

## Die Organisation der Lebewesen als „technisches“ Problem

Univ. Doz. Dr. Wolfgang Wieser

Von einem „technischen Problem“ im Zusammenhang mit der Organisation von Lebewesen zu sprechen, ist augenscheinlicherweise nur dann sinnvoll, wenn dem Wort „technisch“ eine spezielle Bedeutung gegeben wird.

Was immer man unter einem Lebewesen versteht, es ist auch ein System, das bestimmte Bedingungen zu erfüllen hat, um übrig bleiben, oder um das, was gemeinlich unter dem Terminus „Lebensfunktionen“ zusammengefaßt wird, verrichten zu können. Wenn wir nun davon ausgehen, daß die Leistungen der Lebewesen rationalisierbar, d. h. innerhalb eines objektiven und allgemeinverbindlichen Begriffsystems beschreibbar sind — und auf dieser Voraussetzung beruht ja erst die Möglichkeit, Wissenschaft zu betreiben —, dann müssen sich diese Bedingungen auch aus der Fülle der Erscheinungen herauslösen, analysieren und im Prinzip definieren lassen.

Der Biologe, der die Frage stellt: „Was sind die Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit ein bestimmter physiologischer Prozeß so und nicht anders abläuft?“ befindet sich seiner ganzen Einstellung nach in derselben Lage wie ein Konstrukteur, der die Frage stellt: „Welche Bedingungen sind zu erfüllen, damit eine Maschine dies oder jenes leistet?“ — nur blicken sie gewissermaßen in entgegengesetzte Richtungen.

In beiden Fällen wird nach dem Modell eines bestimmten Funktionszusammenhanges gesucht. Der Biologe gewinnt sein Modell auf Grund ständiger Vergleiche mit der Realität des biologischen Geschehens, dem er es so lange anpaßt, bis es ein hinreichend genaues Abbild des zu beschreibenden Funktionszusammenhanges darstellt.

Der Konstrukteur gewinnt sein Modell, indem er die Struktur des Funktionszusammenhanges durchschaut und diesem die Realität technischer Elemente und Verknüpfungen anpaßt.

Ich nenne die biologische Organisation also insofern ein „technisches Problem“, als ihre Erforschung die Formulierung ständig neuer Modelle in Funktionszusammenhängen erfordert, Modelle, deren Genauigkeit allerdings nicht in der Uebereinstimmung mit Ideen, sondern in der Uebereinstimmung mit biologischen Tatsachen liegt.

Auf die Frage nach den Bedingungen, von denen die Leistungen der Lebewesen abhängen, gibt es viele Antworten. In einer sehr allgemeinen Form gilt natürlich — wie für alle Systeme — daß erstens Bausteine, zweitens Energie und drittens ein Organisationschema für die Existenz der Organismen notwendig sind. Bedeutung gewinnt diese Erkenntnis aber erst durch weitere Spezifikationen:

Bausteine und Energie müssen in einer Form vorhanden sein, in der ihr Nachschub sowohl keine Schwierigkeiten bereitet, als auch zum Zeitpunkt der Entstehung des Lebens — also vor einigen Milliarden Jahren — möglich war.

Das Organisationschema muß so geartet sein, daß sich aus ihm die unerhörte Mannigfaltigkeit der Organismen, gleichzeitig aber ihre Identität in der Zeit, einerseits ihre Anpassungsfähigkeit, andererseits ihre Fähigkeit zur Selbstbehauptung ableiten läßt. Diese Liste der Spezifikationen muß um so länger werden, je weiter wir vom Allgemeinen zum Besonderen, vom Typus zur Art oder vom Niederorganisierten zum Höchstorganisierten fortschreiten.

