

## Was ist ein Naturgesetz?

Von E. SCHRÖDINGER, Berlin.

(Antrittsrede an der Universität Zürich, 9. Dezember 1922.)

Die Rede wurde seinerzeit nicht gedruckt. Die spätere Entstehung und Entwicklung der Quantenmechanik hat den EXNERSchen Ideenkreis in den Brennpunkt des Interesses gerückt, übrigens ohne daß EXNERS Name je genannt wurde. Die heutige Publikation folgt wörtlich dem damaligen Manuskript.

Man sollte glauben, daß auf die Frage, was unter einem Naturgesetz zu verstehen sei, kaum eine Wissenschaft klarere und bestimmtere Antwort müßte geben können als die Physik, deren Gesetze als Vorbild der Exaktheit gelten.

„Was ist ein Naturgesetz?“ Die Antwort scheint wirklich nicht sehr schwer. Der Mensch findet sich beim Erwachen des höheren Bewußtseins in einer Umgebung, deren Veränderungen für sein Wohl und Weh von der allergrößten Bedeutung sind. Die Erfahrung — anfangs die unsystematische des täglichen Lebenskampfes, später die systematisch planvolle des wissenschaftlichen Experiments — zeigen ihm, daß die Vorgänge in seiner Umgebung nicht mit kaleidoskopartiger Willkür einander folgen, sondern daß darin erhebliche Regelmäßigkeit zutage tritt, deren Erkenntnis mit Eifer von ihm gepflegt wird, weil sie ihn in seinem Lebenskampf sehr fördert. Die erkannten Regelmäßigkeiten haben durchweg den gleichen Typus: gewisse Merkmale eines Erscheinungsablaufes zeigen sich immer und überall mit gewissen anderen Merkmalen verknüpft. Dabei ist von besonderer biologischer Bedeutung der Fall, daß die eine Merkmalgruppe der anderen zeitlich voraufgeht. Die Umstände, die einem gewissen, oft beobachteten Erscheinungsablauf (*A*) vorangehen, scheiden sich typisch in zwei Gruppen, *beständige* und *wechselnde*. Und wenn weiter erkannt wird, daß die beständige Gruppe auch umgekehrt immer von *A* gefolgt wird, so führt das dazu, diese Gruppe von Umständen als die *bedingenden Ursachen* von *A* zu erklären. So entsteht, Hand in Hand mit der Erkenntnis der *speziellen* regelmäßigen Verknüpfungen, als Abstraktion aus ihrer Gesamtheit, die Vorstellung von der *allgemeinen notwendigen* Verknüpftheit der Erscheinungen untereinander. *Über die Erfahrung hinaus* wird als allgemeines Postulat aufgestellt, daß auch in solchen Fällen, in denen es noch nicht gelungen ist, die bedingenden Ursachen eines bestimmten Erscheinungsablaufes zu isolieren, solche doch angebar sein müssen, oder mit anderen Worten, daß ein jeder Naturvorgang absolut und quantitativ determiniert ist mindestens durch die Gesamtheit der Umstände oder physischen Bedingungen bei seinem Eintreten. In diesem Postulat, das wohl auch als Kausalitätsprinzip bezeichnet wird, werden wir durch fort-schreitende Erkenntnis spezieller bedingender Ursachen stets aufs neue bestärkt.

Als Naturgesetz nun bezeichnen wir doch wohl

nichts anderes als eine mit genügender Sicherheit festgestellte Regelmäßigkeit im Erscheinungsablauf, *sofern sie als notwendig im Sinne des oben genannten Postulats gedacht wird.*

Wo bleibt hier noch eine Unklarheit, wo Anlaß zu einem Zweifel? Da das Tatsächliche außer Diskussion steht, offenbar höchstens an der Richtigkeit oder allgemeinen Zweckmäßigkeit des Postulates.

Die physikalische Forschung hat in den letzten 4—5 Jahrzehnten klipp und klar bewiesen, daß zum mindesten für die erdrückende Mehrzahl der Erscheinungsabläufe, deren Regelmäßigkeit und Beständigkeit zur Aufstellung des Postulates der allgemeinen Kausalität geführt hat, die gemeinsame Wurzel der beobachteten strengen Gesetzmäßigkeit — der *Zufall* ist.

