*größen* absieht und nur die Flächen*winkel* berücksichtigt. Dies geschieht am übersichtlichsten dadurch, daß man statt der Flächen deren Normalen betrachtet und letztere derart parallel verschoben denkt, daß sie von einem gemeinsamen Punkt ausstrahlen. Man erhält auf diese Weise ein Flächennormalenbündel, dessen Symmetrie der wahren Formensymmetrie entspricht. Ist die Symmetrie einer gebildeten Formenoberfläche bzw. eines gebildeten Formenkörpers identisch mit der wahren Formensymmetrie, dann spricht man von *idealer* Ausbildung; ist sie es nicht, dann spricht man von verzerrter Ausbildung.

Es gibt natürlich kontinuierlich verschiedene Grade der Verzerrung. Um beim Beispiel des NaCl-Würfels zu bleiben: Ein Parallelepiped, dessen Flächen senkrecht aufeinander stehen und dessen Kantenlängen nicht mehr als etwa 10 Prozent voneinander abweichen, wird ein Kristallograph noch ohne Gewissensbisse als einen ideal ausgebildeten Würfel anerkennen (denn den wirklich idealen Würfel gibt es nur in der Mathematik bzw. in der Vorstellung). Eine «Streichholzschachtel»-Form würde man jedoch bereits als einen stark verzerrten Würfel bezeichnen; und von Steinsalzkristallen, welche wie Streichhölzer aussehen, würde man sagen, daß sie von den Flächen eines *sehr stark verzerrten* Würfels begrenzt sind. (Es gibt in der Tat Wachstumsbedingungen, unter denen Steinsalz «haarförmig» wächst.)

Zusammenfassend sei bereits für den «frei», von Nachbarn «ungehindert» gewachsenen «Einkristall» festgehalten: Der begrenzten Anzahl von Symmetriemöglichkeiten (32 Kristallklassen) und Kristallformen (47) stehen die unbegrenzten Möglichkeiten verschiedener Kristallgestalten sowie deren Verzerrungen gegenüber. Gesetz und Unordnung beeinflussen in einer magisch wirkenden Mischung das vom Auge als Kristall Wahrgenommene und vom Gefühl als ästhetisch schön Empfundene. Der *Zufall* der Wachstumsbedingungen spielt eine ausschlaggebende Rolle dafür, welche Formen oder welche Kombinationen von Formen als Kristallgestalten in Erscheinung treten, und dafür, ob diese Gestalten «ideal» oder «verzerrt» ausgebildet sind.

Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich stillschweigend auf solche Kristallgestalten, welche als konvexe, von ebenen Flächen begrenzte Polyeder ausgebildet sind und als solche herausgeschnitten gedacht werden können aus einem der Translationssymmetrie exakt genügenden, unbegrenzt zu denkenden Kristall. Hierdurch sollte jedoch nicht der Eindruck entstehen, daß zu dem Begriff «Kristall» eine konvex poly-

edrische Begrenzung durch ebene Flächen gehört, welche dem Rationalitätsgesetz gehorchen. Für den Begriff «Kristall» ist lediglich notwendig, daß die Anordnung seiner Atome Translationssymmetrie erkennen läßt, was experimentell mit Hilfe von Röntgenstrahlen geprüft werden kann. (Ein Stück Glas, dessen Atomanordnung keine Translationssymmetrie erkennen läßt, wird niemals dadurch zum «Kristall», daß man ihm durch Schleifen die Gestalt eines ebenflächig begrenzten Polyeders gibt.) Es gibt daher auch viele Kristalle, die infolge trivialer Gründe eine völlig unkristallographische Begrenzung haben, sei es infolge zufälliger Hindernisse während des Wachstums, sei es infolge willkürlicher Formgebungen, zum Beispiel durch Anschleifen von Facetten für Schmuckstücke.

Es gibt aber auch Kristalle, welche infolge besonderer Wachstumsbedingungen – meist infolge schnellen Wachstums – eine natürliche Begrenzung haben, welche nicht als konvexes Polyeder beschrieben werden kann. Es wachsen dann mehr oder weniger «regelmäßige» Gebilde mit Zacken oder Ästen oder als Gewebe ausgebildet, deren «Regelmäßigkeit» die kristalleigene Symmetrie der betreffenden Kristallklasse mehr oder weniger vollkommen widerspiegelt. Als besonders schönes Beispiel derartiger Ausbildungen sei an Schneekristalle erinnert, über die Thomas Mann im «Zauberberg» schreibt:

«Und unter den Myriaden von Zaubersternchen in ihrer untersichtigen, dem Menschenauge nicht zugedachten, heimlichen Kleinpracht war nicht eines dem anderen gleich; eine endlose Erfindungslust in der Abwandlung und allerfeinsten Ausgestaltung eines und immer desselben Grundschemas, des gleichseitig-gleichwinkligen Sechsecks herrschte da; aber in sich selbst war jedes der kalten Erzeugnisse von unbedingtem Ebenmaß und eisiger Regelmäßigkeit, ja dies war das Unheimliche, Widerorganische, Lebensfeindliche daran; sie waren zu regelmäßig, die zum Leben geordnete Substanz war es niemals in diesem Grade; dem Leben schauderte vor der genauen Richtigkeit; es empfand sie als tödlich, als das Geheimnis des Todes selbst, und Hans Castorp glaubte zu verstehen, warum Tempelbaumeister der Vorzeit absichtlich und insgeheim kleine Abweichungen von der Symmetrie in ihren Säulenordnungen angebracht hatten.»

Bei solchen Gebilden, insbesondere wenn die Ausbildung eine «gewebeartige» ist, wird es manchmal schwer sein, zu entscheiden, ob ein solches Gebilde ein «Einkristall» ist oder eine Anordnung mehrerer Einzelkristalle, welche parallel zueinander orientiert sind.

Diese Frage führt dazu, unsere Betrachtungen auf eine Diskussion der Anordnung mehrerer Kristalle zueinander auszudehnen. Auch hier läßt die von der Natur gebotene Mannigfaltigkeit Gesetze und Gesetzmäßigkeiten erkennen, deren Strenge durch den Zufall aufgelockert wird und Gebilde entstehen läßt, welche unser ästhetisches Empfinden wohltuend ansprechen.

Auf der einen Seite gibt es gesetzmäßige Parallelverwachsungen (Abb. 3) und «Verzwillingungen» von Kristallen gleicher Symmetrie, in ihrer abstrakten Schönheit etwa gleichwertig den Schöpfungen künstlerischer Architektur, auf der anderen Seite gibt es die völlige gegenseitige Unordnung von Kristallen verschiedener Symmetrie und Farbe, wie etwa in granitischen Gesteinen, eine Unordnung, welche nicht nur

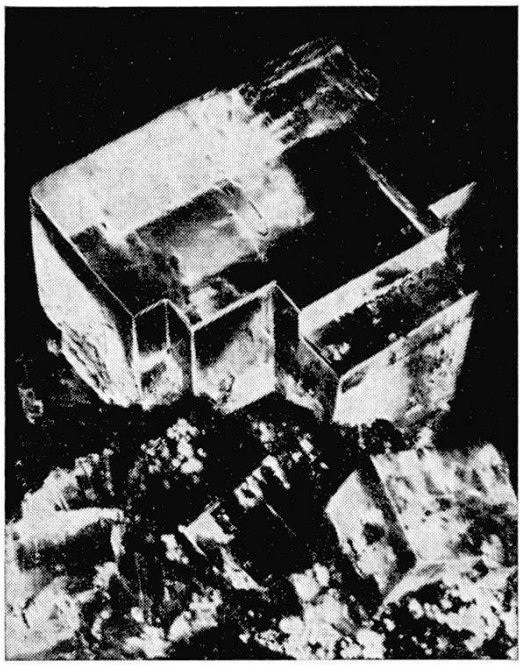


Abb. 3
«Einkristall» oder «Parallelverwachsung»?
Diese Photographie eines Steinsalz(NaCl)-Kristalles wurde einem Buch von A. Ehrhardt: «Kristalle», Verlag H. Ellermann, Hamburg, 1939, entnommen.

dekorativ schön wirkt. Dazwischen liegt eine kontinuierliche Mannigfaltigkeit von Kristallanordnungen, mit wechselndem Verhältnis von «Ordnung» und «Unordnung» (Abb. 4–6). Das als «Ordnung» Empfundene läßt sich zwar oft nicht exakt in Worte fassen, hat aber letzten Endes seine Wurzeln in den Symmetrien der am Aufbau beteiligten Kristalleinheiten. Die gleichzeitige Beteiligung von Ordnung *und* Unordnung erzeugt oft Spannungen, deren Schönheitswirkung der Betrachtende sich kaum entziehen kann. In dieser Weise werden von der Natur oft Gebilde erzeugt, die beglückend wirken wie Werke modern-abstrakter Plastik, und es ist wohl kein Zufall, daß gerade in unseren Zeiten die Freude am Sammeln schöner Kristallstufen so stark zugenommen hat.

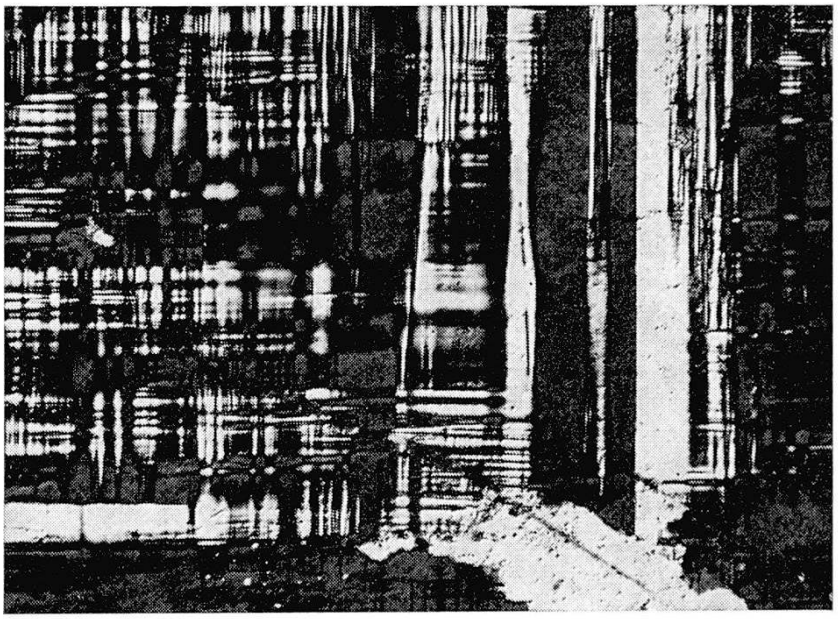


Abb. 4
Mikrophoto (polarisiertes Licht) eines Dünnschliffes von «polysynthetisch verzwillingtem» Mikroklin (K-Feldspat; $KAlSi_3O_8$).

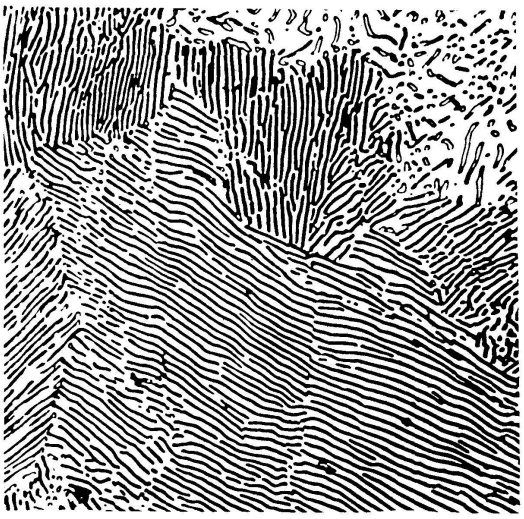


Abb. 5
Mikrophoto eines Metallanschliffes. (Perlit, Ausscheidung von Zementit, $Fe_3C$, in $\alpha$-Eisen.)

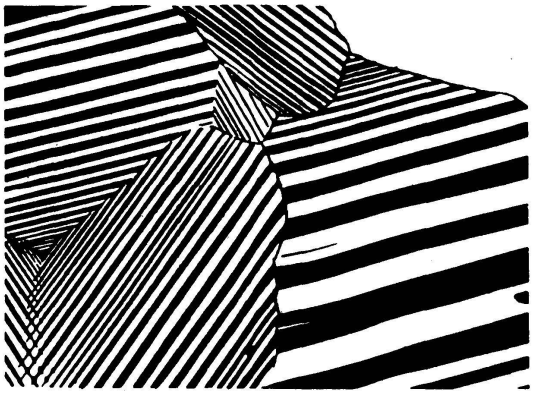


Abb. 6
Zwillingsbildung in In,Tl-Mischkristallen infolge einer beim Abkühlen eintretenden Symmetrieerniedrigung der Kristallstruktur.

Während in der Natur derartige, schön wirkende Spannungen durch «Zufall» entstehen, findet man sie gelegentlich in der bildenden Kunst intuitiv-bewußt erzeugt. Erinnert sei an Dürers «Melancholie»: Ein *trigonaler* Kristall ruht auf einem *tetragonalen* Block. Die hierdurch bereits erzeugte Spannung zwischen trigonaler und tetragonaler Symmetrie wurde – offenbar bewußt – dadurch noch erhöht, daß die 3zählige und die 4zählige Drehungsachse nur parallel und nicht zusammenfallend gewählt wurden. Zusätzlich wurde dem tetragonalen Block noch *eine* Ecke abgeschnitten. Abbildung 7 zeigt eine Zeichnung Dürers zum Polyeder der «Melancholie».

Im bisherigen Teil dieses Vortrages haben wir uns mit den «sichtbaren» Symmetrien der Kristalle und ihrer gegenseitigen Anordnungen befaßt, und wir haben die «sichtbaren» Symmetriegesetze zu verstehen gelernt als Folge der «unsichtbaren», aber mit Röntgenstrahlen beweisbaren Symmetrieeigenschaften des atomaren Aufbaus, der Translationssymmetrie. Zur Veranschaulichung: Ein Na-Ion hat einen Radius von etwa $1 \times 10^{-7}$ mm, ein Cl-Ion einen solchen von etwa $1{,}8 \times 10^{-7}$ mm; das bedeutet, in der Kante eines Steinsalzkristallwürfels von etwa 1 cm Kantenlänge sind etwa 20 Millionen Na- und 20 Millionen Cl-Ionen aneinandergereiht; das entspricht etwa einer Kette sich berührender Rappen – Geldstücke, nicht Pferde – von Zürich nach Paris. Man kann also mit gutem Gewissen die Periodizität der Kristalle als ins Unendliche reichend annehmen und die Translationssymmetrie der Kristalle als wichtige Kristalleigenschaft anerkennen.

