

akzent

Herbert Krause

Gehirn contra Computer?



Herbert Krause

Gehirn contra Computer?

Urania-Verlag Leipzig Jena Berlin

Autor: Dr. sc. nat. Herbert Krause, Erfurt

Illustrationen: Herbert Spantekow

1. Auflage 1976

1.-20. Tausend. Alle Rechte vorbehalten

© Urania-Verlag Leipzig/Jena/Berlin

Verlag für populärwissenschaftliche Literatur, Leipzig, 1976

VLN 212-475/26/76. LSV 353 9

Lektor: Ewald Oetzel

Umschlagreihenentwurf: Helmut Selle

Typographie: Helmut Selle

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: INTERDRUCK Graphischer Großbetrieb

Leipzig - III/18/97

Best.-Nr. 653 411 2

DDR 4,50 M

Inhalt

Der Wurfraubenschütze und die moderne Elektronik	7
Vorbild Natur	13
Meßfühler für Umweltreize	16
Lernen und Training	21
Roboter	27
Sind Denkprozesse erforschbar?	30
Meßsonden im »Ozean« Umwelt	31
»Lichtfühler«	35
Das künstliche Froschauge	38
Infrarotortung, Ultraschall und anderes	45
Rätsel des Hörens	49
Meßfühler für Geruch und Geschmack	54
Biologische Rezeptoren und die zukünftige Meßtechnik	57
Informationsflüsse in Nervensystemen	59
Impulsleitung in der Nervenfasern	62
Das Neuron als Schaltelement	70
Technische Modelle der Nervenzelle	76
Reflexbögen und Verhaltensprogramme	82
Biologische Regelkreise	86
Der Computer und das menschliche Gehirn	92
Methoden und Ergebnisse der Hirnforschung	97
Bewußtsein und Gedächtnis	105
Können Automaten lernen?	113
Von der Verantwortung des Menschen	126

Der Wurftaubenschütze und die moderne Elektronik

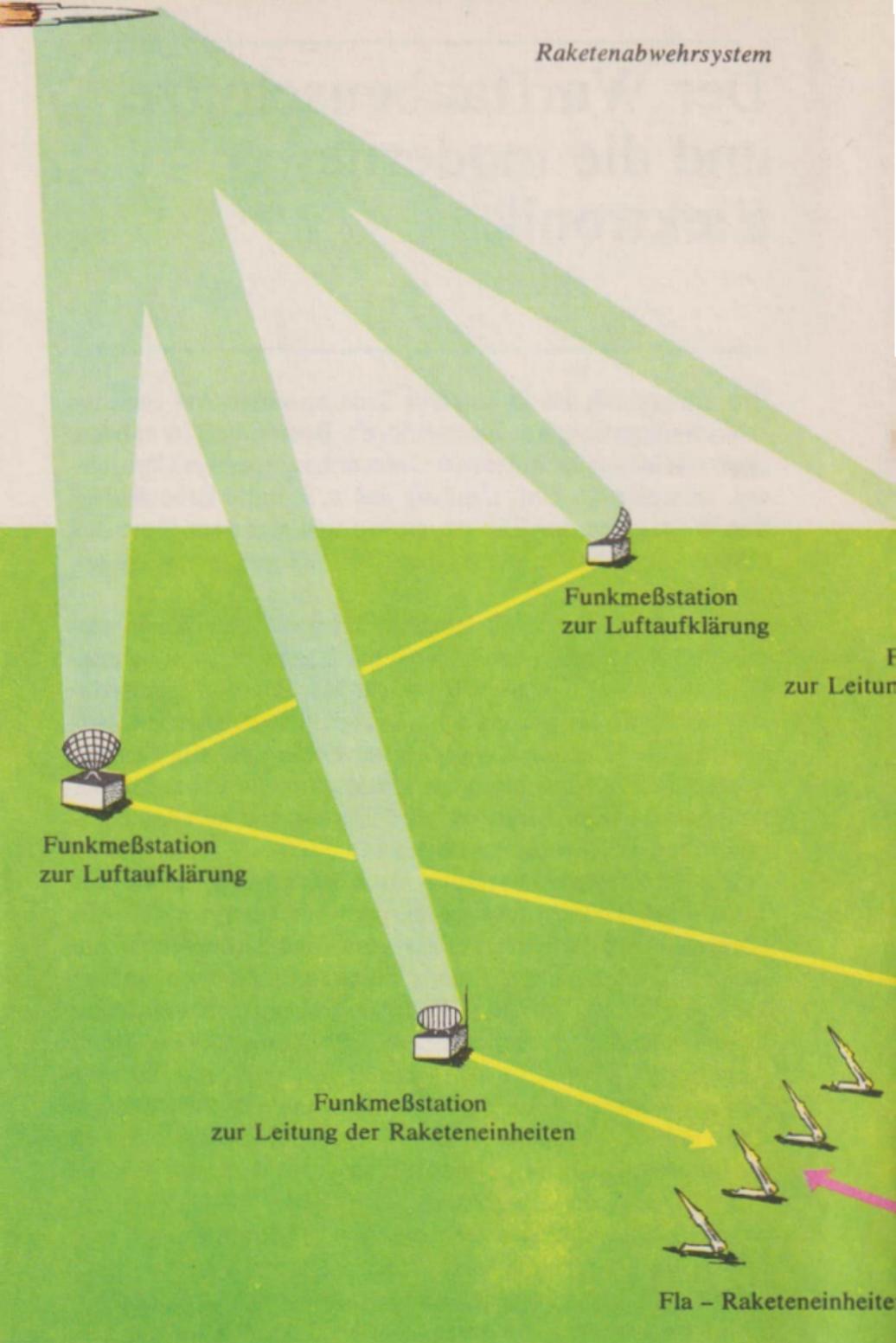
Die Elektronik ist in unserer Zeit zu einer Art Schlüsseltechnik geworden. Sie steckt als Bestandteil in nahezu allen wichtigen technischen Unternehmungen und Projekten. In welchem großem Umfang das z. B. beim Erschließen des Weltraums der Fall ist, wurde uns seit dem Start des ersten Sputniks am 4. Oktober 1957 oft genug vor Augen geführt.

Es ist für jeden offensichtlich: In irgendeiner Weise nutzen fast alle modernen wissenschaftlichen Forschungsmethoden von der Kernphysik bis zur Medizin und Agrarwissenschaft die Möglichkeiten, die ihnen die Elektronik bietet. Mittels Elektronik werden vor allem aber auch datenverarbeitende Maschinen und automatische Prozeßsteuerungen realisiert. Elektronische Geräte sind zu allgemein genutzten Werkzeugen geworden.

Die Elektronik bestimmt auch in großem Maße die Leistungsfähigkeit der modernen Waffensysteme. Mit einer einzigen ferngesteuerten Atomrakete könnte z. B. ein ganzer Landstrich auf einen Schlag mit allem, was in ihm lebt, vernichtet werden. Andererseits wurden elektronische Systeme zum rechtzeitigen Erkennen und Vernichten feindlicher Projektile entwickelt. Sie gehören zu den Spitzenleistungen der Technik. Ketten von Radarstationen sind mit Computern höchster Rechengeschwindigkeit verbunden. Diese berechnen aus den mittels Radar gewonnenen Daten der Flugbahnen feindlicher Flugkörper die Start- und Bahndaten der eigenen Abwehrraketen und geben die Steuerbefehle an deren Abschußrampen.

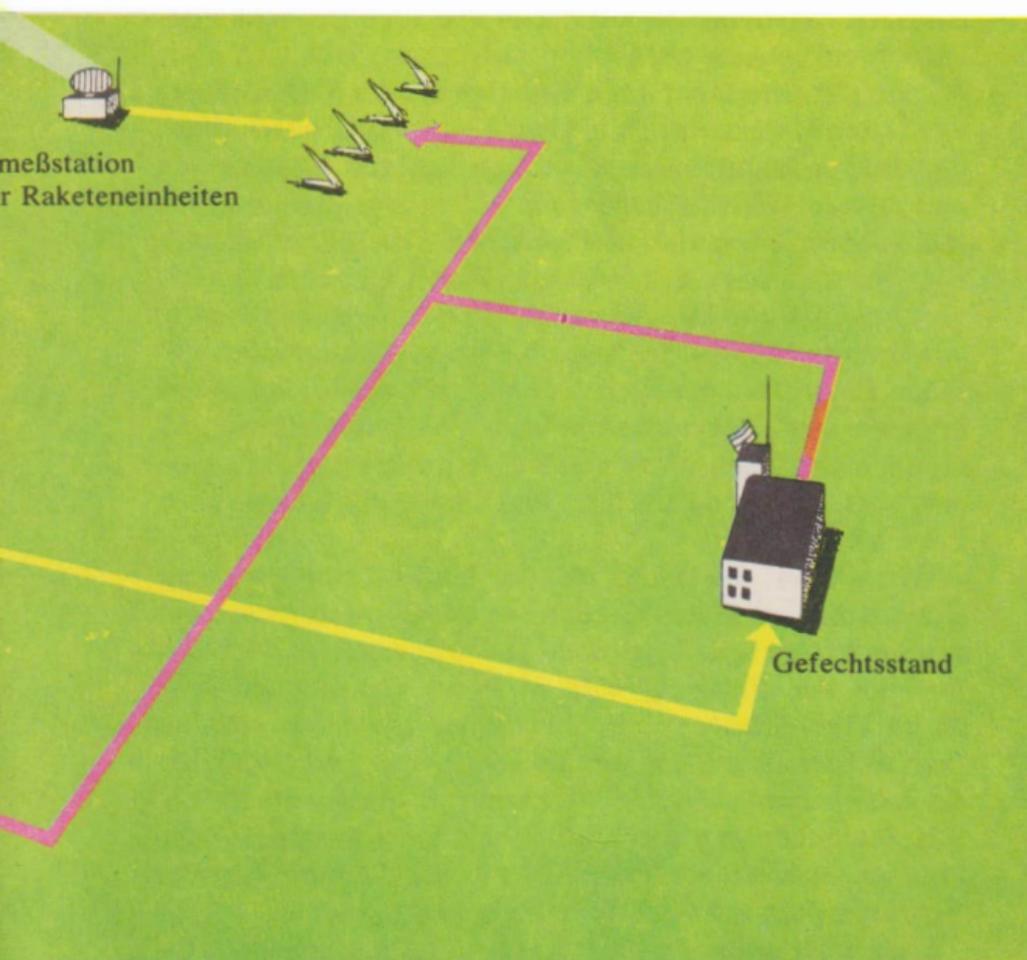
Der Aufwand für solche Raketenabwehrsysteme ist allerdings ungeheuer groß und reicht an die Grenzen der Lei-

Raketenabwehrsystem



stungsfähigkeit der großen Industriestaaten heran. Er demonstriert aber, zu welchen Leistungen heute schon die hochentwickelten Produktivkräfte der menschlichen Gesellschaft fähig sind. Würden diese ausschließlich auf friedliche Ziele gerichtet, so könnte vieles auf unserer Erde besser bestellt sein.

Was die gegenwärtige wissenschaftlich-technische Entwicklung anbelangt, so muß man ständig fragen und prüfen, ob denn die heutigen technischen Lösungen nicht durch bessere, einfachere und billigere abgelöst werden könnten. In unserem Beispiel heißt das, ob unsere gegenwärtige Elektronik etwa an möglichen einfacheren Lösungen vorbeigeht, die uns in Zukunft helfen können, noch größere Aufgaben zu bewältigen.



Unter diesem Gesichtspunkt ist für unsere weiteren Betrachtungen die Überlegung bemerkenswert, daß ein Tennisspieler, ein Wurftaubenschütze und das Raketenabwehrsystem im Prinzip Vergleichbares vollbringen. Der Tennisspieler verfolgt mit seinen Augen die Bahn des fliegenden Balls. Er bestimmt in Bruchteilen einer Sekunde die eigene Reaktion und damit die Rückbahn des Balls infolge des eigenen Schlages. Ein guter Wurftaubenschütze trifft bis zu 100% der Wurftauben, von denen er vorher nicht weiß, wo sie auftauchen werden. Er muß sie mit den Augen orten, ihre Flugbahn kalkulieren und darauf gezielt reagieren.

In beiden Fällen vollbringt das menschliche Zentralnervensystem etwas, was in seinem Endergebnis der Leistung eines großen Computers entspricht. Mit welchen enormen Leistungen menschliche und auch tierische Zentralnervensysteme tatsächlich aufwarten, läßt sich aber erst richtig ermessen, wenn man sich mit der Verarbeitung von Daten in elektronischen Maschinen einmal beschäftigt. Seit einigen Jahrzehnten erforschen Biologen, Physiologen und andere Wissenschaftler die Nervensysteme niederer und höherer Tiere und des Menschen. Das sehr beträchtliche Wissen, über das wir auf diesen Gebieten bereits verfügen, stammt aus Beobachtungen an lebenden Tieren, aus Untersuchungen im Zusammenhang mit neurochirurgischen Eingriffen, aus Experimenten mit isolierten Sinnesorganen und Nervenfasern, aus elektronenmikroskopischer Aufnahmen einzelner Nervenzellen und Rezeptoren, aus mikrochemischen und molekularbiologischen Forschungen.

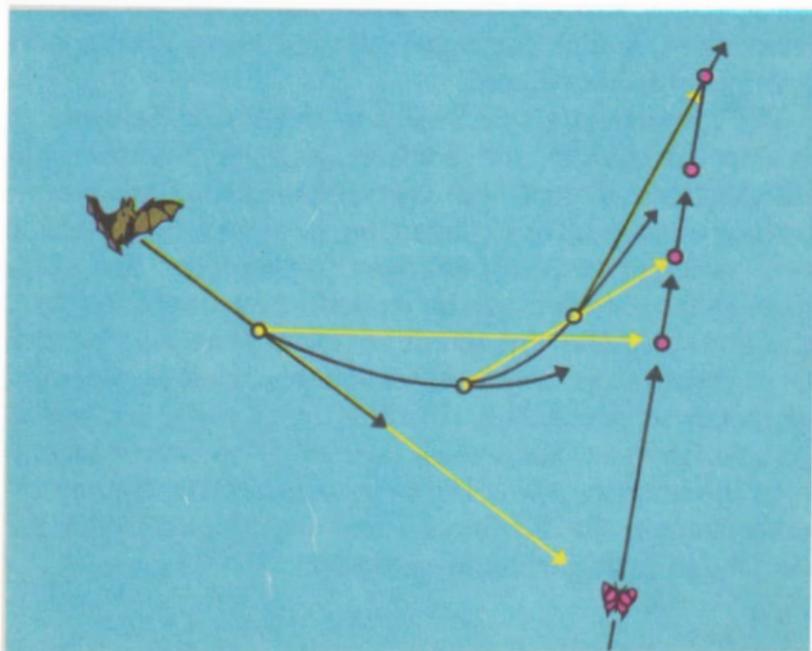
Wir wissen, daß Reize aus der Umwelt (und aus dem Körperinneren) in den Rezeptoren der Sinnesorgane elektrische Erregungen auslösen. Die Information über das Ausmaß der Erregung wird in Form von Impulsfolgen durch Nervenfasern zum Zentralnervensystem geleitet. Dort werden die Informationen verarbeitet, und als Ergebnis laufen Steuerbefehle wiederum in Form von elektrischen Impulsfolgen über die Nervenbahnen zu den Erfolgsorganen, etwa zu den Finger-, Arm- und Beinmuskeln des Tennisspielers oder des Wurftaubenschützen.

Eine erste grobe Analyse dieser Vorgänge zeigt, daß die

Geschwindigkeit, mit der das Zentralnervensystem arbeitet, eigentlich nicht ohne weiteres verständlich ist. Zur Zeit gibt es nur einige Vorstellungen und Annahmen darüber, wie das Zentralnervensystem seine hohen Operationsgeschwindigkeiten erreicht. So gut wie sicher ist jedoch, daß es nach einer völlig anderen Organisation arbeitet als die Computer der Gegenwart.

Um eine möglichst hohe Arbeitsgeschwindigkeit zu erreichen, hat man bei elektronischen Datenverarbeitungsanlagen und Rechengerten in erster Linie versucht, die Leitungswege zwischen den verschiedenen Schaltungsteilen so kurz wie möglich zu gestalten und elektronische Bauelemente zu entwickeln, die möglichst hohe Schaltgeschwindigkeiten besitzen. Sehr viel Zeit wird aber noch für Ein- und Ausgabe, für Verschlüsselung (Codierung) und Entschlüsselung (Decodierung) von Informationen verbraucht. Das Zentralnervensystem arbeitet im Gegen-

Fledermaus auf Beutefang. Flugrichtung und Flugbahn des Tieres in verschiedenen Phasen; die Skizze veranschaulicht die auf der Grundlage eines »biologischen Ortungssystems« erfolgende Bahnkorrektur des Beutefängers



satz zu den heute noch üblichen Computern, die auf der Grundlage der Dualverschlüsselung von Signalen funktionieren, sehr wahrscheinlich nach dem viel schnelleren Analogprinzip. Außerdem enthält seine Arbeitsweise noch einige andere Besonderheiten, auf die wir später zurückkommen müssen.

Tennisspieler und Wurftaubenschütze erwerben ihre Fähigkeiten durch Training. Sie vermindern dabei die bewußten Anteile der Gesamtreaktion und erhöhen die unterbewußten. Das führt zu erheblichen Verkürzungen der Signal- und Steuerbefehlswege innerhalb des Nervensystems und dadurch zu größerer Aktionsgeschwindigkeit und -sicherheit.

Während die Entwicklung der computergesteuerten Regelung von Prozessen auf der Grundlage der Erkenntnisse über elektronische Systeme erst vor wenigen Jahrzehnten begonnen hat, ist das menschliche Zentralnervensystem im »Laboratorium Natur« in Millionen von Jahren durch Auslese und fortwährende Anpassung an die Umweltbedingungen entstanden. Dabei hat die Natur nur das für das jeweilige Lebewesen Notwendige »entwickelt«. Bei Dunkelheit oder dichtem Nebel sieht z. B. der Wurftaubenschütze nichts. Dagegen finden wir im Tierreich eine ganze Reihe von Orientierungssystemen, die bei völliger Dunkelheit, in dichtem Nebel oder in trübem Wasser ausgezeichnet funktionieren.

Die Umwandlung von Reizen in elektrische Erregungen in den Rezeptoren, die Weiterleitung von Impulsen mit Informationsinhalten über Nervenbahnen und die Verarbeitung dieser Informationen im Nervensystem werden von vielen Forscherkollektiven untersucht. Ihre Problemstellungen kann man im wesentlichen in zwei Richtungen einteilen. Die eine strebt an, mehr über die lebenden Organismen zu erfahren, insbesondere auch in die Geheimnisse der menschlichen Hirnfunktionen tiefer einzudringen. Aufgabe der anderen ist es, neue Wege für die technische Elektronik, etwa für höherorganisierte Computergenerationen, für die Steuer- und Regeltechnik oder für die Objektortungstechnik, zu finden.

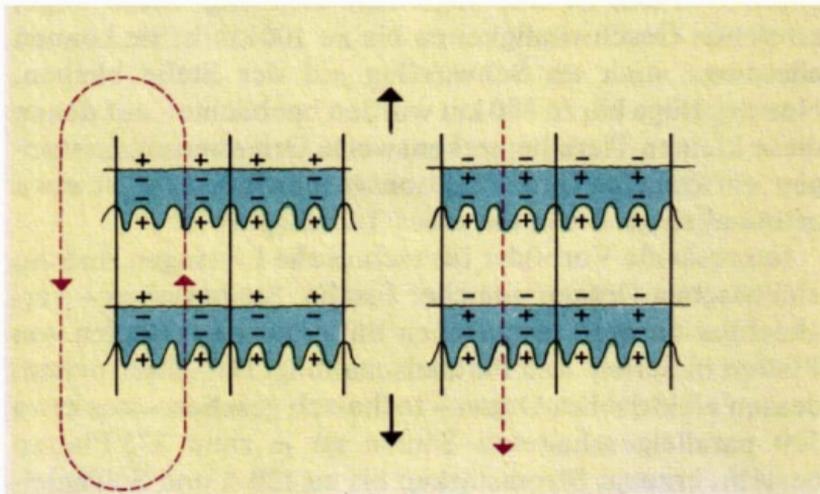
Vorbild Natur

Meist wird uns gar nicht bewußt, wie viele bekannte Lösungen technischer Probleme ihre Vorbilder in der Natur besitzen. Seit Jahrtausenden sind natürliche Erscheinungen und Vorgänge eine Quelle für die Ideen von Forschern, Erfindern und Konstrukteuren. Zellen- und Faserstrukturen der Pflanzen, Höhlen- und Nestbau vieler Tiere waren und sind Anregungen für Baukonstruktionen. Die Formen der Fische, der Flug der Insekten und Vögel geben oft nahezu Ideallösungen hydro- und aerodynamischer Probleme. Von den teilweise phantastischen Leistungen mancher Tiere soll ein Beispiel für viele stehen. Es gibt Kolibris, die in einer Sekunde siebenzig bis achtzig Flügelschläge ausführen. Das ist eine ungeheure Leistung. Diese Vögel erreichen Geschwindigkeiten bis zu 100 km/h; sie können allerdings auch im Schwirrfly auf der Stelle bleiben. Nonstopflüge bis zu 800 km wurden beobachtet, auf denen diese kleinen Tiere bemerkenswerte Orientierungsleistungen entwickeln. Ihre Reaktionsgeschwindigkeit ist etwa zehnmal so groß wie die eines Tennisspielers.

Interessante Vorbilder für technische Lösungen sind die elektrischen Organe mancher Fische. Sie bestehen – vergleichbar unseren technischen Batterien – aus Säulen von Platten in Serien- und Parallelschaltung. Der Zitterrochen, dessen elektrisches Organ – technisch gesehen – aus etwa 500 parallelgeschalteten Säulen zu je rund 375 Platten besteht, erzeugt Stromstärken bis zu 120 A und Schlagleistungen zur Verteidigung und zum Beutefang von 1,8 bis 5 kW. Der Zitteraal, dessen elektrisches Organ wegen der geringeren elektrischen Leitfähigkeit des Süßwassers, in dem er lebt, auf höhere Spannungen bei geringeren Stromstärken eingerichtet ist, erzielt elektrische Schläge von 300 bis 800 V und etwa 1 A. Der am Kopf befindliche positive Pol seines elektrischen Organs bewirkt ein so starkes elektrisches Feld, daß sich in der Nähe aufhaltende Fische gezwungen werden, in Richtung dieses Pols und somit dem Zitteraal geradezu ins Maul zu schwimmen. Nach dem gleichen Prinzip des elektrischen Fischfangs arbeiten heute Fischer in den Binnengewässern und auch Fangschiffe auf dem Meer.



Zitteraal



Querschnitt durch eine elektrische Zelle des Zitteraals. Links: Zelle in Ruhestellung; rechts: aktivierte Zelle. Die schwarzen Pfeile geben die Richtung zum Kopf des Tieres (nach oben) bzw. zum Schwanzende an.

Wir könnten noch viele Beispiele nennen, in denen der Mensch von der Natur gelernt hat. In jüngster Zeit hat man begonnen, systematisch derartige »Lösungen« der Natur zu erforschen und auf den verschiedensten Gebieten technisch nutzbar zu machen. Diese junge Wissenschaft hat den Namen Bionik erhalten.

Nun liegt natürlich der Gedanke sehr nahe, unter den verschiedenartigen Rezeptoren der Lebewesen – den bio-

logischen Meßfühlern für Umweltreize – nach Vorbildern für empfindlichere oder auch stabilere technische Meßmethoden zu suchen, aus biologischen Regelmechanismen neue Erkenntnisse für technische Steuer- und Regelprobleme zu gewinnen und vor allem die großen Vorzüge der Informationsverarbeitung in tierischen und menschlichen Zentralnervensystemen für die elektronische Datenverarbeitung zugänglich zu machen.

In der Technik geschieht die Informationsverarbeitung heute vorwiegend mit elektronischen Mitteln, wobei man vorzugsweise mit integrierten Festkörperschaltkreisen auf der Basis von Halbleitern, mit metallischen Leiterbahnen und dünnen Isolatorschichten arbeitet. In ihnen bewegen sich hauptsächlich Elektronen.

In den Nervensystemen der Lebewesen findet der Transport elektrischer Ladung in der Hauptsache durch die viel größeren Ionen statt. Er wird deshalb z.T. durch andere physikalische Gesetze bestimmt. Bei unbeweglichen oder wenig beweglichen Molekülen biologischer Strukturen, etwa den Riesenmolekülen der Eiweiße, treten wahrscheinlich auch Elektronenübergänge von einem zum anderen Ort oder Zustand innerhalb eines Moleküls auf. Sie bilden dadurch unterschiedliche Zustände innerhalb des Zentralnervensystems. Darüber ist aber bis jetzt so gut wie nichts bekannt, und man kann nur vermuten, daß auf diesem Gebiet noch viele Geheimnisse verborgen sind, die nicht so schnell zu entschleiern sein werden.

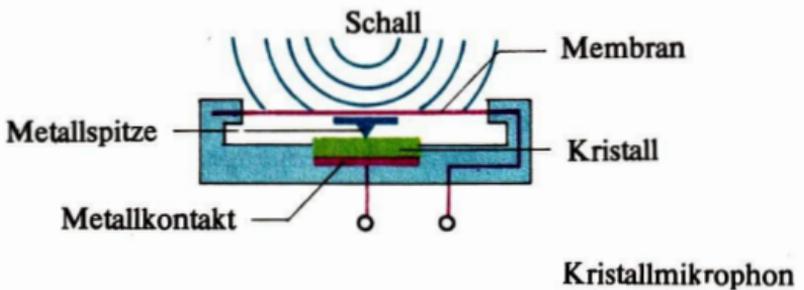
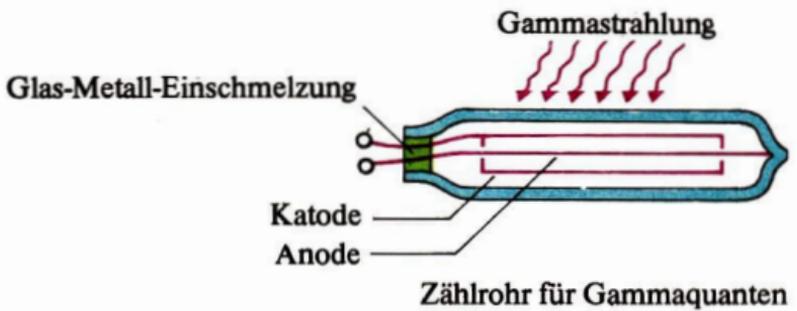
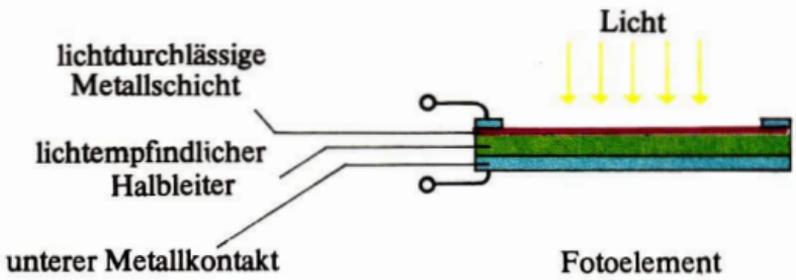
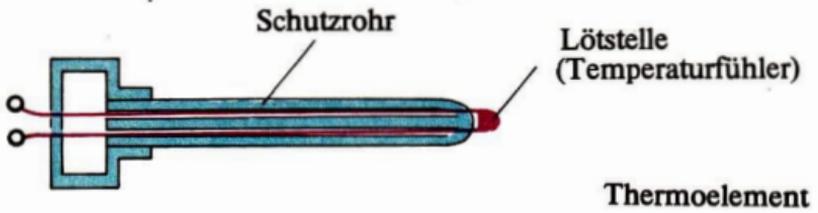
Von großer Bedeutung für das Verständnis der komplexen Vorgänge der Informationsverarbeitung im Zentralnervensystem sind die Grundlagen und Ergebnisse der Kybernetik, der Wissenschaft von den Steuerungsprozessen und den Prozessen der Signalübertragung in Maschinen und Lebewesen. Die Anwendung kybernetischer Methoden auf das Studium von Steuer- und Regelprozessen und auf die Vorgänge bei der Informationsverarbeitung in lebenden Organismen führte zu vielen wertvollen Erkenntnissen. Weitere Erfolge sind zu erwarten. Andererseits wird das immer tiefere Eindringen in die Geheimnisse der biologischen Regelung und Informationsverarbeitung neue grundlegende Erkenntnisse für die Kybernetik bringen.

Meßfühler für Umweltreize

Tiere und Menschen sind in der Lage, aus der Umwelt ständig eine Fülle von Signalen aufzunehmen. Im Laufe der biologischen Entwicklung haben sich für bestimmte Umweltreize bestimmte Organe und Wahrnehmungsfähigkeiten herausgebildet. So entstanden z. B. Gesichtssinn, Gehörsinn, Tastsinn, Geruchssinn, Gleichgewichtssinn, Wärme- und Kältesinn.

Der Wahrnehmungsprozeß beginnt an den Sinnesendstellen, den Rezeptoren, die die eintreffenden Reize in elektrische Signale umwandeln. Bei den Wirbeltieren, z. T. aber auch bei den Insekten haben die verschiedenen Rezeptoren einen sehr hohen Grad von Leistungsfähigkeit erreicht. Das trifft besonders auf die optischen, die akustischen und die Chemorezeptoren zu. Allerdings ist ihr Wirkungsbereich mehr oder weniger eingeschränkt. Das menschliche Ohr z. B. empfindet akustische Schwingungen nur im Bereich von etwa 15 Hz bis 14 kHz als Töne oder Geräusche. Das menschliche Auge kann elektromagnetische Schwingungen nur mit Frequenzen zwischen 4,0 und $8,2 \cdot 10^{14}$ Hz wahrnehmen. Dagegen sehen Bienen und andere Insekten sogar im ultravioletten Strahlungsbereich. In völliger Dunkelheit können einige Schlangen ihre Beutetiere durch deren Wärmestrahlung orten. Fledermäuse und Nachtschmetterlinge empfinden akustische Schwingungen, die für den Menschen im Ultraschallbereich liegen. Verschiedene Fische besitzen sehr empfindliche Rezeptoren, mit denen sie Schwankungen der Stärke elektrischer Felder feststellen können. Ferner gibt es bei Fischen ein Ferntastorgan, das sogenannte Seitenlinienorgan, das auf kleinste Druckschwankungen reagiert.

Der ultraviolette Teil der Sonnenstrahlung ist für uns unsichtbar. Dennoch empfinden wir seine Wirkung, wenn er zu Verbrennungen der Haut führt. Nachdem schließlich auch die Röntgenstrahlen und die verschiedenen radioaktiven Strahlungen entdeckt worden waren, konnte nicht mehr übersehen werden, daß in der Umwelt viel mehr vorgeht, als die Menschen mit ihren Sinnen wahrnehmen. Der ganze Raum um uns herum ist erfüllt von Wellen- und Teilchenstrahlungen, von Luftströmungen und Druck-

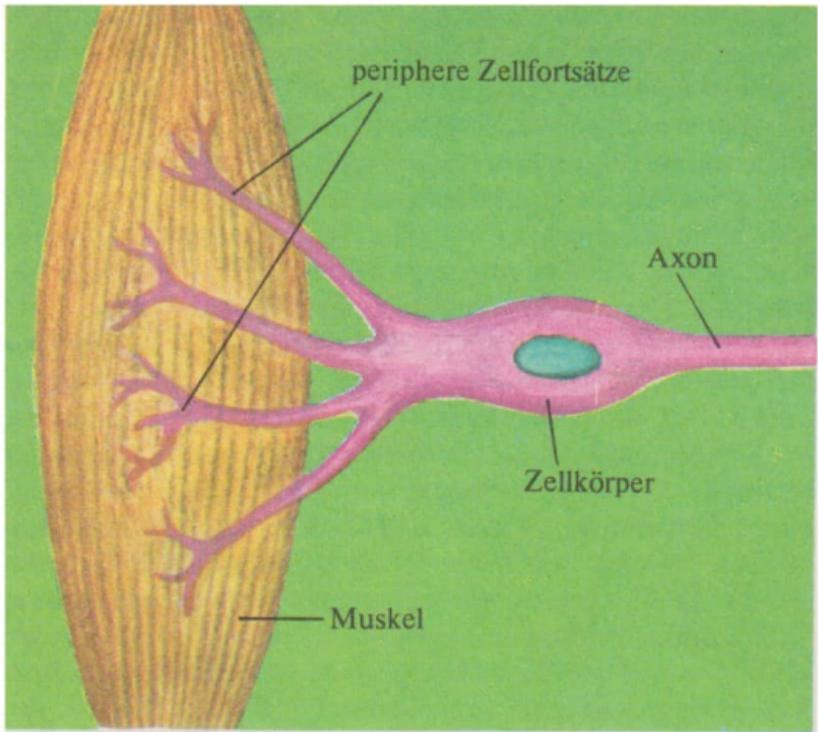


schwankungen. Aus dem Weltraum regnen ununterbrochen verschiedene atomare Teilchen auf die Erdoberfläche herab. Vor allem sind es Kerne von Wasserstoffatomen (Protonen), die mit so hoher Energie auftreffen, daß sie noch in 10 m Wassertiefe nachzuweisen sind. Außer dem mit unseren Augen wahrnehmbaren Licht der Sterne gelangt von zahlreichen kosmischen Objekten her eine Radiostrahlung auf die Erde, die wir erst nach der Entwicklung der Radartechnik, der Funkortung mit Hilfe von Ultrakurzwellen, entdecken konnten. Der Mensch lebt also tatsächlich unter kosmischen Einflüssen.

Für alle diese verschiedenen Strahlungen, für elektrische und magnetische Felder und viele andere physikalische Vorgänge wurden zahlreiche technische Rezeptoren entwickelt. Wir messen Licht mittels Fotodioden und mit Hilfe von lichtempfindlichen elektrischen Widerständen, mechanische Schwingungen mit Piezoquarkristallen, magnetische Felder mit der Magnetnadel oder mit speziellen kleinen Halbleiterbauelementen, sogenannten Hallgeneratoren. Röntgen- und Gammastrahlen werden auf speziellen Fotoplatten registriert, sind aber noch genauer durch Ionisationskammern und Zählrohre zu messen. Mit den beiden zuletztgenannten Geräten kann man sogar die einzelnen atomaren Teilchen einer radioaktiven Strahlung zählen, durch besondere Anordnungen ihre Energiemenge messen und ihre Flugrichtung bestimmen.

Technische Meßfühler leisten im Prinzip Ähnliches wie biologische Rezeptoren. Sie wandeln die spezifische Energie des zu messenden Vorgangs in elektrische Energie um, die, verstärkt und als Informationsgröße fortgeleitet, schließlich zur Anzeige gebracht oder ausgewertet wird. In ihrer Gesamtheit überdecken die technischen Meßfühler einen viel weiteren Bereich von Vorgängen als die biologischen Rezeptoren. Naturgemäß entwickelten sich diese biologischen Meßfühler nach den notwendigen Bedürfnissen zur Erhaltung des Individuums und der Art, dafür aber in einer erstaunlich leistungsfähigen und dabei – gemessen an unserer modernen Mikroelektronik – meist winzigen Form.

Neben den Signalen, die ein Lebewesen über seine Rezeptoren von der Außenwelt empfängt, erhält sein



Dehnungsrezeptor des Flußkrebses

Zentralnervensystem auch Informationen von einer großen Zahl innerer Rezeptoren, etwa von Schmerzrezeptoren oder von Dehnungsrezeptoren aus dem Verdauungstrakt oder der Skelettmuskulatur. Chemorezeptoren sind an der Regulation von Atmung und Blutkreislauf beteiligt, andere stellen die Meßglieder für die Salz-, Zucker- und Mineralstoffregulation dar. Temperaturrezeptoren gewährleisten die konstante Körpertemperatur bei Warmblütern oder die Anpassung des Stoffwechsels an die Außentemperatur bei Kaltblütern. Zum weitaus größten Teil werden die Informationen von all diesen inneren Rezeptoren ohne Mitwirkung des Bewußtseins in niederen Zentren des Zentralnervensystems verarbeitet.

Vergleicht man nun die verschiedenen biologischen Rezeptoren mit entsprechenden technischen Meßfühlern anhand konkreter Kennwerte, so erweisen sich die biologischen Rezeptoren den jeweiligen technischen Konstruktionen oft weit überlegen. Häufig besitzen die Meß-

föhler der Lebewesen eine so hohe Empfindlichkeit, daß sie von analogen technischen Anordnungen nicht im entferntesten erreicht werden. Die Hell-Dunkel-Rezeptoren des menschlichen Auges sprechen auf ein bis zwei Lichtquanten an. Das entspricht, bezogen auf die Energie, etwa der 10^8 -fachen Empfindlichkeit eines Zählrohres oder einer Ionisationskammer, die einzelne Gammaquanten nachweisen können. Die Chemorezeptoren einiger Tiere reagieren bereits auf einzelne Moleküle eines Geruchsstoffes.

Erstaunlich ist auch die fast unvorstellbare Kleinheit der meisten biologischen Rezeptoren, die noch den Vorzug haben, daß ihr Energieverbrauch außerordentlich gering ist. Um nur ein Beispiel zu nennen: Im menschlichen Auge sind etwa 150 000 Lichtrezeptoren auf einem Quadratmillimeter konzentriert. Diese Kleinheit ist für die moderne Mikroelektronik von besonderem Interesse. Man braucht nur an die Ausrüstung einer Raumsonde zu denken, deren Größe und Gesamtleistungsvermögen von der Masse ihrer einzelnen Meßgeräte und Aggregate abhängen. Ist in den Rezeptoren das Signal umgewandelt, erfolgt in Netzen von Nervenzellen, mitunter noch im Sinnesorgan selbst, die erste Stufe der Informationsverarbeitung wiederum auf kleinstem Raum, mit minimalem Energieverbrauch und mit einer wunderbaren Perfektion. Eine weitere von technischem Standpunkt aus sehr hoch einzuschätzende Eigenschaft biologischer Rezeptoren ist ihre hohe Zuverlässigkeit. Sie arbeiten im Normalfall jahrzehntelang praktisch ohne jede Störung.

