

Zur Chemie phylogenetischer und ontogenetischer Adaptations- und Lernprozesse (informationstheoretisch-quasimolekulares Modell)*

Von HERMANN SCHALTEGGER

Institut für organische Chemie der Universität Bern, Erlachstraße 9a, CH-3000 Bern 9

Professor Rudolf Signer zum 70. Geburtstag gewidmet

Redaktionelle Bemerkung: Die nachfolgende Arbeit von H. SCHALTEGGER richtet sich eigentlich mehr noch als an Chemiker und Biochemiker an Biologen und stößt über die Gebiete hinaus, auf die sich das Programm der *Chimia* sonst beschränkt. Ausgehend von kybernetischen Betrachtungen und unter Anwendung thermodynamischer Begriffe und Ansätze auf sehr verschiedenartige, komplexe Wechselwirkungssysteme entwickelt der Autor neue, unorthodoxe Auffassungen und Hypothesen. Die Redaktion betrachtet die Abhandlung nicht zuletzt als eine Aufforderung zur Diskussion und fügt sie als eine besondere Blüte dem bunten Geburtstagsstrauß für Professor RUDOLF SIGNER bei, dessen Interessen stets sehr weit gespannt waren.

* Mitgeteilt an der Herbstversammlung der Schweizerischen Chemischen Gesellschaft am 14. Oktober 1972 in Luzern.

Summary

On the chemistry of phylogenetic and ontogenetic adaptation and learning processes: an information theoretical-quasimolecular model.

Together the organism and its close environment are a closed system with molecular characteristics and can be considered as quasichemical reaction partners. In an animal organism the life processes can be differentiated into controlling and working ones. Here only the controlling systems will be considered. The environment as well represents a controlling system and these two systems can be considered to be reversible in the chemical thermodynamical sense. Furthermore, each adaptation and learning process corresponds to a specific environment. The receptive area of the nerves is called the signal room. x_1 and x_2 are the signal densities before and after the adaptation. The adaptation and learning processes are governed by the following two principles:

1. Principle of information minimums (dominant control)
 $\Delta I = \Delta I_{as} - \Delta I_{or} = R \cdot \ln x_2/x_1$.
2. Principle of entropy (information) controlled reversible production of the controlling molecule $St_{en} + St_{or} \rightleftharpoons St_{ad}$.

From the principle of information minimums it follows that, as a result of its interaction with the environment, an organism increases its information content. The result of the adaptation process is an «Organism/Environment Associate». In equilibrium the information content of the associate ΔI_{as} is zero, and the entropy reaches a maximum. All adaptation and learning processes occur spontaneously and voluntarily in spite of the energy-consuming synthesis of the controlling molecule. The information content (adapted controlling molecules St_{ad}) of the organism increases constantly: $I_{or} > 0$. Here information appears as the inverse thermodynamical function of the entropy. I and S are distribution functions for the energy. Entropy is known to be a measure of the unavailability of energy through dispersal. Accordingly, the information is a measure of the unavailability of energy through consolidation. The total biological physical world can be conceived as information-dispersing potential energy. The entropy maximum ($S_{max} = I_{min}$) is indicated by many Organism/Environment Associates by a highest possible interaction (information or energy exchange) between the elements in the system. An examination of this mechanism of the adaptation process in nature seems to confirm this theory. The dissociation of the Organism/Environment Associates leads to deficiencies which can have, according to the particular system, farreaching consequences.

The two principles (information minimum and reversible production of the controlling molecule) also furnish foundations for the self organization of matter and for the mechanism of evolution. The two principles thus approach a universal meaning in that all chemical, biological and sociological processes appear to be controlled by them. Therefore, it is necessary to reconsider the present conceptions about the mechanism of mutation being the responsible factor for the structural growth during evolution.

1. Einleitung

Wir sind kürzlich davon ausgegangen, Organismus und Umwelt als gleichberechtigte und definierte Reaktionspartner im Sinne der Chemie zu betrachten, welche miteinander Gleichgewichtssysteme bilden können¹. Von diesem Konzept und vom informationstheoretischen Schwerpunkt aus gesehen, haben wir das Prinzip auf die Carcinogenese angewendet^{1,2}. In dieser Mitteilung wird

die Anwendung dieses Konzeptes auf die im Titel genannten Prozesse beschrieben.

Für die theoretische Behandlung von Vorgängen in Organismen hat man von biologischer Seite³ her eine Zelle oder einen mehrzelligen Organismus als sogenanntes offenes System betrachtet, und die Physikalische Chemie hat dann versucht, mit Hilfe der irreversiblen Thermodynamik diese sogenannten «Fließgleichgewichte» theoretisch zu erfassen. Unserer Ansicht nach ist es nur eine technische Verfahrensfrage, ob man ein chemisches oder biologisches System im kontinuierlichen oder im Chargenbetrieb führt. Die «Chemie» der Reaktion wird dabei nicht berührt. Biologische Systeme lassen sich nämlich genauso als Gleichgewichte betrachten, wie sie von der Chemie her bekannt sind; oder umgekehrt: Eine typische Gleichgewichtsreaktion (z. B. eine Veresterung) läßt sich apparativ kontinuierlich führen, d. h. mit Stoffein- und -ausgängen als offenes System betrachten.

2. Differenzierung biologischer Vorgänge in Steuer- und Arbeitsprozesse⁴

Um überblickbare Verhältnisse zu erhalten, haben wir versucht, die biologischen Vorgänge in Steuerprozesse und in Arbeitsprozesse einzuteilen⁴ (Abb. 1). Für unsere Betrachtungen lassen wir nun die Arbeitsprozesse weg.

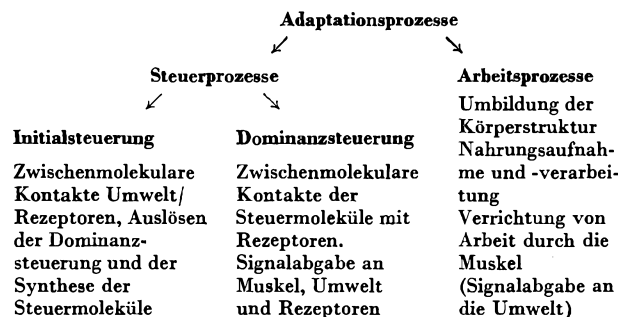


Abb. 1. Schematische Gliederung der Teilvorgänge in Adaptationsprozessen⁵. Initialsteuerung: lokalisiert in den Sinnesorganen. Dominanzsteuerung: lokalisiert in Neuronen und Muskel

¹ *Chimia* 26 (1972) 303.