Inwieweit ist diese Translationssymmetrie nun aber streng verwirklicht? Wir haben oben schon einige triviale Abweichungen (infolge der Wärmebewegungen und Isotopengemische) kennengelernt. Im folgenden seien einige nichttriviale Abweichungen besprochen.

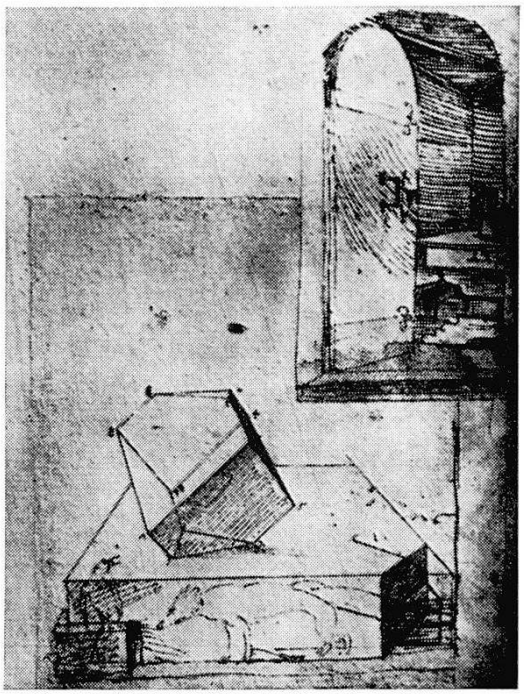


Abb. 7
Zeichnung Dürers zum Polyeder der «Melancholie» (Dresden, Sächsische Landesbibliothek; Abb. 171 in W. Waetzoldt: «Dürer und seine Zeit», Phaidon-Verlag, Wien, 1935).

1. *Leerstellen:* Die meisten chemischen Elemente kristallisieren derart, daß die Atome die Punkte eines und nur eines Translationsgitters (siehe oben) besetzen. Genaue Untersuchungen haben jedoch gezeigt, daß nicht alle identischen Punkte des Translationsgitters mit Atomen besetzt sind. In «zufälliger» Weise bleiben einige Punkte unbesetzt. Die Anzahl unbesetzter Punkte vergrößert sich mit steigender Temperatur.

2. *Mischkristallbildung:* Identische Punkte eines (oder mehrerer) Translationsgitter sind nicht in identischer Weise besetzt. Man kennt folgende Unterfälle:

   a) *Substitutions-Mischkristalle:* Identische Punkte eines (oder mehrerer) Translationsgitter sind mit verschiedenen Atomsorten besetzt (z. B. Kupfer-Gold, bei höherer Temperatur).

   b) *Subtraktions-Mischkristalle:* Identische Punkte eines (oder mehrerer) Translationsgitter sind teilweise unbesetzt – in «zufälliger Weise» (z. B. Magnetkies, $Fe_{1-x}S$).

   c) *Additions-Mischkristalle:* In die Lücken zwischen mehr oder weniger vollständig besetzten Translationsgittern werden mehr oder weniger zusätzliche Atome eingelagert (z. B. Fe+C; Ti+O).
   Die Fälle b und c sind Grenzfälle, die kontinuierlich ineinander übergehen können, wie zum Beispiel im System $CaF_2$–$YF_3$.

3. *Divisions-Fehlordnung:* Während die unter 2. genannten «Unordnungen» durch kontinuierliche Zwischenglieder mit Anordnungen «idealer Ordnung» verbunden sind oder zum mindesten als verbunden gedacht

werden können, besteht bei der Divisions-Fehlordnung die folgende Situation: Trotz stöchiometrischer Zusammensetzung (z. B. $Li_2Fe_2O_4$) ergibt sich aus dem röntgenographischen Experiment und aus strukturtheoretischer Deduktion die Notwendigkeit, daß «identische» Punkte nicht «identisch» besetzt sein können (während im hier gewählten Beispiel der Sauerstoff derart angeordnet ist wie das Chlor im NaCl, sitzen Li und Fe zufällig verteilt auf den Plätzen des Na des NaCl).

Alle vorstehend behandelten Fehlordnungsfälle haben folgendes gemeinsam: Jeder Punkt verhält sich – bezüglich der Wahrscheinlichkeit, von einer bestimmten Atomsorte besetzt zu sein oder nicht – gleich wie jeder andere identische Punkt seines Translationsgitters.

Das bedeutet: Wenn man sich den Kristall in beliebig kleine Bereiche aufgeteilt denkt, so verhält sich jeder Bereich bezüglich seiner Fehlordnung wie jeder andere Bereich (abgesehen von denjenigen Schwankungen, die sich nach den Gesetzen des Zufalls ergeben und natürlich um so größer werden, je kleiner die Aufteilung vorgenommen wird).

Im Gegensatz dazu gibt es Kristalle, bei welchen es möglich ist, Bereichseinteilungen derart vorzunehmen, daß sich die Bereiche bezüglich ihres Fehlordnungsgrades unterscheiden. Eine systematische Diskussion führt zu folgenden Hauptfällen:

| | |
|---|---|
| Ideale Ordnung in allen drei Dimensionen: | «Idealkristall» |
| Ideale Ordnung nur in zwei Dimensionen: | Eindimensionale Fehlordnung (Zinkblende-Wurtzit) |
| Ideale Ordnung nur in einer Dimension: | Zweidimensionale Fehlordnung (Faserstoffe; Harnstoff- und Thioharnstoff-Addukt-Verbindungen) |
| Ideale Ordnung in keiner Dimension, aber verschiedener Ordnungsgrad, je nach gewählter Bereichsaufteilung: | Dreidimensionale Domänenfehlordnung (Cu-Au; Anorthit) |

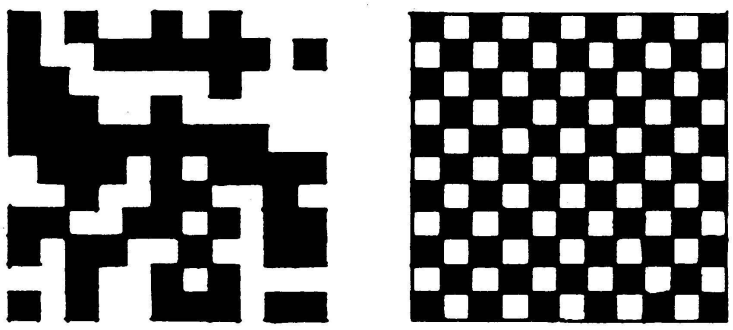


Abb. 8
Rechts: geordnete AB-Verteilung, etwa derjenigen des NaCl entsprechend.
Links: zufällige Verteilung, etwa derjenigen eines AB-Mischkristalles entsprechend (vergrößerter Ausschnitt aus der Abb. 9, links).

Abb. 9. AB-Anordnungen. Links: zufällige Verteilung. Mitte: willkürliche Abweichung (5 %) von zufälliger Verteilung in Richtung stärkerer Dispergierung; man beachte die Vermehrung und Vergrößerung von «Domänen» geordnet wie in Abb. 8, rechts. Rechts: willkürliche Abweichung (5 %) von zufälliger Verteilung in Richtung stärkerer Koagulation, «Entmischung».

Die Abbildungen 8 und 9 zeigen zur Veranschaulichung derartiger Fehlordnungen einige schematische Zeichnungen, Abbildung 10 gibt zum Vergleich das Beispiel einer abstrakten Malerei (Theo von Doesberg, Komposition A 16, 1916).

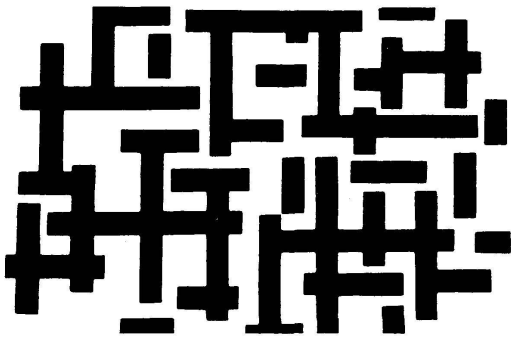


Abb. 10
Theo van Doesburg: Komposition A16, 1916 (nach einer Reproduktion aus Marcel Brion: «Geschichte der abstrakten Malerei», Verlag M. Du Mont Schauberg, Köln, 1960).

Derartige Gegenüberstellungen ließen sich vielfach vermehren. Sie demonstrieren einerseits die Formschönheit, welche die Natur in der Kristallwelt dadurch produziert, daß sie mit spielerischen Zufälligkeiten das Starre ihrer Gesetze auflockert; anderseits lassen sie erkennen, wie der menschliche Geist das Zufällige seiner Umwelt – individuell erarbeiteten Gesetzen folgend – zum Schönen formen kann.

# Film über Blattstellungskonstruktionen

Prof. Dr. Otto Schüepp, Universität Basel

Der Film wurde hergestellt mit Unterstützung des schweizerischen Nationalfonds durch die Kern-Film AG, Basel. Er umfaßt:

1. *Wachstum und Teilung einer Scheitelfläche*, erläutert am Beispiel von Ginkgo biloba. Aus Kreisen mit Radius $r = 10^{0,1\,n}$ und Strahlen aus dem Zentrum entsteht eine Schachbrettfigur, die sich gleichmäßig wachsend aus ihrem Zentrum regeneriert. Sie dient als Netzfigur zur Zeichnung logarithmischer Spiralen. Kreistangenten an in einer Spirale aufeinanderfolgenden Punkten umgrenzen ein Polygon als Bild einer Scheitelfläche. Eine neue Tangente schneidet von der maximalen Scheitelfläche ein Blatt ab und läßt eine ähnliche Scheitelfläche in Minimalgröße und in gedrehter Lage zurück.

2. *Variation des Divergenzwinkels.* Bei gleichbleibenden Abständen vom Zentrum verwandelt sich das Bild durch schrittweise Vergrößerung des Divergenzwinkels von 0° auf 5°, 15°... bis auf 180°. Bald treten als Verbindung von Nachbarpunkten einzelne Parastichen hervor, bald Vierecke zwischen zwei Scharen sich kreuzender Parastichen. Der Übergang von der Divergenz 135° bis auf 144° ergibt beim Grenzwinkel von 137 ½° eine besonders harmonische Anordnung mit Winkelteilungen nach dem Goldenen Schnitt.

3. *Quirlstellung und Spiralstellung.* Quirlstellungen können numeriert werden als «hinkende» Spiralstellungen. Durch kleine Verschiebungen in Winkeln und Abständen kann eine Quirlstellung in eine Spiralstellung mit gleicher Dichte verwandelt werden.

4. *Variation der Radien.* Anhand einer Zeichnung von Alexander Braun (1831) wird die Veränderung der Kontakte bei verändertem Größenverhältnis zwischen Blatt und Axe erläutert. Abnehmendes «Plastochronverhältnis» der Radien läßt nacheinander Parastichenzahlen aus der Fibonacci-Reihe hervortreten. Die Scheitelfläche wird aus einem Dreieck zum Fünfeck, Achteck, Dreizehneck.

5. *Ausfüllung einer Kreisfläche.* Das Zentrum des Blütenkörbchens der Kompositen füllt sich mit gleich alten, gleich großen Blüten in Spiralordnung. Ein Schema wird konstruiert mit Kreisringen von gleicher Fläche und mit konstantem Divergenzwinkel.

*6. Variation der Blattform.* Bei konstanter Divergenz und konstantem Plastochronverhältnis ändert sich das Bild durch Veränderung der Blattform, die bestimmt ist durch konzentrische Kreise oder durch exzentrische Kreise oder durch Kreisbogen mit wachsendem Krümmungsradius bis zur Geraden oder durch konvexe Kreisbogen bis zur geschlossenen Kreisform der Blätter. Zur Darstellung gelangen damit die geschlossenen Blattscheiden vieler Monokotylen oder die sichelförmigen Blattnarben vieler Dikotylen oder die kreisrunde Blattbasis der Farne.

*7. Metamorphose der Blattstellung.* Während das Schema gleichmäßig wächst, verändern sich Stellung, relative Größe und Form der neu von der Scheitelfläche abgetrennten Anlagen. Gezeigt wird der Übergang von der dekussierten Stellung der ersten Blätter zur Spiralstellung durch räumliche Verschiebung und zeitliches Auseinanderrücken der zwei Blätter eines Paares. Bei langsamer Zunahme von Maximal- und Minimalgröße des Scheitels ändert sich die Krümmung der Blattbogen, die relative Größe der Blattanlage, und es verkürzt sich der Zeitabstand der aufeinander folgenden Blätter, das Plastochron. Auf die großen Laubblätter folgen kleinere Hochblätter. Eine sprungweise Veränderung in Größe und Form der Anlagen führt zur Bildung eines Kranzes von Randblüten eines Kompositenblütenstandes; mit einem zweiten Sprung beginnt die rasche Ausfüllung des Scheitels durch kreisrunde Scheibenblüten.

*Schlußwort:* «Was im Film rasch abläuft, läßt die Natur langsam wachsen zum Bild der Sonnenblume. Naturschönheit ist begründet in durchgreifender Ordnung, die wir versuchen nachzubilden in geometrischen Konstruktionen.»

Aufgabe der Naturforschung ist nach Kirchhoff die möglichst einfache und vollständige Beschreibung der Naturkörper und Naturvorgänge. Einfache Beschreibung meint den Verzicht auf ein Verstehen der letzten Ursachen des Seins und des So-Seins und den Verzicht auf Werturteile. So dient auch der Film der Beschreibung der Wachstumsbewegung; wir sollen uns üben, auch am stillstehenden Bild eines Knospenquerschnittes die Wachstumsbewegung zu sehen.

