Lösung scheint dazwischen zu liegen, d. h. eine Spin-Bahn-Kopplung ist vorhanden, überwiegt aber nicht. Die Berechnungen für eine teilweise Kopplung sind umfangreicher als für jeden der beiden Grenzfälle, wurden aber von vielen Forschern [8] für verschiedene Kerne durchgeführt und haben eine sehr viel bessere Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment erbracht.

Das Schalenmodell hat ein großes Forschungsgebiet eröffnet und bildet den Ausgangspunkt für detailliertere Rechnungen. Es gibt genügend viele Kerne zu untersuchen, die „Schalenmodellisten" werden also so bald nicht arbeitslos sein.

Eingegangen am 17. Dezember 1963 [A 369]
Übersetzt von Dr. *H.-D. Zeh*, Heidelberg

[8] Literaturhinweise siehe bei *D. Kurath* in *K. Siegbahn:* Alpha, Beta, and Gamma Ray Spectroscopy. North Holland Pub., Amsterdam, erscheint 1964.

Ereignisse, Naturgesetze und Invarianzprinzipien

Nobel-Vortrag am 12. Dezember 1963 [*]

VON PROF. DR. EUGENE P. WIGNER
PALMER PHYSICAL LABORATORY, PRINCETON UNIVERSITY, PRINCETON, N. J. (USA)

Es ist für mich eine große und unerwartete Ehre, heute hier sprechen zu dürfen. Vor sechs Jahren haben *Yang* und *Lee* hier vorgetragen und einen Überblick über Symmetrieprinzipien im allgemeinen und ihre Entdeckung der Verletzung des Paritätsprinzips im besonderen gegeben [1]. Es ist nicht nötig zu wiederholen, was sie über die Geschichte der Invarianzprinzipien gesagt haben – dabei sicher meine eigenen Beiträge übertrieben darstellend. Ich möchte statt dessen die allgemeine Rolle der Symmetrie- und Invarianzprinzipien sowohl in der modernen wie in der klassischen Physik diskutieren. Genauer gesagt, möchte ich über die Beziehung zwischen drei Kategorien sprechen, die eine fundamentale Rolle in allen Naturwissenschaften spielen: Ereignisse, welche die Basis für die zweite Kategorie bilden, die Naturgesetze und die Symmetrieprinzipien, über die ich darlegen möchte, daß sie dasselbe Verhältnis zu den Naturgesetzen haben wie diese zu den Ereignissen.

I. Ereignisse und Naturgesetze

Es wird oft gesagt, die Aufgabe der Physik bestünde darin, die Natur oder zumindest die unbelebte Natur zu erklären. Was verstehen wir unter erklären? Es ist das Aufstellen weniger, einfacher Prinzipien, welche die Eigenschaften des zu Erklärenden beschreiben. Wenn wir irgend etwas verstehen, so sollte uns sein Verhalten, das sind die Ereignisse, durch die es repräsentiert wird, nicht überraschen. Wir müssen stets den Eindruck haben, daß es nicht anders sein könnte.

Es ist klar, daß die Physik nicht in diesem Sinne trachtet, die Natur zu erklären. In der Tat ergibt sich der große Erfolg der Physik aus einer Beschränkung ihrer Aufgaben: Die Physik bemüht sich nur, die Regelmäßigkeiten im Verhalten ihrer Objekte darzustellen. Dieser Verzicht auf das größere Ziel und die Einschränkung des Gebietes, für das eine Erklärung gesucht werden kann, scheinen uns heute eine offensichtliche Notwendigkeit. Tatsächlich könnte man die Beschränkung des Erklärbaren als die größte bisherige Entdeckung der Physik bezeichnen. Es scheint nicht einfach zu sein, ihren Urheber zu finden oder das genaue Datum ihres Ursprungs anzugeben. *Kepler* versuchte noch, genaue Regeln für die Größe der Planetenbahnen ähnlich seinen Gesetzen für die Planetenbewegung zu finden. *Newton* war sich bereits bewußt, daß die Physik sich für lange Zeit nur mit der Erklärung derjenigen von *Kepler* entdeckten Regelmäßigkeiten beschäftigen würde, die wir heute als die Keplerschen Gesetze bezeichnen [2].

Die Regelmäßigkeiten im Geschehen, welche die physikalische Wissenschaft sich zu entdecken bemüht, nennt man Naturgesetze. Diese Bezeichnung ist wirklich sehr zutreffend. Genau wie die Gesetze des Rechts das Handeln und Verhalten unter bestimmten Umständen regeln, jedoch nicht versuchen, alle Handlungen und jedes Verhalten zu steuern, bestimmen auch die Gesetze der Physik das Verhalten der interessierenden Objekte nur unter bestimmten, wohldefinierten Bedingungen und lassen darüber hinaus viel Freiheit. Diejenigen Elemente des Verhaltens, die nicht durch die Naturgesetze festgelegt werden, nennt man die Anfangsbedingungen. Diese legen dann zusammen mit den Naturgesetzen das Verhalten soweit fest, wie es überhaupt festgelegt werden kann. (Wenn eine weitere Einschränkung möglich wäre, so würde man sie als eine zusätzliche Anfangsbedingung betrachten.) Bekanntlich glaubte man vor der Entdeckung der Quantentheorie, daß eine vollständige Beschreibung des Verhaltens eines Objektes möglich sei, so daß die Anfangsbedingungen und die Naturgesetze zusammen

[*] © 1964 The Nobel Foundation. – Das liebenswürdige Entgegenkommen des Autors und der Nobel-Stiftung, Stockholm, ermöglicht es uns, diesen Nobel-Vortrag, der in den Veröffentlichungen der Nobel-Stiftung erscheinen wird, schon jetzt zu drucken.

