473

Über Regulationen im lebenden Organismus

FESTREDE
gehalten in der öffentlichen Sitzung
der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in München am 24. November 1950

VON

RICHARD WAGNER
o. Mitglied der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse

München 1950
Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
In Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

Über Regulationen im lebenden Organismus

FESTREDE
gehalten in der öffentlichen Sitzung
der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in München am 24. November 1950

VON

RICHARD WAGNER
o. Mitglied der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse

München 1950
Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
In Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

Jeder lebende Organismus ist ein nach den verschiedensten Richtungen hin ausbalanciertes System. Vor allem befindet er sich in einem Gleichgewicht mit seiner Umwelt, und wird solches Gleichgewicht durch einen Anstoß aus der Umwelt – einen sogenannten Reiz – gestört, dann hat der Organismus die Tendenz, von Neuem ein Gleichgewicht mit seiner Umwelt einzustellen. Soweit ihm solches gelingt, ist sein Weiterbestand gesichert, wo es ihm nicht gelingt, ist sein Untergang besiegelt.

Alle höher organisierten Lebewesen sind bekanntlich Zellstaaten, die sich aus einer großen Zahl einzelner lebender Zellen zusammensetzen. Der Zusammenschluß all dieser Einzelwesen zum Staat ist höchstwahrscheinlich deshalb erfolgt, weil das Zellindividuum in der Vergesellschaftung günstigere Lebensbedingungen hat, als wenn es allein durch die Welt gehen würde. In einem Staatsverband ist es möglich, daß die Einzelwesen sich in verschiedener Richtung differenzieren. Wo ein einzelliges Lebewesen, um in der Welt bestehen zu können, alle Qualitäten in sich vereinen muß, die zur Erhaltung des Lebens nötig sind, haben sich im Zellstaat Spezialisten für die verschiedenen Bedürfnisse des Lebens herausdifferenziert. So finden wir Zellen, die speziell für motorische Funktionen ausgebildet sind und mechanischer Arbeitsleistung dienen, wie die Muskelzellen, wir finden andere, die Spezialisten für die Verdauung sind, wie z. B. die Drüsenzellen, und wir finden wieder andere, welche die Beziehungen der Zellindividuen untereinander im Sinne einer Verwaltung des Zellstaates regeln und welche außerdem die Beziehungen zwischen Zellstaat und Umwelt aufrechterhalten. Diese letztere Art von Spezialisten sind die Nervenzellen. Und so kann man für die große Menge der verschiedenartigen Einzelleistungen, die hier nicht alle aufgezählt werden können, jeweils Zellen im Zellstaat finden, die wie Spezialarbeiter auf eine ganz bestimmte Funktion eingestellt sind. Da Spezialisten eine bestimmte Aufgabe meist besser erfüllen wie ein Amateur oder Dilletant, hat der Gesamtorganismus von dieser Spezialisierung seiner Partner im Lebenskampf einen Vorteil. Zweifellos hat aber auch die einzelne Zelle von dieser in der Vergesellschaftung auftretenden Spezialisierung ihren Vorteil, denn bestimmte Aufgaben, die für sie erfüllt wer-

den müssen, werden von Partnern erfüllt, die solcher Aufgabe in besonders hohem Maße gewachsen sind. So kommt das Spezialistentum der Partner schließlich auch der einzelnen Zelle wieder besonders zugute. Jede Zelle und jedes Organ erfüllt seine Funktionen nicht nur im Interesse und für den Bestand des Gesamtorganismus, sondern es erfüllt seine Aufgaben ja schließlich auch für sich selbst. Es erscheint zweifelhaft, ob sich derartige Symbiontensysteme, wie es Zellstaaten und auch Gesellschaftsstaaten sind, aufbauen würden, wenn nicht die Bedürfnisse und der Egoismus des einzelnen Teilhabers hierbei befriedigt würden und ein zweckmäßiger Ausgleich geschaffen worden wäre zwischen dem Eigennutz des einzelnen Teilhabers und dem Gemeinnutz des ganzen Staates. Für das Individuum kann der Staat nicht Selbstzweck, sondern nur Mittel zum Zweck sein.

Damit der lebende Organismus bestehen kann, muß vor allem dafür gesorgt sein, daß den Individuen, die solchen Zellstaat bilden, eine möglichste Konstanz der Lebensbedingungen gewährleistet wird und bestimmte physikalische und chemische Bedingungen zeitlebens aufrechterhalten werden. In physikalischer Hinsicht muß vom Gesamtverband des Organismus dafür gesorgt sein, daß z. B. die Salzkonzentration, die Wasserstoffionenkonzentration, die Temperatur und noch manche andere physikalisch definierbare Größe auf möglichst konstanter Höhe gehalten wird. Solange solche Konstanterhaltung physikalischer und chemischer Lebensbedingungen gelingt, ist das Leben der Zellen und des ganzen Zellstaates gesichert; wo dies aber nicht mehr gelingt, gehen die Individuen zugrunde und der Staat stirbt ab. Auch in chemischer Hinsicht ist es Aufgabe des Gesamtzellstaates, dafür zu sorgen, daß die chemische Zusammensetzung jener Flüssigkeit möglichst gleichbleibt, die die einzelnen Zellindividuen umspült. Durch Ausscheidungsorgane, die dem gesamten Zellstaat gemeinsam sind, wird solches bewirkt. Die Endprodukte des Stoffwechsels der Zellen werden durch sie in die Umwelt zur Ausscheidung gebracht. Jede Anhäufung von stickstoffhaltigen Stoffwechselprodukten, wie sie bei der Eiweißzersetzung entstehen, wird durch die Niere, jede Anreicherung von Kohlensäure, die durch Verbrennung von C-Atomen entsteht, wird durch den Atemapparat verhindert. Zur Aufrechterhaltung

konstanter Lebensbedingungen im Zellmilieu gehört es aber auch, eine möglichst gleichbleibende Konzentration der Ausgangsprodukte des Stoffwechsels zu erzielen, wie dies z. B. im besonderen Fall des Zuckerhaushaltes durch Mechanismen bewirkt wird, die den Blutzuckergehalt auf ein bestimmtes konstantes Niveau einzuregulieren imstande sind. So wird z. B. durch Regulationsapparate ein bilanzmäßiger Ausgleich geschaffen zwischen der Menge des in den Organen verbrauchten und verbrannten Zukkers und jener Menge Zucker, die von der Leber ins Blut hinein nachgeliefert wird. Hierdurch wird der Zuckergehalt des Blutes auf stets gleicher Höhe gehalten und ein bestimmter Blutzuckerspiegel eingestellt.

So erscheint es also als eine der wichtigsten Voraussetzungen für den Ablauf der Lebensvorgänge und den Bestand des Lebens, den Zellindividuen, aus denen sich der gesamte Zellstaat zusammensetzt, eine Konstanz der Lebensbedingungen zu gewährleisten.