Wir finden in der Natur weit verbreitet eine Tendenz zur Bildung geordneter Muster, in denen sich gleiche oder ähnliche Teile in Raum und Zeit wiederholen. Wir erkennen solche Muster in der Ordnung der Elektronen in der Atomhülle, in der Ordnung der Atome im Molekül, in der Ordnung von Kohlenstoffketten und Kohlenstoffringen, in der Wiederholung gleicher Atomgruppen in Makromolekülen. Die Raumgitter der Kristalle ermöglichen unbegrenztes Wachstum durch Anlagerung. Schalen der Weichtiere wachsen durch Einlagerung an ihrer weiten Öffnung. Blattstellungsmuster wachsen als Ganzes durch Einlagerung und bilden sich fort am engen Ende des Vegetationspunktes.

Natürliche Muster lassen sich nachbilden durch geometrische Konstruktionen, nach einfachen Regeln, unter Variation weniger Parameter des Divergenzwinkels, des Plastochronverhältnisses, der Krümmungsradien. Wir empfinden und beurteilen solche Muster als «schön» und

vergleichen sie mit den Mustern, welche menschliche Kunst seit ältester Zeit in Schmuckstücken und in Ornamenten an Gebrauchsgegenständen verwirklicht hat.

Geordnete Struktur wirkt ordnend auf den Stoff- und Energiestrom zwischen einer individuellen Gestalt und der Umwelt. Die Ordnung wirkt darum vielfach leistungssteigernd, zweckmäßig in den Organen der Lebewesen wie in den Apparaten und Maschinen der Technik. Wir werden dazu gedrängt, über das einfache Beschreiben hinauszugehen und an die Gegenstände von Natur, Kunst und Technik mit Werturteilen heranzutreten. Wir fragen nach ihrer Schönheit, und wir fragen nach ihrem Nutzen. Wir fragen schließlich auch nach dem Sinn und Wert unserer wissenschaftlichen Bemühungen. Im ersten Buch der Bibel, griechisch «biblos genéseos ouranou kai gées», im «Buch des Werdens von Himmel und Erde», steht über die Stellung des Menschen in seiner Umwelt das Wort:

«Und Gott sprach: Lasset uns Menschen machen, ein Bild, das uns gleich sei, die da herrschen...über die ganze Erde.» Als Bild soll der Mensch etwas widerspiegeln vom Wesen des Schöpfers durch sein eigenes Schaffen. Er soll Schönheit schauen, nachbilden und fortbilden in Werken der Kunst. Als Herrscher soll er kämpfend und dienend seine Werke hineinstellen in die Natur, mit Hilfe der Naturkräfte im Ausbau der Technik.

# Symmetrie und Form der Tiere

(Als synoptische Aufgabe zeitgenössischer Biologie)

Von Prof. Dr. Fritz E. Lehmann (Bern)

(Aus dem Zoologischen Institut der Universität Bern)

## *1. Die Gestalt lebender Organismen als synoptisches Problem*

Seit jeher erfaßte der forschende Mensch an den Gegenständen der Natur die Eigenheiten von Form und Struktur besonderes unmittelbar. Das gilt vor allem auch für die «Naturgeschichte» der Tiere in der Vergangenheit. Heute jedoch, im Lichte der neueren Einsichten, erscheinen die biologischen Formen hauptsächlich als dynamische Träger des Lebens oder als Organe von Lebensvorgängen und zugleich als historische Gegebenheit, die in der Ontogenie und in der Evolution geworden ist, ohne daß wir ihren Anpassungswert in allen Fällen klar beurteilen können.

Einst erschien dem Naturforscher die Darstellung tierischer Formen nahezu als Selbstzweck, als morphologische Wissenschaft von zentraler Bedeutung; heute ist sie ein wesentliches Hilfsmittel im Dienste der Biologie, die zwar nach dem Werden und der Bedeutung der Formen in der Lebensdynamik der tierischen Organismen fragt; aber die Morphologie allein eröffnet uns heute nicht mehr den Zugang zum vollen Verständnis des Lebens.

So ungeheuer ist die Anhäufung biologischen Tatsachenmaterials geworden, daß es von einem Einzelnen nur ausnahmsweise in befriedigender Weise bewältigt werden kann. Wir sind vielfach gezwungen, uns auf die Leitgedanken verschiedener großer Forschungsgebiete zu stützen. Wir bedürfen repräsentativer Modelle, um zu zeigen, was die biologische Formenwelt heute dem wissenschaftlichen Biologen bedeuten kann. Nur umfassende Lektüre, verbunden mit Erfahrungen auf verschiedenen Gebieten, kann uns unerläßliche Informationen liefern. Vor allem die gemeinschaftliche Arbeit verschiedener Forscher an Symposien oder in gemeinsamen Publikationen kann uns einer umfassenden Übersicht entgegenführen und neue biologische Grundprinzipien herausarbeiten, deren wir so dringend bedürfen, als Gegengewicht zu einer speziali-

sierten Vereinzelung. In diesem Sinne sei das Problem von Symmetrie und Form gewürdigt, als synthetische oder synoptische Aufgabe zeitgenössischer Biologie der Tiere.

### *2. Tierische Morphologie als historisches Anliegen der Biologie*

In der Kulturgeschichte der Menschheit erscheinen erwachsene tierische Wesen, vor allem Säugetiere, als selbstverständliche Gegebenheiten in der Mannigfaltigkeit der Natur. Das geht aus den vielen vorgeschichtlichen Überlieferungen hervor (Höhlenzeichnungen usw.). Das vorgeschichtliche Wissen um die Tiere erscheint allerdings meistens als sehr fragmentarisch. Tierische Wesen stehen sehr häufig in Beziehung zu Göttern der Natur. Sie können sich leicht ineinander verwandeln. Ebensoleicht können sich auch Tiergestalten in menschliche Gestalten umbilden. Alle diese Überlieferungen sind fragmentarisch, aber sie geben doch eine sehr wertvolle tiefenpsychologische Selbstdarstellung des menschlichen Wesens zu jenen Zeiten.

Die erste wissenschaftliche Stufe der Tiererkenntnis wird dann erreicht, wenn dem Menschen die tierischen Gestalten als unwandelbare Gebilde erscheinen und wenn diese Tiere als Träger von besonderen Formgesetzlichkeiten erkannt werden, die nichts Mythisches mit dem Menschen gemein haben. Dieses Bemühen um ein naturwissenschaftliches Verstehen der Tiere taucht seit der ersten Tätigkeit von Aristoteles auf, und in den Jahrhunderten welche an die Renaissance anschließen, gelingt es dem forschenden Menschen, eine wissenschaftliche Ordnung in die Mannigfaltigkeit des Tierreiches zu bringen. Seit Linnés Zeiten ordnet man die Tiere in einem übersichtlichen System. Anschließend daran lehrt uns Cuvier die Bauplanprinzipien der tierischen Organisation erkennen, und bis zu Darwins Zeiten erscheinen uns die tierischen Gestalten als unwandelbare Typen, die man auch leicht konservieren und in Museen aufbewahren kann.

Die Vorstellung der Unwandelbarkeit der tierischen Gestalten lockert sich im Laufe des 19. Jahrhunderts, seit man erkennt, daß jeder tierische Organismus sich aus einem Ei zum adulten Zustand entwickelt. Man lernt einzusehen, daß die Generationenreihen der Tiere nun regelmäßig als eine Serie von Individualzyklen erscheinen. Jeweilen entwickelt sich aus dem befruchteten Ei ein immer komplizierter werdender Embryo, und schließlich erscheint die jedem Menschen bekannte Adultform, die sich ihrerseits fortpflanzt und wieder neuen Individualzyklen zum Leben verhilft. Hier erscheint nun die Adultform nicht mehr als unwandelbares Gebilde, sondern als Abschluß und Ziel eines individuellen Entwicklungsvorganges, als Reifeform, auf die Alter und Tod folgen.

Der Wandel der Tiergestalten auch in der Erdgeschichte wird in der Folge immer deutlicher erkannt. Die Vorstellungen und Ideen Darwins haben sehr dazu beigetragen, die Wandelbarkeit der tierischen

Gestalten in der Erdgeschichte zu betonen. Besonders sensationall hat sich diese Änderung der Vorstellungen ausgewirkt für die Evolution des Menschen in der Erdgeschichte. Wir können heute mit Gewißheit sagen, daß im Erdmittelalter kein menschliches Wesen existiert habe und daß die heutigen menschlichen Gestalten sich in einer langen Reihe von Formwandlungen zum Menschen hin entwickelt haben. Auch die Geschichte der Evolutionslehre hat mit abstrakter Betrachtung und Erforschung der Morphologie (Goethe) begonnen. Lebendige Tiere lassen sich ja sehr leicht klassifizieren, ihre Gestaltentwicklung läßt sich zeichnerisch und photographisch darstellen, und zahlreiche Versteinerungen, die auf der Erde gefunden werden, sind als tierische Gestalten zu begreifen. Die Morphologie der Tiere wird zum Selbstzweck. So ist man zunächst stark abgekommen von der eigentlichen Grundfrage nach den gesamten Lebensleistungen der Tiere.

### *3. Tiere als angepaßte Träger von Lebensleistungen in ihrer Umwelt*

Wie schon Nicolai Hartmann betont, sind tierische Wesen als Träger tierischen Lebens nur denkbar in einer ganz bestimmten Umwelt. Sie sind nicht nur ausgestopfte oder sonstwie präparierte Kadaver, die in Museen dem Publikum vorgestellt werden und die meist keine Beziehung mehr erkennen lassen zu der Umwelt, in die sie eingepaßt waren.

Einige lebendige Forschungsrichtungen der heutigen Biologie fragen sehr betont nach den Lebensleistungen und dem Verhalten der Tiere in ihrer Umwelt. So sehen W. R. Heß, K. v. Frisch und K. Lorenz in den tierischen Wesen zunächst zweckmäßig gestaltete und funktionierende Organismen, die in dem wechselnden Ablauf ihrer jeweiligen Umwelt in sehr angepaßter Weise existieren.

Somit weist schon die Gestalt jedes Lebewesens Kennzeichen seiner Organisation auf, die eine zweckmäßige Anpassung an die jetzigen Lebensverhältnisse vermuten lassen. Zugleich tragen die meisten tierischen Gestalten die Spuren ihrer erdgeschichtlichen Evolution. Es zeugen auch beim Tier Form und Gestalt sowie besonders die Symmetrie von den biologischen Existenzmöglichkeiten und von der Geschichte der tierischen Organismen, vorausgesetzt, daß wir vermögen, sie sachgemäß zu deuten. Heute sind wir einer solchen, zugegebenermaßen approximativen Interpretation von Form, Gestalt und Symmetrie wesentlich näher als noch vor vierzig Jahren. Die neuen biologischen Erkenntnisse erlauben es, aus den verschiedensten Forschungsgebieten der Biologie zu schöpfen und die Einzelheiten zu einer synoptischen Gesamtvorstellung kritisch zusammenzufassen. Insofern sind tierische Formen für den Menschen wesentlich andersartige Naturerscheinungen als die gestalthaften Gefüge der unbelebten Welt, seien es Atome, Moleküle oder Kristalle. Die moderne Biologie bietet aber heute für das Verständnis tierischer Formen eine breite wissenschaftliche Grundlage, die nicht mehr außer acht gelassen werden darf, wenn man im Rahmen

des erkenntnistheoretisch Zulässigen bleiben will. Hier hat der Philosoph Nicolai Hartmann in seiner «Philosophie der Natur» weit offene Wege gewiesen, die allerdings auch wesentliche Anforderungen an kritische Selbstdisziplin und exakte Methoden des Naturforschers stellen.

### *4. Tiere als dynamische und historische Gefüge mit charakteristischer Umwelteignung*

Die klassische Morphologie der Tiere hat uns in steigendem Maße Dokumente geliefert, die für die Ummodelung der Tiere im Laufe der Erdgeschichte sprechen. Es kann kein Zweifel mehr bestehen, daß auch die Säugetiere und der Mensch auf dieser Erde aus einfacheren und anders gebauten Vorfahren entstanden sind.

Aber viele Laien und auch verschiedene Biologen vermögen sich diese allmähliche Ummodelung der Tiere nicht im richtigen Zeitmaß vorzustellen. Zunächst zeigt uns die Genetik heute lebender Organismen regelmäßig, daß Elterntiere Nachkommen erzeugen, die im großen ganzen ihren Eltern weitgehend gleichen. Für diese Ähnlichkeit sorgt der vorhandene Genbestand. Man kann sich fragen, ob hier nicht ein offenbarer Widerspruch vorliegt; auf der einen Seite steht die scheinbare Konstanz von Nachkommen und auf der andern Seite die nachweisliche Ummodelung tierischer Gestalten in der Erdgeschichte. Bei dieser Überlegung fallen wir einer Täuschung in der Perspektive der biologischen Zeiträume anheim. Wenn wir uns Rechenschaft von den Dimensionen biologischer Zeitabstände geben wollen, dann müssen wir uns die ganze Zeitskala biologischer Ereignisse richtig vorstellen.

Eine Mutation ereignet sich im Bruchteil von Sekunden, die Befruchtungsreaktion eines reifen Eies vollzieht sich in der Größenordnung von Sekunden, die Zellteilung spielt sich in Minuten ab, die Entwicklung vom Ei bis zum Embryo geht gewöhnlich in mehreren Stunden bis mehreren Tagen vor sich. Bei Säugetieren dauert der Prozeß der Entwicklung vom befruchteten Ei bis zum neugeborenen Jungen, je nach der Tierart, Wochen oder Monate. Alle die genannten Prozesse spielen sich in einem und demselben Individuum ab. Es handelt sich hier stets um Individualzyklen. Aber das Leben auf unserer Erde hängt nicht nur vom Dasein einzelner Individuen ab, sondern von der Erzeugung zahlreicher gleichartiger Generationen von Individuen. Dem Menschen fällt schon wesentlich schwerer, solche Fortpflanzungsgemeinschaften und ihre Generationenfolgen zu überblicken, denn diese können sich je nach der Tierart über Jahre, Jahrzehnte, Jahrhunderte oder Jahrtausende erstrecken. Im ganzen zeigen uns die Fossilienfunde, daß der Wandel tierischer Gestalten in der Erdgeschichte sehr oft nur langsam vor sich geht, sehr häufig erweist sich der Zeitraum von tausend Jahren als zu klein. Es könnte sich hier um dreißig bis fünfhundert oder mehr Generationen handeln; also in dem Zeitmaßstab, der für uns Menschen als historisch gilt, sind die Wandlungen der tierischen Gestalten sehr

häufig noch relativ unauffällig. Nach den Datierungen der modernen Geophysiker haben wir in der Erdgeschichte mit Zeitperioden von tausend, zehntausend oder hunderttausend Jahren zu rechnen. Dieser evolutive Zeitmaßstab überschreitet unser menschliches Vorstellungsvermögen ganz erheblich. Trotzdem müssen wir annehmen, daß erst in diesen evolutiven Epochen der Erdgeschichte in den aufeinanderfolgenden Generationen von Tieren sichtbare Umgestaltungen vor sich gehen. Der Einwand, daß evolutive Umwandlung und Anpassung an neue Verhältnisse in der Umwelt für uns Menschen in kaum merklicher Weise erfolgen sollen, kann deshalb keine Gültigkeit für sich beanspruchen. Denn wir wissen umgekehrt aus den Befunden der Stratigraphie, daß die Tierwelt des Präkambriums eine ganz andere gewesen ist als heute auf der von Menschen besiedelten Erde.