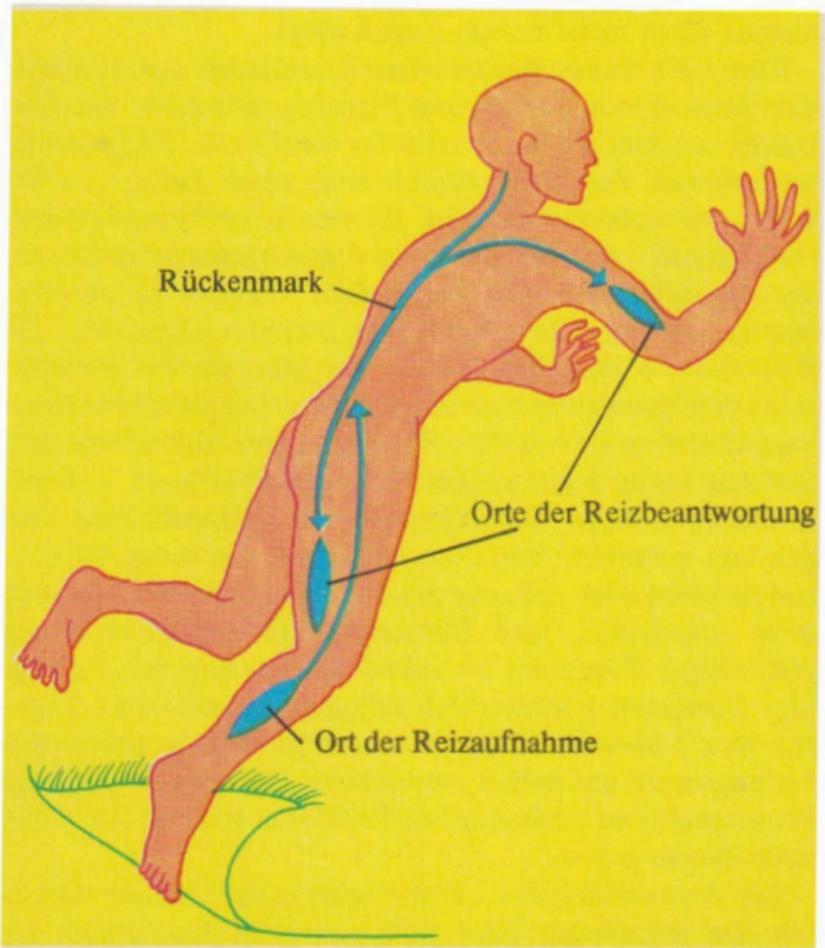
Kleinheit und minimaler Energieverbrauch, extrem hohe Empfindlichkeit und hohe Zuverlässigkeit – das sind gerade die Entwicklungsziele für technische Rezeptoren, die in Raumflugkörpern, für die Steuerung industrieller Prozesse und für viele andere Aufgaben der Meß-, Steuer- und Regeltechnik eingesetzt werden sollen. Es liegt also nahe, die biologischen Rezeptoren so eingehend wie nur irgend möglich zu erforschen, ihre Signaltransformation zu studieren und die anschließende Signalverarbeitung kennenzulernen. Eines der – auf diesem Wege schon recht klar abgesteckten – Ziele besteht darin, Eingabegeräte für Computer zu entwickeln, die direkt gedruckten, handgeschriebenen oder auch gesprochenen Text verarbeiten.

Lernen und Training

Ein Neugeborenes kann nicht gehen, nicht gezielt greifen. Es versteht noch nicht die Bedeutung von Gesehenem und Gehörtem. Erst als Folge eines langen Lernprozesses werden die Muskelbewegungen fließend koordiniert. Es entwickelt sich allmählich die Fähigkeit, Laute zu bilden, diese mit immer höherem Informationsgehalt zu verbinden und auf Umweltereignisse gezielt zu reagieren. Auch im Erwachsenenalter werden noch Fähigkeiten durch Lernen und Training erworben.

Das Ergebnis erfolgreichen Trainings besteht darin, daß

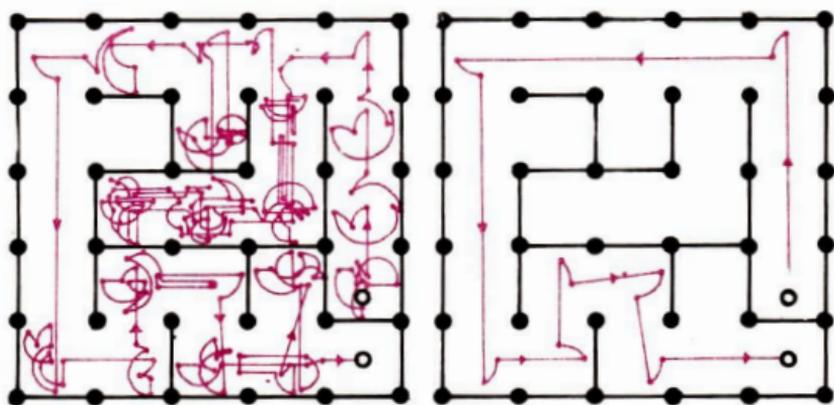
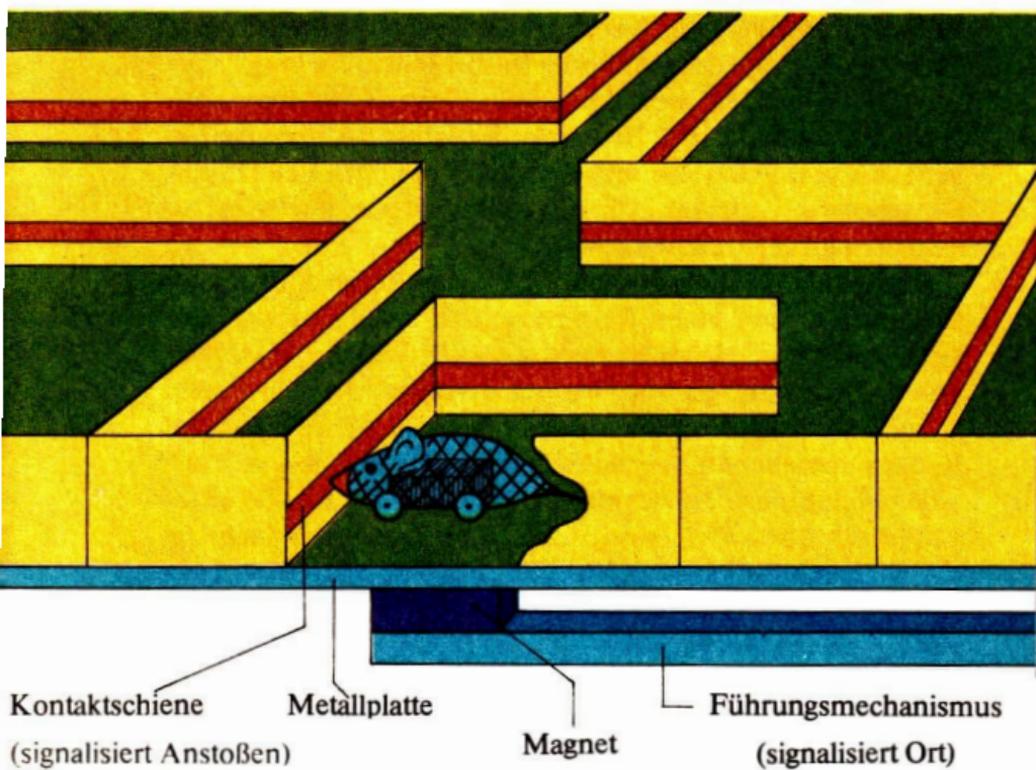
Reflexhandlung beim Stolpern



die Informationsverarbeitung zwischen Aufnahme der Signale und Reaktionen wesentlich verkürzt wird. Dabei wird der größte Teil dieser Informationsverarbeitung in Zentren des Zentralnervensystems verlagert, die unterhalb der Bewußtseinsschwelle arbeiten. Der gute Autofahrer reagiert richtig, ohne erst überlegen zu müssen. Der Tennisspieler denkt während des Spiels vielleicht über seinen Gegner oder über die anzuwendende Taktik nach, aber jedenfalls nicht über die Bewegungen seiner Arm- und Beinmuskeln. Steigen wir eine Treppe hinauf oder hinunter, werden die notwendigen Bewegungen auch bei hoher Schrittgeschwindigkeit exakt koordiniert. Sogar beim Stolpern reagieren wir automatisch so, daß meist ein Sturz verhindert wird. Haben aber die einzelnen Stufen ungewöhnliche Abmessungen, so spüren wir bei höherer Schrittgeschwindigkeit sofort, daß der eingeübte Mechanismus nicht mehr richtig funktioniert.

Vom informationstechnischen Standpunkt aus gesehen, entstehen durch Lernen und Training innerhalb des Zentralnervensystems mehr oder weniger feste Programme, nach denen Verhaltensweisen auch ohne Zutun des Bewußtseins ablaufen können. Ist eine solche Programmierung einmal vorhanden, dann genügt ein einziger auslösender Steuerbefehl, etwa der Befehl »Treppe hinuntergehen!«, und die Aktion wird ohne weiteres Mitwirken des Bewußtseins ablaufen, bis ein Stoppbefehl des Bewußtseins den Bewegungsfluß beendet. Bei komplexeren Handlungsabläufen – etwa dem Sprechen, dem Schreiben, dem Steuern eines Kraftwagens in einer Großstadt – liegen zwischen wenigen Steuerimpulsen des Bewußtseins Folgen von vorprogrammierten Abläufen. Die dabei im Zentralnervensystem ablaufenden Vorgänge sind im einzelnen noch unbekannt. Ihre Bedeutung für die Entwicklung zukünftiger Computer ist jedoch bereits erkannt. Lernfähige Computer könnten sich selbst programmieren, könnten ihre Leistungsfähigkeit von einer relativ primitiven Anfangsstufe aus selbst entwickeln. Die heute noch beim Programmieren vorhandenen Probleme würden auf völlig neue Weise gelöst.

Zur Anwendung des Lernprinzips in der Computertechnik sind jedoch durchaus nicht genaueste Kenntnisse der



Kybernetische Maus von C. Shannon und der Suchvorgang (rechts nach dem »Training«)

Verschaltungen von Nervenzellen erforderlich. Selbst deren technische Nachbildung muß nicht unbedingt vorausgesetzt werden, wenn man lernfähige Maschinen konstruieren will. Es gibt Beispiele dafür, daß schon die Erkenntnis von Arbeitsprinzipien, die an biologischen Objekten gewonnen wurden, für die Konstruktion von Maschinen verwertet werden kann.

Einfache, in beschränktem Maße lernfähige Automaten sind bereits seit einer Reihe von Jahren als sogenannte kybernetische Spielzeuge bekannt, so z. B. die Maschine von C. Shannon, die das Verhalten einer Maus in einem Labyrinth imitiert. Die »Maus« besteht aus einem mit Rädern versehenen, magnetischen Eisenstück, das sich auf einer Metallplatte bewegen kann, auf der die Wände eines Labyrinths befestigt sind. Unterhalb der (nichtmagnetischen) Platte befindet sich ein Führungsmechanismus, der mit Hilfe eines Magneten die »Maus« in Bewegung setzt. Anfangs »fährt« die »Maus« ganz zufällig in irgendeiner Richtung. Stößt sie an eine Wand, führt sie eine Drehung um 90° aus, so daß sie weiterrollen kann. Jeder Anstoß wird einem Computer signalisiert und dort als Erfahrung der »Maus« gespeichert. Auf diese Weise wird in den Speicher des Computers für die von der »Maus« erforschten Felder des Labyrinths ein Steuerprogramm eingeschrieben. Beim zweiten Durchlaufen des Labyrinths gelangt die »Maus« mit wesentlich weniger Anstößen ans Ziel. Auf einem bestimmten Feld angekommen, meldet sie die Feldkoordinaten an den Steuercomputer, wo die dem Feld und seiner quadratischen Form entsprechenden vier Drehmöglichkeiten aus dem Speicher abgefragt werden. Das Ergebnis geht als Steuerbefehl an den Führungsmechanismus der »Maus«. Nach wenigen Durchläufen ist das Steuerprogramm so vervollständigt, daß sie das Labyrinth ohne Fehler passiert. Die »Maus« hat »gelernt«, sich durch den Irrgarten zu bewegen.

Man sieht, daß der Umfang dessen, was ein technisches System lernen kann, unter anderem von der Kapazität seines Informationsspeichers abhängt. Die Speicherkapazität eines informationsverarbeitenden Systems – lernfähig oder nicht lernfähig – ist eine seiner wichtigsten Kenngrößen. Sie wird üblicherweise in bit ausgedrückt. Ein bit

entspricht einer Ja-Nein-Antwort bzw. einer Ziffer im Dualsystem (0 oder 1). Große Elektronenrechner der Gegenwart besitzen Speicherkapazitäten von 10^5 bis 10^6 bit. In den nächsten Jahren hofft man, 10^8 bis 10^{11} bit realisieren zu können. Dagegen wird die Speicherkapazität des menschlichen Zentralnervensystems auf etwa 10^{13} bit geschätzt. Dabei gibt es wie in der Technik auch im biologischen Bereich verschiedene Arten der Informationsspeicherung. Die Prinzipien dieser biologischen Informationsspeicher zu erforschen dürfte eine der interessantesten Aufgaben sein, deren Bedeutung schon ein einfacher Vergleich mit herkömmlichen technischen Aggregaten veranschaulicht. Sollen mikroelektronische Speicher in Großflächenintegrationstechnik (Large Scale Integration – LSI-Technik) mit Speicherkapazitäten von 10^8 bis 10^9 bit ausgestattet werden, so braucht man mehrere Kubikmeter Raum. Das Zentralnervensystem bringt die 10 000fache Menge auf einigen hundert Kubikzentimetern unter. Auch ist zu erwarten, daß die Erkundung biologischer Speichermechanismen zu einem gründlicheren Verständnis der menschlichen Lernprozesse führt. Eine verbesserte Methodik für Unterricht und Studium wäre ein praktisches Ergebnis dieser Forschungen.

Für das Verarbeiten von Informationen sind außer der Kapazität eines Speichers natürlich noch andere Kenngrößen wichtig, etwa sein Eigenverbrauch an Energie oder seine Organisationsform, die die Zeit für das Abrufen einer Information – die Speicherzugriffszeit – wesentlich bestimmt. Auch hier sind die biologischen Speicher den technischen weit überlegen.

Das Zurückholen früher erhaltener Informationen ins Bewußtsein nennen wir Erinnern, den entsprechenden Speicher Gedächtnis. Die Zugriffszeiten zu diesem Speicher reichen von Bruchteilen von Sekunden bis zu Tagen und Wochen. Viele Informationen werden scheinbar vergessen. Unter bestimmten äußeren Umständen geraten sie dann doch wieder in Erinnerung. Solche Erscheinungen betreffen jedoch nicht nur die Sphäre des Bewußtseins. Eine früher trainierte, aber lange nicht ausgeübte Handlung gelingt nicht recht. Jedoch schon nach einigen Versuchen, die viel weniger Zeit beanspruchen als ein erstes Einüben,

kehrt das alte Können zurück. Die früher gespeicherten Programme für die koordinierte Muskelbewegung sind wieder voll aktivierbar.

Alle diese Erscheinungen machen die besondere Organisationsform des Speicherns und Wiederabrufens der Informationen im Zentralnervensystem deutlich. In den gegenwärtigen Computern werden alle Informationen mit Hilfe von Adressen gespeichert, die den Platz oder die Koordinaten bezeichnen, wo eine Information deponiert ist. Wird z. B. ein Zwischenergebnis in den Speicher einer elektronischen Rechenmaschine gegeben, daß in einem späteren Stadium der Rechenoperation wieder herausgeholt werden soll, so muß das Steuerprogramm des Elektronenrechners an dieser Stelle die Speicheradresse des betreffenden Zwischenergebnisses enthalten. Die Speicheradressen erfordern zusätzliches Speichervolumen. Das Aufsuchen verlangsamt die Arbeitsweise des Computers.

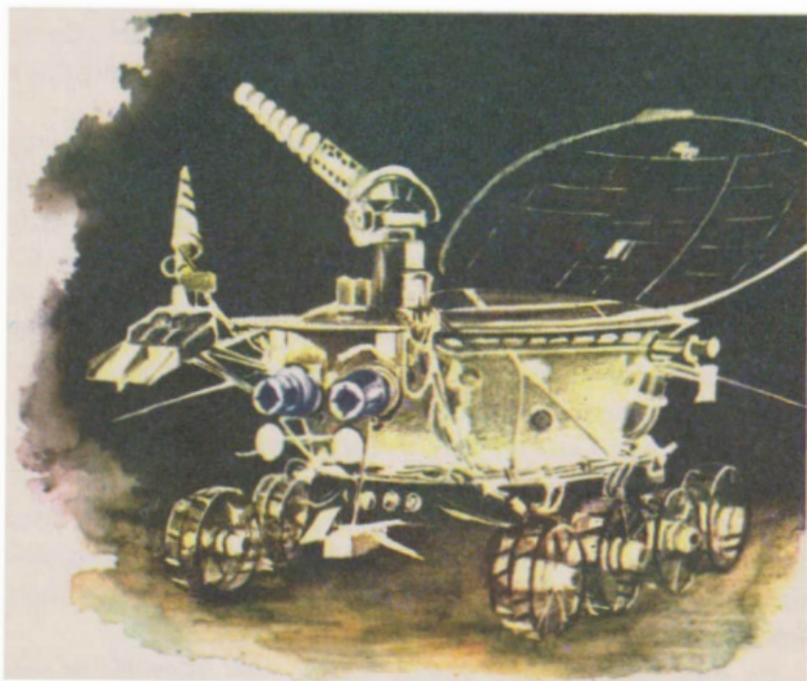
Menschen und Tiere dagegen rufen Informationen nach einem völlig anderen Prinzip aus ihren Speichern ab. Anstelle von Speicheradressen benutzen sie Assoziationen – Beziehungen, Verknüpfungen zwischen gegenwärtigen Ereignissen und früher gespeicherten Informationen. Es genügen wenige Signale oder kurze Signalfolgen, die nur Bruchteile der gesamten Information ausmachen, aber charakteristisch für diese Information sind, um die ganze Information aus dem Speicher abzurufen. Der Ort innerhalb des Speichers, wo diese Information gespeichert war, spielt dabei vermutlich nur eine untergeordnete Rolle.

Diese assoziative Organisationsform der Speicher des Zentralnervensystems erlaubt eine wesentlich schnellere Arbeitsweise und ermöglicht außerdem das Speichern einer größeren Informationsmenge bei gleicher Anzahl von Speicherplätzen.

Roboter

Noch am Anfang dieses Jahrhunderts erschienen der Mensch und insbesondere sein Denken, Fühlen und Handeln – die Leistungen seiner Intelligenz – als etwas Einmaliges und Unerforschliches. Mit der Entwicklung immer besserer Computer geriet diese Auffassung zumindest teilweise ins Wanken. Nachdem die Erkenntnis Fuß gefaßt hatte, daß auch Maschinen Intelligenzleistungen vollbringen können, für die vorher nur der Mensch allein befähigt zu sein schien, und es sich erwiesen hatte, daß solche Maschinen dem Menschen sogar in vielen Dingen überlegen sein können, entstanden Vorstellungen von zukünftigen Maschinen, die den Menschen in jeder Hinsicht übertrafen. Die Phantasie schuf Wesen aus Blech, Glühlampen und Spiralfedern, die Öl trinken, die gehen, sprechen, greifen und Antennen auf monströsen Köpfen tragen.

Lunochod 1, der erste fahrbare, ferngesteuerte Mondautomat, mit zahlreichen »Sensoren« zum Erfassen von Umweltfaktoren ausgestattet



Pessimisten zeichneten Zukunftsbilder von einem Zeitalter der Roboter, in dem für Menschen kein Platz mehr war.

Auch wenn wir Unsinn oder Abwegigkeit solcher Übertreibungen erkennen, sollten wir nicht an dem Gedanken vorbeigehen, daß die künftige Technik noch stärker als heute das Leben der Menschen beeinflussen wird. Muß uns dann auf unseren Schritten in die unbekannte Zukunft Angst erfassen? Gewiß birgt diese künftige Technik auch Gefahren in sich. Inwieweit aber derartige Gefühle begründet sind, hängt von der Gesellschaftsordnung ab, in der den Forschern Aufgaben gestellt, in der wissenschaftliche Ergebnisse zum Nutzen der gesamten Gesellschaft oder im Interesse eines immer höheren Profits verwendet werden. Je gewaltiger die Möglichkeiten zukünftiger Technik sein werden, desto höher muß das Verantwortungsbewußtsein derer sein, die mit ihr umgehen. Es wäre deshalb einseitig und falsch, wenn wir hier nur biologische und technische Aspekte sehen würden. Gerade auf den Gebieten der Erforschung biologischer Informationsaufnahme und -verarbeitung sind Entwicklungstendenzen erkennbar, die zu Gefahren für die gesamte Menschheit führen können. Diesen rechtzeitig zu begegnen ist in erster Linie eine Pflicht der fortschrittlichen Wissenschaftler. Schädliche Tendenzen zu bekämpfen und ihre sozialen Wurzeln zu beseitigen muß zur Aufgabe aller vernünftigen Menschen werden.

Vom technischen Standpunkt aus gesehen, dürfte es sicher sein, daß Roboter von menschenähnlicher Gestalt weit abseits realer Entwicklungstendenzen liegen. Heute tatsächlich schon existierende Maschinen, die man als Roboter bezeichnen könnte, haben ein völlig anderes Aussehen. Eines der hervorragendsten Beispiele stellen die Lunochods dar – ferngesteuerte Automaten mit Sende- und Empfangsanlagen, einer Reihe von Meßeinrichtungen und elektronischen Geräten zur Verarbeitung der gemessenen Daten. Sie nehmen auf der Mondoberfläche über Meßeinrichtungen (Sensoren) Informationen aus ihrer Umgebung auf, sortieren sie, speichern sie vorübergehend und senden sie schließlich sukzessiv zu irdischen Empfangsstationen, wo sie ausgewertet werden können.

Es gibt bereits eine ganze Reihe von Maschinen für

bestimmte Leistungen, die man früher nur dem Intellekt des Menschen zutraute. Bekannt sind schachspielende Automaten, Computer, die Sprachen übersetzen, medizinische Diagnosen stellen oder die Kontenführung einer ganzen Sparkasse erledigen, wieder andere, die die komplette Steuerung einer Walzstraße in einem Stahlwerk übernehmen. Sie stellen gleichsam Einzweckroboter dar, die sich der Mensch zur Sicherung einer hohen Produktivität der Arbeit geschaffen hat. Allerdings können sie nur Aufgaben erfüllen, für die sie eingerichtet wurden.

In naher oder ferner Zukunft werden neue Erkenntnisse aus den Forschungen über die menschlichen und tierischen Sinnesorgane in technische Konzeptionen für noch leistungsfähigere Maschinen eingehen. Lernfähige Automaten, die, ausgehend von einfachen Programmen, selbst ihre Leistungsfähigkeit erweitern, die sich also selbst programmieren, sind heute schon Realität in einigen Laboratorien. In ein oder zwei Jahrzehnten werden sie zur allgemeinen technischen Praxis gehören. Datenverarbeitungsanlagen mit Speichern, die nach dem Prinzip des biologischen Gedächtnisses arbeiten, werden dazu beitragen, daß zukünftige Automaten wesentlich kleiner als heute sind und dennoch eine größere Leistungsbreite aufweisen.

Zweifellos wird sich in naher Zukunft das Verhältnis des Menschen zu den Maschinen ändern. Lernfähige Automaten – gleichgültig, wie sie aussehen, werden erhebliche Teile der Arbeiten übernehmen, die heute noch von menschlichen Hirnen geleistet werden. In Voraussicht dessen hat man versucht, gründlicher als bisher zu erforschen, worin eigentlich das Wesen menschlicher Intelligenz besteht und wo etwa Unterschiede zwischen Mensch und Roboter erhalten bleiben könnten.

Zunächst stellt sich heraus, daß »Intelligenz« zu den verschwommensten Begriffen unserer Sprache gehört. Bisher ist es nur gelungen, wesentliche Merkmale der Intelligenz zu bestimmen. Dabei gelangten Kybernetiker und Philosophen zu der Einsicht, daß nicht Feinheit, Genauigkeit und Geschwindigkeit bei der Ausführung von Operationen für eine Intelligenzleistung ausschlaggebend sind, sondern vielmehr Merkmale wie Ziel, Entscheidung und Voraussicht. Einstweilen können wir nur feststellen,

daß gerade zu diesen Problemen noch viel Forschungsarbeit zu leisten sein wird. Wir übersehen heute eben noch nicht, welche Leistungen unser Gehirn tatsächlich vollbringt. Infolgedessen fehlen wichtige Voraussetzungen, um an Fragen wie die nach dem Unterschied zwischen zukünftigen Robotern und Menschen herangehen zu können. Erhalten bleibt aber jedenfalls die Feststellung, daß die Menschen selbst diese Roboter schaffen werden und deren Eigenschaften bestimmen.

Probleme, die wir gegenwärtig lösen wollen, müssen bescheidener angesetzt sein. Die technischen Möglichkeiten aber, die wir auf diesem Wege finden werden, sind unübersehbar.

Sind Denkprozesse erforschbar?

Wir bezeichnen als Denken schlechthin alles, was in unserem Bewußtsein vorgeht – vom einfachen Vergleichen zweier Informationen, vom Gewinnen und Verwenden der Begriffe bis hin zum komplizierten Kombinieren zahlreicher Erfahrungen und Begriffsinhalte. Der Schulanfänger denkt angestrengt nach, um herauszufinden, wieviel 2 plus 5 ist. Der Physiker denkt über die Wechselwirkungsprozesse der Elementarteilchen nach, und der Dichter ersinnt Verse, die seine Gefühle ausdrücken.

Denken ist wiederum ein sehr unscharfer, weitgespannter Begriff. Die Frage, ob Tiere oder ob Computer denken können, ist nicht zu beantworten, ohne vorher genau zu definieren, was unter »Denken« verstanden werden soll.

Lange Zeit haben die Menschen ihr Denken als etwas selbstverständlich Existierendes hingegenommen. Zwar wurden Denkmethoden entwickelt – die Logik, die Dialektik. Man lernte, das Denken zu schulen, und gab die dafür ausgearbeiteten Methoden an die Nachkommen weiter. Jedoch die dem Denken zugrunde liegenden materiellen Prozesse blieben so gut wie unbekannt. Erst seit einigen Jahrzehnten können Strukturen und Funktionen von Nervenzellen und deren Verschaltungen intensiv erforscht werden. Grundlage dafür sind anatomische, physiologische und biochemische Untersuchungen am peripheren

und zentralen Nervensystem und an Sinnesorganen von Tieren und Menschen. Für das Verständnis biologischer Regelkreise, einzelner Zentren des Zentralnervensystems und des Zusammenwirkens dieser Zentren gewinnen außerdem die Methoden der Kybernetik mehr und mehr an Bedeutung.

Aus den bisher vorliegenden Ergebnissen weiß man, daß nervale Vorgänge ausschließlich auf materielle Prozesse zurückzuführen sind. Bestimmte Organisationsformen der Informationsverarbeitung sind in verschiedenen Zentren des Gehirns sowohl beim Menschen als auch bei Tieren anzutreffen. Das Denken ist demzufolge an bestimmte meßbare physikalische und chemische Prozesse im Nervengewebe gebunden. Seine Grundlagen haben sich, Naturgesetzen folgend, im Laufe der tierischen Evolution von den Einzellern bis hin zum Menschen entwickelt.

Aus dieser Erkenntnis folgt, daß Struktur und Funktionsweise des gesamten menschlichen Zentralnervensystems einschließlich des menschlichen Gehirns in allen ihren Einzelheiten und in ihrem systemhaften Zusammenspiel prinzipiell erforschbar sind. Das ergibt sich auch als Konsequenz der materialistischen Erkenntnistheorie und ihres Postulats von der Erkennbarkeit der Welt. Immerhin hat die daraus abzuleitende Formulierung, das menschliche Gehirn könne sich selbst erkennen und die Erkenntnisprozesse enträtseln, etwas Verblüffendes. Strenggenommen ist sie in dieser Form auch nicht richtig, denn das Werk dieser Erkenntnis wird nicht von einem Einzelgehirn vollbracht, sondern von einer großen Zahl von Gehirnen, von vielen Forscherkollektiven, deren Arbeitsgeräte wiederum von vielen anderen Kollektiven entwickelt worden sind. Durch die kollektive Arbeit entstehen Qualitäten, die dem einzelnen prinzipiell unerreichbar sind.

Meßsonden im »Ozean« Umwelt

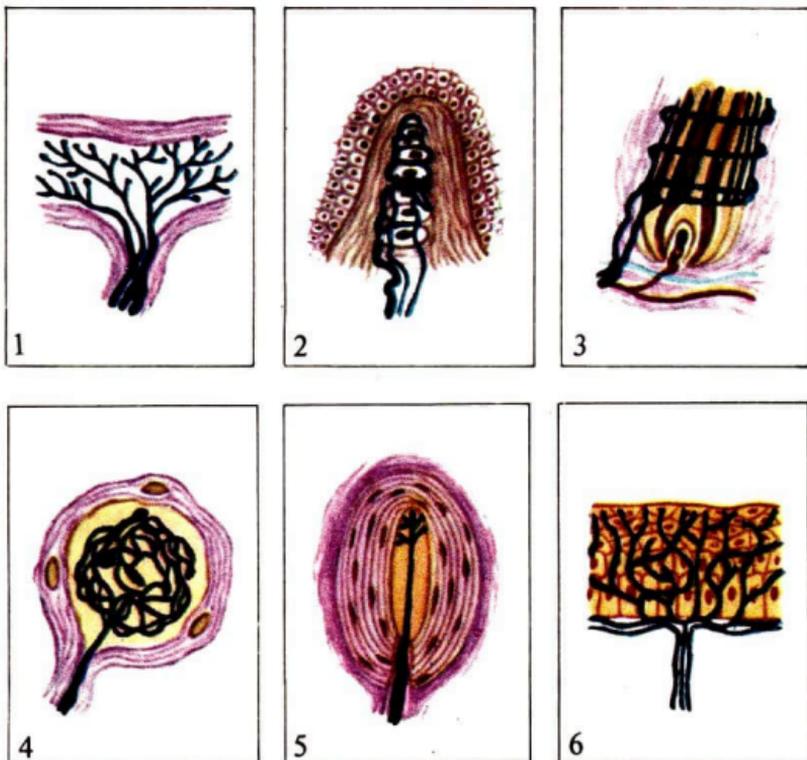
»Fünf Sinne hat der Mensch«, so heißt es im Volksmund. Damit sind Sehen, Hören, Riechen, Schmecken und Fühlen gemeint. Tatsächlich gibt es einige mehr, unter anderen den Schmerzsinne, den Temperatursinne und den Gleichge-

wichtssinn. Durch diese Sinne empfangen wir Informationen aus unserer Umwelt. Während einige Sinne in bestimmten Sinnesorganen – den Augen, den Ohren, dem Gleichgewichtsorgan, der Nase – lokalisiert sind, finden wir andere, z. B. Tastsinn, Temperatursinn und Schmerz-sinn, über den ganzen Körper verteilt.

Die biologischen Meßsonden dieser Sinnesorgane, die Rezeptoren, wandeln die spezifische Reizenergie (Licht, Schall, mechanische, chemische Energie) in elektrische Energie um. Wesentlich dabei ist der Signalcharakter der von den Rezeptoren aufgenommenen und umgewandelten kleinen Energiemengen. Die Rezeptoren müssen auf sehr kurzzeitige Einwirkungen und auf äußerst kleine Schwankungen in den empfangenen Energiemengen reagieren. Bei genauerem Betrachten finden wir, daß die meisten Rezeptoren gerade auf kleine, kurzzeitige Energieschwankungen spezialisiert sind. Die ruhende Umwelt hat für das Lebewesen wenig Bedeutung. Erst Bewegungen signalisieren Nahrung, Gefahren oder den Partner.

Bei gleichförmiger Einwirkung einer konstanten Energiemenge sinkt die Empfindlichkeit der meisten Rezeptoren allmählich ab. Sie passen sich an die Energieeinwirkung an. Jeder kennt diesen Effekt aus eigener Erfahrung. Treten wir z. B. aus einem dunklen Raum ins helle Sonnenlicht, so werden die auf hohe Empfindlichkeit eingestellten Lichtrezeptoren unseres Auges überfordert. Wir sind geblendet. Erst nach einer gewissen Zeit hat sich der Empfindlichkeitsbereich der Rezeptoren an die größere Lichtmenge angepaßt. Treten wir in den dunklen Raum zurück, so gewinnen die Lichtrezeptoren – wiederum nach einer gewissen Zeit – ihre höhere Empfindlichkeit zurück. Im Auge wird die Anpassung der Rezeptoren durch reflektorische Vorgänge, vor allem durch die Veränderung der Pupille, unterstützt.

Die Anpassung oder Adaptation der Rezeptoren hat für die nachfolgende Signalverarbeitung im Zentralnervensystem eine wichtige Bedeutung. Tritt am Rezeptor eine Energieänderung auf, so reagiert er darauf zunächst sehr empfindlich, indem er über die zugeordnete Nerven-faser viele Impulse »abfeuert«. Setzt sich der Energiezufluß konstant fort, dann verringert sich durch Anpassung des



Rezeptoren in der menschlichen Haut für verschiedene Empfindungen: 1 – Hitze, 2 – Berührung, 3 – leichte Berührung, 4 – Kälte, 5 – Druck, 6 – Schmerz. Bei diesen Rezeptoren handelt es sich um gleichartige Dendriten sensibler Neuronen, obwohl sie unterschiedlich strukturiert sind.

Rezeptors die Zahl der elektrischen Impulse je Sekunde (Impulsfrequenz) in der Nervenfasern und damit der Umfang der im Zentralnervensystem zu verarbeitenden Information. Die Adaptation ist ein Teil der Auswahl aus der Fülle der angebotenen Informationen.

Eine Ausnahme bilden unter anderen die Schmerzrezeptoren. Sie adaptieren nicht. Sie würden sonst ihre Aufgabe als Warner vor ernster Gefahr verfehlen!

Das funktionelle Prinzip der Rezeptoren ist in erster Linie auf Besonderheiten ihrer Zellmembran zurückzuführen, die wir ganz ähnlich auch bei anderen erregbaren Strukturen, z. B. Nervenzellen (Neuronen), wiederfinden. Auf beiden Seiten dieser etwa 10 nm (10^{-6} cm) dicken

Membran befinden sich verschiedenartige Ionen mit positiver oder negativer Ladung. Da die Konzentrationen dieser Ionen beiderseits der Membran verschieden sind, wandern die Ionen durch die Zellmembran in Richtung ihres Konzentrationsgefälles. Dabei werden sie jedoch je nach Ionenart unterschiedlich stark behindert. Aus dieser Wechselwirkung zwischen Ionen und Membran entwickelt sich ein Ladungsunterschied zwischen der Membraninnen- und -außenseite und damit eine Potentialdifferenz, eine elektrische Spannung.

Infolge dieser Einwirkung der spezifischen Reizenergie verändert sich die Durchlässigkeit der Membran für die verschiedenen Ionenarten. Ihre Konzentrationen beiderseits der Membran passen sich den neuen Membraneigenschaften an. Die damit verbundene Änderung der elektrischen Potentialdifferenz bezeichnet der Biologe als Erregung. Diese Erregung verkörpert gewissermaßen den transformierten Reiz. Sie wird von der anschließenden Nervenfasern übernommen und in Form von elektrischen Impulsen weitergeleitet. Nicht jeder Reiz löst ein entsprechendes Signal aus, sondern nur ein für den Rezeptor spezifischer, angepaßter Reiz.

Die den Stäbchen und Zapfen der Netzhaut adäquaten Reize bestehen aus elektromagnetischen Wellen mit Wellenlängen zwischen 365 und 750 nm. Für die Haarzellen der Gehörschnecke (Cochlea) im Innenohr sind es die Schallwellen, während die Riechzellen auf die Moleküle von Geruchsstoffen ansprechen, die sich den Riechzellenmembranen anlagern. Auf nichtadäquate Reize reagieren die Rezeptoren nicht oder aber erst bei sehr hoher Reizintensität (z. B. »Sterne sehen« bei einem Schlag auf das Auge).

Darüber, wie der Reiz die Durchlässigkeit der Rezeptormembranen für verschiedene Ionenarten verändert, ist bisher fast nichts bekannt.

Die Übertragung der Erregung vom Rezeptor auf die nachgeschaltete Nervenzelle erfolgt nur, wenn die Erregung des Rezeptors (das Rezeptorpotential) einen bestimmten Schwellenwert überschreitet. Ist das der Fall, dann entstehen in der fortleitenden Nervenfasern je nach Ausmaß der Schwellenwertüberschreitung ein oder meh-

rere elektrische Impulse. Das Rezeptorpotential selbst verändert seinen Wert stetig, entsprechend der Reizstärke. Die Impulse in der fortleitenden Nervenfasern sind immer gleich stark, besitzen alle die gleiche Amplitude. Hier entspricht die Zahl der Impulse je Zeiteinheit (die Impulsfrequenz) der Reizstärke. Bei Dauerreizung wird das anfangs auftretende Rezeptorpotential wieder kleiner, und folglich verringert sich auch die Impulsfrequenz in der anschließenden Nervenfasern. Dieses Verhalten stellt die schon erwähnte Adaptation (Anpassung) der Rezeptoren dar.

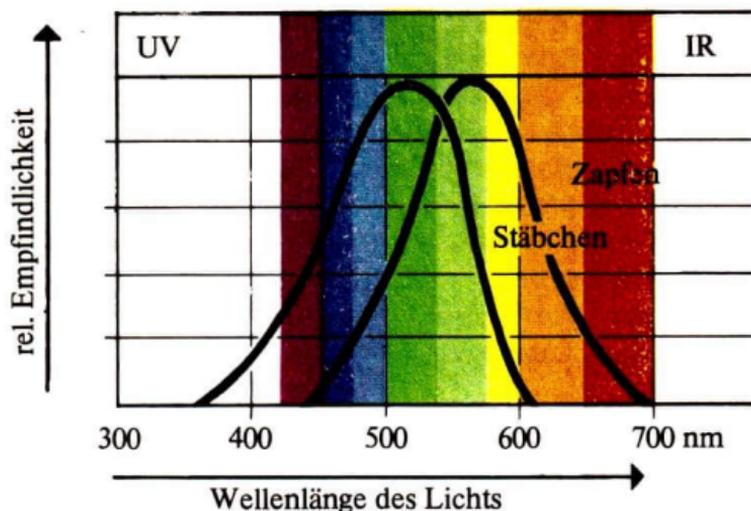
Die Sinnesorgane sind also hochempfindliche, spezialisierte Empfangsapparate, mit denen Veränderungen in der Umwelt (oder im Körperinneren) registriert werden. Als Meßsonden dienen bei Menschen und Tieren die Rezeptoren. Mit ihrer Hilfe erfassen sie die Umwelt.

Eine Aufgabe der Bionik ist es, die winzigen Meßsonden der Organismen, ihren Aufbau und ihre Arbeitsweise, die Funktionsprinzipien der Sinnesorgane sowie die Informationsverarbeitung im Zentralnervensystem zu analysieren und Wege für deren technische Nutzung aufzuspüren. Im Vordergrund stehen dabei unter anderem Probleme der Zeichenerkennung, der maschinellen Umwandlung von gesprochenen in gedruckte Sätze sowie die Entwicklung automatischer Verfahren zur chemischen Analyse.

»Lichtfühler«

Das normale menschliche Auge bemerkt eine glimmende Zigarette im Dunkeln auf Entfernungen von mehr als 100 m. Fotografische Aufnahmen des Nachthimmels zeigen viel mehr Sterne, als wir mit dem Auge wahrnehmen können. Sie entstehen aber durch sehr lange Belichtungszeiten, also durch zeitliche Summation von Lichtquanten. Die Momentempfindlichkeit der Fotoplatten ist nicht größer als die der biologischen Rezeptoren.

Im menschlichen Auge finden wir zwei Typen von Lichtrezeptoren – Stäbchen und Zapfen. Die Stäbchen sind die kleineren, lichtempfindlicheren Rezeptoren, vermitteln



Spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges

aber nur das Hell-dunkel-Sehen. Sie besitzen einen Durchmesser von etwa $2,5\mu\text{m}$, sind also zwanzig- bis dreißigmal dünner als ein menschliches Haar. Experimente haben wiederholt gezeigt, daß diese Stäbchen bereits auf ein bis zwei Lichtquanten des sichtbaren Strahlungsbereichs ansprechen.

