
Den Festvortrag auf dem Leibniztag hielt Herr Achim Müller (Bielefeld) zum Thema „Chemie und Ästhetik“. Da wir seine zahlreichen farbigen Projektionen in den „Sitzungsberichten“ nicht angemessen drucken können, geben wir hier eine in den „Mitteilungen“ des Zentrums für interdisziplinäre Forschung der Universität Bielefeld (4/99, S. 7-21) erschienene Version wieder. (Die Redaktion)

Achim Müller

Chemie und Ästhetik - die Formenvielfalt der Natur als Ausdruck ihrer Kreativität*

Die bunte Vielfalt der Erscheinungen kann verstanden werden, so sagen Pythagoras und Plato, weil und insofern hier einheitliche Formprinzipien zugrundeliegen, die einer mathematischen Darstellung zugänglich sind. (Werner Heisenberg)¹

1. Einleitung

Als Lektüre zum Thema sei empfohlen: *Materie, Geist und Schöpfung: Kosmologischer Befund und kosmogonische Vermutung*² von Hans Jonas – und zwar für den, der sich für die Prinzipien der Natur, für ihre faszinierenden Formen und deren Funktionsvielfalt interessiert, im Besonderen für den, der nach dem Ursprung des Geistes und der Subjektivität fragt. Ich zitiere aus dem Vorwort: „Die hier vorgelegte Schrift erhielt ihren ersten Anstoß durch einen mir freundschaftlich zur Kenntnisnahme übersandten ‚Entwurf zum Thema Kosmos und zweiter Hauptsatz‘. Darin wurde – als erster Schritt eines kosmologischen Gesamtkonzepts – zur Erklärung der Tendenz der Natur, von Gebilden niedriger Ordnung ausgehend solche höherer Ordnung zu schaffen, die Annahme vorgeschlagen, daß im Entstehungsaugenblick der Welt (also im sogenannten ‚Urknall‘) außer der gesamten Energie des Kosmos auch schon die Information entstanden war, die von der ‚chaotischen Explosion‘

* Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. Herbert Hörz zum 70. Geburtstag gewidmet.

über zunächst immaterielle Energieformen und daraus sich differenzierende Urpartikel schließlich zu Protonen führte, zum Wasserstoffatom und von da zur Bildung weiterer Ordnungssysteme, wie das periodische System der Elemente, die anorganischen Verbindungen, *die Schönheitswelt der Kristalle*, und auch zur Ordnungsform der geschlossenen Kreisläufe – der astronomischen im All, der atmosphärischen, biotischen usw. hier auf Erden. Es sei also schon im Urknall ein ‚kosmogonischer Logos‘ enthalten gewesen, [...]“

Jonas geht der Frage nach, ob der sich mit dem Urknall entwickelnden Materie bereits eine Information oder allein eine Potentialität innewohnt. Für Naturwissenschaftler sollte es eine Herausforderung sein, sich mit diesem zentralen Problem zu beschäftigen und der Frage nach einer *Begabung* der Materie nachzugehen, die zur Vielfalt der Formen in der belebten, aber auch der unbelebten Natur geführt hat und weiter führt. Den Chemiker fasziniert hierbei besonders die Entdeckung eines ästhetisch schönen Moleküls³, und für ihn hat die Beziehung zu den von Jonas hergestellten philosophischen Fragen ohne Zweifel eine stimulierende Wirkung. Er wird wohl auch dann – vielleicht im Gegensatz zu Cramers Auffassung (vgl. Anm. 3) – von einem schönen Molekül affiziert, wenn er primär über dessen Entstehungsprozeß keine Detailkenntnisse besitzt.

Im folgenden betrachte ich das ästhetisch Schöne als eine Eigenschaft der uns umgebenden Welt, das heißt ungeachtet der Kritik Kants. Es sollte nämlich für die Mathematik und Naturwissenschaft im Prinzip möglich sein, nachvollziehbare Kriterien des ästhetisch Schönen zu bestimmen, denn es gibt in der Natur – vielleicht entsprechend Hans Heinz Holz⁴ – intersubjektiv feststellbare Merkmale von Schönheit.

2. Architekturen und ästhetisch schöne Formen unserer Welt⁵

[Durch Schönheit] wird der sinnliche Mensch zur Form und zum Denken geleitet; [...] der geistige Mensch zur Materie zurückgeführt und der Sinnenwelt wiedergegeben. (Friedrich von Schiller)⁶

Regelmäßige Formen zogen schon in der Antike die Aufmerksamkeit vor allem von Philosophen auf sich. (Für Platon waren die fünf ästhetisch schönen oder ‚vollkommenen‘ Körper mit gleichen Flächen Grundlage seiner geometrischen Theorie der Materie.) Parmenides reflektierte sogar über die Kugelgestalt alles Seienden und Xenophanes (ca. 570-470 v. Chr.) schrieb dem Göttlichen unter Zurückweisung jeder Art von Anthropomorphismus die

Eigenschaften einer Kugelgestalt zu. Hierüber berichteten später Aristoteles und Diogenes Laertius („Gott ist ein kugelförmiges Wesen, ohne Ähnlichkeit mit dem Menschen.“⁷, „Das Wesen Gottes sei kugelförmig [...]“⁸). Kugel und Kreis galten übrigens in der Antike als die vollkommenen geometrischen Formen⁹.

Am Beginn der Neuzeit war u. a. der Astronom Johannes Kepler (1571-1630) von der Harmonie der Grundstrukturen der Welt tief berührt. Dies hat er in seinem frühen spekulativen Werk *Mysterium Cosmographicum*, und besonders in seinem bedeutenden Spätwerk *Harmonice Mundi* (Weltharmonik)¹⁰ zum Ausdruck gebracht. Die Planeten der ‚frühen‘ keplerschen Welt bewegen sich auf Kugelschalen, denen die fünf regulären platonischen Körper ein- und umbeschrieben sind – die Erde z. B. auf einer Schale mit einem ‚inneren‘ Ikosaeder.

Auf der Ebene unserer Sinneswahrnehmung läßt sich sowohl in der belebten, als auch in der unbelebten Natur – wie beispielsweise bei Kristallen – eine faszinierende Vielfalt, oder anders gesagt eine verschwenderische Fülle schöner Formen entdecken. Goethe etwa (für ihn war das *Deus sive natura* von Spinoza ein Glaubenssatz) stellte sich als Naturforscher die Aufgabe, in der Vielfalt und der Komplexität der Phänomene das Einfache als das Gemeinsame zu erkennen, und zwar im Sinne eines Urphänomens, das sich in den mannigfaltigen Formen, z. B. in der Morphogenese der Pflanzen, entfaltet und anzuschauen (!!)¹¹. Schiller dagegen vertrat gegenüber Goethe die Auffassung, sein Urphänomen sei keineswegs eine Erscheinung, sondern eine Idee („Suchet den ruhenden Pol in der Erscheinungen Flucht.“ nach Schiller/Helmholtz). Zur Frage von Schiller und Helmholtz nach dem Bleibenden im Wandel der Erscheinungen gibt es zwei Lösungsansätze, und sie münden entweder in ein stofflich-energetisches Urphänomen (Goethe)¹² oder in eine gesetzmäßige Struktur (etwa Heisenbergs informationelle Symmetrieprinzipien).

Der Formenreichtum in der Natur – speziell in der Welt der Organismen – ist jedem geläufig und läßt den sensiblen Beobachter immer wieder staunen. Ernst Haeckel z. B. war von der Formenähnlichkeit auf allen Stufen der Natur überwältigt und hat dies in seinem vielzitierten Werk *Kunst-Formen der Natur* (Abb. 1) auch bildlich dokumentiert¹³. In diesen Kontext können auch neuere Arbeiten gestellt werden, von D'Arcy Thompson¹⁴ (über die biologische Formenentwicklung), von Hermann Weyl¹⁵ (über die Symmetriewandlungen in den Formen der Lebewesen) und René Thom¹⁶ (über die Beziehung zwischen geometrischen Formen und dynamischen Prozessen).