Wir können allerdings gewisse Modelle herausgreifen, die uns zeigen, daß auch in relativ kurzen Zeiträumen bei ausreichender Generationenfolge und großer Individuenzahl eine Umkonstruktion von Organismen erfolgen kann; das gilt insbesondere für die Untersuchungen an Fliegen und an Bakterien.

Es stellt sich die Frage nach biologischen Modellen, an denen man experimentell studieren kann, wie neue Arten entstehen, sich durchsetzen und wieder aussterben können. Als genialer biologischer Beobachter hat Darwin sehr bald eine besondere Geschehensweise vermutet, die das Aussterben bzw. die Ausbreitung von lebenden Tierarten kennzeichnet. Schon zu Darwins Zeiten war bekannt, daß alle Organismen viel mehr Nachkommen erzeugen, als nötig sind zur Erhaltung der betreffenden Art. So hatten schon die Zeitgenossen Darwins die größten Befürchtungen, die Erde könne durch die Menschheit übervölkert werden. Bei den Tieren allerdings erreichen ja sehr viele Nachkommen nie das Stadium der Geschlechtsreife, sondern viele Individuen gehen schon vorher zugrunde. Macht man die Annahme, daß vor allem schlecht angepaßte Individuen (auch solche, die gegen die Unbilden des Milieus und gegen Krankheiten besonders empfindlich sind) vorzeitig sterben und die besser Angepaßten eine größere Chance haben zu überleben, dann gelangt man leicht zu der Vorstellung, daß im Leben der Tiere die besser angepaßten leichter überleben (survival of the fittest). In der Konkurrenz ums Dasein (struggle for life) haben alle die Individuen die besseren Überlebenschancen, die besser angepaßt sind und damit einen höheren Selektionswert haben. Das ist in den letzten Jahren eindrücklich an zahlreichen Populationen der Taufliege Drosophila experimentell nachgewiesen worden. So erfolgt also beinahe automatisch eine natürliche Auswahl (natural selection) der besser angepaßten Tiere.

Eine direkte Anpassung des Erbgutes an die Einflüsse der Umwelt, wie sie etwa von Lamarck und anderen postuliert wurden, hat man nie nachgewiesen. Auch wenn ganze Generationenfolgen von erbgleichen Tieren mit Giften behandelt wurden, so ließ sich doch keine erhöhte erbliche Giftfestigkeit erzielen. Dagegen hat sich erwiesen, daß sich aus gemischten Populationen von Fliegen, die zunächst alle giftempfindlich

schienen, nach einiger Zeit sehr giftunempfindliche Rassen herauszüchten ließen. Eine genaue genetische Analyse ergab aber, daß in jeder Wildpopulation von Stubenfliegen, die vorwiegend DDT-empfindliche Individuen enthielten, nur einige wenige Individuen auftraten, die hochgradig unempfindlich gegen DDT waren. Bei Anhalten der DDT-Behandlung der Generationenfolgen überlebten schließlich die Resistenten allein, und schon nach wenigen Generationen erschien eine Population, die fast nur DDT-resistente Tiere enthielt. Ganz analoge Beobachtungen sind an Bakterienpopulationen gemacht worden. Auch hier konnte unter dem Einfluß eines Antibiotikums (z.B. Penicillin) ein neuer resistenter Bakterientypus unter dem dauernden Selektionsdruck der angewandten Substanz erfolgen. Deshalb gilt heute die dauernde Anwendung eines einzigen Antibiotikums auf eine bestimmte Bakterienpopulation während längerer Zeit für so gefährlich. Denn so wird der Selektion und der Ausbreitung neuer resistenter Bakterienrassen sehr zum Schaden des Patienten Vorschub geleistet.

So hat die alte Selektionsidee Darwins, welche die Entstehung neuer Rassen erklären sollte, heute im Zeitalter der modernen Genetik und Umweltforschung eine glänzende Bestätigung erlebt, die zudem von sehr großer praktischer Bedeutung ist. Es sind in der Tat Modellfälle nachgewiesen worden, in denen unter dem Einfluß der Selektion ein neuer, zunächst nur seltener genetischer Typus in relativ kurzer Zeit das Übergewicht in einer Population erhält. So ist im Prinzip auch der Weg aufgezeigt, wie in der Stammesgeschichte neue Arten entstehen können. Der Weg zum Verständnis der biologischen Evolution hat sich geöffnet. Welche neuen Einsichten sich bis jetzt schon dem Biologen erschließen, wird in dem umfassenden Werk von Bernhard Rensch an gut untersuchten Modellfällen einläßlich dargelegt, aber damit sind die Probleme nur angeschnitten, die der weiteren Behandlung mit rationalen und kritischen Methoden harren.

### *5. Tierische Gestalten als tiefenpsychologische und ästhetische Erlebnisformen oder als Objekte synoptisch-biologischer Wissenschaft?*

Allerdings bieten sich dem phantasie- und gemütsbegabten Menschen auch noch tiefenpsychologisch verständliche Wege zur Beschäftigung mit der Form und der Lebensweise der Tiere. Tiere überhaupt und höhere Tiere im besonderen stehen dem Menschen gefühlsmäßig sehr viel näher als unbelebte Gegenstände. An ihnen entzündet sich immer wieder seine lebendige und ästhetische Phantasie und seine Neigung, die natürliche Umwelt in mythischer Weise zu erleben. Es braucht ja nicht viel, wie schon die Urgeschichte zeigt, unsere Umwelt mit Göttlichem und mit Geistern zu beleben. Aber solche inneren Erfahrungen des Menschen mit Tieren haben bis jetzt noch nie weitergeführt. Beim Aufbau verbindlicher naturgesetzlicher Vorstellungen, speziell über tierische Organismen, haben sie sich stets als sehr subjektiv erwiesen;

sie waren zu sehr an die Persönlichkeit eines Menschen gebunden. Für die Mitmenschen erwiesen sie sich nur zum Teil als einfühlbar und verständlich und vermochten deshalb in breiteren Kreisen verschieden veranlagter Menschen kein tiefes Echo zu finden. Sie waren auch nicht imstande, die Menschen zu gemeinsamer Erkenntnisarbeit aufzurufen. In diesem Sinne sind manche Publikationen und Vorträge meines Kollegen Adolf Portmann in Basel zu würdigen. Während der wissenschaftliche Autor Portmann mit seinen schönen Untersuchungen über die Biologie der Vögel, aus dem Bereich der Musterung der Mollusken und aus der Biologie des Menschen bestimmte besondere Zusammenhänge herausgearbeitet hat, die die wissenschaftliche Forschung sehr stark angeregt haben, befaßt sich der biologische Schriftsteller mehr in intuitiver Weise mit tierischen Gestalten als Erlebnisgegenständen. In Form von sehr anregend geschriebenen Aufsätzen, die aufschlußreiche «Selbstdarstellungen» des Autors sind, gibt er tiefenpsychologische Deutungen seiner persönlichen Erfahrungen mit den Erscheinungen aus der Tierwelt.

Aber es bleibt ihm versagt, aus den geschilderten Erscheinungen der Tierbiologie zu den erstaunlichen Aspekten tierischen Wesens vorzustoßen, die heute allmählich zum Gemeingut moderner biologischer Forscher werden. Ein breites Spektrum verschiedener Forschungsbereiche erschließt sich heute dem Biologen. Es reicht von der molekularen Biologie zur Zellbiologie, zur Chemogenetik; es umfaßt die Populationsgenetik verschiedenster Richtungen, und es begreift in sich die neuen Befunde über Entwicklungsphysiologie, Gehirnbau, Nervenphysiologie und Verhaltensforschung. Ein ungeheuer weiter Ausblick auf die Eigenart der Lebenserscheinungen tut sich hier auf. Das erkenntnistheoretische Problem lautet heute vor allem, wie es uns Menschen gelingen soll, diese Mannigfaltigkeit zu einer Gesamtschau des Lebens zu vereinen. Nach der ganzen Einstellung Portmanns kann dieser Weg nicht von ihm gegangen werden. Er hat vielmehr den rascheren Weg zu sehr persönlichen Betrachtungen gewählt, die an die Erlebnisbedürfnisse der Mitmenschen appellieren. Hier vermag ich ihm als wissenschaftlicher Biologe nicht mehr zu folgen. Ich möchte vielmehr im Folgenden das mühsame Beginnen auf mich nehmen und aus den vielseitigen neuzeitlichen biologischen Befunden schöpfen und erst von hier aus zu einer rationalen Übersicht über die heutige Problematik tierischer Gestaltungen gelangen, und zwar am Beispiel des dorsalen Achsensystems der Wirbeltiere.

### *6. Synoptisch fundierte wissenschaftliche Analyse eines biologischen Gefüges am Beispiel: Symmetrie und Form im zentralen dorsalen Achsensystem (Stütz- und Bewegungsapparat) der Wirbeltiere*

Bei sehr vielen tierischen Organismen, die im Wasser leben, ist die Grundsubstanz des Körpers relativ weich. Zunächst existieren wohl keine harten Hebelorgane. So ist es auch zu verstehen, daß bei beweglichen

Vielzellern vorerst von undulierenden Bewegungen weicher Körperteile Gebrauch gemacht wird. Bei Plattwürmern z. B. laufen sinusförmige Wellenbewegungen über den Körper hinweg. Bei cölombesitzenden Ringelwürmern entwickelt sich eine eigentlich peristaltische Vorwärtsbewegung, die von vorne nach hinten über den Körper hinwegzieht. Die Produktion sinusförmiger Formveränderungen verlangt das Vorhandensein einer antagonistisch betätigten Muskulatur. Die Steuerung des Bewegungsapparates ist angewiesen auf ein komplex funktionierendes Nervensystem. Als allgemeines, turgorerzeugendes System kommen einzelne Gewebe oder die Körperhöhle der betreffenden Tiere in Frage.

Die schlängelnde Fortbewegung zahlreicher Chordaten und niedriger Wirbeltiere beruht ebenfalls auf der Produktion von sinusförmigen Schlängelbewegungen. Hier finden sich ebenfalls verschiedene morphologisch-funktionelle Komponenten: eine Chorda als elastischer Antagonist der segmentierten Längsmuskulatur, die vom Bindegewebe umfaßten Längsmuskeln, welche eine sinusförmige Verbiegung des Körpers erzeugen; schließlich steuert das Rückenmark mit seinen Spinalganglien den geordneten Ablauf des Schlängelns.

Bezeichnenderweise werden diese motorisch so wichtigen Primitivorgane bei allen Embryonen der Wirbeltiere, beim Hai ebensogut wie beim Menschen, in sehr ähnlicher Weise angelegt: die Chorda, die segmentierten Längsmuskelanlagen und das zentrale Nervensystem. Die neuere Entwicklungsphysiologie zeigt uns zudem, daß die dorsalen Achsenorgane bei allen Wirbeltieren in engster Koordination miteinander entwickelt werden. Die Anlage von Chorda und Somiten induziert die dazupassende Anlage des Rückenmarks. Späterhin wird die Segmentierung des Nervensystems durch die Segmentierung der Muskulatur bestimmt. Es ist also dafür gesorgt, daß das uralte Stütz- und Bewegungssystem des Rumpfes bei Wirbeltieren in gegenseitiger Korrelation angelegt wird.

Dieses System ist ausgesprochen bilateral symmetrisch, und es gibt sehr vielen wasserlebenden Wirbeltieren auch die charakteristische äußere Stromlinienform; denn die Stromlinienform eines Wassertieres bedarf eines relativ geringen Energieaufwandes bei der Fortbewegung.

Dieses Grundsystem der schlängelnden Fortbewegungsweise kann nun, wie sich vor allem bei den Knochenfischen zeigt, in außerordentlich starker Weise variieren. Auf alle Fälle ist es langgestreckt und streng bilateral symmetrisch. Das steht im Zusammenhang mit der gezielten Fortbewegungsweise der Fische, die sich für ihre Fernorientierung der Riechorgane, der Augen, des Labyrinthes und der Seitenorgane bedienen. Es kann hier keinem Zweifel unterliegen, daß diese bilateral symmetrische Stromlinienform eine wesentliche Rolle bei der Fortbewegung der Fische im Wasser spielt. Abgesehen von diesem Grundprinzip finden wir außerordentlich verschiedene Varianten, von den hochrückigen Korallenfischen bis zum schlangenartigen Aal. Hier würde ein außerordentlich reiches Material vorliegen, um einmal die engen Korrelationen festzu-

stellen, die zwischen der Körperform der Fische, ihrem besonderen Aufenthaltsort und ihrer Lebensweise bestehen.

Wie deutlich solche spezifischen Beziehungen festgestellt werden können, läßt sich bis heute an einem anderen Organsystem demonstrieren. Wolfgang Geiger hat die verschiedenen Proportionen der Gehirnabschnitte bei sehr vielen Knochenfischen quantitativ studiert, und es läßt sich hier eine auffallende Korrelation zwischen Betätigungsweise verschiedener Sinnesbereiche, der Lebensweise und der Proportion der Gehirnabschnitte feststellen. Analoges sollte erwartet werden für die Beziehungen zwischen Körperform und der Eigenart der Lebensweise.