Die etwas dickeren Zapfen der Netzhaut vermitteln das Farbsehen. Die Fähigkeit, Farben zu unterscheiden, ist nur bei wenigen Tieren vorhanden. Die meisten Säugetiere sind farbenblind, z. B. Mäuse, Hunde, Katzen und Rinder. Farbempfindliche Lichtrezeptoren besitzen dagegen neben dem Menschen auch Menschenaffen, Tintenfische und viele Insekten.

Der Mensch empfindet elektromagnetische Strahlung der Wellenlänge von 670 nm ($1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$) als dunkles Rot, etwa 460 nm als violett, die dazwischenliegenden Wellenlängen als helleres Rot, Orange, Gelb, Grün und Blau. An die Enden dieses relativ engen Bereichs schließen sich die weiten Bereiche der nicht mehr sichtbaren Strahlung des Infraroten und des Ultravioletten an. Die Empfindlichkeit der Farbrezeptoren ist im Gelbgrünen am größten und nimmt zum roten und zum violetten Ende des sichtbaren Spektrums hin ab. Das Empfindlichkeitsmaximum im Gelbgrünen entspricht dem Maximum der spek-

tralen Energieverteilung des Sonnenlichts und ist eine Folge der stammesgeschichtlichen Anpassung. Diese Anpassung hat bei farbsehenden Tieren mitunter zu anderen Ergebnissen geführt, die deren Lebensbedingungen besser entsprechen. So ließ sich mit Dressurexperimenten feststellen, daß Bienen Strahlung mit Wellenlängen von etwa 650 bis 300 nm als Licht wahrnehmen. Sie sehen also dort noch, wo für den Menschen schon der ultraviolette Bereich begonnen hat. Dadurch vermögen sie – so nimmt man jedenfalls an – die farbigen Blüten zwischen den Blättern der Bäume und Sträucher und inmitten der Gräser leichter zu unterscheiden.

Kehren wir jetzt zu den Hell-dunkel-Rezeptoren zurück. An ihnen sind die physikochemischen Vorgänge bei der Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Signale am weitesten erforscht. Der Physiologe bezeichnet diesen Prozeß als Transformation von Lichtreizen in (elektrische) Erregung. Dabei wird im Rezeptor die empfangene Reizenergie um einen Faktor von 10^7 bis 10^8 verstärkt. Die Energie für diese Verstärkung stammt aus dem Stoffwechsel der Rezeptorzelle. Der gesamte Vorgang vollzieht sich etwa in folgender Weise: In den Hell-dunkel-Rezeptoren, den Stäbchen, wird auftreffendes Licht durch einen speziellen Sehstoff (auch Sehpurpur genannt), das Rhodopsin, absorbiert. Dabei wird je nach Menge der Lichtenergie ein mehr oder weniger großer Teil der Rhodopsinmoleküle zerlegt. Diese chemische Veränderung des Sehstoffes verschiebt vermutlich das Ionengleichgewicht an der Rezeptormembran. Die Potentialdifferenz zwischen beiden Seiten der Membran (Membranpotential) verringert sich und löst – falls der Schwellenwert für diese Potentialänderung überschritten wird – in der angeschlossenen Nervenfasern elektrische Impulse aus, die über eine Reihe von Schaltstellen zum Zwischenhirn und von dort zum Sehzentrum der Großhirnrinde laufen.

Durch die eben beschriebenen Mechanismen ist das menschliche Auge in der Lage, Leuchtdichte-Unterschiede im Verhältnis $1 : 10^{11}$ wahrzunehmen. Die heutige Technik hat gegenüber der Natur in dieser Hinsicht noch einen beträchtlichen Rückstand: Ein Strahlungsmeßgerät mit automatischer Meßbereichseinstellung nach der Art des

Auges ist mit den gegenwärtig bekannten Möglichkeiten noch in keiner Weise realisierbar.

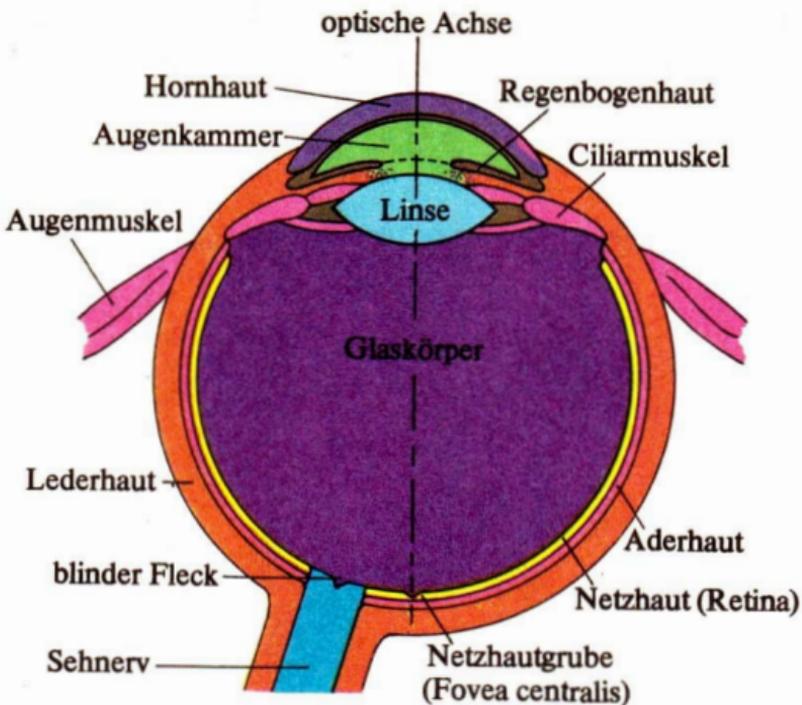
In der Netzhaut des menschlichen Auges sind etwa 7 Millionen Zapfen und 120 Millionen Stäbchen vorhanden. Dieser zahlenmäßige Unterschied ist übrigens auch ein Grund dafür, daß der Sehstoff der Stäbchen so viel besser erforscht ist als die Sehstoffe der farbempfindlichen Zapfen.

Die phantastisch erscheinende Kleinheit der Lichtrezeptoren und ihre dichte Packung sind weitere Eigenschaften, die unsere heutige Mikroelektronik bei weitem noch nicht erreichen kann, die aber technisch von hohem Interesse sind.

Das künstliche Froschauge

Die Zahl der Lichtrezeptoren je Quadratmillimeter beträgt in der Netzhaut des Menschauges etwa 150 000. In vielen Vogelaugen ist diese Rezeptordichte noch höher, beim Sperling z. B. sind es rund 400 000, bei der Krähe 1 000 000. Der Durchmesser eines ihrer Lichtrezeptoren beträgt nur noch 1 μm . Daraus erklärt sich die hohe Sehschärfe dieser Vögel. Wenn ein Habicht aus 100 m Höhe eine 3 cm große Maus erkennt, so besitzt sein Auge das gleiche Auflösungsvermögen wie die Fotoplatte in der Kamera eines Aufklärungsflugzeuges, auf der 3 m große Objekte noch zu unterscheiden sind, die aus 10 000 m Höhe aufgenommen wurden.

Vergleichen wir die Mikrostrukturen der Netzhaut mit den neuesten Ergebnissen der Entwicklung von Bildaufnahmeröhren (Vidicons) und integrierten Schaltkreisen, so wird die große Überlegenheit der biologischen Apparate deutlich. Das Target (die »Netzhaut«) einer solchen Vidiconröhre besteht aus $6 \cdot 10^5$ bis $6 \cdot 10^6$ Silizium-Fotodioden von je 0,15 bis 0,20 mm Kantenlänge und ist rund 100 cm^2 groß. Es arbeitet bei schwachem Tageslicht in überdachten Räumen und wird bei hellem Sonnenlicht nicht übersteuert. Das ist als großer Fortschritt gegenüber älteren Vidicons zu betrachten, die nur in Räumen mit künstlicher Beleuchtung arbeiten konnten.



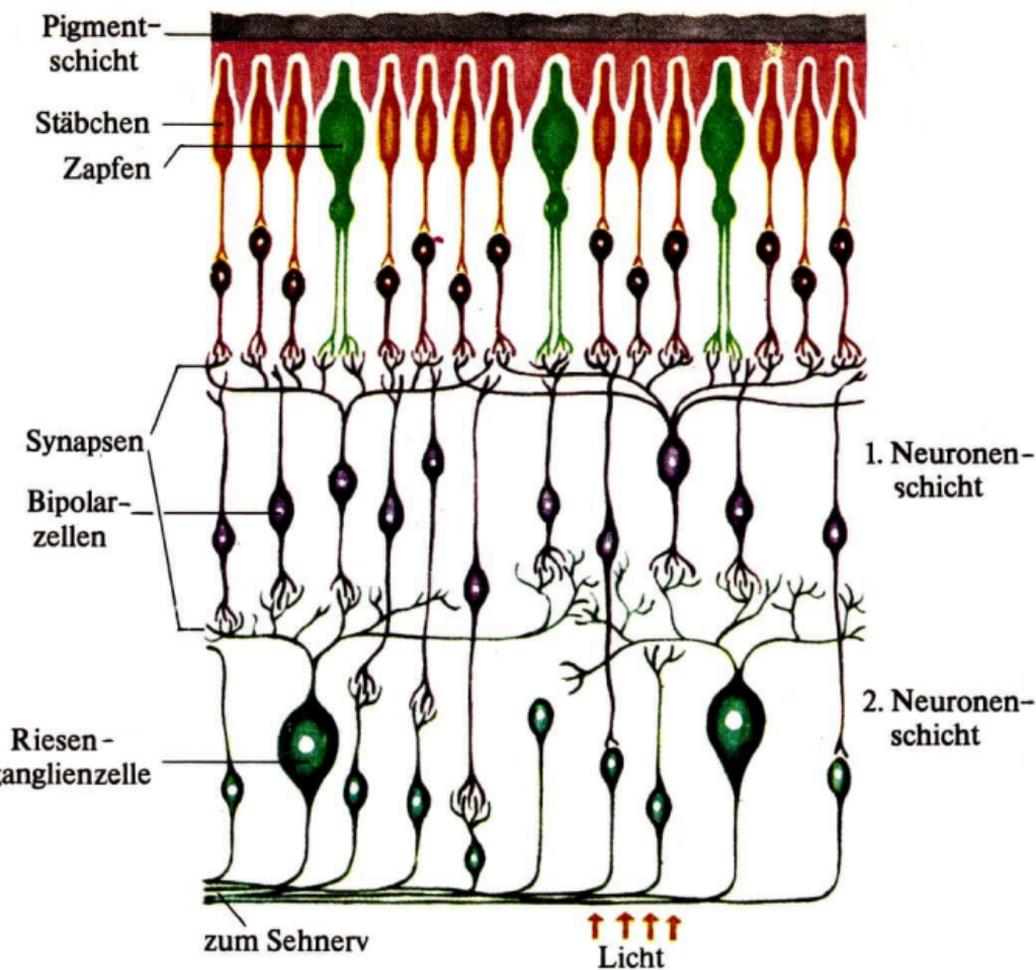
Menschliches Auge

Im Auge ist mehr als die hundertfache Menge von Rezeptoren auf etwa einem Fünfzigstel der Fläche untergebracht. Die maximale Lichtempfindlichkeit der Stäbchen und Zapfen ist wesentlich größer als die der Fotodioden und stellt sich außerdem automatisch auf die vorhandene Helligkeit ein.

Die den Stäbchen und Zapfen nachgeschalteten Neuronschichten besitzen eine Packungsdichte von 10^4 bis 10^5 Elementen je Quadratmillimeter. In hochintegrierten Schaltkreisen der Mikroelektronik dagegen finden wir Bauelementedichten, die unter 10^3 je Quadratmillimeter liegen.

Über die Informationsverarbeitung, die in den noch zur Netzhaut gehörenden Neuronschichten stattfindet, ist bisher nur wenig bekannt. Sicher ist aber, daß hier die von den Lichtrezeptoren aufgenommenen optischen Signale in einer ersten Stufe etwa im Sinne einer Signalauswahl verarbeitet werden.

In der Netzhaut lassen sich verschiedene Nervenzellen



Netzhaut mit Lichtrezeptoren und Neuronenschichten

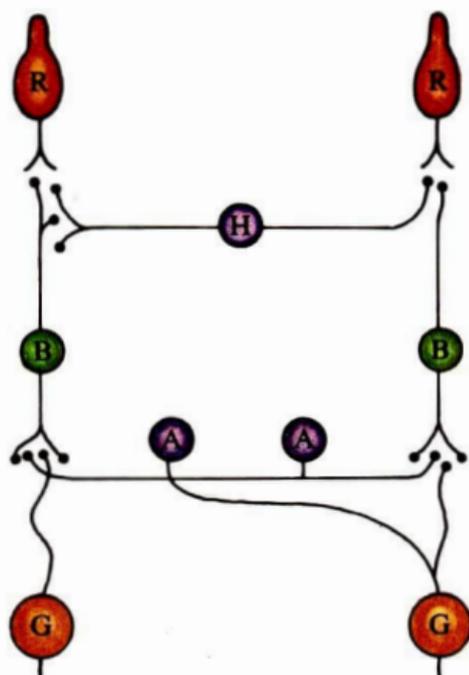
(Neuronen) unterscheiden. Mit den Rezeptoren direkt verbunden sind relativ kleine Neuronen, sogenannte Bipolarzellen. Ihnen folgen größere. Außer den Fasern, die vertikal von den Rezeptoren über die Bipolarzellen und weitere Schaltneuronen in den Sehnerv (Nervus opticus) laufen, existieren in den verschiedenen Neuronenschichten auch horizontale Verbindungen mit zwischengeschalteten Zellen, denen unter anderem auch eine Rückkopplungswirkung zu den Bipolarzellen zugeschrieben wird.

Untersuchungen an verschiedenen Tieraugen haben erste Hinweise über die Art der Informationsverarbeitung

in der Netzhaut gegeben. Dabei wurden isolierte Augen in physiologischen Salzlösungen eine Zeitlang funktionsfähig erhalten. Mit sehr feinen Lichtbündeln wurden eng begrenzte Bezirke der Netzhaut erregt und die dabei auftretenden elektrischen Signale mit Mikroelektroden an verschiedenen Neuronen registriert. Auf diese Mikroelektrodeteknik, mit der man elektrische Potentialschwankungen an einzelnen Nervenzellen und Nervenfasern messen kann, werden wir später noch eingehen.

Aus derartigen Untersuchungen ergaben sich erste Anhaltspunkte für informationsverarbeitende Vorgänge in den Neuronenschichten der Netzhaut. Eines dieser Ergebnisse ist, daß an Hell-dunkel-Grenzen offenbar eine Kontrastverstärkung stattfindet. Wahrscheinlich erfolgt in der Netzhaut auch eine Informationsauswahl. Das auf den Augenhintergrund projizierte Bild wird nicht vollständig zum Sehzentrum übertragen, sondern nach Auswahlprinzipien, die lebenswichtige von unwichtigen Informationen

Schaltschema der Netzhaut. R – Rezeptoren, H – Horizontalzelle, B – Bipolarzelle, A – amakrine Zelle, G – Ganglienzelle



trennen. So reagierten Frösche bei Versuchen mit künstlichen Fliegen, die sich vor einem fotografierten Hintergrund befanden, nie auf eine ruhende Fliege, jedoch sofort auf jede relative Bewegung, gleichgültig, ob die Fliege oder der Hintergrund bewegt wurde.

Das Froschauge ist in vieler Hinsicht ein relativ einfaches Untersuchungsobjekt. Kopf- und Augenbewegungen sind dem Frosch nicht möglich. Auf der Grundlage intensiver elektrophysiologischer Untersuchungen entwickelte eine Gruppe von Wissenschaftlern am Technologischen Institut von Massachusetts (USA) ein dem Froschauge entsprechendes technisches Funktionsmodell, das insgesamt 32 000 elektronische Bauelemente enthält. Die Rezeptoren werden durch 1296 Fotowiderstände dargestellt. Die Bauelemente sind in sieben Schichten in Matrixform angeordnet. Jede dieser Schichten realisiert bestimmte logische Funktionen, deren Ergebnisse darin bestehen, die Umrisse des beobachteten Gegenstandes festzustellen, seine Bewegung relativ zum Zentrum der Rezeptorschicht zu registrieren, die Kontraständerungen und die vom Gegenstand verursachten Verdunkelungen (Schatten) zu bemerken. Die siebente Schicht enthält Lampen, die das Gesamtergebnis der Informationsverarbeitung anzeigen.

Es geht hier um das technisch wichtige und außerordentlich schwierige Problem der maschinellen Zeichenerkennung. Mit dem Modell von Massachusetts wurden z. B. erste Versuche zur automatischen Beobachtung eines Radarschirms unternommen. Es würde einen großen Fortschritt bedeuten, wenn es gelänge, die gezielte Auswahl der Informationen eines Radarschirmbildes zur Wetterbeobachtung oder zur Flugüberwachung zu automatisieren.

Von den vielen auf einem Radarschirm aufleuchtenden Punkten besitzen immer nur einige die gesuchten Informationsinhalte, zeigen etwa ein bewegtes Objekt bestimmter Größe an, während andere vielleicht nur von Reflexionen an Wolken herrühren. Dieses Erfassen von Informationsinhalten bestimmter Signale auf der Basis früher gespeicherter Informationen (Erfahrungen) oder auch durch fest programmierte (angeborene) Verarbeitungsmuster – eben dieses Auswählen der wichtigen Informationen – macht

einen wesentlichen Teil der Leistung aus, die das biologische System »Sehorgan« erbringt. Es ist eine interessante Aufgabe, technische Systeme zur automatischen Zeichenerkennung zu entwickeln. Hierzu gehört auch das automatische Erkennen von gedruckten und geschriebenen Zeichen.

Der Mensch identifiziert fast mühelos Zeichen gleicher Bedeutung, die in verschiedenen Formen gedruckt oder geschrieben wurden. Zahlreiche Untersuchungen über die Technik des menschlichen Lesens haben ergeben, daß der geübte Leser nicht einmal jedes Zeichen erkennen muß, um den Sinn von Worten und Sätzen zu erfassen. Hieran lassen sich recht gut die enormen Möglichkeiten ermessen, Signalmengen ohne wesentliche Einschränkung des Informationsgehaltes zu reduzieren.

Ehe man jedoch Druck- und Schreibrschrift lesende Automaten bauen kann, Leseautomaten also, die zumindest eine gewisse Variationsbreite der Zeichen zulassen, muß der Vorgang des Lesens selbst analysiert werden. Zur Lösung dieses Problems existieren bisher aber nur erste Ansätze.

Schließlich sei noch das automatische Erkennen und Auswerten von Mustern und Bildern erwähnt. Der immer stärker werdende Anfall solcher Aufgaben verlangt dringend nach technischen Lösungen. Wir denken an die automatische Identifizierung von Fingerabdrücken in der Kriminalistik, an die automatische Auswertung von Röntgenaufnahmen bei Reihenuntersuchungen oder an die automatische Auswertung von Wetterkarten.

Auch in der wissenschaftlichen Forschung werden automatische Bildauswerteverfahren immer dringender verlangt. Zum Beispiel erfordern kernphysikalische Untersuchungen, etwa die Suche nach neuen Elementarteilchen oder Experimente mit Antiteilchen das Auswerten von vielen tausend Nebel- bzw. Blaskammeraufnahmen, um eines der sehr seltenen Ereignisse (das Auftreten eines bestimmten Teilchens, kenntlich an Nebelspuren bestimmter Form) zu entdecken.

Automatisch arbeitende Kameras fotografieren die Nebelspuren der Kernprozesse und liefern so eine große Menge von Informationen. In den Programmen zur Ver-



arbeitung dieser Bildinformationen muß das kernphysikalische Wissen stecken, das gerade notwendig ist, um die gesuchten Teilchenspuren unter einer großen Anzahl anderer und zu einem Teil ähnlicher herauszufinden.

Zur Lösung dieser und ähnlicher Probleme gehören immer bestimmte Komplexe von gespeicherten Erfahrungen, gehört ein Vergleichen der neuen mit gespeicherten Informationen. Unser Wissen darüber, wie diese Prozesse der Informationsverarbeitung im Gehirn ablaufen, steckt in den ersten Anfängen. Wir werden noch einmal darauf zurückkommen.



Infrarotortung, Ultraschall und anderes

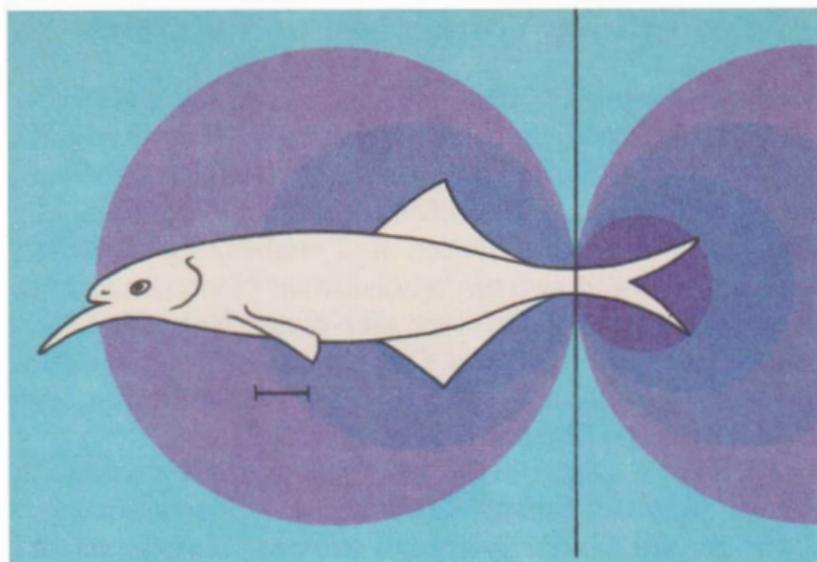
Die sogenannten Grubenottern, zu denen auch Klapperschlangen gehören, suchen und finden ihre Beutetiere nicht mit den Augen. Sie besitzen am Kopf zwei kleine Gruben, die Empfangsorgane für Infrarotstrahlung darstellen. Die etwa senfkorngroßen Gruben sind steilwandige Trichter, über deren Grund sich ein hauchdünnes Häutchen spannt. In diesem Häutchen befinden sich dichte Netze von Nervenfasern und Blutgefäßen. Ob außer den Nervenendigungen noch spezifische Infrarotstrahlungsrezeptoren vorhanden sind, ist nicht endgültig geklärt.

Mit diesem Organ orten die Grubenottern Beutetiere, etwa eine Maus, allein durch deren Körperwärme auf Entfernungen bis zu mehreren Metern. Messungen mit Mikroelektroden ergaben, daß von einem solchen Grubenorgan Temperaturschwankungen von $0,0003^{\circ}\text{C}$ und $0,02\text{ s}$ Dauer noch deutlich registriert werden. Sehr langsame Temperaturänderungen werden dagegen nicht wahrgenommen.

Schlangen liefern somit ein hervorragendes Studienobjekt für höchstempfindliche Strahlungsempfänger und Ortungssysteme. Fernthermometer einer solchen Empfindlichkeit könnten z. B. zur Überwachung bestimmter Produktionsprozesse, in der Grundlagenforschung und angewandten Forschung unschätzbare Dienste leisten. Im Verkehrswesen hat eine Art Infrarotortung bereits Anwen-

Wahrnehmung einer Maus mit Hilfe der Sehzellen bei einem Raubvogel und Ortung der Wärmestrahlung einer Maus bei einer Grubenotter





—|—| $\hat{=}$ 1 cm in der Natur

Verlauf der elektrischen Feldlinien bei einem Schwachstromfisch

dung gefunden, so z. B. für die nächtliche Verkehrsüberwachung in Schiffshäfen.

Erst seit einigen Jahrzehnten weiß man, daß sich verschiedene Fische – es handelt sich um in tropischen Gewässern lebende Arten – mit Hilfe sehr schwacher elektrischer Felder orientieren, die sie durch körpereigene elektrische Organe in ihrer Umgebung selbst erzeugen. Diese sogenannten Schwachstromfische haben sich auf eine derartige Orientierungsmethode spezialisiert, weil sie dem vorwiegend trüben Wasser ihres Lebensraumes am besten angepaßt ist.

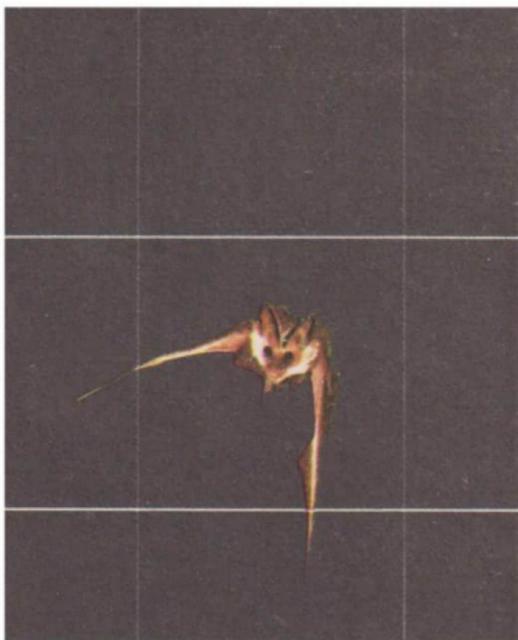
Die elektrischen Organe dieser Fische bestehen aus umgewandelter Skelettmuskulatur und sind ähnlich denen der schon erwähnten Starkstromfische aufgebaut. Meist senden diese Organe ununterbrochen elektrische Navigationsimpulse aus. Rezeptoren am Kopf der Tiere registrieren die durch ihre Umgebung deformierten Impulse. Das System hat also große Ähnlichkeit mit einer elektrischen Echolotung. Die Frequenzen der ausgesandten Impulse liegen sehr hoch. Bei der Art *Sternarchus oxyrhynchus*, die zu Nacktaalähnlichen gehört, hat man 1000 Impulse je Sekunde von je 0,4 V gemessen.

Die Empfindlichkeit der Rezeptoren, die Meßsonden für elektrische Feldstärke darstellen, ist wiederum sehr hoch. Feldstärkeänderungen, wie sie Hindernisse im Wasser, Beutetiere und dergleichen verursachen, können bis zu 10^{-10} V je Quadratzentimeter festgestellt werden. Damit registrieren die Feldstärkerezeptoren der Schwachstromfische etwa ein Tausendstel bis ein Zehntausendstel der Feldstärkeschwankungen, die an einer Rundfunkantenne beim Empfang eines mittelstarken Senders auftreten.

Bei Fischen finden wir noch ein anderes interessantes Orientierungsorgan, das sogenannte Seitenlinienorgan, mit dem kleinste Druckschwankungen des Wassers wahrgenommen werden. Es besteht aus einer Reihe von Rezeptoren in Form von kleinen Säulchen, in denen je etwa fünfzig Tasthärchen miteinander verklebt sind. Diese Rezeptoren signalisieren den Staudruck und damit Strömungsstärken und Druckwellen. Aus der Summe der Signale aller Rezeptoren zu beiden Seiten des Körpers erhält der Fisch Informationen auch über Richtung und Richtungsänderungen kleinster Staudruckschwankungen. Man hat festgestellt, daß z. B. die Makrele mit ihrem Seitenlinienorgan einen sich windenden Wurm auf 1 m Entfernung im Wasser entdecken kann.

Am bekanntesten ist wohl das Ultraschall-Orientierungssystem der Fledermäuse. Es besteht aus einem Stimm- und einem Hörapparat. Bei einer europäischen Fledermaus wiegen Ultraschallsender und -empfänger nur etwa 0,1 g und sind kleiner als 1 cm^3 . Damit führt die Fledermaus kompliziertere Funktionen aus als eine Funkortungsanlage, die einige hundert Kilogramm wiegt und mehrere Kubikmeter Raum ausfüllt.

Die Fledermäuse stoßen mit geöffnetem Maul 10 bis 60, vor Hindernissen bis zu 200 Schreie je Sekunde aus. Der Einzelschrei hat eine Dauer von etwa 5 Millisekunden. Die Schallfrequenzen liegen zwischen 45 und 90 kHz, die Wellenlänge in der Luft also etwa zwischen 3,7 und 7,4 mm. Die Schallenergie ist relativ hoch. Die Echos ihrer Ultraschall-Peillaute empfängt die Fledermaus mit ihrem Hörorgan, in dem höchstempfindliche Ultraschallrezeptoren die Schalleistungen der Echos von etwa 10^{-17} W in elektrische Signale umwandeln und verstärken.

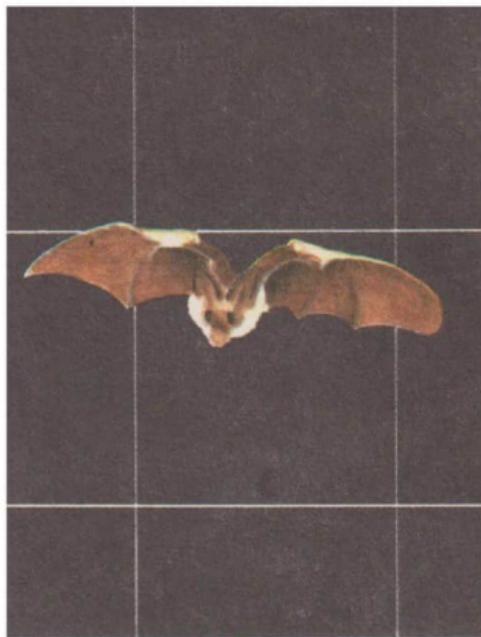
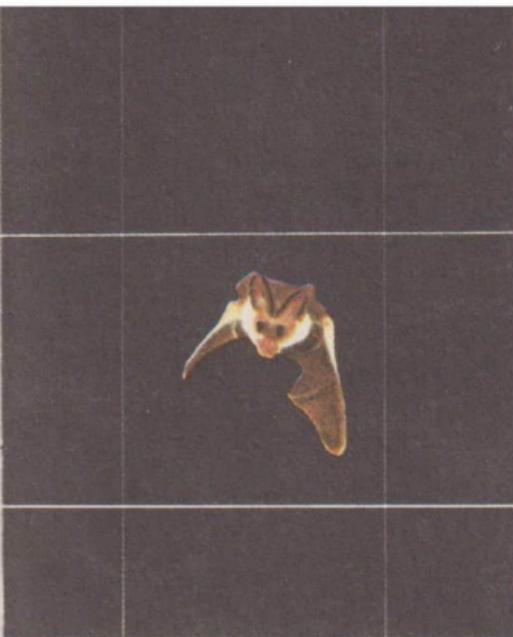


Flug der Fledermaus durch ein Gitter

Die Echos liefern den Fledermäusen auch Informationen über Form, Größe, Bewegung und stoffliche Natur der Hindernisse. Das Empfangsorgan kann Echolaute mit einer zeitlichen Differenz von einer Millisekunde noch gut unterscheiden. Damit ist eine Entfernungsbestimmung des Hindernisses auf mindestens 30 cm gegeben, wahrscheinlich aber ist sie noch präziser.

Fledermäuse orten ein Insekt von 1 cm² Querschnitt auf 3 m Entfernung, erkennen 3 mm dicke Drähte auf 2 m Entfernung. Man hat beobachtet, daß eine Fledermaus in einer Minute mehr als zehn fliegende Insekten fängt. Dabei wird die Fledermaus nicht durch die Ultraschallsignale ihrer Artgenossen gestört. Bisher ist nicht bekannt, wie dieses biologische System eine so hohe Stabilität gegen Störungen erreicht. Technisch ist eine solche Signalstabilität von höchstem Interesse. Gelänge es, die biologische Systemlösung aufzufinden, so wäre sie möglicherweise auf technische Signalsysteme übertragbar.

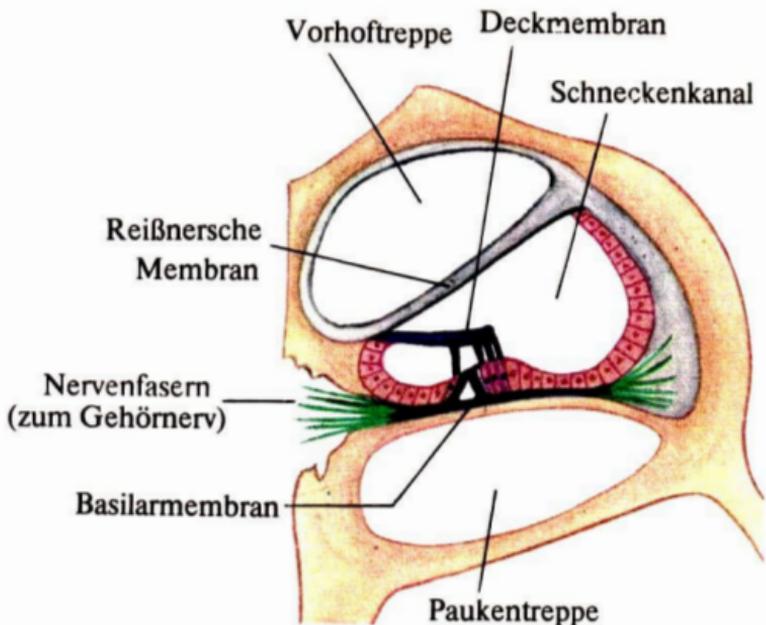
Bei einigen Wasserbewohnern finden wir ebenfalls eine Orientierung mittels Schallecho vor. Tümmeler und andere



Zahnwale stoßen tiefe Grunztöne und Ultraschallpfeife aus. Delfine orientieren sich mit Pfeiftönen im Frequenzbereich von 8 bis 12 kHz und außerdem durch Ticklaute im Ultraschallbereich. Man hat beobachtet, daß diese Tiere damit selbst dünne Fangnetze entdecken und Löcher in diesen Netzen sofort auffinden. Normalerweise benutzen sie dieses Ortungssystem, um den Verlauf des Meeresgrundes und naher Küsten festzustellen und um Fischschwärme zu verfolgen. Was wir also für moderne Fischfangmethoden halten, benutzen diese Tiere schon seit Millionen von Jahren.

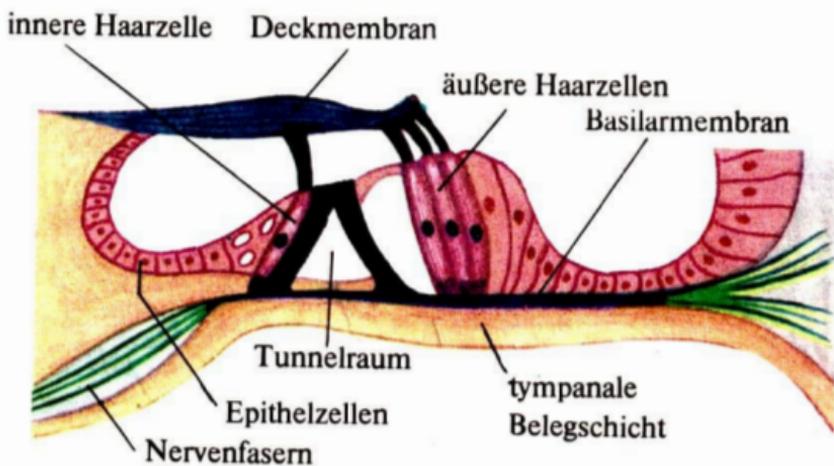
Rätsel des Hörens

Der Mensch nimmt Schwingungen zwischen etwa 15 Hz und 14 kHz als Schall wahr. Darüberliegende Frequenzen werden als Ultraschall bezeichnet. Viele Insekten hören aber noch im Ultraschallbereich. Ihre Hörorgane sind an verschiedenen Körperstellen untergebracht, z. B. am Hin-



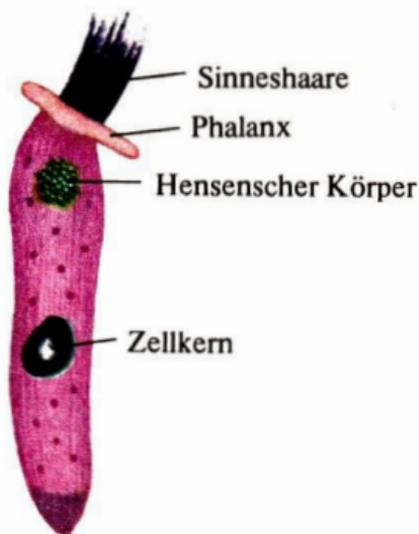
Gehörschnecke. Die im Querschnitt dargestellten drei Kanäle des Innenohres sind gewunden und verengen sich allmählich. Sie sind in die Schädelknochen eingebettet. Ihrer Form verdanken sie auch die Bezeichnung »Gehörschnecke«.

terleib, am Flügelrand oder an den Beinen. So weiß man, daß Heuschreckenarten Schwingungen bis zu 200 kHz wahrnehmen können. Viele Nachtinsekten, wie Spinner, Spinner und andere Nachtfalter, hören die Ultraschall-



Cortisches Organ

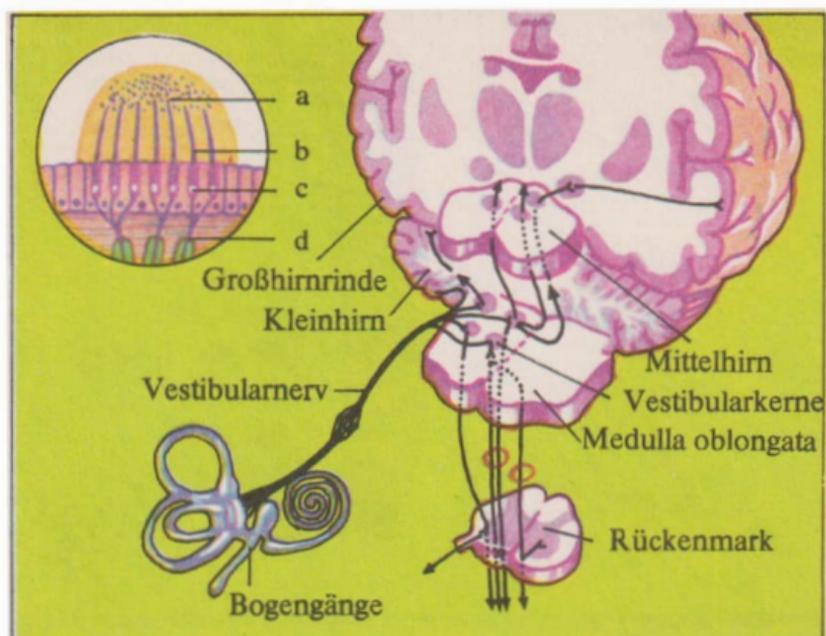
Hörsinneszelle



Peillaute der Fledermäuse und haben dadurch eine Möglichkeit zur Flucht. Bei der Kleinheit dieser Tiere kann man sich eine Vorstellung von der Winzigkeit ihrer Hörorgane machen.

Das Hörorgan der Säugetiere einschließlich des Menschen besteht aus drei Teilen. Das äußere Ohr dient der Schallaufnahme. Das Mittelohr, bestehend aus dem Trommelfell und der Gehörknöchelchenkette, verstärkt die empfangene Schalleistung auf etwa das Zwanzigfache. In der Gehörschnecke des Innenohres werden die empfangenen Schallsignale in ihr Frequenzspektrum zerlegt und von den 10 000 bis 20 000 Schallrezeptoren in elektrische Erregung umgewandelt.

