

## ZUM PROBLEM DER REGULATION.

Von

WOLFGANG KÖHLER.

(Eingegangen am 8. Juli 1927.)

Je reicher unsere Erfahrungen über „Regulation“ im Organischen werden, desto deutlicher nähert sich die biologische Theoriebildung einer entscheidenden Wendung. Mit Problemen der *Morphogenese* ist nur eine relativ geringe Zahl von Forschern beschäftigt; deshalb haben die Regulationen, die nach Störung der normalen Entwicklung von Keimen beobachtet werden und auf anomalem Wege zum normalen Endergebnis führen, nicht ganz die theoretische Wirkung gehabt, die ihnen zugekommen wäre. Aber wir überzeugen uns immer mehr, daß auch die Funktionen des ausgebildeten Organismus der Regulation in viel höherem Maße fähig sind, als unter dem Einfluß einseitig gerichteter Denkweise früher bekannt werden konnte. So zeigen die Versuche von BETHE<sup>1</sup> aufs klarste neuen Funktionsverlauf in den übrig bleibenden Teilen eines Organismus, wenn eine Störung einzelne Organe von der Funktion ausschaltet; und wieder ist das Ergebnis solcher Regulation, daß für den ganzen Organismus im wesentlichen und nach Möglichkeit dasselbe erreicht wird wie unter normalen Bedingungen. Das aber ist *Physiologie* und betrifft also ein gewaltiges Gebiet menschlicher Erkenntnisbetätigung. Die Folgen können nicht ausbleiben.

Eines wird allmählich fast von allen Seiten anerkannt werden müssen: Solche Tatsachen sind nicht mehr durch besondere Gesichtspunkte nur für den Fall und die Umstände der betreffenden Regulationen zu behandeln. Wir haben ohne Zweifel zukünftig auch die *normale* Funktion prinzipiell so aufzufassen, daß die Theorie für sie unter den Bedingungen einer Störung ohne weiteres in die Theorie eben der Regulation übergehen kann. Das bedeutet also, daß wir für die Theorie der normalen Funktion in Morphogenese und Physiologie nach neuen Grundlagen suchen müssen.

Das einzige wirklich klare Bild, nachdem wir uns normale Morphogenese und normale physiologische Funktion in ihrer meist erstaunlichen Ordnung und Angemessenheit deuten konnten, ist bisher die Maschinenvorstellung gewesen. Und damit meine ich ganz strikt Erklärungen, die die Ordnung des Geschehens auf entsprechend ordentliche Anlage von festen Einrichtungen (in Keimen und im entwickelten Organismus) zurückführen. Wir sind von der Technik an Systeme gewöhnt, die durch

---

<sup>1</sup> Vgl. z. B. Arch. f. Psychiatrie u. Nervenkrankh. 76, 81 ff.

festen Bedingungen, Verbindungen, Bahnen usw. die Dynamik der Naturkräfte so einschränken und festlegen, daß ein bestimmter ordentlicher Verlauf erzwungen wird; und seit den Anfängen der europäischen Wissenschaft hat man immer wieder versucht, auch in der freien Natur mit solchen Ideen zu operieren, wo zuerst auffallende Ordnung des Geschehens bemerkt wurde. Noch heute ist die Biologie ganz erfüllt von ihnen, und zweifellos enthalten sie vielfach Richtiges; aber als *grundlegend* können sie nicht mehr angesehen werden, nachdem die Regulationsfähigkeit organischen Geschehens sich als so universell erwiesen hat. Wenn die maschinellen Einrichtungen so fest sind, daß sie wirklich durch ihre Festigkeit die normale Ordnung der Funktion garantieren, dann schließen sie damit auch funktionelle Umgruppierung aus. Und wer sollte sie jeweils schnell so umbilden, wer neue Einrichtungen jedesmal so schaffen, daß gerade im ganzen wieder das Rechte herauskommt?

Hier hat der Streit zwischen Vitalismus und mechanistischer Denkweise eingesetzt: Die Mechanisten pflegen ungeduldig einen oder den anderen speziellen Fall von Verhalten anorganischer Systeme anzuführen, der doch in irgendeinem Zug beinahe wie das Verhalten von Organismen wirke. Niemandem ist damit recht gedient. Denn wir sind nicht an gewissermaßen zufälligen Ähnlichkeiten interessiert, sondern wollen prinzipiell verstehen, unter welchen Umständen und kraft welcher ihrer Grundeigenschaften anorganische Systeme die Verhaltensweise von organischen zeigen und zeigen müssen — falls es so etwas gibt. — Die Vitalisten sind andererseits der Regel nach nur auf die Totalfrage nach der Autonomie des Lebenden gerichtet. So liegt auch ihnen nicht gerade eine ruhige und unparteiische Untersuchung der anorganischen Systeme hinsichtlich der verschiedenen Funktionen und Verhaltenstypen, die bei ihnen vorkommen und sich hier und da in verschiedenen Graden organischem Verhalten nähern. Eine solche *Systemlehre* aber scheint allein aus dem gegenwärtigen Zustande herausführen zu können, in welchem beide Parteien wie im Dunklen miteinander kämpfen. Wenn man erst weiß, welche Seite von Naturgeschehen prinzipiell und verstandenerweise eine Annäherung an organische Verhältnisse bedeutet, dann wird man auch eher einsehen können, ob es ein Höchstmaß der betreffenden Systembeschaffenheit im Anorganischen gibt, das den Übergang zu organischem Verhalten notwendig ausschließt. Eine solche Systemlehre sollte also dasselbe Interesse bei Vitalisten wie bei Mechanisten finden, wiewohl sie nicht nach Lebenserscheinungen sucht, die die Autonomie beweisen sollen, sondern umgekehrt aus einer Übersicht über vorkommendes Systemverhalten im Anorganischen dessen positive Möglichkeiten und daher verständliche Grenzen ermitteln möchte. Das Bedürfnis nach derartiger Untersuchung wird wohl sehr allgemein gefühlt, auch fehlt es — z. B. bei ROUX und DRIESCH — nicht an Ansätzen zur

wirklichen Ausführung; aber nichts kann deutlicher zeigen, wieviel zu tun bleibt, als die gegenwärtige Ratlosigkeit gegenüber physiologischen Regulationen wie denen der BETHESchen Versuche. Diese deuten „auf eine Zielstrebigkeit hin, für welche eine der naturwissenschaftlichen Denkungsart sympathische Erklärung zunächst noch unauffindbar erscheint“<sup>1</sup>. So steht es: Die Maschinenvorstellungen werden hier unhaltbar, und nun sind wir zu wenig an prinzipielle Betrachtung der möglichen Verhaltensweisen von anorganischen Systemen gewöhnt, als daß wir sogleich wüßten, was etwa an ihre Stelle treten könnte. Das folgende ist ein Versuch, wenigstens in einem Punkte die Systemlehre vorzubereiten, die mit der Zeit immer unentbehrlicher werden wird. Nach dem Gesagten soll es sich dabei also nicht um eine positive Theorie der organischen Regulation handeln; es sollen nur die allgemeinen Prinzipien anorganischen Geschehens aufgesucht werden, die überhaupt in Betracht kommen können, wenn es sich um das Verständnis von Regulationsvorgängen handelt<sup>2</sup>.