Was die Bausteine und die Energie betrifft, so mag die Andeutung genügen, daß unsere Vorstellungen über ihre Herkunft und ihr Schicksal bereits ein recht geschlossenes Bild ergeben: Unter der Mitwirkung der Sonnenenergie werden aus den stets verfügbaren elementaren Verbindungen Wasser, Kohlendioxyd, Nitrate und anderen Salzen, die eigentlichen Bausteine: Nukleinsäuren, Proteine, Kohlenhydrate, Fette und Vitamine, aufgebaut und in den organischen Prozeß eingeschleust. Die erste Synthese findet im Chlorophyll der grünen Pflanzen statt und hierbei wird auch ein Teil der Photonenenergie in einer für alle Organismen verwertbaren Form, energiereichen Phosphatverbindungen, festgelegt. Die Entstehung komplexerer organischer Verbindungen aus anorganischen ist jedoch nicht an das Vorhandensein des Pflanzenchlorophylls gebunden, wie vor allem die vor etwa 10 Jahren durchgeführten Experimente des amerikanischen Chemikers Stanley Miller beweisen, der durch elektrische Entladungen in einer künstlichen Atmosphäre aus Methan, Wasserstoff, Ammoniak und Wasserdampf — was der Zusammensetzung der Uratmosphäre unserer Erde entsprechen dürfte — einige jener Aminosäuren, aus denen sich die Eiweißstoffe zusammensetzen, zu erzeugen vermochte.

Jeder Organismus ist ein Prozeß: Material und Energie werden eingeschleust, ersteres in Form von Abbauprodukten, letztere in Form von Arbeit und Wärme wieder abgegeben. Der Organismus erhält sich also im Wechsel seiner Bestandteile, oder — nach einem Wort v. Bertalanffys — im Fließgleichgewicht.

In dieser Zusammenschau verbergen sich außerordentliche Probleme der Organisation.

Auf welche Weise erhält sich denn etwa in diesem großen Fluß die Identität eines Organismus?

Der Techniker würde sagen, es müßte irgendwo ein „Programm“ vorhanden sein, von dem entsprechende Direktiven ausgehen, die den Strom von Material und Energie so lenken, daß die Struktur des Organismus erhalten bleibt.

Es gehört nun zweifellos zu den ganz großen Leistungen der Biologie, daß die Existenz eines derartigen „Programms“ — und noch mehr: sein Organisationsprinzip und die Art seiner „Direktiven“, im Laufe der letzten Jahrzehnte entdeckt worden sind. Wir haben Grund anzunehmen, daß für sämtliche Lebewesen, von den Mikroorganismen bis zum Menschen, dieselben Prinzipien gelten, wir es also hier mit uralten Erfindungen aus einer Zeit zu tun haben, die der großen Entfaltung der organischen Welt vorangegangen sein muß.

Der Konstruktionsplan, oder das Programm, eines Organismus liegt — wie man schon seit einiger Zeit vermutete — in seinen Chromosomen, genauer, im Nukleinsäure-Anteil dieser Zellorgane. Sein Organisationsprinzip hat man sich so vorzustellen, daß die wesentlichsten Spezifikationen, die die Identität eines Organismus bestimmen, in Form einer linear angeordneten „Vorschrift“ in den Nukleinsäuremolekülen festgelegt sind. Der Text dieser Vorschrift setzt sich aus vier Elementen oder Buchstaben zusammen, nämlich aus den vier Stickstoffbasen Adenin, Thymin, Cytosin und Guanin, die in dem spiralig aufgerollten Doppelkettenmolekül der Desoxyribonukleinsäure (DNS) wie die Sprossen einer fast unbegrenzt langen Leiter aufeinander-

folgen. Nach unserer heutigen Anschauung würde ein bestimmtes Merkmal des fertigen Organismus, etwa Blauäugigkeit, darauf zurückzuführen sein, daß in einem bestimmten Abschnitt eines der Chromosomen die vier Sprossentypen oder vier Buchstaben in charakteristischer Sequenz angeordnet sind, etwa

AAAABBCDDD, während, sagen wir,  
AAABBCDDD Braunäugigkeit ergäbe.

Dieser spezielle Fall ist zwar in Wirklichkeit noch nicht analysiert, aber bei Mikroorganismen ist die Abhängigkeit eines bestimmten biochemischen Merkmals von der Sequenz der Nukleotiden (wie man eine Stickstoff-Base mit einem kleinen, aus Phosphat- und Zuckerrest bestehenden Teil des molekularen Gerüsts der Nukleinsäure auch nennt) bereits nachgewiesen worden.

