

Quantitative Ästhetik

Werner Ebeling, Jan Freund, Frank Schweitzer¹

1 Naturwissenschaft und Ästhetik: Fünf Standpunkte

Es ist eine weitverbreitete Meinung, daß Ästhetik auf der einen Seite und Mathematik/Naturwissenschaften auf der anderen Seite durchschnittsfremd sind. Der gesunde Menschenverstand sträubt sich gewissermaßen dagegen, eine tiefere Beziehung zwischen einem Gemälde oder einer Symphonie und quantitativen Gesetzen, wie etwa den Maxwell'schen Gleichungen, anzuerkennen. Andererseits sind aber Kunstwerke, wie eine Bachfuge, ein Gemälde, ein Bauwerk oder eine Skulptur, vor aller ästhetischer Bedeutung auch physikalische Objekte in ein, zwei oder drei Dimensionen. Damit sind sie auch einer Analyse mit physikalischen Methoden zugänglich. Es wäre natürlich naiv anzunehmen, daß physikalische Charakteristika dieser Objekte wie Länge, Masse, Impuls usw. eine direkte ästhetische Relevanz besäßen. Die Schönheit eines Gemäldes kann nicht anhand seiner Fläche ermittelt werden, auch wenn auf dem Flohmarkt häufig sein Preis danach bemessen wird. Unbestreitbar bestehen aber enge Beziehungen zwischen den Symmetrien, oder besser gesagt den gebrochenen Symmetrien eines künstlerischen Objektes und seiner ästhetischen Beurteilung, wie z.B. WEYL (1952) und CAGLIOTI (1983, 1988) im Detail gezeigt haben.

Interessanterweise gab es besonders in der letzten Hälfte unseres Jahrhunderts auch immer wieder Versuche, eine Verbindung zwischen dem ästhetischen Gehalt von Objekten und Komplexitäts- und Informationsmaßen herzustellen. Wir nehmen dies zum Anlaß, um nach den Ausführungen der vorhergehenden Kapitel zu den Problemen von Komplexität, Entropie, Information und Vorhersagbarkeit abschließend deren Beziehung zu ästhetischen Kriterien zu diskutieren. Dabei gehen wir davon aus, daß eine Verbindung von Mathematik/Naturwissenschaft und Ästhetik, unter Einbeziehung der neueren Theorie der Selbstorganisation und Komplexität, zumindest einen sinnvollen, möglicherweise einen fruchtbaren Ansatz darstellt (NIEDERSEN & SCHWEITZER, 1993).

Hier tritt uns zunächst ein Rechtfertigungsproblem entgegen: Warum sollte es im Rahmen einer mathematisch-naturwissenschaftlichen Theorie überhaupt möglich sein, Aussagen über das Ästhetische zu machen? Wollte nicht KANT in seiner "Kritik der Urteilskraft" (1790) das Schöne

¹Corresponding author: fschweitzer@ethz.ch

vom Erkenntnisurteil unter Führung des Verstandes abkoppeln und es allein durch das ästhetische Urteil des wahrnehmenden Subjekts bestimmt sehen? Wie läßt sich eine objektive Erkenntnis mit der gleichzeitigen subjektiven ästhetischen Beurteilung vereinbaren? Können zwei Welten, die durch KANTS Kritik scheinbar so verbindlich voneinander geschieden sind, ohne weiteres miteinander verbunden werden? Zu diesen Fragen gibt es zur Zeit noch keinen breiten Konsens, wir wollen daher die Hauptrichtungen der Diskussion in den folgenden fünf Standpunkten zusammenfassen (SCHWEITZER, 1993):

Der *erste* Standpunkt erklärt das Schöne - ungeachtet der Kantschen Kritik - zum ontologischen Prinzip, es ist eine Eigenschaft der uns umgebenden Dinge. Dann sollte eine objektiv vorgehende Mathematik/Naturwissenschaft in der Lage sein, Kriterien für eine ontologische Bestimmung des "Schönen" anzugeben - ein Ansatz, der in den folgenden Abschnitten noch ausführlicher diskutiert werden soll.

Der *zweite* Standpunkt sieht das Schöne - gemäß der Kantschen Kritik - nicht ontologisch, sondern durch das ästhetische Urteil des wahrnehmenden Subjekts bestimmt, betont aber die Frage, ob durch Zuhilfenahme naturwissenschaftlicher Methoden eine natürliche (biologische) Grundlage für das ästhetische Empfinden oder die Beurteilung des Schönen gefunden werden kann.

Bei der Antwort auf die Frage nach biologischen Grundlagen für ästhetisches Empfinden konzentriert sich die Forschung heute einerseits auf die Rolle der Wahrnehmung, die essentiell von den biologischen Voraussetzungen bestimmt wird, andererseits auf die Rolle der Konstruktion beim Zustandekommen sinnlicher Eindrücke und mentaler Einsichten. Ein solcher Zugang zur Ästhetik knüpft an die Begriffsbestimmung durch A.G. BAUMGARTEN an, der 1758 *aesthetica* als Wahrnehmungslehre einführte: der Begriff umfaßt sowohl das griechische *aisthetos* (wahrnehmbar) als auch *aisteticos* (der Wahrnehmung fähig) (SCHWEITZER, 1994). Das Verständnis des "Schönen" unter Einbeziehung biologischer Aspekte im weitesten Sinne untersucht beispielsweise die erst im Aufbau begriffene *Neuroästhetik*, indem sie Erkenntnisse der Verhaltens- und der Evolutionsbiologie mit denen der Hirnphysiologie, der Psychologie und der Informationsverarbeitung verbindet (RENTSCHLER *et al.* , 1988).

Die Selbstorganisationstheorie in ihrer biologisch-kognitiven Ausrichtung bietet demgegenüber einen konstruktivistischen Erklärungsansatz für das Schöne als Emergenzphänomen (STADLER, KRUSE, 1992), das sich durch Konstruktion auf der Grundlage von Selbstreferentialität und Rekursivität ergibt. Das "ästhetische Vermögen" des Subjekts ließe sich in diesem Rahmen verstehen als die Fähigkeit, distinkte Wahrnehmungen nach selbst-referentiellen Maßstäben zu integrieren, als Einheit zu konstruieren und Schönheit als emergente Eigenschaft dieser Einheit individuell zu erleben. Das Schöne bleibt somit als subjektives Ereignis bestehen, aber auch seiner Intersubjektivität wird Rechnung getragen.

Der *dritte* Standpunkt negiert die beiden vorhergehenden und grenzt die Ästhetik von der Mathematik/Naturwissenschaft ab: Das Schöne ist weder auf dem Umweg einer rein naturwis-

senschaftlichen, noch einer konstruktivistischen Analyse reduzierbar; es unterliegt einer Eigengesetzlichkeit und bedarf zu seiner Bestimmung einer eigenen Begrifflichkeit im Rahmen der Ästhetik.

Im Rahmen einer Komplexitätstheorie könnte dann allenfalls versucht werden, die Konzeptualisierung der Ästhetik zu beschreiben, indem beispielsweise relativ stabile Zustände ästhetischer Erfahrung mit Attraktoren in Beziehung gesetzt, Stilpluralität mit Multistabilität assoziiert und Veränderungen als Phasenübergänge aufgefaßt werden. Einen solchen Weg weiter zu verfolgen, ist allerdings nicht unser Anliegen.

Der *vierte* Standpunkt sieht die Verbindung von Naturwissenschaft und Ästhetik als eine zwangsläufige: Im Mittelpunkt steht hier allerdings nicht die naturwissenschaftliche Fundierung der Ästhetik, wie sie im ersten oder zweiten Standpunkt von jeweils verschiedenen Seiten aus angestrebt wird, sondern die Kardinalfrage wird umgekehrt in der ästhetischen Fundierung der Wissenschaft, nicht allein der Naturwissenschaft, gesehen.

Hier geht es unter anderem um die Rolle, die Ästhetik als heuristisches Leitmotiv in der Naturwissenschaft spielt - auch wenn diese Rolle im wissenschaftlichen Selbstbild vielleicht nicht so offensichtlich wird. Immerhin weist M. S. LONGAIR (1984) in seiner Einführung in die theoretische Physik seine Studenten auf die Leitfunktion der Intuition und der Ästhetik bei der wissenschaftlichen Theorienbildung hin.

Dafür lassen sich auch in der neueren Physikgeschichte zahlreiche Beispiele finden: So sagt DIRAC (1977) über SCHRÖDINGER und sich: "It was a sort of act of faith with us that any equations which describe fundamental laws of Nature must have great mathematical beauty in them. It was a very provitable religion to hold and can be considered as the basis of much of our success." PEITGEN & RICHTER (1986) zitieren HERMANN WEYL mit den Worten: "My work has always tried to unite the true with the beautiful and when I had to choose one or the other I usually chose the beautiful." Der Nobelpreisträger CHANDRASEKHAR (1987) führt die Ästhetik als zentrales Moment bei der Konstituierung wissenschaftlicher Theorien, wie der Allgemeinen Relativitätstheorie, heran (vgl. auch CHANDRASEKHAR, 1979). Schließlich hat auch HEISENBERG (1985) sich mit der Bedeutung des Schönen in der exakten Naturwissenschaft befaßt, auf diesen Aspekt können wir hier allerdings nicht weiter eingehen (vgl. SMORODINSKI, 1993).

Die Wissenschaft wird unter diesem Blickwinkel als eine besondere Form von Kunst betrachtet (FEYERABEND, 1984): sie kreiert nicht nur eine spezifische Wirklichkeit, was dem konstruktivistischen Verständnis ohnehin entspricht, sondern sie bedient sich dabei ästhetischer Maßstäbe (SCHWEITZER, 1994), ja sie ist selbst in ihren Grundfiktionen durch und durch ästhetisch verfaßt (WELSCH, 1991).

Der *fünfte* Standpunkt betont in der Beziehung von Naturwissenschaft und Ästhetik vor allem die Tatsache, daß die moderne Naturwissenschaft - zum Beispiel in der Chaostheorie oder bei

der Untersuchung chemischer Reaktions-Diffusions-Systeme - das Ästhetische nicht mehr nur von außen her bestimmt und eingrenzt, sondern in Form von Mustern und Strukturen Ästhetisches gleichsam hervorzubringen vermag. So sind PEITGEN & RICHTER (1986) der Überzeugung: "How could the aesthetic element come alive other than being integrated into the search for mathematical and scientific knowledge?" Durch die neuen Methoden der Visualisierung wird damit das Verhältnis von Wissenschaft und Kunst auf eine neue Basis gestellt. Auch dieser Punkt soll hier nicht weiter diskutiert werden (EILENBERGER, 1986; HOFFMANN, 1992; NIEDERSEN & SCHWEITZER, 1993; SCHWEITZER, 1994).