² *Chimia* 20 (1966) 197, 237, 389, 23 (1969) 185.

³ L. v. BERTALANFFY, *Theoretische Biologie*, 2. Band, Verlag Francke, Bern 1951, siehe besonders Band 2, S. 49 ff.

⁴ Wie wir an anderen Orten näher ausführen werden, besteht an sich kein prinzipieller Unterschied zwischen Steuer- und Arbeitsvorgängen. Steuerprozesse würden wir zwar in der Entropiedimension formulieren und Arbeitsprozesse in der Energiedimension. Es ist aber viel einfacher und auch korrekter, die Arbeit, z. B. die Freie Enthalpie, als ihren Temperaturkoeffizient, d. h. also in der Entropiedimension, zu verwenden. Arbeit ist Energie, die, einem System zugeführt bzw. vom System abgegeben, stets dessen Informationsinhalt erhöht bzw. vermindert. Man kann daher einfacher diese Energie als «kinetische Information» und den durch sie erhöhten bzw. verminderten Informationsinhalt eines Systems als «potentielle Information» bezeichnen¹. Somit hätte nichts anderes stattgefunden, als daß kinetische Information in potentielle Information übergegangen ist oder umgekehrt.

⁵ Wir werden in einer ausführlichen Mitteilung auf die einzelnen Teilvorgänge eingehen. Für das erste Verständnis dürfte die Abb. 1 ausreichen.

Die Steuerprozesse nehmen wir als reversibel im Sinne der chemischen Thermodynamik an. Die vor ihr geforderten Bedingungen für Reversibilität und Gleichgewicht lassen sich ohne Schwierigkeiten erfüllen. Die Unterscheidung zwischen einer Initialsteuerung und einer Dominanzsteuerung hat sich aus der Analyse der Informationsübertragungsvorgänge sowie aus den anatomischen Strukturen und ihrer Zuordnung zu den einzelnen Funktionen ergeben⁶. Die Initialsteuerung löst die Kette der Wechselwirkungen aus⁶. Die Dominanzsteuerung wäre dafür verantwortlich, daß es überhaupt zu einer Adaptation mit der jeweiligen Umwelt kommt.

Die anatomischen Substrate, in welchen diese Teilvorgänge vor sich gehen, sind stets die Neuron-Muskel-Einheiten⁷. Die Nervenrezeptoren empfangen die Impulse aus der Umwelt (Initialsteuerung) und von der Dominanzsteuerung, d.h. vom Organismus *via* Muskel. Die biologischen Steuervorgänge würden darin bestehen, daß die chemisch gespeicherte Information als Steuerproteine über elektrische Impulse in mechanische Bewegung der Muskel «übersetzt» wird^{1,2}. Jeder Steuervorgang – so hat sich aus unseren theoretischen Untersuchungen ergeben – durchläuft die Codesequenz: chemisch – elektrisch – mechanisch². In den Neuronen vollzieht sich ein intensiver Proteinumsatz, wie sich aus Arbeiten der Neurochemie und Neurophysiologie schließen läßt. Dieser Proteinumsatz entspricht zudem einer thermodynamischen Forderung, wie im folgenden ausgeführt wird. In den Neuronen würde somit – wenn die vorgelegte Theorie zutrifft – die Produktion der Steuerproteine für die Tätigkeit der Muskel stattfinden (St_{ad} = «adaptierte Steuerproteine» in Abb. 2).

Als Steuersystem bezeichnen wir die DNS und ihre nachgeordneten Strukturen, die RNS und die Proteine (Enzyme, Hormone und auch die sogenannten Strukturproteine). Diese Informationsträger fassen wir unter dem Oberbegriff Steuer- oder Codemoleküle zusammen. Das andere Steuersystem als *Reaktionspartner des Organismus* ist die Umwelt (siehe Abb.2). x_1 und x_2 in der Informa-

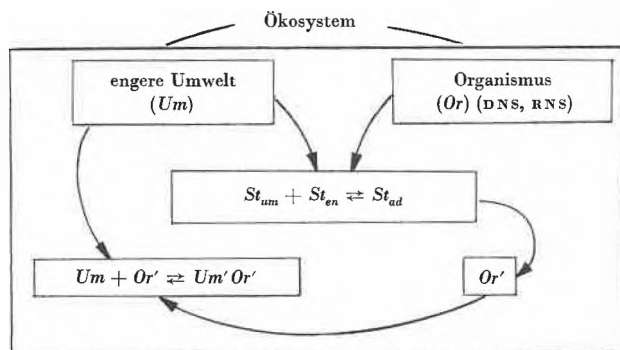


Abb. 2. Wechselwirkung zwischen zwei Steuersystemen ergibt als Reaktionsprodukt ein neues Steuersystem (bzw. einen neuen Organismus). St = Steuermoleküle: DNS, RNS, Proteine. St_{um} = Steuermoleküle durch die Umwelt induziert. St_{en} = endogene Steuermoleküle (Nukleotidsequenzen von der DNS stammend). St_{ad} = adaptierte Steuermoleküle. Um' und Or' veränderte Umwelt bzw. veränderter Organismus: bilden zusammen ein Assoziat

tionsgleichung $I_r = G_2/T - G_1/T = R \cdot \ln x_2/x_1$ ⁸ sind die Signaldichten vor bzw. nach der Adaptation. Dabei muß wegen der Gleichgewichtsbedingung (siehe später) $x_2 < x_1$ sein. Unser Vorgehen, nur von Steuersystemen (Abb.2) auszugehen, können wir auch damit begründen, daß beim Befruchtungsvorgang als Steuersysteme die beiden haploiden Chromosomensätze der Geschlechtspartner miteinander «reagieren». Dabei entsteht ein neues Steuersystem, die befruchtete Eizelle. Auch Virusinfektionen sind «Reaktionen» zwischen Steuersystemen. Man sieht übrigens auch, daß nur adäquate Strukturen so miteinander in Wechselwirkung treten können, daß eine weitere Prozeßsequenz ausgelöst wird⁹. Da nun die Dinge noch sehr im Fluß sind, machen wir noch keinen Unterschied zwischen Adaptations- und Lernprozessen, Gewöhnung und Suchterzeugung. Diese Phänomene dürften wahrscheinlich den gleichen Ursprung haben.