Es ist nun die Frage, wie und nach welchen Prinzipien ein Organismus solches erreicht. Ganz allgemein kann man sagen, daß die Aufrechterhaltung stationärer Bedingungen im Zellkollektiv von jener Stelle aus bewirkt wird, wo für die Änderung eines Zustandes, der konstant erhalten werden muß, die größte Empfindlichkeit besteht. Einige Beispiele mögen das klarmachen. Wo z. B. die gesamte graue Substanz – die Nervenzellen im Rückenmark und im Gehirn – für eine Zunahme des Kohlensäuregehaltes sehr empfindlich sind und in Erregung geraten, so daß sich Krämpfe einstellen, wenn sich Kohlensäure im Organismus anhäuft, finden wir, daß *eine* besonders bevorzugte Stelle vorhanden ist, die als Ort höchster Empfindlichkeit gegenüber Kohlensäure anzusprechen ist. Schon die geringste Zunahme dieses Stoffwechselproduktes löst von diesem Ort größter Empfindlichkeit eine Reaktion aus. Der Ort, an dem solches geschieht, ist das Atemzentrum. Auch an der Verzweigungsstelle der Halsschlagader (der Arteria carotis) ist ein Organ eingebaut, das Erregungen in Nerven erzeugen kann, wenn der Kohlensäuregehalt des Blutes zunimmt. Im Organismus sind sozusagen

besondere Fühler vorhanden, welche den Kohlensäuregehalt kontrollieren. Wenn diese Fühler erregt werden und auf das Stoffwechselprodukt ansprechen, dann lösen sie im Organismus Reaktionen aus, welche geeignet sind, den Kohlensäuregehalt im Blut und in den Geweben wieder herabzusetzen. Die Erregungen, die in solchen Kontrollorganen entstehen, werden bestimmten Nervenzentren zugeleitet und von diesen Zentren aus wird eine Gegenregulation in Gang gesetzt, welche die Störung eines Zustandes wieder beseitigt. Das Atemzentrum z. B. schickt, wenn es durch Kohlensäure stärker erregt wurde, stärkere Nervenimpulse zur Atemmuskulatur. Hierdurch wird die Atmung tiefer und schneller, es wird mehr Kohlensäure durch die Lunge ausgeschieden und der Gehalt des Blutes und der Gewebe an Kohlensäure sinkt nun ab. Hierdurch wird aber die Erregung jener Fühler wieder geringer, die den ganzen Vorgang einer Vertiefung und Beschleunigung der Atmung ausgelöst haben, und sobald der normale Kohlensäuregehalt wieder erreicht ist, hat auch die Atmung wieder ihre normale, für die Ruhe des Organismus zutreffende Stärke. Wie man sieht, reguliert sich der Kohlensäuregehalt durch diesen Mechanismus des Atemapparates von selbst. Solche Selbsteinregulierung eines Zustandes ist für die Lebensvorgänge ganz besonders charakteristisch und typisch.

Wie schon erwähnt, gilt es im lebenden Organismus aber nicht nur einen einzigen Zustand aufrecht und konstant zu halten wie in dem eben gebrachten Beispiel den Kohlensäuregehalt, sondern es müssen gleichzeitig eine ganze Fülle von Zustandsbedingungen einkorrigiert werden. Für die vielerlei Zustände, die es einzuregulieren gibt, ist aber auch eine Vielzahl von Orten da, von denen aus solches geschieht, und jene Zellindividuen des Gesamtstaates, die für eine bestimmte Zustandsänderung die größte Empfindlichkeit haben, regulieren diesen Zustand jeweils für das gesamte Kollektiv.

So haben sich die Warmblüter von den Temperaturschwankungen der Umwelt (innerhalb gewisser Grenzen) unabhängig gemacht und in bekannter Weise die Fähigkeit gewonnen, ihre Körpertemperatur auf annähernd gleicher Höhe zu halten. Die Intensität der Verbrennungsprozesse und des Stoffwechsels im Organismus, die wie alle chemischen Prozesse von der Tempe-

ratur abhängig ist, wird hierdurch von den Temperaturschwankungen unabhängig, wie sie das veränderliche Wetter und Klima sonst mit sich bringen würden. Auch hier ist wieder ein automatisch tätiger Reglermechanismus verantwortlich zu machen, wenn sich die Körpertemperatur (von kleineren Schwankungen abgesehen) immer wieder auf eine konstante Größe einstellt. Auch hier sind wieder Organe vorhanden, Fühler, die das Temperaturgefälle zwischen Körper und Umwelt kontrollieren. Wird dieses Gefälle größer, dann treten in nervösen Endorganen, die in der Haut liegen, Erregungen auf, die durch Nervenbahnen dem Zentralnervensystem zugeleitet werden und schließlich eine Zentralstelle erreichen, welche die höchste Instanz für die Temperaturregulierung ist. Man heißt diese Stelle das Wärmezentrum. Von dort aus werden dann Maßnahmen eingeleitet, welche zur Folge haben, daß das Temperaturgefälle zwischen Körper und Umwelt wieder kleiner wird. Zu diesem Zweck hat z. B. das Wärmezentrum (unter anderem) die Fähigkeit, die Blutgefäße in der Haut zu verengen. Die Blutmenge, die aus dem Innern des Körpers in die Haut fließt, wird so geringer, und die Wärmemenge, die mit dem Blutstrom in die Haut transportiert wird, wird kleiner. Hierdurch sinkt aber die Hauttemperatur ab, und bei gleicher Umgebungstemperatur wird nun das Temperaturgefälle zwischen Körperoberfläche und Umwelt vermindert. Damit fällt aber der Reiz auf jene Kontrollorgane, auf jene Wärmefühler in der Haut weg, die den ganzen Vorgang dieser Regulation in Gang gebracht haben. So reguliert sich also z. B. auch die Temperatur des Körpers automatisch.

Eine andere lebenswichtige Zustandsbedingung, die konstant erhalten werden muß, ist die Salzkonzentration in den Körpersäften und Zellen. Wenn die Salzkonzentration im Blute steigt, dann wird den Zellen Wasser entzogen und sie müssen schrumpfen, wenn die Salzkonzentration der Körpersäfte, insbesondere des Blutes sinkt, dann nehmen die Zellen aus ihrer Umgebung Wasser auf und sie quellen. Für den Zustand der lebenden Substanz in den Zellen ist eine ganz bestimmte optimale Salzkonzentration die unerläßliche Voraussetzung. Auch diese wird vom Organismus selbsttätig regulierend eingestellt. Man hat erst vor kurzer Zeit gefunden, daß in der Halsschlagader Fühler ein-

gebaut sind, welche die Salzkonzentration des Blutes kontrollieren. Leitet man durch dieses Blutgefäß Flüssigkeit, welche eine geringere Salzkonzentration hat wie das Blut selbst, dann werden dort wieder Kontrollorgane erregt, die auf einem bisher nicht aufgeklärtem Weg die Niere veranlassen, mehr Wasser auszuscheiden. Hierdurch wird aber die Salzkonzentration, wo sie abgesunken war, wieder erhöht, und der osmotische Druck, den die gelösten Moleküle und Ionen auf die halbdurchlässigen Grenzflächen und Membranen in den Zellen ausüben, steigt wieder an. Man heißt diesen Vorgang Osmo-Regulation, und auch diese ist eine Leistung eines automatisch funktionierenden Systems. Durch solche Einrichtung befinden sich die einzelnen Zellen, die Symbiontenpartner, die den gesamten Zellstaat unseres Organismus bilden, in bezug auf den Salzgehalt ihrer Umwelt stets in einem gleichbleibenden Milieu.

Erst die höhere Organisation eines Lebewesens und die Ausbildung größerer Zellstaaten, die in der Luft und nicht im Wasser leben, hat solche Einrichtung notwendig werden lassen. Die einzelne Zelle muß nach wie vor in einer Flüssigkeit leben, die in der überwiegenden Hauptsache aus Wasser besteht. Das Wasser als Lösungsmittel vermittelt den Stoffaustausch zwischen dem lebenden Protoplasma des Zellinhaltes und der Umgebung. Um für solchen lebenswichtigen Austausch konstante Bedingungen im Zellmilieu zu erreichen, muß auch die Salzkonzentration auf stets gleiche Größe eingestellt werden. Niedrige Lebewesen, die sich z. B. im Meerwasser aufhalten, haben solche Einrichtungen nicht nötig. Die Zusammensetzung der großen Flüssigkeitsmengen des umgebenden Meerwassers ist so konstant, daß die Flüssigkeit, die solche Zellen umspült, durch Entnahme und Ausscheidung von Substanzen praktisch keine Veränderung erleidet. Bei der im Vergleich zur Masse der Körperzellen relativ geringen Blutmenge unseres Organismus liegen die Verhältnisse aber anders, und es wird eine Einrichtung der Osmo-Regulation nötig, so wie eben beschrieben.

