
Cornelius Frömmel

Vielfalt in biologischen Makromolekülen

Zusammenfassung

Vielfalt (im großen) und Vielfältigkeit (im einzelnen) besitzen aus erkenntnistheoretischer Sicht einen besonderen Reiz, stellen sie doch wesentliche Merkmale der natürlichen und gesellschaftlichen Umwelt des Menschen dar. Mit diesen Aussagen ist der Inhalt des folgende Essay umschrieben, der sich einerseits mit den Problemen 'Leben in praktisch unendlicher Vielfalt', 'Erkennen in praktisch unendlicher Vielfalt' befaßt, und andererseits den Versuch wagt, einige Anregungen für die Theorie der Erkenntnis allgemein aus dem Reich der biologischen Makromoleküle (zu denen als sehr komplexe Beispiele die Proteine und Nukleinsäuren zu zählen sind) zu erhalten. Unter angemessener Berücksichtigung der Gefahren einer vergleichenden Betrachtung zwischen Natur und Gesellschaft, Sein und Denken, lassen sich Anregungen zum Kausalitätsprinzip in hochdimensionalen Systemen, insbesondere zu seinen zeitlichen und räumlichen Limitationen und damit zu Grenzen und Möglichkeiten der Vorhersagbarkeit von Strukturen und Ereignissen, gewinnen. Eine wichtige Schlußfolgerung der Betrachtung ist die Annahme, daß in höherdimensionalen Systemen auf *Dauer* nur evolutionäre Systeme mit bestimmten Verhaltensnormen Chancen zu ihrem Bestand und ihrer Entwicklung haben.

I. Exordium

0. Vorbemerkung

Manche Geschenke übergibt man dem zu Ehrenden mit zittrigen Knien. Der Grund hierfür liegt in der Unsicherheit ob der Antwort des Beschenkten auf die Gabe. Das Risiko wäre für mich kleiner, spräche ich allein über

mein Hauptarbeitsgebiet – die Proteinstrukturtheorie. Ich würde mir dann erlauben, Samuel Mitja Rapoport einen bunten Strauß von interessanten Tatsachen und offenen Problemen auf den Geburtstagstisch zu packen. Bei diesem Vortrag würde er ab und an bedenklich sein Haupt wiegen und ab und an (hoffentlich) zustimmend nicken. Aber ich hätte keine Angst, ich würde es schon hinbiegen, daß ausreichend neu wäre, was ich sagen würde und relativ schwer angreifbar. Mit dem Thema, was ich mir aber gewählt habe, wage ich mich in Regionen, die viel stärker der Diskussion ausgesetzt sind. Ich wäre ein Dummkopf, wenn ich mich dieser Diskussion mit dem 85-jährigen entziehen würde.

Die erste Frage, der ich Aufmerksamkeit widmen möchte, ist: Was ist überhaupt „unendliche Vielfalt“? Im weiteren werde ich – und das wird leider zu oft kursorisch bleiben müssen, denn eine solche Vorlesung läßt nicht genug Platz dafür – einige Fragen, die sich aus der unendlichen Vielfalt ergeben, behandeln. Ich habe zur Gliederung die Überschriften (topici) aus der Rhetorik gewählt. In der Folge möchte ich Fragen so stellen, daß ich immer wieder vergleichbare Situationen in lebender Materie, in Proteinen und im Denken und sonstiger menschlicher Kultur aufsuchen möchte.

Im weiteren widme ich mich der Frage: Wie kann aber unendliche Vielfalt gestaltet werden? Wie kann man Unendliches in Angriff nehmen, und sofort, im Nachgang, ergibt sich die Frage, wie kann man in der unendlichen Vielfalt leben, ohne sich zu 'zerkrümeln'? Und ich möchte zum Schluß in ein paar Thesen Gemeinsamkeiten in vielfältigen Systemen vorstellen und damit meinen Vortrag beenden.

II. expositio sive narratio

1. Einleitung

1.1 Was ist Vielfalt, was ist Vielfältigkeit? Versuch, unendliche Vielfalt zu definieren

Bei der Auseinandersetzung mit schwierigen Tatsachen (schwierig meint meist komplex) ist es hilfreich, sich der Sprache zu erinnern und darüber hinaus nach dem Gegenteil und seiner Bezeichnung zu fragen. Der *Vielfalt* steht im Deutschen die *Einfalt* gegenüber. Der letztere ein Begriff, der

etwas himmelweit Verschiedenes und Anderes – nicht nur im Sinne von Gegenteil – als Nicht-Vielfalt beschreibt. Auffällig ist, daß 'Einfalt' sich auf eine Abstraktionsebene, nämlich auf 'eine besondere Art zu denken' bezieht. Lauscht man in dieses Wort genau hinein, hat man den Eindruck, daß es nicht nur schlichtes Denken bei bescheidener intellektueller Ausstattung meint, sondern eher lineares, einfaches Denken unter Verwendung zwar logischer aber (unvernetzter) Kausalketten umschreibt. Damit ist nicht die Sache selbst, d.h. das Gegenstück zur Vielfalt gemeint, sondern das unkomplexe Denken in der Vielfalt. In diesen Bemerkungen ist das Spannungsfeld betreffs der Vielfalt in meinem Vortrag deutlich geworden, nämlich, wie finden wir uns mit unserem (beschränkten?!) Denken in den unendlichen Möglichkeiten dieser Welt zurecht.

'Vielfalt' hat sich offensichtlich in der Sprache gegen 'Vielheit', 'Vielfachheit' oder ähnliches durchsetzen können, da dieses Wort offensichtlich die Tatsache genauer erfaßt, daß bei umfänglicher Zahl der Möglichkeiten einer Welt die Erkennbarkeit letzterer eingeschränkt oder verhindert ist, so wie es beim Falten von Papier oder Falten bei Kleidungsstücken vorkommt: es gibt dunklere oder gar verdeckte Regionen. Gelingt es in endlicher Zeit¹ nicht, alle Varianten durchzuprobieren, dann liegt, bezogen auf das Ding oder die betrachteten Ereignisse, eine unendliche, nicht im einzelnen durchforstbare, Vielfalt vor. Einige Beispiele mögen das verdeutlichen.

Wieviele verschiedene mögliche Proteine – bestehend im wesentlichen (fast ausschließlich) aus einer Kette miteinander verbundener Bausteine, den Aminosäuren – gibt es?