Das Programm allein genügt natürlich nicht, sondern es muß auch Direktiven geben und diese Direktiven müssen durch Exekutivorgane ausgeführt werden. Die Exekutivorgane werden nach allgemeiner Ansicht durch eine bestimmte Klasse von Eiweißstoffen, die Enzyme, repräsentiert, die Ort, Zeit, Richtung und Geschwindigkeit sämtlicher physiologischer Vorgänge in einem Organismus bestimmen. Danach wäre die Identität eines Organismus durch das nur ihm zukommende, raum-zeitliche Muster der Enzymverteilung gegeben. Der Aufbau dieses Musters muß also unter der Kontrolle der genetisch übermittelten Vorschrift in den Chromosomen des Organismus stehen, was eine direkte Verbindung zwischen dieser und dem Enzymsystem erfordert. Unsere Einsicht in diese Verbindung wird durch die Tatsache erleichtert, daß nicht nur die Nukleinsäuren, sondern auch die Eiweißstoffe aus linear angeordneten Elementen, nämlich den Aminosäuren, aufgebaut sind, von denen in Lebewesen rund 20 verschiedene vorkommen.

Die ungeheure Vielfalt der biologischen Prozesse hat ihr Abbild in der ungeheuren Vielfalt der Enzyme (von der man sich eine gewisse Vorstellung machen kann, wenn man erfährt, daß in einer einzigen Leberzelle bis an die 2000 Enzyme am Werk sein dürften) und dieser wiederum beruht auf der Kombinierbarkeit der 20 Aminosäuren.

Nachrichtentechnisch ausgedrückt, besteht die Achse der biologischen Organisation also aus zwei Zeichenlisten, einer 4-buchstabigen und einer 20-buchstabigen, wobei diese von jener kontrolliert wird.

Die Uebersetzung einer Nachricht aus einem 4-buchstabigen in ein 20-buchstabiges Alphabet könnte auf verschiedene Weise erfolgen, aber die rein theoretisch einfachste Annahme wäre wohl die, daß zur Bestimmung eines Buchstaben des Zwanziger-Alphabets zumindest drei Buchstaben des Vierer-Alphabets verwendet werden, da sich aus vier Elementen maximal 16 Zweiergruppen, hingegen 64 Dreiergruppen bilden lassen. Es wurde darum auch bereits vor einigen Jahren von F. Crick, G. Gamow und anderen die Hypothese vorgeschlagen, daß der Aufbau eines Organismus derart durch seine Erbsubstanz im Zellkern gesteuert werde, daß jeweils drei Nukleotiden eine Aminosäure spezifizieren, der Aufbau der enzymatischen Proteine also durch Sequenzen von Triaden im DNS-Molekül vorgegeben sei. Diese Hypothese scheint nun tatsächlich auf die Wirklichkeit zuzutreffen, zumindest haben die Arbeiten mehrerer Forschergruppen, vor allem der um Crick in Cambridge, Ochoa in New York, Nirenberg und Mattaei in Bethesda starke Argumente für ihre Richtigkeit geliefert. Die Eiweißsynthese der Zellen wird allerdings dadurch kompliziert, daß sie im Zellplasma, und zwar in kleinen Organzellen, den Mikrosomen, stattfindet, während die Desoxyribonukleinsäure auf den Zellkern beschränkt ist. Es war also ein weiterer Uebersetzungsvorgang zu fordern. Dieses Verbindungsglied ist die zweite in der lebenden Zelle vorkommende Nukleinsäure, die Ribonukleinsäure (RNS), die sich von ihrer Verwandten durch das Auftreten der Stickstoff-Base Uracil an Stelle von Thymin unterscheidet. Sie wird aller Wahrscheinlichkeit

nach an bestimmten Regionen des Chromosoms gebildet, wobei sie die in der DNS enthaltene Information übernimmt; darauf wandert sie vom Zellkern in das Zellplasma, gelangt in die Mikrosomen und regt dort auf Grund ihrer Nukleotidensequenz die Synthese spezifischer Eiweißstoffe an (wobei wir davon absehen wollen, daß die tatsächlichen Ereignisse durch die Existenz mehrerer Formen der RNS weiter kompliziert werden).