[1] Vorträge von *C. N. Yang* u. *T. D. Lee*: Les Prix Nobel en 1957. Stockholm 1958.

[2] Siehe z.B.: *A. C. Crombie:* Augustine to Galileo. Falcon Press, London 1952, S. 316ff. Das Wachsen im Verständnis des Reichs des Erkennbaren vom Ende des 13. Jahrhunderts an ist in fast jedem Kapitel dieses Buches zu spüren.

das Verhalten eines Objektes vollständig beschreiben würden, wenn die klassische Theorie gültig wäre.

Die obige Feststellung ist eine Definition der „Anfangsbedingung". Wegen ihrer etwas ungewöhnlichen Natur mag es nützlich sein, das an einem Beispiel zu erläutern. Nehmen wir an, wir würden *Newtons* Bewegungsgesetze für Sterne und Planeten

$$\ddot{\mathfrak{r}}_i = G \sum_j M_j \frac{\mathfrak{r}_{ij}}{r_{ij}^3} \qquad \mathfrak{r}_{ij} = \mathfrak{r}_j - \mathfrak{r}_i \quad , \tag{1}$$

nicht kennen, sondern wir hätten nur die Gleichungen gefunden, welche die dritte Ableitung des Ortes bestimmen:

$$\dddot{\mathfrak{r}}_i = G \sum_j M_j \frac{\dot{\mathfrak{r}}_{ij}(\mathfrak{r}_{ij}\cdot\mathfrak{r}_{ij}) - 3\,\mathfrak{r}_{ij}(\dot{\mathfrak{r}}_{ij}\cdot\mathfrak{r}_{ij})}{r_{ij}^5} \; . \tag{2}$$

Wenn die Kräfte F_i keine Gravitationskräfte wären, so hätte man allgemeiner angesetzt

$$M_i \dddot{\mathfrak{r}}_i = (\dot{\mathfrak{r}}_i \,\mathrm{grad})\, F_i + \dot{F}_i \tag{2a}$$

Die Anfangsbedingungen würden dann nicht nur alle $\mathfrak{r}_i$ und $\dot{\mathfrak{r}}_i$, sondern auch die $\ddot{\mathfrak{r}}_i$ enthalten. Diese Daten würden dann zusammen mit der „Bewegungsgleichung" (2) das zukünftige Verhalten des Systems genauso gut bestimmen wie $\mathfrak{r}_i$, $\dot{\mathfrak{r}}_i$ und (1). Die Tatsache, daß Anfangsbedingungen und Naturgesetze das Verhalten vollständig bestimmen, gilt ganz entsprechend in jeder kausalen Theorie.

Die überraschende Entdeckung der Newtonschen Zeit ist gerade die klare Trennung von Naturgesetzen auf der einen Seite und Anfangsbedingungen auf der anderen. Die Naturgesetze sind genauer als man je hätte vermuten können, dagegen wissen wir fast nichts über die Anfangsbedingungen. Über die letzte Behauptung sollten wir einen Moment nachdenken: Gibt es wirklich keine Regelmäßigkeiten, das betreffend, was wir gerade die Anfangsbedingungen genannt haben?

Die letzte Behauptung wäre sicher nicht richtig, wenn wir von den Naturgesetzen (2) und (2a) ausgegangen wären, d.h. wenn wir $\ddot{\mathfrak{r}}_i$ als Teil der Anfangsbedingungen betrachtet hätten. In diesem Fall gäbe es eine Beziehung – und zwar genau die Beziehung (1) – zwischen den die Anfangsbedingungen bildenden Elementen. Unsere Frage kann daher nur lauten: Gibt es irgendwelche Beziehungen zwischen dem, was wir nun tatsächlich als Anfangsbedingungen betrachten? Konstruktiver formuliert heißt das: Wie können wir sicherstellen, daß wir alle Naturgesetze kennen, die ein bestimmtes System von Phänomenen betreffen? Wenn wir das nicht tun, haben wir unnötig viele Anfangsbedingungen zu bestimmen, um das Verhalten des Objektes festzulegen. Eine Möglichkeit sicherzustellen, daß wir alle Naturgesetze kennen, wäre der Beweis, daß alle Anfangsbedingungen willkürlich gewählt werden können – ein Verfahren, das aber in den Bereichen des sehr Großen oder sehr Kleinen nicht möglich ist. (Wir können weder die Bahnen der Planeten ändern, noch die atomaren Teilchen exakt kontrollieren.) Mir ist kein anderes gleichermaßen eindeutiges Kriterium bekannt; aber es gibt eine andere erwähnenswerte Eigenschaft, die entscheiden kann, ob die Anfangsbedingungen richtig gewählt sind, d.h. ein minimales System bilden.

Das minimale System von Anfangsbedingungen verbietet nicht nur irgendeine exakte Beziehung zwischen seinen Elementen – weit mehr, es gibt Gründe zu glauben, daß diese in der Regel völlig zufällig verteilt auftreten, soweit das mit den explizit vorausgesetzten Bedingungen vereinbar ist. Ich möchte diesen Punkt an einem Beispiel illustrieren, das ihm, wie es zuerst scheint, widerspricht, das jedoch seine Stärken und Schwächen am besten offenbart.