Das menschliche Gehör kann etwa 850 verschiedene Tonhöhen unterscheiden, jedoch nur das Gesamtklangbild, nicht die Frequenzbestandteile von Klängen und Geräuschen. Es besitzt in dieser Hinsicht eine außerordentlich große Empfindlichkeit. Wir erkennen z. B. uns bekannte Stimmen sehr gut wieder, selbst wenn sie durch das Telefon relativ stark verzerrt sind. Unser Gehör unterscheidet sehr genau die Anteile von Oberschwingungen in den verschiedenen Schallquellen – den Gewehrschuß von einem Pistolenschuß, den Trompetenton von einem Klarinetton oder das Zerschlagen eines Zweiges von dem eines Glasstabes.



Gleichgewichtsorgan (Labyrinth) und seine Verbindungen zum Zentralnervensystem: a – Gehörsteinchen, b – Sinneshaare, c – Haarzellen, d – Nerv

In unserem Gehirn sind die Klangbilder früher erhaltener akustischer Informationen in großer Menge gespeichert, mit denen neu empfangene sofort verglichen und dadurch erkannt werden. Vor allem ist bemerkenswert, daß in der überwiegenden Anzahl von Fällen auch unvollständige oder stark gestörte akustische Informationen erkannt werden. Wir verstehen noch eine recht undeutliche oder durch Dialekt verzerrte Aussprache anderer Menschen, wir erfassen aus Wortfetzen den Sinn ganzer Sätze. Unser Gehörsinn besitzt eine hochentwickelte Fähigkeit, verstümmelte Informationen aus dem Gedächtnis zu ergänzen. Es sieht so aus, als stelle unsere Sprache ein Überangebot von Signalelementen für die zu übermittelnden Informationen dar. Aus diesem Überangebot genügen uns oft gewisse Rumpfsignale – auch als akustische Invarianten bezeichnet –, um die Information zu erfassen. Übrigens haben Studien des menschlichen Lesens ergeben, daß entsprechend auch optische Invarianten gebildet werden.

Wie eine solche Invariantenbildung durch den Hörsinn bzw. durch den Gesichtssinn erfolgt, ist zur Zeit noch fast vollständig unbekannt. Wir sind infolgedessen auch nicht in der Lage, Apparate zu konstruieren, die solchen Leistungen nahekommen.

Die phonetische Schreibmaschine, eine Schreibmaschine also, die gesprochenen Text automatisch gemäß dem Regelwerk unserer Sprache schreibt, ist deshalb noch ein Traumziel. Eine solche Maschine müßte in ihrem Speicher die ganze Rechtschreibung und Syntax unserer Sprache enthalten. Sie dürfte sich nicht darauf beschränken, Worte zu hören, sondern müßte aus aufgenommenen Wortfolgen die Schreibweise gleichklingender Worte wie war und wahr oder mal und Mahl selbst bestimmen, müßte auch undeutlich gesprochene Sätze richtig schreiben und dazu noch die richtigen Satzzeichen setzen.

Eine andere nur wenig einfachere Zielstellung ist ein Computereingabegerät, mit dessen Hilfe Programme eingesprochen werden können. Man könnte auch an einen Computer denken, der über Mikrofone Musik aufnimmt und sofort in Noten ausdrückt.

Solche Aufgabenstellungen mögen für unsere Gegenwart noch phantastisch klingen, sind aber nach Aussagen führender Kybernetiker prinzipiell von technischen Apparaten zu lösen. Einstweilen ist nur der menschliche Gehörsinn dazu imstande, die sensorische Seite dieser Aufgaben zu bewältigen. Forschungsarbeiten über das Hören bei Menschen und Tieren, über Aufbau und Funktion der Hörorgane und über die Verarbeitung akustischer Informationen in den Zentralnervensystemen werden durch Versuche mit technischen Modellen ergänzt. Gegenwärtig sind solche Modelle noch weit von den Leistungen biologischer Systeme entfernt. Je weiter aber die biologischen Objekte erforscht werden, um so besser werden danach entwickelte technische Modelle die genannten Zielstellungen erfüllen.

Meßfühler für Geruch und Geschmack

Die Geruchs- und Geschmacksrezeptoren, von denen der Mensch je etwa zehn Millionen besitzt, gehören zu den biologischen Meßfühlern, die auf chemische Reize reagieren. Die außerdem im Körperinneren vorhandenen Chemorezeptoren sind möglicherweise noch gar nicht alle bekannt. Sie stellen die Meßsonden der Regelkreise dar, die zur Aufrechterhaltung des Lebens notwendig sind. Zu ihnen zählen die Carotiskörperchen im Bereich der Halsschlagader, die auf den Kohlendioxidgehalt des Blutes reagieren, und die Osmorezeptoren im Zwischenhirn, die Wasserverluste anzeigen und das Durstgefühl hervorrufen.

Die Chemorezeptoren der Geruchs- und Geschmacksorgane beim Menschen und im Tierreich reagieren meist außerordentlich empfindlich. Sie signalisieren schon ein bis zwei Moleküle eines Geruchs- oder Geschmacksstoffes. Über ihre Wirkungsweise ist noch nicht viel bekannt. Am wahrscheinlichsten ist, daß diese Moleküle an der Rezeptormembran chemisch adsorbiert werden und dabei direkt die Ionendurchlässigkeit der Membran beeinflussen. Danach läuft der schon beschriebene Vorgang ab, der mit der überschwelligigen Änderung des Rezeptorpotentials beginnt und zur Fortleitung von elektrischen Impulsen über die angeschlossenen Nervenfasern führt.

Bemerkenswert ist, daß die meisten technischen Methoden zur Analyse und Anzeige chemischer Substanzen nach anderen Funktionsprinzipien arbeiten. Sie erreichen zwar z. T. sehr hohe Empfindlichkeiten, erfordern aber einen beträchtlichen apparativen Aufwand und viel Zeit.

Da wir im biologischen Bereich Chemorezeptoren für die verschiedensten Stoffe vorfinden, tut sich hier ein weites Feld zur Suche nach Meßsonden zur chemischen Analyse und Kontrolle chemischer Prozesse auf.

Bei Insekten, wie Ameisen und Fliegen, findet man besonders interessante Leistungen des Geruchssinnes. Von Ameisen weiß man, daß sie ihre Wege chemisch – durch sogenannte Phormone – markieren. Die Tiere können aus etwa 2 cm Entfernung den markierten Weg entdecken und sich auf diese Weise orientieren. Experimente mit der Seidenspinnerart *Bombyx mori* zeigten, daß

diese Tiere noch auf 10^{-16} g/cm³ ihres arteigenen Lockstoffes reagieren. Das sind einige wenige Moleküle.

Direkte Beobachtungen wurden mit Mikroelektroden an Chemorezeptoren von Fliegen durchgeführt. Bei diesen Insekten sitzen Geschmacksrezeptoren in den Füßen. Wirken Schmeckstoffe auf diese »Meßfühler« ein, treten in den angeschlossenen Nervenfasern elektrische Potentialschwankungen auf. Das wurde mit Mikroelektroden, die in das Fliegenbein eingestochen worden waren, eindeutig nachgewiesen.

Der Saugrüssel der Fliege reagiert reflektorisch auf die Signale der Geschmacksrezeptoren. Bei andauerndem Kontakt passen sich die Geschmacksrezeptoren dem »Überangebot« allerdings an; ihre Impulsfrequenz nimmt also ab. Möglicherweise wird dadurch ein übermäßiges Vollsaugen verhindert.

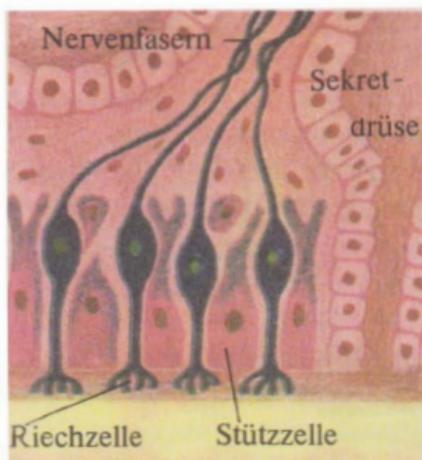
Beim Menschen befinden sich die Geschmacksrezeptoren in der Zungenschleimhaut. Sie besitzen feine Härchen, an deren Oberfläche die Moleküle der Schmeckstoffe spezifisch gebunden werden. In weniger als fünfzig Millisekunden vollziehen sich hier die chemische Adsorption der Moleküle, die Entstehung eines Rezeptorpotentials und das Fortleiten einer diesem entsprechenden Impulsfolge über die Nervenfasern.

Bekanntlich besitzen wir nur vier verschiedene Geschmacksrezeptoren, je eine Art für die Geschmacksrich-



Geschmacksknospe. Spezifische Geschmacksknospen für die vier Geschmacksrichtungen süß, sauer, salzig und bitter sind ungleichmäßig in der Oberflächenschicht der Zunge verteilt.

Menschliches Geruchsorgan (Ausschnitt)



tungen süß, sauer, salzig und bitter. Die große geschmackliche Vielfalt entsteht durch Kombinationen unterschiedlicher Intensitäten dieser vier Geschmackselemente. Darüber hinaus ist beim Schmecken auch der Geruchssinn wesentlich beteiligt.

Viele Tiere, unter ihnen die Frösche, weisen noch eine fünfte Art von Geschmacksrezeptoren auf, mit denen sie reines Wasser feststellen können.

Die Geruchsrezeptoren bei Säugetieren und Menschen befinden sich in den Nasenhöhlen, beim Menschen je etwa 10 bis 20 Millionen, beim Schäferhund, der wohl – soweit uns bekannt – das leistungsfähigste Geruchsorgan besitzt, etwa 250 Millionen. Die Rezeptorzellen enden zum Nasenraum hin mit einer Anschwellung, die sechs bis zwölf feine, lange Riechhärchen trägt. Jedes dieser Härchen ist etwa 0,001 mm lang und nur 0,1 μm dick, also rund 500mal so dünn wie ein Kopfhhaar.

Hunde entdecken mit ihrem Riechorgan noch einzelne Buttersäuremoleküle, die im Schweiß enthalten sind, und unterscheiden dabei sogar die individuellen Unterschiede der Geruchsspuren verschiedener Personen. Wahrscheinlich werden »Geruchsbilder« erfaßt – und zwar mit einem Unterscheidungs- oder Auflösungsvermögen, das mit unseren gegenwärtigen chemischen Kenntnissen kaum beschrieben werden kann.

Auch bei Fischen finden wir z.T. sehr empfindliche Geruchsorgane, die zur Orientierung, zur Nahrungssuche

und zum Entdecken von Feinden benutzt werden. So weiß man, daß Lachse ihren Heimatfluß am Geruch erkennen. Elritzen riechen den Hecht auf mehr als 1 m Entfernung.

In der Technik sind Rezeptoren mit ähnlichen Empfindlichkeiten zum Feststellen chemischer Stoffe nicht bekannt. Dabei wäre der Bedarf für derartige Meßsonden sehr groß, z. B. für das Überwachen von Räumen, in denen schädliche Gase oder Dämpfe auftreten können, oder für die Steuerung chemischer Prozesse. Bei der Erforschung der Atmosphären fremder Himmelskörper durch Raumsonden könnten winzige Chemorezeptoren dank ihrer hohen Verstärker- und Verarbeitungsleistungen erhebliche Vorteile bieten.

Seit einiger Zeit beschäftigen sich einige Forschergruppen sehr intensiv mit den Geruchsorganen bestimmter Schmetterlinge und Fliegen. Diese Insekten tragen ihre Geruchsrezeptoren vorwiegend an den Fühlern, die man mit Geruchsantennen vergleichen könnte. Jeder einzelne dieser Rezeptoren ist mit einer Nervenfasern verbunden. Die Fasern aller Rezeptoren vereinigen sich, voneinander isoliert, zum Antennennerv. Es gelang diesen Antennennerv so zu präparieren, daß die Impulse in einer einzelnen Riechnervenfasern registriert werden konnten. Man fand dabei, daß die Geruchsrezeptoren dieser Tiere noch ein einziges Molekül feststellen können.

Biologische Rezeptoren und die zukünftige Meßtechnik

Die biologischen Rezeptoren und die Teile der Nervensysteme, die die von den Rezeptoren stammenden Informationen verarbeiten, erfüllen eine Reihe der wichtigsten Entwicklungsforderungen der modernen Mikroelektronik und der elektronischen Meßtechnik. Diese biologischen Systeme sind von einer außerordentlichen Kleinheit und arbeiten mit einem sehr geringen Energieverbrauch. Sie erreichen, verglichen mit gegenwärtigen technischen Systemen, eine extrem hohe Zuverlässigkeit und große Stabilität gegenüber Störungen. Ihre Lebensdauer, gemessen in Betriebsstunden, ist technisch zur Zeit kaum erreichbar.

In der Technik erreicht man höhere Betriebssicherheit elektronischer Geräte durch Doppel- oder Mehrfachauslegung aller kritischen Schaltungsteile. Man nennt das Erhöhung der Redundanz. Zum Beispiel in der Steuerungselektronik von Raumflugkörpern gebieten die Sicherheit und die Forderung nach hoher Erfolgswahrscheinlichkeit einen sehr hohen Aufwand. In biologischen Systemen sind wahrscheinlich prinzipiell ähnliche Problemlösungen anzutreffen, die allerdings wesentlich wirkungsvoller sind.

Biologische Rezeptoren sind in den Gesamtorganismus eingebettet und beziehen ihre Betriebsenergie aus dessen Stoffwechsel. Bei ihrer Erforschung gibt es eine große Schwierigkeit. Isolierte Rezeptoren oder von Sinnesorganen losgelöste Teile sind kaum funktionsfähig. Dennoch sind Versuche dieser Art gemacht worden. Man hat z. B. in einzelnen Fällen Rezeptoren präpariert und die von ihnen abgegebenen Signale mit Hilfe technischer Elektronik weiterverarbeitet. Solche kombiniert biologisch-elektronischen Meßapparate werden auch als Hybridsysteme bezeichnet. In ihnen sollen die Vorteile biologischer Systeme – große Empfindlichkeit und Anpassungsfähigkeit – mit den Vorteilen der Elektronik – hohe Arbeitsgeschwindigkeit – verbunden werden.

Derartige neurobiologische Hybridsysteme werden von sowjetischen Forschern andererseits zur Erforschung von Organteilfunktionen eingesetzt, etwa als neue Methoden zur Erforschung der Energetik der Muskelkontraktion oder für die Hirnforschung.

Aussichtsreich erscheint allerdings auch ein anderer Weg, nämlich Signalempfänger nach Vorbildern biologischer Rezeptoren zu konstruieren. Das muß nicht heißen, etwa die biologischen Membranen in allen Einzelheiten nachzubauen. Statt dessen könnte es gelingen, z. B. das Funktionsprinzip der Chemorezeptoren auf passive technische Membranen zu übertragen. Vielleicht wären diese dann hundert- oder tausendmal weniger empfindlich als die biologischen Rezeptoren, würden aber immer noch viel mehr leisten als unsere gegenwärtigen Meßmethoden.

Wie schon mehrfach betont, sind für die Technik zukünftiger Meßautomaten auch die den biologischen Rezeptoren nachgeschaltete Signalanalyse, Signalauswahl und

Signalverteilung sowie das adaptive Verhalten der Rezeptoren – kurz, die gesamte Verarbeitung empfangener Signale – von großem technischem Interesse.

Wir wollen im folgenden versuchen, einen Einblick in die Art und Weise der Informationsverarbeitung im Zentralnervensystem zu vermitteln und verschiedene Ansätze zur wissenschaftlichen und technischen Nutzung solcher Kenntnisse zu zeigen.

Informationsflüsse in Nervensystemen

Der Inhalt des Begriffes Information reicht von den Geruchsspuren, die Tiere in ihrem Revier hinterlassen, bis zur menschlichen Sprache in all ihren optischen und akustischen Ausdrucksformen. Jede Information wird durch materielle Träger vermittelt. Bestimmte Veränderungen der Umwelt, etwa Zeichen, Töne, Geräusche oder Gerüche, stellen für bestimmte Lebewesen Signale dar. Sie haben diesen Signalcharakter durch gesammelte Erfahrungen erhalten. Die Bedeutung eines Signals nennen wir Information.

Schon im Säuglingsalter lernt der Mensch Geräusche, Formen, Gestalten kennen. Durch Wiederholung erhalten sie Signalcharakter. Allmählich erfaßt der Säugling immer deutlicher die Informationsinhalte dieser Signale. Später nimmt der Mensch Zahlbegriffe, Buchstaben, Worte in sich auf. Er lernt seine Muttersprache und auch Sprachen fremder Völker. Dieses Lernen von etwa hundert Zeichen, von einigen tausend Wörtern und ihrer Bedeutung erschließt ihm dann die Welt der Erkenntnisse, die die Menschheit in ihrer Geschichte gesammelt hat.

Ein zunächst noch unbekanntes Ereignis, etwa ein Pfeifton, muß erst einmal wahrgenommen und seine Begleitumstände und Folgen müssen in Erfahrung gebracht werden. Eine wiederholte Wahrnehmung desselben Pfeiftones unter ähnlichen Umständen besitzt dann Signalcharakter und enthält Information. Der Informationsinhalt eines Signals hängt von den vorausgegangenen Erfahrungen des Empfängers, von dem vorher Erlernen ab.

Dasselbe gilt für informationsverarbeitende Maschinen. Ein für Lochstreifeneingabe eingerichteter Computer kann auf ein Stück beschriebenes Papier nicht reagieren. Die einzige für ihn verarbeitbare Signalform sind in Papierstreifen gestanzte Löcher. Ihr Informationsinhalt wird durch einen Code festgelegt, den der Computer »kennt«. Der Computer verarbeitet die nach diesem Code verschlüsselten Informationen und kann z. B. Ergebnisse, indem er die Verschlüsselung rückgängig macht (decodiert), in normalen Buchstaben und Zahlen ausdrucken. Ein Computer dagegen, dessen Eingabeteil normalen Text lesen kann, wandelt die Informationen selbständig in seine Maschinensprache um, in der sie dann elektronisch verarbeitet werden.

Was heißt nun, eine Information zu verarbeiten?

Die Verarbeitung von Informationen setzt sich aus einer ganzen Reihe von Vorgängen zusammen, die nacheinander, mitunter auch gleichzeitig ablaufen. Alles, was zwischen der Aufnahme einer Information und der Reaktion eines Systems auf diese Information in diesem System vorgeht, stellt die Informationsverarbeitung dar. Dazu gehören Umwandlung und Verstärkung der Signale in den Signalempfängern, ihre Weiterleitung, die Auswahl, die Trennung wichtiger von weniger wichtigen Informationen, die Informationsspeicherung, Vergleiche mit früher gespeicherten Informationen, das Abarbeiten der eigentlichen Rechen- oder Entscheidungsprozesse zum Ermitteln des Ergebnisses oder zur Bestimmung der Reaktion mit Hilfe logischer Schaltelemente, das Erzeugen von Steuerbefehlen und deren Weiterleitung zu Reaktionsgliedern des Systems, etwa zum Ausgabedruckwerk eines Computers oder zum Antriebsmotor eines automatischen Fahrzeugs oder zu bestimmten Muskelgruppen eines Lebewesens.

Während der einzelnen Teilschritte der Informationsverarbeitung laufen elektrische Impulse zwischen den einzelnen Schaltelementen des Systems. Sie werden verteilt, vervielfacht, summiert und wieder weitergeleitet oder ausgelöscht. Von den vielen Elementarschritten der Informationsverarbeitung hängen deren Geschwindigkeit, ihre Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit ab.

Informationsverarbeitende Maschinen bestehen in der Hauptsache aus elektronischen Bauelementen, aus Dioden, Transistoren und integrierten Schaltkreisen. Ihre Speicher sind ebenfalls aus solchen Bauelementen oder aus magnetischen Schichten oder Drähten aufgebaut. Als äußere Speicher kennen wir z.B. Magnetband-, Magnettrommel- oder Magnetkartenspeicher. Die Dateneingabe erfolgt je nach Art und Zweck der Maschine über Meßsonden und Meßverstärker, durch Lochstreifenlesegeräte, die mit Fotodioden arbeiten, oder über Fotodiodentargets und Codiergeräte. Die Ergebnisse der Informationsverarbeitung werden durch Ziffernanzeigeelemente dargestellt, von Schnelldruckern ausgedruckt oder auf Bildschirmen sichtbar gemacht. Bei Prozeßrechnern und automatischen Steuerungen werden direkt elektrische Steuerbefehle an Stellmotoren gegeben, die dann mechanische Steuerelemente in Bewegung setzen.

Zur Charakterisierung informationsverarbeitender Maschinen verwendet man eine Reihe von Angaben wie Speicherkapazität, Speicherzugriffszeit, Leistungsaufnahme und Packungsdichte der elektronischen Bauelemente. Die Zuverlässigkeit einer Maschine ist in erster Linie durch die Zuverlässigkeit ihrer Bauelemente bestimmt. Sie kann durch redundante Schaltungen noch erhöht werden. Die Zuverlässigkeit einer Maschine, etwa gemessen an der Zahl der Betriebsstunden bis zu ihrem ersten Ausfall, ist eines ihrer wichtigsten Merkmale.

Es zeigt sich nun, daß in nahezu allen charakteristischen Größen eines informationsverarbeitenden Systems die bisher entwickelten technischen Anlagen den vorhandenen biologischen Systemen, etwa dem Zentralnervensystem des Menschen, unterlegen sind.

Ein Computer enthält 10^4 bis einige 10^5 elektronische Bauelemente. Das menschliche Zentralnervensystem besteht aus 10^{11} oder noch mehr Neuronen. Die Speicherkapazität eines großen Computers beträgt 10^5 bis 10^8 bit. Seine Speicherzugriffszeiten liegen zwischen 10^{-8} und 10^2 s, je nachdem, ob der Zentralspeicher oder die externen Langzeitspeicher benutzt werden. Die Speicherkapazität des Zentralnervensystems liegt zwischen 10^9 und 10^{13} bit. Seine Zugriffszeiten schwanken zwischen

10^{-2} s und 10 s, können unter Umständen allerdings auch noch wesentlich länger sein. Die Computerein- und ausgabegeräte bewältigen Informationsmengen von 10^2 bis 10^6 bit/s, das Zentralnervensystem dagegen bewältigt etwa 10^9 bit/s.

Diese Verhältnisse geben Anlaß genug, die Informationsverarbeitung in biologischen Systemen eingehend zu studieren und zu versuchen, die dabei gefundenen Prinzipien auf technische Systeme zu übertragen.

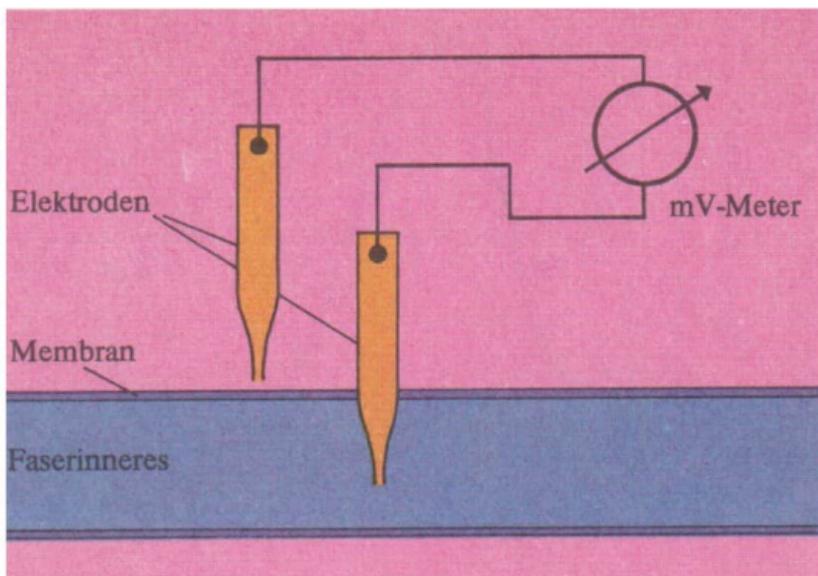
Forschungsprogramme mit derartigen Zielstellungen erfordern das Zusammenarbeiten von Wissenschaftlern vieler Spezialdisziplinen. Für Biologen, Physiologen, Physiker, Chemiker und Elektroniker gilt es, Systemlösungen der Natur ganz aufzudecken. Leider können wir davon zur Zeit trotz vieler schon bekannter Fakten erst wenig erkennen.

Impulsleitung in der Nervenfasern

Nerven sind aus einzelnen voneinander isolierten Fasern zusammengesetzt. Bei Wirbeltieren unterscheidet man marklose und markhaltige Nervenfasern – ein Unterschied, auf den wir später zurückkommen.

Nervenfasern sind von einer dünnen Membran umhüllte Flüssigkeitszylinder, deren Durchmesser zwischen $0,1 \mu\text{m}$ und einigen μm liegt, in Ausnahmefällen aber bis zu 1 mm betragen kann. Die Dicke der Membran mißt nur etwa $7,5 \cdot 10^{-6}$ mm. Das entspricht etwa 75 Durchmessern des Wasserstoffatoms. Die Membran besteht aus Eiweiß- und Lipoidmolekülen. Da diese erheblich größer sind als Wasserstoffatome, kann die Membran nur aus wenigen Moleküllagen bestehen.

Bei einigen Tieren, z. B. bei Tintenfischen und Krabben, fand man besonders dicke Nervenfasern, die sich für Experimente sehr gut eignen. Den englischen Forschern Hodgkin und Huxley, die erstmals 1939 die bis zu einem Millimeter dicken Nervenfasern von Tintenfischen untersuchten, gelang es, die der Ausbildung und Fortleitung elektrischer Impulse in der Nervenfasern zugrunde liegenden Vorgänge weitgehend aufzuklären. Später wurden

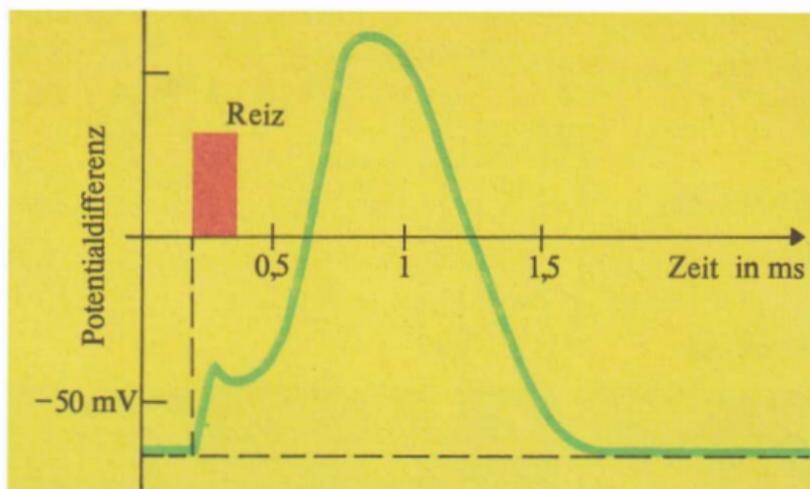


Potentialableitung an der Nervenfasermembran

ihre Ergebnisse auch an dünneren Fasern anderer Tiere bestätigt, so daß man heute sicher ist, daß alle Nervenfasern nach dem gleichen Prinzip arbeiten.

Elektrische Messungen werden bei derartigen Untersuchungen mit Hilfe einer Mikroelektrodenteknik durchgeführt, die zu außerordentlicher Feinheit und Präzision entwickelt worden ist. Die verwendeten Mikroelektroden bestehen vorzugsweise aus Glaskanülen, die mit einer elektrisch leitenden Salzlösung gefüllt sind. An den Spitzen sind diese Kanülen nur noch 0,5 bis 2 μm dick. Eine so feine Elektrode kann in eine Nervenfasermembran oder in eine Nervenzelle eingestochen werden. Sie mißt dann das elektrische Potential im Inneren der Faser bzw. der Zelle. Mit einer zweiten ähnlichen Elektrode ermittelt man das Potential außerhalb und erhält so die elektrische Potentialdifferenz (Spannung) zwischen beiden Meßpunkten. Setzt man solche Mikroelektroden an verschiedenen Stellen einer Nervenfasermembran an, so kann man die Fortpflanzung elektrischer Impulse beobachten und untersuchen.

Außer solchen elektrischen Messungen waren noch weitere physikalische und chemische Untersuchungen



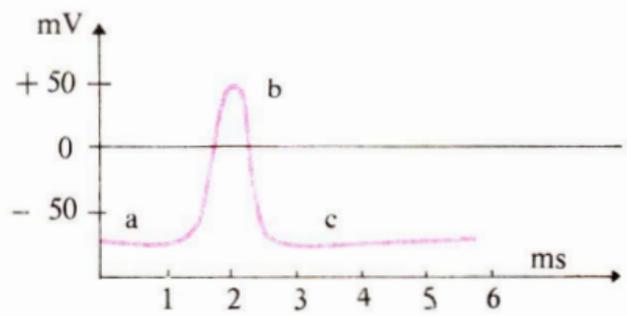
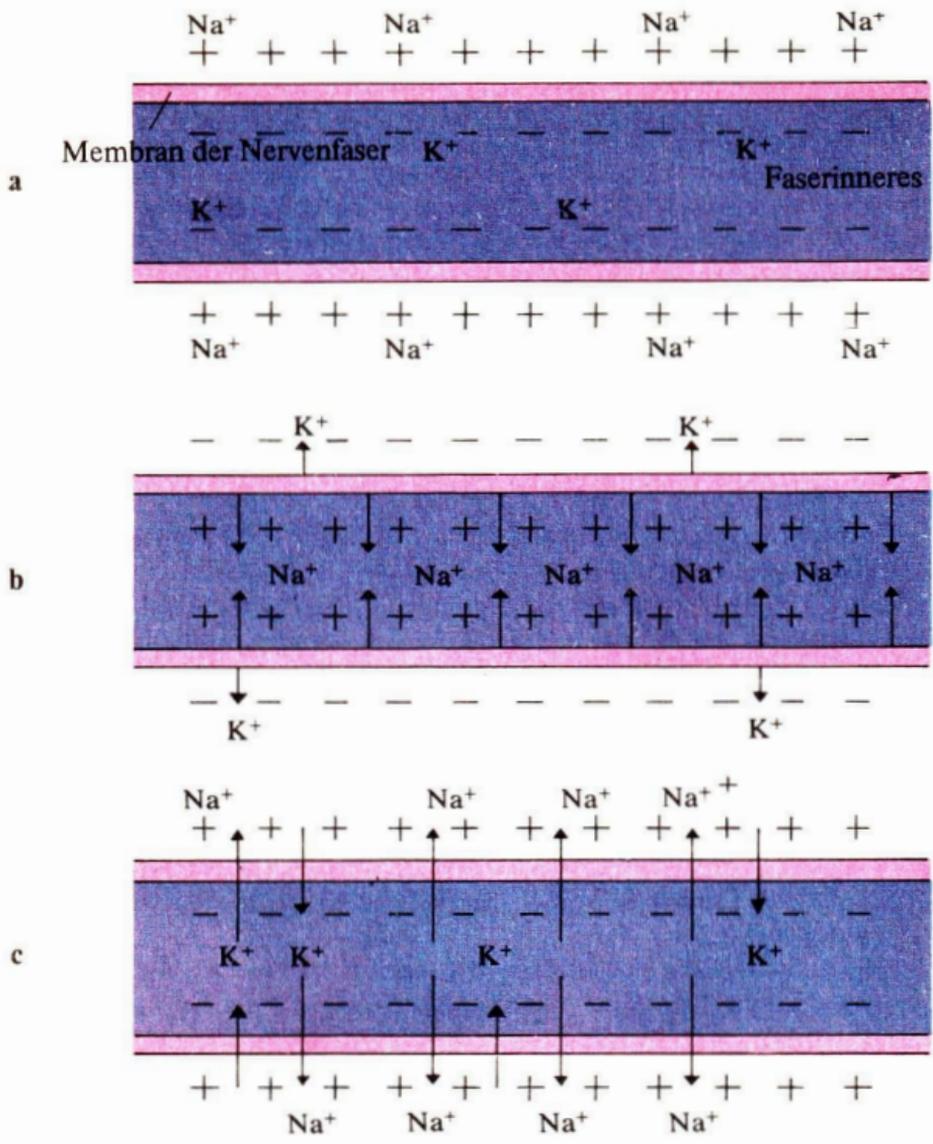
Impulsverlauf an der Axonmembran

notwendig, um die Vorgänge beim Fortleiten elektrischer Impulse in Nervenfasern aufzuklären. So wurde versucht, mit Methoden der Elektronenmikroskopie die Strukturen der Membranen aufzuklären. Biochemische Forschungen galten ihrer stofflichen Zusammensetzung und der Natur der angrenzenden Medien.

Die Messungen mit Mikroelektroden zeigten zunächst, daß das Faserinnere im Ruhezustand negativ geladen ist und daß zwischen den beiden Seiten der Fasermembran eine elektrische Potentialdifferenz vorhanden ist, die meist etwa 70 mV beträgt. Diese Potentialdifferenz wird als Ruhepotential der Faser bezeichnet. Wird ein elektrischer Impuls ausgelöst, bricht das Ruhepotential vorübergehend zusammen. Die Potentialdifferenz schlägt zum entgegengesetzten Vorzeichen um. Das Faserinnere wird also für einen Moment positiv und kehrt danach wieder zum ursprünglichen Zustand des Ruhepotentials zurück. Der eben beschriebene Vorgang dauert allerdings nur etwa eine Millisekunde.

Durch eine Reihe von elektrochemischen Untersuchungen fanden Hodgkin und Huxley und später andere Forscher, daß das Ruhepotential von einer ungleichmäßigen

Ionentransport in einer Nervenfasern



Verteilung verschiedener Ionen beiderseits der Membran herrührt. Dabei spielen Kalium- und Natriumionen eine besondere Rolle.

Im Ruhezustand ist die Konzentration von Kaliumionen im Faserinneren wesentlich höher als außen. Natriumionen treten dagegen außerhalb der Faser in höherer Konzentration auf. Besondere Ionenpumpmechanismen sorgen für die Aufrechterhaltung dieser Konzentrationsunterschiede. Da sowohl Kalium- als auch Natriumionen positiv geladen sind, müssen noch negative Ionen vorhanden sein. Neben negativen Chlorionen im Innen- und Außenraum treten im Faserinneren unter anderem größere, mehrfach negativ geladene Eiweißkörper auf, die die Membran nicht passieren können (vgl. Abb. auf S. 65, Teil a).

Bei einer Erregung der Membran (b) verändert sich deren Durchlässigkeitsverhalten gegenüber den verschiedenen Ionen. Zunächst verstärkt sich wesentlich der Natriumionen-Einstrom, bis er etwa zwanzigfach stärker ist als der Kaliumionen-Ausstrom. Dadurch überwiegen kurzzeitig positive Ladungen im Faserinneren. Sie sind die Ursache für die vorher beschriebene Umpolarisierung der Membran während eines Impulses. Hört die Erregung auf, so nimmt die Membran ihren Ruhezustand erneut ein. Mit Hilfe der genannten Ionenpumpmechanismen werden die ursprünglichen Ladungs- und Potentialverhältnisse wieder hergestellt (c).

Um Nervengewebe isoliert am Leben erhalten zu können, bedarf es kalium- und natriumhaltiger Lösungen. Stoffe, die den Ionenaustausch an der Nervenfasermembran blockieren, stellen tödliche Nervengifte dar. Damit treten hinter diesen Erkenntnissen auch Möglichkeiten zutage, neurophysiologische Forschungsergebnisse zum Schaden der Menschen auszunutzen und durch hemmungslose Profitsucht unübersehbare Gefahren für die Menschheit heraufzubeschwören.

Eine elektrische Potentialänderung an der Fasermembran, ausgelöst z. B. durch die Erregung eines Rezeptors, breitet sich in Form eines Impulses mit einer bestimmten, der Faser eigenen Geschwindigkeit längs der Faser aus, sobald sie an der Ausgangsstelle einen Mindestwert von etwa 10 mV überschritten hat. Wird dieser Schwellenwert

nicht erreicht, so bleibt die Erregung lokal begrenzt. Wird er aber überschritten, dann verändert sich die Ionendurchlässigkeit auch des benachbarten Membranstücks. Der Iontentransport durch die Membran setzt dort ebenfalls ein, führt zum Überschreiten des Potentialschwellenwertes und seinerseits zur Erregung des nächsten Membranstücks und so fort. Auf diese Weise breitet sich ein einmal an irgendeiner Stelle der Nervenfasern ausgelöster Impuls aktiv über die ganze Faser aus.

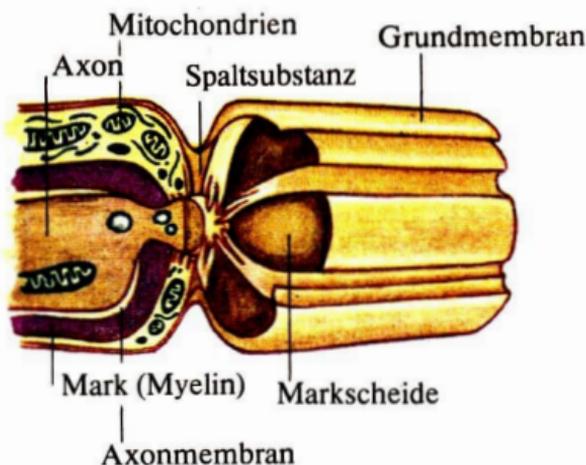
Diese Impulsleitung erfolgt mit konstanter Geschwindigkeit und verlustlos, also mit konstanter Impulsamplitude. Ist nach dem Ablauf eines Impulses das Rezeptorpotential oder das Potential der Nervenzelle, von der die betreffende Faser herkommt, noch nicht unter den Schwellenwert abgesunken, so wird ein zweiter Impuls ausgelöst – je nach Erregungsstärke werden ein einzelner Impuls, mehrere oder ganze Impulssalven ausgelöst. Die Reizstärke wird somit frequenzmoduliert durch die Nervenfasern übertragen.

Die Energie für die Erregungsbildung und die Impulsleitung stammt aus dem Stoffwechsel der betreffenden Zellen, hängt also mit dem Energiehaushalt des gesamten Organismus zusammen.

Ist ein Impuls über ein Faserstück gelaufen, so ist eine bestimmte Erholungszeit notwendig, die vergehen muß, bis die Membran an dieser Stelle wieder erregbar ist und ein zweiter Impuls durchlaufen kann. Diese Erholungszeit, auch Refraktärzeit genannt, beträgt etwa eine Millisekunde. Je Sekunde können demnach bis zu 1000 Impulse über eine Nervenfasern laufen.

Die Impulsleitungsgeschwindigkeit in marklosen Nervenfasern hat je nach Faserstärke Werte zwischen 2 und 25 m/s. Wesentlich höhere Leitungsgeschwindigkeiten treten in den markhaltigen Nervenfasern auf. Je nach Dicke der Faser werden 120 m/s und mehr erreicht. (Bei Wirbeltieren messen die dicksten Fasern etwa 0,1 mm im Durchmesser.)