Die Proteine sollen eine Mindestgröße von etwa 50 Aminosäuren haben. Dabei müssen wir berücksichtigen, daß zwischen 50 und 100 Aminosäuren eine Grauzone ist, d. h. es ist nicht gewiß, ob sich alle Peptidfäden dieser Länge mit Sicherheit zu einer kompakten Struktur falten. Ab 100 Aminosäuren wird es dann relativ sicher, daß es zur Faltung des Fadens im Raum kommt. Wenn wir ein Protein mit 100 Aminosäuren

¹ Endliche Zeit läßt sich als ein wenig Vielfaches einer Eigenzeit eines Ereignisses, sei es die Existenz eines Dinges oder Dauer eines Prozesses definieren, wenig Vielfaches bedeutet tausendfach oder millionenfach aber auch milliardenfach länger. Damit wird klar, daß zeitliche Dimensionen nicht als an sich, d.h. unabhängig von den Dingen und Ereignissen betrachtet werden, sondern auf diese projiziert werden.

betrachten (ein kleines Protein) – der längste bekannte zusammenhängende Peptidfaden ist 40 000 Aminosäuren lang –, so stellen wir fest, daß die Faltung in 2 Blöcken á 50 geschieht. Wir können weiterhin festhalten, daß Proteine in Hierarchien der Komplexität beschreibbar sind, das heißt, die Natur verwendet Bausteine in verschiedenen Komplexitätsebenen: erst die Aminosäuren selbst, deren Primärstruktur, dann sogenannte Sekundärstrukturen, dann die Domäne, späterhin Tertiär- und Quartärstruktur. Die (mittlere) Größe des Bausteins eines Proteins kann mit 50 Aminosäuren (Schwankung 30–150) angenommen werden. Und wenn wir bedenken, daß wir 20 natürliche Aminosäuren² in den Proteinen haben, dann ergibt sich die Zahl solcher Bausteine mit 20^{50} , das ist eine untröstlich große Zahl, nämlich 10^{65} , eine 1 mit 65 Nullen. Es tut im Regelfalle noch nicht weh, das zu hören, aber stellen wir uns einmal vor, das Leben auf der Erde währt zur Zeit 10^{15} Minuten (= 3 Mrd. Jahre). Das ist auch eine relativ große Zahl, aber gegenüber 10^{65} ist sie verschwindend klein. Jetzt behaupten wir mal, daß in jeder lebenden Zelle 1 Million Domänen notwendig sind. (Das stimmt mit Sicherheit auch nicht, ganz so viel sind es nicht.). Seit Beginn des Lebens auf der Erde soll in jeder Minute je eine Mutation in jeder dieser Domäne entstehen. Die gesamte Biosphäre der Erde, von Mensch bis Einzeller, enthält maximal 10^{30} Zellen, mehr gibt das Wasser der Erde nicht her. Wenn wir diese Zahlen miteinander multiplizieren, ergibt sich trotz der unsinnig großen Annahmen, daß nicht alle von der Sequenz her möglichen Domänen getestet worden sein können:

Schema 1 Die Proteinwelt:

Voraussetzungen:

- * Protein-Domänen sollen 50 Aminosäuren enthalten
(Anzahl möglicher Sequenzen $20^{50} = 1.13 \cdot 10^{65}$)
- * Leben auf der Erde gibt es seit etwa 10^{15} Min.
- * Jede Zelle benötigt 1 Mill. Domänen
- * pro Minute und pro Domäne entsteht eine Mutation
- * die gesamte Biosphäre besteht aus 10^{30} Zellen

² 20 (21) verschiedene Aminosäuren können am Ribosom während der Proteinsynthese in den wachsenden 'Proteinfäden' eingebaut werden. Darüber hinaus können einzelne Aminosäuren nach dem Einbau noch modifiziert werden. Dies bleibt im folgenden der Einfachheit halber unberücksichtigt.

$$\begin{aligned}
 N_{\text{getestet}} &= \\
 &10^{30} \cdot 10^6 \cdot 10^{15} = \\
 &10^{51} \ll 10^{65}
 \end{aligned}$$

Daraus folgt, daß etwa 0,0000000000000001% oder noch weniger aller möglichen Sequenzen überhaupt in der Evolution getestet werden konnten: niemals wird erfahrbar sein, ob all die nichtgetesteten Sequenzfolgen Sinn ergeben oder nicht.

Die sich ergebende Definition betreffs Vielfalt für die Proteine lautet: Die unendliche Vielfalt ergibt sich daraus, daß man unter halbwegs vernünftigen Annahmen, in endlicher Zeit (und seien es Milliarden Jahre) in allen ihren Möglichkeiten der Anordnung der Aminosäuren in der Primärstruktur in Zeit und Raum der Erde niemals austesten kann.

Ein unendlich variantenreiches System aus Menschenhand, das wohl auch mit dem Ziele der Eingrenzung der Möglichkeiten entstand, dennoch unendlich vielfältig ist, dient mir als zweites Beispiel: die Musik, gefaßt in Töne. Versuchen wir wieder eine hierarchische Gliederung, was bekanntermaßen auf Grund von Satz- und Themenstruktur leicht möglich ist.

Erkenntlich ist die Länge einer Domäne in der Musik daran, daß Anfang und Ende gut hörbar (durch Betonungen, Kadenzten, Pausen usw.) ist. Z.B. hat Türk (Periode der Frühklassik) geschrieben, daß der Beginn jeder neuen Floskel durch eine ordentliche und leicht nachvollziehbare Betonung markiert werden müsse. Neben der Selbsterkenntnis der Musiker gibt es auch weitere Belege für die Länge einer „Musikdomäne“. Wenn man die Musikstücke mit analytischen Methoden, z.B. mit Hilfe der Bestimmung von Entropien untersucht, stellt man fest, daß sich Musikstücke aus Bausteinen der Länge von 4 oder 8 Takten zusammensetzen. Rechnen wir also 8 Takte mit 4 Noten, total 32, eine recht geringe Zahl. Die Auswahl der Noten geschieht aus einer diatonischen Skala von 2 Oktaven (= Umfang menschlicher Stimme, 24 Töne), dann ergibt sich die gigantische Zahl, daß mindestens 10^{41} Musikstücke der Länge 8 Takte erwarten können.³ Das ist eine riesige Zahl, die wir wie-

³ Unberücksichtigt bleibt dabei, daß erstens Töne zur gleichen Zeit (Akkorde) erklingen und daß verschiedene Rhythmen verwendet werden können. Beides erhöht die Zahl der möglichen Anordnungen beträchtlich. Weiter wird die Zahl durch die größere Länge der Musikstücke (die Taktzahl bewegt sich zwischen 16...5000), wobei zu berücksichtigen ist, daß die Musikstücke sich im Regelfalle „rückbezüglich“ verhalten (siehe unten), d. h. die größten Freiheitsgrade sind mit Sicherheit in den ersten Takten zu finden.

derum mit dem, was möglich ist, vergleichen müssen. Die Musik auf der Erde soll jetzt schon seit 3 Millionen Jahre (unsinnig lange Zeit) währen. Das ergibt $1 \cdot 10^{12}$ Minuten. Unter der Annahme, daß jeweils eintausend Blöcke Musik von 1 Mrd. Musiker in einer Minute verändert werden (welch unglaubliche Produktivität, wenn man bedenkt, daß selbst der als Viel- und Gutschreiber bekannte Telemann für 1000 Takte 3 Tage brauchte), also genau solche unsinnigen Mutationsannahmen wie oben, dann folgt daraus, daß hier wieder viele Nullen nach dem Komma zu nennen sind, bevor überhaupt der durch die Menschheit hervorgebrachte und getestete Prozentsatz Musik folgen konnte, nämlich 0,0000000000000001%.

Es bleibt also festzuhalten: Es gibt in der Musik (einer künstlichen, durch den Menschen geschaffenen Welt) und in den Proteinen (einem Teil der Natur) gleichermaßen eine unendliche Vielfalt.

