LEXIKON DER BIOLOGIE

HERDER
Freiburg · Basel · Wien

1983 – 1987

Entropie und ihre Rolle in der Biologie 1

Information und Instruktion 5

Regelung im Organismus 9

Jugendentwicklung: Tier – Mensch – Vergleich 13

Mensch und Menschenbild in biologischer Sicht 17

Freiheit und freier Wille 22

von
Bernhard Hassenstein

Entropie und ihre Rolle in der Biologie

Im Verlauf von chemischen Prozessen und beim Übergang von einem in einen anderen Aggregatzustand bestehen die Elementarvorgänge in Trennungen und Neubildungen von chemischen Bindungen. Dabei kann sich die Temperatur erhöhen (z. B. in der brennenden Flamme od. wenn sich konzentrierte Schwefelsäure in Wasser verteilt) od. erniedrigen (z. B. wenn sich Kochsalz-Kristalle in Wasser auflösen, Kältemischung). Solche Temperaturänderungen haben zwei Ursachen:

a) Durch das Entstehen von Bindungen kann Wärmeenergie freigesetzt, durch die Trennung von Bindungen Wärmeenergie absorbiert werden. Was sich hiermit ändert, bezeichnet man als (zunehmende bzw. abnehmende) *Enthalpie.*

b) Durch die Vermehrung oder Verminderung von Bindungen oder auf sonstige Weise können sich die Anzahl und die Bewegungsfreiheitsgrade der beweglichen Teilchen vermehren oder vermindern. Dies bezeichnet man als Zunahme bzw. Abnahme der *Entropie,* d. h. des molekularen „Verwandlungsinhalts" der Materie.

Was ist Entropie?

Was ist Enthalpie?

Wie groß diese beiden Anteile an einem zu beobachtenden Gesamtprozeß sind, läßt sich nicht direkt messen, sondern nur indirekt erschließen. Doch gibt es für eigengesetzlich, also ohne äußeren Zwang ablaufende Prozesse einzelne Beispiele, in denen sich keine molekularen Bindungen bilden oder lösen und an denen man daher *reine* Auswirkungen von *Entropie*änderungen beobachten kann: Befestigt man beispielsweise ein Gewicht an einem senkrecht gehaltenen (vulkanisierten) gespannten Gummiband und gibt dann das zuvor festgehaltene Gewicht frei, so hebt das Gummiband das Gewicht, abhängig von dessen Masse, um einen bestimmten

Betrag, leistet also Arbeit. Dabei wird das Gummiband meßbar *kälter!*
Die entscheidende Ursache für beides ist folgende: Im gedehnten Gummiband sind die selbst nicht dehnbaren Kettenmoleküle gestreckt und parallel ausgerichtet, haben aber die Tendenz, in den geknäuelten Zustand der Ruhelage zurückzukehren; in ihr können sie mehr und vielfältigere Wärmebewegungen vollführen. Auch eine von zwei Kindern gehaltene Wäscheleine zieht die Kinder *zueinander*, wenn sie in ihrer Mitte hin- und herbewegt und in dauernd wechselnde Schlingen gerafft wird. So erklärt sich die Tendenz zur *Verkürzung*. Dadurch, daß die Moleküle im geknäuelten Zustand mehr Bewegungsmöglichkeiten (Bewegungsfreiheitsgrade) haben, verteilt sich die vorhandene Bewegungsenergie auf mehr bewegliche Molekülteile. Damit nimmt die *durchschnittliche* Bewegungsenergie des *einzelnen* beweglichen Molekülteils ab, und dies äußert sich in der *Abnahme der Temperatur*. Daß die Verkürzung des Gummibandes tatsächlich durch die Wärmebewegungen in den Kettenmolekülen verursacht wird, zeigt sich daran, daß sich das Band bei *Erwärmung* noch weiter *zusammenzieht* – ganz im Gegensatz zu einem Metallstab, der sich bei Erwärmung *verlängert*. Für all diese Eigentümlichkeiten gilt beim entgegengesetzten Prozeß das Umgekehrte.
Entropievermehrung heißt hier also Leisten von Arbeit (= Produktion von freier Energie) und zugleich Erniedrigen der Temperatur. Anders ist das beim Entstehen von chemischen Bindungen: Hierdurch entsteht freie Energie *und* zugleich Wärme. *Freie Energie* ist Energie, die sich, entsprechende Vorrichtungen und Bedingungen vorausgesetzt, in mechanische (Muskelkontraktion), elektrische (Trockenbatterie) oder chemische Energie (ATP-Synthese) umsetzen läßt. Wenn chemische Prozesse, wie gewöhnlich, Entropieänderungen *und* Transformationen von chemischen Bindungen enthalten, faßt man die Beziehungen zwischen den Änderungen der freien Energie ΔG, der Enthalpie ΔH und der Entropie ΔS in der Formel (1) zusammen, wobei T die Temperatur ist. Die Vorzeichen in dieser Formel erklären sich daraus, daß man einer *Produktion*, d.h. *Abgabe* von freier Energie ΔG (weil sie für das System ein Energie*verlust* ist) und ebenso einer Wärme*produktion* ΔH das Vorzeichen *minus* verliehen hat; eine *Vergrößerung* der Entropie [$+ \Delta S$], die ja zur Energieproduktion *positiv* beisteuert (siehe das Gummibandbeispiel), war daher mit dem Vorzeichen *minus* anzuknüpfen.
Formel (1) gilt für isobar und isotherm verlaufende Vorgänge, d.h., etwaige Volumenänderungen führen zu keinen Druckänderungen (z.B. weil alles bei Atmosphärendruck und nicht im abgeschlossenen Raum abläuft), und alle Temperaturänderungen werden durch eine Thermoregulierung ausgeglichen (dies kann, falls sich das Reaktionsgemisch von sich aus abkühlt, eine Energiezufuhr von außen zur Folge haben).

Entropieveränderungen mitbestimmend für die Arbeitsfähigkeit.

Wie Formel (1) aussagt, sind etwaige Entropieänderungen im Verlauf eines chemischen Prozesses für die Arbeitsfähigkeit und unter Umständen auch für die Richtung, in der er abläuft, mitbestimmend. Wie schon angedeutet, gilt dabei: Entropie*vermehrung* liefert zusätzliche reaktions*fördernde* (freie) Energie, Entropieverminderung zehrt an ihr. Es wäre darum konsequent, nicht nur von ex- und endergonischen sowie exo- und endothermen Prozessen zu sprechen, sondern auch von *exoentropischen* (Entropievermehrung) und *endoentropischen* (Entropieverminderung). Dabei gilt für spontan verlaufende, also exergonische Prozesse ($\Delta G < 0$) folgendes: Sind sie exoentropisch ($\Delta S > 0$), so können sie je nach dem Vorzeichen und dem Betrag der Änderung der *Bindungs*energien endotherm sein (wie beim sich zusammenziehenden Gummiband und beim Sich-Lösen von Salz in Wasser; $|\Delta H| < T|\Delta S|$) oder exotherm (Brennen einer Kerzenflamme, ATP-Spaltung, Verdünnen von H_2SO_4 mit Wasser; $|\Delta H| > T|\Delta S|$). Exergonische Prozesse können jedoch nur dann endoentropisch, also mit einer Entropie*verminderung* verlaufen, wenn die Enthalpieänderung energetisch überwiegt und damit die Gesamtreaktion exotherm ist (Eisbildung in unterkühltem Wasser; $|\Delta H| > T|\Delta S|$); andernfalls wäre ΔG nicht negativ, und der Vorgang würde gar nicht spontan ablaufen.

Entropieabnahme und spontane Entstehung von Struktur und Ordnung.

Ein biologisch bedeutsames Beispiel für eine spontan vor sich gehende Entropie*abnahme* und zugleich ein Modellfall für die *spontane Entstehung von Struktur und Ordnung* ist die Bildung der räumlichen (Tertiär-)Struktur von Proteinen. Der *eindimensionale* Informationsträger m-RNA übersetzt seine Information in die *eindimensionale* Aminosäuresequenz der Polypeptidkette, die sich nach ihrer Bildung zunächst in wäßrigem Milieu befindet. Ein Teil der Aminosäurereste ist hydrophil, ein anderer aber hydrophob. Diesem gegenüber haben die umgebenden Wassermoleküle schwächere Bindungstendenzen als untereinander, so daß sie zueinanderstreben, woraufhin sich die Peptidkette aufknäuelt (vergleichbar mit der Abrundungstendenz von Fettaugen auf der Suppe).

Formel 1:
$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$

Dabei faltet sich aber die Peptidkette entsprechend den in den Seitenketten gemäß der genetischen Information verteilten Bindungsaffinitäten zu einer *ganz bestimmten,* vorgegebenen Form, ihrer typischen und für die Funktion erforderlichen Tertiärstruktur. Dabei verringert sich ihre Entropie (innere Beweglichkeit) analog zur Kristallbildung aus einer Schmelze. Biologisch kaum bedeutsam sind zwei physikalisch zwangsläufige begleitende Effekte dieser spontanen Strukturbildung: Es entsteht Wärme, und der Entropiegehalt der von ihren ursprünglichen Plätzen ausgewichenen H_2O-Moleküle erhöht sich.

Für die Richtung, Geschwindigkeit, Temperaturabhängigkeit u. Wärmeproduktion, aber auch für die Lage des Gleichgewichts bei chemischen und biochemischen Umsetzungen sind nach Formel (1) nicht allein die *Entropie*verhältnisse maßgebend, sondern sie wirken mit den *Enthalpie*verhältnissen (beim Entstehen und Sich-Trennen von chemischen Bindungen) zusammen. Die Entropie kann im Verlauf eines spontanen Prozesses, wie gesagt, nicht nur zunehmen, sondern auch abnehmen – letzteres, wenn die Entstehung der Bindungen mehr freie Energie produziert als durch die Entropieverringerung eingebüßt wird. Da die Entstehung neuer Bindungen wesensgleich ist mit der Vermehrung von Ordnung, heißt das zweierlei:

a) Wenngleich die Vermehrung der *Entropie* zur Verwischung von Ordnung und zur Zerstörung von Strukturen tendiert, so ist ihr die Tendenz von Atomen, sich zu verbinden, als ordnendes Prinzip entgegengerichtet.

b) Wie Gleichung (1) ausdrückt, vermehrt sich der energetische Einfluß der Entropie mit wachsender Temperatur; mit abnehmender Temperatur gewinnt dagegen die *spontane Tendenz zur Bildung von Strukturen und zur Ordnung* immer mehr Einfluß.

Einen Sonderfall im Rahmen chemischer Prozesse stellen *Fließgleichgewichte* dar. Ein Beispiel liefert die Kerzenflamme. Ist sie einmal entzündet, so läßt die erhöhte Temperatur das Wachs schmelzen, im Docht aufsteigen und schließlich verdampfen. Durch die Verbrennung entsteht Wärmeenergie, von der ein Teil durch die gleichzeitige Entropievermehrung aufgebraucht wird. Ein anderer Teil davon fließt als „Volumenarbeit" in die Ausdehnung der heißen Verbrennungsgase, so daß diese im Schwerefeld aufsteigen und Luft von unten und der Seite her in die Flamme hineinströmt. Im Luftraum eines Satelliten brennt keine Kerzenflamme, weil dort der die Gasbewegung richtende Einfluß der Schwerkraft fehlt. Auf die geschilderte Weise entsteht eine *bleibende* Gestalt, die Flamme, durch ein Fließgleichgewicht von Stoffbewegungen, Phasenumwandlungen, chemischen Vorgängen und Energieumsetzungen in einem Schwerefeld, wobei auch eine „Rückwirkung" in die Abfolge der Einzelschritte eingeführt ist, das Aufschmelzen des Wachses und dessen Verdampfung durch die Reaktionswärme. Da hierbei, insgesamt gesehen, freie Energie, darunter auch durch Entropiezunahme entstandene, zunächst strukturgebend auf die Flamme wirkt, dann aber in die Umgebung entweicht und sich dort verteilt, spricht man neuerdings von *dissipativen Strukturen.* Für Fließgleichgewichte und für die Entstehung und Erhaltung dissipativer Strukturen gilt das gleiche wie für sonstige chemische und physikalische Prozesse: Entscheidend ist nicht die Vermehrung der Entropie, sondern die Produktion von freier Energie, in deren Rahmen meistens eine Entropievermehrung mitwirkt, theoretisch aber auch eine Entropieverminderung stattfinden und durch entsprechend höhere Enthalpiewerte aufgewogen werden könnte.

Entropie kann bei spontanem Prozeß zunehmen, aber auch abnehmen.

Auch lebende Organismen sind in diesem Sinne dissipative Strukturen: Mit der Sonnenstrahlung (Pflanzen) bzw. mit der Nahrung (Tiere) nehmen sie potentielle freie Energie in sich auf – darin meist, wenn auch nicht notwendigerweise, Teilsysteme nicht maximalen Entropiegehalts. Die räumlich richtungsgebenden Bedingungen (bei der Flamme die Struktur der Kerze und die Schwerkraftrichtung) entstehen nach Mustern, wie sie an der Tertiärstrukturbildung der Proteine angedeutet wurden. Das Lebensgeschehen wird durch ein vielfältiges Fließgleichgewicht mit zahllosen Rückwirkungswegen aufrechterhalten. Im Tode und in dessen Konsequenz bricht dieses teils strukturelle, teils dynamische Gefüge zusammen, wodurch sich die Gesamtentropie der einstmals lebenden Substanz natürlich stark erhöht.

Im speziellen Sinne kann man das Anwachsen der Entropie als ein dem Leben zuwiderlaufendes Prinzip ansehen.

Die bis hierher besprochenen Vorgänge (vom sich kontrahierenden vorgespannten Gummiband über die Tertiärstrukturbildung von Peptidketten und die Kerzenflamme bis zum lebenden Organismus) spielten sich – physikochemisch gesehen – in *offenen Systemen* ab, d.h., der betrachtete Vorgang konnte Energie abgeben („loswerden"; z.B. Volumenänderung bei der Eisbildung) und Wärme produzieren oder absorbieren, ohne von diesen seinen Produkten rückwirkend beeinflußt zu werden. Die begleitenden Entropieänderungen in der Umgebung wurden nicht in Betracht gezogen. Schließt man dagegen

den Reaktionsraum (gedanklich oder – angenähert – physikalisch) gegen jeden Energie- oder Stoffaustausch mit seiner Außenwelt ab, betrachtet man also ein *geschlossenes System,* so gilt im Unterschied zum offenen System, in dem, wie eben beschrieben, die Entropie auch ohne äußeren Zwang, also spontan, abnehmen kann: Im geschlossenen System kann der Gesamtgehalt der Entropie stets nur – bis zu einem bestimmten Maximum – *zunehmen,* niemals abnehmen. Wenn sich also unterkühltes Wasser *in einem abgeschlossenen System* zu Eis verwandelt, so nimmt zwar im Eiskristall die Entropie ab (durch die Entstehung von Bindungen); die *Temperatur* aber steigt bis zum Gefrierpunkt an, und die darin steckende Entropiezunahme *übersteigt* den Entropieverlust durch die Eisbildung. Am Gefrierpunkt, d. h. bei einem bestimmten Mengenverhältnis von Wasser und Eis, erreicht die Entropie des geschlossenen Systems ihr Maximum. Dieses Verhältnis wird aufrechterhalten durch ein dynamisches Gleichgewicht: Am Gefrierpunkt (= Schmelzpunkt) werden pro Zeiteinheit im Durchschnitt ebensoviele Eiskristall-Bindungen an den Außenflächen des Eises durch die molekulare Wärmebewegung gesprengt, als sich neue Bindungen zwischen zuvor frei beweglichen Teilchen bilden. In einem derartigen geschlossenen System richtet sich das Mengenverhältnis zwischen Wasser und Eis nach der Menge der insgesamt im System enthaltenen Wärmeenergie.