Was hier für drei Beispiele, für die Regulierung des Kohlensäuregehaltes, der Temperatur und der Salzkonzentration skizzenhaft ausgeführt wurde, ließe sich noch für die Regulierung zahlreicher anderer Zustände im Organismus zeigen. Stets handelt es sich dabei um selbsttätige Regulationen.

Um das Grundsätzliche solcher Reglermechanismen im Organismus aber besonders deutlich zu machen und noch einen tieferen Einblick in ihre Funktionsweise zu vermitteln, soll im folgenden an einem Spezialfall, der einer Beobachtung besonders leicht zugänglich ist, das Spiel solcher Einrichtungen ins einzelne gehend gezeigt werden.

Die Konstanterhaltung unseres mittleren Blutdruckes ist zur genaueren Demonstration eines solchen Reglermechanismus deswegen besonders geeignet, weil sich die Regelvorgänge relativ rasch abspielen, sich gut beobachten lassen und weil die einzelnen Teile, aus denen sich der gesamte Apparat der Blutdruck- und Kreislaufregulierung zusammensetzt, in funktioneller und anatomischer Hinsicht besser bekannt sind als die Teile der zahlreichen anderen Reglersysteme im Organismus.

Für die Aufgaben, die der Blutkreislauf in unserem Körper zu erfüllen hat, ist die Einregulierung eines konstanten mittleren Blutdruckes nur Mittel zum Zweck. Die übergeordnete Zielsetzung ist die ausreichende Blutversorgung der einzelnen Organe. Diese haben je nach dem Grad ihrer Tätigkeit einen sehr verschieden großen Stoffwechsel. Die Durchblutung muß an die jeweilige Größe des Stoffwechsels angepaßt werden. Bei verstärkter Muskeltätigkeit müssen die Muskeln, bei vermehrter Verdauungsarbeit müssen die Baucheingeweide und bei geistiger Arbeit muß das Gehirn der Mehrleistung entsprechend stärker durchblutet werden. Je nach den so von Zeit zu Zeit wechselnden Stoffwechselgrößen der verschiedenen Organe und Organsysteme muß hierbei die Blutstromverteilung nach Bedarf geändert und an die Stoffwechselbedürfnisse der einzelnen Kreislaufteilhaber angepaßt werden.

Über all diesen ins einzelne gehenden Regulationen der bedürfnismäßigen Blutstromverteilung in Richtung einzelner Organe und Organgebiete steht aber aus physikalischen, aus hydrodynamischen Gründen die zwingende Notwendigkeit für das Gesamtsystem des Blutkreislaufes, die nötige Druckdifferenz zwischen dem Arteriensystem und dem Venensystem aufrechtzuerhalten, damit das Blut strömt. Für das Bedürfnis des durchbluteten einzelnen Organes ist dabei die Höhe des Druckes, der zu seiner Durchblutung führt, nur von untergeordnetem Interesse,

etwa ähnlich, wie in einem Haushalt der Druck, der in der Wasserleitung herrscht, nur wenig interessiert. Nur darauf kommt es an, daß genügende Wassermengen im Bedarfsfall dem Abnehmer zur Verfügung stehen, beziehungsweise in unserem Fall, daß ausreichende Blutmengen durch das Organ hindurchfließen, um seine Stoffwechselbedürfnisse – seinen Haushalt – zu befriedigen. Je lebhafter tätig es ist, desto mehr Sauerstoff benötigt es, desto mehr Zucker braucht es und desto mehr Kohlensäure wird bei der Verbrennung von ihm gebildet. Sauerstoff wird aus der Lunge, Zucker aus der Leber dem Organ zugeführt und die Kohlensäure wird in die Lunge zur Ausscheidung abtransportiert. Alles dies geschieht auf dem Blutwege, und deshalb muß die jeweilige Durchblutung eines Organs der Größe seines Stoffwechsels, also dem Grad seiner Tätigkeit angepaßt werden.

Ähnlich wie etwa die Netzspannung in einem Elektrizitätswerk unabhängig von der stets wechselnden Stromverteilung im Verbrauchernetz auf konstanter Höhe erhalten wird, besteht aber auch im Blutkreislauf nun das Bestreben, den sogenannten zentralen Blutdruck auf eine konstante mittlere Größe einzustellen. Es ist dies jener Druck, der in der Hauptschlagader unseres Körpers, in der Aorta, herrscht. In die Aorta hinein gelangt das Blut aus dem Herzen, in dieser staut es sich unter Druck (wie in dem Windkessel einer Feuerspritze) an und von dort fließt es dann durch die Arterien den einzelnen Organen zu.

Durch solche Konstanz des mittleren Blutdruckes in der Aorta wird erreicht, daß die Mechanismen, welche die Blutstromverteilung nach den einzelnen Organen zu regeln haben, nur eine einzige physikalisch maßgebliche Größe zu beeinflussen brauchen, um ihre Aufgabe zu erfüllen. Sie regeln nur den Strömungswiderstand in den kleinen und kleinsten Blutgefäßen und sie sind durch diese Konstanterhaltung des Blutdruckes von einer wechselnden Größe des Betriebsdruckes unabhängig geworden. Die Regulierung des Strömungswiderstandes in den Blutgefäßen der Organe geschieht hierbei in der Weise, daß die Blutgefäße verengert oder erweitert werden können. Werden sie verengt, so steigt der Strömungswiderstand und es fließt weniger Blut durch das Organ, werden sie erweitert, dann sinkt der Widerstand und es strömt mehr Blut durch das Organ.

Die Regulierung des Blutstromes für die einzelnen Organe wird von bestimmten Zentralstellen aus bewirkt, die man Gefäßnervenzentren heißt. Es sind dies Nervenzellen, welche ihre Aufgabe dadurch erfüllen, daß sie den Muskeln in der Wand der Blutgefäße Erregungsimpulse zuschicken. Wenn diese Impulse stärker werden, kontrahieren sich die Wandmuskeln stärker und das Lumen der Blutgefäßröhren wird enger. Wo diese Impulse aber schwächer werden, läßt die Kontraktion der Wandmuskeln nach und die Röhren bekommen einen größeren Durchmesser, so daß durch das Organ jetzt mehr Blut hindurchfließen kann.

Mit der Verengerung der peripheren Blutgefäße ist aber gleichzeitig ein Ansteigen des Blutdruckes in den großen herznahen Blutgefäßen – insbesondere der Aorta – verbunden, und zwar aus folgendem leicht ersichtlichen Grund: der Druck in der Aorta und in den großen Arterien hängt einerseits davon ab, wieviel Blut in einer bestimmten Zeit (z. B. in einer Minute) vom Herz in diese Gefäße hineingeworfen wird. Andererseits hängt er davon ab, wieviel Blut in derselben Zeit aus der Aorta und den großen Gefäßen abströmt. Ist der Abstrom aus der Aorta in einer bestimmten Zeitspanne ebenso groß wie der Zustrom vom Herzen her, dann bleibt der mittlere Blutdruck auf konstanter gleichmäßiger Höhe. Nun hat der Organismus wie gesagt die Tendenz, den Blutdruck konstant zu halten, und er erreicht dies dadurch, daß er durch besondere Mechanismen den Abstrom des Blutes aus der Aorta und den Zustrom des Blutes vom Herzen her aneinander angleicht. Zur Konstanterhaltung des mittleren Blutdruckes erfolgt also ein bilanzmäßiger Ausgleich von Zu- und Abstrom für die Aorta.