Da die 4 Nukleotiden der RNS und die 20 Aminosäuren der Proteine als zwei einander zugeordnete Listen von Zeichen anzusehen sind, können wir hier im Sinne der Informationstheorie von einem Kode — und zwar von einem molekularen Kode — sprechen (s. Zemanek 1959, S. 30). Eines der Hauptanliegen der Biochemie der letzten Jahre ist es gewesen, diesen Kode zu entziffern — und es spricht für die Leistungsfähigkeit ihrer Methoden, daß dieses Unterfangen, bis zu einem gewissen Grad wenigstens, bereits gelungen ist. So stellten etwa Nirenberg und Matthaei ein künstliches, bloß aus Uracil aufgebautes, RNS-Molekül her und brachten es unter geeigneten Bedingungen in einen zellfreien Extrakt des Colon-Bazillus, der die Rohstoffe zur Bildung von Eiweißstoffen enthält. Am Ende des Experimentes war in dem Reaktionsgefäß ein ausschließlich aus der Aminosäure Phenylalanin aufgebautes Polypeptid nachzuweisen, d. h. die Basensequenz

U-U-U-U-U-U-U-U-U-U-U-U-U-U-U-U-

hatte die Synthese einer Aminosäuresequenz

P-P-P-P-P

induziert.

Dr. Ochoa vom Rockefeller-Institut in New York glaubt, die „Kodewörter“ für sämtliche Aminosäuren bereits gefunden zu haben, wobei etwa bedeuten sollen:

UUU = Phenylalanin

UCG = Alanin

UAC = Threonin usw.

Die Beziehungen, die zwischen der Erbsubstanz und den Enzymen, also dem „Programm“ und der „Exekutive“ bestehen, können nun auf folgende Weise schematisch zusammengefaßt werden:

Ein bestimmter biochemischer Prozeß vermag abzulaufen, weil ein bestimmtes Enzym im rechten Zeitpunkt am rechten Ort auftritt und dies wird ermöglicht durch die spezifischen „Kommandos“, die von den zugeordneten Nukleotidengruppen des genetischen Programms an die Mikrosomen ergehen — oder irgendwann einmal ergangen und dann gespeichert worden sind.

Läßt sich im genetischen Programm und in der Uebersetzung dieses Programms in das Enzymmuster ein nachrichtentechnisches Problem sehen, so hat die Organisation eines Lebewesens zweifellos auch eine schalttechnische Seite. Diese Feststellung ist eigentlich eine Tautologie insofern die Aufrechterhaltung einer raum-zeitlichen Ordnung irgendwelcher Elemente nur als das Ergebnis eines Systems von Beziehungen denkbar ist.

Diese Beziehungen könnte man sich als bis in die letzte Nuance vorgeben denken. Ort und Moment jedes Reaktionsschrittes, jedes Signals, wären danach im Hauptprogramm festgelegt und die Summe aller Reaktionen und Signale hielte die Ordnung des Systems aufrecht. Ab einer gewissen Zahl von Elementen dürfte diese Methode jedoch nicht mehr funktionieren, da schon der Raum den das Programm beanspruchen würde, um sämtliche Beziehungen in Rechnung zu stellen — abgesehen davon, daß Korrekturen auf unerwartete Störungen unmöglich wären — zu einem begrenzenden Faktor werden muß.