Bei jeder physikalischen Erscheinung, an der wir eine Gesetzmäßigkeit beobachten, wirken ungezählte Tausende, meistens Milliarden einzelner Atome oder Moleküle mit. (In Parantese für die Herren Physiker: das gilt auch für solche Erscheinungen, wo, wie man heute oft sagt, die Wirkung eines einzelnen Atoms zur Beobachtung gelangt; weil in Wahrheit doch die Wechselwirkung dieses einen Atoms mit Tausenden anderer den beobachteten Effekt bestimmt.) Es ist nun, mindestens in einer sehr großen Zahl von Fällen ganz verschiedener Art gelungen, die beobachtete Gesetzmäßigkeit voll und restlos aus der ungeheuer großen Zahl der zusammenwirkenden molekularen Einzelprozesse zu erklären. Der molekulare Einzelprozeß mag seine eigene strenge Gesetzmäßigkeit besitzen oder nicht besitzen — in die beobachtete Gesetzmäßigkeit der Massenerscheinung braucht jene *nicht* eingehend gedacht zu werden, sie wird im Gegenteil in den uns allein zugänglichen Mittelwerten über Millionen von Einzelprozessen vollständig verwischt. Diese Mittelwerte zeigen ihre eigene, rein *statistische Gesetzmäßigkeit*, die auch dann vorhanden wäre, wenn der Verlauf jedes einzelnen molekularen Prozesses durch Würfeln, Roulettespiel, Ziehen aus einer Urne entschieden würde.

Das einfachste und durchsichtigste Beispiel für diese statistische Auffassung der Naturgesetzlichkeit — zugleich ihren Ausgangspunkt in historischer Beziehung — bildet das Verhalten der Gase. Der Einzelprozeß ist hier der Zusammenstoß zweier Gasmoleküle miteinander oder mit der Wand. Der Druck eines Gases gegen die Wände, den man früher einer besonderen Expansivkraft der Materie im Gaszustand zuschrieb, kommt nach der Molekulartheorie durch das Bombardement der Moleküle zustande. Die sekundliche Zahl der Stöße gegen 1 qcm Wandfläche ist enorm groß, bei Atmosphärendruck und 0° C hat sie 24 Stellen ( $2,2 \times 10^{28}$ ), im äußersten irdischen Vakuum für 1 qmm und  $\frac{1}{1000}$  Sekunde berechnet, hat sie immer noch 11 Stellen. Die Molekulartheorie gibt nicht

nur vollkommene Rechenschaft von den sog. Gasgesetzen, das ist von der Abhängigkeit des Druckes von Temperatur und Volumen, sondern erklärt auch alle anderen Eigenschaften der wirklichen Gase, wie Reibung, Wärmeleitung, Diffusion — und zwar *rein statistisch* durch den im einzelnen völlig unregelmäßigen Austausch der Moleküle zwischen verschiedenen Teilen des Gases. Man pflegt bei diesen Rechnungen und Überlegungen allerdings für das Einzelereignis — den Zusammenstoß — die Gesetze der Mechanik vorauszusetzen. Aber notwendig ist das durchaus *nicht*. Es würde völlig genügen, anzunehmen, daß beim einzelnen Stoß eine Zunahme oder eine Abnahme der mechanischen Energie und des mechanischen Impulses *gleich wahrscheinlich* sind, so daß diese Größen *im Mittel sehr vieler Stöße* in der Tat konstant bleiben; etwa so, wie man mit zwei Würfeln im Mittel bei einer Million Würfeln durchschnittlich 7 würfelt, während das Resultat des einzelnen Wurfes völlig unbestimmt ist.