Die markhaltigen Nervenfasern bestehen aus dem Axon oder Achsenzylinder, dem eigentlichen Fortsatz der Nervenzelle, der von einer sogenannten Markscheide aus Schwannschen Zellen umhüllt ist. Die Schwannschen



Ranvierscher Schnürring (Schnitt)

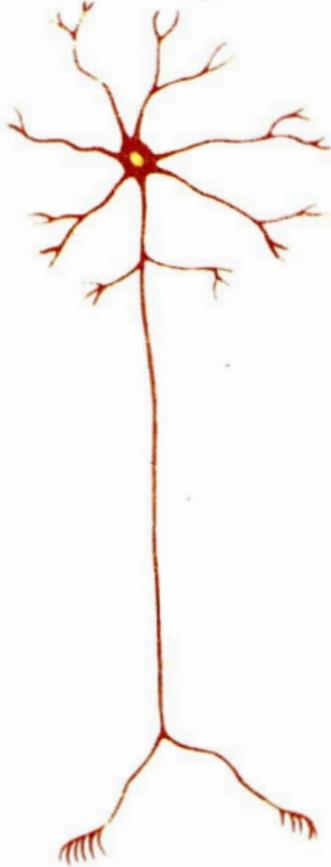
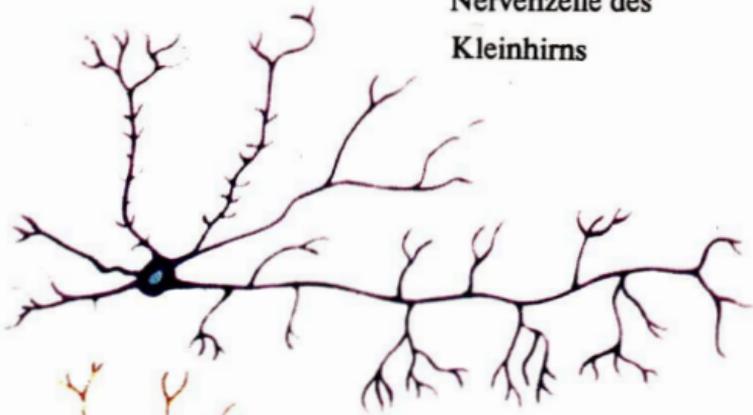
Zellen isolieren die Membran des Achsenzylinders sowohl elektrisch als auch chemisch vom äußeren Medium. Alle 1 bis 2 mm, an den Ranvierschen Schnürringen, liegt die Membran des Achsenzylinders frei. Im Bereich der Markscheiden fließt der Impulsstrom – passiv infolge des Potentialgefälles – wie in jedem anderen elektrischen Leiter. Der bei den marklosen Fasern beschriebene Kalium- und Natriumionenaustausch findet nur an den Schnürringen statt. Die Erregung der Fasermembran springt von Schnürring zu Schnürring. Diese springende oder saltatorische Erregungsleitung ermöglicht die viel höheren Leitungsgeschwindigkeiten.

Jeder Schnürring stellt einen Verstärker dar, durch den der Leitungsverlust innerhalb des vorangegangenen Markscheidenabschnitts ausgeglichen wird.

Im Prinzip kann die Impulsleitung innerhalb der Nervenfasern in beiden Richtungen erfolgen, wie durch Experimente mit künstlichen Reizen leicht zu beweisen ist. Unter natürlichen Bedingungen aber pflanzt sich der Impuls immer nur in einer Richtung fort. Dafür sorgen die später zu besprechenden Synapsen an den Faserenden, die Ventile darstellen und die Erregung nur in einer Richtung übertragen.

Funktionell lassen sich verschiedene Fasern unterscheiden. Die sensiblen, zentripetalen oder afferenten

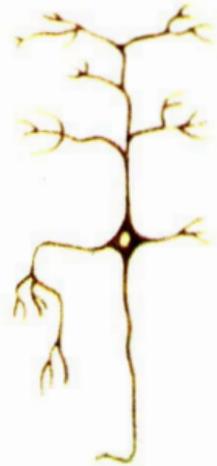
Nervenzelle des
Kleinhirns



motorische Vorderhornzelle
des Rückenmarks



Neuron des
vegetativen
Nervensystems



pyramidales Neuron
der Großhirnrinde

Verschiedene Formen von Zellen des Nervensystems

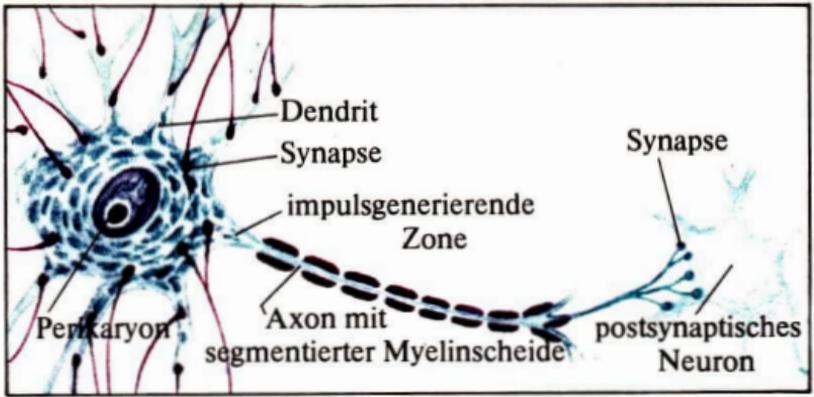
Fasern leiten die Informationen von Rezeptoren her zum Zentralnervensystem, während die zentrifugalen oder efferenten Fasern, vom Zentralnervensystem kommend, zu den Effektoren, z. B. zu Drüsen und Muskeln, führen. Diese Fasern sind jeweils in Bündeln zu Nervensträngen zusammengefaßt, die von bindegewebigen Hüllen geschützt werden. Sehr feine Netze von Blutgefäßen durchsetzen diese Hüllen und versorgen die Nervenfasern mit den lebensnotwendigen Substanzen.

Die Nervenfasern enden innerhalb des Zentralnervensystems an Nervenzellen (Neuronen), von denen wieder neue Axonen (Fasern) ausgehen. Diese Nervenzellen oder Neuronen haben verschiedene Formen und Größen. Sie stellen Schaltelemente im Nervensystem dar. Bisher ist es nur in wenigen Fällen gelungen, den Informationsweg über afferente Fasern und zwischengeschaltete Neuronen bis zum Zentralnervensystem und von diesem zurück bis zu bestimmten Effektoren exakt zu verfolgen. Auf solche Untersuchungen und ihre Ergebnisse werden wir in den folgenden Abschnitten eingehen.

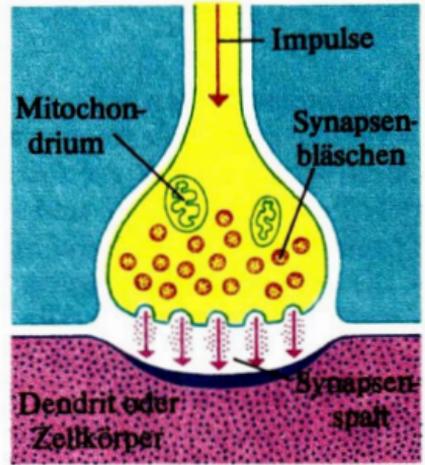
Das Neuron als Schaltelement

Wie ein elektrisches Gerät aus vielen Bauelementen – Transistoren, Dioden, Widerständen, Kondensatoren – besteht, ist auch das Zentralnervensystem aus einzelnen Elementen, den Nervenzellen (Neuronen), aufgebaut. Jedes Neuron besteht aus einem zentralen Zellkörper. Es besitzt meistens eine mehr oder weniger große Zahl von kurzen, verzweigten Fortsätzen (Dendriten) und einen langen Fortsatz (Axon). Die Axone oder Achsenzylinder der Neuronen stellen die Nervenfasern dar, von denen im vorangegangenen Abschnitt die Rede war. Ihre Länge kann bei größeren Tieren 1 m und mehr betragen. Das trifft z. B. auf die Axone der Neuronen im Rückenmark zu, die zur Gliedmaßenmuskulatur führen. Axone anderer Neuronen sind häufig nur einige Zentimeter oder Millimeter, mitunter auch nur Bruchteile eines Millimeters lang.

Das Axon kann als Informationsausgang des Neurons angesehen werden. Es endet wieder an einem Neuron oder



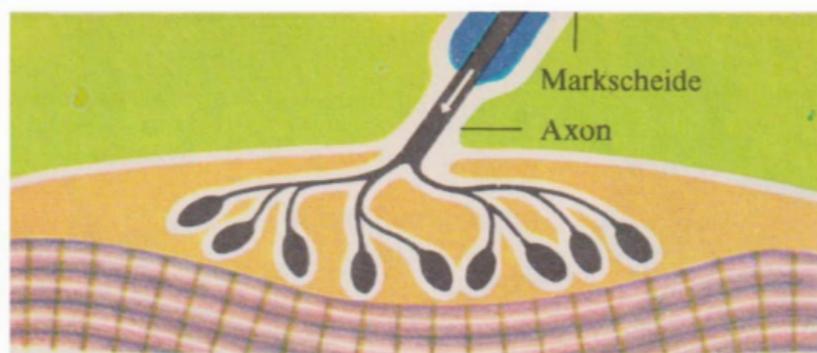
Nervenzelle (Neuron)



Synapse (schematisch)

an einem Effektor, z. B. an einer Muskelfaser. Das Axon kann ein oder einige seitliche Ästchen (Kolateralen) besitzen, im Endbereich jedoch spaltet es sich in Hunderte oder gar Tausende feinsten Ästchen auf. In den Enden der Axonverzweigungen befinden sich kleine, meist knopfartige Verdickungen, die Synapsen.

Elektronenmikroskopische Untersuchungen zeigten, daß die Axonendigung und der benachbarte Membranbezirk der nachgeschalteten Zelle durch einen winzigen Spalt von etwa $2 \cdot 10^{-5}$ mm Breite getrennt sind. Über diesen Spalt erfolgt die Übertragung der Axonimpulse auf indirektem Wege durch einen Wirkstoff, der als Transmitter bezeichnet wird. Die chemische Zusammensetzung dieser Transmitter ist nicht bei allen Synapsen dieselbe und



Motorische Endplatte – die Endigung einer motorischen Nerven-faser an einem Muskel

nur in einigen Fällen bekannt. An motorischen Endplatten, den Endigungen von Axonen an Muskelfasern, besteht der Überträgerstoff aus Acetylcholin. Im Zentralnervensystem von Wirbeltieren sind mehr als zehn verschiedene Transmittertypen nachgewiesen worden.

Die Erregungsübertragung ist an den Synapsen nur in einer Richtung möglich. Die Synapsen haben also unter anderem eine Ventil- oder Gleichrichterfunktion. Durch die relative Trägheit des Übertragungsprozesses entsteht an den Synapsen eine kleine zeitliche Verzögerung, die möglicherweise zu einem taktartigen Arbeiten innerhalb von Neuronennetzen führt.

Die Informationseingänge eines Neurons sind in den meisten Fällen seine Dendriten, kurze, verzweigte Fortsätze, an denen die Axonendigungen vorgeschalteter Neuronen oder Rezeptoren über Synapsen elektrische Impulse übertragen. Außerdem sind auch direkt am Nervenzellkörper synaptische Informationseingänge zu beobachten.

Wie andere erregbare Strukturen bilden Neuronen ein elektrisches Ruhepotential aus und zeigen Schwellenverhalten. Durch Impulse, die an den synaptischen Eingängen eintreffen, wird das elektrische Potential des Neurons verändert. Wird dabei die Reiz- oder Impulsschwelle überschritten, so sendet das betreffende Neuron seinerseits über sein Axon Impulse aus, die nachgeschaltete Neuronen erreichen und dort weiter verarbeitet werden. Impulse, die

auf diese Weise ein Neuron erreichen, können entweder erregend (Membranpotential senkend) oder hemmend (Membranpotential erhöhend) wirken.

Im Neuron summieren sich nun alle an den verschiedenen synaptischen Eingängen gleichzeitig eintreffenden Impulse zu einer Gesamtänderung seines elektrischen Potentials. Das Ergebnis dieser räumlichen Summation entscheidet darüber, ob die Reizschwelle überschritten wird, ob also das Neuron selbst Impulse ausbildet und weiterleitet und – wenn ja – wieviel Impulse zu den nachgeschalteten Neuronen übertragen werden.

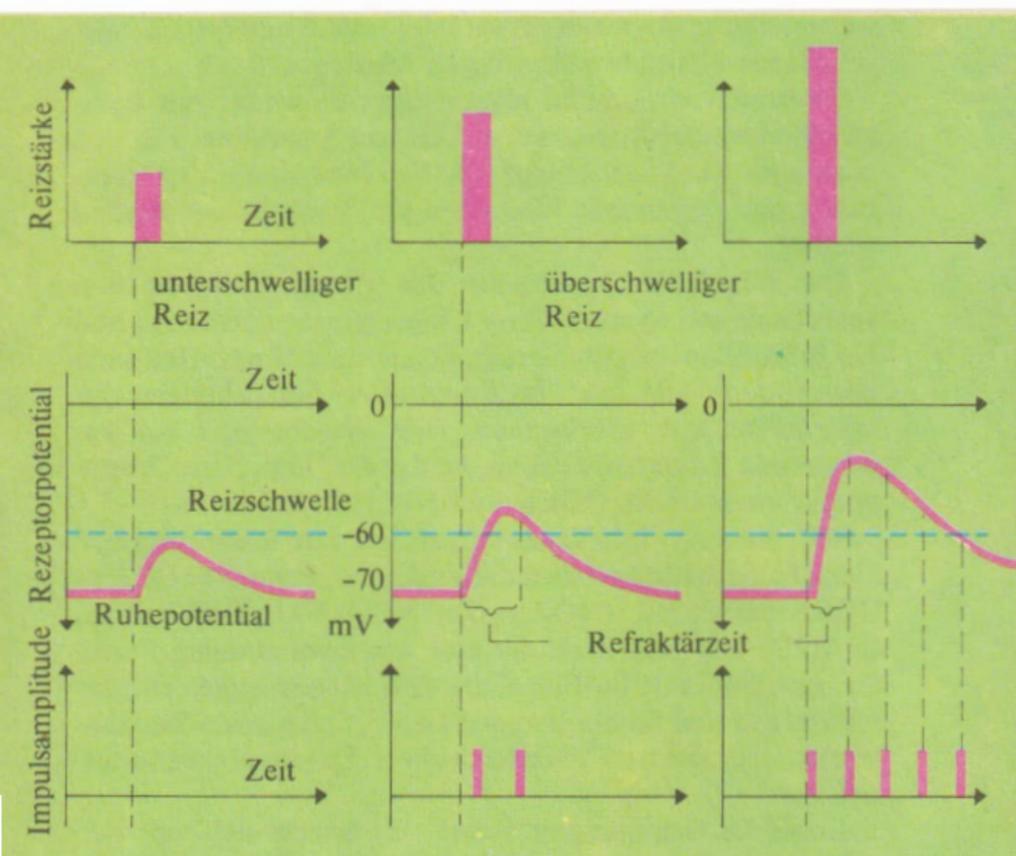
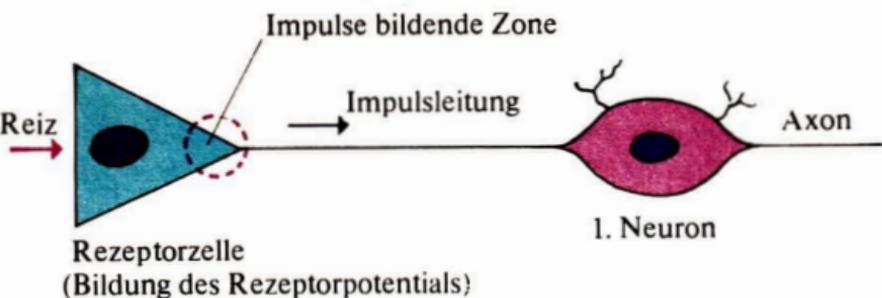
Neuronen wirken im allgemeinen entweder nur hemmend oder nur aktivierend auf andere Neuronen. Für den normalen Funktionsablauf im Nervensystem sind erregende und hemmende Neuronen praktisch gleichermaßen wichtig.

Die räumliche Summation der Erregungen von den verschiedenen synaptischen Eingängen des Neurons und das Schwellenverhalten ermöglichen dem Neuron logische Operationen, die wir von integrierten Schaltkreisen der Mikroelektronik her kennen. Dort spricht man von sogenannten Logikbausteinen, die die drei logischen Grundoperationen UND, ODER und NICHT realisieren.

Mit solchen Logikbausteinen werden kompliziertere logische Schaltungen zusammengesetzt, etwa die NICHT-ODER-Schaltung (NOR), die NICHT-UND-Schaltung (NAND) oder der Multivibrator mit zwei stabilen Funktionszuständen (Flip-Flop), die sich wieder weiter zusammensetzen und kombinieren lassen bis zu ganzen Rechenwerken moderner elektronischer Datenverarbeitungsanlagen.

Logische Schaltungen dieser Art lassen sich aus verschiedenen Bauelementen aufbauen. In den ersten elektrischen Rechenmaschinen bestanden sie z. B. aus elektromagnetischen Relais und Elektronenröhren. Moderne Maschinen arbeiten mit Halbleiterdioden und -transistoren (und anderen Bauelementen), die zu integrierten Schaltkreisen vereinigt sind.

Die Existenz einer Reizschwelle ermöglicht nun den Neuronen ein ganz ähnliches logisches Schaltverhalten. Reicht ein einziger Impuls an einem der synaptischen



Rezeptorpotential und Impulsfrequenz in der erregungsleitenden Nervenfaser

Eingänge aus, um das Neuron zu erregen, so funktioniert dieses wie ein ODER-Baustein. Ergibt erst die Summation mehrerer Impulse von verschiedenen Eingängen ein Überschreiten des Potentialschwellenwertes, so wirkt das

Neuron ähnlich einem UND-Baustein. Im Fall von hemmenden Impulsen an den Eingängen realisieren diese das Verhalten eines NICHT-Bausteins.

Wir haben damit erste Anhaltspunkte zum Verständnis für die Arbeitsweise von Nervenzellen als Schaltelemente in der Informationsverarbeitung des Zentralnervensystems erhalten. Wegen der oft sehr großen Zahl synaptischer Eingänge an einem Neuron und deren funktioneller Verschiedenwertigkeit bleibt es dennoch außerordentlich schwierig, Funktionen und Arbeitsweise auch nur sehr kleiner Teile von Neuronennetzen zu ergründen. Bisher sind dazu nur erste Ansätze vorhanden, aber es besteht kein Zweifel daran, daß die Forschung auf dem eingeschlagenen Wege zu immer tieferen Erkenntnissen vordringen wird.

Außer der räumlichen Summation der Eingangsimpulse tritt im Neuron auch eine zeitliche Summation von Impulsen auf, die wichtige Konsequenzen für das elektrische Verhalten von Neuronen hat.

Schließlich soll noch eine weitere Eigenschaft der Neuronen erwähnt werden, die wir bei den Rezeptoren auch bereits kennengelernt haben. Die Neuronen besitzen die Fähigkeit zur Anpassung an Dauerreizung. Bei fortdauernder Erregung, also bei ununterbrochenem Eintreffen von Impulsen an den Informationseingängen, erhöht sich für manche Neuronen die Reizschwelle. Infolgedessen erniedrigt sich bei andauernder Erregung nach und nach die Ausgangsimpulsfrequenz. Diese Anpassung der Neuronen führt zu einer Verringerung der zu verarbeitenden Signale und sichert das Gesamtsystem gegen Informationsüberflutung.

Offenbar besitzen nicht alle Neuronen diese Fähigkeit. Man hat nämlich auch beobachtet, daß bestimmte Neuronen nach dem Durchgang eines oder mehrerer Impulse die Impulsfrequenz erhöhen.

Unser Wissen über die Elementarbausteine des Nervensystems läßt eine ganze Reihe von Problemen offen. Trotzdem eröffnen sich heute schon interessante technische Perspektiven auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse. Ein Beispiel konnte ein Forscherkollektiv der Technischen Hochschule »Otto von Guericke« in Magdeburg

geben. Diese Wissenschaftler untersuchten Dehnungsrezeptoren von Flußkrebsen und die anschließende Verarbeitung der Meßinformationen in unmittelbar den Dehnungsrezeptoren nachgeschalteten Neuronen. Das Studienobjekt erwies sich als besonders geeignet, weil es sich um ein einfaches, gut überschaubares System handelt. Das Ergebnis ihrer Untersuchungen wurde anschließend in einer technischen Schaltung zur Spannungs-Frequenz-Umsetzung angewandt, deren Aufgabe es ist, wechselnde Spannungsamplituden in Impulsfrequenzfolgen gleicher, konstanter Spannung umzusetzen. Dieses technische Problem tritt in der Elektrotechnik auf. Dabei kommt es darauf an, daß die Impulsfrequenz möglichst genau linear mit der Amplitude der elektrischen Spannung wächst und fällt. Gegenüber der bekannten Methode der spannungsproportionalen Kondensatorentladung konnte das Magdeburger Kollektiv mit einer einfacheren Schaltung eine bessere Linearität erhalten. Ihr Ergebnis dürfte sehr wichtig für das Speichern analoger Daten, für die Datenverdichtung frequenzverschlüsselter Signale und für den Bau von Prozeßrechnern sein.

Technische Modelle der Nervenzelle

Technische Modelle, aufgebaut aus elektronischen Bauelementen, die das an Nervenzellen beobachtete Verhalten nachbilden, gestatten einerseits, Eigenschaften und Verhaltensweisen der biologischen Vorbilder besser zu verstehen und unter verschiedenen Betriebsbedingungen zu untersuchen, andererseits aber stellen sie möglicherweise sehr wichtige Schritte auf dem Wege dar, die biologischen Prinzipien der Informationsverarbeitung auf technische Schaltungen und ganze Geräte zu übertragen.

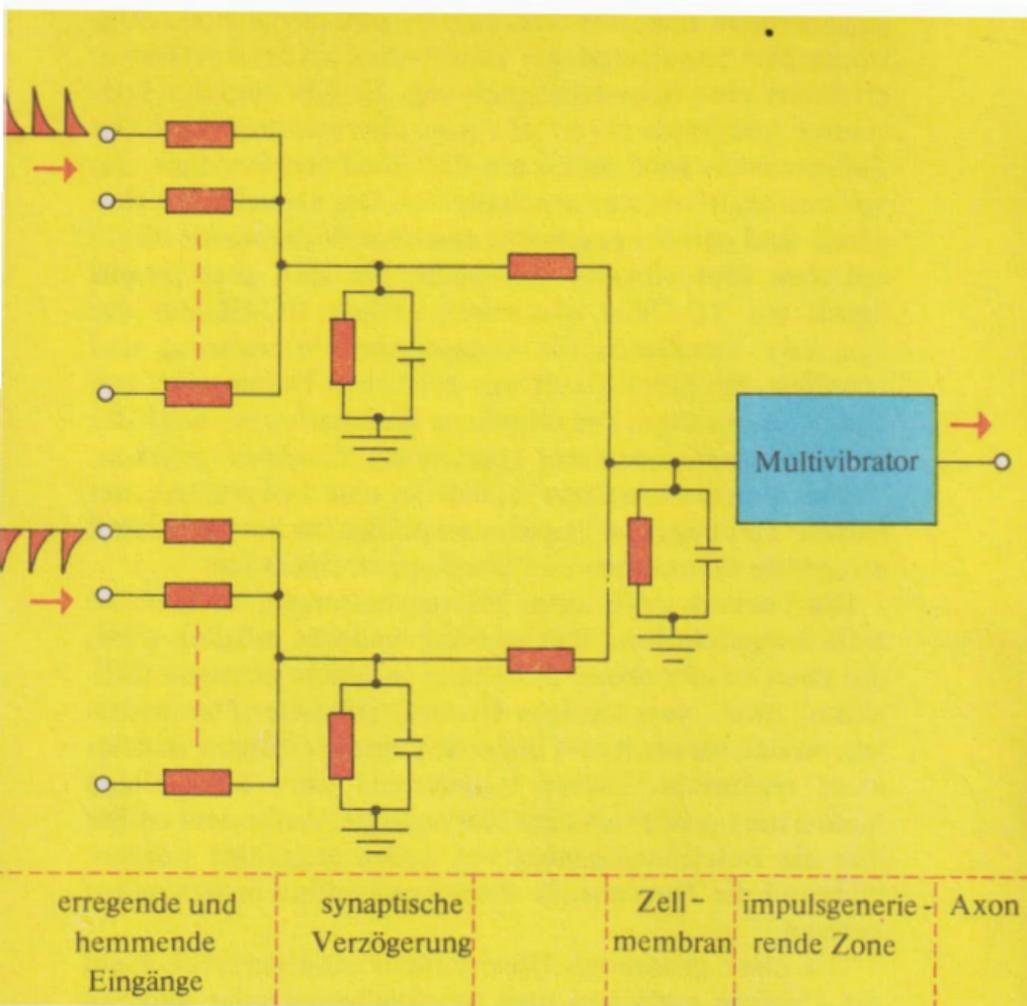
Wir wollen hier das technische Modell eines Neurons beschreiben, das 1961 von K. Küpfmüller und F. Jenik angegeben wurde. In diesem Modell werden als Bauelemente Dioden, Transistoren, Kondensatoren und Widerstände verwendet. Um eine Nervenzelle mit zwanzig Eingängen und hundert Ausgängen zu simulieren, werden mehr als sechzig dieser Bauelemente benötigt. Die impuls-

generierende Zone der Nervenzelle wird durch einen elektronischen Impulserzeuger (Multivibrator) ersetzt. Dieser erfordert eine Schwellenspannung. Er gibt Impulse konstanter Amplitude ab, sobald diese überschritten wird. Die Zellmembran wird durch ein RC-Glied repräsentiert, das vor den Multivibrator geschaltet ist. Die elektrischen Eingänge sind parallel geschaltet und über Widerstände direkt mit dem Multivibrator gekoppelt. Sie sind aber jeweils durch ein RC-Glied überbrückt. Diese RC-Glieder der Eingänge simulieren die synaptische Verzögerung und schaffen die Möglichkeit der zeitlichen Summation von Eingangsimpulsen. Die räumliche Summation ist durch das Vorhandensein mehrerer (paralleler) Eingänge gegeben. Trennt man die Eingänge so, daß der eine Teil positive, der andere Teil negative Impulse empfängt, so hat man damit erregende und hemmende Eingänge nachgebildet.

Die Technik integrierter Mikroschaltungen ist heute so weit fortgeschritten, daß es ohne weiteres möglich wäre, die eben beschriebene Schaltung in einem einzigen (Silizium-) Block von wenigen Quadratmillimetern herzustellen, so daß sie auch rein äußerlich einem einzigen Bauelement entspricht. Dieses Bauelement wäre dann einige hundertmal größer als eine Nervenzelle. Außerdem müßte ihm die Betriebsspannung von außen zugeführt werden, während die Nervenzelle diese bekanntlich in sich selbst erzeugt.

Die eben genannten Unterschiede sind natürlich nicht die einzigen zwischen dem beschriebenen oder anderen Neuronenmodellen und echten Nervenzellen. So bleibt z. B. die Verschiedenwertigkeit synaptischer Eingänge unberücksichtigt. Wir müssen auch damit rechnen, daß uns wichtige Eigenschaften der Neuronen noch gar nicht bekannt sind.

Man kann nun technische Modellneuronen zu komplizierteren Schaltungen zusammensetzen und versuchen, daran Verhalten und Eigenschaften von Neuronennetzen zu studieren. Es ist auch möglich, die gefundenen Eigenschaften eines Neurons in mathematischen Gleichungen zu formulieren, das Neuron also durch einen Satz mathematischer Gleichungen zu beschreiben. Das eröffnet dann wiederum die Möglichkeit, das Verhalten von Neuro-



Neuron – Modell nach Küpfmüller

nennetzen zu berechnen und diese theoretischen Vorhersagen mit Beobachtungen zu vergleichen.

Für den Bau moderner elektronischer Geräte bieten allerdings Modellneuronen von der Art des beschriebenen nicht allzuviel Neues, da sie mit den gleichen Bauelementen arbeiten, die auch in den üblichen Schaltungen verwendet werden. Sie führen weder zu Vereinfachungen und Verkleinerungen noch zur Erhöhung der Zuverlässigkeit elektronischer Geräte.

Dagegen verspricht ein neuer Weg zur Modellierung

biologischer Schaltungen solche Vorteile. Dieser Weg geht von einem Effekt aus, der 1964 von I. B. Gunn entdeckt wurde. Gunn beobachtete an homogenen Plättchen aus Galliumarsenid, die mit zwei Metallkontakten versehen waren, das Auftreten elektromagnetischer Schwingungen, wenn die an den Kontakten anliegende elektrische Spannung einen bestimmten Wert überschritten hatte.

Der Gunneffekt wurde sofort nach seiner Entdeckung von vielen Forschergruppen untersucht und auch bei einer Reihe anderer Halbleiter gefunden.

Eine ausführliche physikalische Erklärung des Effektes würde hier zu weit führen. Sein Auftreten hängt von bestimmten Zusammenhängen zwischen der elektrischen Feldstärke und der Beweglichkeit der Elektronen im Halbleiter ab. Unter bestimmten Bedingungen für diese Größen treten Stromschwingungen auf. Die Elektronen bewegen sich nicht mehr in einem gleichförmigen Strom von der negativen zur positiven Elektrode, sondern pulsierend. Sie driften in Ladungswolken durch die Halbleiterprobe. Man nennt diese Ladungswolken auch Domänen, und da die elektrischen Feldstärken sehr hoch sein müssen, spricht man von Hochfelddomänen.

Wir vermerken zunächst die Existenz einer Schwellenfeldstärke, die überschritten werden muß, wenn die Stromschwingungen – die Hochfelddomänen – auftreten sollen. Eine zweite beachtliche Übereinstimmung mit der Impulsleitung in Nervenfasern ist das Auftreten einer Refraktärzeit. Eine zweite Domäne kann sich nämlich erst dann an der Quellelektrode bilden, wenn die erste die Saugelektrode erreicht hat. Die Refraktärzeit hängt also von der Driftgeschwindigkeit und dem Elektrodenabstand ab.

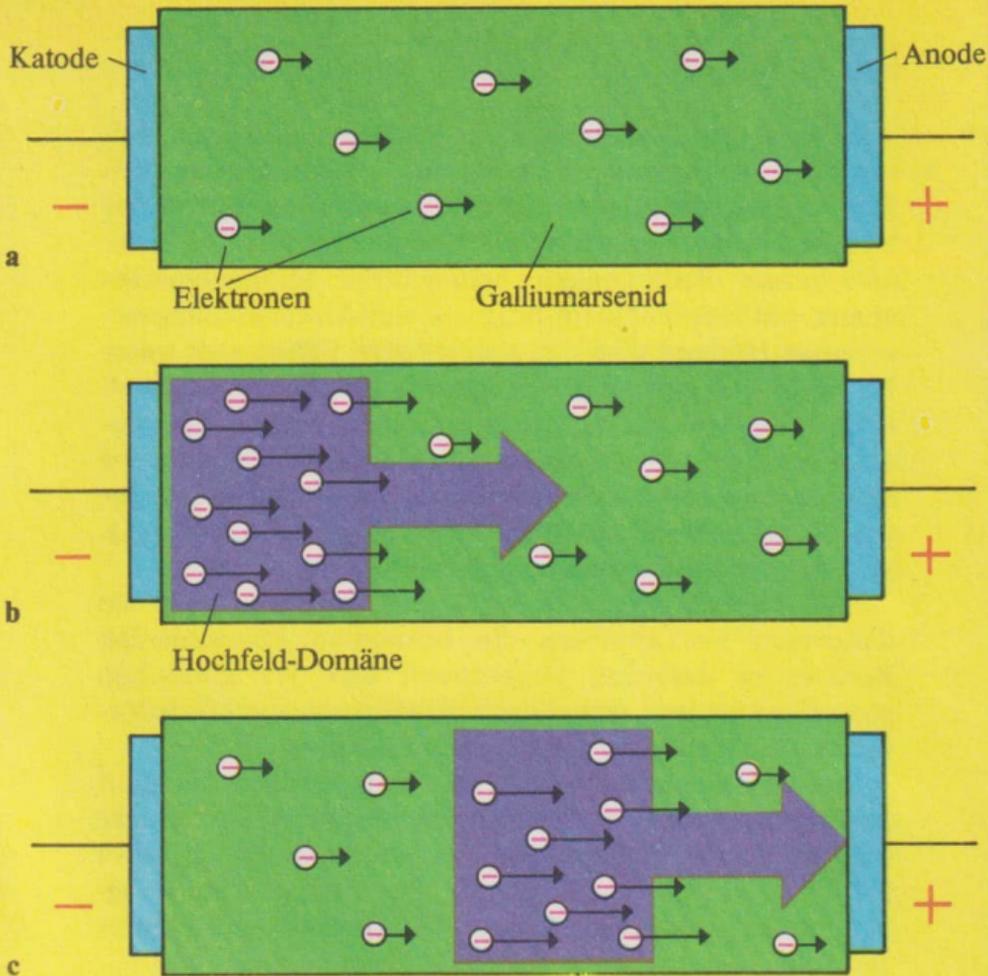
Später hat man festgestellt, daß es verschiedene Mechanismen gibt, die zur Domänenbildung führen. Der von Gunn entdeckte Effekt beruht auf einem dieser Mechanismen. Die Domänen bilden sich im Halbleiter durch verschiedene Wechselwirkungen zwischen dem Kristallgitter und den in ihm teilweise gebundenen, teilweise frei beweglichen Elektronen. Je nach dem physikalischen Prozeß, nach dem gebundene Elektronen in frei bewegliche übergehen können, treten Domänenendriftgeschwindigkeiten von

etwa 1 cm/s bis zu 10^7 cm/s auf. Sind etwa die beiden Elektroden 1 mm voneinander entfernt, so kann man Refraktärzeiten zwischen 0,1 und 10^{-8} s erhalten.

Wir haben gesehen, daß die Eigenschaft des Schwellenverhaltens zu räumlicher und zeitlicher Summation von Impulsen führen kann. Obwohl die Domänenbildung und die elektrischen Prozesse in einer Nervenfasern oder -zelle auf ganz verschiedenen physikalischen Vorgängen beruhen – erstere auf Elektronenbewegungen in Festkörpern, letztere auf Ionenbewegungen durch eine (»aktive«) Membran –, lassen sich beide Vorgänge nach gleichen Prinzipien für die Verarbeitung von Informationen ausnutzen.

Das ist ein hervorragendes Beispiel für die Möglichkeit, Systemlösungen der Natur auf die Technik zu übertragen, ohne die Besonderheiten biologischer Substanzen und physikochemischer Vorgänge, die an die lebende Materie gebunden sind, nachbilden zu müssen. Allein die Ähnlichkeit in zwei charakteristischen Eigenschaften, dem Schwellenverhalten und dem Auftreten einer Refraktärzeit, gestattet es, Bauelemente zu konstruieren, die wie ein Neuron funktionieren. Im Unterschied zu dem vorher beschriebenen Neuronenmodell können wir erwarten, daß nur noch ein einziges oder höchstens sehr wenige elektronische Bauelemente genügen, um logische Funktionen auszuführen, die denen eines Neurons vergleichbar sind.

Im Jahre 1968 entwickelten japanische Wissenschaftler ein derartiges elektronisches Bauelement – Neuristor genannt – und stellten es der Öffentlichkeit vor. Es bestand aus Galliumarsenid. Der Domänendriftkanal zwischen zwei Elektroden war mit einer dünnen Isolatorschicht überzogen, auf der mehrere Steuerelektroden angebracht waren. Diese Steuerelektroden fungierten als Eingänge. Wurden Impulse auf einen oder mehrere dieser Eingänge gegeben, die zum Überschreiten der Schwellenfeldstärke in der elektronenleitenden Galliumarsenidschicht führten, so wurde in dieser eine Domäne ausgelöst, die durch die Anordnung lief. Die Saugelektrode stellt den elektrischen Ausgang dar. Durch besondere Gestaltung und Bemessung der Halbleiterschicht und der Steuerelektroden gelingt es, die schon besprochenen Logikschaltungen nach diesem neuen Prinzip zu realisieren.



Entstehen und Driften einer Hochfelddomäne

a) Stromleitung unterhalb der Schwellfeldstärke; b) Hochfelddomäne bildet sich an der Katode, wenn eine Schwellfeldstärke überschritten wird (die Pfeillängen symbolisieren die Geschwindigkeiten der Elektronen); c) die Hochfelddomäne driftet durch die Galliumarsenidprobe zur Anode.

Die Entwicklung solcher Bauelemente ist noch im Fluß, ihre Serienfertigung noch sehr schwierig. Für die elektronische Informationsverarbeitung bietet sich in den driftenden Hochfelddomänen ein neuer Effekt an, der diese auch ein Stück näher an die Informationsverarbeitung in biologischen Systemen heranführen könnte.

Reflexbögen und Verhaltensprogramme

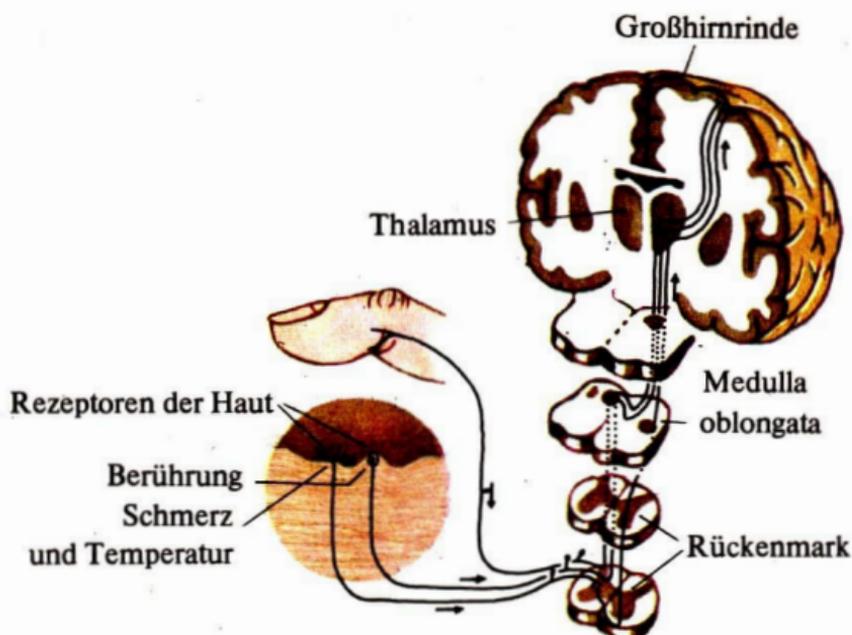
Vergleicht man Schaltzeiten und Leitungsgeschwindigkeiten im Zentralnervensystem mit den entsprechenden Größen der Signalleitung in einem Computer, so fällt dieser Vergleich sehr zugunsten des Computers aus. Die unter natürlichen Bedingungen beobachtete Impulsfolgefrequenz von Nervenfasern liegt – soweit Untersuchungsergebnisse bekannt sind – in den meisten Fällen weit unter 10^3 Hz. Schaltungen mit sehr schnellen Bipolartransistoren können dagegen bis zu 10^9 Hz erreichen. Die Leitungsgeschwindigkeit in den dicksten, markhaltigen Nervenfasern beträgt etwa 150 m/s, in metallischen Leiterbahnen dagegen ist sie nahe der Lichtgeschwindigkeit (300 000 km/s), also mehr als millionenmal schneller.

