

---

# Die empirischen Grundlagen des Determinismus und der apriori-Wahrscheinlichkeit in der Physik

Von

Thilo Vogel, Gießen

Erfahrungsgemäß können wir den Ablauf gewisser phänomenaler Vorgänge durch bestimmte „Versuchsanordnungen“, bestimmte Bedingungen erzwingen. Genauer gesagt: wir haben in sehr vielen Fällen die Erfahrung gemacht, daß ein bestimmter Prozeß eintritt, sooft wir einen gewissen Bedingungskomplex hergestellt haben, und wir erwarten daher, daß der nämliche Prozeß unter denselben Umständen auch in der Zukunft eintreten wird. Alle Erfahrungsurteile der Form „unter den Bedingungen  $a_1, a_2, a_3 \dots$  wird  $A$  beobachtet“ sind zunächst mit einem „Wahrscheinlichkeitsindex“ zu versehen. Wir pflegen aber über diese Erfahrungsgegebenheit insofern hinauszugehen, als wir die absolute Behauptung wagen, daß der betreffende Vorgang stets bei Herstellung des gleichen Bedingungs Zusammenhangs eintritt, m. a. W., daß er durch die entsprechenden Bedingungen eindeutig festgelegt ist. Es ist Erfahrungstatsache, daß wir bei den meisten phänomenalen Vorgängen diesen Schritt widerspruchlos machen können, daß die Wahrscheinlichkeit des Eintretens des erwarteten Phänomens praktisch zur Sicherheit wird. Jedenfalls dürfen wir konstatieren: es gibt Vorgänge in der Wirklichkeit, die durch bestimmte, uns zugängliche und durch uns realisierbare Bedingungen eindeutig festgelegt werden können.

Wir wollen an dem Terminus „Bedingung“ festhalten und den reichlich unscharfen Begriff „Ursache“ vermeiden. Zugegeben, daß im allgemeinen die Begriffe „Ursache“ und „Bedingung“ nicht äquivalent sind: im Bereich der Physik wird vom Ursachbegriff gerade so viel gebraucht, wie der Begriff Bedingung umschreibt. Als Bedingungen eines Vorganges kommen natürlich

nur solche in Betracht, die wirklich beobachtet und mindestens prinzipiell realisiert werden können.

Geht unsere erste These, daß es Vorgänge gibt, die durch physikalische Bedingungen ein für allemal eindeutig bestimmt sind, schon über das hinaus, was Beobachtung je liefern kann, so ist dies in noch viel höherem Maße mit folgender Verschärfung der Fall: zu allen phänomenalen Vorgängen existieren Bedingungskomplexe, durch die sie eindeutig festgelegt sind. Dieses Postulat — es ist der wesentlichste Inhalt des Kausalgesetzes — ordnet jedes Phänomen in eine zeitlich gerichtete funktionale Reihe ein. Noch einen Schritt weiter geht die in der physikalischen Literatur übliche Formulierung: durch die Gegenwart ist die Zukunft eindeutig bestimmt. Das kann nur folgendes bedeuten: wenn wir einen Augenblicksquerschnitt durch die physikalische Wirklichkeit genau kennen, so können wir den Zustand der Welt in jedem späteren Zeitpunkt genau berechnen. Um aber die Idee der genauen Kenntnis eines Augenblicksquerschnitts konzipieren zu können, muß man die Voraussetzung machen, daß alle Phänomene des Querschnitts selbst wieder in funktionaler Beziehung stehen. Wir werden also das Kausalgesetz durch folgende Postulate definieren:

1. Alle Vorgänge der physikalischen Wirklichkeit sind durch physikalische Bedingungen eindeutig bestimmt. Oder: alle physikalischen Vorgänge und Zustände sind determiniert.

2. Auch für jeden Augenblicksquerschnitt besteht ein durchgängiger Bedingungs Zusammenhang.

Übrigens ist diese Formulierung im wesentlichen die Kants.<sup>1)</sup> [Es herrscht nicht immer Klarheit darüber, was man als Kausalgesetz ansehen will. Vielfach findet man es lediglich als Ausdruck für die Existenz von „Kausalketten“ hingestellt, d. h. für die Existenz unmittelbar erlebter Reihen von Ursachen und Wirkungen. Aber wenn man auch weitergeht und die Forderung aufstellt, daß jedem Vorgang ein Ursachkomplex zugeordnet sein müsse, so bleibt doch meist die Frage unerörtert, ob nun aus jedem Ursachkomplex die Wirkung mit strenger Notwendigkeit folgen müsse (was nicht selbstverständlich ist), oder ob auch „Zufallsfolgen“ zugelassen sind. M. a. W.: sind die Kausalketten eine Art „freier Wahlfolgen“ oder werden sie von strengen Gesetzen beherrscht?]

<sup>1)</sup> Kritik der reinen Vernunft: „Alles, was geschieht, setzt etwas voraus, worauf es nach einer Regel folgt.“ Dazu kommt die dritte Analogie der Erfahrung: „Alle Substanzen, sofern sie zugleich sind, stehen in durchgängiger Gemeinschaft.“

Als besonders tiefgehend erscheint das erste Postulat. Nun existieren jedenfalls phänomenale Vorgänge, die ihm nicht genügen: alle statistischen Tatsachen, z. B. alle Glücksspiele, jeder Würfelwurf. Halten wir uns streng an die empirische Bedeutung, die wir dem Terminus „physikalische Bedingung“ gegeben haben, so ist der Ausfall eines Würfelwurfes durch die verfügbaren Bedingungen prinzipiell nicht festlegbar. Will man das Kausalprinzip auch in solchen Fällen aufrechterhalten, so ist man gezwungen, unbekannte, dem Zugriff des Experimentators prinzipiell unzugängliche „Ursachen“ einzuführen, „ideale Gebilde“ wie in der Mathematik, die bewirken sollen, daß der Vorgang „in Wirklichkeit“ doch determiniert ist. Aber existiert für den Physiker etwas prinzipiell Unbeobachtbares? Man wende nicht ein, daß ohne das Postulat von der Determiniertheit alles Geschehens Physik nicht möglich wäre: die statistische Physik beweist das Gegenteil. Wenn wir also unter „Bedingung“ stets angebbare und realisierbare Bedingung verstehen, so kann das erste Postulat nicht allgemein gültig sein. Nun gehören allerdings die eben erwähnten Tatsachen (Glücksspiele) nicht in das Zentrum der Physik. Wir fragen daher: kann es auch mitten im Bereich physikalischer Beobachtungen nicht determinierte Vorgänge geben? Wenn ja, unter welchen Bedingungen und in welchen Grenzen gilt dann das Kausalgesetz? Und schließlich: welches sind die Voraussetzungen dafür, daß auch bei nicht determinierten Vorgängen noch Aufstellung funktionaler Zusammenhänge möglich ist?