Die Beispiele von der Eisbildung in unterkühltem Wasser und von der dynamischen Coexistenz von Wasser und Eis beim Gefrierpunkt in einem gedachten geschlossenen System lehren, daß der Vorgang der Maximierung der Entropie in einem geschlossenen System keineswegs ausschließt, daß sich dabei dasjenige entwikkelt und dynamisch aufrechterhält, was wir als maximale kristalline, also molekulare *Ordnung* anzusprechen gelernt haben. Die der Entropie vielfach ohne Einschränkung zugesprochene Tendenz zur Zerstörung von Strukturen und zum Verwischen von Ordnung kann sich nur bei freier Beweglichkeit der molekularen Teilchen auswirken; sie stößt dort auf eine unüberwindliche Grenze, wo bei der gegebenen Temperatur die Tendenz zur Bildung od. Erhaltung der molekularen Bindungen überwiegt.

Diese Überlegung gilt auch für den vieldiskutierten Gedankenversuch, in dem man den gesamten Kosmos als thermodynamisch abgeschlossenes System betrachtet: Der vollständige Ausgleich aller Temperaturunterschiede, d. h. die Maximierung der Entropie im „Wärmetod" des Weltalls, könnte zwar bei hoher Temperatur auf eine strukturlose homogene Mischung aller beweglichen Teilchen hinauslaufen: Je niedriger jedoch die Endtemperatur ist, die sich schließlich einstellt, desto mehr Materie würde die feste Phase, also die Gestalt geformter Festkörper – vielleicht hochgeordneter Kristalle –, einnehmen. Im Endzustand des Temperaturausgleichs könnten also – solange wir über die Endtemperatur noch nichts wissen –, durchaus die Ordnungskräfte über die Entropie siegen.

Der „Wärmetod" des Weltalls

Wo man in der Biologie Entropiewerte ausrechnet, geht es zumeist nur um deren Zunahme oder Abnahme im Verlauf einer Reaktion, also um Vergleichswerte (ΔS). Die Frage nach dem *absoluten* Entropiegehalt einer Menge von Materie wurde erst dadurch, und auch nur mittelbar, interessant, daß formale Beziehungen zum Begriff der *Information* hervortraten.

Beim Vergleich zwischen dem gedehnten und dem erschlafften Gummiband ging es um die relative Anzahl von Bewegungsmöglichkeiten von Molekülteilchen. Bei der Definition der Entropie ging man jedoch nicht den Weg einer Abzählung der elementaren *Bewegungsmöglichkeiten,* sondern man bezog sich auf die Anzahl der *unterscheidbaren molekularen Zustände* des betrachteten Gesamtsystems. Als absoluten Betrag des Entropiegehalts definierte man S dann nach Formel (2).

Formel 2:

$$S = k \cdot \ln W$$

Dabei ist k eine durch die jeweilige Temperatur dividierte kleine Energiemenge (Boltzmannsche Konstante genannt), und das Symbol W steht für die *Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten der Teilcheneigenschaften.* (Den Buchstaben W interpretiert man demgemäß am besten als Abkürzung von „*W*andlungsgehalt" oder „*W*echselmöglichkeiten" und ignoriert damit die ursprüngliche, aber irreführende Herleitung vom Wort „Wahrscheinlichkeit"; denn die Wahrscheinlichkeit entspricht niemals, außer im Sprachgebrauch der Thermodynamik, einer Anzahl von Möglichkeiten, sondern deren Relation zur Gesamtheit),

Lit.: *Eigen, M., Winkler-Oswatitsch, R.:* Das Spiel. München 1975. *Flamm, D.:* Der Entropiesatz und das Leben. Naturwiss. Rundschau *32,* 225–239, 1979. *Försterling, H.-D., Kuhn, H.:* Kautschukelastizität. In: Physikalische Chemie in Experimenten. Weinheim 1971. *Haken, H.:* Synergetik. Heidelberg ³1983. *Lehninger, A. L.:* Bioenergetik. Molekulare Grundlagen der biologischen Energieumwandlungen. Stuttgart/New York ³1982. *Netter, H.:* Theoretische Biochemie. Physikalisch-chemische Grundlagen der Lebensvorgänge. Berlin/Göttingen/Heidelberg 1959. *Weizsäcker, C. F. von:* Evolution und Entropiewachstum. In: *Scharf, J.-H.:* Informatik. Leipzig 1972.

Bernhard Hassenstein

Information und Instruktion

An einem DNA-Abschnitt innerhalb der lebenden Zelle ist zweierlei von Interesse: Zum einen seine molekulare Struktur aus den fünf Atomarten C, H, O, N und P, zum anderen seine funktionelle Bedeutung als genetische Basis für die Synthese von Substanzen, sei es – bei der Zellteilung – neue DNA nach dem gleichen Muster, seien es – auf dem Wege über Transkription und Translation – bestimmte Proteine. Diese letzteren besitzen eine ganz andere chemische Struktur als die DNA; trotzdem sind sie in ihrer Aminosäuresequenz und damit in ihrer Funktion durch die Nucleotidsequenz des zugehörigen DNA-Abschnitts bestimmt.

Seit dem Entstehen der Informationstheorie drückt man diesen Zusammenhang gern so aus: Die DNA enthält die *genetische Information* für die Struktur der Proteine und damit auch – vermöge der spezifischen Wirkungen der Proteine – für den Bau, die Lebenserscheinungen des Organismus und für die genetisch bedingten Anteile seiner Verhaltenssteuerung. Die genetische Information prägt in diesen Hinsichten den Phänotyp.

Genetische Information

Außer in der Biologie spricht man auch in vielen anderen Lebensbereichen von „Information", und zwar dann, wenn die Bedingungen für einen *Informationszusammenhang* erfüllt sind: Bestimmte Gegebenheiten (= der *Inhalt* der Information) werden durch Symbole, Zeichen oder Signale ausgedrückt; die dadurch zustande gekommene Meldung oder Nachricht wird von einem *Sender* an einen *Empfänger* (Adressaten) übertragen; für diesen sind daraufhin nicht nur die materiellen oder energetischen Gegebenheiten der empfangenen Meldungen oder Nachrichten bedeutsam, sondern vor allem dasjenige, was die Meldungen *bedeuten*, d.h., was sie auf der Senderseite repräsentieren, denn das ist die *Information*, die sie dem Empfänger übermitteln. War der Empfänger bereits im voraus informiert, so enthielten die Meldungen für ihn keine Information mehr. Zu einem „Informationszusammenhang" gehören danach folgende Funktionsglieder:

- der Inhalt der Information
- dessen Übersetzung in Symbole, Zeichen oder Signale
- deren Übertragung vom Sender zu einem noch nicht informierten Empfänger; und dort
- die Ermittlung des Inhalts der empfangenen Signale oder das dementsprechende Reagieren des Empfängers.

Information im Sinne von Informationszusammenhang

Ein solcher Informationszusammenhang läßt sich in der Reiz-Reaktionsbeziehung eines *Reflexes* erkennen, beispielsweise dem schnellen Sich-Zusammenziehen eines Regenwurms nach der plötzlichen Berührung durch den Schnabel einer Amsel: Die darauf ansprechenden Hautrezeptoren erzeugen neurale Aktionspotentiale und werden so zum „Übersetzer" vom Reiz in die physiologische Erregung und zum „Sender". Die Nervenimpulse erreichen auf Nervenbahnen („Übertragungsvorgang") die Längsmuskeln („Empfänger"), die sich kontrahieren, wodurch der Wurm als ganzes Tier biologisch *sinnvoll reagiert*.

Der einleitend skizzierte Informationszusammenhang zwischen der DNA und den phänotypischen Merkmalen enthält einen Funktionsschritt, der auf einen *quantitativen* Aspekt des Informationsbegriffs hinführt: Der genetische Code enthält 4 Symbolarten C, G, A und U. Dreierkombinationen (Tripletts) aus diesen determinieren jeweils die Addition eines Moleküls der 20 Arten von Aminosäuren an die entstehende Peptidkette. Wie eine elementare Kombinationsüberlegung zeigt, würden *Zweier*kombinationen (Dupletts) aus Vertretern der 4 Symbolarten nur $4^2 = 16$ unterscheidbare „Codeworte" zulassen; da-

gegen lassen sich daraus $4^3 = 64$ unterschiedliche *Tripletts* bilden. Für die 20 unterschiedlichen Aminosäuren würden also Dupletts nicht ausreichen, während Tripletts für mehr als das dreifache der 20 unterschiedlichen Aminosäuren hinreichend wären. Der DNA-Triplett-Code besitzt also die mehr als dreifache „Unterscheidungskapazität", als notwendig wäre, um den Einbau von 20 verfügbaren Aminosäuren zu determinieren. Als „Unterscheidungskapazität" versteht sich an dieser Stelle die *Möglichkeit, verschiedene Informationen auszudrücken.* Daher wird sie im folgenden, wie üblich, auch *Informationskapazität* genannt.

Unterscheidungskapazität – Informationskapazität

Als *Maßzahl* für die Informationskapazität I eines Ensembles von Symbolen (eines Codes) hat man nun nicht – wie es nach dem eben Gesagten denkbar gewesen wäre – die Anzahl W der verfügbaren unterschiedlichen Zeichen oder Zeichenkombinationen gewählt, sondern deren dualen Logarithmus (= Logarithmus zur Basis 2, geschrieben ld, zu errechnen aus dem Zehnerlogarithmus durch Multiplikation mit 3,32). Die Definition $I = \mathrm{ld}\ W$ war an sich willkürlich; aber sie bewährt sich: Die einfachste denkbare Entscheidung, nämlich diejenige zwischen *zwei* Alternativen, besitzt nach dieser Definition sinnvollerweise die „Informationskapazität" mit dem Zahlenwert 1 (weil $\mathrm{ld}\ 2 = 1$ ist; denn der duale Logarithmus einer Zahl ist ja derjenige Betrag, mit dem man 2 potenzieren muß, um die genannte Zahl als Ergebnis zu erhalten; und $2^1 = 2$). Dementsprechend heißt die Einheit der Informationskapazität 1 bit, abgekürzt aus *bi*nary dig*it* (binäre Ziffer, Entscheidung zwischen den *zwei* Alternativen 0 und 1).

Auch die höheren Zahlenwerte des dualen Logarithmus lassen sich anschaulich interpretieren: Eine bestimmte Anzahl W von Wahlmöglichkeiten vorausgesetzt, entspricht ld W der Anzahl der „Entweder-Oder-"Entscheidungsschritte und damit zugleich der Anzahl von *dualen Zeichen* (0; 1), um jede einzelne der Möglichkeiten W_1, $W_2 \ldots W_n$ mit einer nur ihr eigenen Zeichenkombination zu versehen.

Einführung der Wahrscheinlichkeit in das Informationskonzept

Ein wichtiger Gedankenschritt führt von der Anzahl der Möglichkeiten W und deren Logarithmus $I = \mathrm{ld}\ W$ (= Informations*kapazität* einer Zeichenmenge W) zum Informations*gehalt* eines *einzelnen* Zeichens I_x. Man verleiht diesem denselben Zahlenwert wie der Informationskapazität der gesamten Zeichenmenge und meint damit: Der Informations*gehalt* eines einzelnen Zeichens bemißt sich danach, aus einer *wie großen Menge von sonstigen Möglichkeiten* (= aus einer wie großen Informationskapazität) er *ausgewählt* ist. (Diese Formulierung wird sogleich durch Anwendung des Wahrscheinlichkeitsbegriffs noch verfeinert werden.)

Informationskapazität und Informationsgehalt

Ein Anwendungsbeispiel: Die Informations*kapazität* der DNA-Tripletts und damit der Informations*gehalt* jedes *einzelnen* DNA-Tripletts ist $\mathrm{ld}\ 64 = 6$ [bit] (weil Tripletts aus 4 Symbolarten $4^3 = 64$ Kombinationen zulassen). Gäbe es statt der 4 Elemente C, G, A und U nur deren zwei, so würden erst Codonen aus jeweils *sechs* Zeichen dieselbe Unterscheidungskapazität von 64 Kombinationen gewährleisten ($2^6 = 64$). Nun ist die Anzahl der von der DNA determinierten Aminosäuren nicht 64, sondern 20, die Informationskapazität dieser Vielfalt also $\mathrm{ld}\ 20 = 4{,}32$ [bit]. Beim Übergang vom DNA- bzw. RNA-Code auf die Aminosäurevielfalt bleiben also, formal gesehen, bei jeder Festlegung einer Aminosäure 1,68 bit je Triplett ungenutzt. (In dieser Berechnung sind unterschiedliche Häufigkeiten von Tripletts bzw. Aminosäuren unberücksichtigt geblieben.)

Vorausgesetzt, im Falle von W verfügbaren Zeichen kämen in einer Zeichenmenge die „Zeichenklassen" $a_1, a_2 \ldots a_x \ldots a_w$ gleich häufig vor, so wäre die Häufigkeit p_x des Auftretens einer bestimmten Zeichenklasse a_x gleich dem Kehrwert von W, also $p_x = 1/W$. Damit wird nach der ursprünglichen Formel $I = \mathrm{ld}\ W$ der Informations*gehalt* jedes einzelnen Zeichens aus der Klasse a_x gleich $I_x = \mathrm{ld}(1/p_x)$. Eine einfache (hier nicht durchgeführte) Überlegung ergibt: Diese Formel für I_x bleibt unverändert, auch wenn die *anderen* Zeichen nicht die gleichen Häufigkeiten und damit andere Informationsgehalte haben.

Damit ist der Begriff der *Wahrscheinlichkeit* in das Informationskonzept eingeführt, und zwar mit folgender Konsequenz: Mit *ab*nehmendem p_x nimmt I_x *zu* (logarithmisch)! Darum deckt sich der Begriff „Informationsgehalt" hier in seiner Bedeutung qualitativ mit dem umgangssprachlichen Ausdruck „Seltenheitswert".

Wenn innerhalb einer Gesamtmenge von n Zeichen die verschiedenen Zeichenklassen $a_1 \ldots a_x \ldots a_w$ *unterschiedlich häufig* vorkommen, stellt sich die Frage nach dem *durchschnittlichen* Informationsgehalt H des einzelnen Zeichens. Dieser Durchschnittswert stellt sich – auf den ersten Blick überraschenderweise – als eine Summe dar, nämlich

$$H = \sum_{x=1}^{w} p_x \cdot \mathrm{ld}\ \frac{1}{p_x}$$

In Wirklichkeit verbirgt sich hinter dieser Formel durchaus die Operation der Durchschnittsbildung „Summe aller Einzelwerte,

geteilt durch *n*"; nur ist die Division durch *n* bereits jedesmal in die Ausrechnung der relativen Beiträge der Zeichen*klassen* hineingezogen: Man multipliziert den Informationsbeitrag jedes Einzelzeichens (ld $1/p_x$) – anstatt mit seiner *Anzahl* A_x – mit $p_x = A_x/n$, also mit seiner Häufigkeit (Wahrscheinlichkeit). Dadurch wird jeder Summand durch *n* dividiert.

Bei näherer Betrachtung der Formel $I = \mathrm{ld} W$ und ihrer Verallgemeinerung für den Durchschnittswert *H* fällt auf: Nichts deutet in ihnen auf die eingangs zusammengestellten Bestandsstücke eines Informationszusammenhanges wie Inhalt, Sender, Übertragungsstrecke, Empfänger. In der Tat sind die Ausdrücke ld *W* und $\sum p_x$ ld $(1/p_x)$ rein statist. Natur und lassen sich daher nicht nur (wie soeben getan) auf Zeichenvorräte im Rahmen von Informationszusammenhängen, sondern auf beliebige Mengen aus unterschiedlichen Elementen anwenden. An die Stelle von „Informationskapazität" tritt dann der allgemeine Ausdruck „Diversität", d.h. Vielfältigkeit oder innere Vielfalt. Ein biologischer Anwendungsbereich hierfür ist die Vielfalt einer Biozönose hinsichtlich der Anzahl und Häufigkeit der dort vorkommenden Arten. (Den einstmals auch hier verwendeten Ausdruck „Informationsgehalt" hat man zu Recht wieder fallen gelassen.) Sucht man die Diversität einer bestimmten *Menge*, so muß man den für das *Element* berechneten Durchschnittswert *H* mit der Anzahl *n* der Elemente multiplizieren.