Aus diesem Vergleich ergibt sich die Frage, wie bei derartigen Verhältnissen die bekannten blitzschnellen Reaktionen tierischer Organismen und des Menschen zustande kommen, wobei doch offenbar meist große Informationsmengen verarbeitet werden müssen.

Soll ein Mensch eine vorher nie ausgeübte Tätigkeit ausführen, so tut er das vorsichtig, meist recht ungeschickt und mit relativ großem Zeitaufwand. Er muß sich dabei fortwährend selbst kontrollieren. Bei einer solchen Tätigkeit ist die Großhirnrinde oberstes Kontroll- und Steuerzentrum.

Die Steuerimpulse für die Willkürbewegungen laufen vom motorischen Zentrum der Großhirnrinde über die sogenannte Pyramidenbahn zu den motorischen Neuronen im Rückenmark und von dort zum Erfolgsorgan, also zu Muskelgruppen des Rumpfes oder der Gliedmaßen. Solange die Bewegung ungeübt ist, werden für jedes Detail Steuerimpulse von seiten der Willkürmotorik gebraucht. Trotzdem erscheint die Bewegung eckig und ungeschickt. Wir brauchen nur an die ersten Schreibversuche von Kindern zu denken.

Neben den direkten Steuerimpulsen laufen auch Impulse zu einem anderen, dem extrapyramidalen System. Es umfaßt Gebiete der Hirnrinde, der Stammganglien, des Kleinhirns und der *Formatio reticularis* im Hirnstamm. In diesen Zentren laufen außerdem gleichzeitig sensorische



Berührungssinn und Wahrnehmung der Gelenkhaltung

Impulse ein, die von Rezeptoren in den Muskeln, Sehnen, Gelenkhäuten und der Haut ausgehen und ständig den Ablauf einer Bewegung signalisieren. Das Kleinhirn spielt dabei wahrscheinlich die Rolle einer relativ selbständigen Steuerzentrale, die die groben Steuerbefehle der motorischen Rinde mit ergänzenden Impulsen zur Koordination der Bewegungen versieht.

Bei häufiger Wiederholung einer Bewegungsfolge entsteht im extrapyramidalen System ein Verhaltensmuster, eine Art Steuerschema, das gespeichert bleibt und auf einen Steuerimpuls oder auf einige wenige Steuerimpulse der motorischen Rinde hin sofort komplette Steuerimpulsfolgen abgibt.

Vermutlich werden nur zu Beginn einer beabsichtigten und »gekonnten« Bewegungsfolge Steuerimpulse von der Großhirnrinde über dicke, markhaltige Nervenbahnen mit der in diesen Bahnen vorhandenen hohen Leitungsgeschwindigkeit ausgesandt. Sie benötigen etwa 0,02 bis 0,05 s, um bis zu den Effektoren zu gelangen. Die gesamte Bewegung läuft dann nach dem vorher eingepprägten Muster über das extrapyramidale System gesteuert ab.

In den Fällen, in denen der Organismus auf Signale aus der Außenwelt mit motorischen Aktionen antwortet, muß zur gesamten Operationszeit noch die Laufzeit der sensorischen Impulse gerechnet werden, z. B. vom Auge oder vom Ohr zum Gehirn. Die Wege dieser sensorischen Impulse sind zwar kürzer, an ihrer Leitung sind aber Fasern geringerer Leitungsgeschwindigkeit beteiligt. Man muß deshalb mit Laufzeiten der sensorischen Impulse von ebenfalls 0,02 bis 0,05 s rechnen. Insgesamt erhalten wir für das intakte Nervensystem Reaktionszeiten zwischen 0,04 und 0,1 s.

Dennoch treten bei oft geübten Tätigkeiten kürzere Reaktionszeiten auf. Das wird offenbar durch direkte Kopplungen zwischen sensorischen und motorischen, unterbewußten Teilen des Nervensystems möglich. Die von den Sinnesorganen kommenden Informationen erreichen sehr wahrscheinlich nicht nur die spezifischen Projektionsfelder in der Großhirnrinde, sondern sie gelangen parallel dazu auch zu anderen (unterbewußten) Zentren des Zentralnervensystems. Dort rufen sie – falls solche vorhanden sind – eingespeicherte Verhaltensprogramme auf, bevor die sensorischen Informationen in der Hirnrinde bewußt werden. So erklärt sich z. B., daß ein Autofahrer einen auf die Straße tretenden Fußgänger sieht und bremst, bevor sein Bewußtsein den Befehl zum Bremsen geben konnte.

Menschen verfügen über eine große Zahl solcher Verhaltensprogramme, die z. T. beträchtliche Variationsbreiten enthalten und zu deren Ausbildung sehr große Speicherkapazitäten in den betreffenden Zentren gehören. Beispiele für derartige Verhaltensprogramme finden wir in einfachen Handlungen wie Treppe hinunter- oder hinaufgehen, Schwimmen, schon beim Erhalten des Gleichgewichts, aber auch in allen mehr oder weniger leicht erlernbaren handwerklichen und künstlerischen Tätigkeiten.

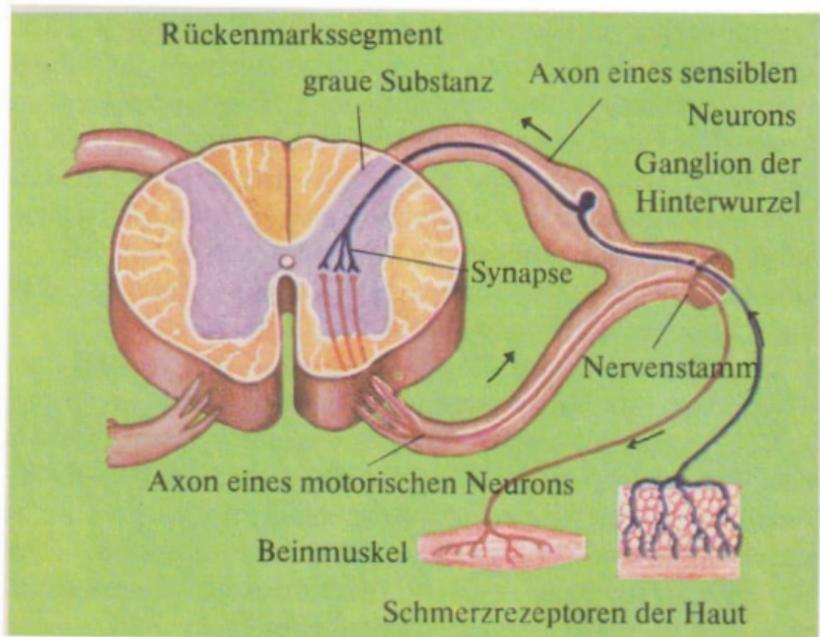
Besonders zu bemerken ist die Art und Weise, in der diese Programme aufgerufen werden. Es geschieht gewissermaßen durch Schlüsselinformationen, die diesen Schlüsselcharakter beim Einprägen des betreffenden Programmes erhalten haben. Meist genügen als Schlüssel schon Bruchstücke ganzer Informationen. Zum Abrufen der fest eingespeicherten Programme müssen also nicht

erst besondere Befehlsimpulsfolgen gebildet werden, sondern eintreffende Informationen selbst sorgen für das Aufrufen der dazu gehörigen, passenden oder zweckmäßigen Verhaltensprogramme. Informationsteile und Verhaltensprogramme sind verknüpft oder assoziiert. Man spricht deshalb von assoziativer Arbeitsweise des Zentralnervensystems. Diese unterscheidet sich grundsätzlich von der Art, nach der in gegenwärtigen Computern gespeicherte Informationen abgerufen werden.

Dieses assoziative Prinzip ermöglicht das gleichzeitige Bearbeiten vieler Informationen. Darin liegt ein weiterer Grund für die Tatsache, daß das Zentralnervensystem große Informationsmengen mit großer Geschwindigkeit verarbeiten kann. Wir werden im letzten Kapitel noch einmal ausführlicher auf diese Problematik eingehen.

Die einfachsten Formen sensomotorischer Verbindungen, die im Laufe des Lebens erworben werden, bezeichnet man nach Pawlow als bedingte Reflexe. Außer diesen existieren aber auch von Geburt an feste sensomotorische Schaltungen in Form von Reflexbögen. Diese genetisch

Ablauf eines Rückenmarksreflexes



programmierten nervalen Schaltungen nennt man unbedingte Reflexe. Beispiele für unbedingte Reflexe sind der Schluckreflex (koordinierter Ablauf des Schluckens) und der Pupillenreflex (Weitung und Verengung der Pupille entsprechend der einfallenden Lichtmenge).

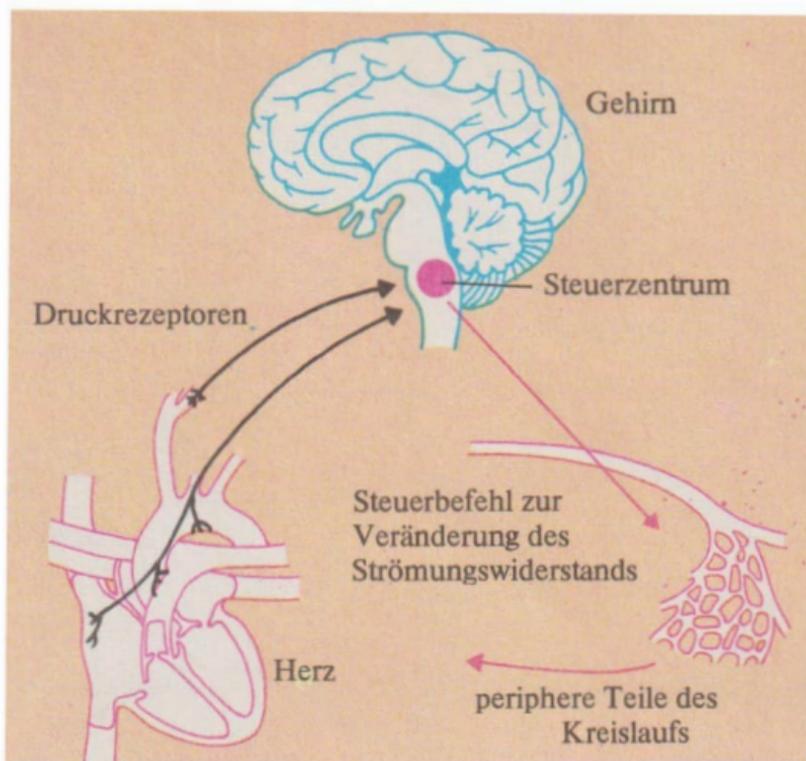
Die Reflexbögen in der Rumpf- und Gliedmaßenregion schließen sich z. T. schon im Rückenmark. Die Leitungswege für sensorische und motorische Impulse sind dann besonders kurz und erlauben dementsprechend einen extrem schnellen Reaktionsablauf. Diese Bewegungsreflexe bzw. die zu ihnen gehörenden im Zentralnervensystem eingespeicherten Programme sind auch an der Koordination von Willkürbewegungen beteiligt und vervollkommen deren Ablauf.

Biologische Regelkreise

Im menschlichen und tierischen Organismus arbeiten eine ganze Reihe biologischer Regelsysteme mit erstaunlicher Präzision und Zuverlässigkeit. Ihre Funktionsweise ist deshalb auch von großem technischem Interesse.

Normalerweise werden z. B. der Zucker-, der Salz- und der Mineralstoffgehalt des Blutes zwischen bestimmten Grenzwerten immer wieder sehr genau eingepegelt. Auch der Sauerstoff- und der Kohlendioxidgehalt des Blutes werden ständig über verschiedene Regelmechanismen kontrolliert und reguliert. Bei Warmblütern wird die Körpertemperatur auf etwa $\pm 0,1^\circ\text{C}$ konstant gehalten. Das sind nur einige der Regelmechanismen, deren Leistungen – könnte man sie annähernd mit technischen Mitteln erreichen – etwa in der chemischen Verfahrenstechnik oder auch anderswo sehr vorteilhaft sein könnten.

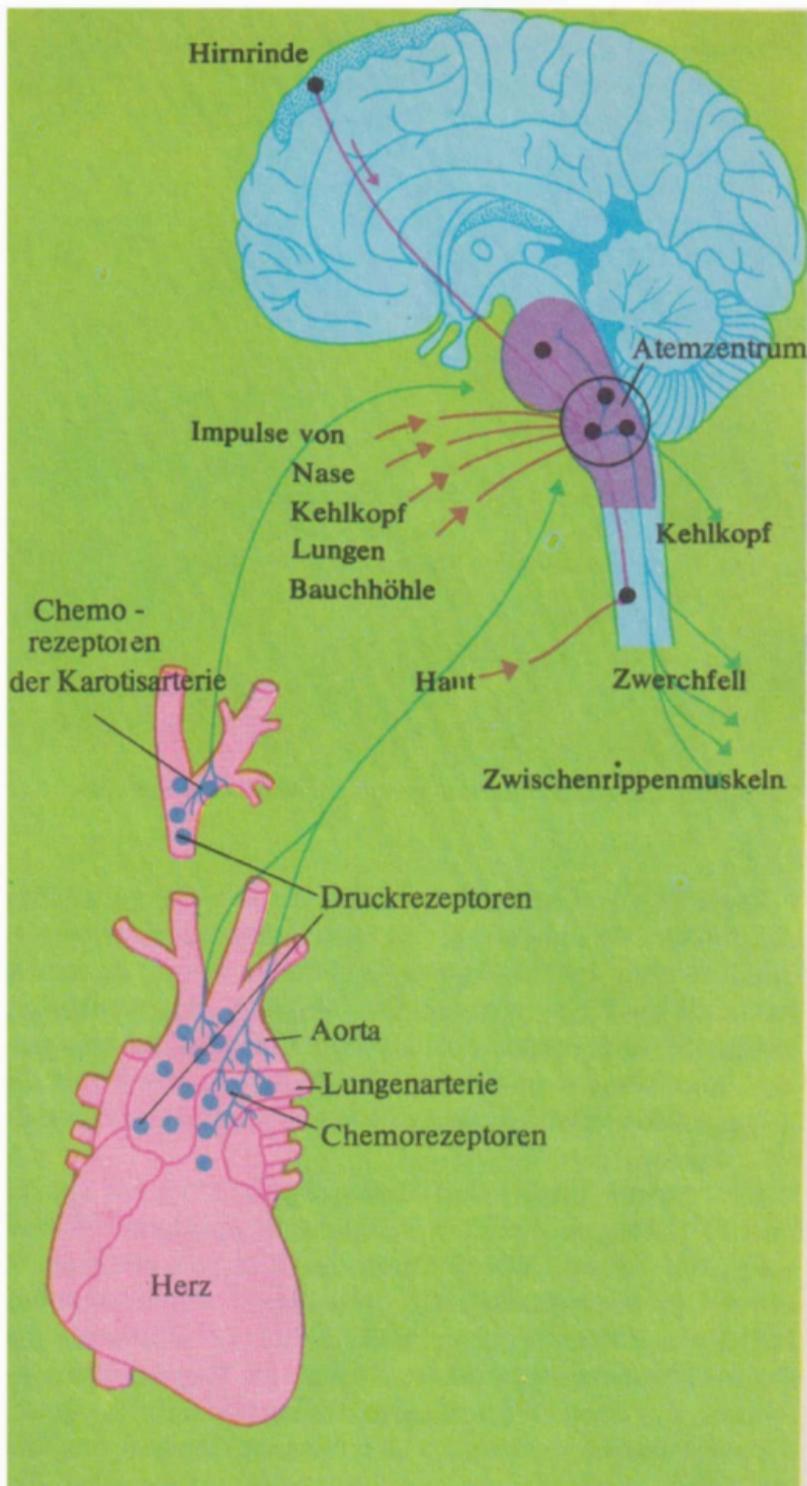
Einige biologische Regelkreise sind bereits sehr gut aufgeklärt. Als Meßwertgeber wirken immer Rezeptoren, z. B. Chemorezeptoren, Thermorezeptoren, Osmorezeptoren. Als Regler, vergleichbar mit elektronischen Regelgliedern, fungieren (unter anderen) Neuronennetzwerke in unterbewußten Zentren des Zentralnervensystems. Als Stellglieder treten spezifische Effektoren auf, im allgemeinen sind es Drüsen- oder Muskelzellen.



Regelkreis zur Aufrechterhaltung des normalen Blutdrucks

Zwei Eigenschaften biologischer Regelkreise gehen über das hinaus, was gegenwärtige technische Regelkreise (zumindest ohne extremen technischen Aufwand) zu leisten imstande sind. Sie besitzen die Fähigkeit, sich wenigstens kurzzeitig außerordentlich starken Belastungen anzupassen, und können in bestimmten Fällen den Sollwert der Regelgröße verstellen. Das soll an einigen Beispielen erläutert werden.

Bei starken physischen Belastungen, etwa bei sportlichen Leistungen oder bei schwerer körperlicher Arbeit, steigt der Sauerstoffverbrauch des Körpers stark an. In entsprechendem Maße tritt Kohlendioxid vermehrt im Blut auf. Diese Veränderungen im Gasgehalt des Blutes werden durch Chemorezeptoren registriert, an Regelzentren gemeldet, die dann ihrerseits eine Reihe von Effektoren mit Steuerimpulsen versorgen. Der Sauerstoffgehalt des Blutes wird zunächst durch intensivere Atmung erhöht.



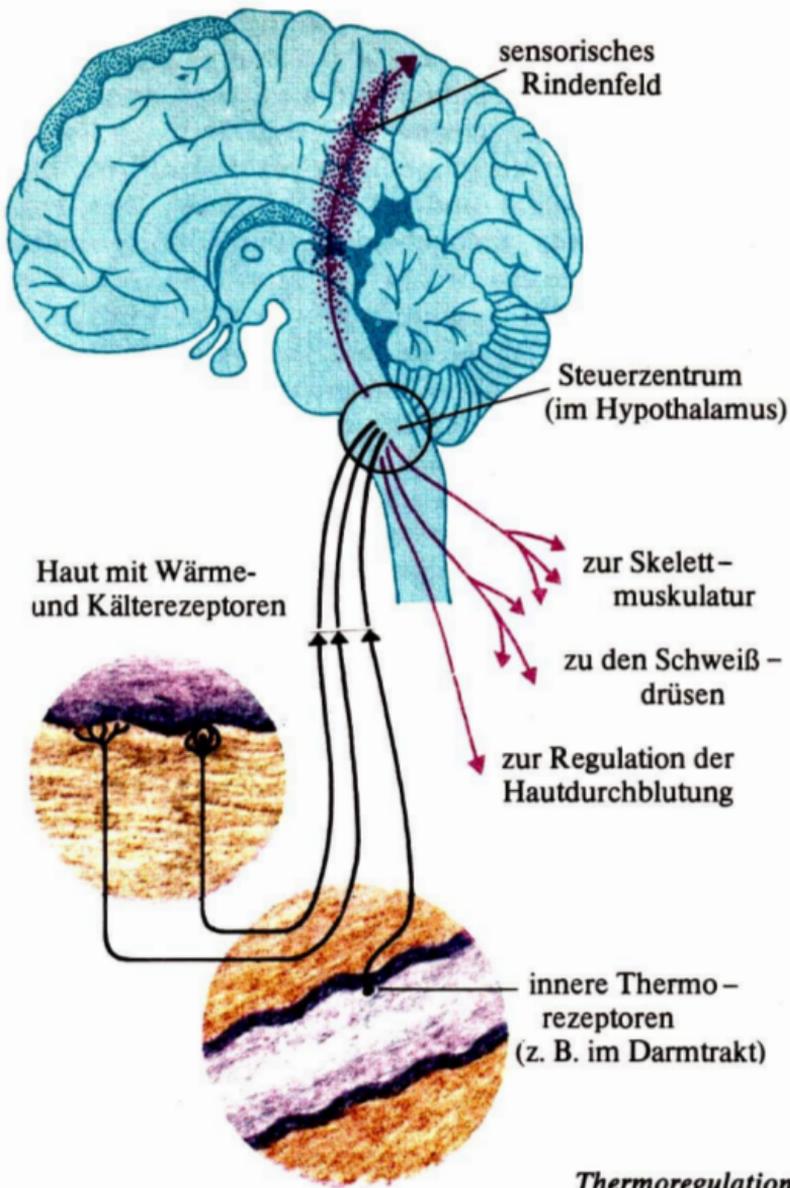
Gleichzeitig verstärkt sich die Herztätigkeit, um das Transportmedium Blut schneller zu befördern. Parallel dazu werden die Blutgefäße durch nervale Steuerung erweitert, also die Leitungsquerschnitte vergrößert. Die Regelzentren für diese Vorgänge liegen im verlängerten Mark (Medulla oblongata) und im Rückenmark. Ihre Funktionen sind (sehr wahrscheinlich durch übergeordnete Zentren) koordiniert, wobei ein sehr hoher Grad von Zuverlässigkeit des Gesamtsystems erreicht wird.

Die eben beschriebene nervale Steuerung von Herz und Kreislauf wird wahrscheinlich durch Hormone und weitere Drüsenprodukte unterstützt, ergänzt und abgesichert. Möglicherweise beeinflussen sogar Stoffwechselprodukte im Blut direkt die Herztätigkeit.

Reicht die durch intensivierte Atmung und Kreislauf-tätigkeit beschaffte Sauerstoffmenge nicht aus, so können noch Sauerstoffreserven aus intrazellulären Depots des Körpers geschöpft werden. Ist die Belastung vorüber, so werden diese Depots wieder aufgefüllt.

Ein anderes interessantes Beispiel ist die Temperaturregulation bei Warmblütern. Die Meßsonden der biologischen Temperaturregelung sind Thermorezeptoren für Kern- und Schalentemperatur des Organismus. In der Haut sind Wärme- und Kälterezeptoren zu unterscheiden, die die Hauttemperaturwerte den Regelzentren melden. Innere Thermorezeptoren wurden im Magen und in anderen Teilen des Verdauungstraktes gefunden. Das Regelzentrum liegt sehr wahrscheinlich im Zwischenhirn (Hypothalamus). Dort wurden ebenfalls innere Thermorezeptoren nachgewiesen.

Beim Menschen beträgt die Körperkerntemperatur etwa 37°C, die Hauttemperatur liegt rund 7 bis 8 Grad niedriger. Beim Einwirken von Störgrößen – z. B. bei Senkung oder Erhöhung der Außentemperatur, beim Einnehmen größerer Mengen kalter Flüssigkeit – melden die Thermorezeptoren Abweichungen vom Sollwert zum Regler im Hypothalamus. Dieser veranlaßt dann eine entsprechende Korrektur.



Als Regulative stehen die Skelettmuskulatur, die Blutgefäße und die Schweißdrüsen der Haut zur Verfügung. Sinkt die Körpertemperatur unter den Sollwert ab, so wird durch erhöhte Anspannung der Skelettmuskulatur, aber auch durch Steigerung des Stoffwechsels der inneren Organe die Wärmeproduktion vermehrt und gleichzeitig die Wärmeabstrahlung durch Drosselung der Hautdurchblutung

vermindert. Bei übernormaler Erhöhung der Körpertemperatur weiten sich die Blutgefäße – die Durchblutung der Haut und damit deren Wärmeabstrahlung nehmen zu. Außerdem treten die Schweißdrüsen in Aktion. Die Verdunstung des Schweißes von der Körperoberfläche verbessert die Wärmeabfuhr beträchtlich.

Bei infektiösen Erkrankungen ist der Körper in der Lage, vorübergehend den Sollwert der Körpertemperatur auf einen höheren Wert einzustellen. Wir nennen das Fieber. Ursache für eine solche Sollwertverstellung sind die sogenannten Pyrogene, besondere Substanzen, die bei fieberhaften Erkrankungen im Blut auftreten. Der Regelkreis wird also nicht nur von Thermorezeptoren beeinflusst. Er ist auch mit anderen biochemischen Indikatoren verbunden, die das Blut kontrollieren.

Beträchtliche Sollwertverstellungen der Thermoregulation beobachten wir bei winterschlafenden Tieren. Igel, Murmeltiere und andere winterschlafende Säuger können ihren Temperatursollwert für die Zeit des Winterschlafs auf 6 °C oder gar auf 1 °C einstellen. Eine solche extreme Sollwertverstellung setzt die gesamte Lebenstätigkeit auf ein Minimum herab. Sie ist bis zu einem bestimmten Grade der Willkür unterworfen. Das Wiederaufwachen aus dem Winterschlaf ist auch von außen zu beeinflussen – der Winterschlaf ist weckbar. Das normale Wiedererwachen aus dem Winterschlaf muß an etwas gebunden sein, was man eine innere Uhr nennen könnte.

Die biologischen Regelkreise existieren im Organismus nicht isoliert, sondern sind meist vielfach mit anderen Regelkreisen verbunden – vermascht. Diese Systemkopplungen machen sehr wahrscheinlich die hohe Stabilität der einzelnen Regelsysteme aus. Sie ermöglichen es, verschiedenartige Effektoren einzuschalten, Reserven zu beteiligen und so die großen Leistungsbreiten und Zuverlässigkeiten zu erreichen.

Neben der nervalen Regulation spielen auch Hormone eine wichtige Rolle. Nervale und hormonale Regulationsmechanismen sind vielfältig miteinander vernetzt. Dadurch wird eine mehrfache Sicherung für die Regulation vegetativer, »betriebsinterner« Prozesse erreicht.

Untersuchungen an biologischen Regelkreisen nehmen

seit einigen Jahren einen relativ breiten Raum in den Programmen zahlreicher Forscherkollektive ein. Das weitere Eindringen in die Mechanismen der Informationsverarbeitung im Zentralnervensystem wird auch dazu beitragen, die biologischen Regelsysteme besser zu übersehen und in ihren einzelnen Teilen genauer zu erfassen.

Der Computer und das menschliche Gehirn

Das Verhältnis zwischen Mensch und Computer hat zahlreiche Aspekte, die vom psychologischen Bereich, vom Verhältnis einzelner Individuen bis in den sozialen Bereich, bis zu den gesamtgesellschaftlichen Problemen reichen. Diesen Themen wurden schon zahlreiche ernsthafte Untersuchungen, besonders von sowjetischen Wissenschaftlern, gewidmet.

Psychologische und soziale Probleme wie die Stellung des Menschen im Produktionsprozeß, die Entwicklung einer höheren Stufe der Produktivität, neue Methoden der allgemeinen und beruflichen Ausbildung oder die zukünftiger Computerentwicklung innewohnenden Gefahren werden zahlreicher, aber auch deutlicher mit der wachsenden Leistungsfähigkeit neuer Computergenerationen.

Der Titel dieses Taschenbuches »Gehirn contra Computer?« drückt die Besorgnis vieler Menschen über gewisse Entwicklungen aus, die von manchen Autoren futuristischer Bücher prognostiziert werden. Die reale Entwicklung geht indessen andere Wege. Das »contra« behält höchstens im profitbestimmten Konkurrenzkampf der kapitalistischen Gesellschaft seine Berechtigung.

Computer sind zunächst einfach Werkzeuge, mit denen der Mensch versucht, Aufgaben zu bewältigen. Bei der weiteren technischen Entwicklung der Computer geht es zunächst nur darum, diese Werkzeuge immer besser, bequemer, leistungsfähiger zu gestalten. Es handelt sich dabei allerdings um äußerst komplizierte Werkzeuge, und es hat sich ergeben, daß in vieler Hinsicht das menschliche Gehirn als Vorbild der Natur für diese Entwicklung dienen kann.

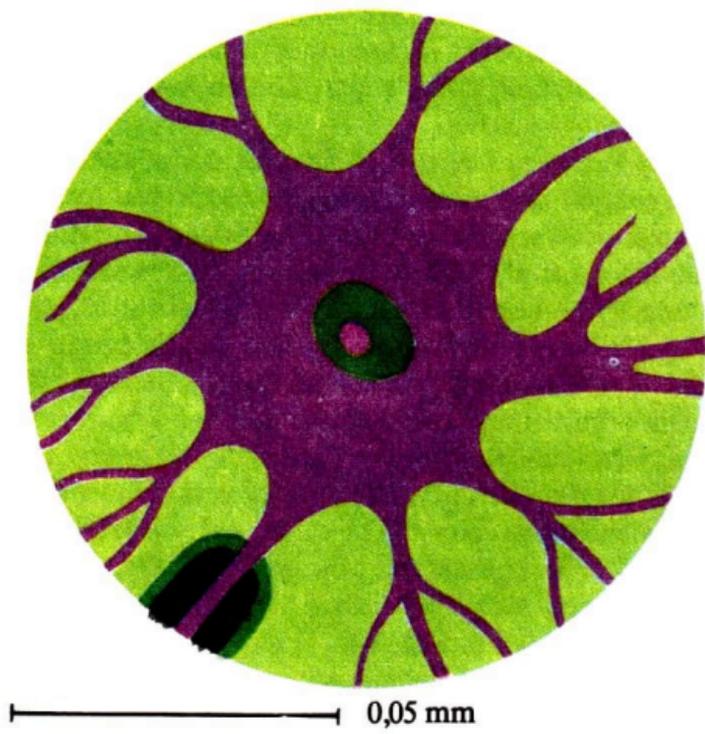
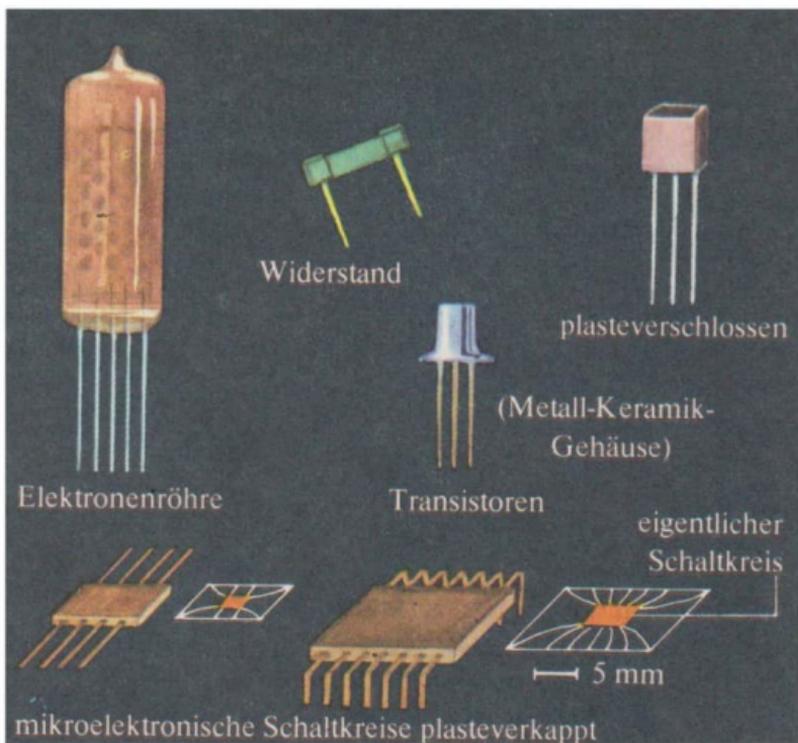
Natürlich geht es nicht darum – auch nicht in fernerer Zukunft –, das Gehirn nachzubauen, sondern darum, Systemlösungen der Natur zu erkennen und in der Technik, in unseren zukünftigen Werkzeugen, anzuwenden.

Wir sind aber auf diesem Wege noch nicht sehr weit fortgeschritten, sondern gerade erst bei den Grundlagen.

Die ersten großen elektronischen Rechenmaschinen aus den fünfziger Jahren dieses Jahrhunderts, noch mit mechanischen Relais und Elektronenröhren aufgebaut, waren riesige Geräte, die viele Kilowatt elektrischer Leistung verbrauchten, sehr umständlich zu bedienen waren und nur in einigen wenigen Exemplaren aufgebaut wurden. Aber die Entwicklung schritt schnell voran. Die Relais und Elektronenröhren wurden durch Transistoren und in den sechziger Jahren durch integrierte Schaltkreise ersetzt. Auf zwanzig bis dreißig Quadratmillimeter großen Siliziumplättchen bilden mehrere tausend Dioden und Transistoren ganze komplexe Schaltungsteile der modernen Elektronenrechner, die in einer Sekunde bis zu zehn Millionen Schaltoperationen ausführen und Ergebnisse direkt sichtbar auf Bildschirmen oder ziffernanzeigenden Flüssigkristallen ausgeben. Mit Hilfe von Schnelldruckern kann man auch Ziffern oder Texte oder mittels elektronisch gesteuerter Zeichengeräte sogar Zeichnungen und Diagramme »konservieren«.

Die Computer der Gegenwart sind kleiner geworden. Sie arbeiten schnell und zuverlässig. In den fortgeschrittenen Industrieländern arbeiten sie schon zu Tausenden. Zur Zeit herrscht ein starker Trend zu Klein- und Taschenrechnern, die bald in Millionen Stückzahlen als Helfer in alle Lebensbereiche einziehen werden. Eine zweite Kategorie sind spezielle Prozeßrechner zur Steuerung industrieller Prozesse. Sie arbeiten nach prozeßspezifischen Programmen, erhalten von elektronischen Meßsonden ständig Informationen aus dem ablaufenden Prozeß und steuern diesen danach in optimaler Weise. Die dritte Art schließlich sind elektronische Großgeräte mit sehr großen Speicherkapazitäten, die bei gewissen Variationen der peripheren Ein- und Ausgabegeräte das können, was Datenverarbeitungsanlagen zur Zeit überhaupt vermögen.

Die Entwicklung elektronischer Bauelemente strebt zu



immer kleineren, dichter gepackten, weniger Energie verbrauchenden und höherintegrierten Bauelementen. Die Elektronenrechner der nächsten Jahre werden deshalb noch kleiner werden, aber auch noch schneller und zuverlässiger arbeiten.

Seit einigen Jahren wird in wissenschaftlichen Instituten und in Forschungslaboratorien der Industrie an Datenverarbeitungsgeräten mit neuen Dimensionen gearbeitet. Ein Beispiel wurde mit dem elektronischen Modell der Froschnetzhaute bereits erwähnt. Eine andere Anlage, Perzeptron genannt, wurde ebenfalls für die automatische Bildauswertung entwickelt. Ebenso könnte man an schallanalysierende Maschinen denken. Der wesentliche Entwicklungsschritt, der mit derartigen Geräten getan wird, ist der Schritt vom registrierenden zum erkennenden Automaten.

Großcomputer können zu lernfähigen Automaten weiterentwickelt werden. Solche Geräte könnten, ausgehend von relativ einfachen Grundprogrammen, durch Wechselwirkungen mit zu steuernden Prozessen über äußere Rezeptoren selbständig optimale Steuerprogramme entwickeln und diese an veränderte Bedingungen immer wieder anpassen.

Die Eigenschaft der Lernfähigkeit setzt immer die Wechselwirkung zwischen dem Automaten und dem von ihm zu bearbeitenden Teil der Außenwelt voraus. Wir können uns gegenwärtig wohl nur ungenügend vorstellen, welche Leistungen lernfähige Automaten bei entsprechender Gestaltung ihrer peripheren Aufnahme- und Wiedergabegeräte in der Zukunft vollbringen werden. Dennoch haben führende Kybernetiker wiederholt festgestellt, daß gegenwärtig keine prinzipiellen Grenzen für die Leistungen von Automaten zu erkennen sind.

Gegenwärtige und zukünftige Datenverarbeitungsanlagen werden von Menschen immer für bestimmte Zwecke gebaut werden. In ihren spezifischen Leistungen sind sie dem Menschen überlegen. Sie arbeiten ermüdungsfrei,

Elektronische Bauelemente (oben); darunter Schnitt durch eine Nervenzelle (zum Vergleich)

lassen sich nicht ablenken, bewältigen in viel kürzerer Zeit einen viel größeren Umfang spezieller Informationen. Das ist kein Widerspruch zu der früher getroffenen Feststellung, daß das Zentralnervensystem durch seine besondere Funktionsweise außerordentlich große Informationsmengen in sehr kurzer Zeit verarbeitet. Es ist im Laufe der stammesgeschichtlichen Entwicklung nur im Hinblick auf mehr oder weniger direkt lebensdienliche Leistungen »konstruiert« worden. Bei Aufgabenstellungen, die in diesem Sinne zweckfremd sind – auch wenn sie für die heutige menschliche Gesellschaft noch so bedeutsam sein mögen –, arbeitet der »menschliche Computer« umständlich, zeitaufwendig und relativ unzuverlässig. Betrachtet man aber Informationsmengen und deren Verarbeitungsgeschwindigkeiten schlechthin, dann ist das menschliche Gehirn selbst den modernsten Computern der Gegenwart noch weit überlegen.

Ein Ziel der Forschung ist es, die Prinzipien von Organisation und Arbeitsweise des Gehirns aufzuklären und zu versuchen, diese Prinzipien auf technische Systeme zu übertragen. Gelingt das in den nächsten Jahrzehnten – und die ersten Schritte dazu sind bereits getan, wie wir auf den folgenden Seiten sehen werden –, so wird das in nahezu allen Bereichen des Lebens umwälzende Folgen haben.

Automaten werden als Simultandolmetscher Sprachen übersetzen, computergesteuerte neuartige Nahverkehrssysteme in Städten werden schnell, sicher und vor allem sauber die wachsenden Transportprobleme lösen helfen, andere elektronische Datenverarbeitungsanlagen werden aus Angaben Tausender Wetterstationen, die über den ganzen Erdball verteilt sind, innerhalb von Minuten Wettervorhersagen ableiten, wieder andere werden selbstständig chemische Betriebe steuern, Maschinen konstruieren oder die komplette Arbeit einer Sparkasse verrichten.

In der Organisationsform digitaler Datenverarbeitungsanlagen ist gegenwärtig eine gewisse Grenze erreicht, aber man ist auch schon dabei, diese Grenze mit Hilfe neurophysiologischer Erkenntnisse zu überschreiten. Erste Rechenautomaten, die nach biologischen Prinzipien arbeiten, haben bereits ihre Überlegenheit über die ältere Generation bewiesen.

Ein grundsätzlicher Beitrag zur Erkenntnis der äußerst ökonomischen Informationsverarbeitung im Gehirn wird direkt von der Hirnforschung geleistet, die sich bemüht, Strukturen des Zentralnervensystems, Verbindungen, Zentren und Funktionen von Elementen und komplexeren Teilen aufzuklären.

Methoden und Ergebnisse der Hirnforschung

Im Mittelalter galt der Mensch als unerforschliches Wunder Gottes. Die Kirche wachte streng über dieses Dogma. Mutige Ärzte mußten sich heimlich in der Nacht von Friedhöfen Leichen stehlen, um sie sezieren zu können und auf diesem Wege den inneren Aufbau des menschlichen Körpers zu erforschen. In jahrhundertelangem, zähem Ringen fiel dieses Tabu. Die inneren Organe wurden untersucht und Blutkreislauf, Nervenbahnen, Sinnesorgane erforscht. Vergleichende Untersuchungen an Tieren ließen funktionelle Zusammenhänge immer deutlicher erkennen.

Bei der Untersuchung der Gewebestrukturen leistete das Mikroskop unschätzbare Dienste. Der innere Aufbau von Zellen konnte mit Hilfe des Elektronenmikroskops weitgehend aufgeklärt werden. Große Beiträge dazu verdanken wir der praktischen Medizin, deren Erfolge bei der Behandlung kranker Organe viele wichtige Erkenntnisse mit sich brachten.