Betrachten wir zu diesem Zweck wieder unser Planetensystem. Es wurde oben schon erwähnt, daß die approximativen Regelmäßigkeiten in den Anfangsbedingungen, nämlich den Bahnbestimmungsgrößen, *Kepler* zu Betrachtungen führten, die *Newton* dann fallen ließ. Diese Regelmäßigkeiten bilden anscheinend ein Gegenbeispiel zu der oben erwähnten These. Die Existenz der Regelmäßigkeiten in den Anfangsbedingungen wird jedoch als so unbefriedigend angesehen, daß es nötig scheint zu zeigen, daß diese Regelmäßigkeiten nichts weiter als die Folgen einer Situation sind, in der keine Regelmäßigkeiten vorhanden waren. Vielleicht ist *von Weizsäckers* diesbezüglicher Versuch [3] am interessantesten: Er nimmt an, daß das Sonnensystem ursprünglich aus einem Zentralstern bestand, umgeben von einer rotierenden Gaswolke, deren innere Bewegung aber völlig zufallsbedingt war. Er leitet dann die oben erwähnten Regelmäßigkeiten des Planetensystems, die man jetzt Bodesche Gesetze nennt, aus dieser Annahme ab. Ganz allgemein versucht man, fast jede „geordnete Bewegung", sogar das Leben, ähnlich zu erklären. Es sollte hinzugefügt werden, daß wenige dieser Erklärungen im Detail ausgeführt worden sind [4], aber die Tatsache, daß solche Erklärungen versucht werden, bleibt bedeutsam.

Der vorhergehende Absatz behandelte Fälle, in denen scheinbare Anzeichen gegen die Zufallsnatur der unkontrollierten Anfangsbedingungen vorhanden waren. Es wurde versucht zu zeigen, daß das scheinbar geordnete Verhalten dieser Anfangsbedingungen die Folge eines solchen Zustandes ist, in dem die unkontrollierten Anfangsbedingungen vorher statistisch verteilt waren. Im ganzen gesehen sind das Ausnahmesituationen. In den meisten Fällen gibt es keinen Grund, die Zufallsnatur der nichtkontrollierten oder nichtspezifizierten Anfangsbedingungen in Frage zu stellen. Und die Zufallsnatur der Anfangsbedingungen wird durch die Gültigkeit von Folgerungen, die man aus dieser Annahme zieht, gestützt. Man begegnet solchen Situationen in der kinetischen Gastheorie und allgemeiner immer dann, wenn man Prozesse beschreibt, in denen die Entropie wächst. Man erhält den Eindruck, daß auf der einen Seite die Naturgesetze sich in wunderbar einfachen Regelmäßigkeiten ausdrücken, während die Anfangsbedingungen andererseits gleichermaßen einfache

[3] *C. F. v. Weizsäcker*, Z. Astrophysik *22*, 319 (1944); *S. Chandrasekhar*, Rev. mod. Physics *18*, 94 (1946).

[4] Der einzige Fall, mit dem der Autor vertraut ist, sind die „fokussierenden Stöße", bei denen Neutronen, die ziemlich hohe Geschwindigkeiten in statistisch verteilten Richtungen besitzen, in Neutronen mit geringerer Geschwindigkeit, aber ausgezeichneter Bewegungsrichtung umgewandelt werden. Siehe *R. H. Silsbee*, J. appl. Physics *28*, 1246 (1957); *Chr. Lehmann* u. *G. Leibfried*, Z. Physik *172*, 465 (1963).

und schöne Unregelmäßigkeiten zeigen, soweit sie nicht kontrolliert sind. Es besteht daher vielleicht nur eine geringe Wahrscheinlichkeit, daß relevante Naturgesetze unentdeckt bleiben.

Die vorangegangene Diskussion charakterisierte die Naturgesetze als Regelmäßigkeiten im Verhalten eines Objektes. In der Quantentheorie ist das ganz natürlich. Die Gesetze der Quantenmechanik können passend als Korrelationen zwischen aufeinanderfolgenden Beobachtungen an einem Objekt formuliert werden. Diese Korrelationen sind die durch die Gesetze der Quantenmechanik beschriebenen Regelmäßigkeiten [5]. Die Gesetze der klassischen Theorie, d.h. ihre Bewegungsgleichungen, werden gewöhnlich nicht als Korrelationen zwischen Beobachtungen angesehen. Es ist jedoch wahr, daß ihr Zweck und ihre Funktion darin besteht, solche Korrelationen zu liefern und daß sie im wesentlichen nichts weiter als der kurzgefaßte Ausdruck solcher Korrelationen sind.

II. Naturgesetze und Invarianzen

Wir haben es aufgegeben, von der Physik eine Erklärung aller Ereignisse, ja selbst nur der Grobstruktur des Universums, zu erwarten. Wir beabsichtigen nur, die Naturgesetze, also die Regelmäßigkeiten der Ereignisse zu entdecken. Kapitel I gibt uns Gründe zu hoffen, daß die Regelmäßigkeiten ein genau definiertes System bilden und klar von dem zu unterscheiden sind, was wir Anfangsbedingungen, ein System mit einem starken Element von Zufälligkeit, nennen. Wir sind jedoch weit davon entfernt, dieses System gefunden zu haben. Selbst wenn es exakte Regelmäßigkeiten gibt, haben wir Gründe zu glauben, daß wir nur einen infinitesimalen Bruchteil davon kennen. Das beste Argument für diese Behauptung läßt sich vielleicht aus einer Tatsache ableiten, die hier vor sechs Jahren von *Yang* mitgeteilt wurde: Die Vielfalt der Wechselwirkungen. *Yang* erwähnte vier Arten der Wechselwirkungen: Gravitation, schwache, elektromagnetische und starke Wechselwirkungen; und inzwischen hat sich herausgestellt, daß es zwei Typen starker Wechselwirkungen gibt. Sie alle spielen in jedem Prozeß eine Rolle, aber es ist schwer oder gar unmöglich zu glauben, daß die Naturgesetze eine solche Vielfalt besitzen, wie sie in vier oder fünf verschiedenen Wechselwirkungstypen, zwischen denen keine Beziehung und keine Analogie entdeckt werden kann, zum Ausdruck kommt.