Das Regulationsproblem betrifft die *Richtung* von Naturvorgängen. Es ist ein Prinzip zu suchen, nach dem Systeme unter sehr mannigfachen Bedingungen ebenso mannigfache Verläufe durchmachen, die im ganzen und im Endergebnis doch stets in dieselben oder wesentlich dieselben Gesamtzustände und Gesamtvorgänge einmünden, wie sie „ohne Störung“ erreicht worden wären. Absichtlich ist bei dieser Formulierung kein Unterschied zwischen normalem und regulatorischem Verlauf gemacht, da ja das gesuchte Prinzip den Normalfall auf die gleiche Art aus den normalen Bedingungen ergeben muß wie die Regulationen aus ungewöhnlichen Bedingungen. Deshalb braucht auch zunächst nicht mehr von „Störungen“ gesprochen zu werden. Denn auch dieser Begriff setzt noch einen als normal ausgezeichneten Verlaufsbeginn voraus, nach welchem erst die abnormen Bedingungen einer Störung eingeführt werden. Für die Zwecke unserer Betrachtung kann (bei Regulation) der Zustand nach einer Störung einfach als einer unter den vielen Anfangszuständen behandelt werden, von denen aus ein System sich merkwürdigerweise stets auf möglichst ein und denselben Endzustand hin verändert.

Was wissen wir überhaupt von der Richtung, die Systemveränderungen im Anorganischen nehmen? Gegenwärtig ist die Physik geneigt, nur *ein* Prinzip innerhalb ihres Bereiches als eine Aussage über die Richtung von Systemveränderungen anzusehen, nämlich den zweiten Hauptsatz in seinen verschiedenen Formen. Die allgemeinste Fassung dieses

<sup>1</sup> A. a. O. S. 83.

<sup>2</sup> Diese Aufgabe fällt teilweise zusammen mit der anderen, die Entstehungsart der zeitunabhängigen Zustände anzugeben, die wegen ihrer Gestalteigenschaften früher von mir behandelt wurden.

Satzes, welche für Verläufe in Bereichen konstanter Gesamtenergie gilt, hat ja die Form einer *Ungleichung* für zwei in der Zeit unmittelbar aufeinanderfolgende Systemzustände:

$$S_2 > S_1$$

(d. h. die Entropie des geschlossenen Systems im ganzen wächst während der Systemveränderungen) und gibt schon dadurch zu erkennen, daß es sich um einen Richtungssatz handelt. Wenn die Entropie unter den gegebenen Bedingungen nicht weiter wachsen kann, muß offenbar Gleichgewicht erreicht sein, und so definiert der zweite Hauptsatz zugleich ausgezeichnete Endzustände von Systemen. Aber wenn er wirklich das einzige Richtungsprinzip wäre, das in der anorganischen Natur gilt, dann bestände von vornherein wenig Aussicht, die Richtung organischer Vorgänge nach physikalischen Prinzipien zu verstehen. Denn das Prinzip der Entropievermehrung bedeutet ja Richtung auf „Einebnung“, Homogenität, und scheint deshalb eher von spezifischer Formung fortals zu ihr hinzuführen. Die statistische Theorie des zweiten Hauptsatzes (BOLTZMANN) ist nur geeignet, diesen Eindruck zu verstärken.

Wie dem auch sein mag, auch im Anorganischen ist nicht alles über die Richtung von Systemveränderungen gesagt, solange man nur von denjenigen Faktoren spricht, auf denen Entropievermehrung beruht. Wenn wir also nicht mit zu engen Vorstellungen operieren wollen, wird eine Betrachtung des bisher Fehlenden erforderlich.

Es ist richtig, daß ein Gleichgewicht in physischen Systemen nur erreicht wird, insofern in ihnen Entropievermehrung bis zum Maximum stattfindet. Aber der spezifische Systemzustand, in dem das Gleichgewicht besteht, ist ja dann allein vom zweiten Hauptsatz her gar nicht zu begreifen, wenn es sich um ein Gleichgewicht auch nach *dynamischen* Grundprinzipien handelt<sup>1</sup>. Das Gleichgewicht elektrischer Ladungen auf einem Leiter ist bei der ganz spezifischen Ladungsverteilung erreicht, in welcher jeder im Innern oder tangentiell an der Oberfläche angreifende Vektor gegen andere im ganzen ausbalanciert ist. Hier liegt also ein Gleichgewicht von Faktoren vor, von denen in der Theorie rein statistisch bestimmten Geschehens überhaupt nicht die Rede ist. Reine Statistik allein würde niemals die an sich „unwahrscheinliche“ Verteilung aller freien Elektrizität auf der Leiteroberfläche verständlich machen. Wenn die Entropievermehrung (JOULESche Wärme usw.) eine notwendige Voraussetzung dafür ist, daß so ein Gleichgewicht überhaupt erreicht wird und bestehen bleibt, so ist sie doch ganz ungeeignet, gerade jene spezifische Verteilung sich im ganzen aufhebender Vektoren im Gleichgewicht begreifen zu lassen. Und was in diesem Falle gilt, bleibt überall richtig, wo dynamische Faktoren sich im Gleichgewicht die Wage halten. Die Entropie-

<sup>1</sup> Die Unterscheidung von dynamischer und statistischer Gesetzmäßigkeit wie in PLANCKES Berliner Rektoratsrede von 1914.

vermehrung ist *notwendig* für zeitunabhängiges Gleichgewicht; denn ohne sie würden die im Leiter verlaufenden Ströme infolge von Selbstinduktion nie in den zeitunabhängigen Zustand einmünden, sondern selbst bei momentaner gegenseitiger Aufhebung aller dynamischen Vektore in der betreffenden Verteilung durch diese, also durch den Gleichgewichtszustand, hindurchpendeln. Aber daß gerade diese Lagerung von Ladung und dynamischen Vektoren sich im ganzen aufrecht erhält (wenn keine makroskopischen Ströme mehr vorhanden sind), davon besagt der zweite Hauptsatz an und für sich gar nichts. Er allein kann es also auch nicht verständlich machen, daß nach allen Ladungs- und Vektorverteilungen, die der Leiter zunächst durchmacht, zum Abschluß sicherlich diejenige auftritt, bei der die dynamischen Vektoren sich gegenseitig aufheben. Wie kommt es, daß stets gerade ein solcher Systemzustand vorkommt und infolge Entropievermehrung stabilisiert wird, der Gleichgewicht in noch einem anderen Sinn ist als dem des zweiten Hauptsatzes? Das ist doch zweifellos ein ausgezeichneter Zustand, eine ganz besondere Verteilung. Gibt es im dynamischen Hergang, abgesehen vom zweiten Hauptsatz, eine Richtung auf solche Verteilung?