Die fünf hier angeführten Standpunkte sollen vor allem die Spannbreite verdeutlichen, unter der das Verhältnis von Mathematik/Naturwissenschaft und Ästhetik heute gesehen werden kann und auch tatsächlich diskutiert wird. Wir wollen uns im weiteren darauf beschränken, die mathematisch-naturwissenschaftlichen Möglichkeiten bei der Einführung ästhetischer Maße zu erörtern.

Unser eigener Standpunkt, der auf den Untersuchungen in den vorstehenden fünf Kapiteln basiert, besagt in Kürze: Ästhetische Kriterien sollten den Begriff Komplexität einschließen. Auch das Schöne ist in aller Regel komplex, wenn dieser Begriff in einem vernünftigen Sinne definiert wird (vgl. Kapitel 1 und 5). Allerdings ist das Vorhandensein komplexer Relationen in der Regel nur eine notwendige Bedingung; in keinem Falle ist Komplexität hinreichend für eine Bestimmung des Ästhetischen.

2 Versuche einer quantitativen Ästhetik

Die Versuche, das Schöne mit den in der jeweiligen Zeit zur Verfügung stehenden mathematischen und naturwissenschaftlichen Mitteln zu beschreiben, reichen durch die gesamte neuzeitliche Kunst- und Wissenschaftsgeschichte. Da wir hier keinen Abriss darüber geben können, möchten wir, *pars pro toto*, zumindest einige Beispiele erwähnen.

In der Renaissance erlebte die darstellende Geometrie eine neue Blütezeit. In Deutschland war es vor allem der Maler und Graphiker ALBRECHT DÜRER, der mit seinem Geometrie-Lehrbuch "*Unterweysung der messung mit dem zirckel und richtschydte in Linien ebenen unnd gantzen corporen*" von 1525/1538 der darstellenden Kunst einen neuen, mathematisch fundierten Rückhalt geben wollte (SCHRÖDER, 1980). Auch seine Proportionslehre des menschlichen Körpers ist in diesem Zusammenhang zu nennen.

Auch GOETHE ging bei seinem Versuch, Gesetze und Regeln für das Kolorit in der Malerei zu finden, zunächst von der Überzeugung aus, daß dazu eine naturwissenschaftliche Fundierung nötig sei: "Ich hatte nämlich zuletzt eingesehen, daß man den Farben, als physischen Erscheinungen, erst von der Seite der Natur beikommen müsse, wenn man in Absicht auf die Kunst

etwas über sie gewinnen wolle” (GOETHE, 1810). GOETHE hatte 1790, am Beginn seiner Studien, tatsächlich die Hoffnung, daß die optische Theorie NEWTONS den naturwissenschaftlichen Hintergrund seiner Farbenlehre liefern könne - auch wenn sich die GOETHESche Farbenlehre schließlich in absoluten Gegensatz zur NEWTONSchen Optik stellte (SCHWEITZER, 1998B).

GUSTAV THEODOR FECHNER (1876) begann, durch Methoden der experimentellen Psychologie eine quantitative Grundlage für ästhetisches Urteilen zu schaffen. So stellte er das “Princip des ästhetischen Contrastes” auf; auch entwarf er “verschiedene Versuche, eine Grundform der Schönheit aufzustellen”. Beispielsweise ließ er im Rahmen psycho-physiologischer Untersuchungen Rechtecke von Personen beurteilen, um das “schönste Rechteck” herauszufinden. Im Ergebnis wurde das Rechteck als das schönste bezeichnet, dessen Seiten im Verhältnis des Goldenen Schnitts standen. Frühere Arbeiten beschäftigten sich ebenfalls mit Psychophysik (FECHNER, 1860) und mit “experimenteller Ästhetik” (FECHNER, 1871).

WILHELM OSTWALD entwickelte neben einer eigenständigen Farbenlehre auch eine Theorie des Schönen, die er *Kalik* nannte (OSTWALD, 1993). Damit wollte er einen Gegensatz zur “bisherigen vorwiegend mystischen Ästhetik” schaffen und nicht nur die Kunst, sondern auch die Schönheit auf rational einsichtige, wissenschaftlich quantifizierbare Zusammenhänge zurückführen: “Der Gegensatz, um den es sich handelt, ist die Auffassung der Kunst als einer Technik oder angewandten Wissenschaft ähnlich dem Maschinenbau oder der Medizin.”

Neben diesen Ansätzen hat es auch zahlreiche Versuche gegeben, die Beziehungen zwischen Ästhetik und Symmetrie mit mathematisch-naturwissenschaftlichen Mitteln zu erforschen. Ein Beispiel dafür ist das hervorragende Buch von WEYL (1952), in dem eine direkte Beziehung zwischen Symmetrie und Harmonie hergestellt wird. Diese Idee geht allerdings schon auf KEPLERS “*Harmonia Mundi*” zurück, dessen Harmonien der Planeten von HINDEMITH in der Symphonie “*Harmonie der Welt*” vertont wurden (DANILOV, 1980). Es ist auch gut bekannt, daß sich verschiedene Künstler in ihrem Schaffen ganz bewußt mathematisch-naturwissenschaftlicher Methoden bedient haben. Wir erinnern an LEONARDO DA VINCI, an BACH oder an ESCHER. THOMAS MANN hat in seinem Roman *Doktor Faustus* den Schaffensprozeß eines Tonkünstlers, Adrian Leverkühn, beschrieben, der sich auf mathematische Methoden stützt.

In all diesen Beispielen deutet sich an, daß es trotz der divergierenden Entwicklung, die die “zwei Kulturen” in den letzten einhundertfünfzig Jahren genommen haben, wechselseitige Beziehungen zwischen Wissenschaft und Kunst gibt. Eine neue Verbindung von Mathematik/Naturwissenschaft und Ästhetik eröffnet vielleicht die Möglichkeit, diese Kulturen auf einer “höheren” Ebene wieder zusammenzuführen. Diese Hoffnung hat sich vor allem durch die neuere Komplexitäts- und Selbstorganisationstheorie verstärkt, und in der Tat hat sich in der Neuzeit keine andere aus der Naturwissenschaft hervorgegangene Theorie so intensiv mit Problemen der Ästhetik und der Kunst beschäftigt (NIEDERSEN & SCHWEITZER, 1993).

Die Anerkennung einer irreduziblen Komplexität der Wirklichkeit, die zum neuen Selbstverständnis der Wissenschaft gehört, ist auch die Voraussetzung für einen neuen Dialog zwischen den zwei Kulturen. So schreiben PRIGOGINE & PAHAUT (1985): "Von nun an wird es wieder möglich, einen neuen Dialog zwischen den verschiedenen Bereichen der modernen Kultur zu schaffen. Die Wissenschaft beschäftigt sich wieder mit Themen, die die Künstler lange Zeit für unvereinbar mit deren Vorgehen hielten."

Damit eröffnet sich auch ein neuer Blick auf die enge Beziehung zwischen natürlichen und künstlerischen Produktionen. Die Natur wird philosophisch wieder eher mit einem Kunstwerk verglichen: "Jede große Epoche der Wissenschaft hat ein bestimmtes Modell der Natur entwickelt. Für die klassische Wissenschaft war es die Uhr, für die Wissenschaft des 19. Jahrhunderts, die Epoche der industriellen Revolution, war es ein Motor, der irgendwann nicht mehr weiterläuft. Was könnte für uns das Symbol sein? Wir stehen vielleicht den Vorstellungen Platons näher, der die Natur mit einem Kunstwerk verglich" (PRIGOGINE & STENGERS, 1990). Entsprechend wird auch eine Verwandtschaft zwischen künstlerischen und natürlichen Schaffensprinzipien konstatiert.

G. NICOLIS (1985), beispielsweise, stellt fest, "daß die Formen und Rhythmen im Universum des Künstlers in Wirklichkeit tief in den Naturgesetzen verankert sind". Er betont selbstverständlich einschränkend: "Natürlich liegt mir der Gedanke fern, die künstlerische Kreativität auf eine chemische Reaktion zurückführen zu wollen, auch wenn sie so komplex ist wie die Belousow-Zhabotinski-Reaktion!" (NICOLIS, 1985) – aber warum sollte die Kunst, zumindest bei der Bestimmung des Ästhetischen, nicht trotzdem von den neuen Einsichten der Naturwissenschaft profitieren können? "Zusammenfassend kann man sagen, daß die Dynamik im Phasenraum neue Formen einführt, die abstrakter sind als die Formen im gewöhnlichen Raum der euklidischen Geometrie, die aber genauso vielfältig und unterschiedlich sein können. Sie könnten den Ausgangspunkt für eine neue Ästhetik bilden, die den engen Zusammenhang zwischen Formen, die aus natürlichen Phänomenen entstanden sind, und Formen, die im Universum des Künstlers dargestellt werden, noch deutlicher beweist" (NICOLIS, 1985).

Damit scheint sich eine neue Konvergenz zwischen Naturwissenschaft, Kunst und Ästhetik anzudeuten. Begründet wird sie mit den allgemeinen Gesetzmäßigkeiten, die bei der Entstehung von Komplexität eine Rolle spielen und die den Handlungsspielraum auch der Kunst eingrenzen. In den folgenden Abschnitten werden wir versuchen, die ästhetische Relevanz dieser Gesetzmäßigkeiten an einigen Beispielen aufzuzeigen. Dabei wird die Informationstheorie auch aus wissenschaftshistorischer Sicht eine besondere Rolle spielen.