Es ist daher ganz selbstverständlich, nach einem Überprinzip zu fragen, das zu den Naturgesetzen in einer analogen Beziehung steht wie diese zu den Ereignissen. Die Naturgesetze erlauben uns, Ereignisse durch die Kenntnis anderer Ereignisse vorauszusehen. Die Invarianzprinzipien sollten uns die Begründung neuer Korrelationen zwischen den Ereignissen erlauben, mit Hilfe bekannter und begründeter Korrelationen zwischen Ereignissen. Genau dies tun sie. Wenn man bewiesen hat, daß die Existenz von Ereignissen A, B, C, ... notwendig das Auftreten des Ereignisses X zur Folge hat, dann haben die Ereignisse A′, B′, C′ ... notwendig X′ zur Folge, falls A′, B′, C′ ... und X′ durch eine der Invarianztransformationen aus A, B, C ... und X hervorgehen. Es gibt drei Kategorien solcher Invarianztransformationen:

a) *Euklidische Transformationen*: Die gestrichenen Ereignisse (A′, B′ ... usw) treten an verschiedenen Punkten im Raum auf, aber mit denselben räumlichen Beziehungen zueinander wie die ungestrichenen Ereignisse (A, B ... usw.).

(b) *Zeitverschiebungen*: Die gestrichenen Ereignisse treten zu einer anderen Zeit auf, aber durch gleiche Zeitintervalle voneinander getrennt wie die ungestrichenen.

(c) *Gleichförmige Bewegung*: Die gestrichenen Ereignisse erscheinen vom Standpunkt eines sich gleichförmig bewegenden Koordinatensystems als die gleichen wie die ungestrichenen Ereignisse vom Standpunkt eines ruhenden Koordinatensystems.

Die ersten zwei Kategorien von Invarianzprinzipien wurden stets als selbstverständlich hingenommen. Man könnte sogar argumentieren, daß Naturgesetze niemals entdeckt worden wären, wenn sie nicht einige elementare Invarianzprinzipien wie die der Kategorien (a) und (b) erfüllt hätten – wenn sie sich von Ort zu Ort geändert hätten oder zu verschiedenen Zeiten verschieden gewesen wären. Das Prinzip (c) scheint nicht so natürlich. Es ist tatsächlich oft in Frage gestellt worden, und es war *Einsteins* außergewöhnlich große Leistung, es in seiner speziellen Relativitätstheorie wieder begründet zu haben. Vor der weiteren Diskussion dieses Punktes wird es jedoch nützlich sein, ein paar allgemeine Bemerkungen zu machen.

Die erste bemerkenswerte gemeinsame Eigenschaft der aufgezählten Invarianzprinzipien ist ihre g e o m e t r i s c h e Natur. Diese gilt jedenfalls, wenn ein vierdimensionales Raum-Zeit-Gebilde als geometrischer Raum zugrunde gelegt wird. Ich meine damit, daß die Invarianztransformationen nicht die Ereignisse selbst ändern; sie ändern nur ihre Lage in Raum und Zeit und ihren Bewegungszustand. Man könnte sich leicht ein Prinzip vorstellen, nach dem etwa Protonen mit Elektronen vertauscht werden, Geschwindigkeiten mit Lagen, usw. [6].

Die zweite bemerkenswerte Eigenschaft der obigen Prinzipien ist, daß sie I n v a r i a n z- und nicht K o v a r i a n z-prinzipien sind. Das bedeutet, daß sie dieselben Folgen für die gestrichenen Voraussetzungen vorhersagen, die für die ungestrichenen erkannt wurden. Es ist gut vorstellbar, daß aus bestimmten Ereignissen A, B ... die Ereignisse X_1, X_2, X_3, usw. mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten, p_1, p_2, p_3 ... folgen werden. Aus den transformierten Eigenschaften A′, B′, C′ ... könnten sich dann die transformierten Konsequenzen X'_1, X'_2, X'_3 ... mit geänderten Wahrscheinlichkeiten wie etwa $p'_1 = p_1 (1 - p_1 + \Sigma p_n^2)$, $p'_2 = p_2 (1 - p_2 + \Sigma p_n^2)$,... ergeben, aber das ist nicht der Fall; wir hatten stets $p'_i = p_i$.

[5] Siehe z.B. den Abschnitt „Was ist der Zustandsvektor" in dem Artikel des Autors in Amer. J. Physics *31*, 6 (1963).

[6] Die Möglichkeit von Invarianzprinzipien, bei denen Geschwindigkeiten durch Lagen ersetzt werden und umgekehrt, wurde untersucht von *M. Born*, Nature (London) *141*, 327 (1938); Proc. Roy. Soc. (London) *165 A*, 291 (1938); *166 A*, 552 (1938). Die Crossing-Relation wurde begründet von *M. L. Goldberger*, Physic. Rev. *99*, 979 (1955); *M. Gell-Mann* u. *M. L. Goldberger*, ibid. *96*, 1433 (1954). Weiter siehe z.B. *M. L. Goldberger* u. *K. M. Watson*: Collision Theory. Wiley, New York 1964, Kap. 10.

