

DIE NATURPHILOSOPHISCHE BEDEUTUNG EINER EINHEITLICHEN FELDTHEORIE DER ELEMENTARTEILCHEN *

Vor etwas mehr als Jahresfrist veröffentlichte Werner Heisenberg seine „Einführung in die einheitliche Feldtheorie der Elementarteilchen“¹ in simultaner deutscher und englischer Ausgabe mit dem Titel „Introduction to the unified field theory of elementary particles“². Damit haben wir die erste übersichtliche Zusammenfassung einer Theorie, die Heisenberg vor nunmehr zehn Jahren, im Frühjahr 1958, im Physikalischen Kolloquium der Universität Göttingen vortrug, und etwas später, am 25. April 1958, im Rahmen der Max-Planck-Feier in Berlin bekannt-machte. Die Arbeiten an dieser Theorie reichen aber auf mehr als 20 Jahre zurück; Heisenberg führte sie durch im engsten Kontakt mit seinem Studienkollegen aus der Münchner, Göttinger und Kopenhagener Zeit: Wolfgang Pauli (geboren am 25. April 1900 in Wien, verstorben am 15. Dezember 1958 in Zürich). Es ist also mehr als ein Anlass zu einem besinnlichen Gedenken in der Geburtsstadt Paulis, zehn Jahre später.

Der Gedanke einer einheitlichen Feldtheorie ist wohl vor allem Albert Einstein zu eigen, dessen letzte Arbeiten auf diesem Gebiet noch einer eingehenden Diskussion harren. Vielleicht kann man mit Hermann Weyl sagen, dass seine Auffassung zu sehr „im Kontinuum ruht“³. Aber auf jeden Fall ist der Ansatz interessant, die drei letzten Typen physikalischer Realität, die wir kennen, nämlich das elektromagnetische, das materielle und das gravitatorische Feld, auf ein einziges universelles Feldgesetz zurückzuführen. Trotz der grossen Fortschritte der Quanten-Elektrodynamik und der Gravitations-Forschung⁴ in den letzten Jahren können wir nicht sagen, dass das Problem einer einheitlichen Feldtheorie der elementaren physikalischen Realität heute bereits endgültig und im positiven Sinne gelöst sei.

Die Bedeutung einer einheitlichen Feldtheorie lässt sich am besten hervorheben, wenn wir sie mit Konkurrenz-Hypothesen vergleichen, die nicht vom gleichen Prinzip ausgehen. Auf die Gefahr hin, Bekanntes zu wiederholen, will ich dabei mit wenigen Worten auch auf die physikalischen Zusammenhänge eingehen im Interesse einer Sprachregelung, das heisst einer Verständigung über die auftretenden Begriffe. Unsere Diskussion wird sich also auf drei Gebiete richten: 1. Die sogenannten „phänomenologischen“ Theorien der

* XIV Internationaler Kongress für Philosophie – Wien 1968. Vortrag: Section VII: Naturphilosophie. Publiziert in Kongress-Akten IV, S. 385-395.

¹ S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1967.

² Interscience Publishers. John Wiley & Sons. New York, 1966.

³ Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft. S. 130, 2. 33.

⁴ D. D. Iwanenko: New aspects of unified theory, 2. Gravitations-Konferenz, Tiflis 20 bis 28. April 1965.

Elementarteilchen oder Teil-Symmetrien. 2. Die einheitliche Feldtheorie. 3. Ihre naturphilosophische Bedeutung.

1. Die Klassifizierung der Elementarteilchen erfolgt heute nicht mehr in einem nur zweidimensionalen Koordinatensystem, mit dem Massenspektrum auf der Ordinatenachse und den elektrischen Elementarladungen auf der Abszissenachse, sondern die Vielfalt und Kompliziertheit der Eigenschaften, die alle auf verschiedenartigen Wechselwirkungen beruhen, erfordert die Einführung von mehrdimensionalen Relations-, Struktur- und Symmetrie-Gefügen. Dabei überschneiden sich die beiden grundsätzlichen Einteilungs-Prinzipien: Einerseits unterscheiden wir Bosonen und Fermionen, je nachdem die Teilchen der Bose-Einstein-Statistik entsprechen, d. h. nicht dem Pauli-Verbot unterliegen, oder der Fermi-Dirac-Statistik gehorchen und damit auch dem Ausschliessungsprinzip von Wolfgang Pauli unterliegen. Im ersten Fall können beliebig viele Teilchen im gleichen Zustand vorkommen und auch räumlich koinzidieren (wie das bei den Strahlungsquanten zutrifft); im zweiten Fall (Pauli-Verbot gültig) ist es unmöglich, dass zwei Teilchen in einem geschlossenen System in sämtlichen Quantenzuständen übereinstimmen. Auf der anderen Seite unterscheiden wir Hadronen (vom griechischen Adjektiv „hadro's“ = voll, erwachsen, stark), d. h. Teilchen, welche starker und sehr starker Wechselwirkung fähig sind, von allen anderen Teilchenarten. Nun sind zwar die meisten Hadronen zugleich Fermionen; es gibt aber auch Bosonen unter ihnen, z. B. die drei Arten von Pi-Mesonen oder Pionen, die berühmten Yukawa-Teilchen, die für den Zusammenhalt der Kernkräfte verantwortlich sind. Nach der alten Einteilung gemäss dem Massenspektrum -- Leptonen (Photonen oder Strahlungsquanten, Neutrinos, Elektronen), Mesonen und Baryonen (Nukleonen und Hyperonen) - ist eine Darstellung dieser experimentell festgestellten Relations-, Struktur- und Symmetrie-Eigenschaften nicht möglich.