Diese Fragen klingen etwas merkwürdig für den Physiker, da bekanntlich Systemverschiebungen, die nicht dem zweiten Hauptsatz folgen, also keine Entropievermehrung zeigen, als „reversibel“ bezeichnet werden. Denkt man sich in irgendeinem Zustand, bei irgendeiner Gruppierung der Systemteile, den gerade vorhandenen Geschwindigkeiten die umgekehrte Richtung gegeben, so würde ja auch der weitere Verlauf der Systemverschiebung mit derselben Notwendigkeit in umgekehrter Richtung vor sich gehen, mit der er sonst die ursprüngliche Richtung innegehalten hätte. Es scheint also wirklich nichts in rein dynamisch bestimmtem Verhalten von Systemen zu liegen, daß eine Verlaufsrichtung auch nur vor ihrem Gegenteil auszeichnete.

So finden wir uns in einer paradoxen Lage: Die Tatsache, daß in Fällen wie den oben besprochenen stets Verteilungen ausbalancierter dynamischer Vektoren erreicht werden, und daß gerade dafür der zweite Hauptsatz nicht verantwortlich gemacht werden kann, verlangt Anerkennung eines Richtungsprinzipes auch für reine Dynamik. Daß rein dynamisches Geschehen allgemein die Eigenschaft der Reversibilität zeigt, scheint es andererseits wieder unmöglich zu machen, daß man ihm eine bestimmte Richtung zuschreibt.

Dieser Widerspruch kann nur aufgeklärt werden, wenn man zunächst gerade Systemveränderungen ganz ohne Entropievermehrung betrachtet, und den zweiten Hauptsatz erst wieder hinzuzieht, nachdem klar geworden ist, ob für Vorgänge ohne Entropievermehrung trotz ihrer Reversibilität ein Richtungsprinzip gilt oder nicht.

So etwas ist behauptet worden, wenn man z. B. sagte, daß ein schwe-

rer Körper von selbst ganz ebenso stets *fallen* und nicht aufsteige, wie nach dem zweiten Hauptsatz zwei aneinander grenzende Mengen verschiedener Gase ineinander diffundieren, wenn man sie sich selbst überläßt. Auf diese Weise wurde versucht, eben dem zweiten Hauptsatz eine allgemeinere Formulierung zu geben, die dynamisches Geschehen mitumfassen und so auch diesem eine natürliche Richtung zuschreiben sollte. Aber wenn der Körper z. B. Pendelgewicht ist, so zeigt sich ja, daß er ebensowohl steigen wie fallen kann, und das ohne jeden systemfremden Einfluß. Die Analogie mit der Diffusion, die stets eine bestimmte Richtung hat, ist also nicht vorhanden; der zweite Hauptsatz bleibt auf irreversible Vorgänge beschränkt<sup>1</sup>.

Trotzdem gibt es ein überaus einfaches und fast selbstverständliches Richtungsprinzip auch im Bereich der sogenannten reversiblen Vorgänge, freilich in einer gewissermaßen versteckten Form. Wir betrachten beispielsweise konservative mechanische Systeme, d. h. solche, die nicht nur abgeschlossen sind — das läßt sich durch hinreichende Ausdehnung des betrachteten Bereiches erreichen —, sondern in denen überdies keine Umwandlung von mechanischer Energie in eine fremde Energieart (etwa Wärme durch Reibung) stattfindet. In solchen Systemen haben die wirkenden Kräfte ein Potential, d. h. es gibt eine Funktion, die potentielle Energie des Systems, deren negative Abgeleitete nach irgendeiner Richtung die Kraft in dieser Richtung darstellt. Denkt man sich nun die beweglichen Teile eines solchen Systems anfangs in Ruhe, und werden sie dann den vorhandenen Kräften überlassen, so gilt der Satz: „Die Kräfte suchen das Potential zu verkleinern.“ (PLANCK, Mechanik, S. 154f.) Dieser Satz kann wie ein unbedeutendes Spezialtheorem klingen, aber er ist es insofern nicht, als er ohne Zweifel ein Richtungsprinzip enthält. Brauchbar für allgemeinere Betrachtung wird er freilich erst, wenn die einschränkende Voraussetzung fortfällt, die wir eben gemacht haben, daß es sich nämlich nur um den Übergang des Systems aus Ruhe (als Ausgangszustand) in Bewegung handle. Diese Voraussetzung *kann* fortfallen, wenn wir annehmen dürfen, daß die Kräfte, die im System auftreten, nicht von den Geschwindigkeiten der Systemteile abhängen, sondern nur von deren *Lage*<sup>2</sup>. In diesem Falle greifen alle Kräfte an jedem bewegten Punkt genau so an, als wäre er ein in dieser Lage ruhender Punkt. Und für die Gesamtheit aller Kräfte und aller Systemteile muß deshalb jederzeit und bei beliebigen Geschwindigkeiten dieser Teile immer noch der Satz gelten: „Die Kräfte suchen im ganzen und dauernd das Potential zu verkleinern.“

<sup>1</sup> Vgl. PLANCK: Thermodynamik, 7. Aufl., 84 f.

<sup>2</sup> Diese Annahme ist bei konservativen mechanischen Systemen berechtigt. Bei elektrodynamischen Systemen tritt eine Komplikation auf, die aber das Gesamtergebnis dieser Überlegung nicht beeinflusst.

Man kann diesem Satz eine anschaulichere Form geben, wenn man bedenkt, daß es von dem mechanischen Potential oder der potentiellen Energie abhängt, wie weit das System von der Gleichgewichtsverteilung entfernt ist, oder ob es sich gerade in ihr befindet. Denn wenn das Potential in einer Verteilung den kleinsten möglichen Wert erreicht hat, den es unter den gegebenen Systembedingungen überhaupt erreichen kann, dann vermögen nach dem bekannten Zusammenhang von Potential und Kräften diese keine Arbeit mehr zu leisten, und wir haben die Gleichgewichtsverteilung vor uns. Je kleiner darum das Potential, desto näher ist die gerade erreichte Systemlage der Gleichgewichtsverteilung; und deshalb läßt sich unser Richtungssatz auch so aussprechen: „Die Kräfte suchen im ganzen und dauernd das System der Gleichgewichtsverteilung zu nähern.“ Wer diese Formulierung für anthropomorph hält, kann auch sagen: „Die Wirkung der Kräfte ist im ganzen und dauernd auf Annäherung des Systems an seine Gleichgewichtsverteilung gerichtet.“