Diversität anstelle von Informationsgehalt

Ursprünglich hat C. E. Shannon den durchschnittlichen Informationsgehalt *H* auch als „Entropie" bezeichnet. Damit hat er einen Ausdruck der Thermodynamik angewendet, der sich auch dort auf eine Vielfalt *W*, nämlich die von physikalischen Mikrozuständen, bezieht:

$$S = k \cdot \log W.$$

In Worten: Die Entropie *S* entspricht dem Boltzmannschen temperaturbezogenen Energiebetrag *k*, multipliziert mit dem Logarithmus der Wandlungsmöglichkeiten zwischen den Teilchenkombinationen (↗Entropie). Den Ausdruck „Entropie" auch als Informationsmaß zu verwenden hat allerdings mehrere Nachteile:

1) Er entspricht ihm nicht hinsichtlich seines Betrages (Zehner- statt Zweierlogarithmus sowie Multiplikation mit der Boltzmann-Konstanten),

2) hinsichtlich seiner Dimension ([Energie dividiert durch Temperatur] anstatt dimensionslos) und

3) der Bedeutung des Ausdrucks „Wahrscheinlichkeit" (*Anzahl* der Kombinationsmöglichkeiten statt *Anteil* am Gesamten).

Begriff der Instruktion

Information und Entropie

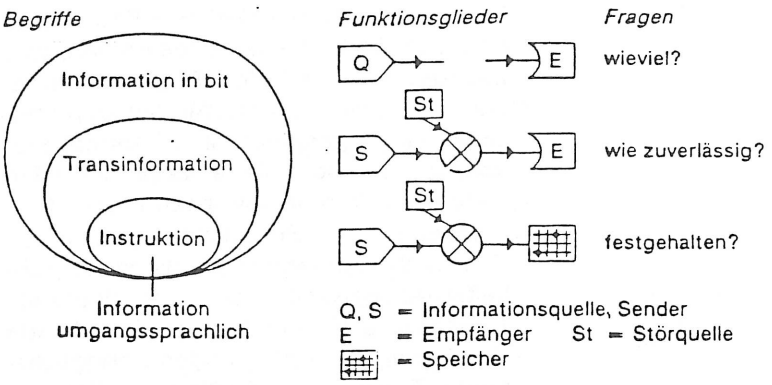
Begriff der Transinformation

Trotzdem ist die *physikalische* Entropie so sehr zum Leitbild dessen geworden, was man gedanklich mit dem Begriff „Information" verknüpft, daß man für das ursprüngliche, umgangssprachliche Informationskonzept, nämlich die einzelne inhaltlich festgelegte Information, nach neuen Ausdrücken suchte: So bezeichnete E. Schrödinger das aus einem Vorrat von Möglichkeiten Ausgewählte oder Festgelegte als *Negentropie* (in der Tat vermindert jede *Festlegung* die *Entropie* des übriggebliebenen Teilsystems), R. Riedl als *Determinationsgehalt*. Die Entropie (Informationskapazität) und die konkrete Information (im Sinne einer bestimmten Nachricht) stehen zueinander in einem ähnlichen Verhältnis wie das Fassungsvermögen eines leeren und der Inhalt eines gefüllten Gefäßes: Beides wird in Volumeneinheiten gemessen; das Fassungs*vermögen* gibt an, welche Mengen an konkreter Füllung *möglich* sind. Dementsprechend stehen Informationskapazität (Entropie) und konkrete Meldung zueinander im logischen Verhältnis von *potentieller* und *aktueller* (konkretisierter) Information. Bei bloßer Kenntnis der Kombinations*möglichkeiten* (Diversität) der Elemente bzw. Symbole ist das *Wissen* um die aktuelle, verwirklichte Kombination noch gleich Null; ist dieses Wissen jedoch gewonnen worden, so ist die Anzahl der *Möglichkeiten* auf 1 und damit die *Diversität* (Entropie) auf Null heruntergegangen (ld 1 = 0).

Für Informationszusammenhänge, wie sie in der Biologie bedeutsam sind, eignet sich unter bestimmten Voraussetzungen als Stellvertreter für den Begriff der aktuellen, konkreten Information der Begriff der *Instruktion* (M. Eigen): Man spricht von Instruktion, wenn Information von Sendern auf Empfänger übertragen und dann vom Empfangsort aus, wo sie gegebenenfalls auch gespeichert wird und „abrufbar" bleibt, weiter wirksam werden kann. Ein Beispiel hierfür wäre die „genetische Information für ein bestimmtes Merkmal", die man danach zur Unterscheidung von der in der DNA steckenden *Diversität* auch *genetische Instruktion* nennen könnte. Das Verhältnis zwischen den Begriffen „Information" und „Instruktion" wird in der Abbildung graphisch dargestellt. Eine vermittelnde Rolle spielt dort der Begriff der „Transinformation":

Als *Transinformation* T_{xy} in einem Informationszusammenhang bezeichnet man denjenigen Anteil der empfangenen Gesamtinformation *(y)*, der den abgesandten Signalen *(x) entspricht*. Er ist gleich der formalen Gesamtinformation I_x abzüglich eines mathematischen Ausdrucks für die

Varianten des Informationsbegriffs



Wahrscheinlichkeit der richtigen Übertragung (Rückschlußwahrscheinlichkeit $p_{\overleftarrow{xy}}$). Und zwar gilt (für *ein* Zeichen):

$$T_{xy} = I_x - \mathrm{Id}\,\frac{1}{p_{\overleftarrow{xy}}} = \mathrm{Id}\,\frac{1}{p_x} - \mathrm{Id}\,\frac{1}{p_{\overleftarrow{xy}}} = \mathrm{Id}\,\frac{p_{\overleftarrow{xy}}}{p_x}\ [\mathrm{bit}]$$

Im Begriff der Transinformation ist hiernach im Unterschied zum Begriff der Diversität ein Informationszusammenhang vorausgesetzt, in dem die Beziehung zwischen *individuellen* Symbolkombinationen am Sender und am Empfänger die entscheidende Rolle spielt. Dies entspricht weitgehend dem umgangssprachlichen Konzept der *Glaubwürdigkeit* einer übertragenen Information.

Welche Rolle spielt der Begriff der Information in der Biologie? Mit seiner Hilfe erfaßt man das Gleichbleibende bei der Übertragung steuernder Signale vom Sender zum Empfänger, z.B. beim Vorgang der Transkription und Translation (von der DNA zu den Proteinen) und allgemein im Zusammenhang zwischen lebenden Individuen und ihren Nachkommen: Was übertragen und vererbt wird, ist nichts Materielles – kein Atom eines Nachkommen braucht aus einem seiner Vorfahren zu stammen – und nichts Energetisches, obwohl auch Energie für den Fortpflanzungsvorgang unentbehrlich ist. „Gedanken der Schöpfung" nannte C.E. von Baer bildlich das immaterielle Prinzip, das die Übereinstimmung zwischen Vorfahren und Nachkommen über alle Stufen des dramatischen Gestaltwandels hinweg erhält, der beim Säugetier über das Ei von beispielsweise 1/10 mm Durchmesser führt, das v. Baer 1826 entdeckte. Heute heißt dieses immaterielle erhaltende Prinzip „Information" (im Sinne von „Instruktion").

Auch N. Wiener, der Begründer der Kybernetik, betonte dessen immaterielle Natur: „Information is information, not matter or energy". Allerdings bedarf Information, um sich auszuprägen und materielles Geschehen zu steuern, des *Trägers* in Form von Materie *oder* von Energie.

Weitere biologische Informationsträger außer der DNA, in deren *Namen* sich ihre steuernde Funktion ausdrückt, sind messenger-RNA, second messenger, Überträgerstoff („Transmitter"), Hormon (= Botenstoff) und Induktionsstoff.

Das Konzept der Information in der Biologie

Lit.: *Baer, C. E. v.:* Welche Auffassung der lebenden Natur ist die richtige? (1837). Neudruck u.a. in *Loerke, O.* und *Suhrkamp, P.* (Hg.): Deutscher Geist. Ein Lesebuch aus zwei Jahrhunderten. Berlin und Frankfurt 1959. *Flechtner, H.-J.:* Grundbegriffe der Kybernetik. Stuttgart 1969. *Hassenstein, B.:* Biologische Kybernetik – eine elementare Einführung. Heidelberg ^{5}1977. *Riedl, R.:* Die Strategie der Genesis. München 1976. *Shannon, C. E.* und *Weaver, W.:* The mathematical Theory of Communication. The University of Illinois Press 1949. *Weizsäcker, C. F. v.:* Evolution und Entropiewachstum. In: *Scharf, J.-H.* (Hg.): Informatik, Leipzig 1972. *Wiener, N.:* Kybernetik. Düsseldorf 1963.

Bernhard Hassenstein

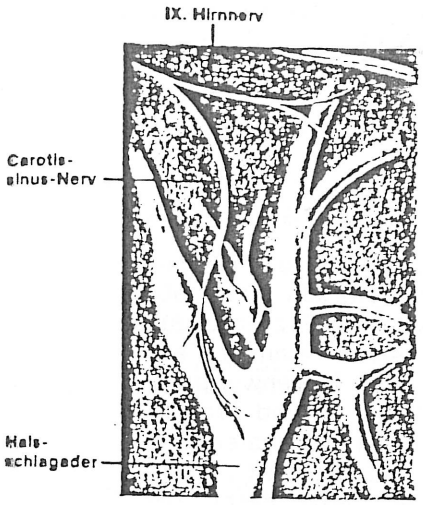
Injunktion *w* [v. lat. inlungere = anfügen, zufügen], sachbezogener (= deskriptiver) Begriff, der in seiner Form die Beschaffenheit seines Bezeichnungsfeldes repräsentiert („abbildet") u. daher (1) fließende Grenzen hat, falls die begriffsbestimmenden Merkmale gg. die Grenzen des Bezeichnungsfeldes kontinuierlich anstatt sprunghaft abnehmen, und (2) durch mehrere unabhängig voneinander variierende Merkmale bestimmt sein kann. Im Ggs. dazu wird für eine *Definition* gefordert, daß sie, wie der Name sagt, (1) *scharf* begrenzt und (2) durch *ein einziges* „definierendes Merkmal" bestimmt ist (vgl. Spaltentext).

Injunktion

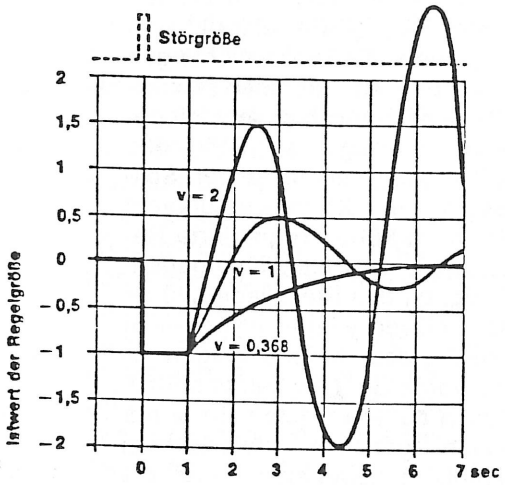
Zahlr. Begriffe der Biol. u. der übrigen Wiss. sind, genau genommen, I.en, z.B. Pflanze u. Tier, Individuum, gesund u. krank (bzw. physiologisch und pathologisch), stenök u. euryök, Haustier u. Wildtier, Art (Spezies), Leben, aber auch Oligopeptid/Polypeptid/Protein. Solche Begriffe „scharf definieren" zu wollen, kann zu willkürl., nicht durch die Sache begründeten u. in der Folge strittigen Begriffsbestimmungen führen, denen dann der wiss. Sprachgebrauch nicht folgt. Eher empfiehlt es sich, I.en als solche bestehen zu lassen u. anzuerkennen, daß sie sich in der überkommenen Form am besten zur Verständigung eignen. Verwandt sind die Begriffe der ↗Typologie u. des ↗Typus.

REGELUNG IM ORGANISMUS

Regelung, *selbsttätige R.*, Regulierung (↗Regulation) durch negative Rückkopplung (↗Feedback); Wirkungsprinzip in Organismen u. in der Technik, demzufolge etwaige Abweichungen v. einem gegebenen Zustand od. Funktionszustand selbsttätig – über einen gesonderten Funktionsweg – Wirkungen hervorrufen, die den Abweichungen entgegengesetzt sind u. sie im Idealfall kompensieren. Es handelt sich also um einen *Kreisprozeß* (Abweichung → gesonderter Funktionsweg → Wirkung gg. die Abweichung ...). Das zugrundeliegende funktionelle System, der *Regelkreis*, besteht im einfachsten Fall aus 3 Gliedern: 1) einem Registrier- od. Meßglied für die Regelabweichungen *(Fühler)*, das zugleich entsprechende Signale erzeugt, also ein „Transducer" ist; 2) einer *Signalübertragung* und 3) einem v. den ankommenden Signalen gesteuerten Wirkungsträger *(Stellglied)*, der Gegenwirkungen gg. die auslösenden Abweichungen ausüben kann. Der (Funktions-)Zustand, dessen jeweiliger Meßwert *(„Istwert")* vom Fühler registriert u. dann vom Stellglied beeinflußt wird, verdiente genau genommen den Namen „geregelte Größe", wird aber *Regelgröße* genannt. Außeneinflüsse auf die Regelgröße, die deren Abweichungen bewirken, heißen *Störgröße*. Falls das Stellglied die Regelgröße nicht unmittelbar, sondern über ein od. mehrere funktionelle Zwischenglieder beeinflußt, so bezeichnet man die Verbindung vom Ort der Stellgliedwirkung zum Meßort des Fühlers recht. unpräzise als *„Regelstrecke"*. Das Steuerkommando für das Stellglied heißt *Stellgröße*. Als *Sollwert* eines Regelkreises bezeichnet man sinngemäß denjenigen (Funktions-)Zustand, bei dem die Stellgliedtätigkeit ihr Ziel, etwaige Abweichungen zu kompensieren, erreicht hat. Das ist der Fall, wenn der Fühler keine Abweichung mehr registriert, formal also die Meldung „null" absendet. Beim Regelkreis ist also im einfachsten Fall der Sollwert ident. mit dem Nullwert der Meßskala des Fühlers. – Das ändert sich, sobald zu den 3 genannten Funktionsgliedern (Fühler, Signalübertragung, Stellglied) ein viertes dazutritt, ein *Sollwertgeber*. Er läßt Signale, *Führungsgröße* genannt, in die Signalübertragung zw. Fühler u. Stellglied einfließen (im einfachsten Fall additiv). Hierdurch wird (anstelle des Nullwerts der Fühler-Meßskala) die Führungsgröße zum Sollwert des Regelkreises. Um dies anschaulich zu erfassen, setze man in ein Regelschema theoretisch Zahlenwerte ein (z.B. Führungsgröße = 2) und ermittle durch Rechnung, wie sich das System daraufhin verhält. Der Funktionswert *„Regelabweichung"* entsteht jetzt durch die Verrechnung der Führungsgröße mit dem Istwert der Regelgröße, im einfachsten Fall durch Subtraktion. Man spricht auch von einem „Vergleichen von Istwert und Sollwert", meint damit aber nichts anderes als die Differenzbildung. – Die bis hierher beschriebene Art der R. trägt den Namen *Proportionalregelung* (P-Regelung), weil zeitlich variierende Regelabweichungen Stellgrößen hervorrufen, die ihnen proportional sind. Bei einer zeitlich gleichbleibenden positiven od. negativen Störgröße erreicht ein P-Regler niemals seinen Sollwert: Der Beginn der Störung verursacht zunächst eine vom Fühler registrierte Regelabweichung; hierauf folgt die entgegengerichtete Tätigkeit des Stellglieds. Würde daraufhin der Sollwert wieder voll erreicht werden, so müßte das zweierlei Folgen haben: Erstens würde die Tätigkeit des Stellglieds daraufhin aufhören (sie wird ja nur durch Abweichungen des Istwerts vom Sollwert veranlaßt); zweitens würde die weiter wirkende Störgröße nun natürl. eine erneute Abweichung hervorrufen. Das System käme also beim Erreichen seines Sollwerts gar nicht zur Ruhe. Ein Ruhezustand stellt sich jedoch bei einer bestimmten bleibenden Abweichung des Istwerts vom Sollwert ein, und zwar wenn die entspr. Stellgliedfunktion dem konstanten Störgrößeneinfluß gerade die Waage hält. Die Abweichung vom Sollwert, bei der dies geschieht, trägt den Namen *„Proportionalabweichung"* (weil sie ein Charakteristikum der „Proportional-R." ist). – Ein zum Proportionalregler hinzutretendes weiteres (in unserer Zählung fünftes) Funktionsglied verleiht der R. die Fähigkeit, auch bei anhaltender Störgröße den Sollwert zu erreichen: Dieses Funktionsglied transformiert das Signal „Regelabweichung" in das Kommando „Verstärken der Stellgliedtätigkeit in der Gegenrichtung zur Regelabweichung". Der Betrag der Regelabweichung bestimmt jetzt nicht mehr, wie beim P-