Seit mehr als 15 Jahren arbeiten Gruppen von Wissenschaftlern an einer theoretischen Aufklärung der experimentell festgestellten Symmetrien der Elementarteilchen, die sich zu „Familien“ zusammenfassen lassen, und ihrer Wechselwirkungen. Die bekanntesten Arbeiten auf diesem Gebiet stammen von M. Gell-Mann, Y. Ne'eman, K. Nishijima und S. Okubo⁵. Das mathematische Werkzeug dieser Untersuchungen ist die Gruppentheorie, die Hermann Weyl „das glänzendste Beispiel rein intellektueller Mathematik“⁶ genannt hat. Wir wollen im folgenden nur kurz an einen besonders berühmt gewordenen und viel diskutierten Fall verblüffender Übereinstimmung zwischen theoretischer Voraussage und experimenteller Bestätigung erinnern, nämlich an die Entdeckung des Omegaminus-Hyperons.

⁵ M. Gell-Mann: Phys. Rev. 92 (1963) 833; 125 (1962) 1067; Proc. Internat. Conf. High Energy Phys. CERN (1962) 805. Y. Ne'eman: Nucl. Phys. 26 (1961) 222. K. Nishijima und T. Nakano: Progr. Theoret. Phys. (Kyoto) 10, 581 (1953). S. Okubo: Progr. Theoret. Phys. (Kyoto, Japan) 27 (1962) 949.

⁶ H. Weyl: Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft (Handbuch der Philosophie, Bd. II A), S. 23, Z. 34.

Der bekannte „acht-fähige Weg“ („eight-fold way“) - der Name erinnert an alte indische oder chinesische Philosophie -, welcher die Zusammenfassung einiger Oktett-Familien sowohl im Bosonen- wie im Fermionen-Bereich erlaubt hatte, wurde von den Autoren Gell-Mann und Ne'eman in den Jahren 1961 und 1962 zu einer zehn-dimensionalen Darstellung erweitert, der ein Dekuplett von Elementarteilchen entsprechen sollte. Den Ausgang bildet eine mathematische Struktur, eine spezielle unitäre Gruppe, SU_3 genannt. Natürlich können wir hier nicht auf den mathematischen Formalismus⁷ eingehen; wir wollen nur an einige Symmetrien erinnern, die interessant sind zur Beleuchtung des philosophisch-erkenntnistheoretischen Problems der Konvergenz zwischen Theorie und Praxis, Mathematik und Experiment.

Man kann neun schon vorher bekannte Arten von Elementarteilchen nach ihren verwandten Eigenschaften zusammenfassen⁸. Vier Arten von Delta-Hyperonen (elektr. Ladung: -1, 0, +1, +2); drei Arten von Sigma-Hyperonen (elektr. Ladung: -1, 0, +1); sowie zwei Arten von Xi-Hyperonen (elektr. Ladung: -1, 0). Demgemäss können wir von einer absteigenden ‚Multiplizität‘ sprechen: 4, 3 und 2 Teildienarten. Wenn wir weiter als „mittlere elektrische Ladung“ Q eines Iso-Multipletts dessen Gesamtladung, geteilt durch die Multiplizität, bezeichnen, so erhalten wir: $Q = \frac{1}{2}$ für Delta: $(2 + 1 + 0 - 1) : 4$; $Q = 0$ für Sigma: $(1 + 0 + (-1)) : 3$; $Q = -\frac{1}{2}$ für Xi: $(0 - 1) : 2$. Um schliesslich aus den Multiplett- oder „Familien“-Eigenschaften „Multiplizität“ M und „mittlere elektrische Ladung“ Q die Individual-Eigenschaft „Teilchenladung“ q ableiten zu können, stellten die Autoren (Gell-Mann und Ne'eman) die einfache Gleichung auf: $q = I_z + Q$, wobei I_z definiert ist als „dritte Komponente der Projektionen im Isospin-Raum“, und der „Isospin“ I definiert ist durch die Gleichung:

$$I = (M - 1) : 2.$$

Weitere Quantenzahlen, die in der Hadronen-Physik auftreten (wir wollen hier nicht auf die sehr hypothetischen „Quarks“⁹ eingehen), sind vor allem die Nukleonen-Ladung oder Baryonenzahl B und die „Strangeness“ (mit „Seltsamkeit“ oder „Fremdheit“ übersetzt) S , welche unter-einander und mit der mittleren elektrischen Ladung Q in der einfachen Beziehung stehen: $B + S = 2 \cdot Q = Y$. Damit ist schliesslich die Quanten-zahl „Hyperladung“ $Y = 2 \cdot Q$ definiert als das Doppelte der mittleren elektrischen Ladung eines Elementarteilchen-Multipletts.