Aus dem Gesagten ergibt sich, daß die statistische Auffassung der Gasgesetze *möglich*, vielleicht, daß sie die einfachste, aber nicht, daß sie die *einzig mögliche* ist. Ein Experimentum crucis ist folgender Versuch. Als statistischer Mittelwert muß der Gasdruck zeitlichen *Schwankungen* unterliegen. Diese müssen um so erheblicher sein, je kleiner die Zahl der kooperierenden Elementarprozesse ist, also je kleiner die gedrückte Fläche und je geringer die Trägheit des Körpers, dem sie angehört, damit er auf kurzperiodische Schwankungen möglichst ungesäumt reagiere. Beides erreicht man, indem man winzige, ultramikroskopische Teilchen in dem Gas suspendiert. Diese zeigen dann in der Tat eine Zickzackbewegung von äußerster Unregelmäßigkeit, die lange bekannte Brownsche Bewegung, die niemals zur Ruhe kommt und in allen Einzelheiten mit den Vorhersagen der Theorie übereinstimmt. Die Zahl der Einzelstöße, welche das Teilchen während einer meßbaren Zeit erleidet, ist zwar immer noch sehr groß, aber doch nicht *so* groß, daß ein allseitig völlig gleicher Druck resultierte. Durch zufälliges Überwiegen der Stöße aus einer zufälligen Richtung, die von Moment zu Moment ganz regellos wechselt, wird das Teilchen völlig regellos hin und her gestoßen. So sehen wir hier ein Naturgesetz — das Gesetz für den Gasdruck — seine exakte Gültigkeit einbüßen, in dem Maße, als die *Zahl* der kooperierenden Einzelprozesse abnimmt. Ein bündiger Beweis für den wesentlich statistischen Charakter mindestens *dieses* Gesetzes läßt sich nicht denken.

Ich könnte noch eine große Anzahl experimentell und theoretisch genau untersuchter Fälle anführen, so das Zustandekommen der gleichmäßig blauen Himmelsfarbe durch die völlig unregelmäßigen Schwankungen der Luftdichte (infolge ihrer molekularen Konstitution) oder den streng gesetzmäßigen Zerfall radioaktiver Substanzen, der aus dem regellosen Zerfall der einzelnen Atome sich aufbaut, wobei es ganz vom Zufall

abzuhängen scheint, welche Atome sogleich, welche morgen, welche in einem Jahre zerfallen werden. — Mehr als durch noch so viele Einzelfälle wird unsere Überzeugung vom statistischen Charakter der physikalischen Gesetzmäßigkeit dadurch bestärkt, daß einer der allgemeinsten Erfahrungssätze, der sog. II. Hauptsatz der Thermodynamik oder Entropiesatz, *der überhaupt schlechterdings bei jedem wirklichen physikalischen Vorgang eine Rolle spielt*, sich als das *Prototyp* eines statistischen Gesetzes herausgestellt hat. So sehr diese Materie durch ihr ganz hervorragendes Interesse ein näheres Eingehen rechtfertigen würde, muß ich mich hier doch auf die sehr kursorische Bemerkung beschränken: rein empirisch steht der Entropiesatz im engsten Zusammenhang mit der typischen, einseitigen Gerichtetheit alles Naturgeschehens. Die Richtung, in der sich ein körperliches System im nächsten Augenblick verändern wird, läßt sich zwar nicht aus ihm allein bestimmen, wohl aber *schließt er gewisse Veränderungen aus*, und darunter befindet sich *immer auch die der wirklich eintretenden genau entgegengesetzte Veränderung*. Die statistische Betrachtungsweise verleiht nun dem Entropiesatz folgenden Inhalt: alles Geschehen entwickelt sich von relativ *unwahrscheinlichen*, d. h. von molekular relativ *geordneten* Zuständen gegen *wahrscheinlichere*, d. h. molekular *ungeordnetere* Zustände hin. —

Über das bis jetzt Gesagte bestehen unter den Physikern keine wesentlichen Meinungsverschiedenheiten mehr. Anders steht es mit dem, was ich weiter zu sagen habe.