Offenbar erfordert die Behandlung dieser Fragen eine genaue Analyse der Methoden bei der Beobachtung.

Zuvor aber noch einige Bemerkungen. Schon in unserer Problemstellung erscheint das Kausalgesetz ausdrücklich als Postulat, als Forderung an die Wirklichkeit, die wie andere Forderungen entweder erfüllt oder nicht erfüllt sein kann. Seiner erkenntnistheoretischen Struktur nach wäre es keine Kategorie mehr im Sinne Kants, aber auch kein Naturgesetz wie etwa das Brechungsgesetz. Denn das Naturgesetz ist die Formulierung bestimmter, konkreter Tatsachenzusammenhänge, das Kausalgesetz aber sagt etwas über die Art dieser Tatsachenzusammenhänge im allgemeinen aus. Es muß daher zwar aus der Erfahrung abstrahiert sein, gilt aber dann für alle Tatsachen von demselben Typus, indem es gleichsam zum Kriterium dafür wird, was überhaupt zum Typus dieser Tatsachen gehört. Solange man Grund hatte anzunehmen, daß alle Erfahrungs-

tatsachen dieselbe erkenntnistheoretische Struktur besäßen, mußte dieser empirische und postulatorische Charakter verborgen bleiben; den Fortschritt konnte die Naturwissenschaft selbst erst bringen dadurch, daß sie auf Tatsachen stieß, die einem anderen Typus angehören. Durch konkrete, einzelne Beobachtungen kann das Kausalprinzip nicht widerlegt werden; dazu bedarf es der Aufdeckung einer Gruppe besonderer Tatsachen, deren erkenntnistheoretische Struktur sich nicht mehr den Voraussetzungen des Determinismus fügt.

Während der empirische Charakter des Kausalbegriffs noch umstritten ist, ist der Begriff der Wahrscheinlichkeit längst als ein empirischer erkannt. Die Wahrscheinlichkeitsrechnung ist eine empirisch fundierte Wissenschaft, die die Aufgabe hat, Zusammenhänge und Abhängigkeiten beobachtbarer Erscheinungen darzustellen, vorausgesetzt nur, daß diese bestimmten Voraussetzungen genügen. Um diese zu finden, geht man von bekannten Erscheinungen aus, etwa von den Verhältnissen bei Glücksspielen. Man stellt die Grundgesetze der Wahrscheinlichkeitsrechnung zusammen, reduziert sie auf die Mindestzahl, erhebt diese zu Axiomen und definiert so den Begriff der Wahrscheinlichkeit implizit.<sup>1)</sup> Es ist dies das Verfahren, das überall in den exakten Naturwissenschaften angewandt wird: man stellt die empirischen Grundtatsachen und Forderungen in möglichster Vollständigkeit zusammen. Dann sucht man einen mathematischen Symbolismus aufzufinden, der diesen Forderungen genügt und durch sie eindeutig bestimmt wird. Das so entstehende formale Axiomensystem kann dann überall da angewandt werden, wo die phänomenalen Tatsachen dieselbe Struktur haben, wie sie in den Axiomen des mathematischen Formalismus niedergelegt ist.

Man sieht die Analogie zum Determinismus: hier wie dort muß das Beobachtungsmaterial gewissen Forderungen genügen, damit man es auf bestimmte Weise symbolisch erfassen kann.

Doch ist es nun an der Zeit, diese Forderungen aufzustellen, die Analyse des Beobachtungsmaterials durchzuführen.

An einem beliebigen Vorgang stellt der Physiker zunächst die unabhängig voneinander meßbaren Seiten fest. Jede dieser durch Zahlwerte ersetzbaren Seiten repräsentiert er durch eine physikalische Größe. Eine physikalische Größe ist daher nichts weiter

<sup>1)</sup> Siehe R. v. Mises, *Mathematische Zeitschrift*, 5, S. 52ff.

als ein Gebilde, das auf Grund von Experimenten durch bestimmte Zahlen ersetzt werden kann. Umgekehrt: Jeder Zahlwert, den man einer physikalischen Größe zuschreibt, muß als Ergebnis eines möglichen Experimentes angesehen werden. Nicht zu verwechseln ist die physikalische Größe mit den verschiedenartigen mathematischen Gebilden, durch die man auf Grund physikalischer Forderungen die Größen ersetzen kann. Davon später mehr.

Gehen wir zunächst von den direkten phänomenalen Vorgängen aus, die uns in Raum und Zeit unmittelbar entgegentreten. Will man nun dem Postulat von der durchgängigen Determiniertheit alles Geschehens Rechnung tragen, so muß man bei jedem Vorgang gerade so viel meßbare Seiten, d. h. physikalische Größen, auffinden können, daß durch sie der Vorgang eindeutig bestimmt ist. Wir wollen uns die Konsequenzen hinsichtlich unserer Beobachtungsmöglichkeiten und der Struktur der Tatsachen selbst überlegen.