3 Birkhoffs mathematische Theorie der Ästhetik

Am Anfang der Entwicklungen, die zu einer Verbindung von Informationstheorie und Ästhetik führten, standen die Arbeiten des Mathematikers G.D. BIRKHOFF (1931, 1932) “A Mathematical Approach to Aesthetics” und “A Mathematical Theory of Aesthetics”, wobei in der zweiten Arbeit vor allem die Ästhetik musikalischer Kompositionen im Mittelpunkt steht. BIRKHOFFS Grundgedanke besteht darin, daß ästhetisches Empfinden sowohl durch Ordnung als auch durch Unordnung gesteigert werden kann. Dabei kommt es auf die richtige Mischung an, da wir weder vollständig reguläre, noch vollständig irreguläre Strukturen als schön empfinden. Diesem Kerngedanken von BIRKHOFF möchten wir sehr zustimmen, denn er trifft sich mit den in Kapitel 1 und 5 entwickelten Auffassungen. Die konkreten mathematischen Ansätze, die BIRKHOFF zur Bestimmung ästhetischer Kriterien eingeführt hat, sehen wir allerdings nur als eine von vielen Möglichkeiten an, die aber durchaus Interesse verdient.

BIRKHOFFS mathematische Ansätze werden von GUNZENHÄUSER (1975) ausführlich diskutiert: “Für BIRKHOFF ist das Fundamentalproblem der ästhetischen Wahrnehmung sehr eng gefaßt: Man untersuche alle ‘auffindbaren ästhetischen Faktoren’ einer Klasse (ästhetischer) Objekte und lege die (relative) Bedeutung dieser Invarianten dadurch fest, daß man ihnen gewisse Zahlenwerte zuordnet. Diese Zahlenwerte, die sich damit auf verschiedene Merkmale der betrachteten Objekte beziehen, gestatten dann einfache numerische Vergleiche der Objekte innerhalb bestimmter Klassen. Das Problem liegt im Auffinden und Definieren geeigneter ästhetischer Faktoren. In der BIRKHOFFSchen Theorie können nur solche Invarianzen berücksichtigt werden, die sich auf die Form der (ästhetischen) Objekte in einem allgemeinen Sinne beziehen.”

Für BIRKHOFF ist das ästhetische Empfinden bei der Wahrnehmung von Objekten bestimmt durch drei Größen, die er als Ordnung O , Komplexität C und ästhetisches Maß M bezeichnet: “The typical aesthetic experience can be regarded as compounded of three successive phases: 1) a preliminary effort of attention, which is necessary for the act of perception, and which increases in proportion to what we shall call the *complexity* (C) of the object; 2) the feeling of value or *aesthetic measure* (M) which rewards this effort, and finally 3) a realization that the object is characterized by a certain harmony, symmetry, or *order* (O), more or less concealed, which seems to be necessary for the aesthetic effort. (...) If our analysis be correct, it is the intuitive estimate of the amount of order O inherent in the aesthetic object, as compared with its complexity C , from which arises the complex feeling of the relative aesthetic value” (BIRKHOFF, 1931).

Die Komplexität C ist ein Maß für die “Gesamtheit der Merkmale des wahrgenommenen Objektes”. In der sinnlichen Wahrnehmung wird diese Komplexität erfahrbar als Anstrengung der Sinnestätigkeit des Betrachters. Numerisch wird C bestimmt durch die Zeichenmenge, aus der das Objekt besteht, also bei gesprochenen Gedichten aus der Zahl der Silben bzw. Phoneme, beim Hören von Musik durch die Zahl der Töne usw.

O repräsentiert die (mehr oder weniger verborgene) *Ordnung* eines Objektes, die für BIRKHOFF als notwendige Bedingung für das Auftreten eines “Gefühls des Gefallens am ästhetischen Objekt” angesehen wird. Diese Ordnung wird durch verschiedene Ordnungselemente, wie Symmetrien in graphischen Objekten, oder Reime bei Gedichten, ausgedrückt.

Unter der Annahme, daß M , O und C meßbare Größen seien, definiert BIRKHOFF das ästhetische Maß M formal als Quotienten von O und C :

$$M = \frac{O}{C}. \quad (1)$$

Das ästhetische Maß M , das das “Gefühl des Gefallens” ausdrücken soll, ist in seiner funktionalen Abhängigkeit von der Ordnung bzw. der Komplexität postuliert. Nach BIRKHOFF reduziert die Komplexität das ästhetische Maß, während es durch Ordnung erhöht wird. Weiterhin wird deutlich, daß es für ein bestimmtes ästhetisches Maß eine Fülle von Realisierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Komplexität und Ordnung gibt. Objekte mit einfacher Komplexität und Ordnung können das gleiche “Gefühl des Gefallens” hervorrufen wie sehr komplexe Objekte entsprechender Ordnung, auch wenn letztere bedeutend schwerer zu quantifizieren sind.

BIRKHOFF selbst hat sein ästhetisches Maß unter anderem auf einfache geometrische Objekte angewandt. Um den Ansatz zu illustrieren, wollen wir das Beispiel der Polygone herausgreifen. Hier wird das ästhetische Maß M folgendermaßen berechnet:

$$M = \frac{V + E + R + HV + (-F)}{C}. \quad (2)$$

Die Komplexität C bestimmt BIRKHOFF im Fall der Polygone als die kleinste Anzahl derjenigen Geraden, auf denen sämtliche Polygonseiten liegen. Das Ordnungsmaß O ergibt sich additiv aus den Maßzahlen fünf verschiedener Ordnungselemente, die BIRKHOFF für wesentlich hält: vertikale Achsensymmetrie (V), Gleichgewicht (E), Rotationsymmetrie (R), Horizontal-Vertikal-Ausrichtung (HV) und “allgemeine Form” (F). “Nach BIRKHOFF hat ein Polygon dann eine ‘erfreuliche Form’, wenn jeder von seinem Zentrum ausgehende Strahl die Begrenzung der Form nur einmal schneidet oder wenn jede beliebige horizontale oder vertikale Gerade diese Begrenzungslinie in höchstens zwei Punkten schneidet. Ist mindestens eine dieser Bedingungen erfüllt, so setzt man $F=0$, sonst aber $F=2$ ” (GUNZENHÄUSER, 1975). Auch für die anderen Größen werden ähnliche “Meßvorschriften” angegeben, ohne daß wir hier darauf eingehen wollen. Abb. 6.1 zeigt eine Anzahl von Polygonen, die von BIRKHOFF entsprechend ihres jeweiligen ästhetischen Maßes angeordnet wurden.

Ein anderer Anwendungsfall betrifft die Form von Vasen. Hier sah BIRKHOFF auch eine praktische Möglichkeit, um Vasenformen mit hohem ästhetischem Maß zu konstruieren (siehe Abb. 6.2).

BIRKHOFF (1931) hat sich selbst über die Problematik der Quantifizierbarkeit und über den Gültigkeitsbereich seiner Formel (1) kritisch geäußert: “Complete quantitative determination of

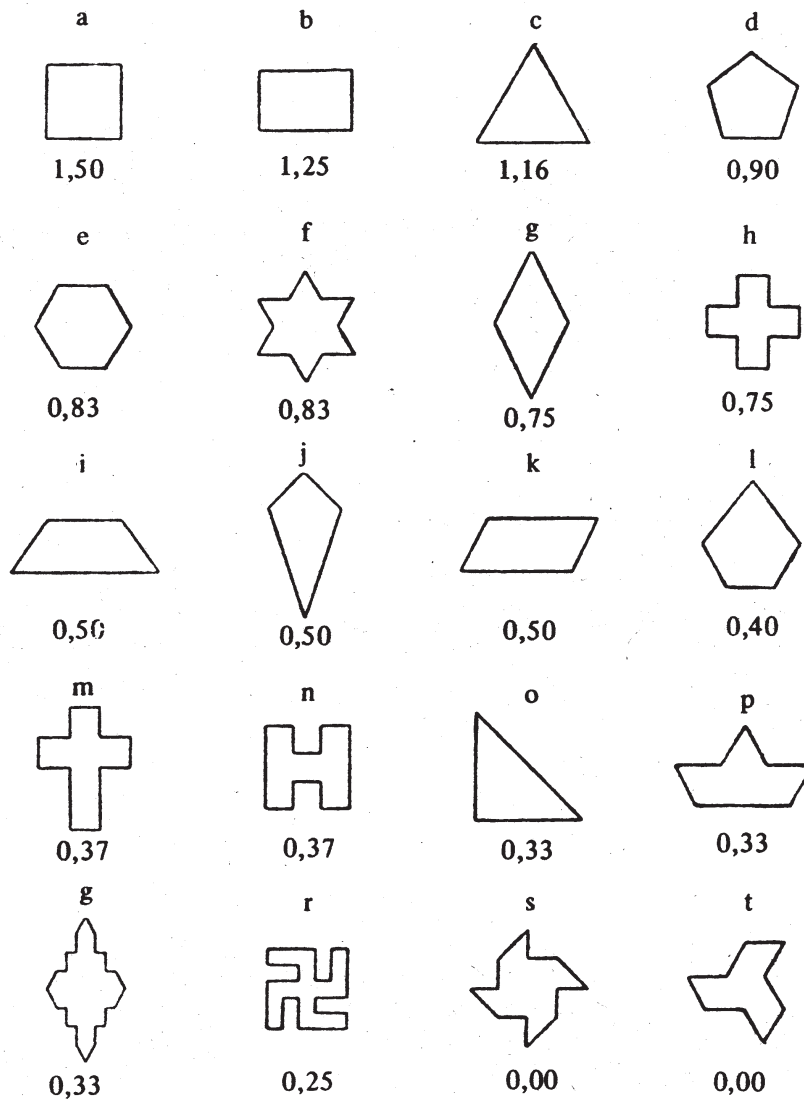


Figure 1: Ausgewählte Polygone mit Angabe des ästhetischen Maßes (nach BIRKHOFF (1929), aus: GUNZENHÄUSER, (1975), S. 35)

these variables will only be attempted for certain typical classes of objects of extreme simplicity; it will be shown however that the analysis of these simple cases throws much light on the complex cases which are more interesting from the artistic point of view.”

Die Probleme, die mit einer quantitativen Analyse des ästhetischen Maßes (1) verbunden sind,

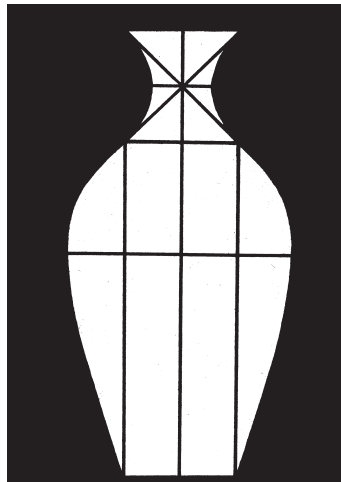


Figure 2: Vasenform mit ästhetischem Maß $M = 1$ nach BIRKHOFF (aus: GUNZENHÄUSER, (1975), S. 43)

betreffen vor allem die Operationalisierbarkeit. Es gibt es keine klar begründbare Methodik zur Bestimmung dessen, was in einem ästhetischen Objekt als Ordnung oder Komplexität bezeichnet werden soll. Insbesondere bleibt es problematisch, wie die Elementenmenge, aus denen ein Objekt konstituiert wird, ausgewählt und quantifiziert werden soll. Hier sind auch Aspekte der Wahrnehmung, der Superzeichen-Bildung und des Lernens zu berücksichtigen, ebenso Faktoren, wie die *Originalität* (oder Seltenheit) der Objekte.