Zur Orientierung, welche Vorgänge bei einem Adaptationsprozeß zu unterscheiden sind und hier im Vordergrund der Diskussion stehen, möge die Abb.2 dienen. Die beiden Steuersysteme Organismus und Umwelt würden die Synthese der «adaptierten» Steuerproteine (St_{ad}) veranlassen. Daraus würde schließlich der «angepaßte» Organismus Or' hervorgehen. Er enthält nach dem Adaptationsvorgang das «chemische Steuerprogramm», welches den Organismus auf seine spezifische Umwelt richtig reagieren läßt. Der so in seinen Steuerproteinen veränderte Organismus bildet nämlich mit seiner unmittelbaren Umwelt ein «Organismus/ Umwelt-Assoziat» $Um' Or'$ mit einem Informationsinhalt $\Delta I_{as} = \Delta G_2/T = 0$. Die nun folgenden Ausführungen befassen sich in erster Linie mit den bemerkenswerten Eigenschaften dieses «Reaktionsproduktes», das ein Analogon zu den zwischenmolekularen Assoziaten auf der chemischen Ebene darstellt.

3. Der Mechanismus der Adaptations- und Lernprozesse: das Organismus/ Umwelt-Assoziat

Die Lern- und Adaptationsprozesse vollziehen sich nun in folgender Weise. Abb.3 zeigt die «Struktur» eines

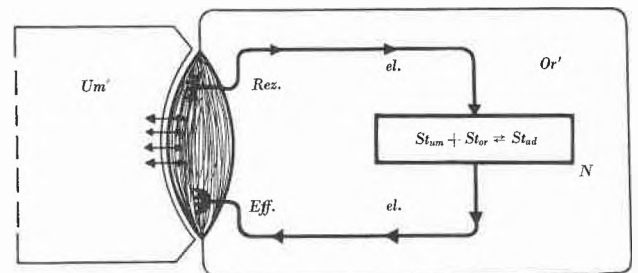


Abb. 3. Organismus/ Umwelt-Assoziat als «Reaktionsprodukt» eines Adaptations- oder Lernprozesses. Or' ist der um die adaptierten Steuermoleküle St_{ad} vermehrte Informationsinhalt des Organismus. $Rez.$ (Rezeptor, z.B. Muskelspindel), $Eff.$ (Effektor, z.B. motorische Endplatte/Muskel), Um' (adaptierte Umwelt), N (Nervenzelle, z.B. sensible und motorische Neuronen im Rückenmark)

«Quasireaktionsproduktes», hervorgegangen aus einem Adaptations- oder Lernprozeß (z. B. Gehen-, Schreiben-, Musizierenlernen oder sportliches Training usw.). Das Schema stellt dünn umrandet mit einem stilisierten Muskel an seiner Stirnseite den Organismus (Or') und die Umwelt (Um') dar. Das Steuersystem ist mit dicker Linienführung markiert. N , das Neuron, steht für das gesamte beteiligte Nervensystem. Die afferenten und efferenten Nervenleitungen verbinden das Muskelsystem mit den korrespondierenden Neuronen. Die vollzogene Adaptation ist symbolisiert durch die parallele Linienführung zwischen angepaßter Umwelt und dem adaptierten Organismus.

Unter Verwendung der chemischen Terminologie ergibt sich die Bildung des Assoziates, wie sie Abb. 2 zeigt. $Um'Or'$ ist die neuentstandene «quasichemische Verbindung». Wir nennen sie «Organismus/Umwelt-Assoziat» oder «Assoziationskomplex». Weder der Organismus noch die Umwelt dürfen hier gesondert betrachtet werden. Sie sind im Idealfall so aneinander angepaßt, daß man von einem «neuen Stoff» im chemischen Sinne sprechen kann. Für die Bildung des Assoziates gelte die bereits früher publizierte Informationsgleichung^{1,8} mit I_r als Reaktionsinformation $I_r = I_{as} - I_{or}$ bzw. $I_r = G_2/T - G_1/T = R \cdot \ln x_2/x_1$. $G_2/T = I_{as}$ sei der Informationsinhalt des Assoziates und $G_1/T = I_{or}$ derjenige des Organismus vor Beginn des Lernprozesses. x_2 sei die Signaldichte bei Beginn der Kannphase und x_1 diejenige bei Beginn des Lernens. Im Gleichgewicht muß $I_{as} = 0$ sein, d. h. $x_2 < x_1$. Es kommt das überraschende Resultat heraus, daß die Reaktion, in unserem Fall also die Adaptation, spontan ablaufen muß. Die Bildung des Assoziates ist also mit einer Zunahme von Entropie (= Abnahme der Information) verbunden. Es entsteht die scheinbar paradoxe Situation, daß das Umwelt/Organismus-Assoziat durch Informationsabgabe entsteht. Dieser scheinbare Widerspruch des Verschwindens von Information bei der Bildung des Assoziates und der Entstehung von Information in einem Teil des Assoziates (Organismus) findet seine Erklärung darin, daß wir selbst Bestandteil des Lernprozesses sind und uns daher subjektiv nur selbst empfinden und nicht als integrierten Bestandteil des Reaktionsproduktes, das als Organismus/Umwelt-Assoziat überhaupt nicht bewußt in Erscheinung tritt^{8,10}. Wenn unsere Informationsgleichung aussagt, die Information nimmt während der «Reaktion» ab, so heißt dies, das gebildete Assoziat liefert nach außen hin keine Information. Es ist ein in sich geschlossenes Gleichgewichtssystem (siehe die späteren Beispiele). Das Schema stellt im Prinzip auch den Mechanismus der Selbstorganisation dar (siehe Abschnitt 6).

Im Zusammenhang mit unserer Informationsgleichung müssen wir noch darauf hinweisen, daß bei unseren Diskussionen Information als inverse thermodynamische Zustandsfunktion zur Entropie $I_{\min} = S_{\max}$ in Erscheinung tritt. Wir werden in einem anderen Zusammenhang genauer darauf eingehen. Die vorliegenden Ausführun-

gen und die angeführten Beispiele zeigen auch unschwer den Zusammenhang zwischen Entropie und Information, insbesondere die Diskussion der Abb. 4 und der Beispiele (Abb. 5, 6 und 7).