Da sich die Besiedlung von Biotopen durch verschiedene Organismen manchmal nur sehr langsam vollzieht, können wir die Bevorzugung bestimmter Biotope durch bestimmte Lebenstypen nicht immer mit Sicherheit bestimmen. Bei lange stabilisierten Beziehungen ist immerhin eine klare Situation zu erwarten. Man darf sich also Selektion nicht immer so vorstellen, daß alles Nichtangepaßte sofort vernichtet werde, sondern es ist sehr oft zu erwarten, daß präadaptierte Träger von speziellen Eigenschaften erst allmählich ihre optimalen Biotope beziehen und sich dort vermehren.

So würde sich also heute eine genauere ökologisch-morphologisch-funktionelle Analyse der Knochenfische auf die Umwelteignung hin sehr lohnen. In der Stammesgeschichte der Wirbeltiere ist aber nicht nur die ursprüngliche Anpassung des dorsalen Achsenapparates sehr aufschlußreich, sondern ebenso erstaunlich ist es, daß die Wirbeltiere beim Übergang zum Landleben in der Lage waren, vom ursprünglichen Gefüge des Rückens aus eine weitgehende Umkonstruktion vorzunehmen. Beim Übergang zum Landleben bleibt zwar die Segmentierung des Rumpfes erhalten, aber die Extremitäten mit ihrem Skelett, ihrer Muskulatur und ihrer Motorik bekommen mehr und mehr ein großes Gewicht im Dasein der betreffenden Tiere; wir brauchen etwa nur an die Vögel oder an die Primaten zu denken. Jetzt wird das Achsenskelett zur mechanischen Grundlage der Extremitäten, welche die Motorik ihrer Träger immer mehr bestimmen. Die Stromlinienform verschwindet relativ rasch. Es tritt die uns so gewohnte Gliederung der Tiere in Kopf, Hals, Rumpf und Schwanz auf. Ferner übernimmt die Rumpfwirbelsäule die Formgestaltung des Körperäußeren und die Gestaltung der Körperhöhlen. Wenn wir zurückgreifen auf die embryonalen Achsenorgane, etwa eines Fisches, eines Reptils und eines Primaten, so bemerken wir, daß diese Systeme embryonal sehr ähnlich sind. Aber die daran anschließende Umkonstruktion bzw. Weiterbildung der genannten Systeme zum Stromlinienrumpf der Fische oder zum schon frei beweglichen und zugleich tonnenförmigen Rumpf der Primaten setzt eine außerordentlich weitgehende Umkonstruktion der embryonalen Anlagen voraus.

Ein Bereich der entwicklungsphysiologischen Umkonstruktion, der bei Säugetieren besonders stark zugänglich ist, ist die Lenden- und Beckenregion. Einerseits gibt es adulte Säuger mit stark reduzierter Beckenzone, und anderseits greifen verschiedene Letalgene in die

embryonale Morphogenese der Lenden- und Kreuzregion bei verschiedenen Nagetieren und Vögeln ein. Eine vergleichende Studie über die genetische Entwicklungsphysiologie der Lendenregion würde sich sehr lohnen (s.a. Lehmann, 1955).

Nach dem Gesagten darf man also nicht erwarten, daß beliebige Umkonstruktionen bei Säugetieren im Bereich des Hinterrumpfes vor sich gehen können; aber es können sehr wohl unter bestimmten Genwirkungen neue Typen entstehen, die eine neuartige Umwelteignung zeigen. Wenn sich dann ökologische «Nischen» finden, wäre eine weitere Fortpflanzung eines solches Typs möglich.

### *7. Synoptische Fragestellungen und Leitprobleme als Aufgaben zeitgemäßer Biologie*

Sobald man die Mannigfaltigkeit der Wirbeltiere, und nicht nur diese allein, daraufhin betrachtet, wie Organisation und besondere Umwelteignung zusammenhängen, öffnet sich eine Welt neuer, noch wenig untersuchter Probleme. Methoden physiologischer Ökologie, die auf statistisch gesicherten Erhebungen beruhen, können hier neue Informationen liefern, ebenso wie Populationsgenetik und experimentelle Evolutionsforschung.

Es hat wirklich keinen Sinn, diese neuartigen Zweige biologischer Forschung als suspekt, weil für den Menschen «zu technisch», zu diffamieren. Vielmehr ist die Zeit reiner Beschreibung der Formen vorbei, und die Forderung nach allseitiger Verknüpfung biologischer Fragestellungen in synoptischer Art ist heute unvermeidlich geworden. Kritische und zugleich synoptische Darstellungen biologischer Probleme allein können die biologische Erkenntnis fördern; damit haben wir freilich auch an die qualitative Leistung des biologischen Forschers große Ansprüche zu stellen.

Ob Erscheinungen submikroskopischer Art oder nervenphysiologische Leistungen, mit dem Kathodenstrahloszillographen aufgenommen, untersucht werden, die biologische Problemstellung ist auch heute bei bedeutenden Biologen wie W. R. Heß, K. v. Frisch oder K. Lorenz unverkennbar. Der Ausdruck «Biotechnik» trifft für die Arbeiten dieser Biologen den Sachverhalt in keiner Weise.

Wenn heute von seiten der Medizin Wünsche an die Biologen der Universität laut werden, die eine Reform des akademischen Unterrichts anstreben, dann sollte allerdings auch hier keine vierzig Jahre alte Konzeption der Organismen zugrunde liegen, sondern eine zeitgemäße, die der Gedankenwelt unserer führenden Forscher entspricht und ihnen gegenüber ein echte Aufgeschlossenheit erkennen läßt. Heute bemühen sich die Forscher auf internationalem Boden, die Phänomene des Lebens und nicht mehr allein die Form von Organismen tiefer zu erfassen. Tierische Wesen erscheinen uns heute nicht mehr allein als adulte und etwas erstarrte Typen im Rahmen eines nüchternen Systems der Tiere, son-

dern als dynamische Gebilde, die in Raum und Zeit der Evolution ihre Form in gesetzmäßiger Weise wechseln. Sie sind ihrer Umwelt aufs engste verbunden, sie besitzen genetische Konstanz und können sich im Laufe größerer Zeiträume an neue Umweltbedingungen anpassen. In tierischen Lebewesen ist strukturelles und biochemisches Geschehen aufs engste an submikroskopische Dimensionen gebunden. Feinste Regulationsvorgänge des Zellgeschehens im einzelnen und straffe Leitung der Zelltätigkeit durch den Genbestand ergänzen sich in erstaunlicher Weise.

Kein Biologe braucht Mystiker zu werden angesichts der sichtbaren und unsichtbaren Mannigfaltigkeit der einzelnen Lebensvorgänge. Zum bewundernden Erstaunen allerdings bietet uns heute die lebende Natur vielfachen Anlaß. Immerhin muß der Biologe als Person den Mut finden, sich stetsfort neuen Einsichten in Lebensvorgänge vorurteilslos aufzuschließen.

Heute muß man sich darum bemühen, die oft so abstrakte und unanschauliche Dynamik im Rahmen eines gestalteten Lebensgeschehens den Studenten an unmittelbaren Lebensvorgängen ebenso nahezubringen wie ihnen den Blick zu schärfen für das, was von der Forschung bis heute noch nicht aufgeklärt wurde. Dieser Haltung bedarf wohl auch jeder aufgeschlossene junge Student der Medizin, der später das Lebewesen Mensch nicht nur als Biologe, sondern auch als heilender Helfer zu betreuen hat.

**Literaturverzeichnis**

Evolution as a Process. Edited by J. Huxley, A.C. Hardy and E.B. Ford. Allen & Onwin, London (1954).

HARTMANN N.: Philosophie der Natur. De Gruyter, Berlin (1950).

LEHMANN F.E.: Die embryonale Entwicklung. Entwicklungsphysiologie und experimentelle Teratologie. Handbuch der allgemeinen Pathologie, Bd. IV/I. Springer-Verlag, Berlin (1955).

PORTMANN ADOLF: Die Tiergestalt. F. Reinhardt, Basel (1948).

RENSCH BERNHARD: Neuere Probleme der Abstammungslehre. F. Enke, Stuttgart (1954).

# Sur la genèse de formes symétriques et asymétriques chez les Végétaux Supérieurs

Par Prof. Dr L. Plantefol (Paris)

Votre thème général «Symétrie et forme» unit deux mots qui doivent s'opposer dans votre pensée. Puisque nous parlons maintenant d'êtres vivants, vous voudriez que la forme nous apparaisse comme le donné concret construit par la matière, par chaque matière vivante spécifique, qui se réalise par les lois de sa physiologie et s'exprime comme un ensemble d'organes accomplissant les fonctions de la croissance et de la vie. En face de «forme», ainsi toute chargée de réalité matérielle, vous placez l'abstrait «symétrie»; car le mot est inévitablement abstrait... Si une loi mathématique peut être dégagée de l'étude d'un être donné, vous rangez cette loi mathématique au chapitre de symétrie et ce que vous nous demandez aujourd'hui, c'est de montrer quelles relations existent entre le donné concret et la loi abstraite. Nous devons être bien d'accord sur cette définition du sujet; car c'est elle qui organisera mon exposé. – J'insiste: forme pourrait être également un mot abstrait; avoir, à propos d'une espèce donnée, la valeur d'une idée platonicienne, qui existe dans le monde des Idées, d'une existence supérieure à celle que nous vivons. Et ce seraient les rapports entre la forme ainsi entendue et la symétrie qu'il s'agirait de dégager. Ce jeu d'idéalisme ne saurait être mon problème. Je m'en excuse.

Et je vous demande la permission de vous lire quelques lignes écrites en 1827 dans son *Organographie végétale* par le grand botaniste que fut Augustin Pyrame de Candolle, au chapitre où il parle des lois générales de la symétrie organique et oppose les deux écoles qui se sont partagé les savants:

«Les uns ont tenté d'établir des lois sur la structure des êtres d'après des considérations générales, et comme on a coutume de le dire *a priori*. Les autres ont observé attentivement les faits qui semblaient s'écarter des lois de la régularité; ils ont vu qu'ils s'en écartaient presque tous d'après des principes uniformes, et en groupant ainsi les irrégularités apparentes, ils les rattachent peu à peu à des lois régulières, et, remontant des faits partiels aux faits généraux, ils tentent de reconnaître les lois de la symétrie *a posteriori*.»

J'accepte pleinement ce texte qui ne date pas encore; mais pour y mettre la marque de notre siècle j'ajouterai quelques mots à la dernière phrase, qui deviendra:

ils tentent de reconnaître les lois de la symétrie *a posteriori*, par l'observation et surtout par l'expérimentation.

Quand on parle de symétrie chez les Végétaux, on pense tout de suite à la fleur, expression typique de la vie végétale. Une fleur régulière comme la fleur de Pommier a une symétrie radiale parfaite. Comportant 5 sépales, 5 pétales, 5 *n* étamines, 5 carpelles, disposés en verticilles, on a, par rotation d'un cinquième de circonférence, 5 images exactement superposables; et chez une fleur de Muflier, fleur irrégulière que TOURNEFORT disait fleur personnée, parce qu'elle fait penser à un masque de théâtre antique *(persona)*, il y a une symétrie par rapport à un plan médian.

Mais il y a aussi chez les Plantes Supérieures d'autres symétries. Elles sont géométriquement parfaites, autant que le comporte la nature vivante, dans les rameaux végétatifs dont les feuilles sont verticillées, qu'elles soient opposées deux à deux, ou qu'elles ceinturent la tige au nombre de 3, 4 ou davantage, à chaque niveau auquel elles sont fixées et régulièrement réparties.

Enfin chez des formes apparemment énigmatiques comme des Cactées, c'est la masse entière du corps, racines exceptées, qui dès l'abord impose la notion de symétrie.

Le terme a d'ailleurs été pris souvent par les botanistes dans un sens plus large que cette symétrie géométrique. Lorsque CORREA DA SERRA écrit en 1805 dans ses *Observations sur la famille des Orangers:* «J'entends par symétrie l'arrangement particulier des parties qui résulte de leur situation et de leur forme», il n'est plus question de géométrie, mais d'une régularité de l'organisation. La même définition large anime la pensée de DE CANDOLLE qui, allant beaucoup plus loin que LINNÉ et plus loin que GOETHE dans une voie où ceux-ci s'étaient engagés, déclare que «tous les êtres organisés sont réguliers dans leur nature intime» et identifie presque les idées de symétrie et d'arrangement régulier des parties. On peut ajouter, poussant plus loin les constatations de DE CANDOLLE et utilisant les faits ontogéniques rencontrés surtout depuis PAYER, que les phénomènes de développement ont une importance considérable dans la compréhension de la forme.

## I

### *Cellules initiales et points végétatifs*

En effet la symétrie des Végétaux entendue dans ce sens large est nécessairement en rapport avec des phénomènes de croissance, avec des phénomènes de multiplication cellulaire orientée. J'en prendrai comme exemple le cas d'une Algue brune, la *Dictyota dichotoma*, des eaux

marines de l'Océan ou de la Méditerranée. Très élevée en organisation, cette Algue s'accroît par le moyen d'une cellule apicale à l'extrémité de chacune de ses divisions; grosse cellule, biconvexe et allongée en fuseau. A son maximum de taille, elle divise son noyau suivant son axe vertical; elle sépare vers le bas une cellule segmentaire et retrouve ainsi sa taille minimale. Tandis qu'elle recommencera à grossir pour se diviser à nouveau, la cellule segmentaire sera à l'origine de 3 plans de cellules superposés; l'Algue s'élargit par la croissance de ces cellules, tandis qu'elle s'allonge par le fonctionnement répété de la cellule apicale [1].

A un rythme beaucoup plus lent, la cellule apicale se divise dans un sens qu'on peut dire tangentiel; les 2 cellules filles vont demeurer sur le bord de l'Algue et auront le rôle d'initiales. Elles se trouvent écartées l'une de l'autre par les cellules segmentaires auxquelles toutes deux donnent naissance et les cellules qui proviennent de celles-ci.

Le thalle de l'Algue est ainsi ramifié par dichotomie. Comme toutes les apicales se divisent dichotomiquement dans le même sens, l'Algue constitue un plan très lacinié. Si elle semble dans l'eau un buisson de rameaux plats, elle s'étale d'elle-même et sans plis sur la feuille du papier d'herbier. Elle a une symétrie plane, étant constituée de 3 plans de cellules superposés, et sa laciniation comporte une assez grande régularité.