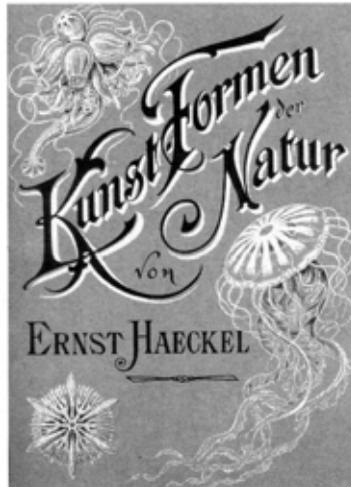


Abb. 1:

Titel von Ernst Haeckels berühmtem Buch „Kunst-Formen der Natur“ (1904)

Aber erst durch die Ermittlung der Gesetzmäßigkeiten, die zwischen Makro- und Mikroebene bestehen, ist ein Verständnis für die Entstehung der makroskopischen Formen im Sinne der modernen Wissenschaft der Materie möglich. Obwohl – um ein Beispiel zu nennen – die epigenetischen Prozesse, die letztlich zum Organismus führen, äußerst komplex sind, lassen sich doch verschiedene Regularitäten mit der molekularen Welt der Genexpression erkennen. Der Nichtnaturwissenschaftler wird vielleicht einen ‚genialen Baumeister‘ in der belebten Natur vermuten, der aus einfachen Gebilden immer komplexere Systeme entstehen läßt.

Wir finden auf der Ebene der Moleküle wie der Phänomene bestimmte Formen, die sich ähneln. Dies gilt z. B. für spiralförmige, helixartige sowie dendritische Strukturen, aber auch für einfache Gebilde, die aus Fünf- und Sechsecken aufgebaut sind. Hier sind die auch geistes- und kulturgeschichtlich und speziell im Kontext mit dem Goldenen Schnitt (*proportio divina*) für die Ästhetik äußerst interessanten Pentagone¹⁷ besonders hervorzuheben. Sie kommen im molekularen Bereich (wie z. B. bei der im Aufsatz behandelten Riesenkugel), bei sphärischen Viren, an geodätischen Kuppeln des amerikanischen Architekten Richard Buckminster Fuller, wie auch bei bestimmten

einfachen Organismen (Abb. 2 und 3) vor. Und es ist durchaus denkbar, daß die moderne Virologie zur Klassifizierung der Strukturen von kugelförmigen Viren mit ihren pentagonalen morphologischen Einheiten, nämlich den sogenannten Capsomeren, nicht zufällig Anleihen bei den Kuppeln von Fuller gemacht hat.

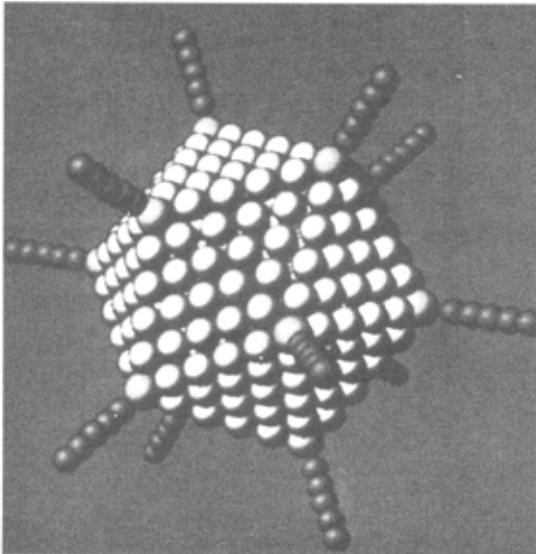


Abb. 2:
Modell des sphärischen (ikosaedrischen) Adeno-Virus (siehe z. B. Peter Sitte, Anm. 5)

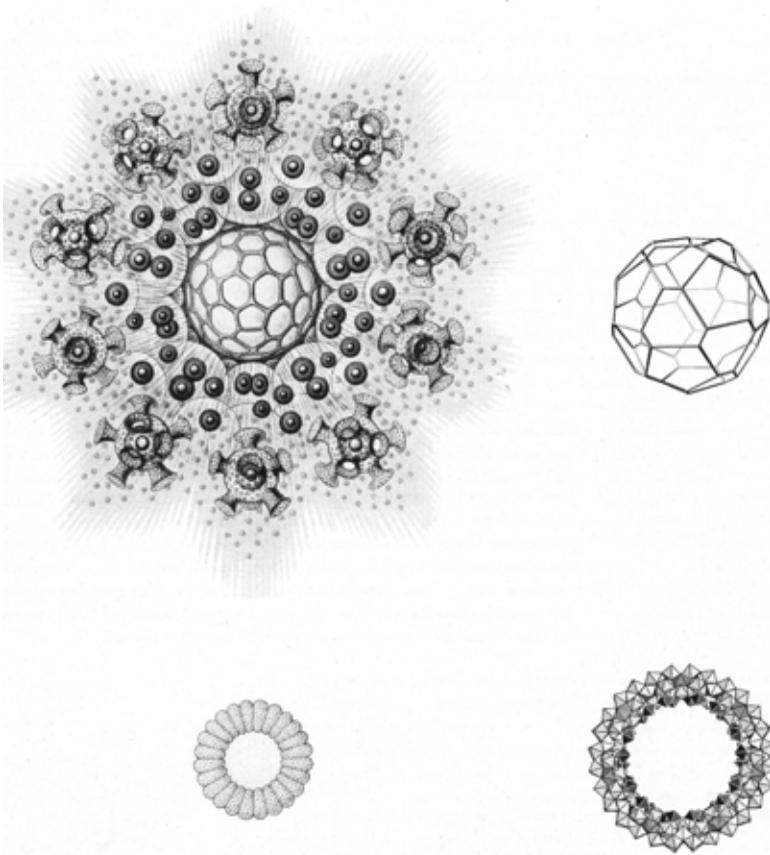


Abb. 3:
 Kugel- und kreisförmige Gebilde: Zwei „Polycyttaria/Vereins-Strahllinge“ („Soziale Radiolarien“) aus Ernst Haeckels Buch „Kunst-Formen der Natur“ (Tafel 51, links) und Modelle von strukturell vergleichbaren in Bielefeld synthetisierten Riesenmolekülen, die im Aufsatz behandelt werden (rechts).

3. Die Begabung der Materie

Chemistry provides not only a mental discipline, but an adventure and an aesthetic experience. Its followers seek to know the hidden causes which underlie the transformations of our changing world, to learn the essence of the rose's colour, the lilac's fragrance, and the oak's tenacity, and to understand the secret paths by which the sunlight and the air create these wonders. (Sir Cyril N. Hinshelwood)¹⁸

I can hardly doubt that when we have some control of the arrangement of things on a small scale we will get an enormously greater range of possible properties that substances can have. (Richard P. Feynman)¹⁹

Die Frage nach der Begabung der Materie, die die Formenvielfalt in der belebten und unbelebten Natur hervorbringt, läßt sich im Anschluß an die genannten Aussagen der beiden berühmten Naturwissenschaftler stellen. Chemiker untersuchen in diesem Kontext Veränderungen materieller Systeme, die zur Formenvielfalt führen – mögen sie nun im biologischen Prozeß erfolgen oder im Labor. (Die Qualitäten der elementaren Bestandteile sind die gleichen.) Der ‚Idealfall‘ wäre gegeben, wenn sich die *top-down*-Methode im Sinne Hinshelwoods – d. h. komplexe biologische Phänomene auf Einfaches ‚zurückzuführen‘ – und die *bottom-up*-Methode im Sinne Feynmans annähern bzw. überlappen würden. In einem solchen Falle würde dies die Kreation einfachster Zellformen im Labor möglich machen. Natur und Labor sind allerdings nicht deckungsgleich. Der große Naturforscher und Philosoph Helmholtz spricht in diesem Zusammenhang von Notwendigkeiten im Naturprozeß und von den Gestaltungsmöglichkeiten des Forschers. Dieser kann – durch Schaffung bestimmter Bedingungen im Rahmen der Naturgesetze bzw. der existierenden Möglichkeitsfelder materieller Systeme – sogar relativ unwahrscheinliche Möglichkeiten realisieren.