⁷ Zur Orientierung: H. P. Dürr: Physik. Blätter, 21 (1965), 406-420.

⁸ Nach der alten Bezeichnungsweise handelt es sich um „angeregte Zustände“ oder „Resonanzen“ der Nukleonen und Hyperonen; aber eine Unterscheidung zwischen „Teilchen“ und „Resonanzen“ ist beim heutigen Stand der Elementarteilchen-Physik ohnedies hinfällig geworden. Das ist der Grund, weshalb man heute von mehr als hundert Elementarteilchen-Arten sprechen kann.

⁹ M. Gell-Mann: Phys. Rev. Letters 8 (1964), 214.

Für die Quantenzahlen Isospin (I), „Strangeness“ (S) und Baryonenzahl (B) gelten Erhaltungssätze bei starken Wechselwirkungen, welche der SU₃-Symmetrie genügen. (Auf die in den letzten Jahren diskutierten höheren Symmetrien — SU₆ SU₁₂ — können wir in diesem Rahmen nicht eingehen¹⁰). Besonders interessant ist dabei die Erhaltung der Baryonenzahl B, welche als ein reines Strukturgesetz den Bestand und Zusammenhalt der physikalischen realen Aussenwelt garantiert und überalterte Vorstellungen von einer Erhaltung der „Masse oder Materie“ ersetzt.

Wir haben nunmehr die folgenden Sequenzen von Quantenzahlen; und die Zahl in Klammern richtet sich jeweils auf ein nach der Theorie vor-auszusagendes Teilchen:

<i>Multiplizität</i>	M:	4, 3, 2, (1).
<i>Mittlere Ladung</i>	Q:	½, 0, - 1/2 , (-1).
<i>Hyperladung</i>	Y:	1, 0, -1, (-2).
<i>Isospin</i>	I:	3/2, 1, ½. (0).

Die Projektionen I_z gewinnt man nach dem Schema:

$$3/2, 1/2 - 3/2, 1, 0, -1; + 1/2, - 1/2; (0).$$

Da die Baryonenzahl B für alle Baryonen (Nukleonen und Hyperonen) gleich 1 ist (für alle Anti-Baryonen mit entgegengesetzten Ladungen gleich -1), erhalten wir schliesslich als letzte Quantenzahlen

$$\text{Strangeness } S = Y - B: 0, -1, -2, (-3).$$

Nach den Symmetrie-Eigenschaften des geschilderten Dekupletts war also ein Teilchen zu erwarten mit den Quantenzahlen:

M = 1; Q = -1; Y = -2; I = 0; I_z = 0; B = 1; S = -3; die elektrische Ladung q berechnet sich nach der Formel:

$$q = I_z + Q: \quad q' = 0 + (-1) = -1.$$

Die Entdeckung des vorausgesagten Teilchens gelang vor etwas mehr als vier Jahren einer Gruppe von 33 Physikern in den USA, im Brookhaven National Laboratory, mit Hilfe eines Teilchen-Beschleunigers (Protonen-Synchrotron) mit einer Energie-Kapazität von

¹⁰ Victor Friedrich Weisskopf (geb. 19. Sept. 1908 in Wien; 1961; 66 Generaldirektor CERN Genf; jetzt Massachusetts Inst.): Quantentheorie und Elementarteilchen. II. Die neuen Symmetrien. In: Physikalische Blätter, 21 (1965), 561.

30 000 000 000 Elektron-Volt. Nicht nur die obenstehenden Quantenzahlen, sondern auch der Ruhmassenwert des neuen Elementarteilchens — heute, „Omega-Hyperon“ genannt — stimmen nach Theorie und Experiment genau überein. Die Werte sind, in Millionen-Elektron-Volt-Einheiten gemessen: Quatruplett Delta: 1238; Triplett Sigma: 1385; Dublett Xi: 1532; Singulett Omega (das neue Teilchen): 1679. Die Differenz zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Massenwerten ist 147, wie in der Okubo-Theorie vorausgesagt¹¹.

Die Auffindung des Omega-minus-Hyperons war der bisher grösste Erfolg der sogenannten „phänomenologischen“ Theorie der Elementarteilchen-Symmetrien, in einer überraschenden Übereinstimmung zwischen theoretischer Voraussage und experimenteller Bestätigung. Darüber hinaus, ist das Omega-minus das erste Elementarteilchen mit einer „Strangeness“-Quantenzahl kleiner als -2, das wir kennen. Trotz allem, dürfen wir einige wesentliche Punkte einer ernsten Kritik an den Grundlagen der „phänomenologischen“ Theorie — besser wäre die Bezeichnung „empirische“ Theorie, um eine Verwechslung mit Husserls phänomenologischer Philosophie zu vermeiden — nicht übersehen, um Heisenbergs „einheitliche Feldtheorie der Elementarteilchen“ verstehen zu können.