Diese Art Vielfalt ist die natürliche Umgebung des Menschen. Bedenkt man, daß unter diesem Aspekt eine Umwelt auf unser Denken und Erkennen trifft, die schier alles kann, fragt man sich, wie es unseren begrenzten Sinnen und Nervenzellen möglich ist, sich in einer solchen vielfältigen Welt zurecht zu finden und wie es mit der Erkennbarkeit dieser Welt bestellt ist.

1.2 Die Gefahren vergleichender Betrachtung Natur und Denken (die Gefahren der Naturphilosophie)

Seitdem uns philosophische Betrachtungen überliefert sind (klassische griechische Philosophie) ist zu konstatieren, daß vergleichende Betrachtungen zwischen dem Denken des Menschen, seinen gesellschaftlichen Verhältnissen und der Natur gemacht werden. Diese vergleichenden Betrachtungen sind – obwohl eine Reihe von Höhepunkten zu beobachten sind – zu keiner Zeit der Menschheitsgeschichte aufgegeben worden. Einer war um die Zeit der Aufklärung bzw. Frühklassik in Europa. Insbesondere für diese Zeit hat sich leicht pejorativ der Begriff ‘Naturphilosophie’ eingebürgert. Die etwas abwertende Bezeichnung ergab sich daraus, daß die Denker dieser Richtung (leider) oft kurzschlüssig von Naturereignissen auf menschliche Verhaltens- und Denkweisen schlossen. Teilweise war das sehr stark durch die Literatur, die naturphilosophische

Gedanken bereitwillig aufnahm, gestützt. Darüber hinaus zeitigten (oder sie wurden bewußt) die Naturwissenschaften Erfolge naturgesetzlichen Denkens (Vorhersagen) in deren bildhafte (archaische) Sprache auch zu Kurzschlüssen Anlaß bot. Interessant ist, daß wenig später Gedanken zu Determinismus, Chaos aufgegriffen wurden, die in der griechischen Klassik schon eine Rolle spielten und die im 20. Jahrhundert in starkem Maße wissenschaftlich untersucht worden sind. Genau auf diese Probleme werden wir bei näherer Betrachtung von komplexen biologischen Systemen zurückkommen müssen. Obwohl die Biologie im 20. Jahrhundert umfangreich als Grundlage für 'naturphilosophische' Betrachtungen verwendet wurde, ist das weniger auf den Problembereich komplexer Systeme zurückzuführen (ich werde mich aber darauf im weiteren umfangreich beziehen), es war eher die rasante Entwicklung der Biologie bis hin zur Gentechnik, die zu philosophischen Betrachtungen Anlaß gab. Selbstverständlich schwang dabei im Hintergrund die Problematik der Komplexität biologischer Systeme, welche eben ein wenig vergleichbar ist mit der Komplexität menschlicher Gesellschaften, mit, ohne daß sich für mich erkennbar eine eigenständige 'Philosophie der Komplexität' herausbildete. Wenn man die allgemeine Ähnlichkeit komplexer Systeme in menschlichen Gesellschaften und der Biologie betont, dann nähert man sich der Naturphilosophie, und damit ist die Frage zu beantworten, welchen Gefahren ich mich dadurch aussetze. Grundsätzlich ist es die Gefahr, daß Analogien für Beweise genommen werden, was damit gleichbedeutend ist, daß die Spezifika der einzelnen Bereiche nicht ausreichend berücksichtigt werden. Was aufzudecken ist, sind die wirklich inherenten Äquivalenzen, worum ich mich bemühen möchte. Auf der anderen Seite möchte ich Anregungen aus den biologisch komplexen Systemen übernehmen, um auf typisch menschliche Phänomene vergleichend aufmerksam zu machen. Anders gesprochen: es muß die nötige Distanz vorhanden sein, um nicht oberflächliche Ähnlichkeiten zur Grundlage von Behauptungen über Gesetzmäßigkeiten zu machen.

III. confirmatio et confutatio sive reprehensio

2. Hauptteil

2.1 Von der Problemen der Vielfalt

Bei der näheren Betrachtung von Eigenschaften vielfältiger Systeme fallen einige ausgeprägte Eigenschaften auf, die niedrig dimensionierte Systeme, z. B. lineare, nicht oder kaum aufweisen, die in der Vielfalt besondere Schwierigkeiten bereiten.

Im folgenden beschränke ich mich exemplarisch auf drei:

1. Die Selbst- oder Rückbezüglichkeit.
2. Die Intransitivität der Ähnlichkeit.
3. Die Schwierigkeit, bei Veränderungen in vielfältigen Systemen Vorhersagen zu treffen oder die geschichtliche Dimension.

Selbstbezüglichkeit

Eine wichtige, dabei auch schwierige, Besonderheit des Seins und Werdens in unendlicher Vielfalt ist die sogenannte Selbstbezüglichkeit, die in allen komplexen Systemen und nur dort auftritt, wie ein System bekannter Dimensionalität deren Grenzen durchbrechen und in eine höhere Dimension 'aufsteigen' kann. Als Beispiel, in dem Selbstbezüglichkeit deutlich wird, diene uns ein Gedicht von Erich Fried.

*Es muß einen Ausweg geben
aus jenem Aberglauben,
der immer meint,
es muß einen Ausweg geben.*

Der zweite Teil des Gedichts nimmt den ersten Teil auf, bezieht sich auf ihn und widerspricht ihm. Damit wird ein im 'System' des Gedichtes unlösbarer Widerspruch deutlich gemacht, der so nicht vorhersehbar war und dessen Unlösbarkeit den einfach logisch denkenden Menschen verwundert. Das Gedicht oder besser dessen Aussage entzieht sich der Beweisbarkeit. Daß das auch für Systeme in der Mathematik gilt, hat Goedel im ersten Drittel dieses Jahrhunderts bewiesen, beunruhigt hat das erst einmal niemanden.

Betrachten wir in diesem Zusammenhang biologische Makromoleküle.

Proteine sind sehr komplizierte Gebilde mit einer Vielzahl von Wechselwirkungen zwischen den Atomen. Im Prinzip durchstoßen sie zweifach Dimensionsgrenzen: die Sequenz ist ein eindimensionaler String und sie faltet sich, vergleichbar einem Wollfaden, zu einem dreidimensionalen Knäuel. Während dem Wollfaden im Knäuel unendlich viele Anordnungen möglich sind, ist dem Peptidfaden eines Proteins praktisch nur eine 3-D-Anordnung erlaubt. Dieser zweifache Wechsel der Dimensionalität erschwert das Verständnis in besonderem Maße.

Etwas einfacher und überschaubarer können Strukturen der Nucleinsäuren sein. Insbesondere Desoxyribonucleinsäuren sind Substanzen, die wie ein Reißverschluß gebaut sein können. Der eine Strang findet über spezifische Wechselwirkungen (Watson-Crick-Basenpaarungen) ein Gegenüber, zu dem er perfekt paßt. Dies ergibt ein reißverschlußähnliches Gebilde. Die Zähnen des Reißverschlusses entsprechen den Basen, das Band, an dem die Zähne befestigt sind, entspricht den Zuckerresten, die über Phosphat miteinander verknüpft sind. Bekannterweise bilden die Basen G (Guanin) und C (Cytosin) und A (Adenin) und T (Thymin) bzw. U (Uracil, nur in der RNA vorkommend) die Paare, die dann zu dem Reißverschluß führen. Nimmt man folgende Nucleinsäuresequenz an:

GGGCCCTTXXXXAAAGGGCCC.

so ergibt sich ein Maximum an Basenpaarungen, wenn man die Nucleinsäure folgender Struktur annimmt:

```

A A A G G G C C C X X X X
T T T C C C G G G X X X

```

Denn 'A' mag 'T' und 'G' mag 'C'.