4. Die Entropie des Organismus/Umwelt-Assoziates und ihre Eigenschaften

Die Abnahme der Information bedeutet, daß die Entropie des Systems bei der Bildung des Reaktionsproduktes zunimmt und im Gleichgewicht ein Maximum erreicht. Mit diesem Entropiezustand hat es eine besondere Bewandnis. Dies soll Abb. 4 zeigen. Nach unseren Ergebnissen scheint es nun, daß es zwei Arten von

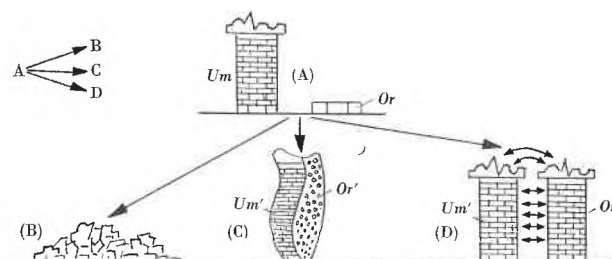


Abb. 4. Entropie und Information bei der Bildung des Organismus/Umwelt-Assoziates. Die Bildung der Organismus/Umwelt-Assoziates bei C und D gehen unter Abnahme von I_r vor sich [Abstand zwischen Or und Um in (A) verkleinert sich und ist bei C bzw. D null]. Dabei nehmen Entropie und Kommunikationsmöglichkeiten zu (Doppelpfeile bei D)

⁶ Wenn wir von anatomischen Strukturen sprechen, so ist dies nach unserer Auffassung das materielle Erscheinungsbild der potentiellen Information¹. Somit ist die Analyse der anatomischen Strukturen gleichbedeutend mit einer Analyse des Steuersystems.

⁷ Siehe die Lehrbücher der Nerven- und Muskelphysiologie und der Anatomie.

⁸ Die Informationsgleichung in der früheren Mitteilung¹ ist in diesem Sinne zu korrigieren (entsprechend den internationalen Vereinbarungen in der Thermodynamik). Ferner war uns in diesem Stadium unserer Untersuchungen¹ noch nicht so klar wie jetzt, daß es sich nicht einfach um eine «einseitige» Informationsaufnahme des Organismus aus der Umwelt handelt, sondern um eine «quasichemische Reaktion» zwischen Umwelt und Organismus. Wir waren genau der herkömmlichen Meinung entsprechend in der Vorstellung befangen, daß der Organismus die Hauptrolle spiele. Daß aber bei der Organismus/Umwelt-Wechselwirkung ein «Reaktionsprodukt» entsteht, bei dessen Bildung Information abgegeben wird, ist uns erst jetzt ganz klar geworden (siehe Abb. 4 und die Ausführungen im Abschnitt 3 «Der Mechanismus der Adaptations- und Lernprozesse: Das Organismus/Umwelt-Assoziat» und Fußnote¹⁰).

⁹ Diese spezifische Reaktionsweise biologischer Systeme läßt sich als weitere Stütze des früher vorgeschlagenen Mechanismus der Carcinogenese^{1,2} betrachten, wonach beliebige chemische oder physikalische Cancerogene *via* Nervenrezeptoren über die Bildung einer RNS und DNS mit der endogenen DNS «reagieren».

¹⁰ Daher beziehen sich die Untersuchungen anderer Autoren über die Umwelteinwirkung nur auf den Organismus als einzigen Reaktions-träger. Dieses subjektive Empfinden z. B. bei der Analyse von Lernprozessen dürfte der zweite Grund sein, weshalb Organismus und Umwelt als gleichwertige Reaktionspartner zur Erklärung von Umwelteinwirkungen nicht zum Zuge gekommen sind. Der erste Grund ist der, daß paradoxerweise bis anhin die Chemie mit ganz wenigen Ausnahmen innerhalb der multidisziplinären Kybernetik und Informationstheorie fehlte,

Entropiezuständen gibt. Normalerweise verstehen wir unter Vorgängen, welche unter Entropiezunahme vor sich gehen, solche, welche in der Tabelle 1 als Beispiele bei B aufgeführt sind. Diese Entropie – man könnte sie auch als «externe Entropie» bezeichnen – ist in Abb. 4 durch den Zustand bei B symbolisiert, z. B. wenn das Türmchen bei A im Laufe der Zeit verwittert oder wenn irgendein Konzentrationsausgleich stattgefunden hat. Der andere Entropiezustand, den wir «interne Entropie» nennen möchten, hat auch ein Maximum. Er schließt Endphasen von Vorgängen ein, welche durch die Zeichnungen in C und D angedeutet sind und wie sie unter dem Begriff «interne Entropie» in der Tabelle 1 stehen.

Tabelle 1. Phylogenetische und ontogenetische Adaptations- und Lernprozesse (Beispiele für interne Entropie und zum Vergleich solche für externe Entropie)

B	C und D
Prozesse unter Zunahme der «externen Entropie»	Prozesse unter Zunahme der «internen Entropie»
Wärmeabfluß;	Allgemeine Umweltadaptation;
Gasexpansion (ideales Gas);	Enzym/Substrat-Wechselwirkung;
Reibung;	Resistenzphänomene (z. B. Antibiotika);
Elektrolyse;	Gewöhnung (Arzneimittel usw.);
Korrosion;	Tarnstrukturen (z. B. Insekten);
Konzentrationsausgleich;	Berufsleute, Musiker, Sportler
Mischungsvorgänge;	usw. mit ihren Geräten;
Entmagnetisierung;	Gehen, Sprechen, Schreiben;
Allgemein: Abbauvorgänge	Nachahmung, Lernen, Triebursachen;
wie Verwitterung und	Dozent/Student; Psychiater/Patient;
Verwesung;	Differenzierungsphänomene;
abfließender Stausee;	Tiersozietäten, Verstärkung;
spielendes Orchester (im	Anähnlichungseffekte;
leeren Saal);	Modelle und Simulatoren;
Vorlesung ohne Hörer	usw.
usw.	