3.1 Grundsätzliches zum Geschehen in der Biosphäre

So hat auch die Chemie die Veränderung der kleinsten Teile sowie ihre Zusammensetzung genau beobachtet, und ihre letzte wichtige Tätigkeit und Feinheit gibt ihr mehr als jemals ein Recht ihre Ansprüche zu Enthüllung organischer Naturen geltend zu machen.
(Johann Wolfgang von Goethe)²⁰

Die materiellen Ereignisse in der Biosphäre, die zu einer Vielfalt und Prozeßdynamik unter den Randbedingungen der Dissipation (d. h. durch die eines offenen Systems) führen, sind gekennzeichnet durch ihre außerordentliche Spezifität. Hierbei scheint der Gedanke einer Begabung der Materie, die es ermöglichte, daß die Ingredienzien der Urerde den gewaltigen, quasi-explosionsartigen Veränderungsprozeß ‚zu initiieren vermochten‘, der dann schließlich zur biologischen Vielfalt führte, von grundlegender Bedeutung für ein weitergehendes ‚Verständnis‘ der Materie zu sein. Bei der Genese der biologischen Vielfalt handelte es sich offensichtlich um einen weitgefächerten Prozeß, den wir zwar in den meisten Details nicht kennen, der aber – etwas frei nach Heraklit - durch die Dialektik von kontingenten Mutations-abläufen und richtungsgebender Selektion erfolgte und ohne Zweifel durch einen Zeitpfeil gekennzeichnet war. Hierbei spielte der Zufall als auslösender (kreativer) Faktor immer eine zentrale Rolle – auch auf der Urerde, als auspräformierten einfachen Biomolekülen Supramoleküle im Sinne der modernen Supramolekularen Chemie entstanden.

Die Begabung der Materie manifestierte sich vor allem in der ‚Optimierung‘ der Adaption der Organismen während der Evolution. Diese Optimierung beruht letztendlich auf einer abgestimmten Wechselwirkung der materiellen Subsysteme bzw. der Makromoleküle des Organismus. Der Chemiker, bzw. Biochemiker, versucht, in diesem Zusammenhang nicht nur Details zu verstehen, sondern auch allgemeine Prinzipien zu entdecken.

Wenngleich der Organismus in seiner Gesamtheit im Fließgleichgewicht ist und die entsprechenden Basisprozesse letztlich unter dissipativen Bedingungen ablaufen, so gibt es doch Prozesse klassischen Typs in der Nähe des Gleichgewichtes, die zu komplexen Strukturen führen. Hierzu sei als Beispiel der Selbstaggregationsprozeß des Tabak-Mosaik-Virus genannt, der *in vivo* und *in vitro* in gleicher Art abläuft. Dies zeigt, daß gerade das Studium von Selbstaggregationsprozessen durch den Chemiker im Labor zum Verständnis der Begabung der Materie beitragen kann. Bei derartigen Prozessen kann

Neuartiges entstehen, auch durch eine Art eines (spontanen) Schöpfungsaktes.

3.2 Die Bildung ästhetisch schöner Formen im Labor – speziell durch Selbstaggregationsprozesse: Ein molekulares Gebilde mit einer Kugel und einem platonischen Körper

[...] (alles Materielle) hat eine unwiderstehliche Neigung, sich zu gestalten. (Johann Wolfgang von Goethe)²¹

Der Chemiker kann die Begabung bzw. die auf informationellen Strukturen basierende Potentialität der Materie im Labor untersuchen – dies vor allem beim Studium der Vielfalt von Selbstaggregationsprozessen. Hierbei können Bezüge zu Prozessen der Biosphäre hergestellt werden, natürlich auch zu solchen, die zur Bildung ästhetisch schöner Formen führen.

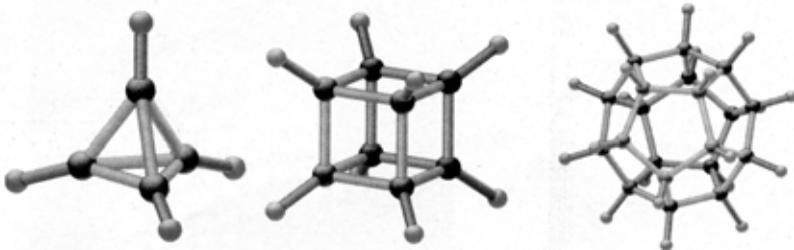


Abb. 4:

Drei einfache Kohlenstoffverbindungen (Tetrahedran, Cuban, Dodekahedran) mit der Form platonischer Körper; Platon: „Wir müssen nun also erklären, dank welcher Beschaffenheit gerade vier Körper (Tetraeder, Oktaeder, Würfel, Ikosaeder) zu den schönsten werden, die sich zwar ähnlich sind, aber doch, indem sie sich auflösen, die Möglichkeit haben, daß der eine aus dem anderen entsteht.“ *Timaios* 53e.

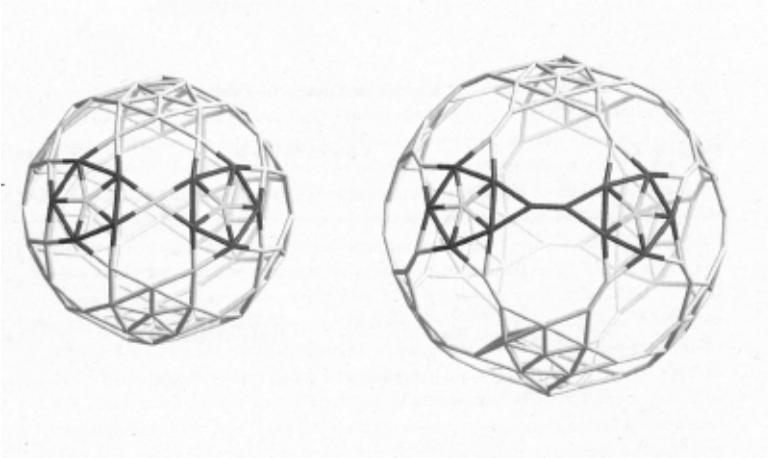


Abb. 5:

Durch Verknüpfung von pentagonalen Einheiten – nämlich den zur Konstruktion von polyedrischen kugelförmigen Strukturen zentralen Gebilden der Pythagoreer und von Archimedes – mit verschiedenen Abstandhaltern läßt sich – aufgrund Bielefelder Arbeiten – die Größe von molekularen Riesenkugeln variieren (sizing)

Die in den Abbildungen 4, 5 und 6 gezeigten Kohlenstoff- und Metall-(Molybdän)-Moleküle haben Bezüge zu den platonischen Körpern. Gezeigt sind das noch nicht synthetisierte (reine) Tetraeder, das Cuban, das Dodekaeder sowie ein aus 132 (72 plus 60) Molybdänatomen bestehendes ikosaedrisches bzw. kugelförmiges Fragment eines molekularen Gebildes, d. h. eines anorganischen Superfullerens. Bei der letzten Spezies, die in Bielefeld kürzlich entdeckt wurde, handelt es sich um ein sogenanntes Polyoxometallat, d. h. ein aus Metall- und Sauerstoffatomen bestehendes Gebilde²². Das schon genannte Fußballmolekül C_{60} und das aus 60 Molybdänatomen bestehende Mo_{60} -Fragment des Superfullerens (Abb. 6) entsprechen übrigens einem der 13 archimedischen Körper, nämlich dem abgestumpften Ikosaeder, das die gleiche Symmetrie wie das Ikosaeder selbst aufweist.

Das ikosaedrische Superfulleren mit 132 Metall-Atomen ist mit den sphärischen Proteinhüllen kugelförmiger Viren strukturell verwandt. Diese setzen sich derart aus Untereinheiten zusammen, daß eine sphärische Hülle mit ikosaedrischer Symmetrie – entsprechend den sich auf die Entwürfe des Architekten Buckminster Fuller für geodätische Kuppeln beziehenden Regeln der Virologen Caspar und Klug – entsteht. Bemerkenswerterweise spannen sowohl beim Superfulleren als auch bei den kugelförmigen Viren – wie z. B. beim (sehr einfachen) Satelliten-Tabak-Nekrose-Virus (STNV) – die Zentren pentagonaler Struktureinheiten ein Ikosaeder auf.