Wir sehen also ein System, was sich zu sich selber zurückfaltet, verbunden auf der rechten Seite durch eine einfache, nichtgepaarte Sequenz XXXXX. Dieses System ist damit im wahrsten Sinne des Wortes selbstbezüglich, es hat für sich wechselseitig selbst eine eigene Umgebung geschaffen. Die Sequenz auf der einen Seite fordert eine bestimmte Sequenz auf der anderen. Unter welchen Bedingungen bleibt diese Struktur im Prinzip stabil? Wieviel Fehlpaarungen, d. h. nichtwechselwirkende Basen nach Mutationspaarungen verträgt diese Struktur? (Selbstverständlich bleibt die Struktur – bis auf aller kleinste Nuancen – gleich, wenn die Basen nur die Seiten wechseln, d. h. eine Mutation auf der

einen Seite durch eine kompensatorische auf der anderen begleitet wird.) Welcher Anteil der Mutanten wird ähnliche (Raum-)Strukturen bilden? Es stellt sich in theoretischen Untersuchungen heraus, daß sich selbst unter Bedingungen umfangreicher 'Mutationen' etwa 1 bis 10% der Sequenzen Selbstbezüglichkeit finden, die sich zu einem definiertem 2(3)-D-Gebilde zusammenfügen. Das heißt also, die komplizierte Energie-Landschaft, ist nicht durch riesig breite Täler nichtfaltbarer Strukturen getrennt, sondern in 10% der Fälle finde ich nach Mutation eine vernünftige Struktur (Fontana et al.), d.h. ein Weg weg von der Struktur, der gangbar ist. Zusammenfassend läßt sich für Nukleinsäuren, die aufgrund ihrer Selbstbezüglichkeit definierte räumliche Gebilde aufweisen können, festhalten, daß aus der Vielzahl der Möglichkeiten (z.B. bei einer Kettenlänge von 2000 Basen $4^{2000} \sim \infty$) durch Mutationen mit hoher Wahrscheinlichkeit (1-10 o/oo) wieder stabil strukturierte Anordnungen gefunden werden. Betrachtet man im Raum der möglichen Sequenzen die Nukleinsäuren im Verlaufe einer Evolution, so kann sich Schritt für Schritt die Entwicklung vollziehen, ohne daß ständig ein Desaster zu erwarten ist, und wir sehen eine 'Spur' der sinnvollen Nukleinsäuren wie Fußtapfen im Schnee (Geschichte s.u.).

Eine weitere Form der Bezüglichkeit (im Sinne der Ganzheit Selbstbezüglichkeit) ist im Ablauf der Evolution zu beobachten. Nachdem die ersten Schritte getan sind, kommt es zu weiteren Schritten, neuen Organismen, die teilweise erst durch die vorangegangenen ermöglicht werden, aber andererseits selbstverständlich die Spuren der Geschichte in sich tragen. Anschaulich belegt wird dies durch die jetzt als gesichert zu betrachtende Aussage, daß die Ontogenese ein Abriß der Phylogenese ist. Andererseits sind eine Reihe von Varianten durch die vorangegangenen Schritte undenkbar geworden (z.B. ist in der Musik nach 2 Oktavsprüngen ein dritter in einer Gesangsstimme wenig sinnvoll). Man kann es entweder als Informationsproduktion oder -gewinn im Laufe der Evolution (Phylogenese) oder Ontogenese oder als Selbstbezüglichkeit, d. h. Beziehung erster Teil und zweiter Teil eines Satzes zueinander, sehen. Und diese Selbstbezüglichkeit macht uns das Leben so schwer. Die Selbstbezüglichkeit im musikalischen System und im System der Proteine zu erkennen, erscheint mir eine der wesentlichen Fragen zu sein, deren Antwort uns das Verständnis komplexer Strukturen und deren Entwicklung ermög-

licht. Darüber hinaus führt uns die (Selbst)bezüglichkeit ob der Kombinatorik in eine neue Dimension der Vielfalt. Schier alles erscheint als erlaubt (siehe oben, ein stochastischer wechselseitiger Tausch der Basen kann jede Ähnlichkeit auf einem Halbstrang verschwinden lassen, und trotzdem sind Strukturen ähnlich).

Von der Intransitivität der Ähnlichkeit in vielfältigen Systemen

Aus der Geometrie ist uns vertraut, daß, wenn Dreieck A und Dreieck B wie auch Dreieck B und Dreieck C einander ähnlich sind, auch Dreieck C mit A ähnlich ist. Leider gilt das im System mit vielfältigen Möglichkeiten nicht. Als Beispiel diene uns folgende Reihe an Worten, die sich immer um einen Buchstaben unterscheiden. Jedes Wort hat mit dem Nachbarn in der nächsten oder vorhergehenden Zeile große Ähnlichkeit, das erste und das letzte haben an keiner Position einen gleichen Buchstaben.

Welche Möglichkeiten gibt es, um von einem Wort (z.B. Hund) zum anderen (Maus) zu kommen?

HUND
HAND
HANS
HAUS
MAUS

Zwischen jedem der Worte ist jeweils ein Buchstabe geändert, eine Punktmutation. Die Reihe ließe sich natürlich fortsetzen (MASS – MAST – HAST). Dabei werden, wie auch schon oben, nur sinnvolle Mutationen, d. h. solche vorgenommen, wo ein neues Wort mit neuer Semantik vorkommt, manchmal sogar eines mit zwei völlig unterschiedlichen Bedeutungen: MAST). Läßt man sinnlose, d.h. Mutationen, die zu Rechtschreibfehlern führen, zu, z.B. bei MAST auf der letzten Position ein D, dann sind unsere Erkennungssysteme in der Lage, diesen Fehler erst einmal zu übergehen und das nächstliegende Wort mit Sinn als das wahrscheinlich richtige anzunehmen. Dieses Phänomen deutet wieder auf die Fehlerfreundlichkeit der Systeme hin, was natürlich die Gefahren von Doppeldeutigkeiten erhöht.