Unter allen Organen des menschlichen und tierischen Körpers blieben Struktur und Funktion des Nervensystems die längste Zeit im dunkeln. Lange Zeit reichte das Wissen der Ärzte und Biologen über anatomische Kenntnisse des Gehirns und des Rückenmarks und über Beobachtungen bei Erkrankungen von Teilen des Nervensystems nicht hinaus. Erst in diesem Jahrhundert gelang es, die Impulsleitung in der Nervenfaser aufzuklären, entstanden die wichtigsten Erkenntnisse über unbedingte und bedingte Reflexe und das Verständnis der körpereigenen Regelmechanismen. Heute ist unser Wissen von der Struktur und Funktion des Nervensystems gewaltig angewachsen. Trotzdem bedeutet das bei der ungeheuren Komplexi-

tät dieses Organsystems nur einen Anfang in einem Erkenntnisprozeß, der noch viele Forschergenerationen beschäftigen wird.

In die Methoden der Hirnforschung werden moderne physikalische Meßverfahren, chemische Analysen und viele andere Ergebnisse aus anderen naturwissenschaftlichen Disziplinen, aber auch die Möglichkeiten der elektronischen und elektronenoptischen Techniken einbezogen. Wir können hier natürlich nur einen kleinen, nicht vollständigen Überblick geben.

Einige Ergebnisse verdanken wir dem Studium der stammesgeschichtlichen Entwicklung von Nervensystemen. Schon Einzeller sind in der Lage, Informationen zu verarbeiten, indem sie auf Reize aus der Umwelt gezielt reagieren. Mehrzellige Tiere haben einen Teil ihrer Zellen für Aufgaben im Dienste der Informationsverarbeitung spezialisiert. Aus vergleichenden Untersuchungen kann man bis zu einem gewissen Grade vom Aufbau einfacherer auf kompliziertere Nervensysteme schließen und Lösungen der natürlichen Entwicklung finden, die sich bei manchen Tierstämmen wiederholen.

Im folgenden wollen wir das zentrale Nervensystem des Menschen und der Säugetiere etwas näher betrachten.

Der imposanteste und weitaus größte Teil des menschlichen Gehirns ist das Großhirn. Seine Oberfläche (die oberflächennahe Schicht), die Großhirnrinde, ist in Furchen und Windungen gefaltet und hat etwa die Größe von $0,25 \text{ m}^2$.

In einem Querschnitt durch das Großhirn (ebenso auch bei anderen Teilen des Zentralnervensystems) erkennt man schon mit bloßem Auge grau erscheinende und gelblich-weiße Zonen. Die Anatomen des Mittelalters sprachen von grauer und weißer Substanz. Die Großhirnrinde und einige Teile in der Tiefe des Großhirns bestehen aus grauer Substanz, die übrigen Anteile aus weißer Substanz.

Im Lichtmikroskop ist bei Anwendung verschiedener histologischer Färbeverfahren wesentlich mehr zu erkennen. Hier sieht man, daß die graue Substanz aus einem Geflecht von Neuronen und deren Fasern besteht, eingebettet in sogenannte Gliazellen, die in ihrer Gesamtheit ein Stützgewebe, die Neuroglia, bilden. Die weiße Substanz

hingegen enthält keine Neuronen, statt dessen aber deren lange Fortsätze, die Axonen, und wiederum Gliazellen.

Als wichtigste anatomisch unterscheidbare Teile des Gehirns wollen wir außer dem Großhirn noch das Zwischenhirn mit Thalamus und Hypothalamus nennen, das Mittelhirn mit der Haube und der Vierhügelregion, das Kleinhirn und das verlängerte Mark.

Das Rückenmark gehört ebenfalls zum Zentralnervensystem und schließt sich unmittelbar dem verlängerten Mark an. Es liegt im Inneren des Wirbelkanals. Auf der Höhe eines jeden Wirbels treten jeweils Nervenstränge ein und aus (insgesamt 31 Paare). Nahe der Peripherie verzweigen sich diese Stränge. Sie führen zu den verschiedenen Organen, Rezeptoren und Effektoren.

Zahlreiche Beobachtungen an Hirnverletzten, bei denen als Unfallfolgen bestimmte Ausfallerscheinungen auftreten, z. B. Lähmungserscheinungen, Ausfall von Bewegungskoordination, Blindheit, Verlust der Sprache, führten zu groben Hinweisen auf die Lokalisation bestimmter Funktionen in bestimmten Teilen des Gehirns. Sie lassen z. T. auch auf einen hierarchischen Aufbau der Zentren des Zentralnervensystems schließen.

Diese Beobachtungen werden durch Tierexperimente ergänzt und erweitert, bei denen bestimmte Bezirke des Zentralnervensystems zerstört oder Nervenstränge an bestimmten Stellen durchschnitten werden. Lokale Zerstörungen werden z. B. durch Vereisung oder durch Hitzezergerinnung mittels elektrischer Ströme erreicht.

Versuchstiere werden vor solchen Operationen in Narkose versetzt oder ausreichend örtlich betäubt. Das Gehirn selbst besitzt keine Schmerzrezeptoren, ist also empfindungslos.

Wird einem Tier, etwa einer Katze, einem Hund oder einem Affen, die Schädeldecke entfernt, so läßt sich die bloßliegende Hirnrinde lokal elektrisch oder chemisch reizen. Die Ergebnisse solcher Reizversuche zeigen an Muskelzuckungen oder anderen Reaktionen die Lage funktioneller Zentren der Großhirnrinde.

Eine Reihe von Erkenntnissen über die Leitungsarchitektur des Zentralnervensystems stammt aus Durchschneidungsversuchen. Wird das Großhirn abgetrennt, so

wird das Tier zum Automaten. Es kann sich koordiniert bewegen, es kann gehen und fressen, findet aber kein Futter, sieht kein Hindernis. Wird an irgendeiner Stelle das Rückenmark durchschnitten, dann hören alle Willkürbewegungen der abwärts vom Trennschnitt liegenden Körperteile auf. Dagegen sind dort die Rückenmarksreflexe verstärkt.

Es ist möglich, derartige Durchschneidungen so zu führen, daß bestimmte Regionen vom übrigen Nervensystem ganz oder teilweise abgetrennt werden, ihre Versorgung durch den Kreislauf aber ausreichend gewährleistet bleibt. An solchen mehr oder weniger isolierten Teilen können dann Reizversuche durchgeführt werden, indem man über eingestochene Elektroden bestimmte Stellen elektrisch reizt und an anderen Stellen mit Hilfe von Meßelektroden Reizantworten abzunehmen versucht. Diese sogenannte black-box-Methode, die auch von der Untersuchung elektronischer Schaltungen her bekannt ist, soll aus Eingangs- und Ausgangssignalen Schlüsse auf die dazwischenliegende Schaltung zulassen. Zwar vermag diese Methode bei relativ kleinen Neuronennetzen detaillierte Aussagen zu liefern, sie ergibt aber bei der Anwendung auf größere Teile des Zentralnervensystems nur sehr globale Informationen, die nicht in Schaltbilder aufzulösen sind.

Aus diesen und anderen Versuchen, auf die hier nicht eingegangen werden kann, zeichneten sich bereits einige Prinzipschaltungen ab, nach denen die mehr als zehn Milliarden Neuronen der menschlichen Großhirnrinde und die Neuronen in anderen Teilen des Zentralnervensystems verbunden sind. Jedes einzelne Neuron ist über seine Axonverzweigungen mit mehreren hundert, teilweise mit mehr als zehntausend anderen Neuronen verbunden. Andererseits empfangen die einzelnen Neuronen von anderen – häufig von Hunderten und Tausenden – Neuronen Informationen über die synaptischen Eingänge.

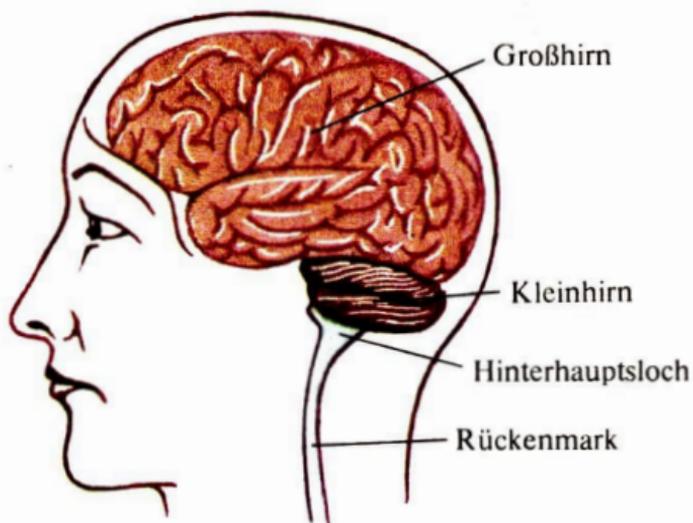
Das menschliche Gehirn

a) Lage des Gehirns im Schädel

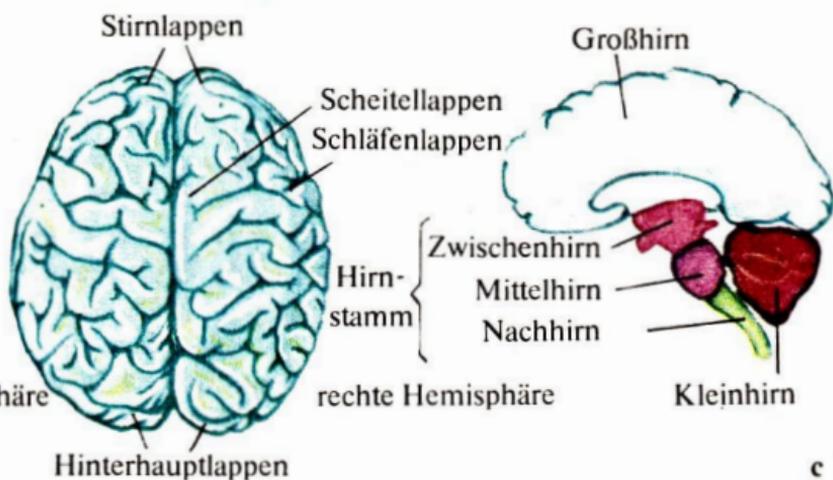
b) Großhirnrinde von oben

c) Die Teile des Gehirns

d) Zentren der Großhirnrinde

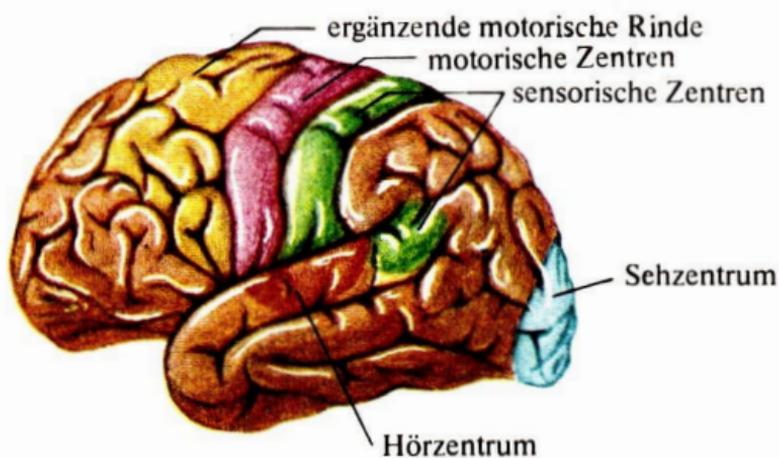


a



b

c



d

Innerhalb des Zentralnervensystems sind Gebiete für ganz bestimmte Körperfunktionen lokalisierbar. Zentren für absolut lebenswichtige Funktionen liegen in den tieferen Hirnabschnitten. Zum Beispiel wurde der Regler für Kreislauf, Herztätigkeit und Atmung im verlängerten Mark gefunden. Das Bewußtsein als Sonderleistung des Gehirns ist im Großhirn lokalisiert. Der Thalamus im Zwischenhirn kann als Tor zum Bewußtsein bezeichnet werden, da hier die Informationen noch einmal umgeschaltet, z. T. auch ausgefiltert werden, bevor sie ins Großhirn gelangen.

In der Großhirnrinde sind z. B. sensorische Felder für die Tastempfindungen des Körpers sowie motorische Felder gefunden worden, von denen die Steuerung der Willkürbewegungen ausgeht. Sehzentrum, Hörzentrum und andere Zentren wurden hier eindeutig lokalisiert. Neben solchen Zentren entdeckte man aber auch andere, die bestimmte Funktionsgebiete ganz oder teilweise vertreten können. Bei Verletzungen oder Zerstörungen fungieren sie als »Ersatzteile«. Sie übernehmen sofort oder nach einiger Zeit die Funktionen der zerstörten Teile.

Diese Zentren und Felder verkörpern Teilsysteme innerhalb des gesamten informationsverarbeitenden Systems. In jedem dieser Teilsysteme werden einlaufende Informationen gespeichert, mit früher gespeicherten verglichen und auf ihre Bedeutung untersucht. Folgeinformationen werden an andere Zentren gegeben, Steuerbefehle zu Effektoren gesendet.

Indes ist die Forschung mit den gegenwärtig zur Verfügung stehenden Methoden noch weit davon entfernt, die Neuronennetze in Schaltbilder auflösen zu können. Von den Verbindungen zwischen den Zentren ist sehr wahrscheinlich nur ein geringer Teil bekannt. Auch unsere Kenntnisse über die Funktionen der verschiedenen Teile des Zentralnervensystems sind noch sehr unvollkommen. Es wäre deshalb völlig falsch, zu glauben, die Hirnforschung hätte mit den bisher genannten Methoden das Gehirn als informationsverarbeitendes System schon weitgehend aufgeklärt. Wir werden auf den folgenden Seiten auf eine Fülle nur teilweise oder noch gar nicht gelöster Probleme stoßen. Zunächst wollen wir aber auf einige andere Methoden der Hirnforschung eingehen.

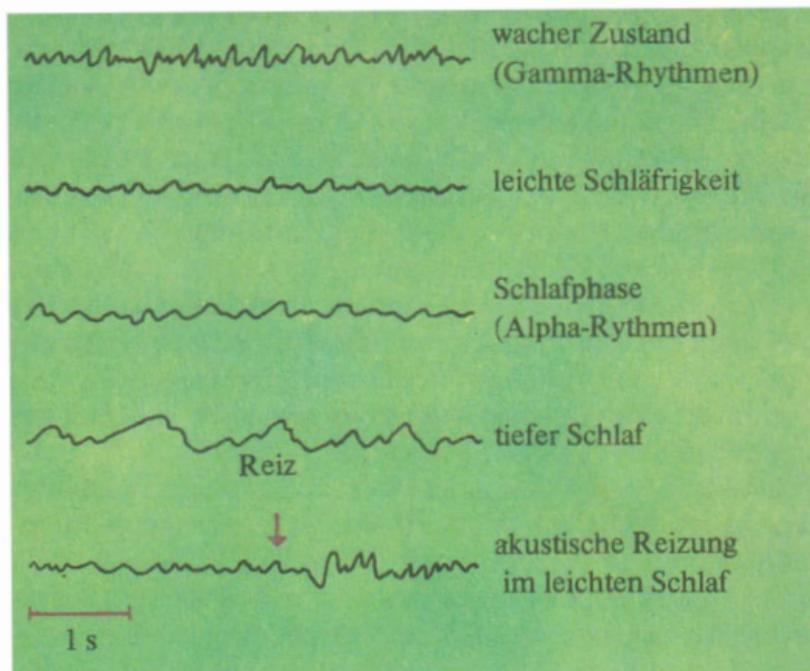
Im Jahre 1931 führte der Züricher Physiologe W. R. Hess Experimente mit Katzen durch, denen Silberelektroden in das Gehirn eingestochen und eingehieilt worden waren. Später wurden ähnliche Versuche auch von anderen Forschern durchgeführt. Saint-Paul und v. Holst entfernten bei Hühnern Teile der Schädeldecke, stachen an verschiedenen Stellen Elektroden ein und schützten die offenen Hirnstellen durch Plastekappen. In diesen Versuchen wirkten die eingehieilten Elektroden als Antennen, über die elektrische Reize drahtlos von einem Hochfrequenzgenerator auf die entsprechenden Hirnteile übertragen wurden. So konnte die Wirkung lokaler Hirnreize an sich frei bewegenden Tieren direkt beobachtet werden.

In diesen Versuchen zeigte sich, daß viele Instinkthandlungen der Tiere – Angriff, Flucht, Nahrungssuche, Impniergehabe – vom Experimentator willkürlich durch elektrische Reizung bestimmter Stellen des Tierhirns hervorgeufen werden können. Katzen, denen Elektroden in das Schlafzentrum und in das Wachzentrum eingehieilt worden waren, konnten durch Reizung der betreffenden Elektroden unvermittelt aus dem Schlaf geweckt oder umgekehrt aus dem Wachzustand in Schlaf versetzt werden.

Aus den Ergebnissen dieser und ähnlicher Versuche kann man schließen, daß Instinkthandlungen als feste Programme im Gehirn gespeichert sind und durch lokale Anstoßimpulse komplett und in richtiger Koordination abgerufen werden können.

Ähnlich dem Elektrokardiogramm (EKG) kann man auch vom unverletzten Schädel durch aufgesetzte Elektroden elektrische Potentialschwankungen abnehmen. Sie werden über Gleichspannungsverstärker und Registriergereäte aufgezeichnet. Man bezeichnet das Ergebnis als Elektroenzephalogramm (EEG). Das EEG widerspiegelt die ununterbrochene Tätigkeit des Gehirns und beweist, daß elektrische Vorgänge zumindest eine wichtige Begleiterscheinung der Hirntätigkeit sind.

Analysen von EEGs haben ergeben, daß man verschiedene Typen von Potentialschwankungen unterscheiden kann, die sich durch Amplitude und Frequenz charakterisieren lassen. Die Rhythmen hängen davon ab, ob die Aufzeichnungen in wachem oder in ruhigem, entspanntem



Elektroenzephalogramme des Menschen

Zustand erfolgten, ja – man kann selbst den Grad der Entspanntheit ablesen. Auch im Schlaf erlischt die elektrische Tätigkeit des Gehirns nicht. Die verschiedenen Phasen des Schlafs sind am EEG deutlich zu erkennen. Mit Hilfe des EEG kann ebenfalls die erst vor etwa zehn Jahren entdeckte paradoxe Schlafphase beobachtet werden. Diese besteht darin, daß das Gehirn im Zustand tiefsten Schlafes eine Flut von Erregungen produziert, die sich in der Art eines Wach-EEG widerspiegelt. Hierbei verhindert ein Hemmungsmechanismus, daß diese Erregungen andere Teile des Gehirns aktivieren. Ganz charakteristisch treten in dieser Schlafphase rasche Bewegungen des Augapfels auf. Diese paradoxe Schlafphase ist aller Wahrscheinlichkeit nach identisch mit der Traumphase.

Es ist auch möglich, mit dem EEG bestimmte Geisteskrankheiten, z. B. Formen der Epilepsie, zu diagnostizieren, die sich im EEG durch Synchronisierung der Potentialwellen oder andere typische Erscheinungen bemerkbar machen.

Eine sehr weitgehende Differenzierung der Hirntätigkeit ist auf der Grundlage des EEG allerdings nicht möglich, da das EEG nur die stark verwischte, auf die Schädeloberfläche projizierte Summe der elektrischen Aktivitäten des Gehirns darstellt.

Natürlich sind mit den genannten die Methoden der Hirnforschung nicht erschöpft. Sie geben nur einen groben Überblick. Ergebnisse der Neurochirurgie, der Psychiatrie gehen in unser ständig wachsendes Wissen vom Gehirn ein. Wichtige neue Erkenntnisse verdanken wir besonders der Molekularbiologie, auf die wir im folgenden näher eingehen wollen.

Bewußtsein und Gedächtnis

Das menschliche Gehirn wiegt etwa 1,2 bis 1,5 kg und nimmt ein Volumen von rund 1,5 l ein. Es verbraucht ständig – wir erinnern daran, daß es auch im Schlafzustand tätig ist – eine Leistung von ungefähr 25 W.

Allein die Großhirnrinde besteht aus 15 bis 20 Milliarden Nervenzellen (Neuronen), denen auf 2 bis 3 Millionen Nervenbahnen von rund 650 Millionen inneren und äußeren Rezeptoren Informationen zugeleitet werden und von denen auf einigen Millionen Nervenbahnen Steuerbefehle zu Effektoren abgeleitet werden. Das Gehirn verarbeitet unterbewußt Informationsmengen bis zu 10^9 bit je Sekunde und besitzt eine Speicherkapazität für Informationen von mehr als 10^{13} bit.

Diese ungeheure Leistung – seit wir elektronische Datenverarbeitungsanlagen bauen und betreiben, wissen wir erst, wie ungeheuer groß diese Leistung ist – wird zum weitaus überwiegenden Teil außerhalb des Bewußtseins erbracht. In das Bewußtsein treten nur Bruchteile dieser Informationsfluten. Auch die riesigen Mengen gespeicherter Informationen bleiben überwiegend unterbewußt und werden nur in sehr kleinen Portionen und nur kurzzeitig ins Bewußtsein geholt, aus dem sie dann wieder ins Unterbewußtsein verschwinden.

Hypnoseversuche haben gezeigt, daß längst vergessen geglaubte und unter normalen Umständen nicht mehr

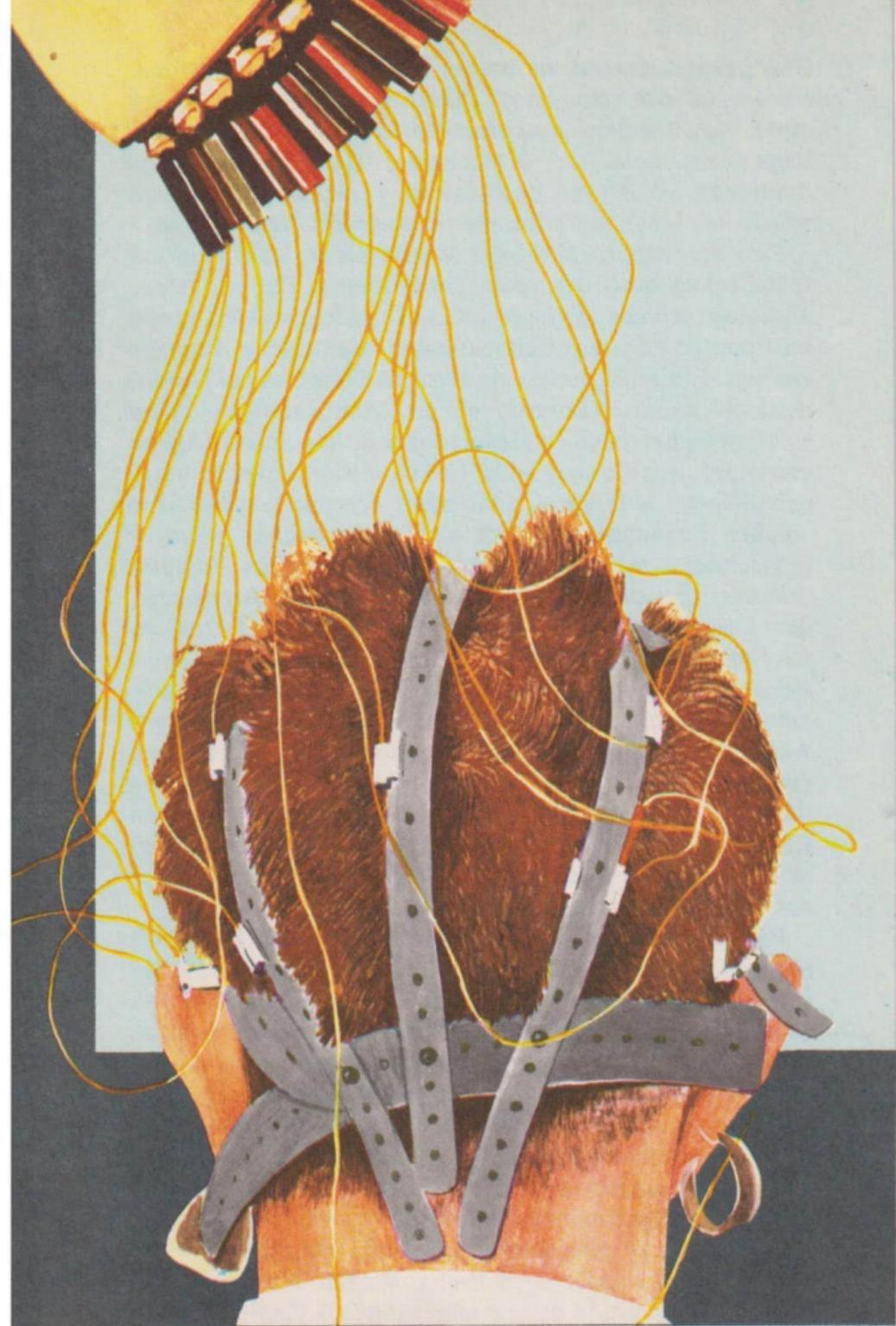
abrufbare Informationen, etwa die Erlebnisse des ersten Schultages oder in der Schulzeit gelernte Vokabeln einer Fremdsprache, gespeichert bleiben und unter bestimmten Umständen wieder erinnerbar werden. Aus diesen und anderen Beobachtungen muß man schließen, daß die Gesamtmenge der gespeicherten Informationen ungeheuer groß und nur sehr schwer abzuschätzen ist.

Die sehr hohen Geschwindigkeiten, mit denen Informationen im Zentralnervensystem verarbeitet werden, sind auf dessen Organisation zurückzuführen. Leider wissen wir über diese Organisation gegenwärtig noch sehr wenig. Von verschiedenen Kybernetikern wurden Hypothesen aufgestellt und kybernetische Modelle entworfen, die die Arbeitsweise des Zentralnervensystems erklären sollen. Eine aussichtsreiche Hypothese, der sich viele Forscher angeschlossen haben, geht von einem statistischen Aufbau von Nervennetzen aus. Es gelang, Modelle von Nervennetzen zu entwerfen, die nach statistischen Gesetzen arbeiten und die über Eigenschaften verfügen, die denen realer Nervennetze nahekommen.

Das menschliche Zentralnervensystem ist ein Ergebnis der Evolution. Man nimmt heute an, daß sich das erste Leben auf der Erde schon vor etwa vier Milliarden Jahren entwickelte. Die Entwicklung der Lebewesen von niederen zu immer höherorganisierten schloß auch die Entwicklung immer höherorganisierter Systeme zur Informationsaufnahme und -verarbeitung in sich ein. Im menschlichen Zentralnervensystem ist eine ganze Reihe angeborener Verhaltenselemente programmiert, z. B. sind es Emotionen und Motivationen, sogar komplexere Verhaltensweisen, die primär nicht dem Bewußtsein bzw. der Vernunft unterstellt sind. Solche Grundmotivationen sind Erhaltung der Art, Selbsterhaltung, Fortpflanzung und viele andere (den erstgenannten untergeordnete), wie Lern- und Spieltrieb, Neugierde, Gemeinschaftstrieb, die wieder zueinander in bestimmten Beziehungen stehen.

Die Art der Manifestation solcher Motive in Form von Programmen im Zentralnervensystem ist unbekannt. Sie

Aufnahme eines EEG



sind gewissermaßen als innere Dauerbefehle anzusehen, aus denen der sogenannte innere Antrieb entsteht. Auf diese Weise werden Aufgabenstellungen und Arbeitsaufträge formuliert. Bei Entscheidungsfällen treten Motivationen oft mit ins Bewußtsein, verschwinden danach wieder ins Unterbewußte, wo sie lange erhalten bleiben.

Den Spontancharakter der Motivationen kann man mit technischen Modellen recht gut imitieren. Ein einfaches, allerdings triviales Beispiel ist ein Impulsgenerator, der in bestimmten, festen Zeitabständen elektrische Impulse erzeugt. Ein biologisches Äquivalent finden wir in Neuronen, die spontan Impulse bilden. Man kann nun einen solchen technischen Impulserzeuger durch ein Schaltglied erweitern, mit dessen Hilfe elektrische Impulse in unregelmäßigen, zufälligen Abständen erzeugt werden. Ein solches Schaltglied – auch als stochastisches Element bezeichnet – wird z. B. durch ein radioaktives Präparat realisiert, bei dem die Zerfallsreaktionen der Atomkerne dem Gesetz der Wahrscheinlichkeit gehorchen. Der nächste Schritt besteht darin, daß die gleichförmigen Impulse eines einfachen oder stochastischen Impulsgenerators in einer Folgeschaltung in charakteristische Signale umgewandelt werden, also in Impulsgruppen, deren Form eben durch die genannte Folgeschaltung bestimmt ist. Eine derartige Anordnung produziert unabhängig von äußeren Einflüssen (abgesehen von gleichmäßiger Energiezufuhr) in regelmäßigen oder unregelmäßigen Abständen immer denselben »Gedanken«.

Bis dahin läßt sich eine technische Modellierung mit relativ einfachen Mitteln durchführen. Will man aber ein solches technisches Modell für die Manifestation von Motivationen im Zentralnervensystem weiterentwickeln, so stößt man auf heute noch kaum faßbare Probleme, denn die Lösung, die die Natur dafür fand – die Organisationsform des Zentralnervensystems –, ist ja bisher unbekannt. Viele Forschergruppen versuchen, ihr unter anderen auch mit kybernetischen Methoden näherzukommen, z. B. mit den schon genannten Modellen, die von einer vermuteten statistischen Arbeitsweise des Gehirns ausgehen.

Eine der wesentlichsten Eigenschaften des Gehirns ist die Lernfähigkeit. In den vorangegangenen Kapiteln haben

wir uns schon wiederholt mit dem Lernen befaßt. Menschen, die sich handwerkliche oder sportliche Fähigkeiten aneignen wollen, erreichen das durch Übung, wobei sich mehr oder weniger stabile Handlungsprogramme ausbilden. Pawlow erzeugte in seinen berühmt gewordenen Versuchen an Hunden experimentell bedingte Reflexe, indem er wiederholt ursprünglich bedeutungslose Signale mit anderen Ereignissen – z. B. mit der Fütterung – kopelte. Wir wollen jetzt den Lernvorgang etwas eingehender betrachten und analysieren.

Wir gehen von einem Zustand aus, in dem innerhalb des Zentralnervensystems eine mehr oder weniger große, aber jedenfalls begrenzte, für das Individuum charakteristische Menge von Informationen gespeichert ist. Wirken äußere Reize über die Rezeptoren auf das Zentralnervensystem ein, so werden sie entsprechend ihrem Informationsinhalt verarbeitet. Die Gesamtheit aller bis dahin gespeicherten Informationen repräsentiert das, was das Individuum bisher von der Außenwelt erfahren hat, sozusagen ein inneres Modell der Außenwelt. Dieses innere Modell bestimmt die Art der Auswertung neu eintreffender Reize. Sind diese Reize unbekannt, dann besitzen sie für das Individuum noch keinen Signalcharakter. Treffen sie aber zusammen mit bekannten Signalen ein, so führt diese äußere zeitliche oder räumliche Verbindung zwischen bekannten und unbekanntem Reizen zu entsprechend gekoppelten Erregungen, die gemeinsam über afferente Bahnen des Nervensystems in dessen zentrale Bereiche gelangen und dort gespeichert werden. Die zunächst lose (weil erstmalige) Verknüpfung (Assoziation) eines Reizes oder mehrerer vorläufig unbekannter Reize mit bekannten Signalen wird fester, deutlicher, wenn sie sich wiederholt. Die vorher unbekanntem Reize haben Signalcharakter erhalten.

Ein Beispiel soll diese Assoziation neuer Reize mit bekannten noch einmal erläutern. Kennen wir von einer Rose nur das Aussehen und nehmen wir zum ersten Mal ihren Duft wahr, so erweitert sich unser Wissen von der Rose durch die Assoziation der Geruchsempfindung mit unserer optischen Vorstellung. Berühren wir ihre Blütenblätter, so verknüpfen sich auch die Tastempfindungen mit den vorher erworbenen Erfahrungen über die Rose.

Auf diese Weise entsteht im Zentralnervensystem ein sich ständig erweiterndes, sich verfeinerndes, durch immer neue Korrekturen verbessertes inneres Modell der Außenwelt. Dabei werden nicht nur einfach Informationen in den Speichern gesammelt und neue mit schon vorhandenen verknüpft. Durch Lernen wird die Abrufbarkeit der gespeicherten Informationen verbessert, die Zahl der Verknüpfungen zwischen verschiedenen Informationen wird erhöht, neue Verarbeitungsprogramme für komplexe Informationen werden gebildet. Diese ständige Anpassung des Zentralnervensystems an immer neue Erfahrungskomplexe ist die Grundlage für die enorme Leistungsfähigkeit des Menschen. Im folgenden Abschnitt über lernfähige Automaten werden wir noch einmal auf das Problem des Lernens zurückkommen. Dabei wird sich herausstellen, daß die Art und Weise der Informationsspeicherung und das Wiederabrufen gespeicherter Informationen die Grundlage für den Lernprozeß bilden.

Wenn wir bisher von Informationsspeicherung im Zentralnervensystem gesprochen haben, so ist die Frage offengeblieben, wie diese Speicherung eigentlich erfolgt.

Möglichst genaue Kenntnisse über Art und Arbeitsweise der Informationsspeicher im Gehirn – über das Gedächtnis also – sind nicht nur von biologischem oder technischem Interesse. Auch Pädagogen, Psychologen und Psychiater können daraus wichtige Schlüsse für ihre praktischen Arbeiten ziehen.

Aus der Technik ist uns eine ganze Reihe verschiedener Informationsspeicher bekannt. Wir kennen die älteren Ferritkernspeicher, die moderneren Magnetdrahtspeicher, Halbleiterspeicher, deren Elemente aus Transistoren bestehen, und die noch stark in Entwicklung befindlichen magnetischen Blasenspeicher. Diese Speicherarten werden in den zentralen Speichern der Computer verwendet. Sie ermöglichen relativ kurze bis sehr kurze Speicherzugriffszeiten. In der »Peripherie« der Computer verwendet man Magnettonbandspeicher, Magnettrommel- oder Magnetkartenspeicher als Langzeitspeicher. Außerdem können Daten auch holographisch gespeichert werden. Sie werden dabei zunächst auf einen Laserstrahl moduliert, der auf einen lichtempfindlichen Film gelenkt

wird. Die auf diese Weise in Hologrammen gespeicherten Informationen (Daten) sind dann wiederum durch Laserstrahlen ablesbar.

Die letztgenannten Langzeitspeicher besitzen längere Speicherzugriffszeiten, dafür aber sehr viel höhere Speicherkapazitäten als die Speichertypen, die für die zentralen Computereinheiten eingesetzt werden.

Wir haben nur einige der wichtigsten technischen Informationsspeicher erwähnt und können auf ihre Arbeitsweise hier nicht genauer eingehen. Wir kehren zu der Frage zurück: Wie geht das Speichern von Informationen im Zentralnervensystem vor sich?

Anfangs nahm man an, daß die Informationsspeicherung im Gehirn auf der Basis kreisender Erregungen in Neuronennetzen erfolgt. Dieses Prinzip ist auch aus der Speichertechnik bekannt. Technische Speicher dieser Art werden als Umlaufspeicher bezeichnet. Bei Untersuchungen an Tiergehirnen fand man tatsächlich ringförmige Schaltstrukturen, die diese Hypothese zu bestätigen schienen. Möglicherweise gründet sich die kurzzeitige Konservierung von Informationen – der biologische Kurzzeitspeicher – tatsächlich auf kreisende (elektrische) Erregungen in Neuronennetzen, die sich bei mehrfachem Durchgang bestimmter Impulsfolgen ausbilden. Auf diese Weise könnten Informationen für Sekunden oder auch Minuten erhalten bleiben.

Diese Hypothese der biologischen Umlaufspeicher ist jedoch nicht geeignet, das Langzeitgedächtnis, die Speicherung von Informationen über Tage, Jahre oder gar das ganze Leben hindurch, befriedigend zu erklären. Auch zwischen Speicherkapazität und Neuronenzahl im Zentralnervensystem bleibt eine Diskrepanz, die nicht ohne weitere »künstliche« Annahmen auflösbar ist.

Inzwischen haben neurochemische und molekularbiologische Forschungen wesentliche neue Ergebnisse zum Problem der biologischen Informationsspeicherung beigetragen, die zudem durch verschiedene Tierexperimente nachdrücklich unterstützt werden. Diese Arbeiten sind aber noch längst nicht abgeschlossen. Ergebnisse dürfen deshalb nur mit großer Vorsicht in ein Gesamtbild eingeordnet werden.

Wir finden in der Natur Informationsspeicherung nicht nur in den Nervenzellen. Molekularbiologische Forschungen auf dem Gebiet der Vererbung haben gezeigt, daß die Erbinformationen in jeder Zelle in Form von kettenartigen Molekülen, den Nukleinsäuren, gespeichert sind und bei der Zellteilung auf die Tochterzellen und damit auf die Tochterorganismen übertragen werden. Die Erbinformationen sind also in makromolekularen Strukturen dauerhaft gespeichert.

Ein weiterer wichtiger und interessanter Befund wurde aus Versuchen mit verschiedenen Einzellern gewonnen. Experimente ergaben, daß einzellige Lebewesen reizbar sind und sogar eine gewisse Lernfähigkeit besitzen. Pantoffeltierchen, die in eine einseitig geschlossene Kapillarröhre gebracht worden waren, lernten nach einigen Versuchen, sich in der Röhre umzudrehen und nach dem freien Ende zu schwimmen. Trompetentierchen in einem Trog, in den ein Wasserstrahl gerichtet wurde, lernten, diesem Strahl gezielt auszuweichen. Aus diesen Beobachtungen folgt, daß beide Einzellerarten in der Lage sind, Verhaltensweisen zu erlernen und Erfahrungen zu speichern.

In den letzten Jahren lieferten Forschungsarbeiten über Strukturen und Bildungsmechanismen der körperspezifischen Eiweißstoffe (Proteine) eine Reihe interessanter Teilergebnisse, die darauf hinweisen, daß die Informationsspeicherung auch im Zentralnervensystem sehr wahrscheinlich an makromolekulare Strukturen gebunden ist.

Aus Tierversuchen ergab sich, daß Proteinmangel in der Nahrung mit stark verschlechterten Gedächtnisleistungen einhergeht. Zum Beispiel erlernten Goldfische in einem größeren Aquarium zunächst den kürzesten Weg zum Futterplatz. Danach wurde ein Teil dieser Tiere eine Zeitlang sehr proteinarm ernährt. Den Weg zu dem inzwischen veränderten Futterplatz konnten die normal ernährten Fische wiederum leicht erlernen, die proteinarm ernährten dagegen nicht.

Viel Aufsehen haben Versuche zur Gedächtnisübertragung an Ratten erregt. Dazu wurden Ratten mittels Strafreizen dressiert, eine sonst bevorzugte dunkle Käfigseite zu meiden. Nachdem diese Tiere getötet worden waren,

injizierte man anderen, an der Dressur nicht beteiligt gewesenen Ratten einen Extrakt aus dem Hirn der dressierten Artgenossen. Das Ergebnis war, daß die nicht dressierten Tiere zu einem hohen Prozentsatz von vornherein die dunkle Käfigseite mieden. Als wirksam für die Übertragung der Dunkelfurcht erwies sich ein Peptid, ein Kettenmolekül aus fünfzehn Aminosäuren, das die Bezeichnung Scotophobin erhielt.