2. Heisenberg selbst hat seine Kritik an den Teil-Theorien wie folgt zusammengefasst: „Der Ausdruck ‚phänomenologische Theorie‘ wird in der folgenden Übersicht für jede Theorie benützt werden, die versucht, die empirischen Daten in ihrem Zusammenhang theoretisch zu verstehen, ohne ausdrücklich ein zugrunde liegendes Naturgesetz zu formulieren. Theorien dieser Art können zu sehr nützlichen Darstellungen der beobachteten Phänomene führen, und sie können später, wenn die endgültige Theorie gefunden ist, häufig als das Ergebnis einer gewissen Approximationsmethode erscheinen, die man auf die vollständige Theorie angewendet hat. Als ein bekanntes historisches Beispiel erwähnen wir die Darstellung der Planetenbahnen durch Zyklen und Epizyklen in der Astronomie des Ptolomäus. Die Zyklen und Epizyklen konnten später als die ersten Glieder einer Fourier-Darstellung der wahren Newton'schen Bahn aufgefasst werden“¹².

Hinzu kommt noch, dass die empirischen Theorien lediglich den Korpuskel-Charakter der Teilchen berücksichtigen, wie dieser sich bei lokal konzentrierten Wechselwirkungsprozessen äussert, nicht aber den dazu komplementären „Wellen-Aspekt“ der Übergangswahrscheinlichkeiten, wie sie Heisenbergs Matrizen-Mechanik und die zu dieser mathematisch isomorphe, d. h. strukturgleiche Wellen-Mechanik Erwin Schrödingers¹³ beschreibt. Heisenbergs neue einheitliche Feldtheorie wird der berühmten Einstein-Broglieschen „Doppelnatur“ von Licht und Materie gerecht: Trotz der hochkomplizierten Form seiner

¹¹ S. Okubo: Progr. Theoret. Phys. (Kyoto, Japan) 27 (1962), 494.

¹² W. Heisenberg: Einführung in die einheitliche Feldtheorie der Elementarteilchen, Stuttgart 1967, S. 125.

¹³ Geboren 12. August 1887 als Sohn einer alten Wiener Gelehrtenfamilie; † 4. Januar 1961.

fundamentalen nicht-linearen Spinor-Feldgleichung ist deren formale Verwandtschaft zu der einfachen Wellengleichung Schrödingers, auf dem Weg über die Kernfeldgleichung Hideki Yukawas, leicht festzustellen.

Heisenbergs „Schlussbemerkungen“¹⁴ beginnen mit dem Satz: „Die in dem vorliegenden Buch dargestellte einheitliche Feldtheorie kann als ein Versuch betrachtet werden, das Naturgesetz zu formulieren, das hinter dem komplizierten Spektrum der Elementarteilchen, ihren Wechselwirkungen und Symmetrien und hinter den in den bekannten phänomenologischen Theorien dargestellten Beziehungen steckt.“

3. Die soeben zitierte Selbstbetrachtung Heisenbergs gibt uns genügenden Anhalt, um die naturphilosophische Bedeutung seiner einheitlichen Feldtheorie der Elementarteilchen ins Auge zu fassen.

3. 1. Der am meisten auffallende Grundzug ist zweifellos der immanente und unabweisbare Drang des Geistes zur Vereinheitlichung, zur Rückführung des Mannigfaltigen und Vielfältigen auf eine innere Einheit, auf ein einziges Grundprinzip.

Bei Heisenberg ist es aber etwas anderes als mit dem einen Grundstoff der ionisch-miletischen Naturphilosophen des sechsten Jahrhunderts vor Christus (Thales' Wasser, Anaximenes' Luft). Am nächsten dürfte der modernen Auffassung noch das „Apeiron“, das Unbegrenzte, Unfassbare, Unerfahrbare des Anaximander nahekommen, das kein Geringerer als Heisenbergs Lehrer in Göttingen, Max Born, mit der heutigen Elementarphysik in Zusammenhang gebracht hat. Es ist auch nicht das eine, ungeteilte und unteilbare, zeitlose „Sein“ oder „Seiende“ des Parmenides, und noch viel weniger die in unzählige Teile zersplitterte, rein materielle Einheit der Atome des Leukippos und Demokritos, denn bei diesen fehlt gerade die formale Einheit des bestimmenden Gesetzes, auf die es in der modernen Physik ankommt. Viel näher steht der Konzeption Heisenbergs die uralte Schule des Pythagoras, dessen Lehre Aristoteles in dem Satz zusammengefasst hat: „Das ganze Universum ist Harmonie und Zahl“¹⁵. Am meisten geistige Verwandtschaft aber finden wir in Platons „Timaios“, in dem Bericht über die Zusammensetzung der vier empedokleischen Elemente aus unsichtbar kleinen regulären Polyedern: Feuer besteht aus Tetraedern, Luft aus Oktaedern, Wasser aus Ikosaedern und Erde aus Kuben; der fünfte aller möglichen regelmässigen Körper, der Dodekaeder, wird dem Weltganzen als „Bildschmuck“ zugeteilt¹⁶. Das formal Gemeinsame des Gedankenganges sehe ich vor allem in drei Berührungspunkten: Erstens: Der Ausgang von einfachen Struktur-Elementen; bei Platon

¹⁴ *Einführung in die einheitliche Feldtheorie ...*, S. 135.