Von der Schwierigkeit, Veränderungen vorhersagen zu können

In den beiden vorangegangenen Abschnitten ist eine weitere Tatsache implizit enthalten, die in uns in vielfältigen Systemen in puncto Erkennbarkeit Kümmernis, in puncto Stabilität und Varianz Hochachtung abringt. Zurück zur Frage, wieviel Mutationen eine Struktur verträgt (bei Worten: wieviele Rechtschreibfehler verträgt ein Wort, bevor es seine Bedeutung ändert oder die Kennbarkeit seines Inhalts verloren gegangen ist?). Wieviel Löcher verträgt eine Hose, bevor sie ihrer Funktion verlustig geht? Diese Beispiele belehren einen sofort, daß das jeweils von sehr vielen Randbedingungen abhängt. Je länger das Wort, umso mehr Mutationen verträgt es, aber andererseits, selbst bei einem langen Wort, ist eine bestimmte Veränderung eines Buchstabens sofort tödlich für das Verständnis. Wenn ein Rest in einem bestimmten Eiweiß wesentlich ist für Rückbezüglichkeit, hat dessen Veränderung ganz andere Auswirkungen als bei einem Rest, dessen funktionelle Bedeutung geringer ist. Ein weiteres Beispiel einer höheren Integrations(Bezüglichkeits)ebene: Man kann Hunderte von Genen in der Hefe ausschalten – man sieht keinen Phänotyp, d. h. die Zellen zeigen kein geändertes Verhalten, bzw. wir haben noch keine Bedingung gefunden, wo geändertes Verhalten zu beobachten wäre. Andererseits kann es sein, daß die Deletion (Ausschaltung) eines einzelnen Gens dazu führt, daß die Hefe nicht lebens- und teilungsfähig ist. Diese Beispiele, die verdeutlichen sollen, daß Vorhersagbarkeit von Ereignissen, Veränderungen der Bedingungen bzw. der Elemente der Vielfalt selbst von vielen inneren und Randbedingungen abhängt und damit nur eingeschränkt möglich ist, lassen sich beliebig fortsetzen. Das bedeutet einerseits, daß man sehr viel besser zu viel wissen muß, um die Vorhersage zu treffen und zweitens, daß ein komplexes vielfältiges System immer mehrere Möglichkeiten hat, auf Änderungen zu reagieren. Diesen Gedanken aufgenommen, kommt man dazu, daß zu einem gegebenen Betrachtungszeitpunkt eines komplexen Systems ein Zustand existiert, der einer von vielen möglichen und nicht der allein denkbare ist. Mit anderen Worten: Das, was beobachtbar ist, ist geworden aus Notwendigkeit und Zufall und nicht nur aus dem Zwang der Naturgesetze, die in einfachen Systemen bei gegebenen Randbedingungen nur eine Lösung zulassen. Das Ohmsche Gesetz hat nicht dieses geschichtliche Element, was wir für die

Und das liegt nicht an dem schönen Blöken des Schafes, sondern an dem Darm des Schafes, der für die Saiten der Streichinstrumente verwendet werden kann.

Etwas prosaischer haben das für lebende Systeme, insbesondere Nucleinsäure und Proteine, Ebeling und Feistel ausgedrückt:

‘Für reale Evolutionsprozesse ist natürlich die Zielsequenz (Reihenfolge der Bausteine in Proteinen und Nucleinsäuren, CF), sofern eine solche überhaupt existiert, nicht vorgegeben.’

Wir stellen nochmals fest: Am Anfang von Musik und Leben können also weder Sinn noch Wort gewesen sein, Sinngebung und Ritualisierung (s. u.) folgten erst später. Wir kommen zur gleichen Ansicht wie Faust: zuerst waren die Kraft und die Tat, dann deren Produkt vorhanden. In die Physik der Proteine übersetzt, ergibt sich, daß die Wechselwirkungen zwischen den Atomen und Atomgruppen, die chemischen (Ver)Bindungen, die sich in der Zeit aufbauen (aus Kraft folgt Tat und dann Seiendes) als Ausgangspunkt des Werdenden zu betrachten sind. Für die Moleküle gibt es kein Ziel der Entwicklung, sondern nur Möglichkeiten, miteinander umzugehen, wechselzuwirken. (Auch an dieser Stelle empfiehlt es sich, auf die Sprache zu hören: *w e c h s e l w i r k e n*, wechselseitig aufeinander einwirken, *a* verändert *b* zu *b'*, dieses wiederum kann *a* zu *a'* ändern usw.

Im folgenden werde ich Besonderheiten des Gestaltens im Raum der unendlichen Vielfalt im einzelnen vertiefen.

Schritt für Schritt

Konfrontiert mit der unendlichen Vielfalt, ergibt sich die Frage, ob diese überhaupt gestaltbar ist. In diesem Kontext war eingangs festgehalten worden, daß es mit Hilfe eines Ziels nicht möglich erscheint, da ein solches nicht existent ist. Zweitens: Ein eventuelles Ziel wäre darüber hinaus in die unendliche Vielfalt eingebettet, ließe sich nur schwerlich ohne besondere Vorkehrungen in endlicher Zeit finden und bliebe damit praktisch unerreichbar. (Nur, wenn wir eines erreicht haben, wissen wir, wie wir dahin gekommen sind und glauben, daß der Weg logisch oder stringent oder determiniert war). Das schrittweise Entwickeln (in unendlicher

Vielfalt) der Natur über etwa $3 \cdot 10^9$ Jahre hinaus bezeichnen wir seit Darwins Zeiten als 'Evolution'. Die Evolution in der Musik ist viel, viel kürzer als die 3 Millionen Jahre, die ich oben, um große Zahlen zu erhalten, angesetzt hatte. Die etwa zehntausendjährige Musikgeschichte ist aber insbesondere in den letzten 300 Jahren viel besser dokumentiert, teilweise auch in ihrer Frühgeschichte, als die Evolution der Proteine.

Die Geschichte der frühen Orgelkunst ist wie die Entwicklung der Lebewesen in Form eines Baumdiagramms darstellbar, es ergibt sich ein Schema, welches sich im wesentlichen über mehr als 100 Jahre erstreckt. Die musikalischen Bezüge decken sich mit den Lehrer-Schüler-Beziehungen ab. Die Kunst des Orgelspiels ist seit etwa dem 12. Jahrhundert durch Notentexte belegt, davor gab es aber auch schon Instrumente. Die Begrenztheit der frühen Instrumente bestand in dem recht eingeschränkten Tonumfang (8 Töne), und entsprechend war die Musik. Aufgrund des Instrumentes (nicht aufgrund der Gesetze der Musik!) konnten nur Melodien, die die 8 verschiedenen Töne umfaßten, gespielt werden (vgl. im Falle der Proteine auch Uraminosäuren). Da wird ein ganz anderer Aspekt deutlich, nämlich der der Coevolution (siehe unten) und äußeren Bedingtheit. Nach dem 12. Jahrhundert waren die Orgeln schon mit ca. 2 Okta-ven ausgestattet, was in etwa dem Umfang der Sängerstimme entspricht. Dies erschien den Musikanten als eine vernünftige Grenze.

Eine weitere Frage ist die nach dem 'Was bleibt?', d. h. unter welchen Bedingungen sind die entstandenen Systeme, sprich Musikstücke bzw. Kompositionen, Proteine, stabil durchsetzungsfähig gegenüber anderen. Hätte ein reiner Epigone Mozart ebensowenig die Chance eines 'evolutionären' Vorteils (z.B. mit größerem Lebensraum seiner Musikstücke/häufige Aufführungen) als Schönberg mit seinen Innovationen zur Beethoven-Zeit? Bedenken wir das für die Proteine, ergibt sich ein vergleichbares Bild. Es erscheint einsichtig, daß ein neues (durch Mutation und andere Vorgänge geändertes) Protein sich

- einerseits ausreichend deutlich von seinem Vorgänger unterscheiden muß, um einen evolutionären Vorteil (größere Durchsetzungsfähigkeit, erhöhte Vermehrungsrate, größerer Lebensraum) für den Organismus zu ergeben,
- andererseits darf die Veränderung nicht zu groß sein, denn auch die neue Musik, das neue Protein muß sich (noch) in die alte Umgebung

einpassen, welche teilweise von ihm selbst bestimmt wird ((Rück)bezüglichkeit).