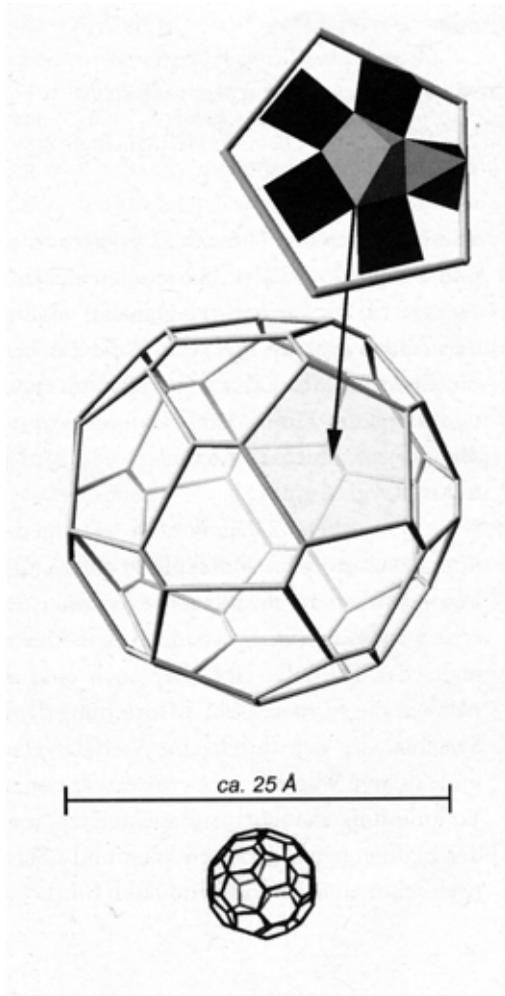


Abb. 6:

Kugel- bzw. Fußballförmige Gebilde: Struktur des aus 60 Molybdänatomen bestehenden ikosaedrischen Mo_{60} -Fragmentes des genannten Superfullerens mit 12 regelmäßigen Fünfecken und 20 (trigonalen) Sechsecken. Eine strukturierte pentagonale Einheit ist in Polyederdarstellung separat abgebildet. Jede pentagonale Baueinheit besteht aus einer zentralen pentagonalen Bipyramide, die mit fünf Oktaedern über Kanten verknüpft ist. Die einzelnen Polyeder bestehen wiederum aus (sieben oder sechs) Sauerstoffatomen mit jeweils einem zentralen Metallatom (oben). Im gleichen Maßstab ist zum Vergleich das Fußballmolekül, das C_{60} -Fulleren, dargestellt (unten).



Abb. 7:
 Titelblatt des letzten Heftes der Zeitschrift „Angewandte Chemie“ des Jahres 1998 mit einer molekularen Riesenkugel – einem sogenannten Keplerat – aus Metall- und Sauerstoffatomen mit einbeschriebenem Ikosaeder, die dem berühmten frühen Kosmosmodell (unten rechts) in Keplers spekulativem Werk „Mysterium Cosmographicum“ ähnelt. (Das Modell bezieht sich mit seinen Kugelschalen und regulären Körpern sowohl auf Platon als auch auf die Erkenntnisse von Kopernikus.)

Chemie und magische Zahlen

Magische Zahl	Cluster/Molekül	Triangulationszahl
$10T+2$	$\{\text{Mo}_{132}\}$ (20 Hexagone)	$\{\text{Fe}_{30}\text{Mo}_{72}\}$ (20 Dreiecke)
		$T = [h, k]$
12	12 (Mo)Mo ₅ -Einheiten (Ikosaeder-Struktur)	12 (Mo)Mo ₅ -Einheiten (Ikosaeder-Struktur)
32	32 Flächen des (Mo ₂) ₃₀ - abgest. Ikosaeders	32 Flächen des {Fe ₃₀ }- Ikosidodekaeders
42	42 (12+30) Baugruppen ^a (Cluster-Ladung)	42 (12+30) Baugruppen ^a
72	72 Mo ^{VI} -Zentren (Ladung der 12 Pentagone)	72 Mo ^{VI} -Zentren
132	132 Mo-Atome	13 [3,1]

Tabelle:

Beziehungen (vgl. Anm. 17) zwischen den sogenannten magischen Zahlen $10T+2$ (vgl. z. B. Ian Stewart, „Life's Other Secret“ [...] und ders., „Spiel, Satz und Sieg für die Mathematik“, Anm. 5) und Struktureinheiten in sphärischen Molekülen – formuliert in der ‚Sprache‘ der Chemiker (Triangulationszahl $T = [h, k] = h^2 + hk + k^2$). a: 12 (Mo)Mo₅-Einheiten +30 Fe bzw. +30 (Mo^v)₂-Abstandhalter

Die strukturelle Ähnlichkeit des Superfullerens mit dem oben erwähnten ‚frühen‘ keplerschen Kosmosmodell ist nicht zu übersehen: In das kugelförmige molekulare Gebilde, dessen äußere Oberfläche von den Sauerstoffatomen der Peripherie aufgespannt wird, ist ein aus 12 Molybdänatomen gebildetes Ikosaeder einbeschrieben (Abb. 7). Aus diesem Grund ist von uns der Name Keplerat gewählt worden.

Aus der Tabelle ist ersichtlich, daß auffällige Beziehungen zwischen den sogenannten ‚magischen Zahlen‘ für sphärische Viren und der Zahl bestimmter Baueinheiten der kugelförmigen Moleküle des Keplerat-Typs bestehen. Es liegt hier also nahe, sich der These der Pythagoreer zu erinnern, nämlich „daß die Eigenschaften und Proportionen der Harmonien durch Zahlen bestimmt sind“ und – wenngleich Aristoteles warnte – zu glauben, „daß auch alles andere seiner ganzen Natur nach den Zahlen nachgebildet sei und die Zahlen das erste der ganzen Natur seien, [...] (und) die Elemente der Zahlen ($\tau \gg \tau \omega \nu \gg \rho \iota \theta \mu \omega \nu \sigma \tau \omicron \iota \chi \epsilon \frac{1}{4} \alpha$) [...] die Elemente aller Dinge, und der ganze Himmel sei Harmonie ($\rho \mu \omega \nu, \alpha$) und Zahl.“ (vgl. hierzu Aristoteles *Metaphysik*, Buch 1, Kapitel 5, 985 b/986 a. Übersetzung nach Alfred Stückelberger, vgl. Anm. 5).

Der Chemiker ist im allgemeinen darauf angewiesen, bei der Synthese komplexer größerer Moleküle in aufwendigen Prozeduren Schritt für Schritt vorzugehen – nämlich durch sukzessive Synthese, Isolierung und Reinigung der einzelnen Zwischenprodukte. (Dies ist zum Beispiel für viele für die Menschheit segensreiche Pharmaka der Fall.) Es gibt aber auch eine andere, sicherlich kreative Vorgehensweise, nämlich die systematische Erforschung der Potentialität oder der Disposition spezieller Systeme, die sich durch eine Vielfalt verschiedener Selbstaggregationsvorgänge bzw. molekularer Wachstumsprozesse auszeichnen. Hierbei geht es im wesentlichen um die Verknüpfung elementarer Baueinheiten, die (allerdings) sehr empfindlich von der Wahl der Bedingungen abhängen kann und überwiegend zu hochsymmetrischen, d. h. ästhetisch schönen Reaktionsprodukten führt.

Beim heutigen Stand der Wissenschaft sind wir noch nicht in der Lage, die Strukturen *aller* möglichen Produkte vorauszusagen, die bei der Verknüpfung von einfachen Fragmenten in komplexen Reaktionssystemen entstehen können. Bei detaillierter Kenntnis des Systems können jedoch intuitiv Wege zu relativen Zielen beschriftet werden, auf denen Neuartiges, zunehmende molekulare Komplexität, aber auch Multifunktionalität der Reaktionsprodukte auftreten können. Potentialitäten – im Sinne von dispositionellen Eigenschaften – werden hierbei vom Chemiker durch Einhalten bestimmter

spezieller Rand- bzw. Reaktionsbedingungen gleichsam ‚geweckt‘. Erfolge sind dort zu erwarten, wo relative Ziele existieren, wie z. B. auf dem Wege zu immer größeren Molekülen. Dies gilt auch dann, wenn man deren genaue Strukturen nicht voraussagen kann. (Entscheidend für den Fortschritt ist allerdings, ob der Wissenschaftler das Ergebnis für weitere fundamentale Untersuchungen zu nutzen versteht oder anders ausgedrückt: Erfolg setzt das Zusammentreffen einer Chance [auf dem genannten Wege] mit dem Bereitsein für diese voraus.) Beispielhaft kann hier auf die im Jahre 1995 von uns entdeckten und durch Selbstaggregation gebildeten molekularen *Bielefelder Riesenräder* (Abb. 8) aus dem Bereich der Polyoxometallat-Chemie hingewiesen werden²³, denen sicherlich auch das Attribut harmonisch bzw. reizvoll zukommt²⁴.