Diese beiden Punkte wurden besonders erwähnt, weil es Symmetrieprinzipien gibt, die sogenannten Crossing-Relationen [6], die vielleicht exakt gültig sind und die bestimmt nicht vom speziellen Wechselwirkungstyp abhängen. In dieser Beziehung sind sie anscheinend den geometrischen Invarianzprinzipien ähnlich. Sie unterscheiden sich von diesen dadurch, daß sie die Ereignisse ändern, also Kovarianz- und keine Invarianzprinzipien sind. Sie erlauben zum Beispiel aus den als bekannt angenommenen Wirkungsquerschnitten für Neutron-Proton-Streuung einige der Neutron-Antiproton-Wirkungsquerschnitte zu ermitteln. Die erstgenannten Ereignisse sind sicher verschieden von den Neutron-Antiproton-Stößen und die Wirkungsquerschnitte für die letztgenannten Stöße gleichen keineswegs den Neutron-Proton-Wirkungsquerschnitten, sondern lassen sich aus diesen nur durch ein ziemlich kompliziertes mathematisches Verfahren bestimmen. Daher kann man die Crossing-Relationen nicht als geometrische Symmetriebeziehungen ansehen und sie werden hier nicht weiter betrachtet. Ebenso werden wir uns hier nicht mit den dynamischen Symmetrieprinzipien befassen, die Symmetrieprinzipien für spezifische Wechselwirkungen wie elektromagnetische oder starke Wechselwirkungen sind und nicht in der Terminologie von Ereignissen formuliert werden [7].

Was die geometrischen Prinzipien betrifft, so muß erwähnt werden, daß sie von der Trennungslinie zwischen Anfangsbedingungen und Naturgesetzen abhängen. So ist beispielsweise das Naturgesetz (2) oder (2a), das man aus dem Newtonschen Prinzip durch Differentiation nach der Zeit erhält, auch invariant gegen eine Transformation in ein gleichförmig beschleunigtes Koordinatensystem

$$\mathfrak{r}_i' = \mathfrak{r}_i + t^2\,\mathfrak{a} \quad , \tag{3}$$

wobei $\mathfrak{a}$ ein beliebiger Vektor ist. Natürlich kann dieses zusätzliche Prinzip keine physikalischen Konsequenzen haben, denn wenn die Anfangsbedingungen $\mathfrak{r}_i$, $\dot{\mathfrak{r}}_i$ und $\ddot{\mathfrak{r}}_i$ sich realisieren lassen, d. h. die Gleichung (1) erfüllen, so sind die transformiereten Anfangsbedingungen $\mathfrak{r}_i' = \mathfrak{r}_i$, $\dot{\mathfrak{r}}_i' = \dot{\mathfrak{r}}_i$ und $\ddot{\mathfrak{r}}_i' = \ddot{\mathfrak{r}}_i + 2\mathfrak{a}$ nicht realisierbar.

Die in der obigen Diskussion betrachteten Symmetrieprinzipien sind die der Newtonschen Mechanik oder der speziellen Relativitätstheorie. Vielleicht wundert man sich, warum die sehr viel allgemeineren und anscheinend geometrischen Invarianzprinzipien der allgemeinen Theorie nicht betrachtet wurden. Der Grund ist, daß der Autor – im Einklang mit den von *Fock* [8] geäußerten Gesichtspunkten – glaubt, daß die kurvenlinearen Koordinatentransformationen der allgemeinen Relativitätstheorie keine Invarianzprinzipien in dem hier betrachteten Sinne sind. Diese sind aktive Transformationen, welche die Ereignisse A, B, C ... durch Ereignisse A′, B′, C′ ... ersetzen, und wenn aktive Transformationen nicht möglich sind, gibt es keine physikalisch definierte Invarianz. Das bloße Ersetzen eines kurvenlinearen Koordinatensystems durch ein anderes ist jedoch eine „Umschreibung" im Sinne von *Melvin* [9]; sie ändert weder die Ereignisse noch gibt sie eine Struktur in den Naturgesetzen wieder. Das bedeutet nicht, daß die Transformationen der allgemeinen Relativitätstheorie etwa keine nützlichen Hilfsmittel zum Auffinden der richtigen Naturgesetze wären; das sind sie ganz offensichtlich. Die Prinzipien, die sie zu formulieren dienen, sind jedoch nach einem Vorschlag, den ich vor kurzem gemacht habe [7], nicht als geometrische Invarianzprinzipien zu betrachten.

[7] Die Beziehungen zwischen den verschiedenen Typen von Symmetrie-Prinzipien wurden in zwei kürzlich erschienenen Arbeiten betrachtet: *E. P. Wigner*, Nuovo Cimento, Suppl. *2* (1964), im Druck; Physics today, *17*, No. 3, 34 (1964). Siehe auch Progr. theoret. Physics *11*, 1912 (1954).

[8] *V. A. Fock:* The Theory of Space, Time, and Gravitation. Pergamon Press, New York 1959; vgl. auch *E. Kretschmann*, Ann. Physik *53*, 575 (1917).

III. Der Gebrauch von Invarianzprinzipien Approximative Invarianzen

Die ersten beiden Kapitel stellten die Invarianzprinzipien als exakt gültige Korrelationen zwischen den Korrelationen von Ereignissen, die als Naturgesetze postuliert werden, dar. Das weist sofort auf eine Anwendung des Systems der Invarianzprinzipien hin, die sicher zur Zeit bedeutendste: Die Invarianzprinzipien sollen ein Prüfstein für die Richtigkeit möglicher Naturgesetze sein. Ein Naturgesetz kann nur dann als richtig akzeptiert werden, wenn die von ihm postulierten Korrelationen mit den akzeptierten Invarianzprinzipien vereinbar sind.