Die Quantelung der Ereignisse; Schritt für Schritt

Wie kann sich in so einer unendlichen Vielfalt etwas Strukturiertes entwickeln? In solchen Systemen, die sich in unendlicher Vielfalt (Definition siehe oben) bewegen (sic!), ist eine schrittweise Entwicklung die einzige Möglichkeit, zu komplexeren System zu kommen. Warum? In einer ersten Teilantwort ist daran zu erinnern, daß die Vielfalt sich aus der endlichen Zahl verschiedener Bausteine ergab, die in großer Zahl zusammengefügt (sei es in einem Musikstück oder in einem Protein) werden. Das führt wiederum dazu, daß zwischen zwei verschiedenen Spezies eines Polymers (einer Sequenz) immer ein Austauschschritt eines/mehrerer Bausteine liegt. Die Schrittweite kann aber recht unterschiedlich sein. Ein weiterer Teil der Antwort ergibt sich aus der Tatsache, daß ein Ziel der Entwicklung nicht angebbar ist, was dazu führt, daß eine *gezielte* Entwicklung ohne (zufälliges) Absuchen von Möglichkeiten, in der Vielfalt nicht möglich ist.

Und ein weiteres muß für die schrittweise Entwicklung als wesentlich festgehalten werden: Was verlieren wir an Freiheitsgraden, wenn die ersten Schritte getan sind? Selbst unter diesen Bedingungen haben wir die eingangs erwähnte unendliche Vielfalt wieder. Das heißt, selbst wenn wir den ersten Schritt getan haben, wenn wir also von 10^{65} Möglichkeiten auf 10^{62} gekommen sind (nicht mehr alle Schritte sind möglich), sind wir immer noch im Bereich der unendlichen Vielfalt, denn es bleiben noch viel mehr, als wir testen können. Die Zahl der Möglichkeiten nimmt natürlich mit der Zahl der getanen Schritte weiter ab. Trotzdem bleibt eine noch ausreichend umfängliche Vielfalt, um mit hoher Wahrscheinlichkeit anstehende Probleme zu lösen.

Im weiteren müssen wir die Frage stellen: Welches sind die Randbedingungen für erfolgreiche Entwicklungen? Entwicklung heißt hier verändern, z. B. sind durch Mutationen (Schrittchen) oder 'Rekombination' von Vorhandenem (Schritte, es können Domänen der Proteine sein, aber auch ganzer Organismen, z. B. Mitochondrien, die einmal unabhängige Einzeller waren und jetzt den meisten Zellen als Kraftwerke dienen)

Veränderungen kleinerer und größerer Art möglich. Andererseits muß das System (zu sich selbst und zu anderen) fehlerfreundlich sein. Nicht jede Mutation darf das gesamte System zerstören. Wäre es so, gäbe es keinen gangbaren Weg weg vom Existierenden, die Entwicklung wäre eingefroren. Existiert 'Fehlerfreundlichkeit' können sich Mutationen im (fast) unveränderten System 'ansammeln', so daß sich dann bei einer weiteren Mutation deutliche Änderungen desselben ergeben: aus dem Epigonen Mozarts entstünde ein neuer eigenständiger Komponist. Nukleinsäuren per se besitzen diese Eigenschaften der Fehlerfreundlichkeit im besonderen Maße. Aber auch Proteine tolerieren (von einzelnen unersetzbaren Aminosäuren abgesehen) Mutationen recht umfänglich. Z. B. sind in der Proteinstrukturdatenbank Atomkoordinaten von ca. 100 künstlich hergestellten verschiedenen Mutanten des Enzyms Lysozym, aber praktisch jede Variante ist 'Lysozym' mit seinen entsprechenden Funktionen. Ursache ist die (unverstandene) Redundanz des Faltungscodes, womit das Stichwort gegeben ist für eine in hohem Maße notwendige Eigenschaft lebender Systeme: die mehrfache Absicherung von Systemelementen

Die Trennung zwischen Funktion und Information

Ein Zweites, welches wir neben der schrittweisen Änderung bei der Entwicklung unendlicher Vielfalt als Rahmen(Rand)bedingung berücksichtigen müssen, ist die sogenannte Ritualisierung. Es reichen nicht die Ereignisse selbst, z. B. die Musikstücke selbst, die Proteine selbst, sondern wir brauchen Informationen, die von diesen abgeleitet werden und für die Ereignisse stehen. Anders sind komplizierte Netzwerke in Raum und Zeit nicht vorstellbar. Würde Musik in Stimme nur von einzelnen Musikern gespielt, wie könnte je ein Werk wie die h-Moll-Messe von J. S. Bach aufgeführt werden? Was passiert, wenn Informations- und Funktionsträger miteinander identisch sind?

Und damit komme ich zu der für die Entwicklung in unendlicher Vielfalt wichtigen Frage: Muß im Rahmen der Evolution komplexer Systeme in unendlicher Vielfalt eine Trennung in Funktion und deren Kodierung stattfinden? Dies zu beantworten fällt innerhalb der Musik leicht. Wenn ich Musik mache, dann hört man etwas und hält es (möglicherweise) für

Musik. Mit dem Verklingen der Töne ist aber das Ganze vorbei. Die Musik lebt so nur in der Gegenwart oder virtuell in der Erinnerung.⁴ Das hat natürlich frühere Generationen sehr gestört, hatten sie noch keine Möglichkeit der äußeren Aufzeichnung der Musik entwickelt. Um sozusagen aus der Gegenwart zu flüchten, um Vergangenheit *und* Zukunft zu erhalten, mußten sie kodieren, und zwar so, daß sich Musik möglichst getreu an einem anderen Ort, zu einer anderen Zeit aufführen ließ.

Wie entsteht nun so ein Code? Ein anschauliches Beispiel ist die Entwicklung der musikalischen Notierung. Wie oft in der Vielfalt, gab es mehrere Ansätze. Einen solchen Ansatz bilden die sogenannten Tabulaturen. Betrachten wir eine Flötentabulatur: Die Grifflöcher der Flöte wurden durchnummeriert, und wenn die Löcher entsprechend der Notierung, z. B. das 8., das 6., das 4., das 3., das 2., das 1. verschlossen werden, erklingt auf einer bestimmten Flöte ein F. Diese Art der Kodierung in Form der Griffnotation ist natürlich eine komplizierte und *instrumentenspezifische* Kodierung, und das hat die Musiker gezwungen, etwas Besseres zu suchen, welches über ein bestimmtes Instrument hinaus gültig war. (Wichtig für komplexere mehrstimmige Musik bzw. für Instrumentalisten, die mehr als ein Instrument beherrschten oder für mehr als einen Typ komponierten.) Und jetzt kommt wieder der Aspekt „Coevolution“, d. h. das Zurückgreifen auf Dinge, die eigentlich zu einem anderen Zwecke 'sich' entwickelt haben: Das gesprochene Wort als Informationsträger zwischen Menschen ist viel älter als die (entwickelte) musikalische 'Sprache'. Die Schriftsprache ist auch älter als die musikalische Sprache, und damit konnten die Menschen auf die Idee kommen, die Schriftsprache, sprich die Buchstaben (Notennamen), zur Kodierung der Musik zu verwenden. Die Kodierung der Musik in Form Tabulatur war entstanden.