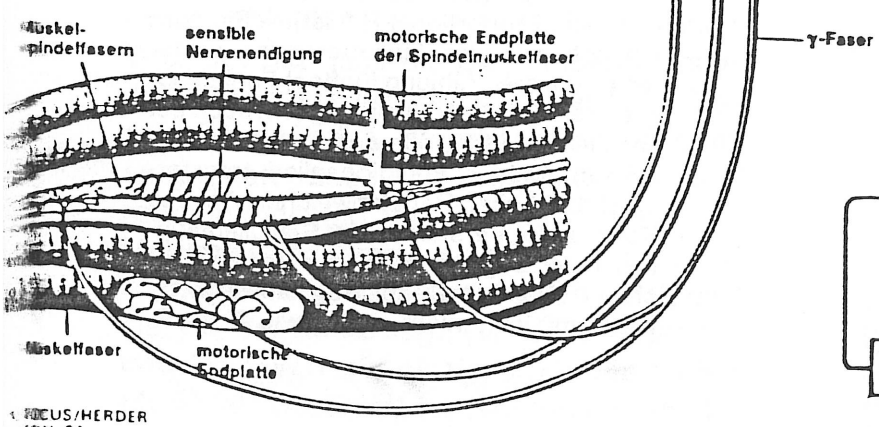


Blutdruckregelung. Der Blutdruck wird laufend durch Spannungsrezeptoren (Fühler), die in die Wand der Halsschlagader (Abb. oben) eingebettet sind, gemessen. Die Meldungen *(Istwert)* werden im Gehirn verrechnet. Dort entstehen Kommandos *(Stellgröße)*, welche die Spannung der Gefäßwandmuskeln *(Stellglied)* im ganzen Körper und damit den Blutdruck *(Regelgröße)* bestimmen.

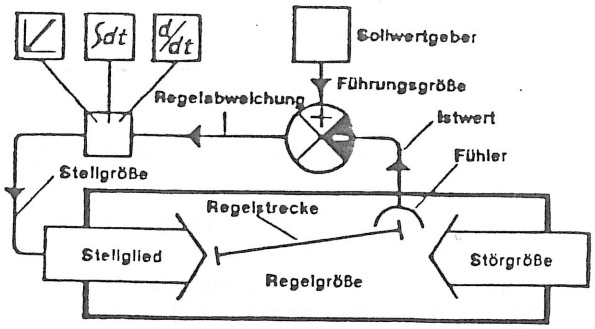


Das Diagramm demonstriert die Bedeutung der *Verstärkung* (v) für die *Stabilität* eines Regelkreises mit der Totzeit von 1 Sekunde. Zum Zeitpunkt 0 hat eine Störgröße die Regelgröße vom Sollwert 0 auf den Istwert −1 verstellt. Die Kurven zeigen für 3 verschiedene Verstärkungen, in welcher Zeit und mit welchem Verlauf die Regelgröße den Sollwert wieder (bzw. bei v = 2 nicht) erreicht.

Abb. unten gibt einen kleinen Ausschnitt aus einem Muskel wieder. Der Oberschenkelmuskel des Menschen enthält ca. 800–1000 Muskelspindeln. Die Länge einer Muskelspindel liegt in der Arbeitsmuskulatur des Menschen zwischen 1 und 3 mm. Die Muskelspindeln sind durch ihre bindegewebige Hülle (in der Abb. grau) fest mit den umgebenden Muskelfasern verbunden, so daß sie sich mit diesen passiv mitverkürzen und mitverlängern.

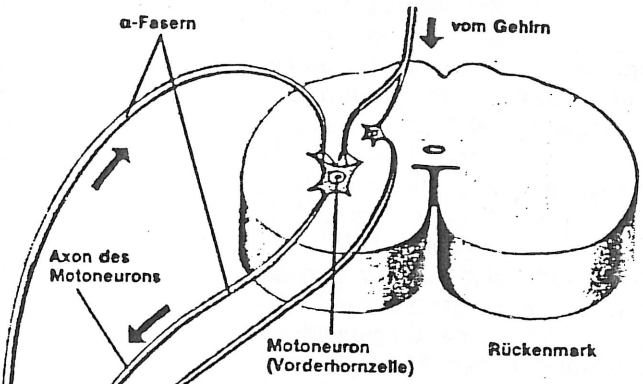


© FOCUS/HERDER
1984. 24



Funktionsschaltbild eines biologischen Regelkreises

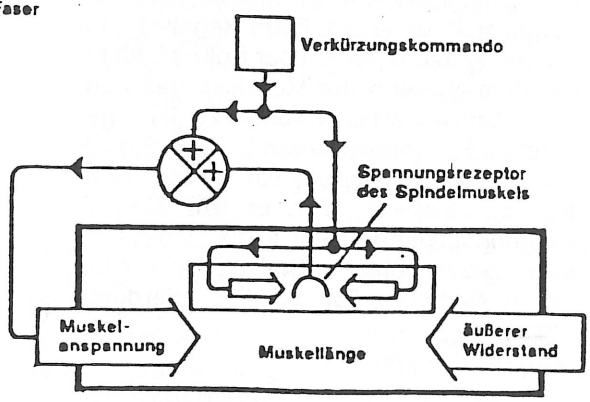
Das leer gehaltene Kästchen, das die Transformation von der Regelabweichung in die Stellgröße symbolisiert, kann durch die 3 darübergezeichneten Elemente (einzeln oder 2 bzw. 3 in Parallelschaltung) verwirklicht sein. Daraus resultieren dann *Proportional-*, *Integral-* oder *Differentialregelung* bzw. Kombinationen davon.



Der pflanzliche, tierische und menschliche Organismus weist eine Vielzahl von Regelsystemen auf, mit denen verschiedene physiologische Größen gemessen und auf bestimmte, für das Leben des Organismus günstige Werte eingestellt werden. Regelkreise bestimmen z. B. den Öffnungsgrad von Spaltöffnungen, den Blutdruck und die Muskelanspannung.

Muskelspindelregelkreis als Servomechanismus

Verkürzungskommandos für die Muskeln gelangen sowohl über α-Fasern zu den Muskelfasern als auch über die dünneren, langsamer leitenden γ-Fasern zu den in die Muskeln eingebetteten Muskelspindeln, wo sie die intrafusalen Muskelfasern zur Kontraktion veranlassen. Das untenstehende Funktionsschaltbild enthält alle signalübertragenden und -verarbeitenden Funktionsglieder der anatomischen Darstellung. Die für jeden Regelkreis erforderliche *Vorzeichenumkehr* im Feed-back-Kreis vollzieht sich hier nicht wie sonst durch Subtraktion des Istwerts von der Führungsgröße (wie im oberen allgemeinen Funktionsschaltbild), sondern dadurch, daß die *Zunahme* der Kontraktion (positive Betragsänderung) zu einer *Verkürzung* des Muskels (negative Längenänderung) führt, daß also zwischen *Stellgröße* und *Regelgröße* eine (im Funktionsschaltbild nicht symbolisierte) Vorzeichenumkehr erfolgt.



Regler, die Wirkungsstärke des Stellglieds, sondern wie schnell sich diese ändern soll. Daher wächst hier die Stellgliedtätigkeit so lange weiter an, wie überhaupt noch eine Regelabweichung gemeldet wird. Ist dadurch schließlich die Regelabweichung voll kompensiert, also gleich Null, so entspricht das dem Kommando: „Stellgliedtätigkeit nicht mehr ändern", d.h. sie weiterhin so stark weiterlaufen lassen, wie es gerade geschieht. Damit erreicht der Regelprozeß trotz anhaltender Störgröße tatsächl. seinen Sollwert und hält ihn ein. Ein Funktionsglied, das eingehende Signale als Änderungskommandos für ihren Signalausstrom verwendet, leistet – mathematisch gesehen – eine zeitl. Integration; darum heißt die in diesem Absatz beschriebene Form der R. *Integralregelung* (I-Regelung). – Außer reinen *P-* und *I-Reglern* gibt es auch Mischformen, bei denen sich das Stellkommando additiv aus proportionalen u. zeitlich integrierten Anteilen zusammensetzt *(PI-Regler)*. Schließlich kann auch der zeitliche Differentialquotient der Regelabweichung separat gewonnen und zusätzl. in das Stellkommando eingespeist werden („Differentialanteil", z.B. im *PD-Regler*). Dann reagiert der Regelkreis um so stärker, je schneller sich eine Regelabweichung ändert. – Regelkreise haben eine Systemeigenschaft, die man ihnen bei der bloßen Betrachtung ihrer Funktionsstruktur nicht ansieht: Falls die durch Regelabweichungen ausgelösten Gegenreaktionen über ihr Ziel, den Sollwert, zu weit hinausschießen, entstehen *Schwingungen* mit anwachsender Schwingungsweite, bis entweder das ganze System zerstört wird *(„Regelkatastrophe")* od. bis die Schwingungen durch Energiemangel begrenzt werden. *Instabil* wird ein Regelkreis beim Überschreiten einer Kennzahl, die sich aus seiner *inneren Verstärkung* (Verhältnis zw. Regelabweichung u. Stellgliedwirkung) u. seiner *Totzeit* (Zeitabstand zw. beginnender Regelabweichung u. beginnender Stellgliedfunktion) errechnet: Je größer die Verstärkung u. je länger die Totzeit, desto eher wird ein Regelkreis instabil. – Bei Reglern mit Sollwertgebern ist die Regelabweichung gleich der Differenz zw. Führungsgröße u. Fühlermeldung. Ändert sie sich häufig, so kann dies mehr auf variierende Störgrößen od. aber auch vornehmlich auf Variationen der Führungsgröße zurückgehen. Im ersten Fall korrigiert die R. im wesentl. die Folgen v. Störungen *(„Halteregler")*, im zweiten läßt sie vorwiegend die Regelgröße den Sollwertänderungen folgen *(„Folgeregler", „Servomechanismus")*. In der Struktur stimmen beide Reglerarten überein. Die unterschiedl. Benennung spiegelt nur wider, wozu sie überwiegend gebraucht werden. Folgeregelungen dienen vorwiegend der Einspeisung der notwend. Energie für die Änderung u. Durchführung v. Steuerprozessen *(Servolenkung)*. – Betrachtet man einen Regelkreis als Funktionssystem, so besteht er aus einer geschlossenen Kette v. Einzelfunktionen. Will man die Dynamik eines Regelsystems untersuchen, so öffnet man dazu, falls möglich, die geschlossene Kette *(„Aufschneiden des Regelkreises")*, v.a. indem man die Wirkung der Stellgröße auf die Regelgröße unterbricht (ein Beispiel s.u.). Man hat dann mathematisch einfachere, besser analysierbare Verhältnisse vor sich. In einem aufgeschnittenen Regelkreis spielt sich keine Regelung mehr ab, sondern nur noch ↗ *Steuerung*.

Die *biologische R.* ist nur eines der im Organismenreich verwirklichten Funktionsprinzipien, um Abweichungen v. einem Sollzustand durch Gegenwirkungen zu verringern od. zu kompensieren (andere Prinzipien der ↗ Homöostase sind mechan. Gleichgewichte, z.B. beim auf dem Wasser schwimmenden Schwan; Überlaufsysteme, z.B. zur Höchstbegrenzung des Blutzuckerspiegels; chem. Pufferung z.B. im Blut; „feed forward"-Systeme, z.B. bei der Pupillenreaktion mancher niederer Wirbeltiere). Augenfällige biologische R.en sind die Pupillenreaktion, die R. des Blutdrucks, der Körper-Temp., des Blutzuckerspiegels, des Blut-Sauerstoffgehalts, des pH-Wertes im Dünndarm u. der Nahrungsaufnahme sowie der Muskel-Eigenreflex. – Die ↗ *Pupillenreaktion* (□) – die Sehzellen wirken als Fühler, die Irismuskeln als Stellglied – kompensiert jeweils nur einen Teil der ein Auge treffenden Lichtflußänderungen (Störgrößen) u. erweist sich dadurch als P-Regler. Reizung des Auges mit sinusförmig variierendem Licht u. gleichzeitige Messung der Pupillenweite offenbaren einen zusätzlichen D-Anteil der R. Das

„Aufschneiden des Regelkreises" gelingt hier bes. einfach dadurch, daß man das Reizlicht eng bündelt u. nur durch das Zentrum der Pupille eintreten läßt; die Pupillenreaktion kann dann den Lichtfluß (= Regelgröße) nicht beeinflussen. – Die R. des ↗*Blutdrucks* ist dagegen sinnvollerweise ein I-Regler: Auch bei massivem Blutverlust (Störgröße) durch eine Wunde bleibt der Blutdruck so gut wie konstant (zuletzt im Bereich des Herzens u. Gehirns). Die Fühler sind Wandspannungs-Sinnesorgane im ↗Carotissinus der Halsschlagader, einer Ader-Ausbuchtung; Stellglied ist die Wandmuskulatur aller Blutgefäße. – Im Dienste der R. der ↗*Körpertemperatur* (↗Temperaturregulation) sind zwei ganz verschiedene Stellglieder tätig, eines für aktive Erwärmung (isometrische ↗Muskelkontraktionen, die sich im ↗Kältezittern äußern), eines für aktive Abkühlung (↗Schwitzen od. ↗Hecheln). ↗*Fieber* ist Ausdruck einer Änderung des Sollwerts. 38 °C Bluttemperatur veranlaßt einen Gesunden zum Kühlen durch Schwitzen, einen für 39 °C disponierten Fiebernden zu Schüttelfrost (= Extremform des Kältezitterns). Fiebersenkende Medikamente ändern den Sollwert des Regelkreises, ein kalter Wadenwickel ist regeltheoretisch eine Störgröße. – Bei der R. des ↗*Blutzucker-Spiegels* (B Hormone) findet sich eine Vernetzung mehrerer Regelkreise. Die Signalübertragung erfolgt nicht durch Nerven, sondern durch ↗Hormone, und zwar verschiedene für den Anstieg (u.a. ↗Glucagon) u. die Abnahme (u.a. ↗Insulin). – Bei der R. des ↗*pH-Werts* im ↗Dünndarm wird die Störgröße, die den Regelprozeß auslöst, im Unterschied zu den meisten anderen Beispielen regelmäßig vom Organismus selbst produziert: Saurer Speisebrei (↗Magensäure!) tritt durch den Magenpförtner in den Dünndarm ein. Dort befindl. ↗Chemorezeptoren („Fühler") registrieren dies als Regelabweichung vom schwach alkalischen Sollwert u. regen auf hormonellem Wege die Produktion alkalischen Darmsafts an; Stellglieder sind die Bauchspeicheldrüse (↗Pankreas) u. Drüsenzellen der Darmwand. – Bei der R. des *Blut-Sauerstoffgehalts* finden sich zwei Besonderheiten: Bei Atemnot (negative Regelabweichung) ist die Stellgliedfunktion ein *Verhalten* (Atmen); und die Regelgröße wird kaum *selbst* registriert, sondern eine im Normalfall funktionell mit ihr reziprok verkoppelte Größe, der CO_2-Gehalt des Blutes (↗Blutgase). Auf experimentell erzeugten O_2-Mangel ohne CO_2-Anstieg reagiert das Atemzentrum so gut wie gar nicht (↗Atmungsregulation, □). – Für die R. der ↗*Nahrungsaufnahme* ist die Regelgröße der Versorgungszustand der Gewebe mit Nährstoffen (↗Hunger). Stellgliedfunktion ist wiederum ein Verhalten, die Nahrungsaufnahme. Die Regelstrecke führt v. der Nahrungsaufnahme über die Magenfüllung, die Verdauung, die Resorption der Nährstoffe u. deren Verteilung auf dem Blutweg bis zur Aufnahme der Nährstoffe in die Zellen. All dies zus. dauert bei Pflanzen- u. Fleischfressern i.d.R. so lange, daß die Meldung über die erfolgte Kompensation der Regelabweichung zu spät käme, um – nach bereits hinreichender Nahrungsaufnahme – der Stellgliedtätigkeit das erforderl. Stoppsignal zu geben. Dies besorgt ein zusätzl. Signalweg am Beginn der Regelstrecke, der die ausreichende Nahrungsaufnahme (z.B. Hund) od. die Magenfüllung (z.B. Fliege *Calliphora*) registriert u. sie als „Vorwegmeldung" über die zu erwartende Kompensation des Defizits u. zugleich als Stoppsignal an die zentralnervöse Kommandoinstanz für die Nahrungsaufnahme überträgt. Der Haupt-Regelkreis ist also durch einen *„inneren Regelkreis"* ergänzt. – Der Reflexbogen (↗Reflex) des *Muskel-↗Eigenreflexes* kann als *Folgeregelkreis* wirken: Folgt einer Muskelanspannung nicht die Verkürzung, weil ein mechan. Hindernis entgegensteht, so entspr. die daraufhin erzeugte Muskelspindel-↗Afferenz (↗Muskelspindeln) im Prinzip der Differenz zw. der angestrebten u. der noch bestehenden Muskellänge (= Regelabweichung), damit aber auch (wiederum im Prinzip) der erforderlichen zusätzl. Muskelanspannung, um das mechan. Hindernis zu überwinden. In der Tat übernimmt die Muskelspindel-Afferenz nach ihrer Umschaltung im Rückenmark die entspr. Funktion, indem sie im absteigenden Schenkel des Reflexbogens als ↗Efferenz übertragen wird u. dann als Stellgröße zusätzl. Muskelkraftentfaltung auslöst.