Zu Beginn des Lernprozesses bei A ist die Information $I_r = R \cdot \ln x_2/x_1$. Da $x_2 < x_1$, nimmt die Information durch Wachsen eines neuen Türmchens, z. B. bei D, immer mehr ab, oder anders gesagt, die Entropie nimmt fortwährend zu, bis sie bei D ihr Maximum erreicht, dann ist die Information ein Minimum bzw. $dI = 0$. Man kann sich leicht überzeugen, daß die Definition der Entropie sowohl aus der statistischen wie aus der chemischen Thermodynamik aufs beste mit dieser Art von Entropie in Einklang steht. Aus praktischen Gründen und weil sie doch auch besondere Eigenschaften hat, würden wir aber trotzdem zwischen einer «internen» und «externen» Entropie unterscheiden, obwohl je nach System nur graduelle Unterschiede bestehen¹¹. Die Vorstellung über die externe Entropie als Maß der Energiezerstreuung bzw. «-vergeudung», ist auf besondere Weise bei der internen Entropie realisiert. Die interne Entropie charakterisiert genauso einen Zustand der «Unordnung» auf das Gesamtsystem bezogen wie bei einem expandierten Gas. Die Gleichverteilung der Energie äußert sich bei der internen Entropie durch einen Zustand maximaler Kommunikation innerhalb der Mikrozustände. Es finden z. B. fortwährend lokale Potentialbildungen und -ausgleiche um die Gleichgewichtslage statt. Sie können mechani-

scher, elektrischer oder chemischer Natur sein. Die Mathematiker und Physikochemiker werden in diesen internen Gleichgewichtssystemen auf der biologischen und soziologischen Ebene ein ideales mathematisches Experimentierfeld vorfinden. Wir müssen uns hier auf rein qualitative Belege beschränken, wie sie die Experimente der Natur liefern; Belege, welche aber nicht weniger einleuchtend sind als etwa eine mathematische Beweisführung.

Es gibt nun verschiedene Typen von Organismus/Umwelt-Assoziaten, genauso wie es alle Übergänge von zwischenmolekularen Assoziaten auf der chemischen Ebene gibt. Organismus/Umwelt-Assoziat vom Typus C der Abb. 4 (stark veränderter Organismus und veränderte Umwelt) und vom Typus D (nur Teile des Steuersystems im Organismus verändert, d. h. der Umwelt angepaßt, z. B. sogenannte «geistige Vorgänge») sind in der Tabelle 1 angeführt. Zum Vergleich finden sich in der Tabelle unter B Vorgänge, welche unter Zunahme der externen Entropie verlaufen. In der Tabelle wird nicht zwischen phylogenetischen¹² und ontogenetischen Adaptationsprozessen unterschieden. Nach unserer Ansicht besteht kein prinzipieller Unterschied zwischen beiden Arten von Anpassungen und Lernvorgängen¹². Zu Adaptationsprozessen, welche zur Kategorie C gehören, würde man die großen biologischen Anpassungen im Tierreich zählen; Anpassungen an das Leben im Wasser, auf dem Lande und in der Luft. Hiezu würde man auch z. B. die Rückanpassung der Zahnwale an das Leben im Wasser rechnen (s. ¹⁴).

Zur Erläuterung der Prozesse bei D greifen wir das Umwelt/Organismus-Assoziat «Dozent-Student» heraus. Es sei bei (A) eine Gruppe von fortgeschrittenen Studenten, welche den «noch nicht angepaßten Organismus» (Or) darstellen. Die unmittelbare Umwelt (Um) der Studenten sei ein Vorlesungsstoff, der von einem jungen Dozenten gelesen wird. Im Laufe des Semesters und in einem parallel laufenden Kolloquium sei der Informationsinhalt der Studentengruppe durch Lernen dem des Dozenten angeglichen worden. Es ist das Organismus/Umwelt-Assoziat $Or'Um'$ entstanden (aus A wird D in Abb. 4). In bezug auf den Vorlesungsstoff sind nun die Informationsinhalte beider Partner identisch. Das Entropiemaximum bzw. Informationsminimum ist erreicht. Phänomenologisch ist dies leicht erkennbar. Zwischen dem jungen Dozenten und seinen gereiften Studenten besteht bezüglich des vermittelten Stoffes kein Unterschied des Informationsinhaltes. Ein Außenstehender würde ohne zusätzliche Information nicht erkennen können (abgesehen vielleicht vom Altersunterschied als zusätzlicher Information), wer Lehrender oder Lernender war. Bezüglich der internen Entropie gilt folgendes: Mit dem Eintreten in die Kennphase besteht nun bezüglich des dozierten Lehrstoffes maximale Kommunikationsmöglichkeit. Die ganze Gruppe einschließlich Dozent kann ungehindert diskutieren. Jeder versteht jeden. Dies ist von großer Tragweite für die Be-

griffe des «Verstehens», des «Verhaltens» oder mit andern Worten: die interne Entropie kennzeichnet den Zustand eines Systems, der in der Kybernetik und Kommunikationstheorie als semantische Dimension der Information bekannt ist.

Der Makrozustand der Gruppe ist ausgeglichen und uniform. Er hat während des Lernprozesses um sehr viele gleichartige Mikrozustände zugenommen, womit seine Wahrscheinlichkeit stark erhöht wurde. Obwohl alle Mikrozustände sonst sehr verschiedenartig sind (weibliche und männliche Studenten mit ganz verschiedenem Aussehen, Temperament, Wissen und von ganz verschiedener Herkunft, usw.), sind sie in bezug auf eine Eigenschaft vereinigt zu einem Makrozustand. Wesentlich ist, daß man erkennt, daß eine echte Entropiezunahme stattgefunden hat, nur ist das Entropiemaximum durch maximale Wechselwirkungen zwischen den Mikrozuständen gekennzeichnet, ähnlich wie in einem Gas. Man kann, adäquat zu einer «mittleren Geschwindigkeit» im expandierten Gas, von einem mittleren Informationsinhalt bei Studenten und Dozenten nach dem Lernprozeß sprechen. Im Vergleich zur «Ausdehnung und Größe» des Makrozustandes sind die Wechselwirkungen zwischen den in verschiedenen Mikrozuständen vorliegenden Teilchen des Systems nur kleine Verrückungen um die Gleichgewichtslage. Man sieht, daß die interne Entropie mit jener der chemischen und statistischen Thermodynamik identisch ist.