Greifen wir einen bestimmten Zeitpunkt heraus, so müssen wir in diesem — mindestens prinzipiell — Lage und Zustand durch Experimentreihen mit beliebiger Genauigkeit angeben können, d. h. jede der voneinander unabhängigen physikalischen Größen des betrachteten Systems muß sich im Limes durch eine bestimmte Zahl ersetzen lassen. Wenn man z. B. mehrere Jahre hindurch immer zu demselben Zeitpunkt — an einem bestimmten Tag, zu einer bestimmten Stunde, Minute und Sekunde — die Lage eines Fixsternes beobachtet, so muß man im Prinzip imstande sein, diese Beobachtung immer genauer und genauer zu machen. Ich sage im Prinzip, die zufälligen technischen Mängel der Instrumente bleiben außer Betracht. Jede Bestimmung des Zustandes eines Systems in einem bestimmten Zeitpunkt ist prinzipiell wiederholbar; die Ergebnisse aller Beobachtungen — als unendliche Folge gedacht — streben einem Grenzwert zu. Exakt formuliert: Ist die Lage des Systems durch  $f$  Koordinaten bestimmt (hat das System  $f$  Freiheitsgrade), so müssen mindestens  $2f$  physikalische Größen (Lage- und Impulskoordinaten) gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit bestimmbar sein.

Zweitens muß es möglich sein, eine Reihe derartiger Orts- und Zustandsbestimmungen für verschiedene Zeitpunkte aufzustellen, ohne daß jedesmal die vorhergehende Bestimmung den Ausfall der folgenden beeinflusst. Es wäre ja immer noch möglich, daß zwar eine Momentanbestimmung mit beliebiger Genauigkeit

ausgeführt werden könnte, daß sie aber das beobachtete System so beeinflusste, daß der Ausfall der folgenden Beobachtung immer von der Tatsache der vorhergehenden abhinge. Es ließe sich in diesem Falle niemals eine objektive Bewegung konstatieren, niemals eine zeitliche Folge von Beobachtungen angeben, die von der Tatsache der Beobachtung unabhängig wäre. Wir machen daher die weitere Voraussetzung: es sollen sich „beobachtungsunabhängige“ Meßreihen herstellen lassen, aus denen dann „objektive“, in sich geschlossene Funktionalzusammenhänge ableitbar sind.

Das Wesen dieser zweiten Voraussetzung möge folgendes Beispiel verdeutlichen: Hätten wir zur Feststellung von Ort und Zustand eines mechanischen Systems lediglich das Mittel zur Verfügung, mit einer sehr feinen Nadel den Gegenstand anzustoßen, also im wesentlichen nur den Tastsinn, so könnten wir nur bei sehr massiven Körpern den Bewegungszustand zu verschiedenen Zeiten objektiv ermitteln. Bei allen bewegten Körpern der Dimension von Staubkörnchen hätte die „Beobachtung“ sofort zur Folge, daß das Partikelchen aus seiner Bahn herausgestoßen würde. Jede Beobachtung würde den Zustand der Körper mit Notwendigkeit verändern, ein geschlossener, objektiver Funktionalzusammenhang wäre überhaupt nicht feststellbar. Denkt man sich vernunftbegabte Wesen, denen nur der Tastsinn zur Verfügung stünde, so wäre für sie schon bei allen Körpern von Staubkorngröße unsere zweite Voraussetzung prinzipiell nicht mehr erfüllt, durch noch so große Verfeinerung der tastenden Instrumente wäre die Rückstoßwirkung nicht auszuschalten.

Diese Voraussetzung, daß die Beobachtung den Ablauf des Geschehens nicht beeinflusst, daß der Beobachter, sobald einmal der Bedingungs Zusammenhang hergestellt ist, für den Vorgang ohne Bedeutung bleibt, verbürgt die Möglichkeit der Wiederholbarkeit ganzer Versuchsreihen.

Auf Grund ausreichender Experimentfolgen können wir jetzt jedem System mehrere unabhängig nebeneinander bestehende Zahlenreihen zuordnen. Praktisch kann man natürlich immer nur soweit kommen, wollte man sich aber bei allen direkt durch die Anschauung erfaßten Vorgängen, die doch kontinuierlich in Raum und Zeit ablaufen, damit begnügen, so bekäme man ein ungenaues Bild der Wirklichkeit. Um die Zuordnung vollständig zu machen, muß man hinzufügen, daß im Grenzfall beliebig dichte Meßreihen aufgestellt werden könnten. Darin steckt ein weiteres,

über die Erfahrung hinausgreifendes Postulat. Hat man etwa bei einer Bahnbestimmung eine Reihe diskreter Punkte experimentell festgelegt, so soll es erstens stets möglich sein, zwischen diesen Punkten noch weitere zu bestimmen, d. h. es soll sich eine Folge von Meßreihen angeben lassen, bei der die Dichte der Werte immer größer wird; zweitens soll sich diese Folge — beliebig weit fortgesetzt — immer mehr einem bestimmten Grenzwert, der idealen Bahnkurve, annähern. Es wird hier zum zweiten Male die Fiktion einer unendlichen Versuchsfolge gemacht und die Existenz eines Grenzwertes postuliert.

Wir fassen die Postulate nochmals zusammen:

1. Ist ein System von  $f$  Freiheitsgraden gegeben, so lassen sich in einem bestimmten Zeitmoment gleichzeitig — d. h. in einer einzigen Messung — gerade  $2f$  unabhängige mechanische Größen beliebig genau bestimmen. (Das „beliebig genau“ postuliert die Existenz eines ersten Grenzwertes.)

2. Derartige Messungen lassen sich zu verschiedenen Zeitpunkten unabhängig voneinander ausführen. Der Ausfall der entstehenden Meßreihen ist unabhängig erstens von der Tatsache der Messung, d. h. von irgendwelchen Einflüssen der Beobachtungsinstrumente, zweitens von der Existenz anderer Systeme; d. h. es ist immer möglich, das betrachtete System gegen störende Faktoren zu isolieren, ein in sich abgeschlossenes System herzustellen.

3. Die verschiedenen einem mechanischen System zugeordneten Meßreihen lassen sich im Prinzip durch Versuchsfolgen beliebig dicht machen. Es wird also die Existenz eines zweiten Grenzwertes gefordert.