Trotz dieser Schwierigkeiten haben sich die grundlegenden Überlegungen BIRKHOFFS zur Ästhetik der Folgezeit als anregend erwiesen, zum Beispiel in Bereichen, die mit klar gegliederten geometrischen Formen zu tun haben, wie etwa der Architektur (GRÜTTER, 1987).

4 Statistische Analysen von Sprache und Stil

Bereits BIRKHOFF (1932) hat seine Theorie auf die Musikalität lyrischer Dichtung angewandt, und er entwickelte auch eine rund 100 Druckseiten umfassende numerische Ästhetik musikalischer Kompositionen. Auch SHANNON (1951) wandte in seiner fundamentalen Arbeit "Prediction and Entropy of Printed English" das Konzept der Informationsentropie auf literarische Produktionen an. Diese Untersuchungen wurden von WILHELM FUCKS in den 50er und 60er Jahren zu einer mathematischen Analyse von Sprachelementen, Sprachstil und Sprachen (FUCKS, 1953) sowie zu einer Analyse von Formalstrukturen der Musik (FUCKS, 1958, 1963) erweitert (vgl. auch FUCKS, 1957, 1968, sowie FUCKS & LAUTER, 1965).

Ausgangspunkt der Arbeiten von FUCKS ist eine statistische Analyse, beispielsweise von Silben, Wort- und Satzlängen, Wortzahl pro Satz usw. in Texten oder von Tonhöhen, Tondauern und Intervallen in der Musik. Es werden Häufigkeitsverteilungen, Korrelationen und Informationsentropien berechnet. Im Ergebnis findet FUCKS signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Autoren bzw. Komponisten, aber auch zwischen Stilepochen. Ebenso ließ sich der Stil von Dichtern im Vergleich zu Schriftstellern quantifizieren oder der von Literaten im Vergleich zu Wissenschaftlern. Auch Unterschiede zwischen Vertretern verschiedener Sprachen wurden quantitativ erfaßt.

Das von FUCKS untersuchte Material und die Analysen sind sehr umfangreich und sicher einer erneuten Rezeption wert; deshalb wollen wir hier einige Beispiele angeben, wobei wir uns auf Texte beschränken. Bei der Analyse der Formalstrukturen von Texten geht FUCKS (1968) von einem abstrakten Stil-Verständnis aus: "Unter Stil wollen wir sehr allgemein die Gesamtheit aller objektiv erfaßbaren Eigenschaften eines Gegenstandes oder einer Handlung verstehen, hier also von literarischen Werken, von Text. Der Stil eines Textes ist teils vom Inhalt, teils von formalen Eigenschaften bestimmt. (...) Für unsere Analyse können wir die formale Struktur eines Textes von seinem Bedeutungsgehalt trennen."

Die Idee, daß literarische Texte sich in gewisser Weise auf der Grenze zwischen Ordnung und Chaos bewegen, hat FUCKS (1968) bei seinen Untersuchungen zum metrischen Gehalt von Texten schon geäußert: "Mathematisch gesehen handelt es sich bei der Metrik um mehr oder minder durchgehaltene Periodizitäten und mehr oder minder kunstvoll konstruierte Symmetrien und Asymmetrien. Absolut streng gebundene Rede ist praktisch unmöglich. Umgekehrt zeigt auch die prosaischste Prosa noch gewisse Reste metrischer Ordnung. Die Texte liegen irgendwo zwischen ganz strenger und ganz regelloser Anordnung metrischer Elemente." Entsprechende Analysen von "Bindungsstärken" und "Anziehungskräften" von Sätzen wurden von FUCKS für die Texte verschiedener Autoren durchgeführt, ohne daß wir hier auf die Details eingehen.

Für uns sind im folgenden die Ausführungen von Interesse, die sich mit der Quantifizierung der Ästhetik unter Verwendung des Entropiebegriffs befassen. FUCKS (1968) teilt die Auffassung anderer quantitativer Ästhetiker, "daß alle Kunstwerke wie jedes zusammengesetzte Ding geordnete Elementenmengen darstellen. (...) Eine exakte Ästhetik muß sich demnach mit zwei Themen befassen: einmal mit der Elementenmenge, die das Kunstwerk konstituiert, und zum anderen mit der Ordnung der Elemente in der Menge. (...) Wenn man erst einmal ein Kunstwerk als geordnete Elementenmenge begriffen hat, ist es naheliegend, den Ordnungsgrad der Menge der Elemente formal genauso zu berechnen, wie man in der Physik Entropien berechnet."

FUCKS hat bereits 1953 die Entropie als ein quantitatives Maß für die Stilcharakteristik in die Ästhetik eingeführt, wobei er sich ausschließlich auf die SHANNONSche Informationsentropie

stützt, die wir hier nur zur Erinnerung noch einmal angeben:

$$S = k_B H = -k_B \sum_{n=1}^N p_n \ln p_n. \quad (3)$$

Die relativen Häufigkeiten p_n wurden für sehr unterschiedliche Charakteristika bestimmt, von denen wir hier nur einige herausgreifen wollen. Eine interessante Stilcharakteristik, die zum Beispiel deutsche und lateinische Autoren deutlich unterscheidet, sind die relativen Häufigkeiten der Silbenzahlen je Wort. Wenn K die Gesamtzahl der Wörter im Text ist und z_n die Zahl der Wörter, die aus n Silben bestehen, dann ergibt sich die relative Häufigkeit als $p_n = z_n/K$. Abb. 6.3 zeigt diese Häufigkeitsverteilungen für vier verschiedene Texte.

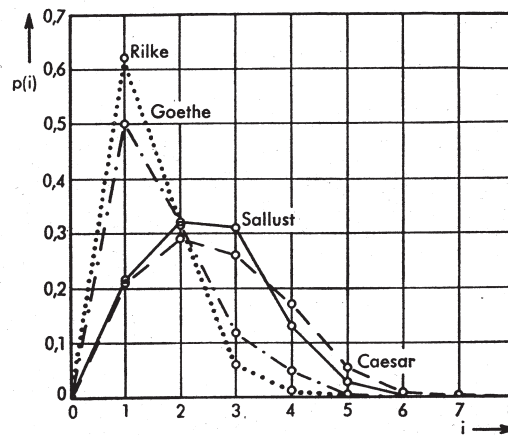


Figure 3: Relative Häufigkeiten p_i der Silbenzahlen je Wort, aufgetragen über der Silbenzahl i je Wort für folgende Werke: *Goethe*: “Wilhelm Meisters Lehr- und Wanderjahre”, *Rilke*: “Die Weise von Liebe und Tod des Cornets Christoph Rilke”, *Caesar*: “De Bello Gallico”, *Sallust*: “Bellum Jugurthinum” (aus: FUCKS (1953), S. 22)

FUCKS (1953) konnte zeigen, daß sich die relativen Häufigkeiten in Abb. 6.3 durch die POISSON-ähnliche Verteilung:

$$p_n = \frac{e^{-\mu} \mu^{n-1}}{(n-1)!} ; \mu = \bar{n} - 1 \quad (4)$$

beschreiben lassen, wenn man den Mittelwert \bar{n} aus der empirisch bestimmten Häufigkeitsverteilung entnimmt.

Da die Unterschiede in Abb. 6.3 offensichtlich sprachbedingt sind, hat FUCKS (1953) eine große Anzahl von literarischen Werken aus neun verschiedenen Sprachen untersucht und daraus die Verteilungen der relativen Häufigkeiten der Silbenzahlen bestimmt. Er findet, daß der Mittelwert

μ dieser Verteilungen nur in einem schmalen Bereich

$$1.351 \leq \mu \leq 2.455 \quad (5)$$

variiert. Unter Verwendung der empirischen Häufigkeitsverteilungen p_n wurde dann auch die SHANNON-Entropie dieser Sprachen berechnet. Das Ergebnis ist in Abb. 6.4 dargestellt.

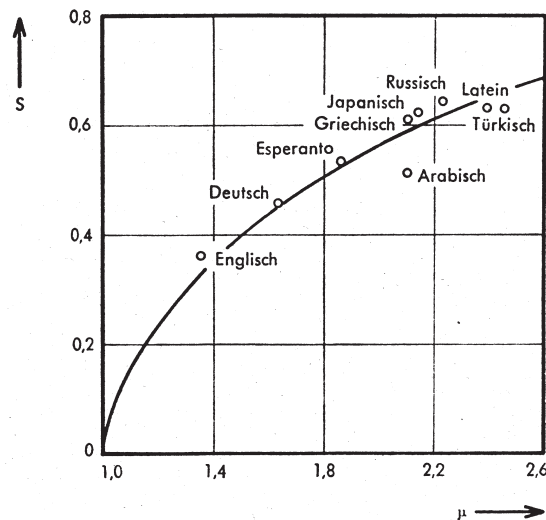


Figure 4: Entropie S (3) als Funktion der mittleren Silbenzahl je Wort μ für neun Sprachen. Die ausgezogene Kurve stellt die aus der Verteilung p_n (4) berechnete Entropie dar (aus: FUCKS (1953), S. 88)

Die gute Übereinstimmung der theoretischen Kurve mit den auf der Basis natürlicher Texte berechneten Entropien in Abb. 6.4 kommentiert FUCKS (1953) mit den Worten: “Wir dürfen daher wohl unsere theoretische neue Verteilung (4) als das allgemeine Gesetz der Bildung von Wörtern aus Silben ansprechen.” Die Abweichung beim Arabischen wird mit der geringen Zahl untersuchter Werke und deren Zugehörigkeit zur gleichen Literaturgattung erklärt.