Was hier am Beispiel eines ontogenetischen Lernprozesses gezeigt wurde, würde auch für ähnlich verlaufende Prozesse in der Ontogenese und Phylogenese gelten. So wäre die Verstädterung ein phylogenetischer Adaptationsprozeß, wobei aus dem bisherigen Verlauf und der voraussichtlichen künftigen Entwicklung unschwer zu erkennen ist, daß die interne Entropie fortwährend zunimmt. Sie zeigt die gleichen Eigenschaften, wie sie im vorangegangenen Beispiel beschrieben wurden. Wegen dieser Entropiezunahme ist die Verstädterung ein freiwillig und spontan ablaufender Prozeß. So bilden auch die Tiersozietäten interne Gleichgewichtssysteme mit einem Maximum an interner Entropie. Dies macht auch ihre Existenzfähigkeit und Stabilität aus.

Neben solchen Polyassoziaten («Quasiflüssigkeiten») existieren einfache Organismus/Umwelt-Assoziat wie z. B. das Patient/Psychiater-Verhältnis, Mensch/Maschine-Systeme (Sportgeräte als Maschinen eingeschlossen), Mensch/Berufs-Assoziat usw. Ebenso zahlreich lassen sich solche internen Gleichgewichtssysteme auch auf biologischer und chemischer Ebene finden. So bildet jedes Tier mit seiner engeren Umwelt ein Assoziat (Abschnitt 5). Die große Bedeutung der internen Entropie liegt offenbar in der Beherrschung aller Lebensvorgänge schlechthin, denn die Zunahme der Entropie bewirkt, daß endergonische Prozesse freiwillig ablaufen. Dieser positive Entropieeffekt könnte auch die Ursache für die biologischen Urtriebe sein: Nahrungssuche, Lerntrieb, Sexualtrieb, Nachahmungstrieb usw. Wenn man an den

großen Energieaufwand am Anfang jedes Lernprozesses denkt, so ist offenbar gerade dieser Gegensatz zwischen Energieaufwand und Freiwilligkeit des Ablaufes das Kennzeichen der Eigengesetzlichkeit der Triebe. So liegt wahrscheinlich auch der Tendenz (Trieb) des Menschen zur Invariantenbildung das genannte Entropieprinzip zugrunde. Wenn für eine große Zahl von oft weit auseinanderliegenden Erscheinungen gemeinsame Gesetzmäßigkeiten (Makrozustand) gefunden werden, so erhöht sich die Wahrscheinlichkeit eines solchen Makrozustandes, was nichts anderes bedeutet, als daß die Entropie zunimmt.

Was nun die Experimente zu dieser hypothetischen Theorie angeht, so hat sie die Natur und das tägliche Leben in reichem Maße geliefert.

5. Anwendung des Prinzips der kleinsten Reaktionsinformation bzw. der maximalen Entropie auf Adaptations- und Lernprozesse

Wir machen, wie früher erwähnt, keinen prinzipiellen Unterschied zwischen ontogenetischen und phylogenetischen Adaptations- und Lernprozessen¹². Abb. 5 zeigt den Sargassum-Fisch (*Histrio pictus*). Er gleicht in Farbe und Form dem braunen Meerestang, seiner engsten Behausung, aus der er sich praktisch nie entfernt. Das Reaktionsprodukt bzw. Organismus / Umwelt-Assoziat ist die Kombination aus Tang und Fisch. Die daraus resultierenden Tarneigenschaften sind ein zufäl-

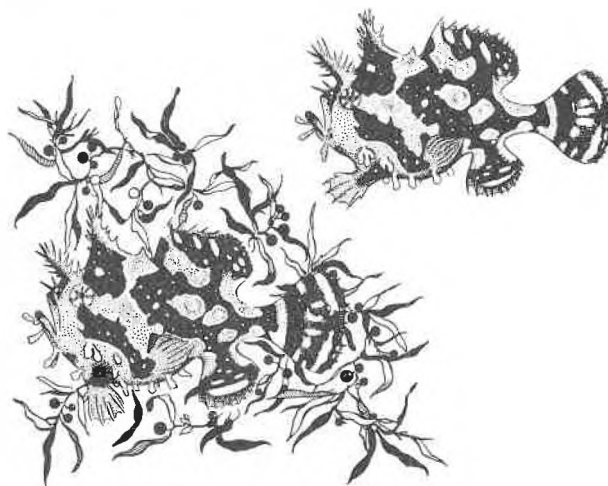


Abb. 5. Sargassum-Fisch (*Histrio pictus*), in den Algenbüschen der atlantischen Sargasso-See lebend (statische Lebensweise) (aus A. PORTMANN: *Tarnung im Tierreich*, Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1956). Fisch und Tang bilden ein Assoziat $\Delta I_{As} = 0$

¹¹ Der Unterschied zwischen externer und interner Entropie dürfte zur Hauptsache im Kopplungsgrad der Systemteilchen und den spezifischen Eigenschaften des Systems bestehen. So wäre z. B. eine Vorlesung ohne Hörer ein praktisch ungekoppeltes System (siehe Tabelle 1 unter B).

¹² Wir würden die Evolution als eine überlagerte Folge von ontogenetischen und phylogenetischen Lernprozessen ansehen. Für die ersteren wäre die RNS und für die letzteren die DNS verantwortlich.²

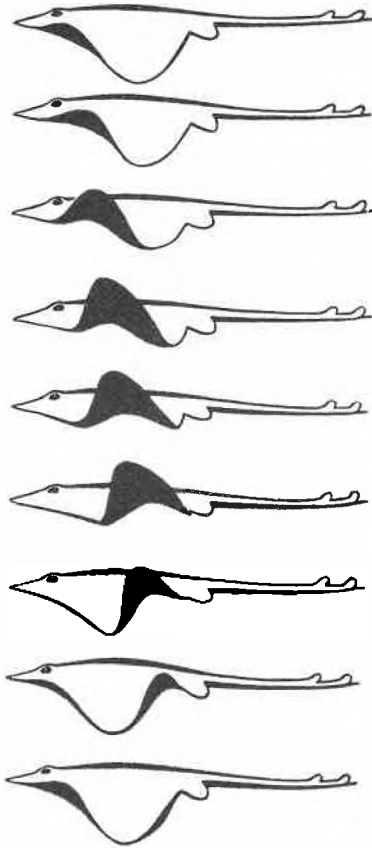


Abb. 6. Flossenbewegungen eines schwimmenden Rochens (dynamische Lebensweise) (aus: K. LORENZ, *Darwin hat doch recht*, Verlag Neske, Pfullingen 1965). Schwimmender Rochen und bewegtes Wasser bilden zusammen ein Assoziat $\Delta I_{as} = 0$