Steuerung, quantitative Beeinflussung der Intensität od. Richtung v. Vorgängen. Beispiele aus der Biologie: Auslösen der Kontraktion (↗Muskelkontraktion) u. Bestimmen des Kontraktionszustands v. Muskeln (↗Muskelspindeln) durch die Frequenz der eintreffenden Nervenimpulse; S. physiologischer Vorgänge durch ↗Hormone (B); S. der Entwicklung (Ontogenie) der Lebewesen durch ihre ↗Gene. Das Ändern, mitunter auch das Aufrechterhalten v. Steuereinstellungen, erfordert den Aufwand v. Energie; doch liefert der steuernde Einfluß dem gesteuerten Vorgang i.d.R. keine Energie u. entnimmt ihm auch keine. Wirkungszusammenhänge der S. sind daher zur Energieübertragung unfähig, können aber ↗Signale (Information, ↗Information u. Instruktion) übertragen. Schließt sich eine Wirkungskette v. Steuervorgängen zu einem Kreisprozeß, so resultiert daraus je nach den Übertragungsfunktionen ein positiver Rückwirkungskreis od. ein stabiler od. instabiler Regelkreis

---

Jugendentwicklung: Tier-Mensch-Vergleich

Die Jugendentwicklung der Säugetiere – hier aufgefaßt als die Zeitspanne zwischen der Geburt und dem Erreichen der vollen Geschlechtsreife – beginnt in verschiedenen systematischen Gruppen mit sehr unterschiedlich angepaßten Jungentypen. Phylogenetisch am ursprünglichsten sind die *Nesthocker:* Wenn sie zur Welt kommen, sind sie noch nicht zur Fortbewegung fähig. Vor der Geburt schließen sich die Augenlider, um nach der Geburt die noch in der Entwicklung befindlichen Augen vor der Einwirkung der Luft zu schützen. Der äußere Gehörgang ist noch nicht durchgängig. In vielen Fällen fehlt jede Behaarung. Erst Tage oder Wochen nach der Geburt öffnen sich die Augen und die äußeren Gehörgänge, wächst das Fell und entwickelt sich die Fortbewegungsweise der Erwachsenen.

Nesthocker, kennzeichnend für *kleine* Säugetiere, die ihre Jungen in Erd- od. Baumhöhlen bzw. in Nestern (Eichhörnchen!) betreuen, unter den Raubtieren aber auch für die großen Formen (Löwe, Bär).

Traglinge, typisch für größere u. große Baumkletterer wie Opossum, Koala, Faultiere u. viele Primaten bis zu den Menschenaffen..

Das andere Extrem bilden bei den Säugern (wie bei den Vögeln) die *Nestflüchter:* Wenige Minuten bis zu einer Stunde nach der Geburt können die Jungen bereits auf den eigenen Beinen stehen, und bald laufen sie der Mutter hinterher, beispielsweise, wenn diese vor einem Raubfeind flüchtet. (Bei manchen Robben allerdings schwimmt das Junge voran, und die Mutter folgt.) Neugeborene Nestflüchterjunge haben bereits offene Augen und Ohren sowie die gleiche oder beinahe die gleiche Behaarung wie die Erwachsenen. Im Uterus schließen sich bei den Nestflüchterjungen vorübergehend die Augenlider und wiederholen damit einen Entwicklungsvorgang der Nesthocker, ohne daß dieser wie dort einer physiologischen Schutzfunktion dient. Hierdurch wird deutlich: Der Übergang vom Nesthocker zum Nestflüchter geschah im Rahmen der Gesamtentwicklung durch das *Späterlegen des Geburtstermins.*

Nestflüchter, kennzeichnend vor allem für *große,* auf die Fortbewegung des *Laufens* spezialisierte Säugetiere, für die das Finden od. Herstellen genügend großer Höhlen für die Jungenaufzucht problematisch wäre.

Eine dritte, eigenständige Anpassungsrichtung repräsentieren die *Traglinge:* Säugetierjunge, die sich vom Mutter- oder auch Vatertier *tragen* lassen, entweder im Beutel (*passive* Traglinge, z.B. Beuteltiere) oder, indem sie sich aktiv am Elterntier festhalten (*aktive* Traglinge). Ihr allgemeiner Entwicklungsstand bei der Geburt entspricht dem der Nestflüchter, z.B. hinsichtlich der Augen, Ohren und Behaarung; ihr Beinskelett ist jedoch so beschaffen, daß die Hände und die Füße, anders als bei Lauftieren, in der Normalhaltung *mit der Innenseite einander zugekehrt* sind, so daß sie ins Fell des tragenden Elterntieres greifen können.

Auch der menschliche neugeborene Säugling ist biologisch auf das Getragenwerden durch die Mutter angelegt. Das *aktive* Sich-Festhalten ist jedoch nur in Spuren – im Greifreflex der Hände – entwickelt. Wegen des Aufrichtens der Körperachse und der aufkommenden Haarlosigkeit des Menschen hatte sich im Verlauf der Menschwerdung auch die Beziehung des Säuglings zur Mutter beim Getragenwerden ändern müssen, wobei während der längsten Phase (im „Tier-Mensch-Übergangsfeld") die *unbekleidete* Mutter vorauszu-

setzen ist. Die Form des Beckens und die Hüftgelenke des Säuglings legen eine Beugehaltung und ungefähr eine 45°-Spreizung der Oberschenkel fest. Diese ohne Muskelanspannung eingehaltene Stellung sowie der große Winkel zwischen Schaft und Hals des Oberschenkels und die auffällige Kurvatur der Unterschenkel („O-Beine") passen – als Anpassungen – zu keiner anderen Position des Säuglings als dem *Reitsitz auf der Hüfte der Mutter.* Dieser ist daher nach heutigen Kenntnissen als die natürliche Traglings-Haltung des menschlichen Säuglings aufzufassen. Dabei preßt der Säugling die Beine an den Körper der Tragenden und braucht nur im Rücken gestützt zu werden.

Die Streckung des Hüftgelenks

Hatten sich die beschriebenen Anpassungen an das Dasein des passiven Traglings im Verlauf der Fetalzeit ausgebildet und sind sie schließlich bei der Geburt voll entwickelt, so werden sie doch im ersten Lebensjahr allmählich wieder rückgängig gemacht, und zwar zugunsten der Verwirklichung der eigentlich menschlichen Fortbewegungsweise auf zwei Beinen. Erst 12 bis 15 Monate nach der Geburt ist das erreicht. Eine so lange Dauer ist im Vergleich zu allen Säugetieren einzigartig. Als „Steppenläufer" wäre der Mensch an sich dazu disponiert, wie die Huftiere sogleich *lauf*fähige Kinder, also *Nestflüchter,* zu gebären; dies aber würde bei der gegebenen Entwicklungsgeschwindigkeit des Fetus eine Schwangerschaftsdauer von über 20 Monaten erfordern. Statt dessen wird der *phylogenetische* Weg vom Traglingsjungen der Baumkletterer zum „Laufkind" des Menschen *ontogenetisch außerhalb* des Uterus durchschritten (im „extrauterinen Früh-Jahr" nach Portmann).

„Sozialer Uterus" und „physiologische Frühgeburt"

Im Unterschied zur Streckung des Hüftgelenks entwickelt sich eine andere Errungenschaft der Menschwerdung, die Verdreifachung des Volumens des Neuhirns, bereits *vor* der Geburt. Das gibt dem Kopf des Fetus eine größere Querschnittsfläche als dem Rumpf und macht den Schädel für die Geburt zum Maß für die notwendige Ausweitung der Geburtswege. Zugleich prägt das Voreilen der Gehirnentwicklung indirekt auch die Physiognomie des Gesichts des Säuglings: hohe Stirn im Vergleich zum Untergesicht sowie weit auseinandergerückte Augen. Diese Merkmale wurden zu Anteilen des „Kindchenschemas". Da sich das Untergesicht („Schnauzenteil" des Gesichts) beim Schimpansen wie bei allen Primaten erst *nach* der Geburt positiv allometrisch entwickelt, ähnelt das Gesicht des *erwachsenen* Menschen weniger dem Gesicht des erwachsenen Schimpansen als dem des Schimpansen-*kindes.* Dies hat – neben zahlreichen anderen Ähnlichkeiten zwischen adulten Menschen und früheren Entwicklungsstadien der Menschenaffen – die nicht endgültig abgeklärte Vermutung aufkommen lassen, im Verlauf der Menschwerdung habe der phylogenetische Mechanismus der *Neotenie* eine Rolle gespielt.

Die Volumenvergrößerung des Neuhirns

Die allgemeine motorische Unterentwicklung und damit Hilfsbedürftigkeit des in der Menschwerdung zum passiven Tragling gewordenen Säuglings hat die Formulierung angeregt, er benötige zur Entwicklung im ersten Lebensjahr einen bergenden „sozialen Uterus". Im Vergleich zu allen Säugetierjungen, die mit offenen Augen und Ohren zur Welt kommen (Nestflüchter und aktive Traglinge), erweckt er ferner den Eindruck, auch nach der normalen (= „physiologischen") Schwangerschaftsdauer noch „zu früh" geboren zu werden („physiologische Frühgeburt"). In seiner Unfähigkeit zur Fortbewegung ähnelt er einem Nesthocker. Diesen Charakter des „sekundären Nesthockers" (nach Portmann) verleiht der Mensch dem Säugling allerdings zusätzlich vor allem dadurch, daß er ihm – wohl besonders seit dem Einsetzen der Seßhaftigkeit und dem Beginn der Stadtentwicklung – seinen Dauerplatz statt an der Mutter zunehmend getrennt von ihr in *liegender Haltung* anweist. Dadurch wird der Säugling, von Natur aus ein passiver Tragling, zum „zivilisationsbedingten Nesthocker".

An diese phylogenetisch so junge Lebensform sind die *sozialen Verhaltensbedürfnisse* des neugeborenen Säuglings allerdings nicht angepaßt (*noch* nicht?). Sie sind weiterhin die des passiven Traglings und lassen sich aus der Lebenssituation des „abgelegten" Säuglings, auch wenn es diesem, wie im Normalfall, weder an Nahrung noch an Schutz und Ruhe, weder an Wärme noch an Hygiene fehlt, weder herleiten noch verstehen:

– Das Getrenntsein von der Mutter beantwortet der Säugling, falls er nicht schläft, häufig mit dem biologischen „sozialen Alarmruf" des Verlassenseins (Schreien); beruhigend wirkt Körperkontakt.

– Beruhigend auf den Säugling wirken auch das Bewegtwerden (z.B. mittels der Wiege) und der Lippenkontakt mit dem Schnuller oder Flaschensauger. Beides entspricht für den Säugling biologischen „Anwesenheitssignalen" der Mutter; der Schnuller ist, ethologisch gesehen, eine Attrappe der Brustwarze.

Ein weiteres Bedürfnis des Säuglings entspricht einer biologischen Notwendigkeit nicht nur speziell des Traglings, sondern – allgemein – aller im Familienverband auf-

wachsenden, aber individuell fortbewegungsfähigen Tierjungen: das Bedürfnis nach individueller Bindung. Auch bei der Erfüllung aller oben genannten körperlichen Lebensbedürfnisse ist zur ungestörten Verhaltensentwicklung des Säuglings – spätestens mit dem 2. oder 3. Lebensmonat beginnend – die Bindung an Mutter und Vater, zumindest aber an *eine konstante zuverlässige Bezugsperson* unerläßlich, die der Säugling am Verhalten, an der Stimme und an ihren Gesichtszügen wiedererkennen kann. Fremde Personen rufen Angst hervor. Dies gilt unabhängig vom leiblichen Verwandtschaftsgrad; darum ist Vaterschafts-Erkennung aufgrund von Reaktionen eines Säuglings oder älteren Kindes völlig unmöglich. Ein Aufwachsen ganz ohne bleibende Bezugsperson hat fast unausweichlich schwerste Retardierungen und Verhaltensstörungen zur Folge (Deprivationssyndrom).

Die Unerläßlichkeit einer Bezugsperson

Je lernfähiger Säugetiere sind, desto deutlicher prägt sich in der Entwicklung ihrer Jungen eine Lebensphase aus – kurz „Spielalter" genannt –, die durch die Verhaltensweisen des Erkundens, Spielens und spielerischen Nachahmens gekennzeichnet ist: Im Schutz des Familienverbandes, also noch ohne die Gefährdungen des späteren Ernstfalles, werden aktiv Erfahrungen gesammelt, reifende motorische Fähigkeiten (z.B. Beutefang, Flucht, auch Anteile des Sexualverhaltens) durch häufiges Ausüben und Variieren vervollkommnet und erlernte Verhaltensweisen, auch Sozialverhalten, älterer Artgenossen durch Nachahmung erworben.

Dieses Programm der *angeborenen Strategien des Erfahrungserwerbs* ist im vollen Umfang auch beim Kleinkind verwirklicht. Besonders augenfällig unter dessen zahlreichen Teilmechanismen ist beim Kleinkind der *Wiederholungsdrang nach Umweltantwort,* als Appell formuliert: „Wiederhole sofort ein Verhaltenselement, falls ihm eine auffällige Wahrnehmung nachfolgte". Das schematische Handeln nach diesem simplen Schema führt unmittelbar zum Unterscheidenkönnen zwischen – einerseits – zufälligen Koinzidenzen und – andererseits – Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen eigenem Handeln und Umweltereignissen. Dadurch wird das Kind über seine Möglichkeiten zur Beeinflussung der belebten und der unbelebten Umwelt belehrt. Der Wiederholungsdrang nach Umweltantwort gehört im eigentlichen Sinne – wie der Erkundungsdrang, der Nachahmungsdrang, die aggressive soziale Exploration und mehrere andere Verhaltensdispositionen des Spielalters – zur *Natur des Kindes.* Leider scheint die *Einfühlung* der Erwachsenen in diese den Kindern angeborenen, emotional verwurzelten Strategien des Erfahrungserwerbs *nicht* naturgegeben zu sein wie Liebe, Angst und Hunger, sondern sie muß mit Verstandeshilfe erworben werden. Hier liegen Gründe für rational bedingte Fehleinstellungen zum Kind, die sich in der Erziehung und in der Konzeption von Bildungseinrichtungen ausdrücken und sich verhängnisvoll auswirken können.