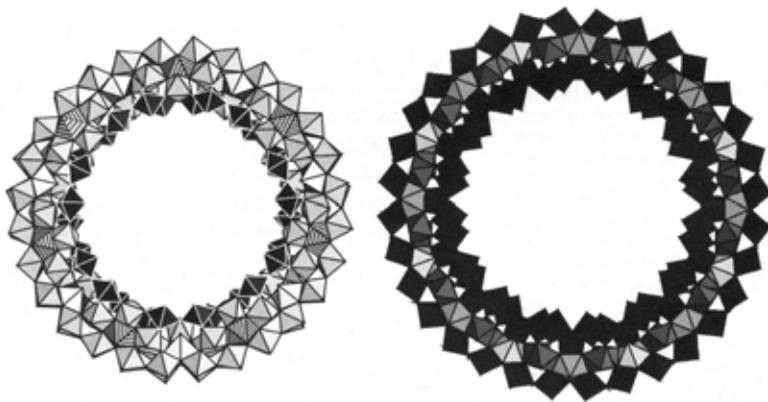


Abb. 8:
 Das ‚Bielefelder Riesenrad‘ mit mehr als 700 Atomen (links), das im wesentlichen aus verknüpften Oktaedern besteht (mit jeweils sechs Sauerstoffatomen und einem zentralen Metallatom). Schönheit und Ordnung bzw. Gesichtspunkte der Gleichheit ‚leiten‘ hier die Materie, so daß Platon sicherlich seine Freude gehabt hätte. Bemerkenswert ist, daß durch Abwandlung der Reaktionsbedingungen ein noch größeres molekulares Rad, das die selben Baueinheiten aufweist (rechts), entsteht.

Charakteristisch für materielle (chemische) Systeme des genannten Typs ist, daß eine Palette von Reaktionsprodukten mit extremer Formenvielfalt entstehen kann. Die Möglichkeit (*dynamis*) hierzu basiert auf den Gegebenheiten

des Systems, wobei die Verwirklichung (*energeia*) – etwa im Sinne der aristotelischen Physik – dann erfolgt, wenn die Gesamtheit aller notwendigen Bedingungen realisiert ist. Im Falle der angesprochenen Polyoxometallate untersucht man speziell Lösungen, die elementare verknüpfbare Bausteine enthalten. Diese weisen verschiedene symmetrische Formen auf, u. a. auch die platonischer Körper, die von Sauerstoffatomen und einem zentralen Metallatom aufgespannt werden. Bei spezifischen Änderungen des Systems – d. h. der Reaktionslösung – verknüpfen sich die Bausteine verschiedenartig. Hierbei kann eine große Vielzahl molekularer Gebilde mit neuartigen, vor allem hochsymmetrischen Strukturen entstehen.

Die Potentialität des materiellen Systems bezieht sich auf etwas grundsätzlich Mögliches. Mit Blick auf Aristoteles kann der Stoff (*hyle*) – den Gesetzen der Chemie bzw. Physik folgend – allerdings nur die Formen (*morphe*) annehmen, die mit ‚seinen Möglichkeiten‘ vereinbar sind.

3.3 Triebkräfte für die Bildung ästhetisch schöner Formen

Es hat sich [...] die Unmöglichkeit erwiesen, dem Sinn dieser Zeichen auf den Grund zu kommen. [...] Sie entziehen sich unserem Verständnis, und es wird schmerzlicher Weise dabei wohl bleiben. Wenn ich aber sage, sie ‚entziehen sich‘, so ist das eben nur das Gegenteil von ‚sich erschließen‘, und daß die Natur diese Chiffren, zu denen uns der Schlüssel fehlt, der bloßen Zier wegen auf die Schale ihres Geschöpfes gemalt haben sollte, redet mir niemand ein. Zier und Bedeutung liefen stets nebeneinander her, auch die alten Schriften dienten dem Schmuck und zugleich der Mitteilung. Sage mir keiner, hier werde nicht etwas mitgeteilt! Daß es eine unzugängliche Mitteilung ist, in diesen Widerspruch sich zu versenken ist auch ein Genuß.

(Thomas Mann)²⁵

Warum bilden sich nun bestimmte stabile Formen und speziell regelmäßige Strukturen, wie z. B. die der schönen hochsymmetrischen sphärischen Viren, die der Meeresschnecken oder die der Fullerene²⁶, aber auch die der Superfullerene? Die Erkenntnisse der Physik und Chemie lehren uns, daß zur Beantwortung der Frage topologische (strukturelle), kinetische und energetische Überlegungen angestellt werden müssen, wobei die Argumentation für dissipative und konservative Strukturen unterschiedlich ist. D'Arcy Wentworth Thompson erklärte seiner Zeit die Entstehung einer biologischen Form aus

dem ‚Bestreben‘ eines Systems, eine Art (energetisches) Gleichgewicht zu erreichen.

Eine Argumentation für den Fall der Stabilität der ästhetisch reizvollen kugelförmigen Viren, wie man sie etwa in Lehrbüchern der Biochemie findet, lautet z. B.: „Der Aufbau des Capsids aus einer großen Zahl identischer Untereinheiten garantiert einen optimalen Effekt (z. B. Schutz der DNA/RNA) bei einem Minimum an Aufwand an genetischer Information. Die Stabilisierung wird durch die Ausbildung einer maximalen Zahl von Bindungen und den mehrfachen Gebrauch von Kontakten der gleichen Art erreicht mit der Folge der hohen Symmetrie des Gesamtgebildes. Durch die Ausbildung von geschlossenen Strukturen (Ringe, Kugel) erhöht sich die Stabilität durch Erhöhung der Zahl der Bindungen zwischen den Proteinuntereinheiten“. Zum Teil sind aber auch Darstellungen mit anthropomorphen Anklängen zu finden: „Die Viren umgehen ihre Genarmut dadurch, daß ihre Hüllen aus einer großen Anzahl einer einzigen oder weniger Arten von Proteinuntereinheiten aufgebaut sind“²⁷, was dann letztlich mit der hohen Symmetrie korreliert.

Die Bildung von Viren erfolgte im Prozeß der Evolution möglicherweise zufällig aus Proteinen und DNA/RNA bzw. direkt aus entsprechenden Bakterienprodukten. Dabei blieben sicherlich die Virusstrukturen mit größter kinetischer Stabilität erhalten – vor allem die mit einer ikosaedrischen Struktur, d. h. höchster Symmetrie. Diese hatten im *survival of the fittest*-Prozeß Bestand, da sie am wenigsten ‚angreifbar‘ waren.

Entsprechendes gilt auch für das oben erwähnte anorganische topologische, auch unter konservativen Bedingungen entstandene Virusmodell mit ikosaedrischer Symmetrie. Von allen möglichen Reaktionsprodukten des relevanten Reaktionsgemisches ist das mit höchster Symmetrie das reaktionsträglichste. Dies läßt sich etwa mit Hilfe der bekannten von Robert R. Woodward und Roald Hoffmann aufgestellten Regeln von der Erhaltung der Orbitalsymmetrie, für die den beiden der Nobelpreis verliehen wurde, erklären. In beiden Fällen - beim Virus und seinem anorganisch-topologischen Modell – greift das gleiche Selektionsprinzip.

Formen an Organismen entstehen dagegen durch eine komplizierte Verknüpfung dissipativer und konservativer Prozesse, eine Verknüpfung die Norbert Bischof wie folgt charakterisiert²⁸: „[...] beide Arten der Formbildung (sind) nötig, um Homöostase mit Selektion, Zielstrebigkeit mit Zweckmäßigkeit also, auf eine Weise verbinden zu können, die das Ergebnis teleonom beschreibbar macht“²⁹. Zur angesprochenen Formenbildung seien zwei Beispiele genannt, nämlich die der alternierenden Muster beim Zebra

und die der Schalen von Seetieren, etwa des *Nautilus pompilius*, die infolge antagonistischer Effekte der Selbstverstärkung durch Nichtlinearität und Inhibierung entstehen. Dabei ist Nichtlinearität Voraussetzung für einen Prozeß, der vom (konservativen) Gleichgewicht wegführt. Die Form biologischer Organismen kann grundsätzlich nur mit Hilfe von (nichtlinearer) Dynamik verstanden werden.