Durch die Postulierung der Grenzwerte ist die aller Empirie anhaftende Wahrscheinlichkeitsschwankung wenigstens idealiter eliminiert. Jeder physikalischen Größe können auf Grund von Experimenten exakte Zahlwerte zugeordnet werden, und vor allem: die Reihe dieser Zahlwerte ist stetig. Infolgedessen entspricht prinzipiell jeder physikalischen Größe das Kontinuum der reellen Zahlen, sie kann daher durch mathematische Gebilde symbolisiert werden, die im Gebiet der reellen Zahlen veränderlich sind. Die der „klassischen“ physikalischen Größe entsprechenden mathematischen Formen gehören somit der „klassischen“ Mathematik an, der Funktionentheorie, der Analysis, die sich auf der Menge der reellen Zahlen aufbaut.

Gibt es nun Tatsachenbereiche, in denen die Postulate erfüllt sind? Zunächst, was heißt „erfüllt“? Offenbar nichts anderes, als daß die Annahme mit keiner Erfahrung der betreffenden Gruppe in Widerspruch steht. Selbstredend lassen sich gerade die beiden Grenzwertpostulate niemals direkt verifizieren, aber es genügt, wenn sich ihre Geltung nicht als widerspruchsvoll herausstellt. Tatsachenbereiche, die den Forderungen genügen, gibt es in der Tat: alle Erscheinungen der makroskopischen (phänomenologischen) Physik gehören hierher: Der ganze Tatsachenkomplex, der der klassischen und relativistischen Mechanik und Elektrodynamik zugrunde liegt. Die Postulate setzen uns in den Stand, auf empirischer Basis die Grundlagen dieser ganzen deterministischen Feldphysik zu entwickeln und die relativistische Raumzeittopologie (etwa in der Form Carnaps) aufzubauen.

Auf Grund der beiden ersten Postulate vor allem ist es möglich, jeden beobachteten Vorgang in einen Komplex von endlich vielen, selbst wieder beobachtbaren und daher willkürlich realisierbaren Bedingungen einzuschließen, von denen er vollständig beherrscht und eindeutig in seinem Ablauf bestimmt wird. Diese Tatsache, daß es gelingt, jede beobachtete Erscheinung in ein in sich abgeschlossenes System einzureihen, nach allen Seiten zu isolieren und durch eine ausreichende Zahl physikalischer Größen eindeutig festzulegen, ist gleichbedeutend mit der Gültigkeit des eingangs erwähnten Prinzips des durchgängigen Determinismus.

Aber der Experimentator bleibt bei diesen phänomenologischen Erscheinungsgruppen nicht stehen, neue Tatsachengebiete werden „adjungiert“ und machen die Gültigkeit der Postulate problematisch. Und diese Problematik hat sich zu einer Krisis ausgewachsen, die damit vor allem eine Krisis des Determinismus, der durchgängigen Gültigkeit des Kausalgesetzes, wird. Man weiß, daß diese Bewegung durch die Quantentheorie ausgelöst wurde. Die ganze Unsumme der ins Gebiet der Quantenerscheinungen und der Atomtheorie gehörigen Tatsachen haben zur Annahme gewisser mikromechanischer Systeme geführt, die man sich natürlich zunächst in Analogie zu den Systemen der klassisch-phänomenologischen Mechanik dachte. Aber man darf von vornherein nicht die charakteristischen Unterschiede übersehen, die vor jeder speziellen Theorie bestehen: Die klassischen Systeme sind direkte Bilder phänomenaler Vorgänge, man kann diese unmittelbar und eindeutig auf jene abbilden. Die mikromechanischen Systeme

dagegen — Elektronen-, Protonen- und Atomkomplexe — können in keiner Weise in die entsprechenden Phänomene — in der Hauptsache die ungeheure Fülle spektroskopischer Tatsachen — „hineingesehen“ werden, denn die Struktur der Linienspektren, Ladungsänderungen beim Photoeffekt usw. haben nichts mit der Struktur der zu ihrer Erklärung ersonnenen Elektronensysteme zu tun. Die Phänomene sind hier nur Signale, daß in einer ganz anderen „Dimension“ etwas los ist. Makromechanische Systeme sind lediglich mathematische Schematisierungen, formale Gerüste anschaulicher Vorgänge, also selbst in gewisser Weise anschaulich. Demgegenüber gehören die Mikrosysteme einer ganz anderen Ebene an wie die Erscheinungen, die von ihnen Kunde geben. Die Anschaulichkeit der Makromechanik wird dadurch erreicht, daß man direkt von den Erscheinungen ausgeht und ihnen ein unmittelbares analytisch-geometrisches Gerüst unterlegt; die vermeintliche Anschaulichkeit eines Atoms — etwa als eines Planetensystems — wird konstruiert, gefordert durch Übertragung makroskopischer Bilder und Gesetze, durch Analogieschlüsse, wobei die Struktur der zugehörigen spektroskopischen und chemischen Daten kein anschauliches Vorbild ist. Die Termini „anschaulich“ und „unanschaulich“ werden hier also in folgendem Sinne gebraucht: Die Anschaulichkeit eines klassisch-mechanischen Systems bedeutet die Möglichkeit, Phänomen und Schema eindeutig aufeinander abzubilden; die Unanschaulichkeit der mikromechanischen Systeme bedeutet die Unmöglichkeit, die Struktur des Systems mit der der Erscheinung zur Deckung zu bringen, aus ihr direkt abzulesen.

Diese Sachlage erfordert natürlich eine besondere Vorsicht bei der Verwendung klassischer Begriffe in diesen direkter Anschauung unzugänglichen Gebieten, gleichwohl wird man eine solche Übertragung zunächst versuchen. Ein derartiges Verfahren, das auf einer Art Prinzip der Permanenz der Grundbegriffe und -gesetze beruht, wird ja die Wissenschaft zunächst immer einschlagen. Erst wenn man dabei auf Widersprüche stößt, wie es der nunmehr „klassischen“ Atomphysik tatsächlich erging, wird man an eine Revision der Grundlagen denken müssen.