Bis hierher gilt die Aussage des Aristoteles: „Der Säugling unterscheidet sich in seinem Wesen noch in nichts von einem Tier". In heutiger Wissenschaftssprache ausgedrückt und durch eine vergleichend biologische Bemerkung ergänzt, heißt das: Zwar sind schon im Embryo, im Fetus und erst recht im Säugling zahlreiche anatomische und physiologische Besonderheiten angelegt, die ihn zu keiner anderen Entwicklung als der zum Menschen prädeterminieren; aber unter den vorausgehend beschriebenen Eigenschaften des Säuglings und Kleinkindes war noch keine, die nicht, wenn auch in abgewandelter Form, auch bei der einen oder anderen Tierart vorkäme. Doch dann geschieht im Rahmen und auf der emotionalen Basis des Verhaltensbereichs „Erkunden, Spielen, Nachahmen" etwas Neues: Das Menschenkind *überholt* in einer bestimmten Entwicklungsphase des Kleinkindalters ein etwa mit ihm aufgezogenes gleichalteriges Schimpansenkind, und dies geschieht dann sogleich mit unaufholbaren Riesenschritten in Richtung derjenigen Dimensionen, die das *eigentlich Menschliche* zur Erscheinung bringen.

Die Rolle der Intelligenz

Eine erste Dimension, in der das Kleinkind schnell ein Niveau erreicht, mit dem sich die entsprechenden Ansätze im Tierreich nicht mehr messen können, ist die der *Intelligenz.* Sie erschließt neue Freiheitsgrade des Verhaltens: Nicht mehr nur *tatsächlich erlebte* Erfahrungen führen durch Lernprozesse zur Vervollkommnung antriebsbedingten Verhaltens (z.B. für den Nahrungserwerb oder die Vermeidung von Gefahren); sondern interne Prozesse der *Um- und Neukombination von Gedächtnisinhalten* (= Denkprozesse) konstruieren Abbilder ganz neuer Verhaltensmöglichkeiten und steuern hiernach das Handeln. Eine weitere Intelligenzleistung ist das Verwenden *erlernter lautlicher Symbole* zur gegenseitigen Verständigung – bis zur Entwicklung der begrifflichen Sprache. Schließlich werden sogar die Antriebe und deren Ziele zum Gegenstand des „inneren Experimentierens", und das ihnen zugeordnete Verhalten kann an gedanklich gewonnenen (z.B. ethischen) Maßstäben

gemessen und daraufhin verstärkt oder gehemmt werden. Durch all das löst sich das Kleinkind viel mehr, als es irgendeinem Tier gegeben wäre, aus der Instinktbindung, d.h. aus der *unmittelbaren* Steuerung durch Antriebe und Bedürfnisse wie Hunger, Angst usw. Diese wirken dann – als Triebfedern des Handelns – vielfach nur noch als so etwas wie die „letzte Instanz" der Verhaltenssteuerung.

Das Auftauchen des Ichbewußtseins

Ein zweiter, sich klar abzeichnender Teilvorgang der individuellen Menschwerdung des Kleinkindes ist das Auftauchen seines *Ichbewußtseins*, sicher abzulesen am richtigen Gebrauch des Wörtchens „ich", davor aber bereits am zutreffenden Deutenkönnen des eigenen Bildes im Spiegel. Letzteres können zwar nachweislich auch Gorilla, Schimpanse und Orang Utan; doch verliert eine Eigenschaft des Menschen ja nicht dadurch ihren Charakter als unbedingt zum Menschen gehörig, wenn man feststellt, daß sie in *Ansätzen* auch bei anderen Lebewesen anzutreffen ist. – Auch das Handeln nach Motiven, die sich aus dem *Sich-Hineinversetzen* in andere Wesen herleiten, zeigt sich erstmalig im Kleinkindalter; dabei wird das Konzept des Ichbewußtseins auf das innere Bild des anderen Wesens, z.B. des Mitmenschen, übertragen: Der Artgenosse wird zum anderen Ich, der Verhaltenspartner zur Person. Eine spätere Konsequenz davon kann die Überzeugung sein, die Persönlichkeit eines Menschen überdauere auch den leiblichen Tod; hier kann der Ansatz zur Achtung vor den Toten und zu ihrer Verehrung liegen.

Die Sexualentwicklung des Menschen

Ein dritter, besonders augenfälliger Schritt zum spezifisch Menschlichen vollzieht sich, wenn ein Kind zum ersten Mal einen *gesehenen Gegenstand* zeichnet, beispielsweise einen Menschen (der dann stets als „Kopffüßer" auftritt). Obwohl Affen und Menschenaffen eindrucksvoll zeichnen und malen können, hat man *„abbildendes* Gestalten in *formerhaltendem Material"* noch niemals bei ihnen beobachtet und es auch trotz gezielter Versuche nicht anregen können. Diese Fähigkeit setzt eine zentralnervöse Funktionsstruktur voraus, die das Eigentum allein des Menschen zu sein scheint. In ihr aber liegt die Voraussetzung auch für die Entwicklung der *Schrift* als Mittel zur Informationsweitergabe an nicht anwesende andere Menschen und damit zugleich für die schriftliche Weitergabe kultureller Traditionen über Generationen hinweg.

Drei Errungenschaften aus der Urgeschichte des Menschen sind durch Dokumente belegt, die sich über die Zeiten erhalten haben: *Feuer, Grab* und (künstlerisches) *Bild*. Sie versinnbildlichen, wenn auch zum Teil in abgeleiteter Form, gerade die drei eben besprochenen Dimensionen, in denen die Fortschritte des Kleinkindes die entsprechenden Ansätze im Tierreich äonenweit hinter sich lassen: die Intelligenz (Indienstnahme des Naturphänomens Feuer gleichsam als Werkzeug); die Erfassung des eigenen Ichs und des Ichs des Mitmenschen, selbst über den Tod hinaus; und das bildnerische Gestalten beispielsweise im Rahmen von Jagdzauber und Totenkult.







3 Kopf-Fuß-Männchen, gemalt von einem 3½jährigen Mädchen

Den Abschluß der Jugendentwicklung bildet die Geschlechtsreife; *während* der Jugendentwicklung bereitet sie sich vor. Einige hinsichtlich des Tier-Mensch-Vergleichs bemerkenswerte Vorgänge sind dabei:

– Der Abstieg der Hoden vollzieht sich bei allen Primaten nach, nur beim Menschen bereits *vor* der Geburt; hier ist die Entwicklung des Menschen also – im Vergleich zu verwandten Arten – *akzeleriert*.

– *Retardiert* ist dagegen die *Pubertät:* Sie erfolgt um Jahre später als beispielsweise beim Schimpansen.

– Einzigartig für den Menschen, d.h. ohne Parallele bei anderen Primaten, ist der pubertäre *Wachstumsschub* bei beiden Geschlechtern; in dessen Verlauf entsteht auch der durchschnittliche Größen*unterschied* zwischen Mann und Frau.

– Der Geschlechtsunterschied in der *Stimmlage* entsteht ebenfalls in der Pubertät. Durch den „Stimmbruch" des männlichen Jugendlichen sinkt die Tonlage um etwa eine Oktave ab.

– Mannigfache Umweltbedingungen in der Kindheit, darunter prägungsähnliche Lernvorgänge, beeinflussen die verhaltensbiologische und die psychische Seite der Sexualentwicklung, und zwar – vermutlich in Wechselwirkung mit genetischen Faktoren – so tiefgehend, daß daraus eine unübersehbare Vielfalt sexueller Verhaltenstypen der Erwachsenen folgt.

Nicht nur *biologische* Besonderheiten, sondern auch die drei besprochenen *spezifisch menschlichen* Errungenschaften der Kleinkindzeit – vor allem Intelligenz und Ichbewußtsein – geben der Sexualentwicklung des Menschen ihr besonderes Gepräge. Stellvertretend für viele seien zwei Vorgänge erwähnt, an erster Stelle ein pathologisches: Kinder mit fehlentwickeltem, z.B. hermaphroditischem äußerem Genitale beginnen mit dem Einsetzen ihres Ichbewußtseins schwer an ihrem Erscheinungsbild zu leiden (Depressionen); Vergleichbares aus der Tierwelt ist nicht bekannt und auch nicht zu erwarten. Um seelischen Störungen vorzubeugen, führt

man daher etwa erforderliche plastische Chirurgie *vor* Beginn des Wachwerdens des kindlichen Ichbewußtseins durch.
Ein verwandtes Phänomen ist die bei vielen Jugendlichen in einem bestimmten Alter auch ohne entsprechende erzieherische Einflüsse entstehende Hemmung, die eigenen Geschlechtsteile fremden Blicken auszusetzen, insbesondere im erregten Zustand („genitale Scham"). Gleich, ob diese Hemmung zu den *Naturanlagen* des Kindes bzw. des Menschen gehört (dies wird u.a. durch humanethologischen Kulturvergleich nahegelegt) oder reines Kulturprodukt ist, geht auch sie von der inneren Vergegenwärtigung des eigenen Erscheinungsbildes aus. Symbolisch wird der Zusammenhang in der bibl. Schöpfungsgeschichte angedeutet; doch führt dies bereits über die Jugendentwicklung hinaus ins Lebensstadium der Erwachsenen.
Das gleiche gilt für die vielleicht radikalste Änderung der sexuellen Disposition während der Menschwerdung: Im Verlauf der Entwicklung des *aufrechten Ganges* verlor der Analbereich seine entscheidende Rolle als sexueller Signalgeber des weiblichen Geschlechts. Dafür wurden Gesicht und Brust zu Trägern visueller erotischer Reizwirkung, bei deren Ausübung und Empfang die Partner nunmehr *einander zugekehrt* sind. Vielleicht liegt hierin eine *biologische* Prädisposition für die *spezifisch menschliche* Möglichkeit, den sexuellen mit den sonstigen Persönlichkeitsbereichen zu einer umfassenden Einheit zu integrieren.

Lit.: *Eibl-Eibesfeldt, I.:* Die Biologie des menschl. Verhaltens. München 1984. *Hassenstein, B.:* Verhaltensbiologie des Kindes. München ⁴1985. *Hellbrügge, Th.* (Hg.): Die Entwicklung der kindlichen Sexualität. München 1982. *Montagu, A.:* Zum Kind reifen. Stuttgart 1984. *Portmann, A.:* Biologische Fragmente zu einer Lehre vom Menschen. Basel/Stuttgart ³1969.

Bernhard Hassenstein

Mensch und Menschenbild in biologischer Sicht

Hinsichtlich seiner *Morphologie* bildet und begründet der Typus des Menschen eine eigene *Familie* im Rahmen der *Ordnung* der Primaten; als *Gesamterscheinung* (einschließlich Zivilisation und ↗Kultur) begründet die Art Mensch jedoch – wie es der englische Zoologe J. Huxley ausdrückte – einen eigenen *Stamm,* wenn nicht sogar – neben den Mineralien, Pflanzen und Tieren – ein eigenes *Reich.* Im Sinne dieser allgemeinen Aussage ein wissenschaftliches Bild des Menschen zu entwerfen, ist die Aufgabe der ↗*Anthropologie* und ihrer Teildisziplinen, z.B. Humanbiologie und ↗Paläanthropologie.

Der Mensch ist von Natur aus ein Kulturwesen

Das *Menschenbild der Biologie* hat nach A. Gehlens Formulierung „der Mensch ist von *Natur* aus ein *Kulturwesen*" zwei Seiten: die eine ist die biologische Mitgift des Menschen, vor allem, inwiefern sie die Entfaltung der Zivilisation und Kultur möglich gemacht hat; und die zweite sind die Rückwirkungen der Zivilisation und der Kultur auf die biol. Seite der menschl. Existenz.

Biologische Mitgift des Menschen

Morphologie und Physiologie. Eine erste herausragende morphologische und physiologische Besonderheit des menschlichen Körpers ist der *dauernde aufrechte*

Gang; auch die Menschenaffen beherrschen den aufrechten Gang, doch ist er nicht ihre hauptsächliche Art der Fortbewegung. Der *Fuß* des Menschen ist – u. a. durch seine langgestreckte Form – als Lauffuß für den ebenen Boden spezialisiert. Die *Hand* des Menschen ist ähnlich geformt wie die der übrigen Primaten, wo sie ihre ursprüngliche Funktion als Greifhand beim Klettern erfüllt; beim aufrechten Gang ist die Hand jedoch von der Mitwirkung bei der Lokomotion völlig befreit. Somit ist der Mensch – biologisch gesehen – das einzige Lebewesen mit dauernd aufrechtem Gang und einer frei verfügbar gewordenen Greifhand.

Aufrechter Gang mit frei disponibler Greifhand

Eine zweite herausragende biologische Besonderheit des Menschen ist sein aus Kehle und Mundraum geformter *Stimmapparat.* Im Unterschied zu den Menschenaffen und allen anderen stimmbegabten Tieren kann der Mensch in unterschiedlichen Tonhöhen eine Vielzahl von Vokalen und Konsonanten formen und zu lautlichen Signalen und zur gesprochenen Sprache kombinieren.

Stimmapparat: Sprache

Als dritte morphologische und physiologische Besonderheit des Menschen ist sein *Gehirn* zu nennen, das durch die Vermehrung seiner *Struktur* eine gigantische Steigerung der Speicherfähigkeit, der Intelligenz und der künstlerischen Schöpferkraft über das bei Tieren vorgefundene Niveau ermöglicht.

Gehirn und seine Struktur: Intelligenz

Der Mensch ist also keinesfalls ein biologisches *Mängelwesen,* wie es der Dichter und Philosoph J. G. Herder und in seiner Nachfolge der Anthropologe A. Gehlen geltend machen wollten, sondern er ist morphologisch und physiologisch für *mehrere biologische Funktionen hoch spezialisiert* und aufs beste angepaßt. Zwar kann der Delphin schneller schwimmen, der Gepard schneller laufen und der Schimpanse besser klettern als der Mensch, und an Muskelkraft ist ihm eine ganze Anzahl von Tierarten hoch überlegen. Würde man aber – um ein Gleichnis aus dem Sport heranzuziehen – zwischen dem Menschen und allen in Frage kommenden Säugetierarten einen *Mehrkampf* veranstalten, der Lang- und Kurzstreckenlauf, Klettern und Schwimmen einschlösse, so würde der Mensch, obgleich es sich bei den Einzeldisziplinen um lauter *rein biologische* Leistungen handelt, wegen seiner körperlichen Vielseitigkeit den Sieg erringen. Der Mensch ist also „auch körperlich gar nicht so ohne" (K. Lorenz).

Der Mensch ist *kein* biologisches Mängelwesen

Die drei herausragenden körperlichen Spezialisierungen des Menschen – aufrechter Gang mit frei disponibler Greifhand, vielseitiger Stimmapparat und überragende Intelligenz –, sind nicht nur je einzeln die Träger ungewöhnlicher Fähigkeiten, sondern sie spielen einander in die Hände. Beispielsweise können Ergebnisse der *Intelligenz* mit Hilfe der freigewordenen *Hände* realisiert und mit Hilfe der differenzierten Lautgebung und *Sprache* anderen Menschen mitgeteilt werden. Aufgrund dieser *kooperativen* Möglichkeiten schaffen die genannten *Spezialisierungen* ein *offenes* Lebewesen mit unübersehbar vielen *Freiheitsgraden* des Verhaltens, aber auch Fähigkeiten zu den unterschiedlichsten neuen Verhaltensspezialisierungen.