Um den Unterschied zwischen autorenspezifischen und sprachspezifischen Charakteristika des Stils deutlich zu machen, hat FUCKS (1953) schließlich auch die Entropie einer ganzen Anzahl von Werken aus drei verschiedenen Sprachen berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 6.5 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, daß die Autoren verschiedener Sprachen sich hinsichtlich der Entropie der Texte unterscheiden, daß aber auf der anderen Seite auch “stilistische Homologien” innerhalb einer Sprache existieren.

Die aus der mittleren Silbenzahl berechnete Entropie kann auch als Stilcharakteristikum eines einzelnen Autoren verwendet werden, wie Abb. 6.6 zeigt. Es fällt auf, wie genau die Punkte für die untersuchten Werke von THOMAS MANN auf einer Geraden liegen (für PLATO wird angemerkt,

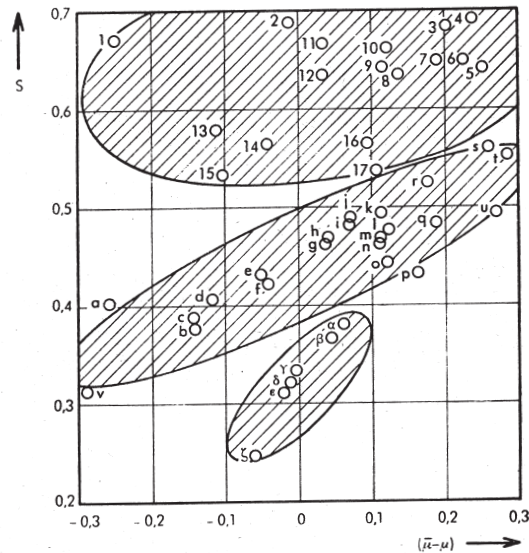


Figure 5: Entropie S (3) einer Anzahl von Schriftwerken für drei Sprachen, aufgetragen über der Größe $\bar{\mu} - \mu$, worin μ die mittlere Silbenzahl je Wort des betreffenden Werkes bedeutet und $\bar{\mu}$ die mittlere Silbenzahl je Wort der zugehörigen Sprache ist. (griechische Buchstaben: Werke englischer Autoren; lateinische Buchstaben: Werke deutscher Autoren; Ziffern: Werke lateinischer Autoren) (aus: FUCKS (1953), S. 90)

daß die Echtheit von einigen der untersuchten Werke umstritten ist). Die auffälligen statistischen Koinzidenzen in den Werken eines Autors hat FUCKS zu einer Methode erweitert, um strittige Autorenschaften zu klären.

Die Ansätze von FUCKS zu einer “deskriptiven” oder “exakten” Ästhetik basieren vor allem auf einer *statistischen Analyse* von Texten, Musik und Bildern, ohne daß hier bereits weitergehende ästhetische Maße definiert wurden. Unter dem Einfluß der Informationstheorie und der Kybernetik wurden diese Ansätze allerdings in den 60er und 70er Jahren zu einer *Informationsästhetik* erweitert, die wir im folgenden Abschnitt umreißen wollen.

5 Informationstheorie und Ästhetik

Bedingt durch die Dominanz der Mathematik und der Naturwissenschaften im 20. Jahrhundert, mehren sich auch die Versuche, eine Ästhetik zu begründen, die rationale, deduktive, experimentelle und statistische Methoden auf ästhetische Probleme anwendet. Diese Ästhetik wird von GUNZENHÄUSER (1975) auch als *Galileische Ästhetik* bezeichnet: “Gegenstand ihres Interesses

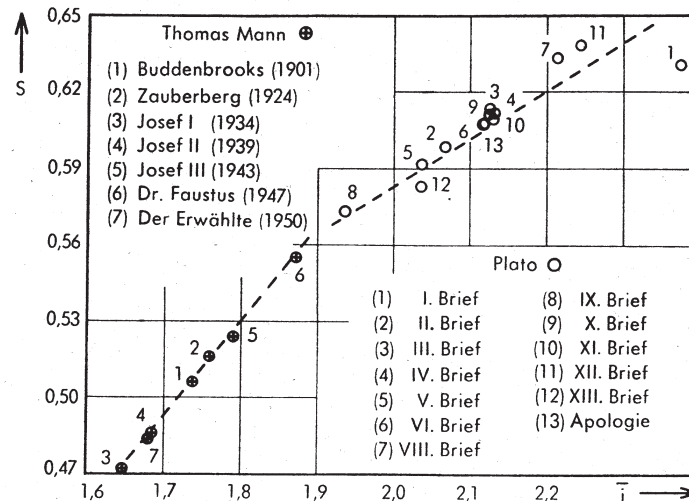


Figure 6: Entropie S (3) für sieben Werke von THOMAS MANN und dreizehn Werke von PLATO aufgetragen über der mittleren Silbenzahl je Wort \bar{i} (aus: FUCKS (1953), S. 97)

sind alle diejenigen ‘Merkmale’ eines ästhetischen Objekts, die man als ‘ästhetischen Zustand’ oder ‘ästhetische Realität’ zusammenfassen kann. Die moderne Ästhetik arbeitet feststellend; sie vermittelt gewisse numerisch zugängliche Merkmale der ‘ästhetischen Realität’, die diese zwar nur detailliert und abstract bezeichnen, dafür aber objektiv und material. Der Detaillismus der gewonnenen (Meß-)Werte erreicht zwar höchste Objektivität, nur selten jedoch eine geschlossene, zusammenhängende Wirklichkeitsbetrachtung, wie man sie von der (subjektiven) Interpretationsästhetik HEGELSchen Typs gewohnt ist. ”

GUNZENHÄUSER (1975) hat fünf Voraussetzungen benannt, die den Rahmen für eine *Informationsästhetik* bilden:

1. Die zu untersuchenden Objekte sind statistisch beschreibbar als räumlich oder zeitlich ausgedehnte Mannigfaltigkeiten diskreter Elemente materialer Beschaffenheit.
2. Die ästhetischen Objekte werden in den Zusammenhang eines Informationsprozesses gestellt: Der Mensch ist Sender und Empfänger “ästhetischer Information”.
3. Ästhetische Objekte entstehen als Kombination von Zeichen eines vorgegebenen Repertoires und werden auch als Zeichengeflecht wahrgenommen.
4. Die Zeichenmenge eines ästhetischen Objekts ist geordnet. Die Anordnungen der Zeichenelemente sind Bestimmungsstücke für die “Gestaltung” eines ästhetischen Objektes.

5. Die ästhetischen Objekte unterliegen der “Unbestimmtheitsrelation”; ihre Zeichen weisen eine (im Prinzip zahlenmäßig angebbare) Unbestimmtheit gegenüber Störungen und Zerstörungen auf.

Jede Ästhetik, die auf diesen Voraussetzungen basiert, ist nach BENSE eine Informationsästhetik, weil die o.g. Merkmale direkt auf den Begriff der Information zutreffen: Information ist statistisch meßbar, besitzt einen materiellen Träger und kann nachrichtentechnisch übermittelt werden. Außerdem sind die Zeichenelemente in einer bestimmten Weise geordnet, die durch Störungen beeinflusst werden kann.

MAX BENSE hat bei seiner Begründung einer “exakten Ästhetik” bereits 1956 auf die Beziehung zwischen der thermodynamischen Entropie und dem ästhetischen Prozeß hingewiesen (BENSE, 1982). Die dem 2. Hauptsatz entsprechende Zunahme der Entropie bedeutet, wie wir auch im Kapitel 1 ausgeführt haben, einen *Ordnungsverlust*. Beim ästhetischen Prozeß dagegen “entsteht aus dem Chaos der stochastischen Verteilung der Zeichenelemente eine Zeichenordnung”. Dieser Ordnungsgewinn ist verbunden mit einer abnehmenden Entropie. Um diesen Gewinn zu charakterisieren, führt BENSE den Begriff der *Redundanz* R ein:

$$R = \frac{H_{vor} - H_{nach}}{H_{vor}}, \quad (6)$$

wobei H_{vor} und H_{nach} die Negentropie bzw. die Abnahme der statistischen Information messen. Eine Redundanz von Null würde also den bereits im Kapitel 5 diskutierten chaotischen Sequenzen entsprechen, eine Redundanz von Eins dagegen den periodischen Sequenzen. Die Redundanz als Ordnungsmaß ist damit einer quantitativen Analyse zugänglich. Zu erwähnen ist, daß die Redundanztheorie in der Ästhetik weitere quantifizierbare Redundanz-Begriffe eingeführt hat, die auch Effekte der Informationsspeicherung und des Lernens berücksichtigen (vgl. dazu GUNZENHÄUSER, 1975).

Im ästhetische Maß M (1), das von BIRKHOFF als Quotient aus Ordnung und Komplexität eingeführt wurde, läßt sich nach BENSE die Ordnung durch die Redundanz ausdrücken. Um die zweite zentrale Größe dieses Ansatzes, die Komplexität, zu quantifizieren, wird in der Informationsästhetik die SHANNONSche Informationsentropie H (3) herangezogen, die wir bereits in den vorhergehenden Kapitel ausführlich diskutiert haben. Damit ergibt sich als Gegenstück zur BIRKHOFFSchen Definition des ästhetischen Maßes (Gl. 1) die Formel:

$$M^* = \frac{\text{Redundanz } R}{\text{Entropie } H}. \quad (7)$$

M^* wird auch als *mikroästhetisches Maß* bezeichnet, um den Unterschied zu dem makroästhetischen Maß von BIRKHOFF zu verdeutlichen. Oftmals wird für die Bestimmung von M^* anstelle der Redundanz R (Gl. 6) nur die Differenz $H_{vor} - H_{nach}$ verwendet, wodurch sich eine dimensionslose Größe M ergibt, die auch als *ästhetische Information* (FRANK, 1959) bezeichnet wird.

Für das ästhetische Maß lassen sich die bereits oben erwähnten zwei Grenzfälle diskutieren:

- *Ordnung*: In diesem Fall wird die als Ordnungsmaß verwendete Redundanz maximal, während die als Komplexitätsmaß verwendete Informationsentropie minimal wird, und M erreicht ein Maximum.
- *Chaos*: In diesem Fall wird das Ordnungsmaß, die Redundanz, minimal, während die Komplexität, die Informationstentropie, maximal wird. Entsprechend hat M ein Minimum.