Eine weitere Form, die heute gängige Notation von Musik, ist eine Kodierung, die, ebenfalls nicht perfekt, aus der Welt der Streichinstrumente kommt. Sie ist nicht ohne Nachteile, sie muß, wie jede Kodierung, unvollständig sein. Folgende Fragen klingen sofort an: Kann alles kodiert sein? Was ist kodiert? Was ist Semantik, was ist Grammatik? Was ist 'co'-kodiert? Eine Kodierung wird erfunden, um für das Ereignis selbst zu ste-

⁴ Die Aufzeichnung im Gedächtnis ist natürlich auch eine Codierung, aber, von wenigen Ausnahmen (Mozart!) abgesehen, eine recht unscharfe und zur Reproduktion der Musik ungeeignet.

hen. Man kann jetzt Noten, ohne sie zu spielen, ohne daß die Musik erklingen *muß*, auf ihren musikalischen Gehalt prüfen. Dies geht aber nur, wenn man die Dekodierung versteht. Wir haben bei der Musik eine Kodierung gesehen, mit der, obwohl durch die Abstraktion einige Feinheiten (wie Lautstärke, exakter Rhythmus, Betonung im Detail, Instrumentspezifika usw.) verlorenzugehen drohen, Vergangenheit überwunden und die Chance eröffnet wurde, die Musik auch in Zukunft zu retten. Wie sieht das bei den Proteinen aus?

Der genetische Code, der vorgefunden wird, ist eine chemische Schrift, die im Dreier-Takt für Aminosäuren steht. Der Code ist praktisch universell, d. h. in jedem Organismus finden wir die gleiche Kodierung. Ein Dreibuchstaben-Wort der Nukleotide steht für eine Aminosäure, eine von den 20 (21) proteinogenen, d.h. die unmittelbar am Ribosom in das Protein eingebaut werden. Damit hat das einzelne Protein und auch das Lebewesen Vergangenheit (Vorfahren) und Zukunft (Nachkommen) bekommen und nicht nur die Gegenwart. Jetzt können wir uns wiederum die Frage stellen, wie solch ein Code entstanden sein mag. Wir können eine Analogie zur Musik ziehen, wieder stehen reale Ereignisse am Anfang der Entstehung des Codes Musik. Ausgehend von einer mehr geometrischen Beschreibung beim Abgreifen eines Tones wurde ein 'Ritual' abgeleitet, welches für den Ton steht. Im Falle der Proteine war es vielleicht so, daß bestimmte Eigenschaften der Aminosäuren zu bestimmten 'Dreier-Worten' der Nukleinsäuren passen.

Die Belege dafür sind, drei Mutationen nach Entstehung des Codes dünn gesät. Z. B. wenn man die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen den Triplets analysiert, stellt man fest, daß bestimmte Ähnlichkeiten in den Eigenschaften der Aminosäuren alleine durch die Ähnlichkeit der Triplet-Worte gegeben sind. So bevorzugen die hydrophoben Aminosäuren Triplets mit 'U' (Uracil) in der Mitte. Ergo können wir annehmen, daß der genetische Code eine Beziehung mit dem realen Geschehen hat, nämlich die Bindung einer Aminosäure an einer bestimmten Stelle, die Mitte von diesem Dreiercode, und dann folgt die Verknüpfung der Aminosäuren miteinander. Auf diese Weise haben wir ein primitives System der Kodierung auf der Grundlage des Prozesses selbst. Später entstand auch hier ein kompliziertes Ritual – die Proteinsynthese am Ribosom. Für primitive Lebensvorstufen mag der

Mechanismus der Informationsübergabe bzw. -realisation durch unmittelbare Wechselwirkung zwischen Nukleotid und Aminosäure ausreichend gewesen sein. Für die komplizierte spätere belebte Welt mußte dies alles wesentlich verbessert werden.

Welche neuen Möglichkeiten bot eine solche Codierung bzw. Ritualisierung? Neben der Möglichkeit, eine Brücke zwischen Vergangenheit und Zukunft zu schlagen (d.h. Informationen effektiv zu sammeln und kompakt weiterzugeben), ergeben sich weitere Vorteile durch die Ritualisierung:

- Vervielfältigen und damit Parallelverarbeiten und -verändern einzelner (Einheit von Variabilität und Konstanz auf einer neuen Ebene der Redundanz) z.B. auch Mutation auf 'stummen' Genen
- Kombination von Genen und deren Bruckstücken
- getrennte Optimierung von Informationssystem (Genotyp) und Phänotyp / Trennung des Erarbeitens der Komposition und Realisierens der Musik.

2. 3 Wie läßt sich in unendlicher Vielfalt beschränkt leben?

Ich möchte mich jetzt der letzten Frage zuwenden: Wie kann ich mich in so einer Welt der unendlichen Vielfalt überhaupt zurechtfinden? Wie gelingt es einem Lebewesen, sei es noch so primitiv, sich in einer Welt zurechtzufinden, in der scheinbar alles möglich ist, man auf 'alles' vorbereitet sein muß? Und da nehme ich eine Anleihe bei Goethe. Er schrieb in seinen Briefen zu „Dichtung und Wahrheit“, daß er dieses Buch eigentlich „Wahrheit und Dichtung“ genannt hat. Er hatte die beiden Begriffe vertauscht. „Dichtung und Wahrheit“ ist aber dann die Reihenfolge, die von ihm autorisiert wurde und einem besser gefällt – daß also nicht alles, was uns begegnet, ernstzunehmen sei, sondern daß ein Faktum in unserem Leben nur dann etwas gilt, wenn es etwas zu bedeuten hat. Und damit kommen wir zu diesem Problem: Wie kann in einer unendlich vielfältigen Welt die Bedeutung eines Faktums erkannt werden. Die Chance, die wir besitzen, beruht auf dem, was bei den alten Griechen schon als *Antizipation* bekannt war. Ein Beispiel, was ich Ihnen zeigen möchte, ist von Herrn Dr. Ritter, Physikochemiker von Haus aus, der sehr weitgehende

Gedanken auch zur Strukturierung niedergeschrieben hat. Es ist die Zeit Goethes, Ritter war auch eine Zeitlang in Jena. Er schrieb in seinen etwa 700 Thesen (als Nachlaß veröffentlicht) diesen Satz, den wir auch in entsprechender anderer Form in den Abhandlungen Kants unter dem Stichwort Antizipation in der „Kritik der reinen Vernunft“ finden können.