¹⁵ Arist. *Metaph. A* 5, 985 b 23 ff.; Diels-Kranz 8 1951, I, S. 452, Z. 9.

sind es gleichseitige und gleichschenkelig-rechtwinkelige Dreiecke, bei Heisenberg die unitäre S-Matrix, welche die Beziehung zwischen Anfangs- und Endzustand in einem elementaren Streuprozess darstellt, sowie die Feld-Operatoren, welche als Erzeugungs- und Vernichtungs-Operatoren für „Materie“ im allgemeinen interpretiert werden können (Fritz Bopp, Werner Heisenberg¹⁷). Zweitens: Die Voraussetzung eines vorgegebenen, mathematisch formulierbaren Naturgesetzes. Bei Platon die apriorisch feststehende Ordnung, dass es fünf und nur fünf regelmässige Körper gibt. Für Heisenberg „scheint es nur eine einfache Gleichung zu geben, die möglicherweise das beobachtete Elementarteilchenspektrum darstellen kann“¹⁸. Drittens: Die Ableitung der Erscheinungswelt aus dem einen und nur einen mathematischen Gesetz: Bei Platon die Zuordnung der fünf regulären Vielecke zu den Welt-Elementen und zum Weltganzen (natürlich materiell falsch vom modernen Standpunkt aus; aber es geht uns ja hier nur um die formalen Ähnlichkeiten des Gedankengangs, die „natur-philosophisch“ ins Gewicht fallen). Heisenberg schreibt: „Die bei den Vorgängen an Elementarteilchen beobachteten Erhaltungssätze scheinen durch die Invarianz-Eigenschaften eben dieser Gleichung richtig dargestellt zu werden“¹⁹.

3. 2. Gegenüber den dargelegten ideellen Verwandtschaften, bildet einen fundamentalen Unterschied in der Einstellung der antiken und der modernen Physik und Naturphilosophie die Wertschätzung der rational gelenkten Erfahrung, des Experiments. Während aus Platons Theorie — die natürlich, vom Standpunkt der heutigen Naturwissenschaften her betrachtet, reine Phantasie ist — gar keine Berechnung und Voraussage zukünftiger Naturgeschehnisse folgt, hat sich Heisenberg gerade dies zum Ziel gesetzt: „Das eine universelle Gesetz müsste alle möglichen Phänomene umfassen“²⁰. Aus der sich gegenseitig befruchtenden Spannung und Wechselwirkung zwischen vorauseilender geistiger Intuition — der Hypothese — und zielbewusst gerichteter Empirie — dem Experiment — ist ja gerade die moderne Wissenschaft entstanden. Das erkenntnistheoretisch-philosophisch Interessante dabei ist, dass in einem gewissen Reifezustand der Forschung nicht mehr die Vernunft die Erfahrung überlagert (Autonomie der Idee und des Logos: Platon), noch die Erfahrung das Mass-gebende ist (phänomenologisch-empirische Symmetrien der Elementarteilchen), sondern dass die beiden gewissermaßen subjektiv-dialektisch gegenüberstehenden Pole, nämlich die Autonomie der Idee und die Heteronomie der Erfahrung, ihre komplementäre Ergänzung,

¹⁶ Platon, *Timaios* 53 A - 57 C. Vgl. 55 B: „Da es aber noch eine fünfte Art der Zusammensetzung von entsprechender Eigenschaft gibt, so bediente sich Gott dieser viel-mehr für das Weltganze, als er diesem seinen Bilderschmuck gab.“ Übersetzung von Franz Susemihl, Verlag Lambert Schneider, Heidelberg, o. J., S. 141, Z. 11-14.

¹⁷ W. Heisenberg: *Einführung in die einh. Feldth.*, 2-2, 2-3. S. 14, S. 18.

¹⁸ *Ibidem*, 3-1. S. 27.

¹⁹ W. Heisenberg: „Die Entwicklung der einheitlichen Feldtheorie der Elementarteilchen“, in: *Die Naturwissenschaften* (1963), S. 3.

²⁰ W. Heisenberg: *Einführung in die einh. Feldth.*, S. 136, Z. 37.

Erfüllung und Überhöhung finden in der Ontologie, Ontonomie oder genauer Orthonomie (Franz Brentano) der wahren Wirklichkeit. Diesem -- vielleicht asymptotisch unerreichbaren — Endziel strebt Heisenbergs Ansatz entgegen. Während er in den letzten 15 Jahren noch mehrmals nach neuen Erfahrungstatsachen sich korrigieren musste (z. B. 1956 nach der Entdeckung der Nicht-Erhaltung der Parität in schwachen Wechselwirkungen, durch die chinesischen Physiker Tsung Dao Lee und Chen Ning Yang), glauben wir, dass heute eine Vervollkommnung, eine „Orthonomie“ erreicht ist, die weit mehr erlaubt, neue Elementarteilchen-Familien und ihre Eigenschaften nach dem universalen Gesetz vorauszusagen, als diese Modifikationen befürchten müsste auf Grund von neuen experimentellen Entdeckungen.