Die Bewertung ästhetischer Wahrnehmungsprozesse bewegt sich also stets zwischen *Ordnung* und *Chaos*, wobei hier das Problem deutlich wird, daß BIRKHOFFS ästhetisches Maß eindeutig die Ordnungszustände ästhetisch höher bewertet. Dies wird aber durch empirische Untersuchungen *so* nicht bestätigt. A.A. MOLES (1966, 1968) hat darauf hingewiesen, daß jede Botschaft, auch die ästhetische, eingeschlossen ist zwischen den Fällen

- *perfekte Originalität*, die nur mit einer gänzlich unvorhersehbaren und praktisch unverständlichen Zeichenfolge erreicht wird - dies entspricht dem *Chaos*-Grenzfall in der obigen Unterscheidung,
- *perfekte Banalität*, die aus der vollständigen Redundanz der Botschaft entsteht und nichts Neues für den Empfänger bringt - dies entspricht dem Grenzfall der *Ordnung* in der obigen Unterscheidung.

Allerdings wird bei MOLES der Grenzfall der *Banalität* oder *Ordnung* aufgrund des zu geringen Neuigkeitswertes ebenso niedrig bewertet wie der Grenzfall der perfekten *Originalität* bzw. des *Chaos* (vgl. dazu Abb. 6.7). Nur *zwischen* diesen beiden Polen, das heißt, wenn es dem Betrachter ermöglicht wird, durch ein Mindestmaß an Strukturierung die dargebotene Information auch auszuschöpfen, nimmt der ästhetische Wert ein Maximum an.

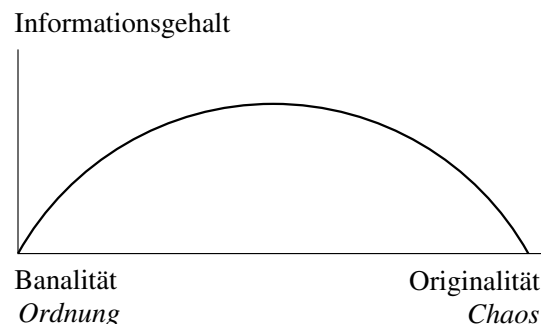


Figure 7: Informationsgrad zwischen Originalität (Chaos) und Banalität (Ordnung)

Es bleibt zu erwähnen, daß mit dem Anbruch des Computer-Zeitalters die Informationsästhetik eine neue Wendung genommen hat. Neben die *analytische Ästhetik*, die vorwiegend ästhetische Gehalte zu quantifizieren versucht, tritt nunmehr die *generative Ästhetik*, bei der es um die Erzeugung ästhetischer Objekte nach algorithmischen Vorschriften, um graphische Programmiersprachen, Textgenerierung u.a. geht. Derartige Phänomene werden unter dem Begriff "Computerkunst" von FRANKE (1985) und VÖLZ (1988) untersucht. NAKE (1974) beschreibt Ästhetik generell als Informationsverarbeitung und diskutiert ebenfalls Anwendungen der Informatik im Bereich ästhetischer Produktion. Weitere Modifikationen des Ästhetik-Begriffs unter dem Einfluß der Informationsverarbeitung betreffen die "kybernetische Ästhetik" von FRANKE (1979) und die "digitalen Ästhetik" von BOOM (1987).

6 Grenzen der quantitativen Ästhetik

Als Fazit aus den verschiedenen Versuchen einer quantitativen Ästhetik läßt sich vielleicht folgende These formulieren: Das Ästhetische, das Schöne, wird im Rahmen naturwissenschaftlicher Analysen immer an dem Ort und in der Weise fixiert, der dem jeweils aktuellen Stand der Wissenschaftsentwicklung entspricht. Die Vorstellung, wo und wie das Schöne wissenschaftlich einzugrenzen ist, gerät damit nicht zuletzt zu einem Spiegel der gerade aktuellen Wissenschaftsentwicklung (SCHWEITZER, 1993, 1998A). Auch wenn sich daraus nicht einfach ein Fortschritt in der Bestimmung des Ästhetischen ableiten läßt, haben sich besonders in den letzten Dekaden interessante und neue Aspekte ergeben.

Geleitet von den wissenschaftlichen Erkenntnissen über die Entstehung von Ordnung und Chaos in der Natur, haben beispielsweise CRAMER & KAEMPFER (1992) eine neue ästhetische Theorie über die Entstehung von Schönheit aufgestellt. Sie postulieren dazu, "daß Schönheit überall dort entsteht, wo das Chaos in die Ordnung oder wo die Ordnung in das Chaos mündet in jenem irreversiblen Schritt, der sich nicht voraussehen, der sich nicht berechnen und der sich daher auch nicht umkehren (nicht wiederholen) lassen kann. Schönheit ist gleich der offenen (irrationalen) Ordnung des Überganges, und so ist sie ihrem eigenen Prinzip nach vergänglich, fragil, gefährdet und je nur einmalig" (CRAMER & KAEMPFER, 1992).

Das Schöne wird damit das Ergebnis eines dynamischen Prozesses: es ist irreversibel - das heißt, einmalig, einzigartig, historisch geworden und auch wieder vergänglich, es ist indeterminiert - das heißt, in entscheidenden Punkten unvorhersagbar, überraschend, neu, es ist in weiten Bereichen skaleninvariant - das heißt, es zeigt sich auf verschiedenen Ebenen unserer hierarchisch gegliederten Welt.

Durch eine ästhetische Bestimmung im Rahmen der Komplexitätstheorie wird von CRAMER (1988) der Versuch unternommen, "Schönheit nicht nur als subjektive Wahrnehmung zu verstehen, sondern als ein dieser Wahrnehmung zugrunde liegendes, mathematisch begründbares

Gesetz" - wobei die Parallelen zur ästhetischen Diskussion im Rahmen der Informationsästhetik, die wir im vorhergehenden Abschnitt dargelegt haben, nicht zu übersehen sind.

Wenn Schönheit sich als "eine den Dingen und der Welt inhärente Eigenschaft" (CRAMER, 1988) erweisen sollte, dann scheint der "Zugang zu einer objektiven Ästhetik" offenzustehen. Der Vorteil eines solchen Zuganges liegt auf der Hand: das Naturschöne und das Kunstschöne können auf einen gemeinsamen Nenner zurückgeführt werden, der künstlerische Schaffensprozeß ist dem der Natur adäquat. CRAMER & KAEMPFER (1992) schreiben dazu: "In dem neuen dynamischen Begriff der Schönheit, wie wir ihn exponieren werden, dürften die Schönen Formen, die der Mensch herstellt als 'Artefakt', als 'Kunstwerk', prinzipiell den gleichen Entstehungsprozessen unterworfen sein wie die Schönen Formen der Natur: die Natur der Schönheit und die Schönheit der Natur erweisen sich als konvergierende Begriffe."

Eine solcherart konsequente Rückführung des Schönen auf ontologische Prinzipien (im Abschnitt 6.1 als erster Standpunkt bezeichnet) dürfte den Anspruch einer Allgemeingültigkeit erheben, wenn sich zeigen ließe, daß es sich hier nicht nur um situativ notwendige, sondern auch um existentiell hinreichende Bedingungen für die Entstehung von Schönheit handelt - das heißt: 1. immer, wenn diese Bedingungen erfüllt werden, entsteht Schönheit - sonst aber nicht; 2. unter den genannten Bedingungen entsteht nur Schönheit (im qualitativen Sinne) - und nichts anderes.

CRAMER & KAEMPFER (1992) bemühen sich um diesen Nachweis, indem sie (gemäß Punkt 1) zunächst zeigen, daß die verschiedenen Formen von Schönheit sich als auf der Grenze zwischen Ordnung und Chaos befindlich verstehen lassen. Dabei kommt der Proportion des Goldenen Schnittes, die in der dynamischen Theorie des Chaos eine wichtige Rolle spielt (RICHTER & SCHOLZ, 1987), als einem natürlichen Maß der Schönen Form besondere Bedeutung zu.

Um dem unter Punkt 2 genannten Anspruch gerecht zu werden, muß das Nicht-Schöne, das Häßliche, gerade dergestalt vom Schönen abgekoppelt werden, daß es (a) nicht derselben Prozessualität genügt und (b) eine Abweichung von dem Maß darstellt, das die Schöne Form vorgibt. So schreiben CRAMER & KAEMPFER (1992): "Eine mögliche Ästhetik des Häßlichen, zu der hier vorerst nur Materialien vorgelegt werden können, wird es, so läßt sich vermuten, mit Formen zu tun haben, die sich teils als 'statisch', 'unbewegt', 'starr', teils als 'Abweichungen' vom Maß (zum Beispiel durch Unter- oder Überschreitung) klassifizieren lassen dürften."

Ein Problem, das mit dem CRAMERSchen Ansatz, Schönheit an ontologischen Kriterien festzumachen, verbunden ist, besteht darin, daß die oben genannten notwendigen und hinreichenden Bedingungen für die Entstehung des Schönen gerade nicht als *allgemeingültig* fixiert werden können. Dies soll durch einige Anmerkungen zu den genannten zwei Punkten deutlich gemacht werden:

1. Schönheit entsteht auch auf der Grenze zwischen Ordnung und Chaos - aber es gibt keine Belege dafür, daß sie nicht auch in anderen Zusammenhängen entsteht.

Der dynamische Schönheitsbegriff, wie ihn CRAMER und KAEMPFER vertreten, ist zugleich ein sehr eingeschränkter: Da er postuliert, daß wir Schönheit immer nur dort finden, wo Ordnung und Chaos sich wechselseitig durchdringen, muß notwendigerweise das, was gemeinhin als schön gilt, in irgendeiner Weise auf Chaos und Ordnung zurückgeführt werden. Diese Reduktion kann - insbesondere beim Kunstschönen, wo der Schwerpunkt gerade auf der Einmaligkeit, auf der Wahrnehmung von Einzelheiten liegt - nicht ohne einseitige Betrachtung geleistet werden. Wenn es die Symmetriebrüche, die Prozessualität fern vom Gleichgewicht sind, die die Schönheit hervorbringen sollen, dann müssen eine Reihe von ästhetischen Fragen, wie die nach Symmetrie und Gleichgewicht, zwangsläufig an den Rand gedrängt werden.

2. Auf der Grenze zwischen Ordnung und Chaos entsteht nicht nur Schönheit (im qualitativen Sinne), sondern wir finden ebenso Strukturen, denen nicht ohne weiteres das Attribut "schön" zugeordnet werden kann.