Unter den Beobachtungstatsachen, auf die die Atomphysik aufbaut, sind zwei Gruppen von besonderer Bedeutung: einmal die Strahlungserscheinungen, vor allem die Spektren, sodann alle Beobachtungen über Zusammenstöße von Elektronen mit Atomen (die von Frank und Hertz begründeten Stoßversuche). Beide

zeigen, daß das weite Gebiet der atomaren Erscheinungen von Diskontinuitäten, von merkwürdigen ganzzahligen Verhältnissen durchwaltet ist, die die klassische Atommechanik in den berühmten Quantenzahlen und Quantisierungsvorschriften zu erfassen versuchte. Neben den gewohnten kontinuierlichen Größen tauchen hier neue Größen auf, die nur bestimmte diskrete Werte annehmen können. Die Beziehung einer physikalischen Größe zu den Zahlenwerten, deren sie fähig ist, wird allgemeiner: während der klassischen Größe stets ein Zahlkontinuum entspricht, kann der Quantengröße ein beliebiges — diskontinuierliches oder stetiges — Wertschema zugeordnet sein. Das ist das erste Merkmal, die erste Verallgemeinerung, die die empirische Grundlage der Mikrophysik kennzeichnet.

Die experimentelle Forschung ist stets mit (wenn auch einfachen) theoretischen Vorstellungen verwoben. Diese Vorstellungen sind allerdings mehr ein Rahmen, der in mannigfacher Weise ausgefüllt werden kann, aber sie beeinflussen die Richtung des experimentellen Forschens und zeichnen der theoretischen Entwicklung bestimmte Richtlinien vor. So hat sich aus der Menge des mikrophysikalischen Tatsachenmaterials der Begriff eines Elementargebildes entwickelt, des Elektrons, Protons usw., dessen Existenz durch unzählige Versuche gesichert ist, und das selbst wieder Voraussetzung und sinngebend ist für Ketten neuer Experimente. Es wurde schon auf die Diskrepanz hingewiesen, die zwischen den Erscheinungen und derartigen elementaren Systemen besteht und die eine weitgehende Freiheit in der Ausgestaltung dieser Systeme zuläßt; vielleicht besteht sogar prinzipielle Mehrdeutigkeit in der Interpretation der Erfahrungstatsachen, wie man aus dem Streit zwischen korpuskularer und undulatorischer Auffassung von Licht und Materie schließen könnte. Aber derartige Möglichkeiten sollen uns zunächst nicht kümmern. Wir wollen uns lediglich mit der Struktur der empirischen Basis beschäftigen, auf die beide Theorien zurückgreifen müssen.

Obwohl der Experimentalphysiker mit dem Begriff des Elektrons arbeitet, braucht er seine Struktur, seine Mechanik nicht von vornherein zu kennen. Worüber er sich aber klar sein muß, ist die Frage, wie er das Elektron messend erfassen kann, wie er überhaupt auf Grund seiner Messungen zur Konstitution derartiger mikroskopischer Elementargebilde kommt. Um diesem Problem näherzutreten, gehen wir in zwei Schritten vor: Zunächst fragen wir, was prin-

zipiell an einem mikromechanischen System meßbar ist, und dann, wie man praktisch zu Aussagen über das Elektron kommt. Die erste Frage führt zu dem berühmten Gedankenexperiment von Heisenberg<sup>1)</sup>, die zweite zeigt uns, wie man überhaupt empirisch zum Begriff derartiger Elementargebilde gelangt. Beide legen wesentliche Züge der Struktur atomarer Tatsachen bloß.

Soll es einen Sinn haben, von Lage und Geschwindigkeit als mikromechanischen Größen zu reden, so müssen Experimente angebbar und ausführbar sein, die gestatten, Lage und Geschwindigkeit zu messen. Die Lage eines Elektrons könnte man nach Heisenberg im Prinzip vermittelt eines „ $\gamma$ -Strahlenmikroskopes“ festlegen, indem man das Partikelchen mit möglichst kurzwelligem Lichte ( $\gamma$ -Strahlen) beleuchtete. Aber in dem Augenblick, in dem ein Lichtquant, von der Beleuchtungsquelle herkommend, auf das Elektron trifft, erleidet dieses einen Rückstoß, der um so größer wird, je größer die Frequenz des Lichtquants ist. Das ist der berühmte Comptoneffekt, der als eine der fundamentalsten Tatsachen der Quantenphysik anzusehen ist. Je genauer also die Ortsbestimmung sein soll, desto stärker wird das Elektron aus seiner Bahn geworfen, desto mehr ändert sich sein Bewegungszustand, mathematisch gesprochen, sein Impuls. Der Comptonrückstoß bewirkt, daß die Impulsbestimmung um so ungenauer ausfallen muß, je genauer die Bestimmung der Lagekoordinaten ist. Eine exakte gleichzeitige Bestimmung sowohl der  $f$  Lage- wie der  $f$  Impulskoordinaten eines mikromechanischen Systems von  $f$  Freiheitsgraden ist also unmöglich. Zwar könnte man umgekehrt versuchen, die Impulsgrößen, d. h. den Bewegungszustand des Systems mit möglichster Schärfe zu fixieren. Das ginge prinzipiell mit Hilfe des Dopplereffektes, indem man einen Lichtstrahl an dem Elektron reflektierte oder beugte und aus der Frequenzänderung die Geschwindigkeit ermittelte. Um aber wirklich von einer bestimmten Geschwindigkeit in dem betreffenden Moment reden zu können, muß man den Comptonrückstoß, der diese Geschwindigkeit ja momentan ändert, möglichst ausschalten, also Licht geringer Frequenz oder großer Wellenlänge zur Beleuchtung wählen. Über die weitere Schwierigkeit, eine derartige Messung auf einen bestimmten Zeitpunkt zu beziehen, vergleiche man Kennard, „Zur Quantenmechanik einfacher Bewegungs-

---

<sup>1)</sup> Vgl. Zeitschrift für Physik, 43 (1927), S. 172.