Es ist nicht schwer zu sehen, inwiefern dieser Satz als Richtungsprinzip gelten kann und doch keinen Widerspruch mit der Reversibilität der betrachteten Systeme ergibt. Der entscheidende Punkt ist, daß der Satz nicht von den Bewegungen der Systemteile, sondern nur von dem Sinn spricht, in dem jeweils die Kräfte des Systems an diesen Teilen angreifen und sie beschleunigen. Offenbar kann sich ja ein Systemteil dem Sinn des Satzes zuwider *bewegen*, während ihn doch zugleich die Kräfte dem Satz gemäß in entgegengesetzter Richtung *beschleunigen*, wie das z. B. bei einem Pendel der Fall ist, welches eben seine Gleichgewichtslage passiert hat und sich nun von dieser fort, gegen die wirksame Komponente der Erdschwere, bewegt. Aus diesem Grunde verdient das Richtungsprinzip „versteckt“ genannt zu werden: Es gilt nicht allgemein von den Bewegungen im System, sondern nur von der jeweiligen Gesamtrichtung der wirkenden Kräfte; und wer deshalb nur an den stattfindenden *Bewegungen* interessiert ist, kann mit Recht leugnen, daß sich *in ihnen* eine feste Richtung des Systemgeschehens äußert. Die theoretische Physik ist im allgemeinen darauf ausgewiesen, die Bewegungsgesetze der betrachteten Systeme zu formulieren. Kein Wunder, daß das eben besprochene allgemeine Richtungsprinzip in ihr nicht vorkommen pflegt. Man findet es nur soweit erwähnt, als Systeme aus Ruhe in Bewegung übergehen (vgl. oben S. 320), weil ja für diesen Übergang die Wirkungen der Kräfte mit den Richtungen der Bewegungen zusammenfallen. Es kann aber keinem Zweifel unterliegen, daß wir seine allgemeine Formulierung brauchen, wenn wir verstehen wollen, wie ein System mit dynamischen Kräften überhaupt in einen Zustand von Balancierung dieser Kräfte übergeht, oder ihn wenigstens unter bestimmten Umständen erreicht, von denen noch die Rede ist.

Denn offenbar wird es an der Gültigkeit dieses dynamischen Rich-

tungsprinzipes liegen, daß in Systemen, deren Veränderungen außerdem auch noch dem Entropieprinzip folgen, wirklich Gleichgewichte der dynamischen Vektore erreicht werden, ein Tatbestand, der von dem zweiten Hauptsatz aus nicht zu verstehen war, weil die für ihn maßgebenden Vorstellungen von dynamischen Vektoren gar nichts aussagten. Auf welche Art gerade das Entropieprinzip erst zur *Verwirklichung* der Gleichgewichte führt, auf die doch nach dem Richtungsprinzip die dynamischen Kräfte stets hinwirken, bleibt noch zu betrachten. Aber eines muß dabei von vornherein klar bleiben: Dieses Richtungsprinzip selbst hat nicht das mindeste mit den Vorstellungen zu tun, die dem zweiten Hauptsatz zugrunde liegen; weder Statistik noch die mit ihr zusammenhängende Irreversibilität spielen irgendeine Rolle bei der Begründung des Richtungsprinzipes.

Wie nun unter Mitwirkung des Entropieprinzips aus dem Richtungsatz für die dynamischen Kräfte ein Richtungssatz für die wirklichen Systemveränderungen wird, das kann man nur klar überschauen, wenn man sich vorher deutlich macht, weshalb die wirklich stattfindenden *Bewegungen* in einem rein dynamischen System nicht allgemein dem dynamischen Richtungsprinzip folgen. Es ist ja nicht nur bei einem Pendel so, daß die wirklichen Bewegungen ebensowohl der Krafrichtung entgegengesetzt wie ihr entsprechend erfolgen, sondern dasselbe gilt für alle rein dynamischen Systeme überhaupt: Verschiebungen, die im ganzen das Potential verkleinern, gehen in solche über, die es vergrößern, auch bei beliebiger Komplizierung der Systeme, und daher rührt ja der reversible Charakter solcher Systemveränderungen, der für die übliche physikalische Betrachtung nichts von Richtung des Geschehens erkennen läßt.

Die Bewegungsgesetze, z. B. für ein konservatives mechanisches System, müssen *allgemein* gefaßt sein. Dazu gehört auch, daß die Teile des Systems im Anfangszustand, von dem die Anwendung der Gesetze ausgeht, beliebige Geschwindigkeiten haben können. Es ist für solche Betrachtung nur ein Spezialfall unter unendlich vielen möglichen, wenn die Richtungen der Anfangsgeschwindigkeiten gerade dieselben sind, die die Kräfte des Systems bei der betreffenden Lage auch von selbst hervorgerufen würden. Die Anfangsgeschwindigkeit eines Pendels kann z. B. der wirksamen Komponente der Erdschwere ebenso gut entgegengesetzt wie mit ihr übereinstimmend sein. Wenn dann die Bewegung des Pendels zunächst der Kraft und dem Richtungsprinzip entgegengesetzt *bleibt*, so liegt das an der Trägheit, oder anders ausgedrückt: daran, daß die Wirkung einer Kraft sich einer vorhandenen Geschwindigkeit einfach superponiert und, als positive oder negative Beschleunigung, diese vorhandene Geschwindigkeit an sich respektiert, die — gleichgültig gegen

die momentan wirkenden Kräfte — zu beharren strebt. Es bedarf aber natürlich gar nicht systemfremder Anfangsgeschwindigkeiten, damit die Trägheit die wirkliche Bewegung dem Richtungsprinzip entgegengesetzt verlaufen läßt. Denn wenn das Pendel in einer beliebigen Anfangslage (außer der des Gleichgewichts) mit der Geschwindigkeit Null der Erdschwere zu folgen beginnt, so bestimmt sich ja die jeweils erfolgende Bewegung nicht durch die momentanen Systemkräfte, sondern eine Geschwindigkeit, die eben von diesen Kräften erzeugt ist, geht selbständig und unabhängig in den nächstfolgenden Systemzustand über, und über sie superponiert sich jetzt der Geschwindigkeitszuwachs, den die Kräfte in diesem zweiten Zustand bewirken usw. Dadurch kommt im Verlauf des Fallens eine immer größere Geschwindigkeit zustande, die beim Passieren der Gleichgewichtslage maximal ist und nun indifferent in gleicher Richtung zu beharren strebt, so daß aus der eigenen Dynamik des Systems eine Bewegungsart folgt, die jenseits der Gleichgewichtslage dem Richtungsprinzip der Kräfte zuwiderläuft. In diesem Sinn beruht es also auf Trägheit, daß dem Richtungsprinzip der Kräfte nicht ein Richtungsprinzip der wirklich stattfindenden Vorgänge entspricht, oder, was für nähere Betrachtung dasselbe bedeutet, daß solche Systeme die Eigenschaft der Reversibilität zeigen.