Die Ontogenie des Menschen

Ontogenie. Die durchschnittliche Gesamtdauer des Lebens des Schimpansen beträgt etwa 40, die des Menschen etwa 80 Jahre. Vergleicht man aber die einzelnen Lebensabschnitte der *Kindheit* bis zum Beginn des Zahnwechsels, der *Jugend* bis zur Pubertät, des *Erwachsenenalters I* bis zum Ende der Fortpflanzungszeit im weiblichen Geschlecht und des *Erwachsenenalters II* (Senium), so ergeben sich bei weitem die größten Unterschiede in der ersten und in der letzten dieser Epochen.

Die verlangsamte *Kindheitsentwicklung* könnte, wie der Zoologe und Anthropologe A. Portmann vermutete, den notwendigen Zeitraum zu Verfügung stellen, um den beim Menschen erhöhten Ansprüchen der Einspeicherung von Gedächtnisinhalten, von Verfahren der Intelligenz und der Sprachentwicklung zu genügen.

Das verlängerte *Senium* könnte ein Ausdruck dafür sein, daß – in der für diese Festlegung maßgebenden Evolutionsepoche – die Verwertung der bis dahin eingespeicherten Information der *älter gewordenen Gruppenmitglieder* einen entsprechend großen Selektions- bzw. Überlebenswert für diejenigen Verwandtengruppen brachte, denen sie angehörten.

Verhaltenssteuerung. „Im Menschen liegt ein ganz einmaliger, sonst nicht versuchter Gesamtentwurf der Natur vor": Der Mensch „verhält sich zu sich selbst; er lebt nicht, er führt sein Leben". Diese Aussage von A. Gehlen zielt auf die Fähigkeit des Menschen, seine eigene Existenz in seinem Bewußtsein zu „spiegeln" (Ich-Bewußtsein) und sein eigenes, künftig mögliches Leiden und Handeln in seine bewußte Verhaltenssteuerung und -planung einzubeziehen. Im Vergleich zur reinen Instinkt- und Erfahrungsabhängigkeit des Verhaltens des Säuglings bzw. fast aller Tiere eröffnet dies völlig neue Freiheitsgrade des Entscheidens über das eigene künftige Handeln – bis zu einer nur dem Menschen zugänglichen Extremhandlung, dem bewußten Auslöschen des eigenen Lebens im Frei-Tod. Diese Art der Verhal-

tenssteuerung setzt allerdings voraus, was Gehlen als „Hiatus" (lat., = Kluft) bezeichnete: Das Verhalten muß von den unmittelbar wirkenden instinktiven oder erfahrungsbedingten Verhaltenstendenzen „abgekoppelt" werden können, um dem bewußten „Führen des Lebens" (= der Vernunft) das Steuer zu überlassen.

Durch das „Abkoppeln" von der unmittelbaren Verhaltensbestimmung verlieren jedoch die instinktgebundenen Antriebe und unmittelbar erfahrungsbedingten Verhaltenstendenzen keineswegs jeden Einfluß auf das menschliche Verhalten: Sie beteiligen sich an den bewußten Entscheidungen als Rivalen oder als Förderer anderer Triebfedern. Zudem können sehr starke Verhaltenstendenzen (Beispiel: Jähzorn, panische Angst) die Vernunft-Steuerung des Verhaltens auch völlig aus den Angeln heben und den Menschen wieder dem Diktat der biologisch bedingten Triebfedern unterwerfen. Dies führt zur Frage nach den in der *Natur des Menschen* verankerten *Antrieben und Verhaltensbereitschaften.*

Bei Tieren sind unter besonderen Selektionsbedingungen, z. B. auf Inseln oder in der Domestikation, bestimmte angeborene Antriebe schwächer geworden oder verlorengegangen, z. B. bei Brieftauben die Bereitschaft, sich beim Heimflug zum Schlag anderen gesichteten Tauben zuzugesellen. Ein solches Instinkt-Defizit ist jahrzehntelang – auch von K. Lorenz – beim Menschen vermutet worden. Der Mensch hat jedoch im Rahmen seiner Entscheidungsfreiheit (Hiatus) die Wahl zwischen instinktkonformem und instinktunabhängigem Verhalten, und diese *Wahlmöglichkeit* nimmt ihm die Instinkt*sicherheit* – auch im Fall der Existenz eines einschlägigen Instinktes. Fehlende Instinkt*sicherheit* ist daher kein Argument für die *Armut* an *Instinkten.* I. Eibl-Eibesfeldt hält es sogar für denkbar, daß im Zuge der Menschwerdung nicht nur keine Instinkte verlorengingen, sondern womöglich zusätzliche instinktive Triebfedern entstanden sind.

Im Bereich der instinktiven Verhaltensbereitschaften des Menschen besteht die spezielle Frage: Besitzt er eine *angeborene Tötungshemmung* gegenüber Mitmenschen? Und falls ja: Gibt es Situationen, in denen sie außer Kraft tritt? Vermutlich lautet die Antwort: Eine solche Tötungshemmung existiert – als Tendenz! – gegenüber *individuell bekannten* Angehörigen des eigenen Sozialverbandes, nicht aber gegenüber *Gruppenfeinden.* So etwas ist im Tierreich typisch für sozial lebende große Raubtiere, z. B. Wolf und Löwe. Falls auch der Mensch diesem Schema entspräche, was ja zu seiner vermuteten Lebensform im „Tier-Mensch-Übergangsfeld" passen würde, so fiele er biologisch in dieser Hinsicht also nicht aus dem Rahmen. Das hieße: In der biologisch motivierten Situation der *Gruppenfeindschaft* bestände im Verhältnis zu Gruppengegnern keine biologisch bedingte innere Hemmung gegen unmenschl. Grausamkeit und Tötung. Man spricht hier mit Recht von „Abgründen der menschl. Natur".

Angeborene Tötungshemmung?

Für das Menschenbild der biologischen Anthropologie entscheidend ist jedoch auch die Möglichkeit des Menschen, in jedem Mitmenschen ein fühlendes Wesen nach dem Modell des bewußt gewordenen eigenen Ichs zu sehen und dieses Konzept der „Einfühlung" für das eigene Handeln bestimmend werden zu lassen. Hierdurch erhebt sich der Mensch – der Möglichkeit nach – auf ein Niveau des Handelns, wie es in Goethes Gedicht „Das Göttliche" skizziert worden ist.

Entspräche die von A. Gehlen vermutete Möglichkeit des Menschen, sein Verhalten von der unmittelbaren Instinktsteuerung abzukoppeln, den Tatsachen, so würden allerdings im „Hiatus" nicht nur sozialethisch begründete Handlungsmotive, sondern auch mentale Produkte jeglicher anderen Art handlungsbestimmend werden können, also auch Vorstellungen, die wir als Ausgeburten der Phantasie bezeichnen würden. So etwas ist in der Tat seit jeher vorgekommen. Als Beispiel möge der für Jahrhunderte verhaltensbestimmende Mythos der Sumerer gelten, der Sinn des Lebens bestehe in Fronarbeit für die Götter, damit diese nicht mehr – wie vor der Erschaffung des Menschen – selbst solche Arbeit leisten müßten. Ein moderner Ausdruck für mentale Vorgänge solcher Art ist „Rationalisierung".

Andererseits ist die Unabhängigkeit von der unmittelbaren Steuerung durch instinktive Impulse auch die Voraussetzung dafür, daß sich der Mensch als das „offene Wesen" empfinden kann: Was der menschliche Geist überhaupt zu erfassen vermag, das kann dank des „Hiatus" auch sein Verhalten bestimmen, ohne daß dies durch instinktive Festlegung behindert würde. Allerdings gelingt dem Menschen diese Befreiung in der Regel nicht vollkommen: Von Schmerz und Angst, die in der menschlichen Natur verankert sind, völlig unabhängig zu werden, gelingt nur Märtyrern und Heiligen.

Zivilisations- und kulturbedingte Rückwirkungen auf die biologische Existenz des Menschen

Ernährung und Bekleidung. Entdeckungen und Erfindungen wie der Gebrauch des

Feuers – also Intelligenzleistungen – eröffneten die Möglichkeit zum Braten, Kochen und Backen; dadurch erweiterte sich das Spektrum der verwertbaren Nahrung. Weitere Leistungen der Intelligenz ermöglichten die Haltung und Züchtung von Haustieren sowie den Anbau von Pflanzen. Durch all dies erschloß sich der Mensch – biologisch gesehen – neue ökologische Nischen, erweiterte also seine Lebensgrundlage. Eine Konsequenz davon war vermutlich die *Erhöhung der Bevölkerungsdichte.*

Die Erhöhung der Bevölkerungsdichte

Die Vorzugstemperatur des unbekleideten Menschen im Wahlversuch beträgt etwa 28 °C. Damit ist er an tropisches Klima angepaßt. Die Erfindungen der Bekleidung und des Feuers gaben ihm die Möglichkeit, sein *Wohngebiet* bis in die Arktis hinein (Eskimos) *zu erweitern.*

Geräteherstellung, Landwirtschaft, Technik. ↗Werkzeuggebrauch kommt selten bei Tieren vor, gezielte Herstellung von Werkzeug (man spricht dann bevorzugt von „Geräten") aufgrund von Erfahrung oder von Einsicht wurde nur in ganz wenigen Einzelfällen beobachtet. Die Menschen haben diese Fähigkeit zunächst langsam, dann immer schneller weiterentwickelt und sind von der Herstellung von landwirtschaftlichen Geräten und Waffen Schritt für Schritt bis zur heutigen Technik gelangt. Jedes neuerfundene Gerät erschloß dem Menschen neue Möglichkeiten zur Nutzung von Ressourcen der Natur und steigerte seine *ökologische Potenz* fast ins Ungemessene.

Die Bedeutung des Werkzeuggebrauchs

Sprachen und Schrift. Auf der Schwarmtraube tanzende Spurbienen verschlüsseln die Entfernung zu den aufgefundenen möglichen neuen Nisthöhlen des Schwarms mit Hilfe der Tanzgeschwindigkeit (↗Bienensprache). Dieser Übersetzungscode ist ihnen angeboren. Sprachen aus *erlernten* Symbolen beherrscht dagegen nur der Mensch; lediglich in ein paar Einzelfällen ist über erlernte und sinngemäß verstandene Symbole auch bei Tieren berichtet worden. Beim Menschen vereinigen sich zur Leistung des Sprechens die physiologischen Fähigkeiten der Lautproduktion mit den im Gehirn verankerten Begabungen zum Lernen und zum Denken.

Sprache und Schrift

Das Sprechen der Menschen dient nicht nur zur Weitergabe von Information, sondern wegen der Vielzahl und Unterschiedlichkeit der Sprachen verschiedener Völkerschaften auch zur Isolation zwischen diesen, also zur Verhinderung von Wechselbeziehungen, die sonst möglich wären. Die kulturbedingte Diversifikation der Sprachen ist ein Analogon zum stammesgeschichtlichen Vorgang der Entstehung von unterschiedlichen sozialen Signalen, z.B. im Rahmen der Paarbildung bei verschiedenen *Arten;* diese sind interspezifisch unverständlich und tragen dadurch zur genetischen Art-Isolierung bei.

Die *geschriebene* Sprache schließlich ermöglicht (seit mindestens 3000 v. Chr.) die Speicherung von Information und deren Weitergabe ohne unmittelbaren Sprechkontakt zwischen den Individuen und daher auch über Generationen hinweg.

Medizin. Hilfe für Kranke oder sonst in Bedrängnis geratene Artgenossen ist nur bei wenigen Tierarten beobachtet worden (Blattschneiderameisen, Zwergmungos, Delphine, Elefanten, Schimpansen). Beim Menschen gehört die Behandlung von Kranken in die Obhut bestimmter Berufe: Das Arzttum ist eine kulturelle Schöpfung. Die Medizin beeinflußt die biologische Existenz der Art Mensch auf vielfältige Weise. Sie verlängert die durchschnittliche Lebensdauer, verändert die relative Häufigkeit der Krankheiten und die Anteile verschiedener Todesursachen, läßt durch entsprechende Therapie und die damit verbundene Verminderung der Letalität die Häufigkeit genetischer Defekte ansteigen und veranlaßt durch die Verminderung der Säuglings- und Kindersterblichkeit eine zum Teil drastische Bevölkerungsvermehrung.

Humanökologie. Bei zahlreichen Organismenarten haben sich ökologische Gleichgewichte, z.B. zwischen Räubern und Beutetieren, eingespielt; oder den Individuen sind Reaktionsweisen angeboren, die das Anwachsen der Bevölkerungsdichte begrenzen und dadurch die Ernährungsgrundlage der Art vor der Zerstörung durch übermäßige Ausbeutung schützen. Wegen übermäßiger Jagd (z.B. von Walen), extensiver Landwirtschaft und wegen der mehr als exponentiell (hyperbolisch) anwachsenden Erdbevölkerung besteht ein solches Gleichgewicht zwischen der Art Mensch und seiner Umwelt heute nicht mehr. Zwar wächst die Bevölkerung in der Bundesrepublik Deutschland heute nicht mehr an; doch besteht zur Zeit keine Aussicht, daß sich dieses generative Verhalten auch weltweit durchsetzen könnte. Die Spezies Mensch *gefährdet* daher von Tag zu Tag mehr *die Stabilität ihrer Umwelt* und damit ihre eigene *Weiterexistenz.* Die wichtigsten anthropogenen Umweltschäden, die bei weiterem extensiven Wachstum der Bevölkerung und der Industrie nach gnadenlosen Gesetzen auf den Menschen zurückschlagen müssen, sind Bodenerosionen und Vergiftung des Grundwassers, der Luft und des Bodens mit Schwermetallen und mit Radioaktivität.

Die Gefährdung der Stabilität der Umwelt und der eigenen Weiterexistenz

Sozialverhalten und Menschlichkeit. Hoch-

differenzierte Sozialverbände mit Kasten- bzw. „Berufs"-Differenzierung, mit Pflanzenzucht, Tierhaltung und Sklaverei gibt es – auf angeborener Grundlage – auch bei Insekten (Termiten, Ameisen und Bienen). Nur beim Menschen sind die *Strukturen der Sozialverbände* durch *gedankliche Konstruktionen* mitbestimmt; beim Menschen können daher politisches und wirtschaftliches System *einander ablösen*. Nur der Mensch hat überdies *Institutionen* geschaffen wie das Rechtswesen, die verschiedenen Ausgestaltungen des religiösen Lebens, militärische Organisationen und Schulen. Auch *Berufe*, die nicht durch genetische, entwicklungsbiologische oder morphologische Kastenbildung entstehen, sondern durch spezielle Ausbildung, sind allein für den Menschen typisch.

Struktur der Sozialverbände

Die soziale *Rollenverteilung zwischen Mann und Frau* ist zum Teil biologisch, zum Teil kulturell bestimmt. Einen Hinweis darauf gibt die Tatsache, daß manche Berufe bei sämtlichen untersuchten Völkerschaften lediglich von einem Geschlecht ausgeübt werden (überwiegend biologische Bedingtheit), z.B. Großwildjagd von Männern, Säuglingsversorgung von Frauen; dagegen werden andere Berufe je nach Völkerschaft von Männern, von Frauen oder von beiden zusammen ausgeübt (überwiegend kulturelle Bedingtheit), z.B. bei der Herstellung von Bekleidung.