Die Regulierung des Abstromes geschieht durch die Gefäßnerven, durch den sogenannten Vasomotorenapparat. Dieser stellt ein System von über- und untergeordneten nervösen Instanzen dar. Man kann im wesentlichen 3 Instanzen unterscheiden. Die subalternste Stelle liegt in den Wänden der Blutgefäße selbst. Die dort befindlichen Nervenzellen können von sich aus Änderungen der Gefäßweite und damit Blutdruckschwankungen bereits hervorbringen. Ihr Einflußbereich ist aber nur ein kleiner und sie haben nur lokale Bedeutung für jene Arterien, in deren Wand sie sich befinden. Die nächsthöhere Instanz des Vaso-

motorenapparates liegt im Rückenmark. Von den dort befindlichen Nervenzellen können bereits ganze Bereiche des Blutgefäßsystems beherrscht und reguliert werden, und jedes Zentrum hat bereits eine regionale Bedeutung und beherrscht ein größeres Körpergebiet. Die höchste und für die Blutdruckregulierung des Gesamtkörpers souveräne Instanz liegt im obersten Ende des Rückenmarks, in der medulla oblongata. Von hier aus werden wieder alle Rückenmarkszentren beherrscht, und es wird deren Tätigkeit so koordiniert, wie dies im Interesse des Gesamtorganismus gelegen sein muß. Unabhängig von den verschiedenen, von Zeit zu Zeit wechselnden Durchblutungsbedürfnissen der einzelnen Organe und Organsysteme wird von dieser übergeordneten Stelle vor allem dafür gesorgt, daß – wie immer das Blut zu den einzelnen Organen auch fließen mag – der Betriebsdruck für den gesamten Blutkreislauf konstant erhalten wird. Auch solches wird wiederum durch einen automatischen Regelmechanismus bewirkt, den ich kurz beschreiben möchte.

Da man an diesem System der Blutdruckregulierung eine Reihe von Einzelmechanismen und Details feststellen kann, aus denen sich der Gesamtapparat zusammensetzt, die sich bei anderen biologischen Regelsystemen noch nicht in funktioneller und anatomischer Hinsicht so klar voneinander abgrenzen lassen, ergibt sich beim Studium dieses biologischen Blutdruckreglers ein besonders deutlicher Einblick in das Geschehen solcher Regulationen.

In die Wand der großen Blutgefäße, z. B. in die Hauptschlagader (in die Aorta), aber auch in den beiden großen Halsschlagadern sind wiederum Fühler eingebaut, die den dort herrschenden Druck unter Kontrolle halten. Es sind dies spannungsempfindliche Endorgane sensibler Nerven, die ähnlich funktionieren wie Manometer. Wenn der Blutdruck in diesen großen Blutgefäßen steigt, wird die Wand dieser Blutgefäße stärker gespannt. Diese Spannungszunahme ist der mechanische Reiz für die Endorgane sensibler Nerven. Diese werden erregt und durch zwei Nervenpaare, die sogenannten „Blutdruckzügler", laufen Erregungen hinauf zum verlängerten Mark in das vorhin schon erwähnte übergeordnete Gefäßnervenzentrum – also zur höchsten Stelle für die gesamte Blutdruckregulierung. Die Nervenimpulse, die so

im Zentrum ankommen, haben die Fähigkeit, den Erregungszustand des Gefäßnervensystems zu beeinflussen, und zwar abzuschwächen. Sie haben auf das Gefäßnervenzentrum eine hemmende Wirkung (und setzen die Erregung in diesem herab). Man findet im Zentralnervensystem immer wieder die Erscheinung, daß durch Erregungen bestimmter Nervenzellen und Nervenfasern andere Nervenzentren gehemmt und in ihrer Tätigkeit gleichsam gebremst werden. Unser ganzes Nervenleben ist ein fortwährendes Spiel zwischen Entstehen von Erregungen und Hemmung von Erregungen. Warum die Erregung bestimmter Nervenfasern und -zentren in anderen Zentren eine Erregungshemmung erzeugen kann, ist – wenn man auch schon einiges darüber weiß – ein in vielem noch ungelöstes Problem.

Jedenfalls wird aber in unserem Fall durch eine Erhöhung des Blutdruckes, durch eine Spannungszunahme der Gefäßwand, eine Serie von Nervenimpulsen erzeugt, welche die Erregung im übergeordneten Gefäßnervenzentrum herabsetzen und dämpfen. Das Strömen solcher Impulse kann man beweisen, indem man die elektrischen Begleiterscheinungen feststellt, die mit solchen Erregungen in den Nerven der Blutdruckzügler verbunden sind. Die so erzielte Hemmung im souveränen Gefäßnervenzentrum hat aber zur Folge, daß die peripheren Blutgefäße nun schwächer innerviert werden; denn dieses Zentrum schickt dann infolge seiner Hemmung schwächere Impulse ins Rückenmark als vorher, und die dort befindlichen untergeordneten Instanzen der Blutdruckregulierung schicken nun ihrerseits selbst schwächere Impulse zu den Blutgefäßen hinaus. Hierdurch läßt die glatte Muskulatur in der Wand der Blutgefäße mit ihrer Kraftentwicklung nach, die Wandspannung dieser Blutröhren wird kleiner und ihr Lumen erweitert sich. Durch diese so erweiterten Gefäße fließt jetzt mehr Blut als vorher aus der Aorta ab, was zur Folge hat, daß in dieser der Druck sinkt. Damit wird aber die Wandspannung in der Aorta und in den Halsschlagadern kleiner, und der Reiz auf die sensiblen Endorgane, der den ganzen Vorgang der Gefäßerweiterung ausgelöst hat, wird geringer. Hierdurch werden aber auch wieder die Impulse schwächer, die das Gefäßnervenzentrum hemmen, seine Erregung nimmt wiederum zu, und die peripheren Gefäße, die das Blut aus der Aorta ableiten,

verengern sich nun wieder. So erfolgt jetzt wieder ein Ansteigen des Blutdruckes, bis eine neue Gegenregulation erfolgt. Es handelt sich also in diesem Fall der Blutdruckregulierung – und auch bei vielen anderen Fällen biologischer Regelmechanismen – immer um eine Gegenregulation. Die Änderung eines Zustandes wirkt derart als Reiz, daß über bestimmte Zentren eine Gegenmaßnahme veranlaßt wird, die den Reiz wieder zu beseitigen und aufzuheben bestrebt ist.

Durch einen solchen Reglermechanismus kann begreiflicherweise der Blutdruck nie völlig genau auf einem bestimmten Niveau gehalten werden, sondern es wird stets dazu kommen müssen, daß der Druck um ein mittleres Niveau hin- und herpendelt. Wie groß die Schwankungen des Druckes um sein mittleres Niveau sind, das hängt von der Präzision dieses Regelapparates ab. Es steht zu erwarten, daß solche Balanceschwankungen um so kleinere Amplitude und Wellenlänge haben werden, je empfindlicher der rezeptive Teil des Reglerapparates ist, also je kleiner die Spannungsänderung in der Gefäßwand sein kann, auf welche die Fühler ansprechen. Außerdem wird die Genauigkeit der Einregulierung des mittleren Blutdruckniveaus davon abhängen, wie schnell jede Spannungsänderung in Erregungen umgewandelt wird, die das Gefäßnervenzentrum hemmen. Schließlich aber wird auch noch entscheidend sein die Geschwindigkeit, mit der der efferente Teil des Gefäßnervenapparates, sozusagen die Exekutive dieses Systems, reagiert. Es wird maßgeblich darauf ankommen, wie lange es braucht, bis das Gefäßnervenzentrum in der Peripherie des Blutkreislaufes eine wirksame Gegenregulation zur Wirklichkeit gemacht hat. Bei den komplizierten Wegen, welche die Erregung vom Gefäßnervenzentrum unter Passage mehrerer Umschaltestellen in die Peripherie zurückzulegen hat, wird gerade für diesen Teil des gesamten Regelvorganges eine besonders lange Zeit in Betracht kommen. Am langsamsten im Gesamtmechanismus funktioniert aber zweifellos die glatte Muskulatur in der Blutgefäßwand selbst. Erst durch diese werden die Strömungsverhältnisse im Blutkreislauf so verändert, daß die Fühler neuerdings ansprechen und eine neue Korrektur des Blutdruckes zur Auslösung bringen. Der ganze Regelapparat ist ein in sich rückgekoppeltes System und