Das gewöhnliche Pendel ist als System von *einem* Freiheitsgrad zu behandeln; deshalb liegt jede beim Pendel mögliche Geschwindigkeit auf der durch einen Kreisbogen gegebenen Kurve, die die Pendelbahn bedeutet, und deshalb kann auch die Anfangsgeschwindigkeit nur entweder mit der wirksamen Kraftkomponente der Richtung nach übereinstimmen oder gerade entgegengesetzt gerichtet sein. Wieder deshalb geht das Pendel mit Sicherheit durch die Gleichgewichtslage hindurch; andere Wege kommen nicht in Betracht. In Systemen von mehr als einem Freiheitsgrad ist das nicht so. Da können die Anfangsgeschwindigkeiten schräg und quer zu der Wirkungsrichtung der Kräfte stehen, und da sie selbständig in die Form der entstehenden Bahnen eingehen, so wird jetzt sogar von den Anfangsgeschwindigkeiten mitbestimmt, in welchem Maß das System jemals sein Potential erniedrigen kann. Einfachste Beispiele zeigen das, und es genügt, die Bahn eines Planeten um die Sonne zu betrachten. Hat dieser einmal eine Geschwindigkeit, die nicht von der Sonne gerade fort oder gerade auf sie zu gerichtet ist, so kann — Abwesenheit jeder Reibung vorausgesetzt — der Planet niemals die Sonne erreichen, obwohl die vorhandene Kraft stets auf die Sonne hin gerichtet ist und nur in dieser Richtung beschleunigend wirkt. Nicht die momentan gegebene Kraft bestimmt eben die momentane Richtung der Bahn, sondern die von der Kraft herrührende Geschwindigkeitsänderung wird gemäß der Parallelogrammregel zu der schon vorhandenen und selbständig beharrenden geometrisch addiert. So gelangt

der Planet nicht weiter an die Sonne heran als zu seiner Perihelstellung, wo der kleinste Wert des Potentials erreicht ist, zu der es dieser Einfluß der Anfangsgeschwindigkeit kommen läßt; und da der Planet gerade hier die größte Geschwindigkeit hat, so fährt er sogleich über diese Lage hinaus in Stellungen, die wieder erhöhtem Potential entsprechen.

Der Hergang bleibt derselbe, wenn man anstatt so einfacher Fälle beliebig komplexere betrachtet. *Überall* bestimmen nicht die aktuellen Kräfte allein, sondern diese und die vorher vorhandenen, durch Trägheit weiter beharrenden Geschwindigkeiten die wirkliche Bewegung, woraus stets folgen muß, daß die wirklich erreichten Konfigurationen relativ kleinster potentieller Energie weitab von den Wegen liegen können, auf denen sich das System nur der Richtung seiner Kräfte zufolge verändern würde. Und selbst wenn keine Anfangsgeschwindigkeiten vorhanden sind oder nur solche, die auch die Systemkräfte selbst erzeugt haben könnten, dann wird zwar das Geschehen anfangs der Richtung der Kräfte gemäß verlaufen, aber (wie beim Pendel) der Trägheit wegen auch über eine Gleichgewichtslage (das Minimum des Potentials) hinausfahren und sich dann der Kräfte richtung entgegen verändern<sup>1</sup>.

Hiernach ist die Selbständigkeit vorhandener Geschwindigkeiten, ihr Verharren ohne Rücksicht auf die aktuelle Systemlage und die dieser Systemlage entsprechenden Kräfte, ist also diese Trägheitswirkung der einzige Grund dafür, daß dem Richtungssatz der Kräfte nicht auch ein Richtungssatz der Systemveränderungen entspricht. Trägheit ist also auch der Grund, weshalb das Geschehen in solchen Systemen reversibel ist, d. h. in einem oder im anderen Sinn ablaufen kann, sich der Zeitrichtung gegenüber gleichgültig verhält. Ohne Trägheit in diesem Sinn würde es ja der Richtung der Kräfte folgen und geradeswegs in einen dauernden Gleichgewichtszustand einmünden, sofern es überhaupt einen solchen gibt. Wenn PLANCK darauf verweist, daß die Reversibilität solcher Vorgänge schon aus dem mathematischen Charakter der Bewegungsgesetze folgt, insofern diese nur den zweiten Differentialquotienten nach der Zeit, als Ausdruck für Beschleunigung und Kraft, die Zeit also nur in der zweiten Potenz enthalten und deshalb gegen einen Vorzeichenwechsel der Zeitvariablen indifferent sind, so besagt dies im Grunde ganz dasselbe: nämlich daß die Kräfte jeweils *Beschleunigungen* im System bestimmen und nicht die Geschwindigkeiten, die ihnen gegenüber vielmehr selbständig sind in der Form der Trägheit. Dieser Tatbestand ist in sämtlichen Gleichungen der analytischen Mechanik

<sup>1</sup> Sobald man die Voraussetzung macht, daß keine Faktoren vom Charakter der Reibung mitwirken, gilt alles, was in den beiden letzten Absätzen gesagt ist, auch z. B. wo Oberflächenspannung oder elektrostatisches Feld die untersuchten Kräfte des Systems darstellen.

implizite enthalten, und deshalb kann man keiner von ihnen einen Richtungssatz ablesen.

Wegen des folgenden ist aber noch einmal daran zu erinnern, daß der oben besprochene Richtungssatz hiervon gar nicht irgendwie betroffen wird. Ihm entspricht trotz alledem jederzeit die Wirkungsrichtung der Kräfte. Das Pendel schwingt wohl der Trägheit wegen durch die Gleichgewichtslage, und damit beginnt seine Bewegung dem Richtungssatz entgegen zu verlaufen, aber im gleichen Augenblick dreht auch die wirksame Kraftkomponente ihren Sinn gegenüber der Bewegung um und weist infolgedessen wiederum auf die Gleichgewichtslage hin. Hat bei Annäherung an die Gleichgewichtslage der Sinn von Kraft und Geschwindigkeit, deshalb auch von Beschleunigung und Geschwindigkeit, übereingestimmt, so kommen Beschleunigung und Geschwindigkeit in Gegensatz, sobald sich das Pendel aus der ausgezeichneten Lage zu entfernen beginnt, und aus Beschleunigung wird Verzögerung. Allgemeiner: solange die Bewegungen irgendeines konservativen Systems dieses einer Gleichgewichtsverteilung näherbringen, wirken die Kräfte im ganzen beschleunigend, sobald die Bewegungen vom Gleichgewicht fortführen, beginnen die Kräfte im ganzen verzögernd zu wirken. So auch im astronomischen Fall: Der Planet wird von der Sonne beschleunigt, bis er möglichst nahe an sie herangekommen ist; sobald er aber das Perihel passiert hat, beginnt die Gravitation seine Geschwindigkeit herabzusetzen usw. — Für beliebige (konservative) mechanische Systeme läßt sich dasselbe auch aus dem Energieprinzip ablesen:

$$\text{Potentielle Energie} + \text{Kinetische Energie} = \text{const.}$$

Sobald in einem beliebigen konservativen mechanischen System die potentielle Energie den geringsten Betrag erreicht hat, den sie nach gegebenen Anfangsbedingungen und gegebenen Systemeigenschaften erreichen kann, muß hiernach weitere Bewegung unter Verminderung der kinetischen Energie erfolgen, also so, daß im ganzen die Geschwindigkeiten des Systems vermindert werden. Das kann aber nur geschehen, indem von nun an die Kräfte der Entfernung aus der Konfiguration kleinster potentieller Energie im ganzen entgegen, also verzögernd wirken.