Einsteins Originalarbeit, die zu seiner Formulierung der speziellen Relativitätstheorie führte, beleuchtet den obigen Punkt mit größter Klarheit [10]. Er weist in diesem Artikel nach, daß die Korrelationen zwischen Ereignissen in sich zueinander gleichförmig bewegenden Koordinatensystemen gleich sind, auch wenn die Ursachen, die diesen Korrelationen zugeschrieben wurden, zu jener Zeit vom Bewegungszustand des Koordinatensystems abhingen. Ganz ähnlich machte *Einstein* intensivsten Gebrauch von Invarianzprinzipien, um die richtige Form der Naturgesetze zu ermitteln, in diesem Fall die des Gravitationsgesetzes, durch die Annahme, daß dieses Gesetz mit den vorausgesetzten Invarianzprinzipien übereinstimmt [11]. Gleichermaßen bemerkenswert ist die gegenwärtige Anwendung von Invarianzprinzipien auf die Quantenelektrodynamik. Diese Theorie ist nicht konsistent – sie ist in Wirklichkeit keine Theorie im engeren Sinne, da ihre Gleichungen in Widerspruch zueinander stehen. Diese Widersprüche können jedoch fast eindeutig aufgelöst werden, wenn man annimmt, daß ihre Folgerungen mit der speziellen Relativitätstheorie im Einklang stehen [12]. Ein anderer, noch fundamentalerer Ansatz versucht, die Quantenfeldtheorie zu axiomatisieren, wobei die Invarianz-

[9] *M. A. Melvin*, Rev. mod. Physics *32*, 477 (1960).

[10] *A. Einstein*, Ann. Physik *17*, 891 (1905).

[11] *A. Einstein*, Ann. Physik *49*, 769 (1916). Ähnliche Ergebnisse erhielt gleichzeitig *D. Hilbert*, Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, 395 (1915).

[12] *J. Schwinger*, Physic. Rev. *76*, 790 (1949). Siehe auch *S. S. Schweber:* An Introduction to Relativistic Quantum Field Theory. Row, Petersen and Co, New York 1961, Abschn. 15; dort auch weitere Referenzen.

prinzipien die Ausgangsbasis für die Axiome bilden [13]. Ich will diese Frage nicht weiter untersuchen, da sie schon oft und ausführlich diskutiert wurde. Ich habe selbst erst kürzlich darüber gesprochen [7].

Es ist wahrscheinlich die bedeutendste Funktion der Invarianzprinzipien, Prüfsteine für die Naturgesetze zu sein; es ist aber nicht die einzige. In vielen Fällen lassen sich Konsequenzen der Naturgesetze aus den Eigenschaften des mathematischen Formalismus der Theorie ableiten, unter Benutzung des Postulates, daß das Gesetz – dessen genaue Form nicht bekannt zu sein braucht – mit den Invarianzprinzipien im Einklang ist. Das am besten bekannte Beispiel dafür ist die Ableitung der Erhaltungssätze von Impuls, Drehimpuls und Energie, sowie die Bewegung des Massenschwerpunktes, entweder auf der Basis des Lagrange-Formalismus der klassischen Mechanik, oder des Hilbert-Raumes der Quantenmechanik, jeweils mit Hilfe der früher aufgezählten geometrischen Invarianzprinzipien [14]. Nebenbei soll bemerkt werden, daß die Erhaltungssätze gegenwärtig die einzig allgemein gültigen uns bekannten Korrelationen zwischen Beobachtungen darstellen. Es ist ja klar, daß die Gesetze, die wir aus den geometrischen Invarianzprinzipien ableiten, in ihrer Gültigkeit jede spezielle Theorie – Gravitation, Elektromagnetismus usw. – überschreiten. Der Zusammenhang zwischen Invarianzprinzipien und Erhaltungssätzen – die in diesem Zusammenhang immer das Gesetz der Schwerpunktsbewegung enthalten – ist ebenfalls in der Literatur häufig und hinreichend diskutiert worden.

In der Quantentheorie erlauben die Invarianzprinzipien, noch weiterreichende Schlußfolgerungen als in der klassischen Mechanik zu ziehen, und mein ursprüngliches Interesse für Invarianzprinzipien entsprang gerade dieser Tatsache. Der Grund für die größere Wirksamkeit von Invarianzprinzipien in der Quantentheorie ist im wesentlichen die lineare Natur des zugrundeliegenden Hilbert-Raumes [15]. Diese Linearität bedeutet, daß sich aus zwei Zustandsvektoren ψ_1 und ψ_2 unendlich viele neue Zustandsvektoren

$$\psi = a_1 \psi_1 + a_2 \psi_2 \tag{4}$$

bilden lassen, wobei a_1 und a_2 beliebige Zahlen sind. Entsprechend kann man auch mehrere, sogar unendlich viele Zustände mit weitgehend beliebigen Koeffizienten überlagern. Diese Möglichkeit der Überlagerung von Zuständen ist keineswegs physikalisch natürlich. Selbst wenn wir wissen, wie sich ein System in die Zustände ψ_1 und ψ_2 bringen läßt, können wir kein Rezept angeben, wie wir es in eine Überlagerung dieser Zustände bringen sollen. Ein solches Rezept müßte natürlich von den Koeffizienten abhängen, mit denen die beiden Zustände zu überlagern sind, und ein solches Rezept ist einfach nicht bekannt. Daher ist das Überlagerungsprinzip, streng gesprochen, ein Existenzpostulat – aber ein sehr effektives und nützliches.