Bei der Analyse der Informationsentropie natürlicher Sequenzen, wie Textpassagen und verschiedene Musikstücke, die wir im Kapitel 5 diskutiert haben, hat sich gezeigt, daß die Informationsentropie dieser "künstlerischen" Sequenzen, aufgetragen über der Stringlänge, genau zwischen dem entsprechenden Verhalten chaotischer und regulärer Sequenzen liegt. Das heißt, diese Sequenzen sind weder zu sehr mit Überraschungen versehen, also völlig unerwartet und unvorhersagbar, noch sind sie regulär und eintönig - sie befinden sich gerade auf der Grenze zwischen Ordnung und Chaos. Interessanterweise galt diese Aussage allerdings für alle untersuchten Sequenzen, unabhängig von ihrem ästhetischen Gehalt. Das heißt, ein Kriterium, um das Häßliche durch Abweichung von der Norm vom Schönen zu trennen, ergab sich durch diese Analyse nicht. Vielmehr zeigte auch der denkbar "unästhetische" Text einer englischsprachigen Programmieranleitung ein Verhalten zwischen Ordnung und Chaos. Dieses Kriterium ist somit nur ein notwendiges, nicht aber ein hinreichendes.

Wie wir bereits im Kapitel 1 im Zusammenhang mit der selbstorganisierten Kritizität (SOC) erwähnt haben, findet die Selbstorganisationstheorie zunehmend, daß alle "kreativen" Prozesse - unabhängig von einer ästhetischen Bewertung - auf der Grenze zwischen Ordnung und Chaos angesiedelt sind (vgl. dazu auch LANGTON, 1991). Andererseits setzt *Schönheit* kreative Komponenten notwendig voraus.

Das CRAMERSche Kriterium zur Charakterisierung der Schönheit erweist sich also auch mit den hier eingeführten "dynamischen Erweiterungen" als nicht hinreichend, um einen ästhetischen Gehalt daran festmachen zu können. Es lenkt aber die Aufmerksamkeit auf die Randbedingungen, unter denen Schönheit entstehen kann - und es betont die Tatsache, daß die Schönheit auf der Grenze zum Chaos in einem umfassenderen Sinne zu sehen ist, als es durch "The Beauty of Fractals" (PEITGEN & RICHTER, 1986) bisher weithin assoziiert wird.

7 Ein Fazit am Schluß

Wir haben in diesem Kapitel verschiedene Ansätze diskutiert, um das Ästhetische unter dem Gesichtspunkt der Selbstorganisations- und Komplexitätstheorie zu quantifizieren. Dabei zeigt sich, daß die Frage, was letztlich als ästhetisch angesehen werden kann, offensichtlich nur teilweise auf rein mathematisch-naturwissenschaftliche Sachverhalte reduzierbar ist. Auch nach unserer Auffassung sind statistische Maße oder Maßzahlen nur sehr bedingt geeignet, die ästhetischen Aspekte von Strukturen zu erfassen.

Wir sind allerdings der Überzeugung, daß Ästhetik durchaus etwas mit Komplexität zu tun hat. Wir wiederholen unsere Ansicht, daß Komplexität an die Existenz einer Hierarchie von räumlichen bzw. zeitlichen Korrelationen gebunden ist, die räumlich-zeitliche Nahordnung ebenso wie Fernordnung einschließen. Eine solche Vielfalt von Korrelationen kann unserer Meinung nach auch als ästhetisches Kriterium interpretiert werden. In der Regel ist das Schöne auch komplex, selbst wenn diese Bedingung nur notwendigen und keinesfalls hinreichenden Charakter trägt.

In diesem Sinne möchten wir die Grundthese dieses Kapitels so verstanden wissen, daß Komplexität und Ästhetik miteinander verbunden sind und daß die moderne Komplexitätsforschung auch zur Erforschung ästhetischer Dimensionen beitragen kann. Wir haben insbesondere im Kapitel 5 dargestellt, wie Hierarchien von Korrelationen Messungen und mathematischen Darstellungen zugänglich gemacht werden können. Dabei wurde allerdings auch deutlich, daß diese Aufgabe nicht trivial ist, sondern zum Teil einen hohen Aufwand und subtile mathematische Techniken voraussetzt.

Um unseren eigenen Standpunkt zusammenzufassen, möchten wir hier auch an den Begriff der freien Information anknüpfen. Im Kapitel 2 haben wir freie Information charakterisiert als eine binäre Relation, als Teil einer Beziehung zwischen zwei Systemen. Freie Information ist also keine unmittelbare Systemeigenschaft, sondern sie hat eine relativ eigenständige Existenz. Freie Information ist immer symbolische Information, sie setzt voraus, daß Sender und Empfänger diese Symbole erzeugen und verstehen können. In analoger Weise können wir auch *das Schöne* charakterisieren: Es ist nicht eine Eigenschaft der Objekte an sich, sondern eine binäre Relation zwischen Objekt und Subjekt. Entscheidend ist die durch die pragmatische Information vermittelte Wirkung. Diese wird wiederum durch ein optimales Verhältnis von Bekanntem und Unbekanntem, Altem und Neuem, durch Gewohnheit und Überraschung charakterisiert.

Die Sentenz dieser Diskussion läßt sich mit einem Satz zusammenfassen, den ALFRED WHITEHEAD bereits 1929 in seinem berühmten Buch "Process and Reality" fomulierte: "The right chaos and the right vagueness are jointly required for any effective harmony." Diese Einsicht steht in enger Beziehung zu den in Kapitel 5 dargestellten Schlußfolgerungen über die Struktur von Texten und Musikstücken (BACHsche Kompositionen, Volkslieder), die hinsichtlich ihrer Entropie

auch “zwischen Ordnung und Chaos” liegen, und entsprechend dieser Klassifikation quantitativ als ästhetisch einzuordnen sind.

Mit einer Charakterisierung des Schönen als binäre Relation messen wir dem *dynamischen Prozeß der Perzeption* große Bedeutung bei. Dieser dynamische Aspekt der Wahrnehmung wurde, wie wir ausgeführt haben, auch von BIRKHOFF als wesentlicher Zugang zum Problem der Ästhetik angesehen. SCHROEDER (1991) faßt dessen Auffassung mit den Worten zusammen: “BIRKHOFF’s theory, in a nutshell, says that for a work of art to be pleasing and interesting it should neither be too regular and predictable nor pack too many surprises.”

Wir halten dies für zutreffend und sind der Überzeugung, daß das Konzept der *dynamischen Entropie* ein geeignetes Instrument zur Quantifizierung dieser Aussage ist. Dieser Ansatz, den wir in den Kapiteln 3 und 4 ausführlich dargelegt haben, konzentriert sich auf eben dieses Verhältnis von Vorhersagbarkeit (bereits bekannter Strukturen) und Überraschungseffekt (beim Auftauchen neuer Strukturen). Durch die dynamische Entropie wird gerade die Unsicherheit bei der schrittweisen Voraussage beschrieben - oder anders ausgedrückt: Die dynamische Entropie gibt an, was es beim nächstfolgenden (Wahrnehmungs-)Schritt an Neuem, Unerwartetem zu entdecken gibt oder wieviel etwa schon als bekannt vorausgesetzt werden darf. Sie quantifiziert damit gewissermaßen den bekannten *Deja-vu*-Effekt.

Der Umstand, daß die Wahrnehmung von Objekten beim Betrachter einen “ästhetischen Gehalt” assoziiert, wird innerhalb eines evolutionär geprägten Ästhetik-Verständnisses vor allem an der Bedeutung festgemacht, die die zugrundeliegenden Selbstorganisationsprozesse im Verlauf der Evolution gehabt haben. Auch CRAMER & KAEMPFER (1992) sehen, “daß unser Erkenntnisvermögen, die ‘pattern recognition’, geradezu auf das Erkennen des Prozessualen spezialisiert ist und daß es damit auch ein quasi naturhaftes Vermögen gibt, das Prozessual-Schöne in unserer Welt durch einen speziellen Filter zu erkennen”.

Dieser “Filter” richtet aber zunächst nur die Aufmerksamkeit des Individuums auf das Prozessuale, das im Verlauf der Evolution eine besondere Rolle gespielt und dessen Wahrnehmungsapparat geprägt hat - ohne damit zugleich eine ästhetische Wertung mitzuliefern. Der “ästhetische Gehalt” dieser als relevant wahrgenommenen Strukturen ergäbe sich dann erst im Rahmen eines subjektiven Prozesses, der auch emotionale Elemente mit berücksichtigt. Aber immerhin wäre dies eine mögliche Erklärung für das grundlegende Interesse, das wir als Betrachter den Strukturen auf der Grenze zwischen Ordnung und Chaos entgegenbringen. Diesen Standpunkt vertritt auch EILENBERGER (1986) in seinem Kommentar zu “The Beauty of Fractals”.

Einer Reduktion des Ästhetischen auf rein quantitative Aspekte auf der einen Seite steht also auf der anderen Seite die subjektive Wahrnehmung und Wertung durch das Individuum entgegen, für welche im Rahmen naturwissenschaftlicher Theorien bestenfalls Randbedingungen angegeben werden können. A. MOLES (1966) bemerkt dazu: “Aesthetic information cannot be translated. It does not draw on a universal repertoire but on a repertoire of knowledge that the sender and

receiver have in common. Theoretically, it cannot be translated into another ‘language’ or into another system of logical signs because this other ‘language’ does not exist. It is closely related to the concept of personal information.”

Wie es scheint, ist auch durch den Versuch, das Schöne im Rahmen der Komplexitätstheorie zu bestimmen, der KANTSche Standpunkt zur Ästhetik noch nicht obsolet geworden. “Die Objekte ästhetischer Untersuchungen sind im allgemeinen nicht normierbar, und ihr wahrer Informationsgehalt geht gerade bei der Mittelwertbildung verloren”, schrieb schon EIGEN zum Thema “Sinn und Grenzen einer Theorie der ästhetischen Information” (EIGEN & WINKLER, 1975). Andererseits kann man nicht übersehen, daß die auf der Theorie der Selbstorganisation und Komplexität basierenden Überlegungen zur Ästhetik dem Problem ganz neue Gesichtspunkte hinzugefügt haben (vgl. auch NIEDERSEN & SCHWEITZER, 1993). Eine weitere vorurteilslose, aber gleichzeitig kritische Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Selbstorganisation und Ästhetik wird deshalb sicher von einigem Interesse sein.