Die zweite Lösung des Schaltproblems liegt darin, ein möglichst genaues Programm des zu erreichenden Zustandes festzulegen, seine Verwirklichung aber von den jeweiligen Bedingungen des Systems abhängig zu machen. Dies führt unmittelbar zur Errichtung von Subzentren mit relativer Autonomie, die die veränderlichen Einflüsse, denen das System ausgesetzt ist, registrieren und verarbeiten. Erst vom Ergebnis dieser Verarbeitung wird das weitere Verhalten des übergeordneten Zentrums abhängen. Wir können diese Art der Schaltung auch als eine Hierarchie der Integration auffassen, die auf miteinander verknüpften Kreisprozessen beruht. So steht etwa die Enzymproduktion einer Leberzelle in letzter Instanz unter der Kontrolle der Desoxyribonukleinsäure im Zellkern; die Tätigkeit des Kontrollzentrums wird jedoch von der Enzymverteilung im Zellplasma beeinflusst und diese hängt wiederum ab von höheren Kreisprozessen, wie etwa dem Zuckerstoffwechsel des ganzen Organismus, der seine eigenen Kontrollzentren, Ausführungsorgane und Wege der Nachrichtenübermittlung besitzt. Die Voraussetzung dieser Art von hierarchischer Ordnung ist also die Existenz von Kontrollzentren mit „Sollprogrammen“, deren Verwirklichung von der Rückmeldung der jeweils herrschenden Systembedingungen abhängt, also dem, was in der Schalttechnik ein Kreis mit Rücksteuerung, oder etwas spezieller, ein Regelkreis genannt wird.

Für die kritische Situation eines „offenen Systems“, das ununterbrochen Material und Energie mit der Umwelt austauscht, wäre auch kaum etwas anderes in Frage gekommen. Offene Systeme sind zu variabel und von äußeren Einflüssen zu abhängig, als das ihre Stabilität durch ein starres, vorgegebenes Programm aufrechterhalten werden könnte. Die Stabilität — das heißt also die Aufrechterhaltung der Identität des Systems — kann wohl nur erreicht werden durch die Anpassung des Programms an die jeweils herrschenden Faktoren und dies erfordert Einrichtungen zum Wahrnehmen dieser Faktoren: Meßfühler in der Sprache der Regeltechnik; Einrichtungen zum Herstellen der Sollbedingungen: Stellglieder; und schließlich Regelzentren, die die Sollwerte festsetzen. Diese Organe müssen durch entsprechende Leitungsbahnen miteinander verknüpft sein, über die Nachrichten gesandt werden können. Im Organismus sind dies nervöse und hormonale Bahnen, wobei die Nachrichten repräsentiert werden durch nervöse Impulsmuster bestimmter Frequenz sowie durch Hormone bestimmter Molekularstruktur und Konzentration.

Die Vergrößerung der Stabilität eines Systems ist gleichbedeutend mit der erhöhten Absicherung gegen Störungen — und dies ist nur durch Vermehrung von Rezeptoren, Schaltelementen und Effektoren zu erreichen. Diese Konsequenz gilt für Systeme aller Art, von Organismen bis Maschinen. Aus diesem Grund bezeichnet man auch die niederorganisierten Lebewesen oft als „Spielbälle der Umwelt“, d. h. als Organismen, die den überraschenden Veränderungen der Umwelt mehr oder minder schrankenlos preisgegeben sind — und dies, weil ihr geringer Gehalt an nervösen Schaltelementen und Verknüpfungen den Aufbau leistungsfähiger Stabilisierungsmechanismen unmöglich macht. Was wir Höherentwicklung nennen, bedeutet die Zunahme derartiger Stabilisierungsmechanismen, die Ablösung von der Tyrannei des wechselvollen Milieus, die Steigerung der Autonomie des Organismus.

Was dies schalttechnisch bedeutet, kann man sich am Beispiel der Temperaturregulation veranschaulichen. Einzeller und einige primitive Vielzeller kommen wahrscheinlich ohne irgendeinen Temperatursinn aus. Ihr Stoffwechsel verändert sich wie ein chemisches System mit der Außentemperatur und es wird erwartet, daß sie ihr Leben in einem erträglichen Temperaturbereich verbringen. In Ermangelung geeigneter Rezeptoren könnten sie die Nähe letaler Temperaturzonen gar nicht registrieren, diese also auch nicht vermeiden. Andere Tiere haben Temperatursinnesorgane, die die aktive Einstellung auf ein Optimum ermöglichen, aber noch immer ist der Stoffwechsel