in einem solchen wird der langsamste Teil die mögliche Höchstfrequenz bestimmen. Keinesfalls können solche Regulationen schneller erfolgen, als es der langsamste Teil des Gesamtsystems zuläßt. Niemals kann eine so regulierte Größe – in unserem Fall der Blutdruck – genau auf einem bestimmten, stets gleichen Niveau gehalten werden, sondern es muß immer dazu kommen, daß der Druck um ein mittleres Niveau hin- und herpendelt. Die fortwährenden Oszillationen des Blutdruckes, die auf solche Weise auftreten, kann man mit geeigneten Methoden bei Tier und Mensch leicht feststellen und zur Aufschrift bringen. Es sind dies Blutdruckwellen, die zwar schon lange bekannt sind, deren Deutung aber erst möglich war, nachdem dieses ganze System der Blutdruckregulierung als ein in sich geschlossener rückgekoppelter Apparat erkannt wurde. Die Wellen, die man so beobachten kann, sind also der Ausdruck einer unvollkommenen Regelwirkung des Apparates der Blutgefäßnerven. Die Erhaltung eines solchen Zustandes – wie in unserem Fall des mittleren Blutdruckes – kommt durch ein fortgesetztes Balancieren zustande und spielt sich ähnlich ab, als ob wir etwa einen Stock aufrecht auf dem Finger stehend in Balance halten wollten. Damit das labile Gleichgewicht aufrechterhalten werden kann, der Stock auf dem Finger stehen bleibt und nicht umfällt, muß man bekanntlich fortwährend Korrekturbewegungen machen und bestrebt sein, immer wieder den Unterstützungspunkt unter den Schwerpunkt zu schieben. Eine solche Balance für den Blutdruck spielt sich hier von der Geburt bis zum Tode ab und auch, wo der Blutdruck konstant bleibt, sind fortgesetzt Apparate tätig, welche ihn möglichst konstant auf einem mittleren Niveau zu halten bestrebt sind. Um ein triviales, aber anschauliches Beispiel zu bringen: auch auf völlig gerader Strecke kann man das Steuerrad eines Autos nicht feststellen, sondern man muß immer wieder Korrekturbewegungen am Steuerrad nach rechts und links machen, damit der Wagen auf gerader Strecke bleibt. Je vollkommener und präziser gesteuert wird, desto kleiner sind aber die Schwankungen während der Fahrt.

Das hier eingehender gebrachte Beispiel eines Reglermechanismus für den Blutdruck sollte uns nur das Grundsätzliche im Spiel solcher Mechanismen des lebenden Organismus zeigen.

Jeder Zustand, der konstant gehalten werden muß, damit das Leben weitergeht, hängt von dem Spiel eines derartigen Regelmechanismus ab. Und wie schon einleitend erwähnt, handelt es sich nicht nur um die Regulierung eines einzigen Zustandes im lebenden Organismus, sondern um die gleichzeitige Regelung einer großen, vorerst noch unübersichtlichen Zahl der verschiedensten Zustandsbedingungen. Es ist also nicht nur ein Regler vorhanden, sondern ein ganzes Netz von Reglern, die alle für das komplexe Geschehen des Lebens ineinandergreifen. Wenn ein einziger dieser Regelmechanismen versagt, versagen schließlich auch alle übrigen, das labile Gleichgewicht wird nicht mehr gehalten und der Tod tritt ein.

Wo bisher nur von der Einregulierung des Blutdruckes gesprochen wurde, läßt sich z. B. für den Blutkreislauf auch noch zeigen, daß wahrscheinlich eine andere wichtige Größe, nämlich das Minutenvolumen des Herzens, gleichfalls durch einen derartigen Reglermechanismus eingestellt wird. Man versteht unter Minutenvolumen die Blutmenge, die das Herz in einer Minute in die Aorta auswirft. In der Ruhe beträgt es beim Menschen ungefähr 5 Liter. Mit jedem Schlag sendet das Herz durch sensible Nerven Impulse in das Zentralnervensystem, und zwar an jene Stelle des verlängerten Markes, die unter anderem auch für die Blutdruckregulierung von Bedeutung ist. Dort ist ein Nervenzentrum vorhanden, welches durch zentrifugale Fasern die Tätigkeit des Herzens hemmen kann. Die Impulse, die bei jedem Herzschlag durch afferente sensible Nerven aus dem Herzen herauskommen und in das Zentralnervensystem einströmen, lassen sich ebenso wie jene, die der Blutdruckregulierung dienen, dadurch nachweisen, daß man die elektrischen Erscheinungen beobachtet, die bei jedem Herzschlag in diesen sensiblen Nerven des Herzens auftreten. Bei jedem Schlag erstattet sozusagen das Herz der Zentralstelle der Kreislaufregulierung im verlängerten Mark eine Meldung. Auf Grund dieser Rückmeldungen wird dann die Herztätigkeit erst einreguliert. Im Gegensatz zur früher besprochenen Art der Blutdruckregulierung, wo spannungsempfindliche Endorgane – also Kraftmesser, die nach Art von

Manometern funktionieren – in Aktion treten, scheinen aber im Herzen dehnungsempfindliche Endorgane sensibler Nerven – also Längenmesser – für die Signalgebung an die Zentralstelle von Bedeutung zu sein. Je größer die Füllung des Herzens, desto stärker ist die Dehnung seiner Wände und desto stärker sind jene Nervenimpulse, die das Herz der Zentralstelle zuschickt. Es ist wahrscheinlich, daß die Änderung des Schlagvolumens – also jener Blutmenge, die das Herz mit einem Schlag auswirft – durch diese sensiblen Nervenfasern des Herzens unter Kontrolle gehalten wird. Wird das Schlagvolumen zu groß, dann sind alle Voraussetzungen dafür gegeben, daß vom Steuerungszentrum aus der Herzschlag abgeschwächt und verlangsamt wird. Durch die Abschwächung des einzelnen Herzschlages wird das Schlagvolumen kleiner, also die Menge Blut, die mit einem einzigen Herzschlag aus der linken Herzkammer in die Aorta ausgeworfen wird. Durch die gleichzeitig erfolgende Verlangsamung des Herzschlages wird die Zahl der Herzschläge pro Minute kleiner, also die Herzfrequenz herabgesetzt. Da Schlagvolumen × Herzfrequenz gleich dem Minutenvolumen ist, wird also durch solchen Einfluß das Minutenvolumen vermindert. Die Einflußnahme auf das Herz im Sinne einer Verlangsamung und Abschwächung des Herzschlages erfolgt auf dem Wege der Herzäste des zehnten Hirnnerven. Dieser sogenannte Nervus vagus ist der Sparnerv des Herzens, und er hat die Fähigkeit, in den Elementarvorgang der Erregungsbildung und der Muskelkontraktion derart einzugreifen, daß der Energieumsatz im Herzen vermindert wird. Seine Wirkung auf das Herz erfolgt dabei nicht direkt, sondern indirekt dadurch, daß sich unter dieser Nervenwirkung ein Stoff im Herzen bildet, der den Herzschlag abschwächt und verlangsamt. Wahrscheinlich ist dieser Stoff Acetylcholin.