C'est le jeu d'autres initiales que nous allons étudier et mettre à l'épreuve expérimentalement à propos de la création de la symétrie chez les Plantes Supérieures.

Voici une tige feuillée de Lilas. Sensiblement cylindrique et symétrique par rapport à son axe, elle porte des paires de feuilles opposées qui sont symétriques l'une par rapport à l'autre; elles sont décussées, c'est-à-dire alternativement disposées dans 2 plans à 90°, ce qui est symétrie encore. Enfin les feuilles ont, elles-mêmes, une symétrie bilatérale. Cette tige feuillée est due au fonctionnement d'un *point végétatif*, masse proliférante d'abord cachée sous les écailles d'un bourgeon, portée maintenant par la croissance sous-jacente au bout de la tige qu'elle a créée. Pour dégager le point végétatif, il faut enlever successivement au sommet de la pousse feuillée, après les petites feuilles vertes qui entourent le bourgeon terminal, des paires de feuilles de plus en plus petites, verdâtres puis incolores. Elles sont insérées de plus en plus haut, progressivement rapprochées de l'axe en même temps que leur taille diminue; ce ne sont plus que des lames triangulaires et enfin 2 minuscules pyramides élevées face à face en bordure du sommet plat de la tige. Feuilles, ébauches, primordiums désignent les états successivement rencontrés. Aux deux bouts de la surface tabulaire que limitent les primordiums, un ensemble de cellules actives constitue un initium, future feuille commençant sa croissance, non encore saillante. Au total, il y a symétrie parfaite, dans l'espace et dans le temps. Des feuilles symétriques naissent et croissent synchroniquement [2].

Avec d'autres Végétaux, la tige se termine en un cône arrondi dont le sommet est libre; des protubérances foliaires l'entourent, ne créant aucune symétrie: il n'y en a jamais 2 à même distance du sommet;

elles sont d'autant plus petites qu'elles sont plus proches du sommet. Au-delà il y a encore, non décelable sans coloration, car il ne déforme pas la surface, un initium foliaire commençant sa croissance. Il en est ainsi du Lupin. Donc ici, au contraire du cas précédent, nulle symétrie dans la réalisation foliaire, comme il n'y en a pas dans la répartition des feuilles échelonnées toutes à des niveaux différents sur la tige adulte.

Voici en effet 2 domaines qui sont étroitement unis: le fonctionnement du point végétatif créant les feuilles, la disposition des feuilles sur la tige adulte. Il faut les étudier de concert. La manière dont fonctionne le point végétatif explique la disposition foliaire. Inversement la phyllotaxie ou disposition des feuilles sur les tiges explique la constitution et le fonctionnement du point végétatif. J'ai souhaité dans mes recherches unir plus étroitement ces 2 domaines qu'on ne l'avait fait jusqu'alors. En 1947, sur l'étude de quelques exemples, j'ai énoncé des idées et tracé un programme d'expériences. Les résultats intéressent votre sujet: «Symétrie et forme». Je vous apporte aujourd'hui les confirmations établies par les travaux de l'école française de morphologie qui s'est formée autour de moi.

J'exposerai d'abord l'interprétation du point végétatif à laquelle m'a conduit la méthode utilisée.

L'image classique du point végétatif, construite au milieu du 19e siècle, comporte au sommet, disposées suivant l'axe, des cellules initiales de l'activité desquelles dérivent les cellules nouvelles, formées à l'extrémité de la tige. Cela commença avec la théorie de l'*initiale apicale* unique, exposée par NAEGELI en 1858. Puis en 1868 HANSTEIN proposa la théorie des histogènes qui comporte 3 groupes d'*initiales apicales*, superposés suivant l'axe et donnant chacun naissance à une sorte de feuillet. Elle est abandonnée aujourd'hui en ce qui concerne la prédestination des cellules dérivant des initiales, mais l'idée d'initiales apicales est conservée dans toutes les interprétations du point végétatif.

Voilà donc la première idée qui doive être soumise à une épreuve: supprimons au sommet plusieurs épaisseurs de cellules. Si les cellules initiales sont apicales, nous les aurons supprimées: les phénomènes de croissance se trouveront suspendus ou profondément altérés. Or j'ai montré, il y a 16 ans, qu'on pouvait scalper le point végétatif de la Fève, en pleine poussée, sans déterminer la moindre modification de la croissance. J'étais donc porté à penser que les initiales ne sont pas apicales, mais sont logées ailleurs qu'à l'apex.

Les feuilles ne naissent pas au sommet du point végétatif, mais sur les flancs de celui-ci. Là nous sommes sûrs qu'il y a des cellules très actives qui jouent le rôle d'initiales dans l'édification de la feuille. Voici (fig. 1, 1) une coupe d'un bourgeon terminal de Lupin. 9 jeunes et très jeunes feuilles sont coupées transversalement; voici la tige sectionnée presque à son apex et le primordium de la plus jeune feuille $I_3$. En ce point il y avait des initiales dont la multiplication et les développements qui la suivent donneront une feuille. Quand, sur la pousse plus jeune (fig. 1, 2), la feuille $P_4$ était à l'état où est $I_3$ aujourd'hui, elle occupait au point

végétatif cet emplacement, marqué de traits – et pour $P_5$ un peu plus tard, c'était celui-ci, marqué de points. Ces 3 feuilles suffisent presque à fermer un anneau. Voici (fig. 1,3) l'apparence qu'il prend si nous superposons, à un grossissement plus fort, les initiums des 9 feuilles. Chaque point de cet anneau a fourni successivement 2 ou 3 feuilles, échelonnées dans le temps, par exemple ici $P_6$ et $P_1$. Nous pouvons tracer sur le cône du point végétatif les limites d'une sorte d'anneau que, d'une manière hypothétique encore, nous appellerons *anneau initial.*

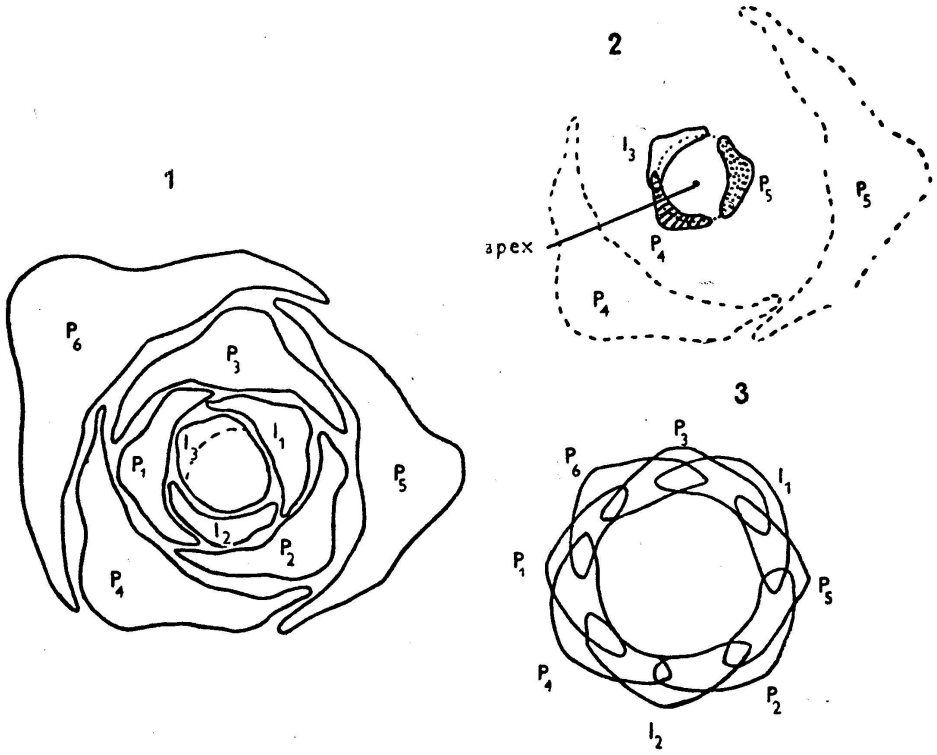



Fig. 1

Naturellement cet anneau initial, il faut le montrer, dans la masse du point végétatif, sur les coupes longitudinales et transversales passant à ce niveau – et il faut en étudier le fonctionnement.

Le montrer ? Il va de soi que si, sur les coupes, il apparaissait délimité par un double trait, il aurait été repéré depuis longtemps. Il est fait de cellules que des nuances différencient des cellules voisines. Voici la photographie d'une coupe colorée à l'hématoxyline: section longitudinale axiale d'un apex de *Chrysanthemum segetum.* A droite la face supérieure de la 3e feuille à partir du sommet; la 2e feuille n'est visible qu'en haut. Quant à la toute jeune première feuille, terminant l'état d'initium et commençant à devenir primordium foliaire, puisqu'elle fait à peine saillie, elle montre précisément la coupe de l'anneau initial, à gauche. La coloration sombre du cytoplasme marque l'activité du tissu. Ici, à droite, nous coupons l'anneau initial sur 3 ou 4 épaisseurs

de cellules, à cytoplasme chromatique; cette région a participé antérieurement à la construction de la feuille 3; elle se reconstitue en attendant l'édification d'une feuille nouvelle. L'anneau initial ceinture ainsi la base du cône végétatif; il a près de 50 microns d'épaisseur sur les 200 qu'est le diamètre de ce cône à sa base [3].

Cette vue nous montre les autres tissus du point végétatif. Tendu en un plan à l'intérieur de l'anneau initial, le *méristème médullaire*. Voici 2 cellules de ce méristème en pleine activité; en voici une autre actuellement au repos; cellules plates de type cambial, elles donnent naissance à des rangées de cellules de moelle, largement vacuolisées et contenant peu de cytoplasme. Enfin, au-dessus de l'anneau initial et du méristème médullaire, un ensemble de cellules qui ont un caractère méristématique indiscutable, mais qui, presque inactives et un peu vacuolisées, prennent très peu de colorant. C'est ce tissu que mon élève, collaborateur et ami, M. Buvat, a appelé *méristème d'attente*... nom très juste, car ce méristème attend de jouer un rôle essentiel, tardivement, pour former la fleur terminale ou l'inflorescence. Anneau initial, méristème médullaire, méristème d'attente, voilà les 3 parties que nous distinguons dans le point végétatif – parfaitement symétrique par rapport à l'axe de la tige.

L'idée que le tissu initial de la tige pourrait n'avoir pas une position apicale et axiale en même temps, a beaucoup choqué; le schéma que nous avons établi du point végétatif et de son fonctionnement, mes collaborateurs et moi, a été traité de «révolutionnaire». Sans doute n'est-ce pas un outrage, mais c'était pour nous une raison de multiplier nos preuves. Voici les plus frappantes.

1. Cytologiques d'abord. J'y ai un peu fait allusion: les 3 tissus du point végétatif ont des caractères différents. J'attachais une grande importance à ce que leur étude fût faite à la perfection. Je me suis assuré sur ce point la collaboration du meilleur cytologiste français R. Buvat, élève et héritier de Guilliermond. Nous avons eu de nombreux travailleurs; il fut publié plus de 50 notes et mémoires et 7 thèses furent consacrées à la cytologie. Ce n'est pas le lieu de parler des différences cytologiques qui opposent les 3 tissus; elles sont vraiment affaire de spécialistes. Faites-moi confiance quand je vous dis: les cellules apicales axiales n'ont pas vraiment les caractères d'initiales actives.

2. Les relevés de mitoses constituent un excellent procédé. Par définition les apicales doivent se diviser souvent. Pour avoir des nombres significatifs, on totalisera les résultats de plusieurs observations. On a figuré ici le contour du point végétatif et les limites des cellules pour une jeune plante de *Chrysanthemum segetum* initiant sa 7e feuille; on a superposé les mitoses provenant des 10 coupes axiales de 10 plantes pareilles. L'activité mitotique est presque nulle à l'apex, qui ne saurait comporter d'initiales [4].

3. Autre témoignage de l'activité: la richesse locale en acides nucléiques. En premier lieu le test de Brachet. La coloration par la pyronine rend sombre chaque point de la préparation, proportionnellement à sa teneur en acide ribonucléique. Voici chez l'*Impatiens Roylei*, plante à

feuilles verticillées par 3, une coupe transversale au niveau de l'anneau initial. Vous voyez, plus ou moins détachées de la tige, les bases de 3 jeunes feuilles en pleine croissance par leurs cornes foliaires. L'anneau initial est très net. Il ceinture la tige et comporte les soubassements de 3 feuilles qui se développent. Vous voyez comme est moins coloré, au centre, le méristème d'attente [5].

4. Dernier test plus complet encore. Dans la plante dont on va étudier le point végétatif en coupe, on injecte de l'adénine tritiée, c'est-à-dire rendue radioactive par du tritium 3H. Une coupe fournit 2 études: une autoradiographie montre où, dans le point végétatif, sont venues les molécules d'adénine tritiée; la coupe elle-même est ensuite colorée; la superposition de la coupe à la radiographie permet de préciser cytologiquement, par exemple noyau ou cytoplasme, la localisation de l'adénine [6].

Sur l'autoradiographie on voit quelques amas circulaires de taches noires. La coupe montre que ce sont des noyaux qui se sont chargés d'adénine, parce qu'ils réalisaient la synthèse de chromatine; il n'y en a guère que dans l'anneau initial. Des points isolés correspondent à des nucléoprotéides cytoplasmiques; il y en a un peu partout, mais surtout dans l'anneau initial.

Cette expérience, réalisée il y a quelques mois par Mme Lance, confirme que pour ces tests la zone apicale est presque vide; elle ne saurait être active.

Au total l'existence de l'anneau initial me semble amplement démontrée. On l'a vérifiée chez de nombreuses Dicotylédones, des Monocotylédones, des Gymnospermes, même chez des Ptéridophytes. Je n'insiste pas davantage à son sujet. Nous ne manquerons pas d'ailleurs de rencontrer d'autres preuves de son existence en voyant comment il intervient dans la phyllotaxie – réalisant soit des formes symétriques (feuilles opposées et verticillées), soit des formes apparemment asymétriques (disposition spiralée).

## II

### *La phyllotaxie des tiges symétriques et asymétriques*

Quel lien existe-t-il entre les feuilles portées par une tige ?