3. 3. Heisenbergs einheitliche Feldtheorie der Elementarteilchen ist schliesslich, ontologisch-philosophisch betrachtet, eine durchaus realistische Auffassung des Grundgesetzes der physikalischen Wirklichkeit. Einige wenige Zitate können das zur Genüge belegen: „Alle Teilchen sind gewissermassen nur Formen einer Grundsubstanz, die man Materie oder Energie nennen kann. Die Energie wird zur Materie, indem sie sich in die Form eines Elementarteilchens begibt. Diese Formen müssen durch ein einheitliches Naturgesetz bestimmt sein, sich aus ihm herleiten lassen. Die Elementarteilchen sind also stationäre Zustände eines physikalischen Systems „Materie“ ...²¹. „Wenn die verschiedenen Elementarteilchen als verschiedene Formen der fundamentalen Substanz ‚Energie‘ oder ‚Materie‘ auf-gefasst werden, so sollte man doch darauf achten, dass sie häufig nur sehr vergängliche Formen mit äusserst kurzer Lebensdauer sind ... Alle Obergänge sollten möglich sein. Der Ausdruck ‚Elementarteilchen‘ wird ganz allgemein für irgendeine dieser Formen benützt werden, unabhängig von ihrer speziellen Stabilität“²². Es liegt nahe, hier an den Begriff „Energie-Strukturen“ oder „strukturierte Energien“ zu denken (den Hinweis verdanke ich dem Physiko-Chemiker Hans Georg Grimm); denn Energie — und darum auch „Materie“ — ist ja kein absoluter Bestand, sondern vom Potentialniveau, von der „Wertigkeit“, von der „Strukturiertheit“ abhängig. Heisenberg selbst hat das in einem für sein Denken und Arbeiten sehr charakteristischen Satz ausgedrückt: „Man erkennt hier auch, dass mit der Feststellung des einen Grundstoffs nur wenig gewonnen ist und dass vielmehr der ganze Reichtum erst in den Formen steckt“²³.

3. 4. Schliesslich ist es interessant zu bemerken, wie die Elementarteilchen-Physik — zweifellos das hervorragendste Faktum der physikalischen Forschung in der zweiten Hälfte des XX. Jahrhunderts -- die uralten wissenschaftlich-philosophischen Aporien und Antino-

²¹ W. Heisenberg: „Die Entwicklung der einheitlichen Feldtheorie der Elementarteilchen“, in: „Die Naturwissenschaften“ (1963), S. 3.

²² W. Heisenberg: Einführung in die einh. Feldth., S. 3, Z. 17—20 und 36—39.

²³ W. Heisenberg: *Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft*, 8. Aufl. Stuttgart 1949, S. 97, Z. 32—34.

mien zu überwinden trachtet, die von Zenon von Elea (ca. 490-430 vor Chr.)²⁴ bis zu Kants „transzendentaler Dialektik“ reichen²⁵. Es handelt sich um die berühmte angebliche „innere Unendlichkeit“ einer unbegrenzten Teilbarkeit „nach innen hinein“, oder mit anderen Worten, um das Problem „Kontinuum-Diskontinuum“. Mathematisch wurde das Problem bereits im vergangenen Jahrhundert gelöst durch das Konvergenz-Kriterium von Augustin Louis Cauchy und die Definition der Irrationalzahlen von Richard Dedekind („Dedekindscher Schnitt“). Den physikalischen Aspekt zu klären, bleibt unserer Generation vorbehalten.

Es gibt grundsätzlich zwei Möglichkeiten, dem physikalischen Problem einer „unbegrenzten Teilbarkeit“ näherzukommen. Ich möchte diese beiden Möglichkeiten mit den Namen „innere Strukturierung“ und „äussere Strukturierung“ bezeichnen. Der erste Weg der Annahme einer inneren Strukturierung ist der zumeist in der Geschichte des Geistes beschrittene, seitdem Anaxagoras vor nunmehr 24 Jahrhunderten mit seinem Gedanken der „Homoiomerien“ das Prinzip aufgestellt hat²⁶, welches kaum ein Jahrhundert später Platon im „Timaios“ in eine mythische Form eingekleidet hat²⁷. Auf den Spuren der Annahme einer inneren Struktur der Nukleonen, welche der Nobelpreisträger für Physik 1961 Robert Hofstadter auf Grund seiner experimentellen Untersuchungen in Stanford (Californien) vorgeschlagen hatte, haben vor drei Jahren die russischen Physiker M. E. Omeljanowski und G. B. Rumer eine Theorie der „Teilchenskala ohne Begrenzung“ ausgearbeitet. Leider fehlt uns hier Raum und Zeit, auf diese ausgezeichnete Arbeit mehr als mit der Anregung, sie zu studieren, einzugehen²⁸.

Im Grunde sind sich die Physiker heute einig über die Grundcharaktere der Mikrowelt. Omeljanowski-Rumer schreiben hierzu: „Die Frage nach dem Elementaren und Komplizierten, die gestellt werden kann bezüglich Elektronen, Protonen, Mesonen und anderen Elementarteilchen, besitzt nicht mehr jenen Sinn, den sie in der alten Atomistik besass. Die Begriffe elementar und kompliziert verlieren in der Mikrowelt ihren abstrakt-unveränderlichen Charakter und werden „fließend“, wobei sie miteinander verknüpft sind und nur so einen konkreten Sinn erhalten. Ebenso Heisenberg: „Die Elementarteilchen sind nicht, wie man früher etwa angenommen hätte, unveränderliche, unteilbare Grundbausteine der Materie. Sie können vielmehr ineinander umgewandelt werden“²⁹. „Die bekannte Formel: ‚jedes Elementarteilchen besteht aus allen anderen Elementarteilchen‘ scheint eine gute Be-

²⁴ Vgl. Aristoteles, *De Gener. et Corr.*, 316 a 14-34, 325 a 8-12, sowie Simplicius, in *Phys.* 139, 24—140, 26.