---

Systeme der bisher betrachteten Art zeigen in ihrem manifesten Verhalten keine „Regulationsfähigkeit“. Die Konfigurationen relativ kleinster potentieller Energie, die während der Verschiebungen auftreten, hängen, wie wir gesehen haben, von den Anfangslagen und Anfangsgeschwindigkeiten ab. Es gibt also keinen gemeinsamen Endzustand, auf den sich ein solches System unabhängig von der Anfangskonstellation hinbewegte, ganz abgesehen davon, daß es obendrein in jedem Falle die Konfiguration relativ kleinsten Potentials sogleich wieder verläßt. —

Andererseits gilt für solche Systeme das Richtungsprinzip der Kräfte, nach welchem diese dauernd in der Richtung auf Verminderung der potentiellen Energie wirken, womit Annäherung an die Bedingungen für ein Gleichgewicht gegeben ist. Was geschehen würde, wenn auch die wirklichen Verschiebungen des Systems diesem Prinzip folgten, d. h. also, wenn die oben besprochenen Trägheitserscheinungen auf irgendeine Art eliminiert werden würden, das kann man leicht angeben. In diesem Falle würde das betreffende System, der Richtung nur der Kräfte folgend, dauernd an potentieller Energie verlieren, und wenn auf diesem Wege überhaupt ein Minimum potentieller Energie liegt, dann wird dieses und wird also die Gleichgewichtskonfiguration erreicht werden. Man braucht deshalb nur die Gleichgewichtsbedingung zu betrachten, um festzustellen, von welchen Faktoren das schließlich erreichte Gleichgewicht bestimmt wird; daraus muß sich ergeben, ob solche Systeme nach der eben vorausgesetzten Ausschaltung jener Trägheitswirkungen „regulatorische“ Eigenschaften besitzen oder nicht. Bekanntlich besagt jene Gleichgewichtsbedingung (das Prinzip der virtuellen Verrückungen), daß das System im Gleichgewicht angekommen ist, wenn seine Kräfte in der betreffenden Lage insgesamt keine Arbeit leisten können. Das wird ausgedrückt durch eine homogene Gleichung, in die nur die Kräfte (*für die betreffende Konstellation genommen*) und gewisse mit den Systembedingungen verträgliche kleine Raumverschiebungen (die virtuellen Verrückungen *für die betreffende Konstellation*) eingehen, in welcher also Anfangskordinaten und Anfangsgeschwindigkeiten des Systems keine Rolle spielen. Danach würde zu schließen sein, daß solche Systeme, für die es überhaupt ein Gleichgewicht gibt, bei sonst gegebenen Systembedingungen von beliebigen Anfangszuständen her und deshalb im allgemeinen auf verschiedenen Wegen stets die gleiche Endkonfiguration erreichten, also „regulierten“. Das ist, wie wir nun sehen werden, zutreffend mit einer einzigen Einschränkung.

In einem konservativen mechanischen System kommen stets Geschwindigkeiten vor, die ohne Rücksicht auf aktuelle Kräfte zu beharren streben. Insofern scheint ein System, aus dem solche Trägheitswirkungen eliminiert sind, eine Fiktion darzustellen. Indessen wird aus der Fiktion Wirklichkeit, sobald das betrachtete System Entropievermehrung zeigt (dem zweiten Hauptsatz unterworfen ist) und damit aufhört, ein konservatives zu sein. Gegenüber dem Richtungsprinzip der dynamischen Kräfte kann das Beharren einmal vorhandener oder entstandener Geschwindigkeiten ohne Kraftwirkung als eine Sache für sich betrachtet werden, und dann fragt es sich, auf welche Art dieser Faktor sich ausschalten läßt. Von den Geschwindigkeiten der Systemteile hängt es ab, wie stark die Reibung in einem System ist, das überhaupt Reibung und damit eine Hauptform der Entropievermehrung aufweist: Je größer die Ge-

schwindigkeit, desto beträchtlicher die Reibung. Und da nun Reibung makroskopische Geschwindigkeiten des Systems in ungeordnete mikroskopische Wärmebewegung umwandelt, so tendiert sie dazu, diejenigen Geschwindigkeitskomponenten aus dem makroskopischen Verhalten des Systems auszuschalten, die nicht in der Richtung von Kräften liegen und nicht von diesen eben erzeugt oder gegen die Reibung unterhalten werden<sup>1</sup>.

Es ist nach dem früher Besprochenen klar, daß damit die Verläufe im System wesentlich verändert werden und im allgemeinen ganz andere Wege gehen als zuvor. Es ist ferner klar, daß diese Änderung der Verläufe, die ja mit zunehmender Reibung immer mehr nur von den Kräften bestimmt werden und mit deren Richtung zusammenfallen, das Verhalten des Systems demjenigen Prinzip gemäß macht, nach welchem die *Kräfte immer* wirken. Ein Planet, der sich in einem Medium mit Reibung bewegt, würde überall geringere tangentielle Geschwindigkeit haben als in einem reibungslosen Medium; infolgedessen würde die jeweils durch Gravitationswirkung erzeugte Geschwindigkeitskomponente sich im Parallelogramm der Geschwindigkeiten relativ stärker durchsetzen, und die Planetenbahn würde stärker nach der Sonne gekrümmt werden. Da das von jedem Bahnelement gälte, würde der Planet anstatt einer Ellipse eine Spirale unter immer größerer Annäherung an die Sonne beschreiben.

Welche Bewegungsformen im einzelnen Fall auftreten, das wird davon abhängen, wie stark man die Reibung anzusetzen hat, ob der Reibungskoeffizient überall im System der gleiche ist usf. Es ist ohne Interesse für diese allgemeine Betrachtung, irgendwelche Einzelbeispiele aus der Fülle der möglichen herauszugreifen, da wir in der glücklichen Lage sind, für den Vergleich mit den wichtigsten organischen Fällen ein Extrembeispiel wählen zu können, das besonders einfacher Natur ist. Zum mindesten von den recht langsamen Prozessen, in denen etwa die Morphogenese besteht, kann mit Sicherheit behauptet werden, daß sie bei stärkster Reibung verlaufen, nämlich so, daß gerichtete Geschwindigkeiten *ohne* entsprechende Kraft in der gleichen Richtung praktisch überhaupt nicht vorkommen; ähnlich wie man z. B. in der Lehre von den elektrischen Strömen in flüssigen Leitern ebenfalls keine gerichtete Ionenbewegung anzunehmen hat, die unabhängig von Kräften beharren könnte, sondern die *Geschwindigkeit* und nicht die Beschleunigung der Kraft proportional setzt.