Wenn wir die physikalischen Gesetze als statistische erkannt haben, für deren Zustandekommen die streng kausale Determiniertheit des molekularen Einzelereignisses nicht *erforderlich* wäre, so ist es doch die allgemeine Meinung, daß in Wirklichkeit der Einzelprozeß, z. B. der Zusammenstoß zweier Gasmoleküle, streng kausal determiniert *ist* bzw. *verläuft* — wie ja auch der Ausgang eines Roulettespiels nicht unbestimmt wäre für den, der — nachdem das Rädchen in Schwung versetzt ist — die Größe dieses Schwunges, die Widerstände in der Luft und an der Achse ganz genau kennt und in Rechnung zu stellen wüßte. — Vielfach werden sogar *ganz bestimmte* elementare Gesetzmäßigkeiten behauptet, so beim Stoß von Gasmolekülen die Erhaltung der Energie und des Impulses *bei jedem einzelnen Stoß*.

Es war der Experimentalphysiker FRANZ EXNER, der im Jahre 1919<sup>1</sup> zum ersten Male mit voller philosophischer Klarheit Kritik erhoben hat gegen die *Selbstverständlichkeit*, mit der die Überzeugung von der absoluten Determiniertheit des molekularen Geschehens von jedermann gehegt wird. Er kommt zu dem Schluß, daß das Behauptete zwar *möglich*, jedoch keinesfalls *notwendig*, und bei Licht betrachtet, *gar nicht sehr wahrscheinlich ist*.

<sup>1</sup> F. EXNER, Vorlesungen über die Physikalischen Grundlagen der Naturwissenschaften. Wien, F. Deuticke 1919.

Was zunächst die *Nichtnotwendigkeit* anlangt, so habe ich mich schon früher darüber ausgesprochen und glaube mit EXNER, daß sie sich aufrecht erhalten läßt, ungeachtet dessen, daß die meisten Forscher sogar ganz bestimmte Züge der elementaren Gesetzmäßigkeit fordern. Natürlich *können* wir den Energiesatz im großen dadurch erklären, daß er schon im kleinen gilt. Aber ich sehe nicht, daß wir *müssen*. Ebenso *können* wir ja die Expansivkraft eines Gases als Summe der Expansivkräfte seiner Elementarteilchen erklären. *Hier* ist eine solche Auffassung *unzutreffend*, ich sehe nicht, weshalb sie *dort* die *einzig mögliche* sein soll. — Im übrigen ist anzumerken, daß Energie-Impulssatz nur *vier* Gleichungen liefern, und daher, auch wenn sie im Einzelprozeß erfüllt sind, denselben noch weitgehend unbestimmt lassen.

Woher stammt nun der allgemein verbreitete Glaube an die absolute, kausale Determiniertheit des molekularen Geschehens und die Überzeugung von der *Undenkbarkeit* des Gegenteils? Einfach aus der von Jahrtausenden ererbten *Gewohnheit, kausal zu denken*, die uns ein undeterminiertes Geschehen, einen absoluten, *primären* Zufall als einen vollkommenen Nonsens, als *logisch* unsinnig erscheinen läßt.

Woher aber stammt diese Denkgewohnheit? Aus der jahrhundert-, jahrtausende langen Beobachtung gerade *derjenigen* natürlichen Gesetzmäßigkeiten, von denen wir heute mit Sicherheit wissen, daß sie nicht — jedenfalls nicht unmittelbar — *kausale*, sondern *unmittelbar statistische* Gesetzmäßigkeiten sind. Damit ist aber jener Denkgewohnheit der rationelle Boden entzogen. Für die Praxis werden wir sie zwar unbedenklich beibehalten, weil sie ja im Erfolg das Richtige trifft. Uns aber *von ihr zwingen* zu lassen, *hinter* den beobachteten *statistischen*, absolut kausale Gesetze mit Notwendigkeit zu postulieren, wäre ein ganz offenbar fehlerhafter Zirkelschluß.

Aber nicht nur *zwingt* nichts zu dieser Annahme, wir sollten uns klar machen, daß eine derartige *Zweifachheit der Naturgesetze* recht unwahrscheinlich ist. *Eines* wären die „eentlichen“, wahren, absoluten Gesetze im Unendlichkleinen, ein *anderes* die im Endlichen beobachtete Gesetzmäßigkeit, die gerade in ihren wesentlichsten Zügen *nicht* durch jene absoluten Gesetze, sondern durch den Begriff der *reinen Zahl*, den klarsten und einfachsten, den Menscheng Geist gebildet hat, bestimmt sind. In der Welt der Erscheinung klare Verständlichkeit — hinter ihr ein dunkles, ewig unverstandenes Machtgebot, ein rätselvolles „Müssen“. Die *Möglichkeit*, daß es sich so verhält, ist zuzugeben, doch erinnert diese Verdoppelung des Naturgesetzes zu sehr an die Verdoppelung der *Naturobjekte* durch den Animismus, als daß ich an ihre Haltbarkeit glauben möchte.