²⁵ Kant, *Kr. d. r. V.*, A 434-437, B 462-465; Insel-Ausg. II, 420-423. („Der Antinomie der reinen Vernunft zweiter Widerstreit der transzendentalen Ideen“.)

²⁶ Anaxagoras: Diels-Kranz, II, 59 (46) B Fr. 3: „Denn nicht gibt es beim Kleinen je ein Kleinstes, sondern stets ein noch Kleineres (denn es ist unmöglich, dass das Seiende durch Teilung zu sein aufhöre).“

²⁷ Platon, *Timaios*, 53 E: „Die noch ursprünglicheren Urbestandteile aber kennt nur Gott und von den Menschen der, den er lieb hat“.

²⁸ Omeljanowski-Rumer, in: *Physik. Blätter* 22 (1966), 8, 343.

²⁹ W. Heisenberg, in: *Die Naturwissenschaften*, 50 (1963), 1, S. 3.

schreibung der paradoxen Situation zu geben, mit der wir in den Experimenten konfrontiert werden"³⁰. Elementarteilchen „können ‚kleinste Einheiten‘ also nur in dem Sinne genannt werden, dass sie dann, wenn sie zerlegt werden, in Teile zerfallen, die selbst nicht kleiner sind, sondern eben wieder Einheiten etwa der gleichen Art und Grösse“.

Das Letztere ist das Entscheidende. Heisenberg findet einen anderen logisch mehr kohärenten Weg als die Annahme einer „inneren Strukturierung“, einer „unendlichen Teilbarkeit nach innen hinein“. Alle Eigenschaften der Elementarteilchen rühren vielmehr von ihrer „äusseren Strukturierung“ her, von ihren vielfältigen Wechselwirkungen und Wechselbeziehungen, und damit von den übergeordneten Struktur-Feldern und dem diesen allen gemeinsamen universalen Rahmen-Gesetz. Die Teilchen oder Korpuskeln sind in diesem weltweit gespannten und logisch-mathematisch formulierbaren Rahmen nicht „beharrende Dinge“, sondern -wie schon Eddington und Whitehead voraussagten- „events“, das heisst: äusserst flüchtige Ereignisse. Philosophische Vorläufer dieses Gedankens, dass eine gesetzmässige Determination eine „unendliche Teilbarkeit nach innen hinein“ ausschliesse, habe ich bisher nur bei Nikolaus von Kues und bei Leibniz gefunden. Daher kann ich Heisenberg³¹ zustimmen, in seiner Schlussfolgerung: „Already the existing experimental evidence an elementary particles forces us now to say that we will either some day have a unified theory of the whole system of elementary particles, or we will not understand it at all.“

³⁰ W. Heisenberg: *Einf. in d. einh. Feldth.*, 1967, S. 2.

³¹ Niels Bohr, *Memorial Meeting*. Copenhagen 1964.

Zusammenfassung

Vor etwas mehr als Jahresfrist veröffentlichte Werner HEISENBERG seine „Einführung in die einheitliche Feldtheorie der Elementarteilchen“ in paralleler englischer und deutscher Ausgabe. Es gibt mehr als einen Anlass zu einem Gedanken gerade 1968 in Wien: es sind zehn Jahre her seit dem plötzlichen Tod des 1900 in Wien geborenen Wolfgang Pauli, des engsten Mitarbeiters von Heisenberg bei der allmählichen Gestaltung der Theorie. Im vergangenen Jahr (1967) wäre der 80. Geburtstag des Wiener Nobelpreisträgers Erwin SCHRÖDINGER gewesen, dessen berühmte Wellengleichung der Elektronen eine der ersten Grundlagen für die Theorie abgab. Schliesslich feiern wir am 19. September dieses Jahres den 60. Geburtstag des Wiener Physikers Victor Friederich WEISSKOPF, der gleichfalls hervorragenden Anteil hat an der Erforschung der Elementarteilchen.

Das immer tiefere Eindringen in diese elementare Mikrowelt ist zweifellos das hervorragendste Faktum der physikalischen Wissenschaft in der zweiten Hälfte des XX. Jahrhunderts, und ist auch in mehreren Aspekten von hohem naturphilosophischen Interesse. Handelt es sich doch darum, die drei letzten Typen physikalischer Realität, die wir kennen, nämlich das elektromagnetische, das materielle und das gravitatorische Feld, auf ein einziges universelles Feldgesetz zurückzuführen.

Das vorliegende Referat gliedert sich in drei Teile:

1. Die sogenannten „phänomenologischen“ (genauer „empirischen“) Theorien der Elementarteilchen oder Teil-Symmetrien (S. 2-5).
2. Die einheitliche Feldtheorie in ihrer physikalischen Bedeutung (S. 6).
3. Die naturphilosophische Bedeutung einer einheitlichen Feldtheorie der Elementarteilchen (S. 7-11).