Auch hier, für die Beherrschung der Blutmenge, die das Herz in einer Minute auswirft, liegt offenkundig wieder ein automatisch wirksamer Regler vor. Wird das Volumen des Herzens infolge stärkerer Blutfüllung größer, dann werden die Herzwände stärker gedehnt und hierdurch dehnungsempfindliche Endorgane sensibler Nerven stärker gereizt. Hierdurch laufen im Herzhemmungszentrum stärkere Impulse ein, und dieses veranlaßt durch Äste des zehnten Hirnnerven eine Abschwächung des Herz-

schlages. So wird wieder automatisch durch ein in sich geschlossenes System bewirkt, daß das Herz sich nicht zu sehr bei seiner Arbeit verausgabt. Auch der hier aufgezeigte Mechanismus ist ein Apparat für sich, ein durch Rückkoppelung in sich geschlossenes Reglersystem.

Obwohl sich dieser Mechanismus von dem früher beschriebenen der Blutdruckregulierung deutlich in anatomischer und funktioneller Hinsicht abgrenzen läßt, hängen trotzdem diese beiden Mechanismen innig zusammen. Auf der einen Seite wird der Blutdruck, den das Herz erzeugt, unter Kontrolle gehalten, auf der anderen Seite das Auswurfvolumen des Herzens. Wo beide Größen aber gleichzeitig für Herz- und Kreislaufregulierung verwertet werden und die beiden Apparate, so wie tatsächlich der Fall, zusammenspielen, bedeutet dies, daß unser Herz und Blutkreislauf wahrscheinlich unter Kontrolle der mechanischen Herzarbeit einreguliert werden. Wir haben also wahrscheinlich eine Art Leistungsmesser in unserem Kreislauf eingebaut – eine Art Wattmesser wie in einem Elektrizitätswerk – der unter fortwährender Beobachtung der Herzarbeit den Kreislauf reguliert. Mechanismen der Druckmessung und Volummessung, die zwei getrennten Systemen angehören, greifen hier im Interesse einer übergeordneten Regulierung ineinander. Dabei liegen diese beiden Regelmechanismen, der eine für den Blutdruck, der andere für das Herzschlagvolumen, sozusagen in einer Ebene der Korrelation, sie sind einander gleichwertig und einer ist dem anderen beigeordnet. Es gibt im Organismus aber auch Regelapparate, die einander übergeordnet sind.

Wenn bereits früher für das Prinzip der Blutdruckregulierung nebenbei darauf hingewiesen wurde, daß es sich dabei um eine instanzenmäßige Ordnung verschiedener Nervenzentren handelt, die der Regulierung dienen, derart, daß die subalternste Instanz in den Gefäßwänden selbst, die nächst höhere im Rückenmark und die höchste, das souveräne Gefäßnervenzentrum, in dem verlängerten Mark, in der Medulla oblongata, gelegen ist, dann muß jetzt noch bemerkt werden, daß ganz allgemein eine solche Ordnung nach Instanzen für die Regelvorgänge im lebenden

Körper eine Rolle zu spielen scheint. Es ist nicht ohne Belang für das Verständnis zentral nervöser Korrelationen, wie sie der automatischen Regelung solcher Vorgänge dienen, sich zu fragen, welches ordnende Prinzip die Über- bzw. Unterordnung solcher Nervenzentren beherrscht. Für animalische Funktionen, für die Über- und Unterordnung motorischer Nervenzentren, die z. B. das Zusammenspiel der Skelettmuskeln regulieren, kann man häufig feststellen, daß ein Nervenzentrum im Gesamtverband um so höher steht, je geringer die Wahrscheinlichkeit für das Vorkommen jener koordinativen Leistung ist, die es erfüllt. Häufig vorkommende, schablonenhaft zu lösende Aufgaben werden von untergeordneten Zentren verrichtet. Für solche ist der Automatismus eines einfachen Regelapparates meist leicht erkennbar. Seltenere Aufgaben, für deren Vorkommen im Organismus (beziehungsweise in der Wechselwirkung von Organismus und Umwelt) ein geringerer Grad von Wahrscheinlichkeit besteht, bleiben höheren Nervenzentren vorbehalten. Zum Beispiel ist für motorische Funktionen, deren Vorkommen den geringsten Grad der Wahrscheinlichkeit besitzt, als höchste Instanz die Großhirnrinde selbst zuständig.

Ein Beispiel möge dies zeigen: wenn wir eine neue motorische Funktion erlernen, z. B. Radfahren oder Tanzen, dann muß man zuerst, wo man diese Betätigung noch nie erlebt hat, mit dem Bewußtsein bei solcher Tätigkeit sein. Solange diese Betätigung neu ist und selten, solange also noch ein geringer Wahrscheinlichkeitsgrad für das Vorkommen dieser koordinativen Leistung besteht, muß die höchste Instanz des Nervensymstems, nämlich die Großhirnrinde, solchen Vorgang selbst regulieren. Wir müssen jeden Vorgang bewußt in uns aufnehmen, etwa beim Tanzen jeden Schritt lernen. Durch Wiederholung – durch Übung – wird diese besondere Art der Beanspruchung nervöser Regulationszentren immer wahrscheinlicher. Die Funktionen, wie solche zuerst nur die Großhirnrinde bewußt durchführen kann, werden automatisiert und nach tieferen Zentren hin verlagert. So macht sich die höchste Instanz, die Großhirnrinde vom wahrscheinlich Gewordenen, vom Alltäglichen und Trivialen wieder frei und steht den seltenen und sensationellen Beanspruchungen zur Verfügung. Wenn man nach genügender Übung Radfahren oder

Tanzen kann, dann sind diese Vorgänge so weitgehend automatisch geworden, daß man bei solchen Arten motorischer Betätigung das Bewußtsein in bekannter Weise für andere Erlebnisse wieder frei hat. Die alltägliche Bewegung bei der Lokomotion von Tier und Mensch, etwa die Gehbewegung, braucht vom Großhirn her nur intendiert und angeregt zu werden. Wo sie einmal in Gang gekommen ist, geht sie automatisch weiter und wird zum großen Teil durch Automatismen bewirkt, die im Rückenmark liegen, also sehr untergeordneten nervösen Instanzen entsprechen. So läßt sich leicht zeigen, daß z. B. eine Katze, der man das Gehirn ausgeschaltet hat, durch einen Saal noch genau so hindurchlaufen kann, als ob sie dies willkürlich und mit Bewußtsein täte. Am Gang ist kaum ein Unterschied gegenüber einer normalen Katze zu erkennen, da die Automatismen und Bewegungsschablonen des Rückenmarks von sich aus die Bewegungsvorgänge ebenso regulieren wie sonst auch.

Auch für die Über- und Unterordnung jener bei automatischer Regelung im Inneren des Organismus zuständiger Nervenzentren scheint das hier skizzierte Ordnungsprinzip seine Bedeutung zu haben, mag es sich dabei auch um die Regelung vegetativer Funktionen handeln. Ein weiteres ordnendes Prinzip für die rangmäßige Einstufung von Korrelationsstellen, die der Regelung lebenswichtiger Vorgänge dienen, scheint auch noch die Geschwindigkeit der Erregungsbildung in solchen Zentren zu sein – also die Schnelligkeit, mit der sie auf einlaufende Impulse aus Fühlern reagieren. Wo es sich z. B. für das Zustandekommen des Herzschlages um ein automatisch tätiges System im Herzen selbst handelt, kann man beobachten, daß der Erregungsrhythmus, also die Häufigkeit, mit der sich der automatische Vorgang abspielt, in der übergeordneten Stelle am größten ist. Diese übergeordnete Stelle im Herzen, welche jeden Herzschlag automatisch auslöst, der sogenannten Schrittmacher des Herzens, ist der Keith-Flaksche Knoten. Eine untergeordnete Stelle im Herzen, die aber auch eine Automatie eventuell hervorrufen kann, der sogenannte Tawarasche Knoten, ist langsamer in seiner Erregungsbildung. Ein untergeordnetes Zentrum für automatische Regulationen kommt meist deshalb nicht zu selb-

ständiger Regelung und Automatie, weil die Impulse von oben her – von der übergeordneten Stelle – schneller eintreffen, als es seiner eigenen Geschwindigkeit automatischer Erregungsbildung entspricht. Ehe es in Selbsterregung gerät, wird es bereits von oben her, von übergeordneter Stelle, durch Impulse getroffen und durch einen Befehl in Miterregung versetzt. Es wird von der höheren Stelle, die schneller funktioniert, gleichsam überspielt und kommt gar nicht zu automatischem Handeln. Schließlich kann man noch feststellen, daß je höher eine Stelle zur Regulierung von Vorgängen steht, desto größer jenes Gebiet im Organismus ist, das sie beherrscht.