den Unregelmäßigkeiten des Milieus unterworfen. Homiotherme Tiere schließlich verfügen nicht bloß über Sinnesorgane, die die Messung der Außentemperatur auf Zehntel und Hundertstel Grad erlauben, sondern auch über Regelmechanismen, mit deren Hilfe die Körpertemperatur selbst bei variablen Außenbedingungen auf einer bestimmten Höhe gehalten wird. Dies impliziert eine Fülle konstruktiver Details. Zunächst die Existenz von Rezeptoren, die die Körpertemperatur ständig registrieren. Bei höheren Wirbeltieren sitzen diese in einer besonderen Region des Zwischenhirns und der jeweilige Stand der Körpertemperatur wird ihnen durch das Blut übermittelt. Die Rezeptoren melden ihre Befunde an das Regelzentrum — ebenfalls im Zwischenhirn — das den Istwert mit dem Sollwert — etwa 37 Grad Celsius bei einem gesunden Menschen — vergleicht und bei zu großer Differenz zwischen den beiden die Korrektur des Istwertes durch entsprechende Kommandos an die Effektoren veranlaßt. Als solche, d. h. als Stellglieder, wirken Muskeln und Drüsen, die Kommandos werden hormonal übertragen. Beim Absinken der Körpertemperatur setzt z. B. Muskelzittern ein, wodurch Wärme erzeugt wird; die Temperatur steigt wieder. Aber nun ist durch die erhöhte Muskeltätigkeit ein neuer Faktor mit in das Spiel gezogen worden: die Energiereserven der Muskeln; diese hängen ab von der Zuckerversorgung und diese hinwiederum ist einem komplizierten Regelmechanismus mit Regler, Stellgliedern (den wichtigsten Drüsen innerer Sekretion), Meßfühler, sowie den Bahnen für die Hin- und Rückmeldung eingebaut.

Mit einem Wort: Die Aufrechterhaltung einer konstanten Körpertemperatur erfordert die Vermaschung mehrerer Regelkreise. Die Zahl der beteiligten Elemente — oder besser: Steuerglieder — muß sehr groß sein. Das System, in dem diese Regelmechanismen neben vielen anderen Platz finden, muß also rein quantitativ bereits einen beträchtlichen Grad der Komplexität erreicht haben. Augenscheinlich waren diese quantitativen Bedingungen erst bei den höheren Wirbeltieren erfüllt, deren höchstes, der Mensch, im Gehirn über ein oberstes Steuerzentrum mit etwa 10 Milliarden Teilsystemen, den Neuronen, verfügt.

Wie schon eingangs erwähnt, ist anzunehmen, daß jede Leistung eines Organismus auf ihre konstruktiven Voraussetzungen untersucht werden kann. Im einzelnen erfordert dies zunächst eine genaue Definition der Leistung (oder Verhaltensweise) und dann eine Analyse dessen was Mittelstaedt (1961) die „Grundstruktur des Wirkungszusammenhanges“ oder das „Wirkungsgefüge“ nannte, nämlich die Beziehung aller jener Teilsysteme, die zur Hervorbringung der in Frage stehenden Leistung nachweislich notwendig sind. Durch experimentelle Eingriffe muß dann die Entscheidung versucht werden, welche Beziehungen aus der Summe aller möglichen für das Zustandekommen der Leistung tatsächlich verantwortlich sind.

Auf Grund der genauen Analyse eines biologischen Vorganges mag es z. B. notwendig werden, irgendwo zwischen dem „input“ und dem „output“ des Systems die Existenz eines Regelkreises zu fordern. Diese Forderung wird sich zunächst auf Grund der genauen Kenntnis des Systemverhaltens ergeben und ist unabhängig davon, ob es jemals möglich sein wird, die technischen Details des Regelkreises: die Zahl der beteiligten Teilsysteme, die Struktur dieser Teilsysteme, die Form der Informationsübertragung usw. zu definieren. Aber freilich, der Wissenschaftler wird nicht nachlassen zu versuchen, auch diese Dinge in Erfahrung zu bringen. Es muß jedoch mit aller Entschiedenheit betont werden, daß bereits die Ableitung konstruktiver Prinzipien aus der Struktur des tierischen Verhaltens ein notwendiger und legitimer Schritt im Gang der biologischen Wissenschaften ist. Es hieße einem verschwommenen Mystizismus Tür und Tor öffnen, glaubten wir nicht daran, daß die Leistungen von Systemen in ganz bestimmten, rationalen Beziehungsgesetzen wurzeln, die sich aus jenen durch eine genaue Analyse