liger Nebeneffekt, der natürlich als Selektionsfaktor in der Evolution wirkt ($\Delta I_{as} = 0$). Außerhalb seines Wohnbezirkes ist er grell sichtbar ($I_r = R \cdot \ln x_2/x_1$). Eine sehr dynamische Lebensweise im Gegensatz zum Fisch im vorhergehenden Beispiel hat der Rochen in Abb. 6. Die Flossenbewegungen lassen die dynamischen Strukturen der Wasserwellen erkennen. Bewegtes Wasser und schwimmender Rochen zusammen bilden das Gleichgewichtsassoziat. Das Entropiemaximum ist gekennzeichnet durch eine Vielzahl verschiedenartiger Mikrozustände (Wassermoleküle bzw. Cluster und Strukturbestandteile des Rochens, vorwiegend die Flossen betreffend), welche bezüglich Geschwindigkeit und Bewegungsablauf der «Teilchen» zum Makrozustand vereinigt sind.

Das nächste Beispiel stellt eine rosafarbene malaisische Fangschrecke (Abb. 7) dar, welche auf einer rosa Orchidee lebt und darin praktisch unsichtbar ist. Obwohl beide rosa Farbstoffe sowie chemische Zusammensetzung und Mikromorphologie beider Informationspartner grundverschieden sind, vereinigen sie sich zu einem einheitlichen Makrozustand, der das Assoziat kennzeichnet. Dieser Adaptationsprozeß muß sich über viele Generationen vollzogen haben. Auf ihn kann man, wie auf alle Adaptationsprozesse, das Schema mit dem Türm-



Abb. 7. Auf einer roten Orchidee lebende rote Fangschrecke (*Hymenopus coronatus*, Malaya) (aus W. WICKLER, *Mimikry*, Kindlers Universitätsbibliothek, München 1968. Insekt und Orchidee bilden zusammen ein Assoziat $\Delta I_{as} = 0$

chen anwenden (Abb. 4). In dem Maße, wie sich immer mehr Steuermoleküle bilden (Enzyme und andere Strukturen, welche Gestalt und Farbe der Orchidee «nachahmen»), nimmt die Gesamtentropie zu und die Gesamtinformation I_{as} ab. Je mehr aber letztere abnimmt, um so mehr wächst das Türmchen (symbolisiert die Menge der Steuermoleküle), d. h. um so mehr nimmt die potentielle Information im Insekt zu. Eine andere Art solcher phylogenetischer Umwelt/Organismus-Gleichgewichte, d. h. ein an seiner spezifischen Umwelt adaptierter Organismus, ist in Abb. 8 dargestellt. Ein Molch bewegt sich in einer Futterspur. Beidseits der Spur herrscht Konzentrationsgefälle, was sich durch die Wahrnehmung von I_r anzeigt. Aber innerhalb der Spur herrscht auch noch eine Konzentrationszunahme des Stimulus entlang der Spur. Deshalb schwimmt der Molch so lange in ihr, bis er sein Futter verschlungen hat und der Verdauungsprozeß beginnt (Entropiemaximum, $\Delta I_{as} = 0$).

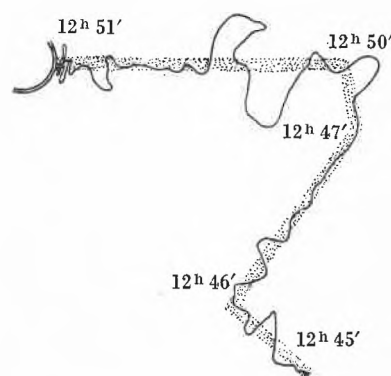


Abb. 8. Spur eines Molches (*Triturus*) auf einer experimentell gelegten Duftfährte eines Regenwurmes (aus *The Chemical Senses and Nutrition*, The John Hopkins Press, ed. by M. R. KARE and O. MALLER; nach K. HERTER, *Amphibia*, in *Handbuch der Zoologie*, Band VI, Verlag de Gruyter, Berlin 1941)

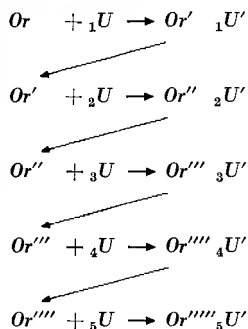
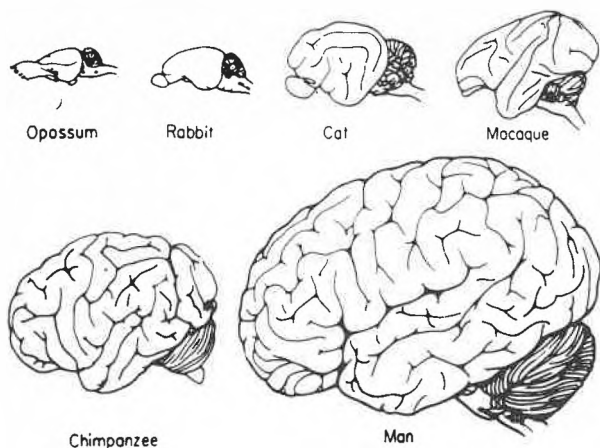


Abb. 10. Gehirnentwicklung der Säuger im Laufe der Evolution¹³ als Beispiel für die «Strukturmassezunahme» (potentielle Information) während der Evolution nach dem Prinzip der kleinsten Reaktionsinformation und der reversiblen Produktion der Steuer-moleküle

Weniger leicht sind Gleichgewichte der folgenden Art zu erkennen: Kunstturner z. B. stellen zusammen mit ihren Turn- und Trainingsgeräten und der übrigen Umwelt (Gravitation) Gleichgewichtssysteme (Organismus/Umwelt-Assoziat) dar. Dem großen Energieaufwand am Anfang des Lernens (Synthese der «Adaptationsstrukturen») steht beim Eintreten in das Gleichgewicht die Leichtigkeit der Bewegungen gegenüber, welche gekonnt und fließender «von der Hand» gehen ($\Delta G \rightarrow 0$). Ganz den gleichen Verlauf würde das Wechselspiel zwischen Aufwand und Effekt z. B. beim Musiker, etwa einem Geigenisten, nehmen. Hier ist die momentan beispiele Geige der Gleichgewichtspartner.