Soweit Regulationen von subalternen Stellen durchgeführt werden, ist die Automatie des Vorganges im Sinne eines Regelmechanismus meist leicht zu durchschauen und als Zwangsläufigkeit erkennbar. Je höher aber das Nervenzentrum steht, das auf Grund eintreffender Impulse regulatorisch wirkt, desto schwieriger ist die Automatie des Vorganges zu erkennen.

Jedenfalls scheinen drei biologisch wichtige Prinzipien im Vordergrund zu stehen, wo es sich im Organismus um instanzenmäßige Über- und Unterordnung von Korrelationssystemen handelt, die der Regulierung eines Vorganges oder der Aufrechterhaltung eines Zustandes dienen. Gegenüber der subalternen Stelle hat die übergeordnete Stelle erstens einen größeren Wirkungsbereich, zweitens regelt sie Vorgänge, für deren Vorkommen ein kleinerer Wahrscheinlichkeitsgrad besteht, und drittens reagiert sie meist schneller als die untergeordnete Stelle.

Wir haben also im Organismus nicht nur Regelvorgänge, die sozusagen auf einer Ebene nebeneinander ablaufend ineinandergreifen, sondern auch solche, die einander über- bzw. untergeordnet sind.

Es würde hier viel zu weit führen, wollte man die Fülle derartiger Regulationen in unserem Organismus aufzeigen, die alle gleichzeitig funktionieren müssen, um die große Zahl jener Zustandsbedingungen konstant zu halten, die für den Bestand des Lebens erfüllt sein müssen. Ob es der Kohlensäuregehalt des Blutes und der Gewebe, die Wasserstoffionenkonzentration, der Salzgehalt, der Zuckergehalt, die Körpertemperatur oder sonst eine andere wichtige Größe ist, stets finden wir für die

Aufrechterhaltung des jeweiligen Zustandes ein grundsätzlich ähnliches Prinzip in Anwendung gebracht, wie es hier beschrieben wurde. Ja selbst für die Funktion einzelner Organe, die eine Spezialaufgabe erfüllen, finden wir dasselbe Prinzip automatischer Regelung. Zum Beispiel läßt sich das Pupillenspiel in unserem Auge unter solchem Gesichtspunkt betrachten. Es erfüllt bekanntlich die Aufgabe, unabhängig von der Lichtstärke, die von außen her in das Auge fällt, eine möglichste Konstanz der Netzhautbelichtung zu erreichen. Das Gleichgewichtsorgan, der sogenannte Vestibularapparat, welcher uns die Möglichkeit gibt, unsere Körperlage gegenüber einwirkenden Störungen im Schwerfeld aufrechtzuerhalten, funktioniert auch nach Art eines automatischen Reglers. Und schließlich sogar bei der Einstellung unserer Muskelkraft spielen solche Automatismen, die durch rückgekoppelte Systeme zustande kommen, eine entscheidende Rolle. Also selbst einzelne Organe verdanken ihre Funktionstüchtigkeit diesem Prinzip einer solchen Automatisierung.

Automatismen können mit Hilfe von „Regelungen" und mit Hilfe von „Steuerungen" erzielt werden. Einer, von den Technikern getroffenen Konvention nach, ist der Begriff „Regelung" dann zutreffend, wenn das zu regelnde System und der Regler einen in sich geschlossenen Kreis darstellen. Es soll eine bestimmte Größe – die Regelgröße – durch eine Einrichtung, die man in der Technik als „Fühler" bezeichnet (und die auch von uns bisher so bezeichnet wurde), über ein die „Kräfte beherrschendes Zentrum" durch ein sogenanntes „Regelglied" konstant eingestellt werden. Den Wert, auf den die zu regelnde Größe eingestellt werden soll, heißt man den „Sollwert". In dem früher herausgegriffenen Beispiel der Blutdruckregulierung entspricht der Regelgröße der Blutdruck, und der Sollwert ist der konstant zu haltende „mittlere Blutdruck". Das Gebiet, in dem er konstant gehalten werden soll, in der Technik die „Regelstrecke" genannt, entspricht dem Windkessel der Aorta und den großen Arterien. Dem Fühler, den auch der Techniker bei allen solchen Reglern verwenden muß, entsprechen im Blutkreislauf spannungs- oder dehnungsempfindliche Endorgane sensibler afferenter Nerven, die in die Blutgefäßwände an bestimmten Stellen eingebaut sind und die so, wie schon beschrieben, nach Art von

Manometern funktionieren. Die entstandenen Erregungen werden in das „kräftebeherrschende Zentrum" geleitet und dort für die Kräfteregulierung wirksam. Im Falle des biologischen Geschehens der Blutdruckregulierung ist dies das Gefäßnervenzentrum in dem verlängerten Mark. Dieses wirkt durch die wechselnde Stärke seiner zentrifugal laufenden nervösen Impulse auf das sogenannte „Regelglied", in unserem Falle die glatte Muskulatur in der Wand der Blutgefäße. Werden die Blutgefäßmuskeln stärker innerviert, dann werden die Röhren der Blutgefäße enger, der periphere Strömungswiderstand wird größer und der Blutdruck steigt. Bei Abschwächung der Innervierung tritt das Gegenteil ein und der Blutdruck – die Regelgröße – wird kleiner.

Man kann bei genauerer Betrachtung überhaupt nicht feststellen, daß zwischen diesen biologisch so wichtigen Regelmechanismen, wie sie im Organismus der Lebenserhaltung dienen, in bezug auf die Prinzipien ihrer Funktion ein Unterschied besteht gegenüber jenen, die der Techniker zur Einregulierung der verschiedensten Größen verwendet. Weder in bezug auf ihre Funktion noch in bezug auf die Teile, aus denen sie sich zusammensetzen, ist ein grundsätzlicher Unterschied zu finden. Ob in der Technik mechanische Größen geregelt werden, wie Drehzahlen, Druck, Durchflußmengen, Geschwindigkeiten, Spannungen usw., oder elektrische Größen, wie Frequenzen, Leistungen, Phasenwinkel, elektr. Spannungen oder Stromstärken, oder thermische Größen in Brutschränken, Industrieöfen, Kühlschränken usw., stets finden wir dasselbe Prinzip realisiert, das auch die lebende Natur zur Aufrechterhaltung des Lebens im Organismus angewendet hat. Das Wesentliche ist hierbei, daß solcher Mechanismus in einem geschlossenen Kreis stets wieder auf sich selbst zurückwirkt. Mit anderen Worten könnte man auch sagen, diese Einrichtungen sind so beschaffen, daß von dem Energiestrom, der durch das System hindurchgeht, ein sehr kleiner Teil abgezweigt und zur Regulierung dieses Energiestromes verwendet wird.