*Würde der Gottesverehrer die Bibel verstehen können,
wenn er nicht, was in der Bibel stände, in sich sich selbst fände?*

Johann Wilhelm Ritter

Das heißt also, wir verstehen die Welt nur, weil wir vorgebildete Strukturen dafür haben, sie zu verstehen. In der Musik kann ich das an einem weiteren Beispiel erläutern. Auf einem (verstimmten) Instrument möge ein Ausschnitt eines Noëls (Weihnachtsstück) von Daquin erklingen, wobei die einzelnen Töne bis zu 40 cent gegenüber den gleichschwebenden verstimmt sein sollen. Trotz dieser schmerzlich deutlichen Verstimmung träte die Melodie, die der Komponist in der Oberstimme (unbewußt) verwendet, die (Anfangs-)Melodie von 'Alle meine Entchen', deutlich zutage.

„Alle meine Entchen“ hat der Komponist wahrscheinlich weder erkannt, noch würde es in ein Weihnachtsstück hineinpassen. Trotz der Verstimmung gelingt es dem Zuhörer, die Töne 'hinzuzwingen' so daß er einen Ton, der zwischen Fis und F angesiedelt war, korrekt auf Fis projiziert. Also geht unser Hirn beim Hören vorstrukturiert vor, d. h. es hört ein bißchen das, was es hören will. Ähnliches findet bei bestimmten Erkennungsprozessen zwischen Proteinen statt. Tiere besitzen z. B. ein Abwehrsystem, das ihr Inneres gegen Eindringlinge schützt. Nichts Fremdes soll unerkannt Böses anrichten. Dieses Immunsystem muß mit Proteinen und anderen Molekülen rechnen, die es noch nie gesehen hat, also auch mit der unendlichen Vielfalt. Frage: Wie kann es praktisch alles erkennen? Stark vereinfacht passiert folgendes: Das Immunsystem 'würfelt' ein bißchen. Dieses Würfeln, sprich Mutieren und zufälliges Rekombinieren, führt zu etwa 10^7 bis 10^{10} Varianten, und diese Varianten sind eine Auswahl aus 10^{65} Varianten, also ein Teil aus der unendlichen Vielfalt. Dieser Teil aus der großen Gesamtheit ist offensichtlich in seinen Erkennungsmöglichkeiten so breit gestreut, daß er mindestens halbwegs

Sachen irgendwie, wenn auch im Einzelfall gerade so, greifen kann. Dann wird, ausgehend von diesen halbwegs greifenden Proteinen, ein Mutationsprozeß in Gang gesetzt, bis eine perfekte Passung erreicht ist, d. h. bis das Immunsystem Moleküle besitzt, die eine Schraubstock ähnlich feste Bindung an den Fremdling erreichen. Ich denke, man kann zeigen, daß ein solches Verfahren des Anpassens von vorhandenen halbwegs passenden Strukturen in perfekt passende das sicherste ist, um Eigenes von Fremdem zu unterscheiden, ohne das Eigene mit Fremdem zu verwechseln. Alle anderen Varianten sind viel zu gefährlich für den Organismus, weil per Zufall völlig neu entwickelte Proteine, die Fremdes erkennen sollen, plötzlich Eigenes binden. Wir haben also hier wieder Antizipation, vorgebildete Proteinstrukturen, um etwas zu erkennen.

An dieser Stelle sei die Bemerkung erlaubt, daß dieses a priori, das Wissen im Vorhinein, das Vorbereiten auf eine bestimmte, notwendige Wechselwirkung, das schon wissen, was da kommen könnte, was man eigentlich nicht wissen kann, daß dieses für die betreffende Struktur ein a posteriori ist, d. h. gelernt und bewährt in der langen Entwicklungsreihe der Evolution. Gleiches gilt für die Struktur des Menschen, die der Erkenntnis und dem Verständnis dieser Welt dient, dem Gehirn: Ohne die kombinatorische Vielfalt überhaupt berechnen zu wollen (diese ist unvorstellbar, wenn man bedenkt, daß wir viele Milliarden Nervenzellen haben, die mit hunderten bis tausenden beeinflubarer Schaltstellen (Synapsen) ausgerüstet sind), ist es klar, daß das Gehirn für die Speicherung und Verarbeitung von Information gewaltige Kapazitäten hat. Auch hier ist von unendlicher Vielfalt im Sinne der Eingangsdefinition zu sprechen. Aber auch hier wird vorstrukturiert. So sind wir ziemlich sicher, daß wir Grundvoraussetzungen in unserem neuronalen Netz Gehirn haben, um Sprache zu erlernen, gezielte Bewegungen durchzuführen, daß wir also insgesamt strukturelle Voraussetzungen besitzen, zu lernen, und zwar in einer Form, daß wir genau in der Umwelt, in der wir uns bewegen, mit ihrer Vielfalt zurecht kommen könnten. Natürlich hat das Apriori auch Elemente eines Vorurteils, doch offensichtlich sichert dieses Lern- und Entscheidungsfähigkeit in der komplexen Umwelt. Wie schwer es ist, aus dem Aposteriori sich zu befreien, kann jeder nachvollziehen, wenn er versucht, 4, 5, 6- oder sonstwie dimensionale Räume sich vorzustellen. Sie sind uns mathematisch zugänglich, nicht aber für unser Gehirn vorstellbar.

Festzuhalten bleibt, daß es wohl gelten kann, daß äußere Komplexität mit unendlicher Vielfalt in innerer Komplexität mit unendlicher Vielfalt, beides historisch vorstrukturiert, ihre Entsprechung findet.

IV. conclusio et peroratio

3. Schluß

1. *'Das Reich der Kunst ist eine zweite Welt,
Doch wesenshaft und wirklich wie die erste,
Und alles Wirkliche gehorcht dem Maß.'* (Grillparzer)
2. *Nur fehlerbegrenzte und fehlerfreundliche evolutionäre Systeme hoher Dimensionalität finden sich in unendlicher Vielfalt zurecht und können sie (beschränkt) erkennen.*
3. *Und das ganze hat kein Ende: die letzte Musik ist noch nicht geschrieben, ein letztes, neues Protein wird nicht sein, solange, wie Welt ist, und der letzte Organismus – sei es Parasit oder Nützlichling aus Sicht einer Werteskala – noch nicht entstanden oder verschwunden.*

V. litterae

Da ich meine Ausführungen eingangs als „Essay“ bezeichnete, sei zum Schluß aus der Literatur nur eine Auswahl von Referenzen, die mir wesentliche Anregungen gaben, aufgeführt.

- Berendt, Joachim Ernst*; Das Dritte Ohr; 1985; Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg
Cramer, Friedrich; Chaos and Order; 1993; VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim
Ebeling, Werner; Engel, Andreas; Feistel, Rainer; Physik der Evolutionsprozesse; 1990; Akademie-Verlag Berlin
Ebeling, Werner; Feistel, Rainer; Chaos und Kosmos; im Druck 1994; Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg-Berlin-Oxford
Hofstadter, Douglas R.; *Gödel Escher Bach*; 1979; Basic Books, New York
Mandelbrot, Benoît B.; Die fraktale Geometrie der Natur; 1977; W.H. Freeman and Company, New York
Ritter, Johann Wilhelm; Fragmente aus dem Nachlasse eines jungen Physikers; 1984; Gustav Kiepenheuer Verlag Leipzig und Weimar