Nehmen wir einen solchen Grad von Reibung an, fallen also alle Geschwindigkeiten fort, die nicht gerade von den wirkenden Kräften erzeugt und unterhalten werden, dann muß nach unseren früheren Über-

<sup>1</sup> Der Gegensatz von „makroskopisch“ und „mikroskopisch“ wie in den Schriften von PLANCK, z. B. Acht Vorlesungen über theoretische Physik S. 46 ff.

legungen das Richtungsprinzip für die Gesamtheit der *Kräfte* vollkommen in ein Richtungsprinzip der stattfindenden *Verschiebungen* übergehen, weil diese jetzt durchaus von jenen bestimmt werden. Die Richtung solchen Geschehens muß deshalb dauernd auf Abnahme der potentiellen Energie gerichtet sein, und wenn dabei überhaupt ein Gleichgewichtszustand erreicht werden kann, so wird die Umbildung des Gesamtsystems schließlich mit Sicherheit in ihn einmünden. Beliebige Anfangsgeschwindigkeiten können jetzt offenbar keinen Einfluß mehr auf den schließlich erreichten Endzustand haben, da (makroskopische) Geschwindigkeiten ja von vornherein nur so weit möglich sind, wie ihnen eine Kraft entspricht. Die Anfangslagen der Systemteile aber werden ebenfalls irrelevant, insofern das Potential von jeder Anfangskonfiguration aus dauernd abnehmen muß, und sofern wir voraussetzen können, daß es bei einmal gegebenen Systemeigenschaften eine *einzig*e Konstellation gibt, in der sich die Kräfte die Wage halten, das Gleichgewicht also erreicht ist.

Soweit also die bisherige Betrachtung geht, ist es allgemeine Eigenschaft solcher Systeme mit stärkster Reibung, von verschiedenen Ausgangslagen aus stets in denselben Endzustand überzugehen, sie „regulieren“. Es wird gut sein, dieses Ergebnis noch etwas genauer zu formulieren. An jedem System gibt es Eigenschaften, die nicht von dem Systemgeschehen alteriert werden, von denen als „Systembedingungen“ diese Verschiebungen vielmehr abhängen. Unsere Überlegungen haben nun gezeigt, daß ein *Systemgeschehen* im allgemeinen auf verschiedenen Wegen, von verschiedenen Ausgangslagen her und also auch „nach Störungen“ ein und denselben Endzustand herstellt, d. h. reguliert. Dieser Endzustand ist nur bestimmt durch die Gesamtheit jener festgegebenen Systemeigenschaften, die eben als „Systembedingungen“ bezeichnet wurden, sowie natürlich durch die Natur der im System wirkenden Kräfte. -- Danach gibt es eine Regulation für die dynamisch (in Vorgängen) bestimmte Systembeschaffenheit. Wenn dagegen eine Änderung an den *Systembedingungen* erfolgt (die sich nicht dynamisch im ganzen aufrechterhalten), dann wird es für eine solche Störung im allgemeinen keine Regulation geben. Infolgedessen wird dann auch das *Systemgeschehen* einen anderen Verlauf nehmen und zu einem anderen Endzustand führen, der den veränderten Bedingungen entspricht. Damit kommen wir zu einer Bemerkung, die den bisherigen Überlegungen eine notwendige Begrenzung gibt.

Auch organische Systeme zeigen sich nicht immer der Regulation fähig, und so wäre es von vornherein verdächtig, wenn das Richtungsprinzip im Anorganischen mehr leistete, als auf organischem Gebiet verwirklicht ist. Ein ganz einfaches Beispiel läßt sofort sehen, welche Umstände eine vollkommene Regulation verhindern können, indem sie das

Endergebnis eines dynamischen Vorganges vom Anfangszustand abhängig machen. Wenn in einem zylindrischen Gefäß Stoffe verschiedener spezifischer Schwere durcheinander gemengt sind, die sich nicht ineinander lösen, und die innere Reibung des Ganzen groß ist, so wird nach geraumer Weile ein Zustand eintreten, in dem die Stoffe in horizontalen Schichten nach ihrer spezifischen Schwere geordnet sind. Sind aber z. B. Schrotkörner dabei, und ist in einiger Höhe über dem Boden ein Sieb horizontal angebracht, durch welches die Schrotkörner nicht passieren können, so wird der Endzustand davon abhängig, ob sich die Schrotkörner zu Anfang alle unterhalb des Siebes befinden oder in irgendeiner Zahl darüber. Solche Fälle lassen sich in mannigfacher Form erdenken. Ihnen allen ist gemeinsam, daß ein Teil der festgegebenen Systembedingungen bestimmte Wege ungangbar macht, und daß es infolgedessen von den Anfangslagen der Systemteile abhängt, ob das optimale Gleichgewicht erreicht wird oder nicht. Auch unter diesen Umständen wird sich das System stets diesem Gleichgewicht soweit nähern, wie es möglich ist, da es ja seine potentielle Energie nach Möglichkeit verringert; aber der wirklich erreichte Endzustand kann von dem optimalen Gleichgewicht je nach den Anfangsbedingungen in verschiedenem Maß entfernt bleiben. Es ist freilich nicht anzunehmen, daß Hindernisse von gerade dieser Art bei dem Vergleich von anorganischen Vorgängen mit organischen Prozessen besondere Berücksichtigung verdienen. Es mußte aber erwähnt werden, daß die bisherige Überlegung von ihnen absieht; überdies machen sie die folgende in biologischem Zusammenhang wichtige Behinderung von Regulationen leichter verständlich.

Hindernisse, die nicht selbst an der Dynamik des Systems teilnehmen, sondern diese nur als unveränderliche Bedingungen mitbestimmen, können nämlich auch im Systemgeschehen selbst zustande kommen. Unser Gedankengang betraf bisher in der Hauptsache mechanische Systeme im engeren Sinne; er kann aber erweitert werden und läßt sich z. B. auf die Wirkungsrichtung der Oberflächenspannung, ohne wesentliche Änderungen auch auf die Verteilung elektrostatischer Ladungen usw. übertragen. Ebenso kann man die besonders wichtigen Systeme betrachten, in denen verschiedene Kraftarten zu gleicher Zeit wirksam sind, wie z. B. Oberflächenspannung, Gravitation und elektrostatische Kräfte oder noch andere neben ihnen. Die „gerichtete“ Systemenergie, die sich unter Umformung des Systems dauernd vermindert und schließlich auf einen kleinsten Wert sinkt, ist dann nur aus den verschiedenen Energiearten insgesamt zu bilden, und das Gleichgewicht ist dann erreicht, wenn für sie *im ganzen* die Minimumbedingung erfüllt ist. Auch solche Systeme werden bei hinreichender Reibung regulieren, sofern nicht besondere vorgegebene Bedingungen manche Ausgangslagen vor anderen auszeichnen wie im obigen Beispiel (Sieb). Indessen haben

wir zu bedenken, daß zu den Vorgangsarten, die an dem Systemgeschehen teilnehmen, auch solche gehören können, die wichtigste Beispiele irreversibler Veränderungen bilden, wie z. B. chemische Reaktionen, die zu Ausfällungen von bestimmten Substanzen, vielleicht in charakteristischen Formen, führen<sup>1</sup>. Es ist klar, daß wenn einmal ein solcher Prozeß stattgefunden hat, die im System wirksamen Kräfte nicht immer imstande sein werden, ihn wieder rückgängig zu machen, so daß von nun an eine weitere unabänderliche Systembedingung vorliegt. Wird jetzt eine Störung gesetzt, d. h. das System von seinem Wege abgebracht, so ist diese inzwischen aufgetretene feste Systembedingung der dynamischen Umgruppierung in Richtung auf das sonst erreichte Gleichgewicht im Wege, und sie *bleibt* im Wege. Das System wird zwar noch dem sonst erreichten Endzustand so nahe als möglich kommen, aber es nicht wirklich erreichen. So haben wir dann unvollständige Regulation. Prinzipiell ist ein solcher Fall dem des oben behandelten Beispiels (Sieb) ganz ähnlich. Es ist nur an Stelle einer vorgegebenen Systembedingung eine solche getreten, welche das Systemgeschehen selbst ausgebildet hat. — Jedenfalls läßt die Betrachtung anorganischer Fälle ohne Schwierigkeit Prinzipien erkennen, nach denen die Fähigkeit zur Regulation beschränkt sein kann.