Um dies zu illustrieren, wollen wir daran denken, daß man in der klassischen Theorie aus einem vorgegebenen Zustand, wie etwa einer Planetenbahn, eine andere mögliche Bahn durch Drehung der ursprünglichen Bahn um das Kraftzentrum erzeugen kann. Das ist interessant, hat aber keine sehr überraschenden Konsequenzen. In der Quantentheorie gilt dasselbe. Hier kann man jedoch nach dem erwähnten Prinzip die Zustände, die man aus einem vorgegebenen durch Drehung erhält, überlagern. Wenn die Drehungen, denen der ursprüngliche Zustand unterworfen wurde, gleichförmig über alle Richtungen verteilt sind, und wenn man diese Zustände mit gleichen Koeffizienten überlagert, so ist der resultierende Zustand zwangsläufig kugelsymmetrisch. Diese Konstruktion eines sphärisch symmetrischen Zustandes könnte nur dann zu keinem Ziel führen, wenn diese Überlagerung zum Null-Vektor des Hilbert-Raumes führen würde, d.h. wenn man gar keinen Zustand erhielte. In einem solchen Fall könnte man jedoch andere Überlagerungskoeffizienten wählen – im zweidimensionalen Fall die Koeffizienten $e^{im\varphi}$, wobei φ der Winkel ist, um den der ursprüngliche Zustand gedreht wurde. Der resultierende Zustand würde – wenngleich nicht mehr kugelsymmetrisch, oder im zweidimensionalen Fall zylindersymmetrisch – immer noch einfache Eigenschaften bezüglich Drehungen besitzen. Diese Möglichkeit, die Konstruktion von Zuständen mit entweder voller Drehsymmetrie oder wenigstens einem einfachen Verhalten bezüglich Drehungen, bildet eine fundamentale Neuerung der Quantentheorie. Es ist außerdem sehr befriedigend, daß einfache Systeme wie Atome Zustände hoher Symmetrie besitzen.

Das Überlagerungsprinzip erlaubt ebenso, die Spiegelungssymmetrie auszunutzen. In der klassischen sowohl wie in der Quantenmechanik ist mit einem bestimmten Zustand immer das Spiegelbild dieses Zustandes möglich. In der klassischen Theorie kann aber aus dieser Tatsache keine bedeutsame Folgerung gezogen werden. In der Quantentheorie lassen sich der ursprüngliche und der gespiegelte Zustand mit gleichen oder entgegengesetzt gleichen Koeffizienten überlagern. Im ersten Fall ist der resultierende Zustand symmetrisch gegenüber Spiegelungen, im zweiten Fall antisymmetrisch. Die schon erwähnte große Leistung von *Lee* und *Yang* [1] bestand gerade in einer sehr überraschenden Neuinterpretation einer der Spiegelungsoperationen, nämlich der Raumspiegelung, und in dem Beweis, daß die alte Interpretation nicht gültig sein konnte. Die Betrachtung von „Zeitspiegelungen" verlangt besondere Sorgfalt, da der zugeordnete Operator antiunitär ist. Theoretisch führt sie zu einer neuen Quantenzahl und einer Klassifizierung von Teilchen [16], die aber in der Praxis bisher nicht angewendet worden ist.

[13] Siehe *A. S. Wightman* über „Quelques Problemes Mathematiques de la Theorie Quantique Relativiste" und mehrere andere Artikel in: Les Problemes Mathematiques de la Theorie Quantique des Champs. Centre National de la Recherche Scientifique, Paris 1959.

[14] *G. Hamel*, Z. math. Physik *50*, 1 (1904); *F. Klein*, Nachr. Ges. Wiss. Göttingen 171 (1918); *E. Noether*, ibid. 235 (1918); *E. Bessel-Hagen*, Mathemat. Ann. *84*, 258 (1921). Die quantentheoretische Ableitung wurde gegeben von *E. Wigner*, Nachr. Ges. Wiss. Göttingen 375 (1927) und enthält auch den Paritätserhaltungssatz, der in [1] als nur näherungsweise gültig gezeigt wurde. Siehe auch [16].

[15] Diese Bemerkung wurde besonders von *C. N. Yang* 1959 bei der Hundertjahrfeier des Bryn Mawr College betont. Vgl. auch *E. P. Wigner*, Proc. Amer. philos. Soc. *93*, 521 (1949).

[16] Siehe den Artikel des Autors „Unitary Representations of the Inhomogeneous Lorentz Group including Reflections" in: Group Theoretical Concepts and Methods in Elementary Particle Physics. Gordon and Breach, New York 1964.

Meine Diskussion wäre ohne Erwähnung der approximativen Invarianzbeziehung höchst unvollständig. Wie alle approximativen Beziehungen können sie unter bestimmten Bedingungen sehr genau gelten, unter anderen aber ganz entscheidend falsch sein. Die kritischen Bedingungen können durch den Zustand des Objektes gegeben sein, oder einen Typ von Phänomenen auszeichnen. Das bedeutendste Beispiel für die erste Gruppe ist der Fall geringer Relativgeschwindigkeiten. Hier sind die magnetischen Felder schwach, und die Spinrichtungen beeinflussen die anderen Koordinaten nicht. Das führt zur Russell-Saunders-Kopplung in der Spektroskopie [17]. Noch interessanter ist der Fall sehr hoher Geschwindigkeiten, in dem die Ruhmasse vernachlässigbar wird. Leider ist dieses Beispiel noch nicht in aller Ausführlichkeit diskutiert worden, obwohl es vielversprechende Anfänge gibt [18].