Ich möchte aber nicht dahin mißverstanden werden, als hielte ich die Durchführung dieser neuen — sagen wir kurz *akausalen* (d. h. *nicht notwendig* kausalen) Auffassung für leicht und einfach. Die heute herrschende Ansicht ist die, daß minde-

stens die Gravitation und die Elektrodynamik absolute, elementare Gesetzmäßigkeiten sind, die auch für die Welt der Atome und Elektronen gelten und vielleicht als Urgesetzlichkeit allem Geschehen zugrunde liegen. Sie wissen von den erstaunlichen Erfolgen der Einsteinschen Gravitationstheorie. Müssen wir daraus schließen, daß seine Gravitationsgleichungen ein *Elementargesetz* sind. Ich glaube, nein. Wohl bei keinem Naturvorgang ist die Zahl der einzelnen Atome, die zusammenwirken müssen, damit ein beobachtbarer Effekt zustande komme, so enorm groß wie bei den Gravitationserscheinungen. Das würde die außerordentliche Präzision, mit der sich die Planetenbewegungen auf Jahrhunderte vorausberechnen lassen, auch vom statistischen Standpunkte verständlich machen. — Ich will übrigens nicht leugnen, daß gerade die EINSTEINSche Theorie die *absolute Gültigkeit der Energie-Impulssätze* außerordentlich nahelegt. Dieselben drücken in ihr, auf den Massenpunkt angewendet, eigentlich nur *eine absolute Beharrungstendenz* aus — wie ja die ganze Gravitationstheorie bezeichnet werden kann als eine Zurückführung der *Gravitation* auf das *Trägheitsgesetz*. Das einfachstdenkbare absolute Gesetz: *unter gewissen Umständen ändert sich nichts* — fällt wohl noch kaum unter den Begriff der kausalen Determiniertheit und wäre am Ende auch mit einer, im übrigen akausalen Auffassung des Weltgeschehens vereinbar.

Im Gegensatz zur Gravitation wird die Elektrodynamik heute ganz allgemein auf die Vorgänge im Atom selbst angewendet, und zwar mit erstaunlichem Erfolge. Diese positiven Erfolge sind wohl der ernsthafteste Einwand, der gegen die akausale Auffassung ins Feld geführt werden wird. Die Zeit verbietet mir ein näheres Eingehen auf diese Frage, und ich muß mich auf die folgende grundsätzliche Bemerkung beschränken, die zugleich unser Ergebnis kurz zusammenfaßt:

Die von EXNER aufgestellte Behauptung geht dahin: es ist sehr wohl möglich, daß die Naturgesetze samt und sonders statistischen Charakter haben. Das hinter dem statistischen Gesetz heute noch ganz allgemein mit Selbstverständlichkeit postulierte absolute Naturgesetz *geht über die Erfahrung hinaus*. Eine derartige doppelte Begründung der Gesetzmäßigkeit in der Natur ist an sich unwahrscheinlich. *Die Beweislast obliegt den Verfechtern, nicht den Zweiflern an der absoluten Kausalität*. Denn daran zu zweifeln ist heute bei weitem das *Natürlichere*.

Diesen Beweis nun zu erbringen, erscheint die Elektrodynamik des Atoms aus dem Grund ungeeignet, weil sie nach allgemeinem Urteil selbst noch an schweren inneren Widersprüchen krankt, die vielfach als logische empfunden werden. Ich halte es für wahrscheinlicher, daß die Befreiung von dem eingewurzeltten Vorurteil der absoluten Kausalität uns bei der Überwindung der Schwierigkeiten helfen, als daß, umgekehrt, die Theorie des Atoms das Kausalitätsdogma dennoch als — sozusagen zufällig — richtig erweisen wird.