4. Hans Jonas versus Alfred North Whitehead und ein Schlußwort

[...]; das Neue kann sich aber nicht aus dem Alten entwickeln, ohne daß das Alte durch eine gewisse Aufnahme äußerer Nahrung zu einer Art von Vollkommenheit gelangt sei. (Johann Wolfgang von Goethe)³⁰

Wie steht es nun aber mit einer Antwort auf die fundamentale Frage nach dem *kosmogonischen Logos*³¹, der Hans Jonas in dem eingangs zitierten Aufsatz nachgeht: Wohnte der sich mit dem Urknall entwickelnden Materie bereits Information inne? Ist dieser Begriff im Kontext des Werdeganges von elementaren Gebilden bzw. Baueinheiten zu komplexeren Strukturen brauchbar – auch bezogen auf die Vorstellung einer Evolution, in der Information den Werdegang zu höheren Ordnungen gleichsam lenkte? Oder entfaltete sich der kosmogonische Logos allein als Begabung der Materie?³² Im letzteren Fall wäre die Begabung der Materie im Sinne von Jonas eine Beschaffenheit, die etwas grundsätzlich ermöglicht, aber nicht darauf angelegt ist, den Prozeß des Werdens gleichsam zu lenken. Unter diesem Aspekt könnte auch die Frage gestellt werden, ob relativ einfache Bestandteile der Materie, wie etwa Atome, schon die Information - und zwar in der obigen Bedeutung – für die Bildung spezieller molekularer Gebilde enthalten, z. B. für die im Aufsatz besonders herausgestellten schönen Formen. Sicher ist, daß nach „Bildung [relevanter] Ordnungssysteme wie [des] Periodensystems der Elemente“ (vgl. Einleitung) das Entstehen bzw. die Aktualisierung der angesprochenen Formen geeignete Rand- bzw. Reaktionsbedingungen voraussetzt.

In diesem Kontext kritisiert Jonas Whitehead, nach dem Wirklichkeit beständiges Werden ist. Nach Whiteheads Ansicht sind die atomaren Bausteine der Materie Elemente organischen Wachsens und damit auch der Fortentwicklung des Universums³³. In diesem Sinne kann Materie als kreativ angesehen werden, aus deren Schoß ständig Neues entsteht und unter bestimmten Bedingungen für uns auch unerwartet Neues. Dabei ist es – offensichtlich im Sinne von Whitehead – nicht wichtig, ob das *Neue* im Naturprozeß oder im Labor des Chemikers entsteht; es resultiert in beiden Fällen aus der Unerschöpflichkeit

der Materie. Whitehead ordnet bereits einer relativ unstrukturierten Materie Information zu, die die Kreativität der Materie steuert.

Jonas weist einen unkritisch verwendeten Begriff Information ab: ‚Information‘ braucht für sich selbst schon, als ihr physisches Substrat, ein differenziertes und stabiles System, wie es das molekular vollständig artikulierte und darin beharrliche Genom von Lebewesen ist (oder die magnetisch ebenso ausbuchstabierte Programmierung – ‚Software‘ – von Computern). Information ist also nicht nur Ursache, sondern selber schon Ergebnis von Organisation, Niederschlag und Ausdruck des vorher Erreichten, das dadurch perpetuiert, aber nicht überhöht wird.³⁴ (Vergleiche hierzu das obige Goethe-Zitat.) Nach Jonas kommt nämlich nur eher ‚stärker‘ strukturierten, damit sicher wohl auch größeren molekularen Gebilden als Entitäten eines chemischen Prozesses Information zu, nämlich Gebilden, die – z. B. aufgrund ihrer speziellen Form, und damit auch ihres Gewordenseins – selektiv und spezifisch in einen Prozeß eingreifen können oder einen prognostizierbaren Prozeß induzieren. Um ein Beispiel zu nennen: In einem Gemisch zahlreicher Moleküle kann z. B. ein spezielles molekulares Gebilde mit einer geeigneten Oberfläche als Rezeptor ein seiner Form nach komplementäres Molekül erkennen und letztlich ausselektieren. (Hierbei entsteht dann ein größeres supramolekulares Gebilde.) Information im Rezeptormolekül mit bestimmter Qualität ist dann im Sinne von Jonas schon Ergebnis und Ausdruck des Gewordenseins.

Von potentieller Information kann man ausgehen, wenn wechselwirkende und im weitesten Sinne einen Prozeß auslösende ‚komplementäre‘ Strukturen existieren³⁵. Für den Wissenschaftler geht es darum, diese Art Information zu entschlüsseln, um Ordnungsprinzipien in der Formenvielfalt zu erkennen. Man kann versuchen, die Wirklichkeit rational zu erfassen oder bildlich emotional zu erahnen (vgl. hierzu auch Goethes Farbenlehre, speziell im Teil über die ‚sinnlich-sittliche Wirkung der Farbe‘ über das relevante Erlebnis und damit über eine andere Schicht der Wirklichkeit als die von Newton³⁶). Vielleicht fördert das Zusammenwirken die Kreativität des Forschers; auf jeden Fall korreliert dies mit dem noch (?) problembeladenen, aber ungemein spannenden Verhältnis von Ästhetik zu Naturforschung. ‚Nur durch das Morgentor des Schönen drangst du in das Erkenntnisland.³⁷

Anmerkungen

- 1 WERNER HEISENBERG: Die Bedeutung des Schönen in der exakten Naturwissenschaft. In: WERNER HEISENBERG: *Gesammelte Werke*, Abt. C, Bd. III, *Physik und Erkenntnis 1969-1976*, (hg. von WALTER BLUM/HANS-PETER DÜRR/HELMUT RECHENBERG), Piper, München 1985, S. 369.

- 2 HANS JONAS: *Materie, Geist und Schöpfung: Kosmologischer Befund und kosmogonische Vermutung*. In: *Philosophische Untersuchungen und metaphysische Vermutungen*, Insel, Frankfurt am Main 1992, S. 209.
- 3 Unberücksichtigt bleibt im vorliegenden Aufsatz die Arbeit über die 'Ästhetische Theorie' von FRIEDRICH CRAMER (s. u.), nach der natürliche Übergänge zwischen Chaos und Ordnung Schönheit hervorbringen und nach der sich ästhetische Phänomene in der Zeit abspielen („Unwillkürlich bemerken wir das Prozessuale an der Basis einer 'schönen' Struktur“ und „[...] der naive Betrachter wird weniger durch die Struktur, die ihm vor Augen steht, als vielmehr durch den Prozeß 'affiziert', den sie voraussetzt und der in ihr 'erscheint'“). CRAMER führt in diesem Zusammenhang die Wachstumsspirale von Muscheln und Schnecken an, bei der in jeder Windung das Verhältnis des Goldenen Schnittes eingehalten wird, und weist auf die bei bestimmten Blütenblättern erkennbaren Regelmäßigkeiten hin, d. h. deren Beziehungen zu der sogenannten *Fibonacci*-Reihe (... , 5, 8, 13, 21,...) (hierzu CRAMER: „Daraus ist der Prozeß des Wachsens unmittelbar ersichtlich.“).

Auch die Vielfältigkeit der Geschmacksdefinitionen, die in ihrem erkenntnistheoretischen Fundament begründet sind, soll hier unberücksichtigt bleiben. In einem Kapitel über Ästhetik ist hierzu z. B. zu lesen: „Kaum eine andere philosophische Disziplin ruht auf so ungesicherten Voraussetzungen wie die Ästhetik. Gleich einer Wetterfahne wird sie 'von jedem philosophischen, kulturellen, wissenschaftstheoretischen Windstoß herumgeworfen, wird bald metaphysisch betrieben und bald empirisch, bald normativ und bald deskriptiv, bald vom Künstler aus und bald vom Genießenden, sieht heute das Zentrum des Ästhetischen in der Kunst, für die das Naturschöne nur als Vorstufe zu deuten sei, und findet morgen im Kunstschönen nur ein Naturschönes aus zweiter Hand““ (vgl. Anm. 6). Beispielhaft sei hier die Kritik PLOTINS an der Symmetriekonzeption der Stoa erwähnt. Hierbei wendet sich PLOTIN gegen die Auffassung der Stoa, Schönheit sei als Symmetrie zu verstehen, was so viel wie die harmonische Relation der Teile eines Gegenstandes bedeutet.

Das Wort Ästhetik (vom griech. *aisthesis* Wahrnehmung) wurde von ALEXANDER GOTTLIEB BAUMGARTEN (1714-1762) geprägt. Sie sei *scientia cognitionis sensitivae*, bemerkte er in seiner *Aesthetica* (1750) und weiter, daß hier der *felix aestheticus* in den Mittelpunkt tritt. BAUMGARTEN hat übrigens in seinen *Philosophischen Briefen* auch den Plan einer „aesthetischen Empirik“ unter Berufung auf BACON und BOYLE entworfen, in der auch die „Waffen der Sinne“ und deren Werkzeuge wie Vergrößerungs- und Ferngläser und künstliche Ohren behandelt werden sollen. Dieser ist für die moderne Naturwissenschaft und speziell für den ästhetisch schöne Moleküle synthetisierenden Chemiker besonders interessant.