typen<sup>1)</sup> Jedenfalls ist es unmöglich, in einer einzigen Messung sowohl die Lage wie die Geschwindigkeit des Elektrons beliebig genau zu bestimmen. Für die Genauigkeit, mit der gleichzeitig die Lage- und Impulskoordinaten gemessen werden können, besteht vielmehr eine untere Schranke, die sich in folgender Ungenauigkeitsrelation ausdrückt:

$$\Delta p \cdot \Delta q \geq \frac{h}{2}.$$

Hierin ist  $\Delta p$  die Ungenauigkeitsspanne der Impulskoordinate  $p$ ,  $\Delta q$  die der Lagekoordinate  $q$ ;  $h$  ist die bekannte Plancksche Konstante. Die Ungleichung zeigt in der Tat, daß, je größer die Ungenauigkeitsspanne von  $p$  ist, desto kleiner die Unsicherheit in bezug auf  $q$  wird und umgekehrt. Vor allem geht aus ihr hervor, daß die Genauigkeitsschranke für die gleichzeitige Bestimmung des Gesamtzustandes eines Mikrosystems eine prinzipielle, auf keine Weise vermeidbare ist. Das widerspricht aber bereits unserem ersten Postulat. In der Mikromechanik sind nicht mehr mindestens  $2f$ , sondern nur noch höchstens  $f$  physikalische Größen desselben Systems gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit meßbar. Kurz: der Gesamtzustand eines Systems in einem gegebenen Zeitpunkt ist nicht scharf fixierbar.

Denkt man sich nun speziell die Lagekoordinaten eines Systems mit sehr großer Genauigkeit für verschiedene Zeitpunkte bestimmt, so wird nach jeder einzelnen Messung infolge des Comptonrückstoßes die Bahn und die Geschwindigkeit des Elektrons gestört. Wir stellen damit eine Bewegung fest, die in ihren Einzelheiten erst durch den Akt der Beobachtung erzeugt wird. Wir messen bei einem einzelnen Elektron gar nicht eine objektive Bahn, sondern eine Bahn, die durch unsere Beobachtung überhaupt erst entsteht.

Zwei klassische Begriffe werden durch diese Erkenntnis, deren exakter Ausdruck die angeführte Ungenauigkeitsrelation ist, in grundlegender Weise verwandelt. Vor allem der Begriff des Experimentes. Klassisch versteht man darunter die Herstellung und Isolierung eines geschlossenen Bedingungs Zusammenhangs, der einen objektiven, von dem Beobachter (nach Herstellung der Bedingungen) und von unkontrollierbaren Faktoren unabhängigen phänomenalen Vorgang auslöst. In der Mikromechanik ist nun der Beobachter prinzipiell nicht mehr eliminierbar, er geht in jedem

<sup>1)</sup> Zeitschrift für Physik, 44 (1927), S. 340.

Moment der Beobachtung in den Bedingungskomplex ein als wirkender Faktor, so daß sich prinzipiell ein in sich völlig abgeschlossenes System nicht mehr herstellen läßt. Das Experiment besteht also in einer unlöslichen Wechselwirkung zwischen dem beobachtenden Subjekt und den Erscheinungen, die Wirklichkeit tritt nicht — wie es Auffassung des seitherigen physikalischen Realismus war — als in sich selbständige, isolierte Realität dem nur als Zuschauer gewerteten Beobachter dualistisch gegenüber, die scharfe Grenze zwischen Subjekt und „objektiver“ Wirklichkeit verwischt sich zusehends. Ist selbstverständlich auch jede Scheidung der naiven Bewußtseinswirklichkeit in einen subjektiven und einen objektiven Anteil willkürlich, so war es seither doch gerade der Physik gelungen, diesen objektiven, und das bedeutet doch wohl: gesetzmäßigen, unbeeinflußbaren Teil zu isolieren, und zwar mit Hilfe des Experimentes, das zu einer Wirklichkeit führen sollte, die „an sich“, d. h. auch ohne daß sie ausgemessen und beobachtet wurde, gerade so bestehen sollte, wie die Messungen zeigen. Der Comptoneffekt lehrt aber, daß eine solche bewußtseins-transzendente Welt auch für den Physiker nicht existiert: Die mikromechanische Wirklichkeit existiert so, wie wir sie messen, eben nur in dem Augenblick, in dem wir die Messungen ausführen. Die als selbstverständlich betrachtete Annahme, daß die Vorgänge sich auch dann, wenn wir sie nicht beobachten, genau so abspielen, wie wir sie beobachtet haben, ist eine Hypothese. Diese Einsicht ist jedenfalls eines der wichtigsten erkenntnistheoretischen Ergebnisse der Quantentheorie. Wenn wir den Begriff Existenz in seiner schlichten empirischen Bedeutung nehmen und wenn Plancks Formel, daß physikalisch nur das existiere, was gemessen wird, zu Recht besteht, so existiert die mikromechanische Wirklichkeit überhaupt nur dann, wenn sie gemessen wird. Das ist die notwendige Folge der Tatsache, daß jede Messung einen ganz neuen Vorgang schafft.

Damit erhält auch der Begriff der physikalischen Größe einen etwas anderen Inhalt. Zumindestens tritt der empirische Charakter des Größenbegriffs auf das deutlichste hervor. Nach seitheriger Auffassung ist es ohne weiteres möglich, auch unabhängig vom Experiment einer physikalischen Größe ein bestimmtes Wertgebiet, etwa die Menge der reellen Zahlen, zuzuordnen. Es kann auch unabhängig von der Messung vom Zahlwert einer Größe gesprochen werden, das Experiment macht uns diesen Wert nur

bekannt. Das ist in der Quantenphysik unmöglich. Die grundlegende Einsicht, daß jede Bestimmung des Wertes einer mikro-mechanischen Größe diesen Wert beeinflußt, zwingt zu der Auffassung, daß es keinen Sinn hat, unabhängig vom Experiment der Größe einen bestimmten Wert zuzuordnen. Die mikro-mechanischen Größen erhalten bestimmte Werte erst durch die Experimente, durch die sie gemessen werden sollen. Unabhängig von diesen Messungen von dem Zahlwert einer Größe zu reden, hat keinen Sinn. Nebenbei bemerkt hat die Quantenphysik auch deutlich erkennen lassen, daß drei Bestandteile am Begriff der physikalischen Größe zu unterscheiden sind: erstens die Größe lediglich als meßbare Seite einer Erscheinung, zweitens die Zahlwerte, die man auf Grund von Messungen dieser Größe zuordnet; drittens das mathematische Gebilde, durch das der Theoretiker, von irgendwelchen physikalischen Forderungen geleitet, den physikalischen Größenbegriff ersetzt.