Schlußfolgerungen und Hypothesen aus diesen und ähnlichen Versuchen sind nicht unbestritten. Zur Zeit ist es noch nicht gelungen, eine einigermaßen widerspruchsfreie Theorie über die Informationsspeicherung im Zentralnervensystem zu entwickeln. Man kann lediglich vermuten, in welcher Richtung die Lösung dieses Problems zu suchen ist. Es dürfte aber kaum zweifelhaft sein, daß die Fragen nach den biologischen Informationsspeichern, ihrer Organisation und Wirkungsweise – wenn auch erst nach langen und intensiven Forschungsarbeiten – beantwortet werden.

Können Automaten lernen?

Die Maus von Shannon und andere kybernetische Spielzeuge sind eine erste Antwort auf die Frage nach der Lernfähigkeit von Automaten. Es ist möglich, Maschinen zu bauen, die unter bestimmten, vorgegebenen Bedingungen innerhalb eines vorgegebenen Rahmens Verhaltensweisen »lernen« können. Bei den Forschungsarbeiten zu diesen Problemen lassen sich zwei Zielrichtungen unterscheiden. Die eine strebt die Entwicklung hochleistungsfähiger Automaten an, konzentriert sich also auf rein technische Projekte. Die zweite betrachtet derartige Automaten als technische Modelle für Organisation und Arbeitsweise des Zentralnervensystems oder einiger seiner Teile und vergleicht Untersuchungsergebnisse, die an solchen Modellen gewonnen wurden, mit dem Lernverhalten von Tieren und Menschen.

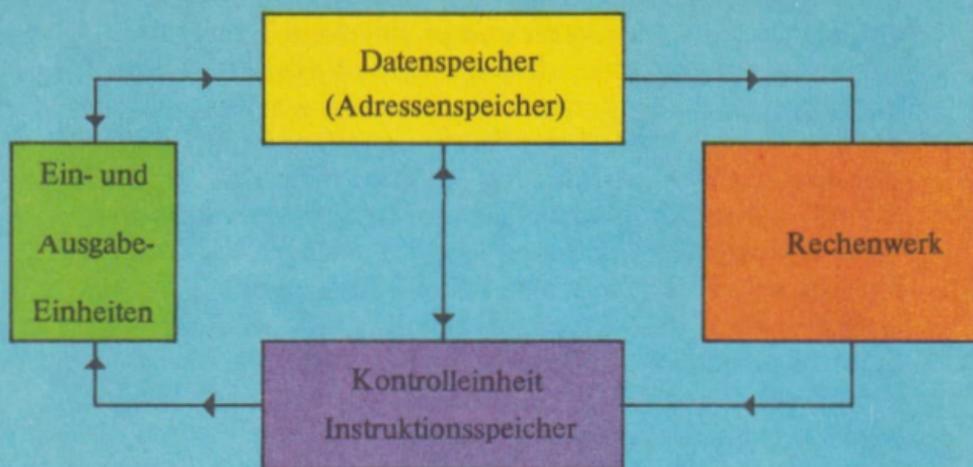
Eine Grundvoraussetzung für das Lernen schlechthin ist das Speichern von Informationen, eine zweite die Wiederabrufbarkeit gespeicherter Informationen. Die Art und

Weise des Speicherns und Wiederabrufens von Informationen wird durch die Organisationsform des Systems bestimmt. Wir sind schon verschiedentlich auf die assoziative Arbeitsweise des Zentralnervensystems gestoßen. Ein wesentlicher Unterschied assoziativer Speicherorganisation zu den bisher in Computern üblichen Speichern ist das Fehlen von Speicheradressen.

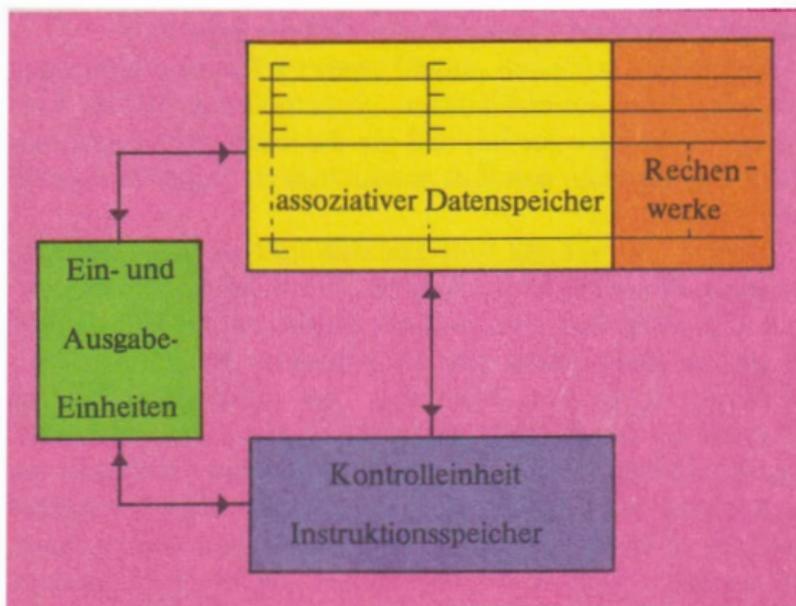
Betrachten wir einmal einen peripheren Speicher einer großen Datenverarbeitungsanlage in Form eines Magnettonbandspeichers. Soll von diesem eine bestimmte Information abgerufen werden, so muß im Operationsbefehl zur Verarbeitung dieser Information deren Speicheradresse enthalten sein, d. h., Nummer und Laufwerkstellung des Bandes müssen in der Sprache des Elektronenrechners von dessen Befehlseinheit an den peripheren Magnettonbandspeicher gegeben werden. Danach wird das betreffende Band gewählt, in Bewegung gesetzt und an der in der Adresse bezeichneten Stelle angehalten. Die hier gespeicherte Information wird abgelesen und an das Rechenwerk der Datenverarbeitungsanlage gegeben. Nach Ablauf dieser Operationen kann die Maschine gemäß dem eingegebenen Programm weiterarbeiten.

Anders arbeitet ein Computer, dessen Speicher assoziativ organisiert sind. Er besitzt keinen großen zentralen (Adressen-) Speicher und kein Rechenwerk, sondern er ist in viele kleine Speicher geteilt, denen jeweils kleinere Rechenwerke zugeordnet sind. Operationsprogramme und eingehende Informationen werden nach charakteristischen Impulsen oder Impulsgruppen, die in ihnen enthalten sind – also nach Merkmalen der Informationen selbst, nicht nach angehängten Adressen –, auf die verschiedenen Speicher und Rechenwerke der Datenverarbeitungsanlage verteilt, dort – zum großen Teil gleichzeitig – verarbeitet und schließlich zu Ergebnissen zusammengefaßt.

Die Aufgabe, Informationen auf verschiedene Speicherplätze und Rechenwerke zu verteilen, ähnelt dann einem stufenweise verfeinerten Sortieren der Informationen nach Stichworten. Man könnte auch von automatischer Klassifizierung sprechen. In einer assoziativ organisierten elektronischen Datenverarbeitungsanlage ist diese automatische Klassifizierung durch den Aufbau der Schaltungen fest



Konventioneller Digital-Computer



Assoziativer Computer

eingebaut. Die Daten gelangen dann automatisch in die richtigen Rechenwerke und finden in den angeschlossenen Speichern die zugehörigen oder passenden und an dieser Stelle verwertbaren Informationen vor.

Prozeßrechner, die nach dem assoziativen Prinzip arbeiten, sind bereits entwickelt und in einzelnen Exemplaren aufgebaut worden. Ihre Arbeitsgeschwindigkeit ist wesentlich höher als die herkömmlicher Datenverarbeitungsanlagen mit Adressenspeichern und linearer Operationsfolge. Ein modernes Gerät führt die Addition von 1000 Datenpaaren in ungefähr drei Millisekunden aus, ein vergleichbarer assoziativer Computer leistet dieselben Additionen in zehn Mikrosekunden, also 300mal so schnell.

Man hofft, die Arbeitsgeschwindigkeit assoziativer Elektronenrechner auf mindestens das 1000fache der herkömmlichen Computer steigern zu können, ohne dazu schnellere Bauelemente einzusetzen.

Manche mögen fragen, wozu denn immer höhere Rechengeschwindigkeiten der elektronischen Rechanlagen angestrebt werden. Ist es möglich, überhaupt so viele Daten so schnell einzugeben? – Was wird mit derartig riesigen Datenverarbeitungskapazitäten getan?

Betrachten wir noch einmal unseren Tennisspieler oder unseren Wurftaubenschützen. Entscheidend an der Leistung dieser Sportler ist, daß sie die richtigen Reaktionen nicht irgendwann, sondern genau zum richtigen Zeitpunkt vollbringen.

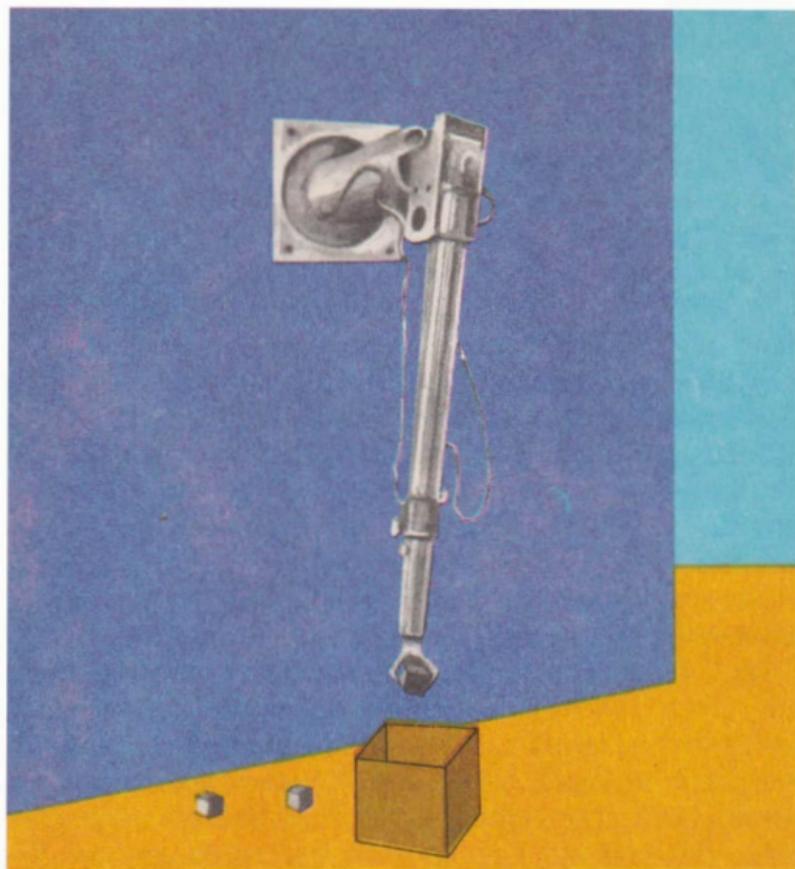
Auch in Forschung und Technik gibt es viele Fälle, in denen es ebenso darauf ankommt, große Informationsmengen in äußerst kurz bemessenen Zeiten zu bewältigen. Wir brauchen dazu nicht nur an gewaltige Raketenabwehrsysteme zu denken. Muß z. B. bei einer komplizierten Operation der Patient an eine Herz-Lungen-Maschine angeschlossen werden, so arbeitet heute der Operateur mit einem großen Kollektiv zusammen. Zahlreiche Meßgeräte müssen überwacht werden. Infusionen sind auszuführen, Sauerstoff- und Narkosegasdosierungen zu regulieren, Reaktionen zu überwachen. Ein elektronisches Gerät, das einen großen Teil dieser Aufgaben übernehmen soll, muß alle Funktionen automatisch mit einer Geschwindigkeit steuern, die mit der Operation Schritt hält. Auf diese Weise lassen sich die Versorgung des Kreislaufs optimieren, Fehlhandlungen des Hilfspersonals ausschließen und damit die Belastung des Patienten verringern. Wahrscheinlich wird auch die Operationszeit verkürzt werden.

Ein anderes Beispiel ist die automatische Flugsicherung. Ein elektronischer Rechner, der gleichzeitig eine größere Anzahl Flugzeuge in der Nähe eines Großflughafens dirigieren soll, muß das mit einer Geschwindigkeit tun, die mit den Fluggeschwindigkeiten Schritt hält.

Werden die Informationen von einigen hundert Wetterstationen, Sonden, Wettersatelliten und Wetterradarstationen zu Großraumwetterbildern zusammengefaßt, so ergeben sich einige hunderttausend Daten, die nur dann ein echtes Gesamtbild von der augenblicklichen Wettersituation liefern, wenn sie insgesamt in sehr kurzer Zeit (innerhalb von Minuten) verarbeitet werden.

Auch aus dem technischen oder industriellen Bereich ließen sich viele Beispiele anführen, bei denen es zur Steuerung und Optimierung von Prozessen darauf ankommt, daß große Datenmengen nahezu gleichzeitig verarbeitet werden. Eine außerordentlich hohe Stufe der Leistungsfähigkeit, so hofft man, wird man mit assoziativen Computern erreichen. Die assoziative Organisation macht die elektronischen Datenverarbeitungsanlagen jedoch noch nicht zu lernfähigen Systemen. Sie sind lediglich den Aufgaben angepaßt, die bei ihrer Konstruktion vorgesehen waren. Die Lernfähigkeit setzt voraus, daß neu aufgenommene Informationen zu internen Veränderungen des Systems führen. Ein lernfähiger Computer muß die vorher erwähnte Klassifizierung von Informationen selbständig erweitern und verfeinern können. Er muß neue, ihm unbekanntere Informationen aufnehmen, sich ihre charakteristischen Merkmale einprägen, nach diesen Merkmalen in freien Speicherbereichen deponieren und von dort wieder abrufen können. Der lernfähige Computer stellt innerhalb seiner Schaltung selbständig neue Verknüpfungen her und paßt sich damit neu eingegangenen Informationen an. Wir nennen ein solches assoziativ anpassungsfähiges System ein adaptives System. Ein adaptives System kann sein Verhalten gegenüber seiner »Umwelt« selbst optimieren.

Wir wollen nun versuchen, einen Zugang zum Problem lernfähiger Automaten zu finden. Dazu gehen wir vom Herstellen von Verknüpfungen zwischen verschiedenen Informationen aus und werden technische Realisierungs-

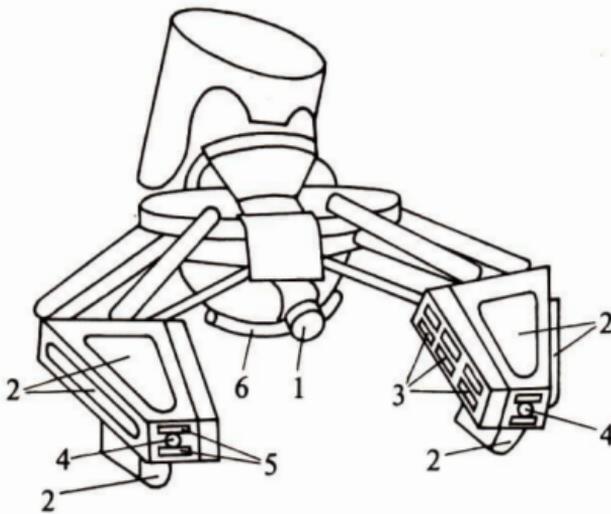


Ein »lernfähiger« Automat in Form eines Manipulators. Die Ausführungshand kann automatisch gesteuert werden. Sie handelt nach Befehlen, die von einem numerischen Rechner ausgegeben werden. Der Greifer sucht schwarze Würfel und bringt sie in eine Schachtel (siehe Abb. S. 119: Greifer dieses Geräts)

möglichkeiten solcher Informationsverknüpfungen betrachten.

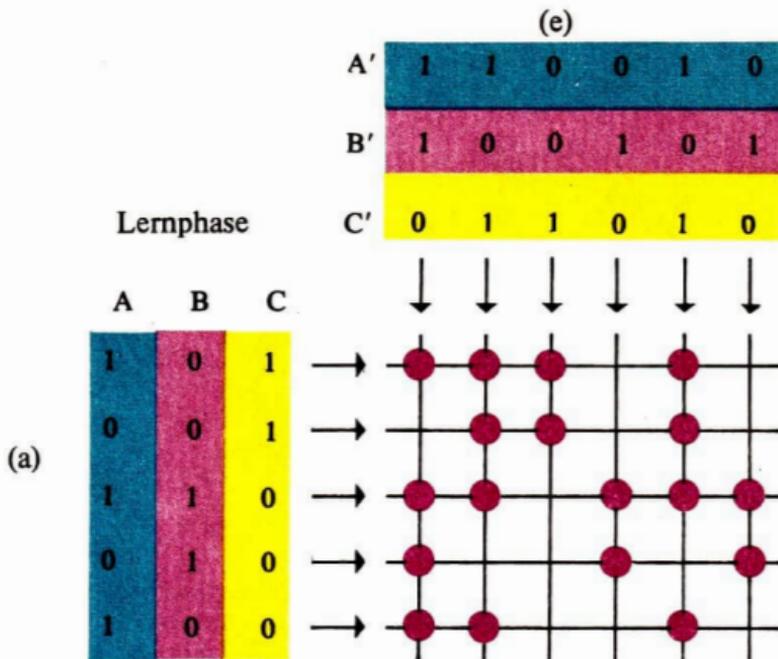
Das Verknüpfen zweier Informationen stellt gewissermaßen den Elementarvorgang des Lernens dar. Technische Bauelemente und Schaltungen, mit denen das Verknüpfen von Informationen erreicht werden kann, werden die grundsätzlichen Elemente lernfähiger Automaten sein.

Gehen wir zunächst von folgendem einfachen Beispiel aus: Eine Bildaufnahmeröhre (Vidicon) als Eingabeeinheit



1 – Geber, der die Lage des Objektes zwischen den Greiferfingern bestimmt; 2 – Geber, die eine Berührung mit Abschnitten signalisieren, die keine Arbeitsabschnitte sind; 3 – 6 Geber, die die Lage des ergriffenen Objektes signalisieren; 4 – Fotodiode, die auf den Schatten reagiert, der von einem schwarzen Würfel geworfen wird; 5 – Geber, die anzeigen, daß der Greifer auf ein Objekt gestoßen ist, das sich vor der Stirnseite befindet; 6 – Geber, der sich einschaltet, sobald die automatische Greifhand die Fläche berührt, auf der sich die Würfel befinden.

einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage nimmt den handgeschriebenen Buchstaben A auf und leitet ihn als Impulsfolge dem assoziativen Block des Computers zu. Dort sei aber nur der Druckbuchstabe A gespeichert. Im allgemeinen wird der handgeschriebene Buchstabe so stark von dem gedruckten abweichen, daß er nicht assoziativ erfaßt – nicht erkannt – wird. Nun soll aber ein äußeres Signal dafür sorgen, daß gleichzeitig mit dem eingegebenen handgeschriebenen A aus dem Speicher der Druckbuchstabe A abgerufen wird und beide einer Verknüpfungsschaltung angeboten werden. Diese stellt nach ein- oder mehrmaliger Wiederholung die Verknüpfung her. Nach dieser Lernphase kann das zusätzliche Signal wegfallen. Die Kannphase ist erreicht, in der die Vidiconaufnahme des handgeschriebenen A allein genügt. Die Assoziation zum Druckbuchstaben A ist im Elektronenrechner herge-



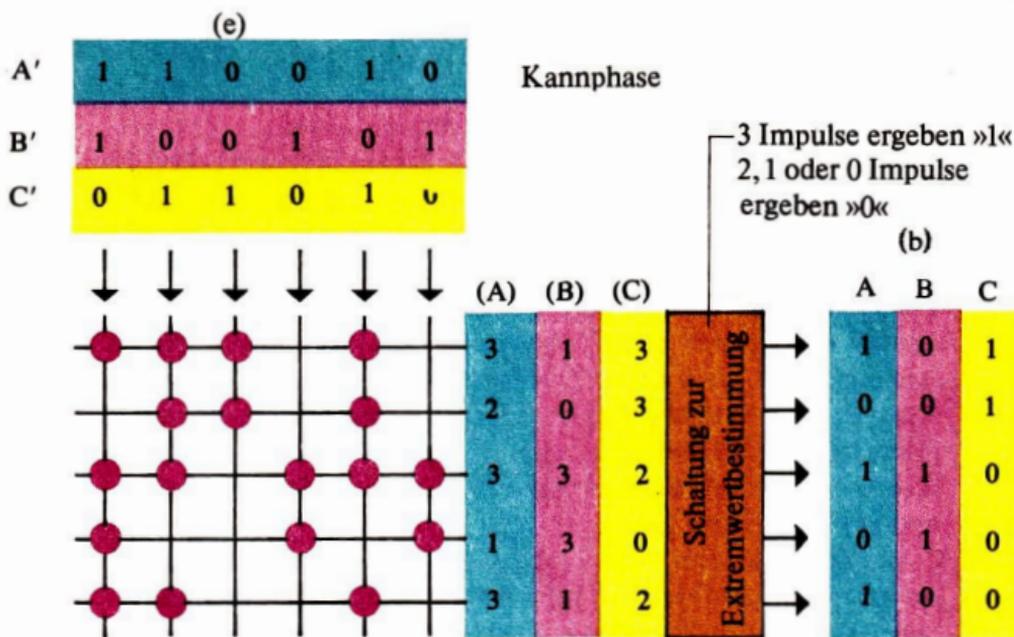
Lernmatrix

Lernphase: Verknüpfung der eingehenden Informationen A', B', C' mit den Bedeutungen A, B, C. 1 = Impuls; 0 = kein Impuls. Verknüpfungen entstehen dort, wo sich Impulse von (a) und (e) gleichzeitig kreuzen.

stellt. Wir können auch sagen, die Datenverarbeitungsanlage hat die Bedeutung des handgeschriebenen A gelernt. Man kann dem Gerät nun in gleicher Weise verschiedene handgeschriebene Buchstaben A anbieten. In den Lernphasen wird die Maschine die Fähigkeit erwerben, alle angebotenen handschriftlichen Formen des A auf eine Bedeutung – eben den Druckbuchstaben A – zu normieren.

Ganz ähnlich erlernt ein Schüler das Alphabet. Der Lehrer bietet ihm in der Lernphase akustisch den Laut an und malt dazu den Buchstaben an die Tafel. Der Schüler verknüpft beide Informationen. In der Kannphase liest der Schüler den Buchstaben, indem er das Zeichen wiedererkennt und den dazu gehörenden Laut artikuliert.

Eine sehr instruktive theoretische Schaltung zur Verknüpfung von Informationen stellt die Lernmatrix dar. An ihr ist noch einmal gut zu sehen, wie das Verknüpfen von



Kannphase: Die Bedeutungen A, B, C der Informationen A', B', C' sind erlernt worden.

Informationen konkret geschehen kann. Die Lernmatrix besteht aus zwei Scharen sich kreuzender Leitungen, die sich an den Kreuzungspunkten verknüpfen können. Da es zunächst um ein theoretisches Modell geht, stellen wir vorläufig die Frage zurück, wie eine solche Verknüpfung technisch realisiert werden könnte. Wir nehmen einfach an, daß eine Verknüpfung eintritt, wenn gleichzeitig in beiden Leitungen am Kreuzungspunkt ein elektrischer Impuls eintrifft. Die Verknüpfung besteht dann in einem ausreichend hohen elektrischen Leitwert, so daß elektrische Impulse am Kreuzungspunkt von einer zur anderen Leitung übergehen können.

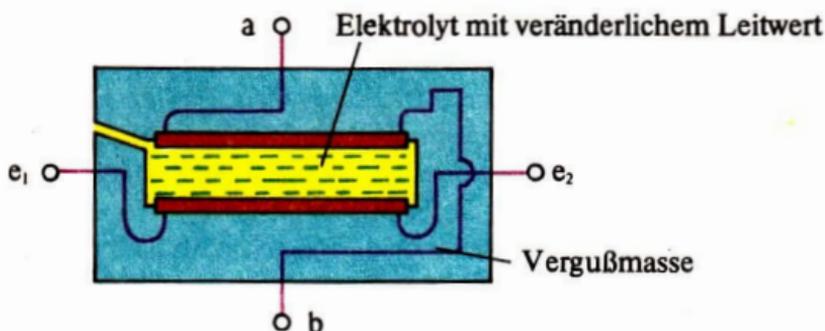
Von der Eingangsseite (e) der Lernmatrix möge eine Information in Form von Impulsen an bestimmten Eingangsleitungen in die Matrix einfließen. In der Lernphase werden gleichzeitig von der Assoziationsseite (a) Impulse eingespeist, die eine zweite Information darstellen sollen. Die Matrix verknüpft beide Informationen. Auf der Ausgangsseite (b) erscheint die Impulsfolge a. Ist die Verknüp-

fung ausreichend stabil hergestellt, ist also die Kannphase erreicht, so genügt die Eingangsinformation e allein, um am Ausgang die Impulsfolge a erscheinen zu lassen.

In ein und derselben Lernmatrix lassen sich natürlich mehrere Informationspaare verknüpfen, um so mehr, je größer die Zahl der sich kreuzenden Leitungen ist. Die Verknüpfung kann auch so gedacht werden, daß sich in der Lernphase das Zusammentreffen von Impulsen an den Kreuzungspunkten mehrfach wiederholen muß, bevor eine ausreichende Verknüpfung hergestellt ist. Das hat den Vorteil, daß einmalig fehlerhafte Eingangssignale korrigiert werden können. Zufällige Fehler würden nicht als falsche Verknüpfungen eingebaut, da sie sich im allgemeinen nicht wiederholen.

Die Frage ist nun, wie derartige Lernmatrizen technisch realisiert werden können. Den Kern dieses Problems stellen natürlich die Kreuzungspunkte dar. Es gilt Elemente – in ihrer Größe möglichst in die moderne Mikroelektronik passend – zu finden, die elektrische Verbindungen mit den beschriebenen Eigenschaften verwirklichen. Mit derartigen Elementen – wir wollen sie einmal Kreuzungselemente nennen – könnte man dann mit Hilfe der technologischen Möglichkeiten der Mikroelektronik Lernmatrizen und komplexere Lernmatrixschaltungen aufbauen. Sie wären neuartige integrierte Bauelemente, die zum Aufbau lernfähiger Automaten dienen könnten.

Es sind verschiedene physikalische Effekte geeignet, die Verknüpfung an einem Kreuzungspunkt zu erreichen. Gegenwärtig wird als relativ aussichtsreich die Leitwertänderung einer elektrolytischen Zelle angesehen. Eine solche Zelle, im Englischen auch als Memistor bezeichnet, besteht aus zwei Elektroden in einem elektrolytischen Medium. Jede Elektrode besitzt zwei metallische Kontakte, die Zelle insgesamt also vier Anschlüsse, von denen je zwei über ihre Elektrode verbunden sind. Als Elektrolyt wird ein solcher gewählt, dessen elektrischer Leitwert sich in einem elektrischen Feld mit der Dauer des Anliegens dieses Feldes allmählich erhöht. Fließt nun über jede der Leitungen ein elektrischer Impuls (entgegengesetzten Vorzeichens), so tritt für die Dauer dieser Impulse zwischen den Elektroden ein elektrisches Feld auf. Anfangs ist der



Technische Realisierung eines Kreuzungspunktes

Leitwert des Elektrolyten so gering, daß ein Impuls nicht von der einen zur anderen Elektrode übergehen kann. Das Kreuzungselement befindet sich in der Lernphase. Nach ein- oder mehrmaliger Wiederholung der Impulskoinzidenzen an beiden Elektroden ist der Leitwert des Elektrolyten so weit erhöht worden, daß ein weiterer Impuls von der Eingangsleitung über den Elektrolyten auf die zweite Leitung übergehen kann. Das Element hat die Kannphase erreicht.

Eine andere Realisierungsmöglichkeit bietet ein Dünnschichttransistor auf ferroelektrischem Substrat (Triglycinsulfat), der 1967 in der Fachliteratur vorgestellt wurde. Dieser Transistor kann durch Spannungsimpulse reversibel seine Steilheit im Verhältnis 1000:1 ändern. Seine Schaltzeiten liegen im Bereich von Mikrosekunden. Ein solcher Transistor eignet sich sehr gut als Kreuzungselement. In der Lernphase erhöhen die Spannungsimpulse von der Assoziationsseite seine Steilheit, also seinen Verstärkungsgrad. Dabei können diese Impulse entweder so bemessen sein, daß schon ein oder zwei genügen, um einen ausreichend hohen Verstärkungsgrad zu erreichen, oder auch so, daß eine größere Zahl von Impulsen (Wiederholungen) nötig ist, um diesen Fall zu erreichen. Genügend hohe Verstärkung des Transistors entspricht der Kannphase.

Leider treten zur Zeit in diesem Bauelement und ähnlichen Elementen elektrische Instabilitäten auf, die einen Einsatz in Schaltungen wenig aussichtsreich erscheinen lassen. Als weitere Mängel, die gegenwärtig noch den

genannten und ähnlichen adaptiven Bauelementen anhaften, sind ungenügende Beständigkeit ihrer Eigenschaften und schlechte Reproduzierbarkeit bei ihrer Herstellung zu nennen. Die Beispiele zeigen aber, daß technische Lösungen für Verknüpfungselemente möglich sind, aus denen sich dann Lernmatrizen aufbauen lassen.

Übrigens ist die Erhöhung eines elektrischen Leitwertes nur einer unter verschiedenen anderen physikalischen Effekten, die zur Konstruktion von Kreuzungselementen (Verknüpfungselementen, adaptiven Bauelementen) ausgenützt werden können. Die Suche nach geeigneten Lösungen hat erst begonnen und führt vielleicht auf völlig neue Wege.

Auch die hier ausführlicher dargestellte Lernmatrix als integriertes Bauelement stellt nur einen unter verschiedenen möglichen Wegen dar, auf dem man zu lernfähigen Automaten gelangen kann. Ihr Wert als technisches Modell für Verknüpfungsvorgänge in Neuronennetzen muß und wird in der Folgezeit noch eingehend studiert werden.

Nehmen wir nun einmal an, es stünden Lernmatrix-Bauelemente mit ausreichend stabilen Eigenschaften zur Verfügung, und aus ihnen (und natürlich zusätzlich aus einer ganzen Reihe anderer heute schon bekannter elektronischer Bauelemente) würden lernfähige Automaten aufgebaut – dann wäre der Umfang dessen, was diese Maschinen zu lernen imstande wären, hauptsächlich durch die Zahl der Lernmatrixelemente in einer Datenverarbeitungsanlage bestimmt. Sicher würde ein leistungsstarker lernfähiger Automat mehrere tausend Lernmatrizen enthalten, in denen einige Millionen von Informationen verknüpfbar wären.

Man erkennt aus diesen technisch notwendigen Dimensionen, daß ein Lernmatrixelement nicht sehr groß sein darf, denn viele derartige Elemente müssen auf möglichst kleinem Raum unterzubringen sein.

Es ist heute schwer zu übersehen, wie unsere Technik, wie das gesamte menschliche Leben einmal mit lernfähigen Automaten aussehen wird. Am ehesten ist noch der Einsatz derartiger Geräte als Prozeßrechner vor auszusehen. Als Beispiel betrachten wir den Einsatz einer lernfähigen oder adaptiven (anpassungsfähigen) Datenverarbeitungsanlage

zur Steuerung eines großchemischen Prozesses. Im Unterschied zu einem nichtlernfähigen Prozeßrechner kann der lernfähige Automat seine Arbeit mit relativ wenigen Startinformationen beginnen. Diese bestehen aus Ziel- und Randwertdaten für den zu optimierenden Prozeß. Informationen über den zu steuernden Prozeß selbst erhält der Automat von Meßsonden, etwa Temperaturfühlern, Manometern und Durchflußmengenmessern. Mit Hilfe dieser Informationen und der eingegebenen Zielwerte erlernt er nun selbständig das optimale Steuerprogramm für den Prozeß. Er lernt es sozusagen am Prozeß selbst und steuert diesen danach.

Für den nichtlernfähigen Prozeßrechner muß das optimierte Steuerprogramm bestimmt werden, damit es ihm eingegeben werden kann. Er vermag nur Meßgrößen wie Temperaturen, Drücke und Durchflußmengen zwischen vorgegebenen Grenzwerten zu halten. Der lernfähige Rechner dagegen nimmt zusätzliche Informationen etwa von Analysengeräten oder anderen Meßgeräten über das Endprodukt auf, »erkennt« an diesen den Erfolg seiner Arbeit und verbessert ihn ständig.

Hat der Prozeßrechner die Lernphase hinter sich, so kennt er die Zusammenhänge zwischen den Zielgrößen des Prozesses und den Prozeßparametern. In der Kannphase wird er den Prozeß optimal steuern.

Würde sich nun z. B. nach einiger Zeit die Qualität eines oder mehrerer Ausgangsstoffe ändern, so würde der adaptive Rechner sein Steuerprogramm sofort an diese neuen Bedingungen anpassen. Ebenso würde er bei veränderten Zielbedingungen das diesen entsprechende optimale Programm wieder selbständig auffinden. All das geschähe mit der Sicherheit und Zuverlässigkeit des Automaten, der nichts übersieht, nichts vergißt und niemals ermüdet.

Die Fähigkeit zu lernen eröffnet den Automaten sehr weite Bereiche für einen hocheffektiven Einsatz. Der eben besprochene lernfähige Prozeßrechner deutet nur schwach die Möglichkeiten an, die der menschlichen Gesellschaft offenstehen, wenn sie einmal im Beherrschen der Technik so weit fortgeschritten sein wird. Ganze automatisch gesteuerte Fabriken sind denkbar. Lernfähige Automaten werden konstruieren, Versuche steuern, Sprachen erlernen

und übersetzen können. Es ist sogar denkbar, daß lernfähige Automaten sich selbst untersuchen, vervollkommen und weiterentwickeln werden.

Von der Verantwortung des Menschen

Wir haben gesehen, daß biologische Systeme, insbesondere das Zentralnervensystem des Menschen, in ihrer gesamten Leistungsfähigkeit vergleichbaren technischen Systemen in vieler Hinsicht überlegen, oft sogar weit überlegen sind. Es liegt also nahe, hier Vorbilder für Lösungen technischer Probleme zu sehen. Diese Feststellung ist aber noch keine Problemstellung. Wir müssen fragen: Wer stellt der Wissenschaft Aufgaben? Wer nennt die technischen Probleme? Erst die Beantwortung dieser Fragen führt auf die Entwicklungstendenzen von Wissenschaft und Technik. Und damit sind wir bei der Verantwortung der menschlichen Gesellschaft.

Aufgabenstellungen zur Lösung von Problemen kommen zu einem Teil aus der Grundlagenforschung der verschiedenen Spezialdisziplinen, zu einem anderen und heute oft entscheidenden Teil aber aus der Wirtschaft, aus der Industrie. Besonders dort, wo von wissenschaftlichen Entwicklungen große technische und damit wirtschaftliche Vorteile erhofft werden, wird die Entwicklung nachdrücklich vorangetrieben.

Letzteres trifft sicher auf die Entwicklung assoziativer und adaptiver Datenverarbeitungsanlagen zu, außerdem auch auf technische Rezeptoren für verschiedene Arten von Signalenergie, die nach biologischen Prinzipien arbeiten. Von neuen Ergebnissen über biologische Regelmechanismen und datenreduzierende Schaltungen erwartet man, neue technische Lösungen in der Meß- und Regeltechnik zu finden.

Neue Forschungsergebnisse der Biologen und Mediziner über Sinnesorgane und Zentralnervensysteme von Tieren und Menschen werden auch dann, wenn sie nur auf die ihren eigenen Disziplinen entstammenden Ziele gerichtet sind, technische Entwicklungen beeinflussen.

Leider wachsen in dem Maße, in dem sich unsere Kennt-

nisse über biologische informationsverarbeitende Systeme vertiefen und in dem technische Datenverarbeitungsanlagen immer vollkommener werden, auch die Möglichkeiten der direkten und indirekten Manipulation einzelner Menschen und ganzer Menschengruppen. Einflüsse und Manipulationen beginnen schon damit, daß Menschen in verschiedenen Berufszweigen in kapitalistischen Ländern durch technische Entwicklungen verunsichert werden. Je größer der Umfang der Automatisierung in Industrie, Handel, Verkehr, auf dem Gebiet der Dienstleistungen, in Verwaltungen und wissenschaftlichen Einrichtungen wird, um so stärker wächst – und zwar sehr begründet – die Existenzangst der Menschen in all den Ländern, wo das Gesetz des Maximalprofits die wissenschaftlich-technische Entwicklung bestimmt.

Die Widersinnigkeit des Privatbesitzes an Produktionsmitteln so ungeheuer hoher Leistungsfähigkeit, deren Entwicklung doch ohne jeden Zweifel Ergebnis der Arbeit von Millionen Menschen mehrerer Generationen ist, wird unabweisbar deutlich. Wir erreichen eine neue Stufe im Verhältnis zwischen Mensch und Maschine. Hatten wir mit der Erfindung der Dampfmaschine sowie später mit dem Elektromotor und dem Verbrennungsmotor Kraftmaschinen zur Verfügung, die der Mensch steuern mußte, so überlassen wir nun dieses Steuern den Automaten in immer vollkommenerer Weise. Es gelingt den Menschen, sich von schwerer oder gefährlicher Arbeit Stück um Stück zu befreien, sich auf sich selbst zu besinnen. Aber darin liegen Gefahren verborgen. Wozu befreit sich der Mensch? – Geht er in die Leere des Nichtstuns? Hier liegen soziale, psychologische, politische Probleme auch für die fortgeschrittene sozialistische Gesellschaft.

Neue Wege der Erziehung und Bildung, der Anleitung zu schöpferischem Handeln müssen gefunden und begangen werden. Wir dürfen uns nicht allein auf unsere Technik verlassen. Das Bewältigen dieser neuen Technik umfaßt viel mehr, als sich in Zahlen wachsender Produktivkraft ausdrücken läßt.

In den letzten Jahren ist klar geworden, daß die Rohstoffvorräte unserer Erde nicht unerschöpflich sind. Was nützt uns aber eine hochautomatisierte Industrie,

der Energie und Rohstoffe zur Verarbeitung fehlen würden?

Wir können hier nur andeuten, wie stark alle diese Probleme miteinander verflochten sind. Die Ereignisse der Gegenwart zeigen, daß in der Welt diese Probleme oft nicht im Sinne der Menschen gelöst werden. Kein Wunder, daß dann aus Entwicklungstendenzen negative Konsequenzen in Form von antihumanen Projekten gezogen werden. Wiederholt haben amerikanische Experten solche Projekte wie elektronische Kindererziehung, die elektrische Fernsteuerung von Menschenmassen und ähnliches diskutiert. Solchen Spekulationen steht aber das Verantwortungsbewußtsein aller Menschen gegenüber, die arbeiten und forschen zum Wohl und zur Entwicklung ihrer Art.

»akzent« – die Taschenbuchreihe
mit vielseitiger Thematik:
Mensch und Gesellschaft,
Leben und Umwelt, Naturwissenschaft
und Technik. – Lebendiges Wissen
für jedermann, anregend und aktuell,
konkret und bildhaft.

Weitere Bände:

Mothes, Tiere am Fließband
Schönknecht, Schneller – aber wie?
Thomas/Thomas, Milliarden Jahre Leben
Freytag, Vom Wasser- zum Landleben
Raubach, Rätsel um das Molekül
Friedemann,
Leben wir unter kosmischen Einflüssen?
Mohrig, Wieviel Menschen trägt die Erde?
Günther, Gebaute Umwelt