Rollenverteilung zwischen Mann und Frau

Die jeweils herrschenden politischen und sozialen Verhältnisse beeinflussen das individuelle Verhalten der Menschen von Grund auf; die verhaltensbestimmende Mentalität der Bevölkerung kann beispielsweise in Frieden, Revolution, Krieg oder in Diktaturen und Demokratien dermaßen unterschiedlich sein, daß ein uneingeweihter Beobachter sie kaum als Verhaltensnormen einer und derselben Spezies auffassen würde. Dabei bestimmt jeweils die von der Mehrzahl der Individuen im Sozialverband vertretene Werthaltung auch die *Systemebene*, in der die Entscheidungen der Individuen fallen: In Paniksituationen oder während Pogromen und im Krieg kann dies die Ebene von unmittelbar biologisch determinierten Verhaltensimpulsen sein, z.B. Angst und Gruppenhaß. Bei der Verhaltenssteuerung durch Wertvorstellungen der Humanität sind dagegen die biologischen Verhaltensimpulse vielfach von der *unmittelbaren* Bestimmung des Verhaltens abgekoppelt (Gehlens „Hiatus"); denn die in der Natur des Menschen verankerten Reaktionsweisen und Antriebe stehen zwar in weiten Bereichen mit dem *Ideal der Menschlichkeit* im Einklang, doch gehört auch die Anfälligkeit für Gruppenhaß und für unmenschliche Grausamkeit gegenüber Gruppenfeinden zur menschlichen Natur. Das Ideal der Menschlichkeit ist eine kulturelle und geistige Schöpfung und deckt sich mit der menschlichen Natur nicht vollständig; es steht zu bestimmten Anteilen von ihr in unüberbrückbarem Widerspruch. Doch ist der Mensch nur dann wirklich Mensch, wenn er beim Auftreten eines solchen Widerspruches der *Menschlichkeit* gegenüber der *menschlichen Natur* den Vorrang gibt.

Lit.: *Campbell, B. G.:* Entwicklung zum Menschen. Stuttgart ²1979. *Eibl-Eibesfeldt, I.:* Die Biologie des menschlichen Verhaltens. München 1984. *Gadamer, H.-G., Vogler, P.* (Hg.): Neue Anthropologie TB (7 Bände). Stuttgart – München 1972–1975. *Gehlen, A.:* Der Mensch. Frankfurt ⁸1966. *Hassenstein, B.* (Hg.): Freiburger Vorlesungen zur Biologie des Menschen. Heidelberg 1979. *Hofer, G., Altner, G.:* Die Sonderstellung des Menschen. Stuttgart 1972. *Knussmann, R.:* Vergleichende Biologie des Menschen. Stuttgart 1980. *Lorenz, K.:* Über tierisches und menschliches Verhalten. München – Zürich 1965. *Lorenz, K.:* Die Rückseite des Spiegels. München – Zürich 1973. *Portmann, A.:* Biologische Fragmente zu einer Lehre vom Menschen. Basel – Stuttgart ³1969.

Bernhard Hassenstein

Das Erlebnis *„ich bin frei"* kann das Bewußtsein eines wachen oder träumenden Menschen unter Umständen ganz erfüllen; damit verwirklicht sich dort *absolute* Freiheit in Form einer psychischen Gegebenheit. Freiheit, so empfunden, steht im unüberbrückbaren Gegensatz zu jeder Form von Determination.

Der Begriff Freiheit

Wo der Begriff „Freiheit" dagegen in den Naturwissenschaften auftaucht, z.B. in dem physikalischen Ausdruck „Freiheitsgrad", ist Freiheit stets nur partiell gegeben und bleibt an Bedingungen geknüpft: Als in erdgeschichtlicher Vergangenheit Insekten, Flugsaurier, Vögel und Fledermäuse die Fähigkeit zum aktiven Flug erlangten, gewannen sie für ihre Fortbewegung einen zusätzlichen *Freiheitsgrad*; in anderen Hinsichten blieben sie aber tausendfach an innere und äußere Lebensbedingungen gebunden.

Was die Beherrschung einer neuen räumlichen Dimension für die Fortbewegung, das war der Zugang zu neuen Bereichen von *auswertbarer Information* für die Vervollkommnung der *Verhaltenssteuerung*. Deren Startniveau bildeten die *Instinkte*, das in mehreren Schritten erreichte Endstadium die Fähigkeit des Menschen zur freien Entscheidung.

Für *erbbedingtes* (instinktives, angeborenes) *Verhalten* ist es durch Schaltungen des Nervensystems (im Zusammenwirken mit den Sinnes- und Ausführungsorganen) ein für allemal festgelegt, welche Reaktionen durch welche Reizmuster ausgelöst werden. Das ändert sich, sobald das verhaltenssteuernde System *lernfähig* wird: Aufgrund von *Erfahrungen* wandeln oder erweitern sich nun im Laufe des individuellen Lebens die ursprünglichen Reiz-Reaktions-Beziehungen. Eine neue Dimension, die individuelle *Vergangenheit*, gewinnt Einfluß auf die gegenwärtige Verhaltenssteuerung.

Eine Informationsquelle höherer Ordnung, die *Intelligenz*, erschließt für die Verhaltenssteuerung, wenn auch niemals perfekt, die Dimension der vorweggenommenen *Zukunft*: Eindrücke aus der bisherigen Erfahrung werden nach Regeln, die ebenfalls der Erfahrung entstammen können, für kommende, neue Situationen um- und neukombiniert; dieser Vorgang liefert so etwas wie ein Modell dessen, was in Konsequenz von neu eingetretenen Bedingungen in der Zukunft zu erwarten ist. Diese Denkergebnisse (Ergebnisse inneren Experimentierens nach *S. Freud*) beteiligen sich dann an der Verhaltenssteuerung.

Bei Menschenaffen und Menschen erreicht die innere Modellbildung einen so hohen Grad der Vervollkommnung, daß sich ein repräsentatives Abbild nicht nur der Umwelt, sondern auch der eigenen Existenz zu formieren vermag; beispielsweise wird dann das eigene Spiegelbild nicht mehr als fremdes Wesen, sondern als Abbild des eigenen Körpers erkannt. Darauf aufbauend, vermag der Mensch die Möglichkeit auszuschöpfen, sein eigenes zukünftig denkbares Verhalten in die gedanklich zu entwerfenden Zukunfts-Modellbilder einzubeziehen (Schimpansen können das nur in Andeutungen).

In diesem Rahmen werden etwaige alternative Handlungsmöglichkeiten zum Bewußtsein gebracht, hinsichtlich ihrer Erfolgsaussichten abgewogen, mit dem Prinzip der eigenen Verantwortlichkeit und ethischen, vielleicht auch religiösen Maßstäben in Beziehung gesetzt und daraufhin die Entscheidung gefällt. Wird sich ein Mensch im Verlauf eines solchen Entscheidungsprozesses des Spiels seiner Gedanken *bewußt*, so kann er sich als entscheidungsfrei erleben; ja es kann sich das anfangs erwähnte Gefühl der absoluten Freiheit einstellen und bis zum Fällen der endgültigen Entscheidung erhalten bleiben. Dieser psychischen Situation wird die Definition *Friedrich Schillers* gerecht: „Frei ist der Mensch, der dem Gesetz der Vernunft folgt." (Der Begriff der Vernunft schließt neben dem Verstand auch die moralische Dimension ein.)

Willensfreiheit und Determination

Genau betrachtet, besteht aber zwischen dem eben beschriebenen Entscheidungsprozeß und dem begleitenden Bewußtsein der Willensfreiheit ein Widerspruch: Der Entscheidungsprozeß entspricht seinem Idealtypus um so mehr, je strenger er durch Einsicht, Verantwortlichkeit und Moral determiniert ist; das absolute Freiheitsgefühl aber ist, wie eingangs gesagt, mit der Vorstellung der Determination ganz unvereinbar. Angesichts dieses Widerspruchs werden drei Standpunkte vertreten:

- Man nimmt den Widerspruch als gegeben hin;
- man hält am begrifflichen Gegensatz zwischen Freiheit und Determination fest und erklärt angesichts des beobachtbaren *determinierten* Entscheidungsprozesses das Freiheitserlebnis folgerichtig als Täuschung, vergleichbar einer Sinnestäuschung;
- man anerkennt die bewußt erlebte Freiheit als ‚psychische Realität, erklärt dafür

aber das Begleitgefühl der Undeterminiertheit für widerlegt durch die jedermann zugängliche Erfahrung und vertritt den Standpunkt: Freiheit existiert, ist aber nicht Undeterminiertheit, sondern eine besonders *differenzierte Form der Determination* unter Ausschöpfung aller dem menschlichen Geist zugänglichen Quellen für entscheidungsbedeutsame Gesichtspunkte.

Logisch widerspruchsfrei sind der zweite und der dritte unter diesen drei Standpunkten. Der zweite Standpunkt negiert die menschliche Entscheidungsfreiheit, damit aber auch die tragende Grundlage der *Verantwortlichkeit des Menschen:* Die Verantwortlichkeit des Menschen ist gebunden an seine Fähigkeit zur freien Entscheidung; denn was ein Mensch nicht aus freiem Willen, sondern gezwungen tut, liegt nicht mehr in seiner Verantwortung, sondern geht auf das Konto der ihn zwingenden Umstände. Insofern ist der zweite Standpunkt zwar logisch konsequent, steht aber im Widerspruch zur menschlichen Selbstverantwortung und damit zu einem nicht aufgebbaren Grundsatz des menschlichen moralischen Selbstverständnisses.

Auch der dritte unter den formulierten Standpunkten ist logisch konsequent, bejaht aber die Existenz der menschlichen Willensfreiheit. Damit läßt er die anthropologische Basis der menschlichen Verantwortlichkeit für sein entscheidungsfreies Handeln unangetastet.

In der Diskussion um die menschliche Willensfreiheit wurde oft die Frage gestellt, ob eine durchgehende kausale Determination allen materiellen Geschehens nicht von vorneherein jede real existierende Freiheit unmöglich machen würde.

Die Vorstellung von einem Widerspruch zwischen Kausalprinzip und Willensfreiheit erweist sich jedoch durch einen einfachen systemtheoretischen Gedankengang als unzutreffend: Sobald ein Netzwerk aus datenverarbeitenden Elementen genügend komplex ist, um *programmiert* werden zu können, sind die Programme nicht mehr auf die Funktionsprinzipien der Netzwerk-Elemente beschränkt. So können etwa in einem Computer sämtliche Regeln des Schachspiels programmiert werden, damit also die Konzepte König, Dame, Turm, Springer, Läufer und Bauer nebst deren Anzahlen, nebst dem Schachbrett, der Aufstellung usw., und dies, obgleich es sich hierbei um vereinbarte Normen handelt, die nichts mit Naturgesetzen zu tun haben. Mathematische und logische Fehler, die versehentlich in ein Programm hineingeraten können, werden vom Computer nicht automatisch eliminiert, sondern befolgt; sie steuern dann zum Leidwesen des Programmierers auf kausalem Wege die Vorgänge der Ausgabe. Daher besteht auch kein Hindernis gegen das Programmiertwerden von Regeln, die formal gegen das Kausalprinzip verstoßen, weder in Computern, noch erst recht in Netzen aus Nervenzellen.

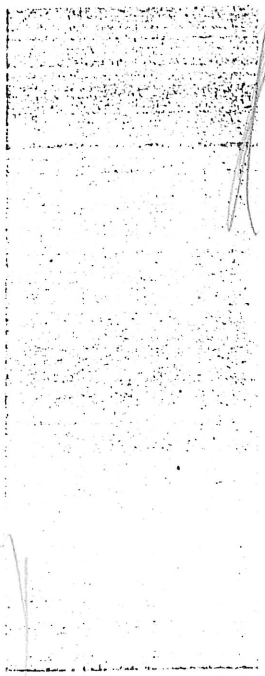
Der Widerspruch zwischen Kausalität und Willensfreiheit, ein Scheinwiderspruch

Der Widerspruch zwischen Kausalität und Willensfreiheit, mit dem sich Generationen von Philosophen und Naturwissenschaftlern abgequält haben, erweist sich demnach als Scheinwiderspruch, sobald man die Beziehungen zwischen Element- und Systemfunktionen in datenverarbeitenden Systemen in Betracht zieht.

In systemtheoretischer Sicht erübrigt sich damit auch jedes Bemühen, zur Rettung der menschlichen Willensfreiheit auf nicht kausal determinierte Quantenprozesse zurückzugreifen, wie dies *Pascual Jordan* mit seiner „Verstärkertheorie der Willensfreiheit" (1932) versuchte: Nach seiner Ansicht sollte sich der in der Mikrophysik verbleibende Spielraum der kausalen Determination *(Heisenbergs Unbestimmtheitsrelation)* im Organismus durch „Verstärkung" zu demjenigen Freiheitsspielraum wandeln, der uns als Willensfreiheit gegeben ist. Doch läßt sich ein kausalitätsentbundener Spielraum, wie gesagt, auch als Ergebnis einer entsprechenden Programmierung innerhalb von datenverarbeitenden Netzwerken aus kausal determinierten Elementen vorstellen, sofern man eine solche Voraussetzung für die Theorie der Willensfreiheit überhaupt für erforderlich hält. Überdies führte Pascual Jordans Verstärkertheorie noch (ähnlich wie jede Zufallstheorie der Willensfreiheit) zu der verwirrenden Vorstellung, die menschliche Entscheidungsfreiheit verwirkliche sich konkret in mikrophysikalisch bedingten Zufallsentscheidungen. Dies würde, wie damals schon *Max Planck* bemerkte, jede moralische Verantwortlichkeit des Menschen für seine freien Entscheidungen ausschließen – eine Vorstellung, deren Unannehmbarkeit schon oben in anderem Zusammenhang dargelegt wurde.

Nach der hier vorgetragenen Auffassung macht ein Mensch von dem Freiraum seiner menschlichen Entscheidungsfreiheit Gebrauch, wenn er etwaige verschiedene Möglichkeiten des künftigen Verhaltens gedanklich vorwegnimmt, sie mit Zielvorstellungen, ethischen Normen und dem Bewußtsein seiner eigenen Verantwortung in Beziehung setzt und dann nach dem Ergebnis dieser Erwägungen handelt. An der Verwirklichung dieser seiner Entscheidungsfreiheit wird ein Mensch gehindert,

wenn ihn überstark aktivierte Antriebe – subjektiv: Emotionen – überwältigen. Mit den Worten Jähzorn und Panik (panische Angst) drückt die Umgangssprache so hohe Stärkegrade der Aggressivität und der Angst aus, daß Vernunftgründe keinen Einfluß mehr haben. Zwischen den Extremen des entscheidungsfreien und des rein emotionsgesteuerten Handelns bestehen fließende Übergänge; dort gilt: Je stärker irgendwelche biologisch bedingte Verhaltenstendenzen sind, desto eher setzen sie sich beim Einzelmenschen gegen sonstige Verhaltensgründe durch und desto weitergehender bestimmen sie auch, wenn sie viele Menschen erfassen, die Verhaltensrichtungen des Kollektivs. Obgleich das Ausschalten der menschlichen Entscheidungsfreiheit die Verhaltensdetermination auf die ursprüngliche biologische Ebene beschränkt, kann eine solche rein emotionale Verhaltensbestimmung mit dem überwältigenden Gefühl von eigener Kraft und Freiwilligkeit einhergehen. Das Bewußtsein der Entscheidungsfreiheit kann also leider auch irreführen und uns blinde biologische oder ideologische Determination als einen Zustand der Freiheit vorspiegeln.



Lit.: *Bünning, E.:* Quantenmechanik und Biologie. Die Naturwiss. 31 (1943) 194–197. *Hassenstein, B.:* Willensfreiheit und Verantwortlichkeit. Naturwissenschaftliche und juristische Aspekte. In: Hassenstein, B. (Hg.): Freiburger Vorlesungen zur Biologie des Menschen. Heidelberg 1979. *Jordan, P.:* Die Quantenmechanik und die Grundprobleme der Biologie und Psychologie. Die Naturwiss. 20 (1932), 815–821. *Jordan, P.:* Die Verstärkertheorie der Organismen in ihrem gegenwärtigen Stand. Die Naturwiss. 26 (1938), 537–545. *Planck, M.:* Vom Wesen der Willensfreiheit. In: Reden und Vorträge. Band II, S. 70–87. Leipzig 1943. *Seitelberger, F.:* Neurobiologische Grundlagen der menschlichen Freiheit. Überlegungen zur Evolution des Gehirns. In: *Böhme, W.* (Hg.): Mensch u. Kosmos. Herrenalber Texte 33 (1981) 26–47.

Bernhard Hassenstein