Der vielleicht wichtigste Fall spezieller Phänomene, bei denen mehr Invarianztransformationen als oben aufgezählt gelten, ist ziemlich allgemein. Er umfaßt alle Phänomene wie etwa Stöße von Atomen, Molekülen und Kernen, bei denen die schwache Wechselwirkung, die für den β-Zerfall verantwortlich ist, keine Rolle spielt. In all diesen Fällen ist die Paritätsoperation eine zulässige Invarianzoperation. Das gilt auch in der gewöhnlichen Spektroskopie.

Bei einem anderen interessanten speziellen Typ von Phänomenen spielt auch die elektromagnetische Wechselwirkung nur eine untergeordnete Rolle. Damit wird die elektrische Ladung der Teilchen bedeutungslos, und die Vertauschung von Protonen und Neutronen, oder allgemeiner der Mitglieder eines Isotopenspin-Multipletts, wird eine Invarianzoperation. Dieses und andere Beispiele zusätzlicher Symmetrien führen zu hochinteressanten Fragen, die heute zentrales Interesse besitzen. Dieses Problem ist aber zu differenziert, um bei dieser Gelegenheit im einzelnen diskutiert werden zu können.

Eingegangen am 20. Februar 1964 [A 387]
Übersetzt von Dr. *H.-D. Zeh*, Heidelberg

[17] Siehe das Buch des Autors: Gruppentheorie und ihre Anwendungen auf die Quantenmechanik der Atomspektren. Vieweg, Braunschweig 1931; oder die englische Übersetzung von *J. Griffin*, Academic Press, New York 1959.

[18] *H. A. Kastrup*, Physics Letters *3*, 78 (1962). Die zusätzlichen Invarianzoperationen bilden vermutlich die konforme Gruppe. Es wurde schon von *E. Cunningham*, Proc. London Math. Soc. *8*, 77 (1909) und *H. Bateman*, ibid. *8*, 223 (1910) bemerkt, daß die Maxwellschen Gleichungen für das Vakuum unter dieser Gruppe invariant sind. Diese Gleichungen beschreiben die Ausbreitung von Lichtwellen, die ja immer Lichtgeschwindigkeit haben. Neuerdings wurden diese Fragen auch von *F. Fulton*, *F. Rohrlich* u. *L. Witten*, Rev. mod. Physics *34*, 442 (1962) und von *J. Murai*, Progr. theoret. Physics *11*, 441 (1954) behandelt. Diese Arbeiten enthalten weitere Literaturhinweise.

Oberflächenoxyde des Kohlenstoffs

VON DOZ. DR. H.-P. BOEHM, DR.-ING. E. DIEHL, DIPL.-CHEM. W. HECK UND DIPL.-CHEM. R. SAPPOK

ANORGANISCH-CHEMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT HEIDELBERG

Bei der Oxydation graphitischen Kohlenstoffs bilden sich an den Rändern der Kohlenstoffschichten saure Oberflächenoxyde (oder -hydroxyde bei Anwesenheit von Wasser). Mit mikrokristallinem Kohlenstoff ergab sich, daß bei der Reaktion mit Sauerstoff bei 400 bis 450 °C vier Gruppen unterschiedlicher Acidität entstehen: Je eine stärker saure und eine schwächer saure Carboxylgruppe sowie eine phenolische Hydroxylgruppe wurden nachgewiesen. Wahrscheinlich liegt außerdem eine Carbonylgruppe vor. Mit gelösten Oxydationsmitteln bildet sich bei Zimmertemperatur zusätzlich ein Äquivalent einer stärker sauren Carboxylgruppe. – Die möglichen Konstitutionen der sauren Oberflächenoxyde werden diskutiert. Auch an der Oberfläche des Diamanten werden Oberflächenoxyde gebildet, die sich chemisch nachweisen lassen. Beim Einwirken von Sauerstoff bei 800 bis 900 °C unter geringem Druck wird Diamant in schwarzen Kohlenstoff umgewandelt. Dabei spielen Oberflächenoxyde eine Rolle.

I. Einleitung

Elementarer Kohlenstoff tritt kristallin als Diamant oder als Graphit auf. Im Inneren der Raumnetzstruktur des Diamanten oder der Schichtstruktur des Graphits sind alle Kohlenstoffatome kovalent verknüpft. Die an der Oberfläche freiliegenden Valenzen können z. B. mit Sauerstoff abgesättigt werden; es bilden sich Oberflächenverbindungen.

Die Oberflächenoxyde beeinflussen die Eigenschaften der Oberfläche des Kohlenstoffs, z. B. die Benetzbarkeit, das Adsorptionsvermögen der Aktivkohlen oder die Dispergierbarkeit von Farbrußen in Druckerschwärze. Ruße, die als verstärkende Füllstoffe für Gummi verwendet werden, enthalten ebenfalls stets Oberflächenoxyde [*]. Ferner spielen Oberflächenoxyde

[*] Die Oberflächenoxyde scheinen zwar für die verstärkende Wirkung nicht unmittelbar verantwortlich zu sein, denn auch andere feinteilige Stoffe, z. B. das den Rußen morphologisch sehr ähnliche Siliciumdioxyd, ®Aerosil, wirken ähnlich. Viele Eigenschaften der Ruße werden jedoch von Oberflächenoxyden beeinflußt, so reagieren z. B. „channel blacks" in wäßriger Suspension sauer, „furnace blacks" und „thermal blacks" hingegen basisch. Wie die Oberflächenoxyde die Vulkanisationsfähigkeit und die Eigenschaften des Gummis beeinflussen, ist noch nicht restlos geklärt.