La phyllotaxie classique admet *a priori* que l'ensemble des feuilles portées par une tige constitue un seul système. Son étude part des formes qui ne sont pas verticillées. On peut tracer la spirale génératrice ou *spirale génétique* en unissant toutes les feuilles de proche en proche dans l'ordre où elles sont apparues sur la tige. Entre 2 feuilles successives, la spirale tourne d'un angle constant pour une espèce donnée et constituant sa divergence. Remarquons en passant qu'il ne peut y avoir aucune symétrie géométrique vraie. Mais on sait qu'en fait, même pour cette phyllotaxie spiralée pour laquelle la théorie a été construite, tout est loin d'être parfait. Les divergences le long d'une spirale génétique sont

souvent très variables, par exemple du simple au double – et de plus, celui qui trace la spirale en se laissant guider au mieux par les divergences, doit parfois, au lieu de progresser vers le sommet, se laisser ramener en arrière par une ligne irrégulière: métatopie, dit SCHIMPER. Enfin le schéma que nous avons tracé s'applique bien mal aux verticillées. Sur une tige de Lilas on grimpe à pic d'un verticille au suivant en tournant de 90° puis on trace dans le verticille un palier horizontal sur 180° de la tige, et ainsi de suite... La prosenthèse de SCHIMPER, qui prétendait légitimer cette variation de divergence au changement de cycle, n'était qu'une vertu dormitive. Ceux, modernes, qui conservent la spirale génétique, ne font pas beaucoup mieux.

Je pense au contraire que toutes les phyllotaxies et toutes leurs anomalies peuvent être expliquées simplement par le recours aux *hélices foliaires multiples*, théorie étayée et, peut-on dire, démontrée par une expérimentation importante.

Que sont les hélices foliaires multiples ?

Lorsque dans votre jardin les Lis blancs seront défleuris, laissez la tige sécher sur pied. Vous recueillerez à la fin de l'été, un bâton creux, blanchâtre, remarquablement droit, sur lequel les insertions des feuilles tombées sont marquées par de petits traits transversaux. Essayez de tracer la spirale génératrice. Si vous y réussissez sans hésitations et sans métatopies, c'est que vous êtes une personne qui gagne aux loteries et que vous avez eu un échantillon parfait.

Mais appliquez cette autre règle: prenez l'insertion 1, celle qui est la plus basse sur la tige et qui correspond à une large écaille développée sous terre. Menez de son bord gauche, puis de son bord droit les 2 génératrices orientées vers le haut; sur l'une ou l'autre de ces génératrices, vous rencontrerez le bord d'une insertion foliaire, placée par rapport à à la génératrice à l'inverse de l'insertion 1. Refaites de même depuis l'autre bord de cette seconde insertion, vous rencontrerez une troisième insertion foliaire et ainsi de suite jusqu'en haut. Bien des insertions restent libres. Repartez de la seconde et plus tard de la 3e feuille au bas de la tige, et procédez de même... Toutes les insertions foliaires seront rangées en 3 séries orientées parallèlement qui pourront comporter jusqu'à une soixantaine d'insertions et en auront le même nombre à une unité près. Vous venez de tracer les 3 hélices foliaires qu'on rencontre généralement sur la tige du Lis blanc adulte, formant un gros bulbe et donnant une longue grappe de fleurs. La phyllotaxie de cette tige ? Elle ne comporte pas une spirale génétique, la plupart du temps impossible à tracer; elle comporte 3 hélices foliaires [7].

Nous avons appliqué dans notre construction la règle de contiguïté qui est l'un des éléments de la définition de l'hélice foliaire. Au niveau de l'anneau initial, les initiums successivement formés par une hélice foliaire sont contigus l'un à l'autre. La croissance en longueur de la tige les écarte les uns des autres dans le sens de la longueur, mais les feuilles demeurent contiguës par leur segment foliaire qui prolonge le pétiole sur la tige et est assez souvent apparent à sa surface. Contiguës, les

feuilles d'une hélice foliaire sont liées entre elles par un lien réel que nous fera constater l'expérimentation.

Sans vouloir me permettre une rêverie, je dirai encore...: comme il semble plus simple d'expliquer l'induction qui fera naître dans l'anneau initial une feuille nouvelle, en contiguïté avec la dernière formée sur l'hélice foliaire – plutôt que les inductions et inhibitions qui en feraient naître une sur la spirale génétique le plus loin possible des deux dernières feuilles formées et d'initiales axiales. Mais comme il n'y a rien d'expérimental sous cette phrase, je passe vite.

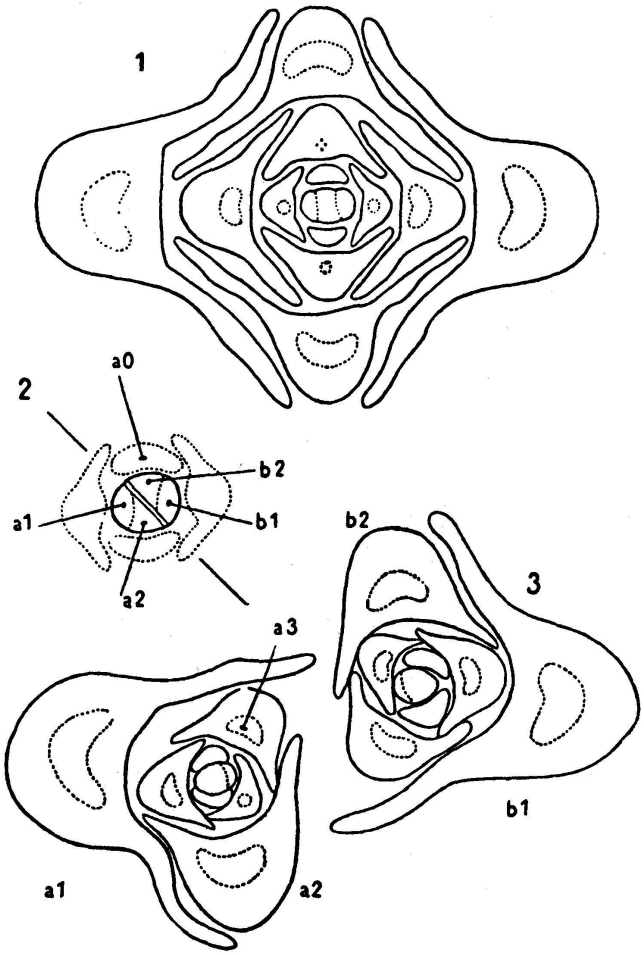



Fig. 2

Il faut expérimenter sur les hélices foliaires. Je chercherai une première expérience dans un mémoire de M. et R. Snow publié en 1935 et dont le titre traduit en français est: «Sections diagonales à travers des apex décussés». Le but de ce mémoire était la mesure des angles de divergence après la section indiquée. Le résultat qui me semble essentiel attire à peine l'attention des auteurs; il ne répond pas à leur programme.

La figure 2, en 1, illustre la phyllotaxie opposée décussée de l'*Epilobium hirsutum*. La coupe est menée au niveau où les deux plus jeunes feuilles sont insérées sur l'apex. Elles sont simplement des primordiums, à peine saillants. Il y a au total 7 paires de feuilles représentées dans ce

bourgeon et l'ensemble a une symétrie parfaite. En 2 est figuré, un peu plus grossi, le schéma de l'opération. Obliquement une section est menée entre les 2 primordiums, section oblique, de manière à laisser intacts également les 2 primordiums $a_1$ et $b_1$ et les bords du point végétatif où doivent paraître les primordiums suivants $a_2$ et $b_2$. Les deux lèvres de la fente commencent à s'écarter. Le reste de la figure, sous le n° 3, est une coupe comparable à celle de 1, faite 15 jours après l'opération. La tige, qui s'est développée, s'est partagée en 2 parties qui sont isolées, chacune étant entourée par une série de feuilles. Mais il n'y a dans chaque série qu'une feuille de chaque taille et il y a dans chacune des 2 séries des

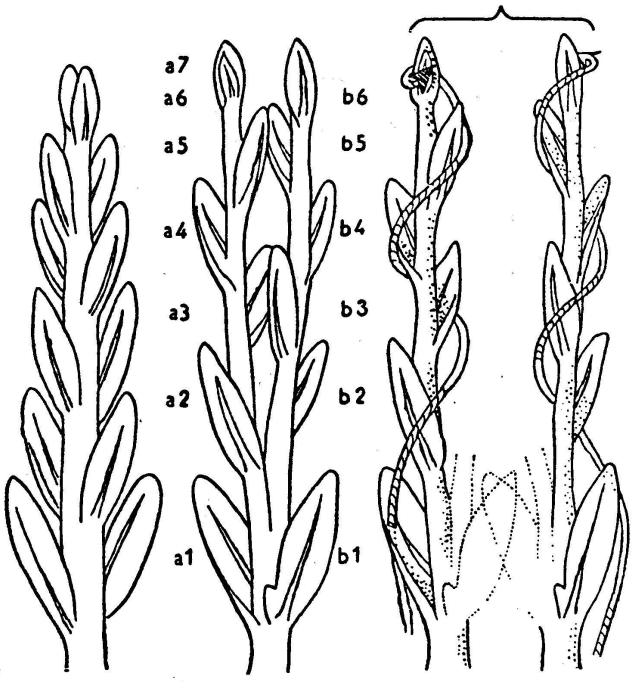



Fig. 3

feuilles qui se correspondent par leur taille – et même par leur position. $a_1$ correspond à $b_1$, $a_2$ correspond à $b_2$, mais elles sont portées par des tiges différentes. On peut, allongeant les axes pour schématiser l'expérience, représenter les résultats comme ceci : voici d'abord (fig. 3, 1) la tige normale avec ses verticilles de feuilles opposées décussées – puis voici en 2 le résultat de l'opération : 2 tiges indépendantes depuis le point où a été menée la section, portant une série de feuilles isolées, de plus en plus jeunes. Enfin, voici en 3, séparées l'une de l'autre à la base, les deux demi-tiges qui portent chacune une hélice foliaire. La tige normale totalise sur un même axe deux hélices foliaires. La section, isolant l'un de l'autre les 2 initiums terminaux, a séparé les 2 hélices foliaires.

Ainsi, s'il y a symétrie parfaite dans la distribution des feuilles sur la tige, c'est que, simultanément, deux réalités, indépendantes l'une de l'autre sur la tige où elles se développent, fournissaient des feuilles égales ; et que leur synchronisme était parfait... Pas toujours parfait d'ailleurs : sur les rejets de Frêne par exemple, les 2 feuilles opposées ne sont pas toujours au même niveau.

Est-il besoin de dire que, si en pratiquant l'opération, on procède à l'ablation d'une moitié de l'apex, il ne se développe qu'une demi-tige avec une hélice foliaire. Le morceau qu'on enlève renferme avec les initiales qui auraient donné la demi-tige manquante, une masse active, spécialisée, qui va continuer l'hélice foliaire et que j'appellerai *centre générateur* de l'hélice foliaire.

Il faut donc maintenant prouver l'existence de ce centre. Peut-on faire mieux pour cela que de limiter le traumatisme fait au point végétatif à la plus petite masse de matière dont la destruction entraîne la suppression de l'hélice ? Nous préciserons ainsi que ce centre se trouve au niveau de l'initium qu'il est aisé de détruire seul.

Je citerai à ce sujet une expérience de mon élève LOISEAU. Elle porte sur l'*Impatiens Roylei* qui comporte des verticilles de 3 feuilles, nous l'avons vu. Il s'agit de blesser l'anneau initial par piqûre sur un primordium très jeune ou un initium. Et puis on laisse croître. La figure 4 représente la développée d'une tige, c'est-à-dire la surface de la tige fendue sur une génératrice et étalée sur un plan. La piqûre a été faite sur l'initium $a_3$, du 3e verticille. Elle a laissé une trace au-dessous d'elle entre $a_2$ et $c_2$. L'initium piqué $a_3$ n'a pas donné de feuille ; il n'y en a donc que 2 à ce verticille et, sur l'emplacement normal de $a_3$, une surface sans feuille. Mais au cours du développement qui se réalise après la piqûre, alors que des feuilles nouvelles sont nées sur l'anneau initial, il a manqué une feuille à chacun des verticilles suivants. Nous sommes fondés à penser que les 2 feuilles subsistant à chaque verticille font suite aux 2 feuilles du verticille précédent, aussi doit-on noter les 2 feuilles existantes comme elles sont notées ici : $b_4$, $b_5$... correspondent à $b_3$ ; $c_4$, $c_5$... correspondent à $c_3$ ; elles participent des 2 hélices foliaires b et c. La piqûre, blessant le centre générateur de l'hélice a, a supprimé au-delà de la feuille $a_3$ les 4 feuilles qui allaient constituer la suite de l'hélice a. Laissant intact le fonctionnement des hélices b et c, elle montre qu'il y a indépendance entre les 3 hélices de cette tige comme l'expérience de SNOW avait montré l'indépendance des 2 hélices foliaires dans son exemple à feuilles opposées décussée.

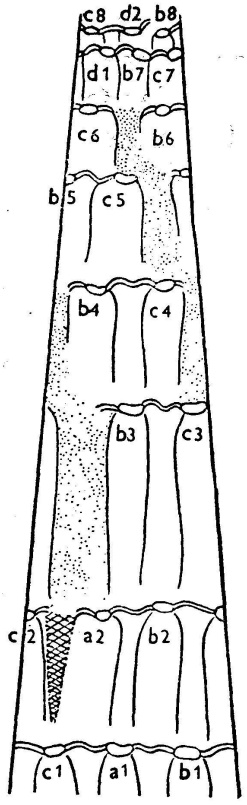


Fig. 4

Une remarque confirme mieux encore la réalité et l'individualité des hélices foliaires. Certes l'anneau initial a été blessé en $a_3$ sur presque un quart de son pourtour. Les initiums $a_4$, $a_5$, $a_6$, qui ne sont pas formés, n'auraient pas eu à prendre naissance dans la partie lésée, mais précisément dans les trois quarts non lésés de l'anneau initial. Et pourtant ils ne se sont pas formés. Tandis que, sur l'emplacement qui avait été détruit, nous trouvons, entre les 2 génératrices qui délimitent la blessure, se formant successivement, les feuilles $b_4$, $b_5$ et $c_5$, $c_6$. Ce n'est pas la blessure de l'anneau initial qui empêche la formation des feuilles, mais la

destruction du centre générateur de feuilles situé en tête de l'hélice et dont la réalité se trouve ainsi affirmée.