Hiermit ist die anfangs gestellte Aufgabe im ersten Entwurf gelöst. Soweit anorganische Systeme ihren eigenen Kräften folgen und dabei durch Faktoren vom Charakter der Reibung das Beharren makroskopischer Geschwindigkeiten ohne entsprechende Kräfte verhindert wird, formen sie sich in der Richtung auf Potentialverminderung um. Falls dabei die gegebenen Systembedingungen einen Gleichgewichtszustand erreichen lassen, ist er ein und derselbe für ganz verschiedene Ausgangslagen der Systemteile, d. h. die Systeme „regulieren“, — soweit nicht die Systembedingungen bestimmte Wege ausschließen und soweit nicht im Hergang selbst neue feste Bedingungen dieser Art geschaffen werden. Neben den rein statistischen Gesetzmäßigkeiten (wie denen der Diffusion, Wärmeleitung usw.) ist dies das einzige Richtungsprinzip, das im Anorganischen zu entdecken ist. Die Entropievermehrung spielt in ihm nur insofern eine Rolle, als sie durch Aufhebung indifferenten makroskopischer Geschwindigkeiten die Systemveränderungen dem (ganz selbständigen) Richtungsprinzip der Kräfte folgen läßt. Als Richtungsprinzip wesentlich dynamischer Natur ist es so allgemein, daß für ein zweites neben

<sup>1</sup> An und für sich gehört hierher eine allgemeine Betrachtung, wie es hinsichtlich der „Regulation“ bei denjenigen (makroskopischen) Vorgängen steht, die ganz und gar unter den Entropiesatz fallen, also Wärmeleitung und Diffusion. Der Kürze wegen sehe ich von dieser Betrachtung ab. Es gibt aber auch in solchen Fällen „Regulation“.

ihm kein Platz wäre. Wenn deshalb festgestellt werden soll, ob Regulationserscheinungen im Organischen nach naturwissenschaftlichen Gesichtspunkten verstanden werden können, so muß eine solche Untersuchung diejenigen Möglichkeiten entwickeln und prüfen, die sich aus diesem Richtungsprinzip (sowie aus den *rein* statistischen Gesetzen) ergeben. Ein anderer Weg steht nicht offen<sup>1</sup>.

Die bisherige Untersuchung hatte ein positives Ergebnis: Es gibt leicht zu charakterisierende anorganische Systeme in allen möglichen Graden der Komplizierung, die die Grundeigenschaft regulatorischen Verhaltens verständlicherweise zeigen und zeigen müssen. Daraus folgt an sich nicht, daß organische Regulationen auf den gleichen Prinzipien beruhen. Denn die organischen Regulationen haben noch Sonderheiten, von denen in unserer Betrachtung keine Rede war, und um derentwillen man vielleicht gezwungen werden könnte, doch noch auf andere Prinzipien als die der Physik zurückzugreifen. Ob sich auch für diese Sonderheiten ein Verständnis vom Anorganischen her erreichen läßt, wird erst die Untersuchung besonderer Systemtypen erweisen können. Eine solche Untersuchung hätte aber jedenfalls von dem eben dargestellten Richtungsprinzip auszugehen.

Es ist leicht, mehrere Punkte anzugeben, wo nähere Präzisierung der bisher vorausgesetzten Begriffe sofort weiterführen muß.

Einmal ist als zeitunabhängiger Endzustand, auf den hin die zuletzt behandelten System sich verändern, bisher ein statisches Gleichgewicht angenommen. Für den Vergleich mit biologischen Fällen haben stationäre Geschehensformen als Endzustände, sowie Komplikationen dieser mit statischen Gleichgewichten wohl größere Bedeutung. Es ist also

---

<sup>1</sup> Prinzipien für allgemeine Richtung des Naturgeschehens haben im 19. Jahrhundert verschiedene Philosophen aufzustellen versucht, freilich ohne gerade die Regulationsfrage dabei zu behandeln: so SPENCER, FECHNER, PETZOLDT und andere, die alle von einer „Tendenz zur Stabilität“ sprechen. Soviel ich sehen kann, gehen sie dabei entweder in einer halb spekulativen Art vor — wie sie z. B. in SPENCERS Ausführungen das tiefe Mißvergnügen von MAXWELL hervorrief —, oder sie sprechen von jener Tendenz auf Grund ungefährer empirischer Eindrücke darüber, wie es in der Regel auf dieser Erde und im Weltraum zugeht. Den einfachen Gedankengang, über den hier berichtet ist, habe ich zu meiner eigenen Überraschung nirgends auffinden können, auch sonst keine Ableitung, weshalb und in welcher Form ein Richtungsprinzip auch im rein Dynamischen besteht. Bei PETZOLDT (Das allgemeinste Entwicklungsgesetz, München 1923) findet sich der Fehler, der oben S. 319f. besprochen wurde, — wodurch das Verhältnis von Entropievermehrung und dynamischer Richtung vollends in Verwirrung gerät (vgl. über diesen Fehler z. B. PLANCK: Thermodynamik S. 85, Anm. 1). Das Prinzip von LE CHATELIER und BRAUN dürfte dagegen eine nahe Beziehung zu dem hier behandelten Richtungsprinzip haben, und ist wohl kaum nur eine Form des zweiten Hauptsatzes, wie manche glauben. Ich möchte auf dieses Prinzip in einer anderen Schrift näher eingehen.

zu untersuchen, ob und auf welche Art das Richtungsprinzip zu stationären Zuständen führt, und wie es dabei mit der Regulation steht.

Zweitens ist der Begriff eines Systems, der bisher verwandt wurde, nicht etwa unmittelbar mit dem Begriff eines Organismus in Parallele zu setzen. Denn jener Begriff eines Systems bezieht sich auf einen Bereich, für den als ganzen weder Aufnahme noch Abgabe von Energie in Betracht kommt. Natürlich gilt das z. B. nicht vom Organismus während der Morphogenese. Was wir „System“ genannt haben, ist dann als oder Organismus samt *der* Umgebung, die in merklichem Energieaustausch mit ihm steht. Eine dringende Aufgabe wird darin bestehen, physikalisch-chemische Fälle zu untersuchen, wo, ähnlich wie beim Keim in der Morphogenese, ein nicht (energetisch) geschlossenes System sich deutlich innerhalb des geschlossenen Gesamtsystems absondert.

---