Ästhetische Wahrnehmung ist die Wahrnehmung von Schönheit. Sie soll in diesem Aufsatz im Sinne der Umgangssprache der Antike – nämlich als das, was harmonisch bzw. anziehend wirkt – verstanden werden. Harmonie läßt sich aufgrund der Formästhetik mit Proportion und Symmetrie (griech. Ebenmaß) zu den Grundformen rechnen, durch die sich Schönheit als Einheit in der Mannigfaltigkeit darstellt. Hierbei bezieht sich Symmetrie auf das gleichmäßige Form- oder Größenverhältnis von Teilen in einem Ganzen, dagegen Struktur auf das Gefüge von Relationen, durch die die Elemente (Teile) eines Ganzen miteinander verbunden sind, vgl. zur Thematik auch die Aufsätze von RAINER E. ZIMMERMANN (Ästhetik der Differenz: Strukturbildung im Weltprozeß), FRIEDRICH CRAMER (Schönheit als dynamisches Grenzphänomen zwischen Chaos und Ordnung - ein Neuer Laokoon) und JOACHIM WILKE (*Landscape revisited: Naturästhetik und Selbstorganisation*). In: UWE NIEDERSEN/FRANK SCHWEITZER (Hg.): *Selbstorganisation: Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften*, Band 4, Ästhetik und Selbstorganisation, Duncker & Humblot, Berlin 1993, sowie die allgemeinen Darstellungen: ALWIN DIEMER/IVO FRENZEL (Hg.): *Philosophie* (Das Fischer Lexikon), Fischer, Frankfurt am Main 1958, Begriff *Ästhetik*; JOACHIM RITTER et al. (Hg.): *Historisches Wörterbuch der Philosophie*, Wiss. Buchges., Darmstadt 1971/1992, Begriffe *Ästhetik* und *Das Schöne*; WOLFHART HENCKMANN/KONRAD LOTTER (Hg.): *Lexikon*

- der *Ästhetik*, Beck, München 1992.
- 4 HANS HEINZ HOLZ: *Der ästhetische Gegenstand: Philosophische Theorie der bildenden Künste I*, Aisthesis, Bielefeld 1996.
 - 5 Vgl. hierzu HUGH ALDERSEY-WILLIAMS: *The Most Beautiful Molecule: The Discovery of the Buckyball*, Wiley, New York 1995; ANDREAS DEUTSCH (Hg.): *Muster des Lebendigen: Faszination ihrer Entstehung und Simulation*, Vieweg, Braunschweig 1994 (vgl. insbesondere die Kapitel 'Harmonie der Proportionen von PETER H. RICHTER/HOLGER DULLIN sowie 'Symmetrie und Topologie' von ANDREAS DRESS/DANIEL HUSON/ACHIM MÜLLER); HANS MEINHARDT: *The Algorithmic Beauty of Sea Shells*, Springer, Berlin 1998 (dtisch: *Wie Schnecken sich in Schale werfen*, Springer, Berlin 1997); FRITZ VÖGTLE: *Reizvolle Moleküle der Organischen Chemie*, Teubner, Stuttgart 1989; IAN STEWART: *Game, Set and Math. Enigmas and Conundrums*, Blackwell, Oxford 1989 (dtisch.: *Spiel, Satz und Sieg für die Mathematik*, Insel, Frankfurt am Main 1997 [Kapitel 'Baue Dir Deinen eigenen Virus']); IAN STEWART: *Life's Other Secret: The New Mathematics of the Living World* (Kapitel 'The Frozen Accident'), Wiley, New York 1998; JOHANNES KEPLER: *Gesammelte Werke*, Band VI, *Harmonice Mundi* (Weltharmonik) (hg. von MAX CASPAR), Beck, München 1990; JOACHIM DETTMANN, In Form – Symmetrie, Topologie, Strukturen. In: *Fullerene – die Bucky-Balls erobern die Chemie*, Birkhäuser, Basel 1994, S. 149; PETER SITTE: Symmetrien bei Organismen. In: *Biologie in unserer Zeit*, 14 (Heft 6), 1984, S. 161; ALFRED STÜCKELBERGER: *Einführung in die Antiken Naturwissenschaften*. Wiss. Buchges., Darmstadt 1988 (Kapitel: Pythagoras und die Pythagoreer).
 - 6 Zitiert nach ALWIN DIEMER/IVO FRENZEL (Hg.): *Philosophie* (Das Fischer Lexikon), Fischer, Frankfurt am Main 1958, Begriff *Ästhetik*.
 - 7 DIOGENES LAERTIUS: *Leben und Meinungen berühmter Philosophen*, Bd. II, Buch 9, Kap. II, Meiner, Hamburg 1990, S. 168.
 - 8 WILHELM CAPELLE (Hg.): *Die Vorsokratiker*, Kröner, Stuttgart 1968, S. 123; vgl. auch On Melissus, Xenophanes, and Gorgias. In: JONATHAN BARNES (Hg.): *The Complete Works of Aristotle*, Bd. II, Princeton University Press, Princeton 1995.
 - 9 Auch in der belebten Natur findet man kugelförmige (z. B. bei den Kolonien von Geißeltierchen der Art *Volvox aureus*) sowie kreisförmige Formen (bei der Art *Arachnoidiscus* – übrigens ein Organismus, der einer gotischen Fensterrose ähnelt). In Abb. 3 sind vergleichbare Strukturen aus dem Bereich der Moleküle, die im Aufsatz behandelt werden, dargestellt.
 - 10 Vgl. Anm. 5
 - 11 Auf jeden Fall sollte unser primäres Interesse darin bestehen, die formgebenden Ursachen der Natur – der belebten und unbelebten – auf Einfaches bzw. erste Prinzipien zurückzuführen.
 - 12 WERNER HEISENBERG: Das Naturbild Goethes und die technisch-naturwissenschaftliche Welt. In: WERNER HEISENBERG: *Gesammelte Werke*, Abt. C, Bd. II, *Physik und Erkenntnis, 1956-1968* (hg. von WALTER BLUM/HANS-PETER DÜRR/HELMUT RECHENBERG), Piper, München 1984, S. 394: „Kann nun die eben geschilderte Grundstruktur, die Doppelkette der Nukleinsäure, der GOETHESCHEN Urpflanze irgendwie verglichen werden? [...] Es handelt sich ja in beiden Fällen um das Verständnis der gestaltenden, formgebenden Kräfte in der belebten Natur, um ihre Zurückführung auf etwas Einfaches, allen lebendigen Gestalten Gemeinsames.“
 - 13 ERNST HAECKEL: *Kunst-Formen der Natur* (1904), Prestel, München 1998.
 - 14 D'ARCY W. THOMPSON: *On Growth and Form* (hg. von JOHN T. BONNER), Cambridge University Press, Cambridge 1997.
 - 15 HERMANN WEYL: *Symmetry*, Princeton University Press, Princeton 1989.
 - 16 RENÉ THOM: *Structural Stability and Morphogenesis: An Outline of a General Theory of Models*, Addison-Wesley, Reading (Mass.) 1989.
 - 17 Vgl. Literatur in: ACHIM MÜLLER/SABYASACHI SARKAR/QAISER-SYED NAZIR-SHAH/