Alle Betrachtungen, die in Physik und Technik auf Regler angewendet werden, scheinen grundsätzlich auch auf diese Einregulierung der Lebensbedingungen im Organismus anwendbar zu sein. Auch dieselben mathematischen Behandlungsmethoden

für solche Systeme sind hier in Betracht zu ziehen. Für den Biologen und Physiologen besteht nur die große Schwierigkeit, daß er – nachdem erst vor kurzem das Wesen dieser Einrichtungen in unserem Körper als Regler-Mechanismen erkannt wurde – noch weit davon entfernt ist, die Apparatkonstanten dieser Mechanismen soweit quantitativ in Erfahrung zu bringen, daß an eine exakte Behandlung dieser Problemseite des Lebens womöglich mit mathematischen Hilfsmitteln herangetreten werden kann. Wenn man im Sinne eines Experimentes irgendeinen Eingriff im lebenden Organismus vornimmt, um eine wichtige Größe quantitativ zu bestimmen, dann werden eben durch diesen Eingriff selbst andere Reglermechanismen, die man unangetastet lassen möchte, nebenbei gestört. Bei der gegenseitigen Wechselwirkung all dieser Apparate wird hierdurch auch jene Größe in oft unkontrollierbarer Weise beeinflußt, zu deren Messung man den Eingriff vorgenommen hat. In dem Maße aber, als es gelingen wird, quantitative Zusammenhänge für diese Vorgänge kennenzulernen, darf man erwarten, daß eines der intimsten Geheimnisse des Lebens einer Aufklärung näher gebracht wird. Für manche Vorgänge, die im Organismus geregelt werden, ist es schwierig oder bisher noch nicht möglich gewesen, die völlige Geschlossenheit jenes Kreises aufzuzeigen, die den Automatismus solcher Systeme dem Verständnis näher bringt. Je weiter wir aber unsere Kenntnis der Lebensvorgänge vertiefen, desto mehr scheinen sie uns nach Gesichtspunkten behandelnswert, die ganz allgemein für Reglermechanismen – so wie hier für die Blutdruckregulierung beschrieben – ihre Gültigkeit haben.

Man muß sich fragen, bei welcher kleinsten lebenden Einheit setzt dieses auf automatische Regelung gerichtete Organisationsprinzip ein und wann ist es erstmals aufgetreten? Es ist sehr wahrscheinlich, daß bereits im lebenden Protoplasma der einzelnen Zelle solche Automatismen eine Rolle spielen, die eine Konstanz der Lebensbedingungen aufrechtzuerhalten trachten. Wahrscheinlich darf man sagen: *dort, wo der erste Regelvorgang eingesetzt hat, war das erste Leben.* Nur unter Anwendung solcher Mechanismen, die über einen in sich geschlossenen Kreis zur Selbsterregung und schließlich Selbststeuerung führen, kann man sich eine Belebung vorher unbelebter Materie vorstellen.

Wenn nach der antiken Sage Prometheus den Göttern das Feuer stehlen mußte, um seine aus Erde geformten unbelebten Leiber zu beleben, dann will es scheinen, als ob die alten Griechen sich bereits ähnliche Gedanken gemacht haben wie wir, wenn wir vor der Frage stehen, wie der erste Mechanismus der Selbsterregung und Selbststeuerung im lebenden Organismus zustande gekommen ist. Das Feuer ist das primitive Beispiel eines Urvorganges mit Selbsterregung, wenn man bedenkt, daß die hohe Temperatur, die bei der Verbrennung entsteht, die Voraussetzung dafür gibt, daß immer weitere Substanz in den Verbrennungsprozeß einbezogen und angezündet wird. Es ist eine Kettenreaktion, die lawinenartig in Gang kommt. Auch für die lebende Materie finden wir einen ähnlichen Vorgang und eine deutliche Tendenz, dem Maximum eines Energieumsatzes zuzustreben und wenn möglich immer mehr unbelebte Materie in den Lebensprozeß einzubeziehen. Nur durch die Beschränkung, welche der Nährboden auferlegt und erzwingt, wird solchem uferlosen Streben eine Grenze gesetzt. Man denke hier an den bekannten Versuch einer Fortzüchtung der Herzmuskelzellen von Hühnerembryonen, die sich in der Nährlösung durch Teilung immer weiter vermehren. Hätte man in den ungefähr 2 Dezennien, wo sie fortgeimpft wurden und sich vermehrt haben, genügend Nährboden zur Verfügung gehabt, dann hätte die Masse ihrer lebenden Substanz unterdessen die Masse der Sonne erreicht. Diese Prozesse der Selbsterregung des Lebenden hängen aber mit den Vorgängen der Selbststeuerung und Automatie innig zusammen.

Es ist auch sehr bemerkenswert, daß der Mensch mit fortschreitender Technik in die unbelebte Natur ein Organisationsprinzip hineinträgt, wie es im Innern eines Organismus bereits längst vorhanden ist und wie es für dessen Bestand eine unerläßliche Voraussetzung bildet. Aus der Absicht zu automatisieren, aus dem Wunsch z. B. bei der Güterproduktion usw. vitale Leistung zu ersparen, wurden die Regelmechanismen in der unbelebten Natur vom Techniker in Anwendung gebracht. Hierbei kann man aber bestimmt nicht sagen, daß der Techniker die Anregung, solche Automatismen zu schaffen, aus biologischen Vorbildern erhalten hat. Zweifellos sind die Regelapparate im lebenden Organismus weitaus die älteren und sie waren bereits

vorhanden, ehe ein Menschenhirn Gedanken in solcher Richtung fassen konnte. Die Techniker haben dieses lebensbeherrschende Organisationsprinzip in Anwendung gebracht, ohne die biologischen Vorbilder zu kennen, und erst nachdem die Techniker ihre Einrichtungen geschaffen hatten, wurde eine Deutung wichtiger Lebensvorgänge unter solchem Gesichtspunkt eingehender in Betracht gezogen. Es wurden unbewußt Modelle bestimmter Lebensvorgänge geschaffen, und erst das Studium dieser Modelle hat strengere Gesetzmäßigkeiten aufgedeckt, die grundsätzlich auch für den Organismus Gültigkeit zu haben scheinen. Daß der Techniker hier dem Biologen und Physiologen wesentlich voraneilen konnte, dürfte wohl seine hauptsächliche Ursache darin haben, daß er in der Lage war, schon frühzeitig durch quantitative Untersuchungen Gesetzmäßigkeiten aufzudecken, wo dem Biologen solches aus Gründen der Methodik unmöglich war. Jeder Eingriff im lebenden Organismus ändert, wie schon erwähnt, nicht nur die Größe, die man im Sinne eines Experimentes ändern will, sondern er ändert meist noch eine ganze Reihe anderer Faktoren nebenbei. Hierdurch wird es aber schwierig, ja oft unmöglich, die Beziehungen zwischen einer unabhängigen Variablen und einer abhängigen Variablen so exakt quantitativ in Erfahrung zu bringen, wie der Physiker in der unbelebten Natur solches kann. Solange aber eine eingehende Kenntnis der quantitativen Zusammenhänge nicht erreicht ist, und wir die Konstanten der biologisch wichtigen Regler nicht so genau kennen, wie der Techniker die Konstanten und Eigenschaften seiner Apparate, sind wir nicht in der Lage, mit jenem geistigen Rüstzeug und jenen Denkmethoden an diese Probleme des Lebens heranzutreten, wie sie dem Physiker und Techniker die Mathematik liefert. Es wird darauf ankommen, jene Untersuchungsmethoden immer weiter auszubauen, welche es gestatten, exakte quantitative Bestimmungen im lebenden Organismus vorzunehmen und eine strengere funktionelle Abhängigkeit dieser Größen voneinander in Erfahrung zu bringen. Wo solches gelingt, wird man wahrscheinlich den Schlüssel zur Erschließung derart wichtiger Geheimnisse des Lebens in die Hand bekommen, wie es z. B. die Regulationen im lebenden Organismus sind.