8 Literatur

- BENSE, M. (1982): *Aestetica. Einführung in die neue Ästhetik*. Internationale Reihe: Kybernetik und Information, Bd. 13, 2. erw.Aufl., Baden-Baden: Agis.
- BIRKHOFF, G. D. (1929): Science and spiritual perspectives. A new philosophy. *The Century Magazine*, June 1929, vol. **118**, pp. 156-165.
- BIRKHOFF, G. D. (1931): A mathematical approach to aesthetics. *Scientia*, Sept. 1931, pp. 133-146.
- BIRKHOFF, G. D. (1932): A Mathematical Theory of Aesthetics. *The Rice Institute Pamphlet*, vol **19**, pp. 189-342.
- BOOM, H. VAN DEN (1987): *Digitale Ästhetik. Zu einer Bildungstheorie des Computers*. Stuttgart: Metzler.
- CAGLIOTI, G. (1983): *Simmetrie infrante nella scienzae nell’ arte*. Milano: Clup (Dt.Übers. Vieweg, Braunschweig 1988).
- CHANDRASEKHAR, S. (1987): *Truth and Beauty. Aesthetics and Motivations in Science*. Chicago: University of Chicago Press.
- CHANDRASEKHAR, S. (1987): The Aesthetic Base of the General Theory of Relativity. In: (ders.): *Truth and Beauty. Aesthetics and Motivations in Science*. Chicago: University of Chicago Press, pp. 144-170.
- CRAMER, F. (1988): *Chaos und Ordnung. Die komplexe Struktur des Lebendigen*. Stuttgart: DVA.
- CRAMER, F.; KAEMPFER, W. (1992): *Die Natur der Schönheit. Zur Dynamik der schönen Formen*. Frankfurt a.M.: Insel.
- DANILOV, YU. A. (1980): Johann Kepler und die Harmonia Mundi. In: M. Senechal, G. Fleck (Hrsg.): *Etüden zur Symmetrie* (erw. russ. Übers. v. Yu. A. Danilov), Moskau: Mir.

- DIRAC, P. (1977): In: *History of Twentieth Century Physics*. Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi", Course 57, New York: Academic Press, p. 136.
- EIGEN, M.; WINKLER, R. (1975): *Das Spiel. Naturgesetze steuern den Zufall*. München–Zürich, Piper.
- EILENBERGER, G. (1986): Freedom, Science, and Aesthetics. In: H. O. Peitgen, P. H. Richter: *The Beauty of Fractals. Images of Complex Dynamical Systems*, New York: Springer, pp. 175-180.
- FECHNER, G. T. (1860): *Elemente der Psychophysik*. Teil I und II, Leipzig.
- FECHNER, G. T. (1871): Zur Experimentalen Aesthetik. *Abhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse*. Bd. 9, Heft 6. Leipzig: S. Hirzel.
- FECHNER, G. T. (1876): *Vorschule der Ästhetik*. 2 Bde..
- FEYERABEND, P. (1984): *Wissenschaft als Kunst*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp.
- FRANK, H. (1959): *Grundlagenprobleme der Informationsästhetik und erste Anwendungen auf die Mime pur*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- FRANKE, H. W. (1979): *Kybernetische Ästhetik. "Phänomen Kunst"*. Reinhardt.
- FRANKE, H. W. (1985): *Computergraphik - Computerkunst*. Berlin: Springer.
- FUCKS, W. (1953): Mathematische Analyse von Sprachelementen, Sprachstil und Sprachen. *Arbeitsgemeinschaft für Forschung NRW*, Bd. 34 a, S. 1-110.
- FUCKS, W. (1957): Gibt es mathematische Gesetze in Sprache und Musik? *Umschau* **57**, Heft 2.
- FUCKS, W. (1958): Mathematische Analyse der Formalstruktur von Musik. *Forschungsber. des Wirtschafts- u. Verkehrsminist. NRW* Nr. 357, S. 1-46.
- FUCKS, W. (1963): Mathematische Analyse von Formalstrukturen von Werken der Musik. *Arbeitsgemeinschaft für Forschung NRW*, Bd. 124, S. 39-93.
- FUCKS, W. (1968): *Nach allen Regeln der Kunst: Diagnosen über Literatur, Musik, bildende Kunst - die Werke, ihre Autoren und Schöpfer*. Stuttgart: DVA.
- FUCKS, W.; LAUTER, J. (1965): Exaktwissenschaftliche Musikanalyse. *Forschungsber. des Wirtschafts- u. Verkehrsminist. NRW*, Nr. 1519, S. 1-59.
- GOETHE, J. W. v. (1810): Materialien zur Geschichte der Farbenlehre (1810). In: *Goethe. Die Schriften zur Naturwissenschaft* (Leopoldina-Ausgabe), Abt. I, Band 6, Weimar 1947 ff..
- GRÜTTER, J.K. (1987): *Ästhetik der Architektur. Grundlagen der Architekturwahrnehmung*. Stuttgart.
- GUNZENHÄUSER, RUL (1963): Informationstheorie und Ästhetik. *Umschau*, Heft 20/21.
- GUNZENHÄUSER, RUL (1975): *Maß und Information als ästhetische Kategorien. Einführung in die ästhetische Theorie G.D. Birkhoffs und die Informationsästhetik*. Baden-Baden: Agis.
- HEISENBERG, W. (1985): Die Bedeutung des Schönen in der exakten Naturwissenschaft. In: (ders.): *Gesammelte Werke*, Band C III, München: Piper, S. 369-384.
- HOFFMANN, H.-J. (HRSG.) (1992): *Verknüpfungen. Chaos und Ordnung inspirieren künstlerische Fotografie und Literatur*. Basel: Birkhäuser.

- LANGTON, C. G. (ED.) (1994): *Artificial Life III.* Proc. Workshop on Artificial Life, June 1992, Santa Fe, NM, Santa Fe Institute Studies in the Science of Complexity, Proc. Vol. XVII, Reading, MA: Addison-Wesley.
- LONGAIR, M.S. (1984): *Theoretical concepts in physics. An alternative view of theoretical reasoning in physics for final-year undergraduates.* Cambridge: Cambridge University Press.
- MOLES, A. A. (1966): *Information Theory and Aesthetic Perception.* Urbana, IL: University of Illinois Press.
- MOLES, A. A. (1968): Information und Redundanz. In: H. Ronge (Hrsg.): *Kunst und Kybernetik. Ein Bericht über drei Kunsterziehungstagungen Recklinghausen 1965 1966 1967*, Köln: DuMont-Schauberg, S. 14-27.
- NAKE, F. (1974): *Ästhetik als Informationsverarbeitung. Grundlagen und Anwendungen der Informatik im Bereich ästhetischer Produktion und Kritik.* Berlin: Springer.
- NICOLIS, G. (1985): Symmetriebrüche und Perzeption von Formen. In: M. Baudson (Hrsg.): *Zeit. Die vierte Dimension der Kunst*, Weinheim: Acta humaniora.
- NIEDERSEN, U.; SCHWEITZER, F. (HRSG.) (1993): *Ästhetik und Selbstorganisation.* (Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften, Bd. 4), Berlin: Duncker & Humblot.
- OSTWALD, W. (1993): Kalik oder Schönheitslehre. (Edition von U. Niedersen). In: U. Niedersen, F. Schweitzer (Hrsg.): *Ästhetik und Selbstorganisation* (Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften, Bd. 4), Berlin: Duncker & Humblot.
- PEITGEN, HEINZ-OTTO; RICHTER, PETER H. (1986): *The Beauty of Fractals. Images of Complex Dynamical Systems.* New York: Springer.
- PRIGOGINE, I.; PAHAUT, S. (1985): Die Zeit wiederentdecken. In: M. Baudson (Hrsg.): *Zeit. Die vierte Dimension der Kunst*, Weinheim: Acta humaniora.
- PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. (1990): *Dialog mit der Natur. Neue Wege naturwissenschaftlichen Denkens.* München: Piper, 6. Aufl.
- RENTSCHLER, I.; HERZBERGER, B.; EPSTEIN, D. (EDS.) (1988): *Beauty and the Brain. Biological Aspects of Aesthetics.* Basel: Birkhäuser.
- RICHTER, P. H.; SCHOLZ, H.-J. (1987): Der Goldene Schnitt in der Natur. Harmonische Proportionen und die Evolution. In: B. O. Küppers (Hrsg.): *Ordnung aus dem Chaos. Prinzipien der Selbstorganisation und Ordnung des Lebens*, München: Piper, S. 175 - 214.
- SCHROEDER, M. R. (1991): *Fractals, Chaos, Power Laws.* New York: Freeman.
- SCHWEITZER, F. (1993): Ästhetik aus der Sicht naturwissenschaftlicher Selbstorganisation, HUB-Preprint.
- SCHWEITZER, F. (1994): Natur zwischen Ästhetik und Selbstorganisationstheorie, In: *Zum Naturbegriff der Gegenwart*, Stuttgart: Frommann-Holzboog, Bd. 2, S. 93-119.
- SCHWEITZER, F. (1998a): Naturwissenschaft und Selbsterkenntnis. In: P. Matussek (Hrsg.): *Goethe und die Verzeitlichung der Natur*, München: C. H. Beck.

- SCHWEITZER, F. (1998b): Wege und Agenten: Reduktion und Konstruktion in der Selbstorganisationstheorie. In: H.-J. Krug, L. Pohlmann (Hrsg.): *Evolution und Irreversibilität*, (Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur- Sozial- und Geisteswissenschaften, Bd. 8), Berlin: Duncker & Humblot.
- SHANNON, C.E. (1951): Prediction and Entropy of Printed English, *Bell System Technical Journal* **30**, 50-64.
- SMORODINSKI, Y.A. (1993): Heisenberg und Dirac: Die Bedeutung des Schönen in der Naturwissenschaft, *Phys. Bl.* **49**, Nr. 5, S. 436-438.
- STADLER, M.; KRUSE, P. (1992): Zur Emergenz psychischer Qualitäten. Das psychophysische Problem im Lichte der Selbstorganisationstheorie. In: W. Krohn, G. Küppers (Hrsg.): *Emergenz: Die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp.
- VÖLZ, H. (1988): *Computer und Kunst*. Akzent-Reihe Bd. 87, Leipzig: Urania.
- WELSCH, W. (1991): Kreativität heute, *Universitas*, Heft 6, S. 587 - 591.
- WEYL, H. (1952): *Symmetry*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- WHITEHEAD, ALFRED (1929): *Process and Reality*. New York.