Wir kommen nun zu unserem zweiten Problem: Welches sind die grundsätzlichen Möglichkeiten, empirisch zu einer Definition mikromechanischer Elementargebilde, also des Elektrons, zu gelangen? Es handelt sich hier um eine abstrakte Konstruktion, um ein System, das als solches unserer direkten Wahrnehmung nicht zugänglich ist. Was wir mit unseren Instrumenten wirklich sinnlich erfassen können, sind stets die Wirkungen von gewaltigen Schwärmen, die aus den erwähnten Elementargebildern bestehen, von Elektronenströmen. Die Wirkung einer Elektronengesamtheit ist also empirisch das Primäre, von ihr ist auszugehen bei der Bestimmung des Individuums. Und da physikalische Systeme letzten Endes nur auf Grund gesicherter empirischer Feststellungen eingeführt werden dürfen, so beruht die Existenz des Einzelelektrons lediglich auf den Beobachtungen, die an Gesamtheiten, nicht aber an Individuen dieser Gesamtheiten gemacht wurden. Erst auf dem Umweg über derartige Elektronenmassen, also abzählend, statistisch, kommt man zu Aussagen über das Elektron selbst, m. a. W. das Elektron ist empirisch nur durch statistische Gesamtheiten definierbar.

Diese schroffe Formulierung steht nun allerdings in einem gewissen Gegensatz zu den Betrachtungen des Heisenbergschen Gedankenexperiments. Herr Professor v. Aster hatte die Güte, mich darauf aufmerksam zu machen und die charakteristische Bedeutung dieses scheinbaren Bruchs zu klären. Unstreitig be-

sagt das Heisenbergexperiment, daß es im Prinzip möglich ist, das einzelne Elektron zu beobachten. Aber man darf nicht vergessen, daß diese Beobachtung eine unvermeidbare Grenze hat, daß das einzelne Elektron niemals restlos bestimmt werden kann. Innerhalb der Grenzen der möglichen Determinierbarkeit kann das eine Elektron völlig durch ein anderes ersetzt werden. Die Beobachtung liefert also zwar ein einzelnes Gebilde, aber — worauf wir sogleich zurückkommen werden — kein Individuum im klassischen Sinne. Diese Unbestimmtheit nun, die es gestattet, ein Elektron einfach durch ein anderes zu ersetzen, ist äquivalent mit der Behauptung, daß das Einzelgebilde statistisch aus einer Gesamtheit heraus zu definieren sei. Die charakteristische Unschärfe, die jeder experimentellen Zustandsbestimmung eines Einzelsystems anhaftet, läßt sich eben auch so interpretieren, daß die statistische Gesamtheit das Primäre, das Elektron dagegen ein abgeleitetes, sekundäres Gebilde sei. Es besteht also eine für den ganzen Problemkreis fundamentale Äquivalenz: Der Satz von der prinzipiellen Ungenauigkeit bei der Bestimmung eines mikromechanischen Elementarsystems ist erkenntnistheoretisch völlig gleichbedeutend mit der Behauptung, daß derartige Elementarsysteme nur auf dem Umweg über statistische Gesamtheiten erfaßbar sind.

Etwas anschaulicher ausgedrückt würde das heißen, daß jene plastische Individualität, wie sie uns in der Welt der Wahrnehmungen entgegentritt, dem einzelnen Elektron nicht zukommt.

Diese fundamentale Tatsache bedingt einen erkenntnistheoretischen Unterschied zwischen einem Elementargebilde der klassischen Mechanik (etwa einem Massenpunkt), das als solches prinzipiell direkt meßbar sein muß, und dem Elementargebilde der Mikromechanik. Das erste ist in seiner Individualität der Beobachtung zugänglich, das zweite nicht; seine individuelle Bewegung bleibt uns verschlossen, und zwar nicht nur praktisch, sondern wie das Heisenbergsche Gedankenexperiment zeigt, auch prinzipiell. Aus dem, was uns empirisch allein zugänglich ist, läßt sich die Bewegung des einzelnen Elektrons nicht ermitteln. Das Elementargebilde der Quantenmechanik ist als Individuum jedenfalls durch die prinzipiell allein in Frage kommenden Bedingungen nicht eindeutig bestimmbar. Damit ist nun die erste Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Wahrscheinlichkeitsrechnung gegeben. Denn Wahrscheinlichkeitsrechnung hat natürlich nur

da Sinn, wo bestimmte Vorgänge nicht eindeutig aus den verfügbaren Bedingungen folgen; anders ausgedrückt, wo die Zuordnung der Merkmale — z. B. der Zahlen 1 bis 6 beim Würfelspiel oder der Richtungen des Elektrons nach dem Stoß bei den Stoßvorgängen — zu den Elementen des betreffenden Kollektivs (dem einzelnen Würfelwurf bzw. dem Stoß des Lichtquants) regellos ist, wo kein heimliches „Spielsystem“ herrscht.