- HARTMUT BÖGGE/ MARC SCHMIDTMANN/SHATARUPA SARKAR/PAUL KÖGERLER/BJÖRN HAUPTFLEISCH/ALFRED TRAUTWEIN/VOLKER SCHÜNEMANN: Archimedische Synthese und magische Zahlen: Größenvariation von Molybdänsauerstoff-Riesenkugeln vom Kepleratyp. In: *Angewandte Chemie*, 111, 1999, 3435-3439 sowie verschiedene Kapitel in: ISTVÁN HARGITAI (Hg.): *Quasicrystals, Networks, and Molecules of Fivefold Symmetry*, VCH, Weinheim 1990.
- 18 CYRIL N. HINSELWOOD: Centenary Address to the Chemical Society. In: *J. Chem. Soc.*, 1947, 1271-1277.
- 19 Zitiert nach R. W. SIEGEL: *Physics Today* 46, Okt. Heft, 1993, 64-66.
- 20 JOHANN WOLFGANG von GOETHE: Betrachtung über Morphologie. In: *Werke*, Bd. 13, *Naturwissenschaftliche Schriften I*, Hamburger Ausgabe, dtv., München 1998, S. 120.
- 21 JOHANN WOLFGANG von GOETHE: Neigung des Materiellen, sich zu gestalten. In: *Goethe: Die Schriften zur Naturwissenschaft*, hg. i. A. der deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina (bearbeitet von DOROTHEA KUHN/WOLF von ENGELHARDT), Bd. 11, Hermann Böhlaus Nachfolger, Weimar 1970, S. 203.
- 22 ACHIM MÜLLER/ERICH KRICKEMEYER/HARTMUT BÖGGE/MARC SCHMIDTMANN/FRANK PETERS: Materielle Organisationsformen: ein anorganisches Superfulleren und Keplerat auf Molybdänsauerstoffbasis. In: *Angewandte Chemie*, 110, 1998, 3567-3571.
- 23 ACHIM MÜLLER et al.: [...] ein wasserlösliches Riesenrad mit mehr als 700 Atomen und einer relativen Molekülmasse von ca. 24 000. In: *Angew. Chemie* 107, 1995, S. 2293-2295. Vgl. auch den Übersichtsartikel ACHIM MÜLLER/PAUL KÖGERLER/ CHRISTOPH KUHLMANN: A variety of combinatorially linkable units as disposition: from a giant icosahedral Keplerate to multi-functional metal-oxide based network structures. In: *J. Chem. Soc., Chem. Commun.*, 1999, S. 1347-1358, sowie ACHIM MÜLLER/CHRISTIAN BEUGHOLT, The Medium is the Message. In: *Nature*, 383, 1996, S. 296-297.
- 24 Kommentare der Presse: Deutsche Chemiker entdeckten das Rad im Reagenzglas neu, *Die Welt*, 1995, 27. Dezember; DAVID BRADLEY: Big wheel rolls back the molecular frontier. In: *New Scientist*, 148, 1995, Nr. 2003, S. 18; GÜNTHER STOLL: Im Sog der Supramoleküle. In: *Spektrum der Wissenschaft*, Heft 8, 1996, S. 62 (vgl. auch Titelblatt mit zugehörigem Text auf S. 4); CLAIRE SERAIN/ JOCHEN MEYER: L'Invention de la Roue Moléculaire. In: *La Recherche*, Nr. 292, November 1996, S. 39; MARCIN JAMKOWSKI: 'Opona' z molibdenu. In: *Gazeta Wyborcza* (Polen), 17. November 1995; Großes Rad gedreht, *Der Spiegel*, Nr. 47, 1995, S. 237; vgl. auch *Frankfurter Allgemeine Zeitung* (Natur und Wissenschaft), 22. November 1995 und *Süddeutsche Zeitung* (Umwelt • Wissenschaft • Technik), 7. Dezember 1995. Entsprechendes ergab sich nach der Publikation des genannten Superfullerens: Clusters of Molybdenum, *The Hindu (Science & Technology)* (Indien), 31. Dezember 1998; Molibdeno con sorpresa, *El Pais* (Spanien), 6. Januar 1999; Anorganische Riesenkugel, *Spektrum der Wissenschaft*, Heft 2, 1999, 14; Spielereien mit Molekülen und Mini-Einkaufstaschen, *Süddeutsche Zeitung*, 2. Februar 1999; Monster-Molekül aus Molybdän, *Bild der Wissenschaft*, Heft 3, 1999, 10; VLADIMIR FEDIN: Giant Inorganic Clusters (in russisch). In: *Wissenschaft in Sibirien*, Nr. 8, Februar 1999; DAVID BRADLEY: Metal Buckyballs. In: *The Alchemist*, März 1999 (http://www.chemweb.com/alchem/1999/catalyst/ct_990312_bucky.html).
- 25 THOMAS MANN: *Doktor Faustus*, Kapitel III (Jonathan Leverkühn betrachtet ein Muster auf einer neu-kaledonischen Meeresschnecke).
- 26 HAROLD W. KROTO/J.R. HEATH/S.C.O'BRIEN/ROBERT F.CURL/RICHARD E. SMALLEY: *Nature*, 318, 1985, 162-163.
- 27 LUBERT STRYER: *Biochemie*, Spektrum, Heidelberg 1990 (völlig neubearbeitete Auflage), S. 888.
- 28 NORBERT BISCHOF: Ordnung und Organisation als heuristische Prinzipien des reduktiven Denkens. In: HEINRICH MEIER (Hg.): *Die Herausforderung der Evolutionsbiologie*, Piper,

- München 1992, S. 79.
- 29 Bei BISCHOF ist weiterhin zu lesen: „Jede ortsfeste dissipative Gestalt dürfte sich, wenn geeignetes Material vorhanden ist und die Zeiträume ausreichen, allmählich ein konservatives Skelett schaffen. Solange dieser Prozeß läuft, vermag das Skelett an der homöostatischen Potenz der dissipativen Gestalt teilzuhaben; man denke etwa an die Heilung von Knochenbrüchen. Im Gegenzug allerdings wird das Skelett die dissipativen Prozesse im Sinne einer KÖHLERSchen Zwangsordnung zunehmend kanalisieren. Auf diesem Wege gerät die dissipative Gestalt immer mehr in den Sog zeitlicher Irreversibilität und wird durch sie schließlich zum Erlöschen gebracht.“
- 30 Vgl. Anm. 20.
- 31 In der Vorsokratik war die *Arche* Trägerin des *Logos* mit der Konsequenz, daß aus ungeformter Materie (Stoff) Form entstehen kann. Im allgemeinen versucht man aus der Art der Form auf das Gesetz des Stoffes zu schließen.
- 32 JONAS (vgl. Anm. 2) äußert im Kontext zum faszinierenden Entstehen von Subjektivität: „Materie ist Subjektivität von Anfang an in der Latenz, selbst wenn [...] dazu noch seltenstes Glück für die Aktualisierung dieses Potentials nötig [ist]. Soviel an ‚Teleologie‘ läßt sich dem vitalen Zeugnis allein entnehmen. [...] Es folgt, daß Endursachen – damit aber auch Werte und Wertdifferenzen – in den Begriff der [...] Weltkausalität mit hineingenommen werden müssen: als mitgegebene Disposition dazu und zugleich als Offenheit der Duldung für ihr Intervenieren im Determinationsgefüge der Wirkursachen.“
- 33 Nach WHITEHEADS nachvollziehbarem ontologischem Prinzip liegt die Wirklichkeit in der Selbstorganisation konkreter Einzelwesen begründet. (Unterschied dieser organistischen Philosophie zu PLATON: Der Gedanke einer für die Ideen notwendigen Realisierung.) In seinem Werk *Prozeß und Realität: Entwurf einer Kosmologie* (ALFRED NORTH WHITEHEAD, Suhrkamp, Frankfurt am Main 1987) ist im Kapitel II, Das Kategorienschema (Die Kategorie des Elementaren) zu lesen: „‚Kreativität‘ ist die Universalie der Universalien, die den elementaren Sachverhalt charakterisiert. [...] ‚Kreativität‘ ist das Prinzip des Neuen. Ein wirkliches Ereignis ist ein neues Einzelwesen, das sich von jedem unter den ‚vielen‘ unterscheidet, die es vereinigt. Daher führt die ‚Kreativität‘ etwas Neues in die Natur der vielen ein, [...]“. WHITEHEADS Kategorie des Elementaren ersetzt hier ARISTOTELES’ Kategorie der ersten Substanz.
- 34 Siehe Anm. 2, S. 211.
- 35 Zum relevanten Potentialitätsbegriff vgl. ACHIM MÜLLER: Die inhärente Potentialität materieller Systeme. In: *Philosophia naturalis* 35, 1998, S. 333.
- 36 Vgl. hierzu auch HERBERT HÖRZ: Mathematische Ordnung der Wirklichkeit – Philosophische Reflexionen zur Weltansicht von HELMHOLTZ und HEISENBERG. In: KLAUS MAINZER/ACHIM MÜLLER/WALTER G. SALTZER (Hg.): *From Simplicity to Complexity II: Information - Interaction - Emergence*, Vieweg, Braunschweig 1998.
- 37 FRIEDRICH SCHILLER: *Über das Schöne und die Kunst. Schriften zur Ästhetik*, München 1984 (zitiert nach JOACHIM DETTMANN, Anm. 5).

Ich danke den Herren Prof. Gerd Fleischmann, Prof. Dr. Dr. h.c. Herbert Hörz, Dr. Bruno Redeker und Prof. Dr. Dr. Rainer Zimmermann für wertvolle Diskussionen. Herrn Dipl.-Chem. Paul Kögerler sei für die kritische Durchsicht des Manuskripts, Herrn Dipl.-Chem. Björn Hauptfleisch für die Mithilfe bei der Anfertigung der Abbildungen und dem Fonds der Chemischen Industrie sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft für finanzielle Unterstützung gedankt.