wenigstens im Prinzip ableiten lassen. So mag uns zum Beispiel überraschen, daß das Bild der Umwelt, wie es auf unserer Netzhaut entsteht, bei Augen- oder Kopfbewegungen unverändert bleibt, obwohl hierbei die Lichtstrahlen doch auf stets neue Sehelemente fallen. Bewegt sich jedoch das Objekt, dann nehmen wir diese Veränderung der Lagebeziehung zwischen Auge und Umwelt durchaus als Bewegung wahr. Diese Leistung unseres Auges oder Gehirnes mag uns, wie gesagt, überraschen, aber sie auf ein nicht weiter auflösbares, vitalistisches Prinzip zurückzuführen, geht nicht an. Es muß vielmehr nach einem rationalen Modell gesucht werden, aus dem sich jene Leistung ableiten läßt. Dieses Gebot ist das Gegenstück zum Axiom des Konstrukteurs, daß sich für jede genau definierbare Leistung eine Verknüpfung technischer Elemente finden lassen muß, durch die sie zu verwirklichen ist. Im Falle der Konstanz der Seheindrücke haben z. B. v. Holst und Mittelstädt (1950) gezeigt, daß sie sich durch folgendes Schema erklären lassen:

Willkürliche Kopf- und Augenbewegungen gehen auf Kommandos höherer Nervenzentren zurück, die sich sowohl in das Kontraktionsmuster der entsprechenden Muskeln umsetzen, als auch — und hierin liegt die geniale Annahme der beiden Biologen — in Form einer „Efferenzkopie“ gespeichert werden. Alle Verschiebungen der Lagebeziehungen zwischen Umwelt und Auge, die durch die willkürlichen Kopfbewegungen hervorgerufen wurden, führen zu tatsächlichen Veränderungen des Sehbildes, die registriert, rückgemeldet und mit den in der Efferenzkopie enthaltenen erwarteten Veränderungen verglichen werden, wobei wir uns diesen Vergleich mathematisch als einen Subtraktionsprozeß vorzustellen haben. Haben beide Komponenten: die erwartete und die tatsächliche Veränderung, den selben Betrag, dann ergibt ihre Subtraktion Null, was gleichbedeutend ist mit der Konstanz des Seheindrucks. Anders formuliert: Die durch einen Willkürakt bewirkte Veränderung der Lagebeziehungen zwischen Subjekt und Objekt wird durch die mit entgegengesetztem Vorzeichen versehene Efferenzkopie kompensiert. Hat jedoch ein Objekt der Umwelt seine Lage verändert, dann kann diese Bewegung natürlich nicht in der Efferenzkopie aufscheinen und sie bleibt bei der Subtraktion als eine absolute Bewegungskomponente erhalten. Andere Erklärungsmöglichkeiten lassen sich experimentell ausschalten, so daß eine große Wahrscheinlichkeit für die Existenz dieses auf dem Verknüpfungsprinzip der „Masche“ aufbauenden Schemas — dem sogenannten Reafferenzprinzip — besteht.

Alle derartigen Schaltsysteme enthalten als integrierende Bestandteile Verrechnungszentren, in denen einlangende und gespeicherte Signale durch mathematische Operationen miteinander verknüpft werden. So erfordert jeder Regelkreis die Subtraktion oder Addition von Soll- und Istwerten; in einem speziellen Fall, dem Bewegungssehen bei Insekten, können — wie Hassenstein und Reichardt (1953) gezeigt haben — die experimentellen Befunde nur unter der Annahme verstanden werden, daß es im Nervensystem Elemente gibt, die die einkommenden Signale miteinander multiplizieren.