Auf die gleiche Weise lassen sich ganz allgemein Differenzierungsvorgänge als Adaptations- und Lernprozesse verstehen. Man lernt beispielsweise nach einiger Übung noch zwei Gewichte von 800 und 804 g unterscheiden. So mögen auch die erstaunlichen Leistungen von Bildfälschungs-, Antiquitätenexperten usw. zustande kommen, indem sich durch weitgehende Adaptation noch sehr feine Unterschiede herausdifferenzieren lassen.

6. Mangelerscheinungen, Selbstorganisation, Evolution

Ein letzter Anwendungsbereich der beiden Prinzipien Informationsminimum und reversible Produktion der

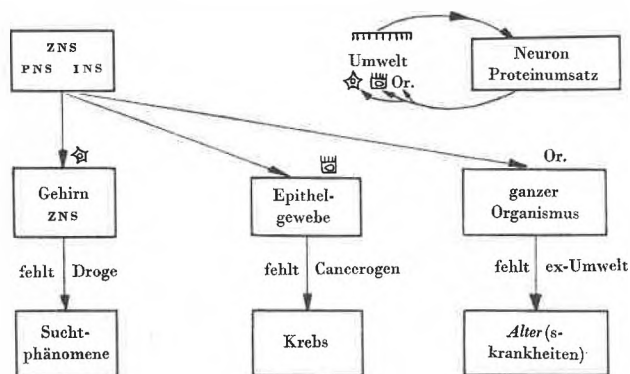


Abb. 9. Mangelerscheinungen wegen Fehlens des Gleichgewichtspartners. Für diese Interpretation sprechen viele Phänomene aus der Humanpathologie (ZNS = Zentralnervensystem, PNS = peripheres Nervensystem und INS = intramullares Nervensystem)

Steuer-moleküle betrifft die Dissoziation des Organismus/ Umwelt-Assoziates und ihre höchst bemerkenswerten Konsequenzen. Diese sind, um es kurz vorwegzunehmen: Hunger, Suchtphänomene, Alter, Krebs, Selbstorganisation und Evolution. Wenn ein Organismus/ Umwelt-Assoziat dissoziiert, entsteht der bemerkenswerte Zustand, daß das encodierte Steuerprogramm dabei nicht verschwindet, sondern es resultiert vorerst ein Organismus, welchem der Gleichgewichtspartner fehlt, und das kann, je nach dem Ort des Mangels, verheerende Folgen haben, indem schwere Mangelerscheinungen (Abb. 9) auftreten. Hunger, Sucht, Krebs, Alter sind solche Mangelerscheinungen, auf die aber hier nicht näher eingegangen werden kann. Auf jeden Fall entsteht durch Wegfall des angepaßten Umweltpartners (Wegnahme des rechten Türmchens in Abb. 4 bei C und D) im Organismus ein hoher Informationsinhalt. Tritt ein so beschaffener Organismus mit einer völlig neuen Umwelt in Kontakt, so kann sofort nach dem Informations-Entropieprinzip die Adaptation einsetzen. Dabei muß durchaus nicht das ursprüngliche Umweltprogramm verschwinden, namentlich dann nicht, wenn die Dissoziation nur temporär ist. Das ist dann der Fall, wenn es sich z. B. um das Erlernen neuer Fertigkeiten (neue Adaptation) handelt. Das neue Umwelt/Organismus-Assoziat enthält dann zwei Steuerprogramme, wobei es dann an zwei Umweltpartner angepaßt ist. Nun kann dieses Assoziat wieder, vorübergehend oder dauernd, dissoziieren, und es entsteht von neuem ein Organismus mit hohem Informationsinhalt, der sich nun erneut an eine neue Umwelt adaptiert, usw. (Abb. 10).

Die einzelnen Gehirne sind in der richtigen Relation zueinander gezeichnet. Sie sollen die echte Zunahme der Steuerstrukturen durch die Zunahme der Hirnmasse bzw. des Hirnvolumens widerspiegeln. Or bis Or'''''' stellen dann jeweils einen an eine neue Umwelt ${}_1U$ bis ${}_5U$ adaptierten Organismus dar, repräsentiert durch die Gehirnentwicklung der Säuger im Laufe der Evolution.

¹³ Diese Abbildung stammt aus einem Aufsatz von J.C. ECCLES, *Naturwiss.* 56 [1969] 525, über die Entwicklung des Kleinhirnes. Wir benützen sie, um die Zunahme der potentiellen Information «Strukturmasse» (Neuronen mit Steuerproteinen) des Steuersystems im Laufe der Evolution zu demonstrieren.

Da jede Dissoziation der Umwelt/Organismus-Komplexe den Aufwand von Bindungsenergie erfordert, wird es so sein, daß eine Umwelt die andere temporär oder permanent verdrängt. Es kann sich aber auch um die gleichzeitige Anpassung an mehrere Umweltsignalgruppen handeln. So scheint es möglich, über die Bildung von Organismus/Umwelt-Assoziaten, ihre anschließende Dissoziation, erneute Bildung von Adaptationskomplexen und so fort die *Selbstorganisation biologischer Strukturen* plausibel zu machen. Der spontane Ablauf und die Steuerung der Selbstorganisation würde durch das Informations-Entropieprinzip verursacht. Mutation und Selektion sind in diesen Mechanismus involviert, nur ist ihr Detailvorgang nicht so, wie man ihn sich seit DARWIN vorstellt. Es wird deshalb notwendig sein, die

heutigen Vorstellungen über den Mechanismus der Mutation^{12, 14} als verantwortlichen Faktor für den Strukturzuwachs während der Evolution einer strengeren Kritik zu unterziehen.

¹⁴ Nach Fertigstellung des Manuskriptes wurden wir auf das Buch von A. KOESTLER, *Der Fall des Biologen Paul Kammerer*, Molden, 1972 (Titel des englischen Originals: *The Case of the Midwife Toad*, 1971), aufmerksam gemacht. Es geht dabei um den experimentellen Nachweis der Vererbung erworbener Eigenschaften. In der deutschen Ausgabe heißt es auf S. 46 oben: «Es steht fest, daß die erwähnten Farbänderungen nicht durch den direkten chemischen oder photochemischen Einfluß der Umwelt auf die Haut der Tiere» (gemeint ist *Salamandra maculosa*, forma typica) «zustande kommen, sondern vielmehr über das Zentralnervensystem erfolgen, das auf die von den Augen des Tieres wahrgenommene Farbe reagiert.»