Die zweite Voraussetzung für die Anwendung von Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen ist von selbst erfüllt. Sie fordert bekanntlich die Existenz eines Grenzwertes der relativen Häufigkeit, mit der gewisse Merkmalzuordnungen innerhalb des Kollektivs auftreten. Beobachtet man etwa beim Comptoneffekt nach dem Stoß in einer ganz bestimmten Richtung, so soll die Anzahl der Male, wo das Elektron gerade in dieser Richtung fliegt, mit der Gesamtzahl der Stöße ein Verhältnis bilden, das sich mit wachsender Versuchszahl immer mehr einem festen Wert nähert. Diesen Wert bezeichnen wir als die Wahrscheinlichkeit, daß das Elektron nach dem Stoß gerade in dieser Richtung fliegt. Daß derartige Grenzwerte existieren, ist Erfahrungstatsache, die aber bereits in der Definition des Elektrons auf Grund der Beobachtungen an statistischen Gesamtheiten steckt. Denn die Konzeption des Elektronenbegriffes wäre ja von vornherein unmöglich, wenn nicht Elektronengesamtheiten derartige Gesetzmäßigkeiten zeigten, die sich dann in meßbaren makroskopischen Wirkungen äußerten. Selbstredend muß dann umgekehrt auf das Einzelelektron Wahrscheinlichkeitsrechnung anwendbar sein.

Sowohl die Ungenauigkeitsrelation also, nach der die Fixierung des Systemzustandes nur bis auf bestimmte, nicht vermeidbare Unsicherheitsintervalle erfolgen kann, als auch die Tatsache, daß das Elektron lediglich über statistische Gesamtheiten empirisch zugänglich ist, zeigen, daß der Begriff der Wahrscheinlichkeit von vornherein Bestandteil jeder theoretischen Deutung sein muß. Dies und nichts weiter ist der Sinn des vielgebrauchten Wortes von der apriori-Wahrscheinlichkeit. Man darf darunter nicht verstehen, daß Wahrscheinlichkeitsrechnung a priori im Sinne Kants auf die quantenmechanischen Tatsachen anzuwenden wäre. Gerade die Erfahrung ist es ja erst, die uns zur Aufgabe des Determinismus nötigt. Aber ist einmal die besondere Struktur der mikrophysikalischen Beobachtungsmöglichkeiten erkannt, so kann keine neu in diesem Zusammenhang auftauchende Tatsache

dieses Ergebnis aus der Welt schaffen. Es zeigt sich deutlich die eigenartige Stellung, die die Prinzipie des Determinismus und der apriori-Wahrscheinlichkeit einnehmen: sie beruhen auf Erfahrung, aber auf Erfahrung zweiter Ordnung gleichsam, sie sind Beobachtungen an Beobachtungen, insofern also für gewisse Gruppen von Tatsachen erster Ordnung apriori; das will sagen: durch Tatsachen dieser ersten Ordnung, also durch direkte Phänomene der Wirklichkeit, können sie nicht widerlegt werden, wohl aber durch Beobachtungen, Erfahrungen zweiter Ordnung an den einzelnen Gruppen von Tatsachen erster Ordnung. In diesem Sinne relativiert sich der Begriff des apriori. Es gibt Begriffe apriori nur für ganz bestimmte Einstellungen, unter ganz bestimmten Voraussetzungen und Forderungen an die Wirklichkeit, die ja an sich viel zu reichhaltig ist, als daß sie sich ein für allemal und in ihrem ganzen Umfange in ein festes Kategorienschema pressen ließe. Wenn auch der Kantsche apriori-Begriff nicht zu halten ist, so liegt das Problem doch auch wieder nicht so einfach, daß man sagen könnte, alle Begriffe schlechthin stammen aus der Erfahrung, denn dann wäre unverständlich, wieso das Kausalgesetz eine tatsächlich ganz andere Art von Gültigkeit hat als etwa das van der Waals'sche Gasgesetz.

So viel scheint jedenfalls deutlich, daß Determinismus und apriori-Wahrscheinlichkeit zwei an sich völlig gleichberechtigte Methoden sind, die Wirklichkeit zu deuten. Nur muß der Wahrscheinlichkeitsbetrachtung die größere Allgemeinheit zugesprochen werden, da sie den Determinismus und damit die ganze klassisch-makroskopische Physik als Spezialfall (unendlich große Wahrscheinlichkeit) in sich enthält. Und wenn es eines der Grundprinzipie der physikalischen Entwicklung ist, zu immer allgemeineren Gesetzen vorzudringen ist, in die die seither bewährten als Spezialfälle aufgehen, so erscheint dieser Übergang zur statistischen Grundlage durchaus gerechtfertigt.

Es sei beiläufig noch eine andere Folge unserer Definition des Elektronenbegriffs auf Grund statistischer Ergebnisse angeführt. Sie betrifft die Individualität dieses Elementargebildes. Während der Massenpunkt der Makrophysik auch im System prinzipiell unabhängig von allen anderen ist und mit ihnen nur durch bestimmte Kräfte in Wechselwirkung treten kann, ist eine derartige Isolierung für das Elektronenindividuum unmöglich. Weil lediglich von der Gesamtheit her definiert, ist es ohne die Gesamtheit, ohne Teilchen gleicher Art strenggenommen nicht existenzfähig. Das

Elektron ist also in gewisser Weise durch die Existenz anderer Elektronen in seiner Individualität beschränkt. Es darf uns daher nicht wundern, wenn die Theorie von anderen Gesichtspunkten her zu ähnlichen Ergebnissen gelangt; man wendet nämlich neuerdings auf ein Elektronengas nicht die gewöhnliche, sondern die sog. Fermistatistik an, nach der jedes Elektron nicht durch Kraftwirkungen, sondern lediglich durch die Existenz der anderen Elektronen in seiner Freiheit beeinträchtigt wird.

Damit wollen wir unsere Betrachtungen abschließen. Wir stellen noch einmal die wichtigsten Tatsachen zusammen:

1. Quantenmechanische Größen können nicht nur kontinuierlicher, sondern auch diskreter Zahlwerte fähig sein.

2. In einem mikromechanischen System von  $f$  Freiheitsgraden lassen sich in einer einzigen Messung höchstens  $f$  mechanische Größen (nicht mehr) beliebig genau fixieren. Für die Genauigkeit der Messung des Gesamtzustandes besteht eine untere Schranke.

3. Zustandsänderungen mikromechanischer Systeme sind durch physikalisch zugängliche Bedingungen nicht eindeutig, sondern nur statistisch bestimmbar. M. a. W. die mikromechanischen Elementarvorgänge sind nicht determiniert.

---