Analysen dieser Art zwingen uns somit, in den Kontrollzentren der Lebewesen die Existenz von Elementen, Steuerkörpern, Verrechnungsstellen, spezifischen Verknüpfungsweisen, Teilsystemen usw. anzunehmen, deren große Zahl und Komplexität sehr wohl die Ursache der beinahe unbegrenzten Mannigfaltigkeit tierischer Verhaltensweisen sein könnte. Stellen wir uns eine Liste schalt- und regelungstechnischer Details zusammen, deren Vorkommen in Organismen durch die heutige biologische Forschung nahegelegt wird, so läßt sich hierdurch besser als durch jedes Einzelspiel die Rolle des Biologen als eines Konstrukteurs illustrieren, der gewissermaßen dazu verurteilt ist, die Schöpfungen eines unendlich genialeren Kollegen zu analysieren, auseinanderzunehmen und in Gedanken wieder zusammenzusetzen.

## Literatur

- J. Brachet 1957, *Biochemical Cytology*. — Academic Press Inc., New York.
- D. W. Bronk und G. Stella, 1932, Afferent impulses in the carotid sinus nerve... — *J. cell. comp. Physiol.* 1.
- T. H. Bullock, 1957, Neuronal integrative mechanisms. In: *Recent Advances in Invertebrate Physiology*. Univ. of Oregon Publ.
- E. Bünning 1958, *Die physiologische Uhr*. Springer Verlag.
- H. Drischel 1956, 1. Blutzuckerregelung, 2. Dynamik vegetativer Regelvorgänge. In: *Regelungsvorgänge in der Biologie*. Oldenbourg, München.
- J. C. Eccles 1953, *The neurophysiological basis of mind*. Clarendon Press, Oxford.
- G. Gamow und M. Ycas 1958, The cryptographic approach to the problem of protein synthesis. In: *Symposium on Information Theory in Biology*. Pergamon Press.
- B. Hassenstein und W. Reichardt 1953, *Z. Naturforsch.* 8b.
- B. Hassenstein 1960, Die bisherige Rolle der Kybernetik in der biologischen Forschung. *Naturwissensch. Rdschau* Jg. 13 Heft 9–11.
- H. Hensel 1956, Temperaturregelung des Organismus. In: *Regelungsvorgänge in der Biologie*. Oldenbourg, München.
- E. v. Holst und H. Mittelstaedt 1950, Das Reafferenzprinzip. *Naturwissenschaften* 37.
- R. Jander 1957, Die optische Richtungsorientierung der roten Waldameise. *Z. vgl. Physiol.* 40.
- W. S. Culloch und W. Pitts 1943, *Bull. mathem. Biophys.* 5.
- H. Mittelstaedt 1950, *Z. vgl. Physiol.* 32.
- H. Mittelstaedt 1961, Probleme der Kursregelung bei frei beweglichen Tieren. In: *Aufnahme und Verarbeitung von Nachrichten durch Organismen*. NTG-Fachtagung in Karlsruhe. S. Hirzel, Stuttgart.
- O. F. Ranke und W. D. Keidel 1960, *Physiologie des Zentralnervensystems vom Standpunkt der Regelungslehre*. Urban u. Schwarzenberg.
- W. Reichardt 1961, Die Lichtreaktion von *Phycomyces*. *Kybernetik* 1.
- U. D. Robertson 1962, The membrane of the living cell. *Scientific American* 206/4.
- W. A. Rosenblith 1959, Sensory performance of organisms. In: *Biophysical Science*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- J. Schwartzkopf 1961, Die Uebertragung akustischer Information durch Nerventätigkeit nach dem Salvenprinzip. NTG-Fachtagung in Karlsruhe. S. Hirzel Verlag, Stuttgart.
- J. D. Watson und F. H. C. Crick 1953, Molecular structure of nucleic acids. *Nature* (London) 171.
- H. Zemanek 1959, *Elementare Informationstheorie*. Oldenbourg, Wien und München.