Dans cette analyse expérimentale, j'ai parlé jusqu'ici de phyllotaxie verticillée, car, en raison même de la netteté de cette disposition, les résultats des expériences apparaissent plus clairement. Les mêmes peuvent être réalisées dans le cas de phyllotaxie spiralée. Les résultats sont comparables, mais parlent moins aux yeux. L'avantage de la théorie des hélices multiples apparaît quand se manifestent des anomalies légères, par exemple chez le Poirier dont voici la disposition quinconciale typique. Ici la spirale génératrice est bien mal venue avec des intervalles sans élongations et d'autres très allongés. Pas de difficultés avec le tracé en hélices foliaires qui diffère à peine dans ce cas du tracé relatif à la tige normale.

Il y a pourtant une expérience particulièrement importante qui fut réalisée par Snow sur le Lupin, phyllotaxie spiralée. Traduit en hélices foliaires ce résultat est le suivant: une section dans la zone où se trouve un centre générateur peut amener la division de ce centre en 2; la plante poursuit sa croissance avec une hélice supplémentaire.

Voici, à côté du schéma de l'opération, la coupe donnant le résultat. Dans l'interprétation de Snow, l'initium piqué a donné 2 feuilles 1k et 1a, soudées par leurs stipules. Les feuilles 2 et 3 se sont développées sur la spirale génétique, en position normale, mais au niveau de 3, la spirale s'est inversée et passe par 4, et 5, etc. Pour moi, je vois sur la figure 3, où les stipules n'ont pas été représentées, que l'une des 2 hélices du Lupin, venant de la gauche, est normale; que l'autre se divise pour passer par les deux demi-feuilles 1 au-delà de chacune desquelles se poursuit un tracé normal d'hélice. Le centre générateur de l'hélice atteinte a été lui-même divisé en 2 par l'opération. Commençant avec 2 hélices, la plante finit avec 3.

Mais en phyllotaxie spiralée, on peut ergoter sur l'interprétation proposée. Avec la même opération, Loiseau a fait passer l'*Impatiens Roylei* de 3 à 4 hélices. Quand les verticilles de 3 feuilles sont remplacés par des verticilles de 4 feuilles, la discussion sur les faits n'est plus possible.

Voilà donc expliqués par la même pensée des domaines phyllotaxiques qui paraissaient presque irréductibles. Voyez avec quelle facilité s'éclaire le lien entre verticillation et disposition spiralée, et même distichie où 2 hélices foliaires sont redressées en orthostiques. Par exemple chez l'*Helianthus annuus*, voici après les 2 cotylédons qui se sont un peu développés en feuilles, 2 verticilles de feuilles opposées avec décussation, puis rapidement nous passons au régime feuilles spiralées qui relèverait d'une phyllotaxie toute différente, avec spirale génétique et divergence. Les réalités sous-jacentes à ces apparences différentes demeurent les mêmes: il y a 2 hélices foliaires tout le long de la tige. Dans la graine, chaque cotylédon était la première feuille d'une hélice foliaire; dans la gemmule, les 2 hélices sont synchrones; les deux premières paires de feuilles embrassent complètement la jeune

tige; plus haut le contact entre les 2 feuilles se rompt, dès le 4e verticille; les 2 hélices se décalent l'une par rapport à l'autre, alternant bientôt dans leur fonctionnement assez régulièrement pour qu'on puisse tracer une spirale génétique. Mais celle-ci, apparue tardivement, ne saurait être une réalité. La réalité, ce sont ces 2 hélices foliaires – qu'une opération pourrait séparer, dont elle pourrait détruire l'une ou la dédoubler – ces 2 hélices foliaires qui créent sur la tige d'abord la symétrie parfaite de la verticillation, puis plus tard cette autre symétrie, non géométrique celle-là, du fonctionnement alterné [8].

Je ne voudrais pas vous avoir donné l'impression que la forme des plantes est à la merci de l'expérimentateur, qu'à partir d'un Oeillet à feuilles opposées décussées, on va pouvoir fabriquer des Oeillets à disposition spiralée parce qu'ils n'auraient plus qu'une seule hélice foliaire, des Oeillets à feuilles verticillées par 3 parce qu'on aurait expérimentalement dédoublé une hélice. La forme est un équilibre qu'on peut parfois altérer un instant, modifiant sa symétrie, le temps d'obtenir la réponse aux questions posées, mais l'équilibre troublé se rétablit. Plus ou moins vite suivant les plantes. Quand le point végétatif, modifié par l'opération, s'est vraiment réparé, que sa blessure est effacée, il se retrouve de l'espace libre dans un anneau initial devenu trop grand pour les centres générateurs qu'il contient; un centre générateur nouveau apparaît. Après quelques verticilles à 2 feuilles, l'*Impatiens Roylei* de Loiseau crée un centre générateur nouveau et la forme spécifique est restaurée grâce à une hélice nouvelle. A l'inverse, une hélice supplémentaire pourra disparaître plus ou moins tôt. Les plantes sont assez diversement tolérantes. Certaines réalisent même spontanément des variations. Vous pourrez voir sur certains Fuchsias en même temps des rameaux verticillés par 4, 3 et 2. La *Lysimachia vulgaris* a des pieds à verticilles de 3 feuilles, des pieds à verticilles de 4. D'autres plantes ont des conditions tellement fixes que l'expérimentation sur elles est presque impossible, tant elles sont pressées de régénérer les parties détruites et de restaurer la forme altérée.

## III

### *Dissociation, fasciation*

Mais parfois, sous des influences très énigmatiques, ces symétries internes se rompent et les plantes deviennent asymétriques et monstrueuses. C'est généralement par augmentation du nombre des hélices foliaires que se produisent les anomalies.

Nous abordons là l'un des plus vastes problèmes de la tératologie végétale, celui qui mène aux fasciations – problème qui n'est pas sans analogie avec celui du cancer par l'augmentation des masses de matière vivante qu'il produit aux dépens de matière vivante normale, mais où l'organisation – et par conséquent une certaine symétrie – joue un rôle

essentiel qu'elle n'a pas dans les cancers. Je n'aurai pas la prétention de parler de causes; nous les ignorons. Vous allez voir combien l'étude des manifestations est déjà fructueuse et surprenante.

Ce sont les formes tératologiques les plus humbles dont l'étude est le plus intéressante; elles nous donneront l'explication des plus complexes. Avant la fasciation proprement dite, il faut connaître la dissociation.

Un excellent cas m'a été fourni par l'*Helianthus annuus*, var. *uniflorus*, variété qui termine par un unique capitule, énorme, une tige verticale sans ramifications. Je ne reviens pas sur la tige normale que nous avons déjà étudiée. J'ajouterai seulement qu'à côté de celles qui sont régulières comme je l'ai dessiné, il y en a de très irrégulières où le tracé de la spirale génétique ne saurait se faire sans métatopies et larges variations de la divergence. J'ai eu l'attention attirée par des anomalies de forme foliaire sur des irrégularités phyllotaxiques; la figure que je vous présente combine sous une forme moyenne une série de cas moins complets. Voici sur l'une des 2 hélices une feuille à 2 pointes, puis, la suivant, une feuille présentant 2 limbes, mais un pétiole unique à sa base; en troisième lieu 2 feuilles absolument normales, mais ayant une insertion commune; enfin 2 feuilles insérées à des niveaux différents par deux segments foliaires bien indépendants. Nous avons assisté à la division progressive d'une hélice foliaire en deux. Nous pourrons suivre les 3 hélices jusqu'au sommet de la tige qui se termine par un très gros capitule. Mais j'ai obtenu plusieurs plantes dont la tige portait 2 capitules. Elles présentaient l'exacte symétrie que voici. Ne parlons pas de ramification: l'un des capitules serait terminal, l'autre sur un rameau s'insérant par un angle franc à l'aisselle d'une feuille. L'étude phyllotaxique a montré que la tige particulière à chaque capitule présentait 2 hélices et que du haut en bas on trouvait 4 puis 3, puis 2 hélices. Ainsi 2 fois s'était produite durant la croissance une augmentation du nombre normal d'hélices. La tige d'*Helianthus* n'est pas stable pour 4 hélices, alors qu'elle l'est pour 3. Ici elle s'est régularisée par une *dissociation*: les deux moitiés de la tige se poursuivent tangentiellement à l'axe commun, comme si nous avions fendu le point végétatif [9].

Le Fusain du Japon *(Evonymus japonicus)* fournit un autre exemple, facilement interprétable à cause de ses feuilles opposées décussées. Certains rameaux peuvent avoir, de bout en bout, des verticilles à 3 feuilles: ils sont stables. Si sur un rameau à 3 feuilles, un verticille nouveau en présente 4, la dissociation ne tardera guère. Mais sur d'autres tiges du même arbuste, sans que s'individualisent les deux axes d'une dissociation, le point végétatif s'étale plus ou moins en éventail, tandis que le nombre des hélices foliaires s'élève rapidement: une fasciation a pris naissance.

Je vous parlerai encore d'une troisième série d'anomalies, celles qu'on rencontre chez les *Stapelia*. Ces Asclépiadacées sont formées de touffes de rameaux d'une vingtaine de centimètres de long dont les grandes fleurs en étoile sont bien connues. Un rameau normal est de

section subcarrée. Il porte 4 hélices foliaires qui, droites, constituent les 4 angles. Vous voyez les pointes des feuilles successives, ici fanées et blanches, là, jeunes, charnues et vertes. Les feuilles existent, mais sont soudées entre elles et soudées à la tige comme chez de nombreuses plantes à allure de Cactées. 4 côtes, symétrie et équilibre parfaits; rameau droit. Sur ce rameau-ci, en ce point, entre 2 côtes, naît une cinquième hélice. Sa présence dérange l'équilibre. Il y a maintenant 5 côtes qui tournent en hélice autour de l'axe; les feuilles, dont l'orientation longitudinale demeure, sont moins intimement soudées et révèlent leur indépendance. A ce niveau une sixième côte apparaît. Elle permet de restaurer la symétrie; les 6 côtes se redressent; les feuilles se retrouvent fusionnées. L'augmentation au-delà de 6 donne une dissociation, peu sensible: 2 rameaux en fourche. Mais les formes anormales frappantes des *Stapelia* sont les *fasciations*. En voici une, admirable, où un rameau a poursuivi sa croissance sur près de 60 cm de long, s'étalant en un éventail de multiples fois replié, dont le bord, équivalent du point végétatif minuscule de ce rameau normal, était développé en une ligne sinueuse de plus d'un mètre de long au bord de l'éventail, avec, s'arrêtant sur ce bord, des milliers d'hélices foliaires.

Il n'est pas question d'établir ici un tracé indiscutable de ces hélices foliaires. Les phénomènes que l'analyse permet de constater sont les suivants: bifurcation d'hélices par division d'un centre générateur, naissance d'hélice par création de centre nouveau, formation simultanée de plusieurs initiums côte à côte sur le bord du point végétatif linéaire, parallèlement à ce bord sans doute sur une même hélice, bifurcation multiple de l'hélice à partir des initiums ainsi formés. Cette image schématique montre: une tige normale à 2 hélices avec une fleur terminale, une tige anormale où le nombre des hélices augmentant, se réalisent des dissociations, une tige largement fasciée.

Je ne pense pas devoir quitter le sujet de la fasciation sur une présentation aussi abstraite. Je commenterai cette image qui offre l'une des plus remarquables fasciations existantes, celle du *Carnegia gigantea*. Chez les Cactées, il y a des hélices foliaires. Ce sont, comme chez les *Stapelia*, les côtes faites de feuilles, alignées ici en orthostiques et soudées les unes aux autres. La plante jeune a 12 côtes; la plante adulte en a 24. On passe de 12 à 24 surtout par des dédoublements de centres générateurs analogues à ceux qui forment ici des Y. A la partie moyenne de ce tronc le nombre des côtes est déjà bien supérieur à 24. Vous voyez très bien comment, dans la région moyenne où la fasciation proprement dite commence, s'élève considérablement le nombre de ces hélices qui sont des côtes, dont la taille diminue pour qu'elles ne soient plus qu'une striation fine et serrée sur les lobes de la fasciation. D'une forme columnaire parfaitement régulière, la fasciation fait une sorte de lame bourgeonnante à symétrie plane.

En terminant, je me sens doublement honteux. D'abord j'ai pu parler de symétrie sans aborder le problème de la fleur. Je m'en excuse: j'ai dû choisir. Et puis je suis un peu honteux de la dernière partie de

mon exposé. Certes je vous ai expliqué des figures, en prolongeant le thème présenté. Mais, au contraire des deux premières parties, je n'ai pas eu la sensation de démontrer, et ne démontrant pas, j'ai eu celle de dire seulement: «j'imagine». Or je voudrais que la Science – et même la Botanique – s'appuyât toujours sur des faits précis, aussi matériels que possible, en étroit contact avec la démonstration de l'expérience. La confrontation de plusieurs observations peut parfois apporter une preuve; mais elle est toujours de qualité inférieure à celle de l'expérience, faite pour prouver. Quant à nos imaginations, non démontrées, où l'esprit humain exprime à propos de faits qui pourraient être scientifiques, un besoin d'idéal, je ne leur dénie pas une grandeur et une beauté; elles ont plus de rapport avec la Poésie qu'avec la Science, qui est avant tout expérience et preuve.

**Références**

On trouvera le complément d'illustration utile dans divers ouvrages et mémoires:

1. Oltmanns: Morphologie und Biologie der Algen, 2e édit., t. II, p. 178, fig. 432.
2. Louis: Le cellule, t. 44, 1935, p. 105, fig. 20.
3. Lance: Ann. Sc. Nat. Bot., 1957, p. 181, fig. 29.
4. — Ibid., p. 190, fig. 35.
5. Loiseau: Ann. Sc. Nat. Bot., 1959, pl. 44, fig. 2.
6. Lance: C. R. Acad. Sc., t. 252, 1961, pl. p. 1505.
7. Plantefol: Ann. Sc. Nat. Bot., 1946, fig. 5, p. 191.
8. — Ann. Sc. Nat. Bot., 1947, fig. 25, p. 3.
9. — Ann. Sc. Nat. Bot., 1947, fig. 42 et 43 (p. 35 et 36).