3.1. Der am meisten auffallende Grundzug ist die Neigung zur *Vereinheitlichung*, zur Rückführung des Mannigfaltigen auf seine innere Einheit, auf ein einziges Grundprinzip. Es ist aber nicht die „materielle“ Einheit des einen „Grundstoffes“ der ionischen Naturphilosophen des sechsten vorchristlichen Jahrhunderts, und ebensowenig des antiken Atomismus, sondern worauf es HEISENBERG ankommt, ist die *formale Einheit* des bestimmten Gesetzes. Wir finden geistige Verwandtschaft in den pythagoreischen Schulen und vor allem in PLATONS „Timaics“, nämlich in der Voraussetzung eines vorgegebenen, mathematisch formulierbaren Naturgesetzes: Bei Platon die apriorisch feststehende Ordnung, dass es fünf und nur fünf reguläre Polyeder als „Welt-Elemente“ gibt; für HEISENBERG „scheint es nur eine einfache Gleichung zu geben, die möglicherweise das

beobachtete Elementarteilchen-Spektrum darstellen kann" (Einführung in die einheitliche Feldtheorie, S.27).

3.2. Einen wesentlichen Unterschied, welcher die moderne Naturauffassung vor der antiken auszeichnet, sehen wir jedoch in der Wertschätzung der rational gelenkten Erfahrung, des *Experiments*. Es ist nicht *Autonomie* der Idee und des Logos, aber auch nicht Heteronomie der blossen Empirie, sondern die "*Orthonomie*" (Franz BRENTANO) der wahren Wirklichkeit, oder wenigstens eines ihrer Aspekte.

3.3. HEISENBERGs einheitliche Feldtheorie ist - ontologisch-philosophisch betrachtet - eine durchaus *realistische* Auffassung des Grundgesetzes der physikalischen Wirklichkeit (Belege durch Zitate).

3.4. Die Elementarteilchen-Theorie strebt nach einer Überwindung der uralten wissenschaftlich-philosophischen Aporien und Antinomien, die von ZENON von Elea bis zu KANTs "transzendentaler Dialektik" einer unbegrenzten Teilbarkeit "nach innen hinein", oder mit anderen Worten, um das Problem "Kontinuum-Diskontinuum". Es gibt grundsätzlich zwei Möglichkeiten: Erstens, die Annahme eine "inneren Strukturierung" der Elementarteilchen, worüber die russischen Physiker OMELJANOWSKI und RUMER eine interessante Theorie der "Teilchenskala ohne Begrenzung" ausgearbeitet haben. Zweitens - und das ist HEISENBERGs Auffassung -: Alle Eigenschaften der Elementarteilchen rühren von ihrer "äusseren Strukturierung" her, von ihren vielfältigen Wechselwirkungen, und damit von den übergeordneten Struktur-Feldern und dem diesen allen gemeinsamen universalen Rahmen-Gesetz. Die Teilchen sind in diesem Rahmen nicht "beharrende Dinge", sondern "*events*" (EDDINGTON, WHITEHEAD), d.h. äusserst flüchtige *Ereignisse*.

Diskussionsbeitrag: Plenarsitzung V: Philosophie und Naturwissenschaft

Thema: *Zur Ontologie der Naturgesetze*

Zusammenfassung (résumé):

1. Die moderne Naturwissenschaft versteht sich selbst als Erforschung der Naturgesetze. Der Begriff des Gesetzes hat die Kategorie der Form mit neuem Inhalt erfüllt (Zitate von LEIBZIG, HEISENBERG, WEYL, C. F. v. WEIZSÄCKER). Daher die philosophische Frage: Was ist ein Naturgesetz?

2. Vorläufige Definition: *Ein Naturgesetz ist die strukturelle Determination einer Reihe von realen Phänomenen.* "Phänomen" wird hier im ursprünglichen Sinne verstanden als etwas, was sich zeigt, sich offenbart. Da die Begriffe Determination, Reihe ohne weiteres verständlich sind, bleibt als nächste Frage:

3. Was heisst "*Struktur*"? *Struktur ist ein geordnetes System von Relationen.* Diskussionen der Grundbegriffe: Struktur, Ordnung, System, Relation (Beziehung) sowie verwandter Begriffe: Isomorphie, Symmetrie, Harmonie, Komplementarität, Analogie, Hierarchie. Verhältnis von Strukturen und Struktur-Elementen.

4. Bedeutung des Strukturbegriffes in den modernen Wissenschaften, besonders in der Mathematik (Arbeitskreis BOURBAK) und in der Physik (HEISENBERGs einheitliche Feldtheorie der Elementarteilchen). Bestimmung der Mathematik als Erforschung aller *möglichen* Strukturen, der Physik als Erforschung der *realisierten* oder *aktualisierten* Strukturen. Damit Auftauchen eines ontologischen Grundes der Naturgesetze.

5. Frage nach einer "*existentiellen Objektivierbarkeit*" der Naturgesetze. Gibt es ein reales und objektives Korrelat des noetischen Sinnes, welchen die mathematisch-symbolischen Formulierungen der Naturgesetze darstellen? Voraussetzung einer möglichen Antwort ist ein Beweis oder wenigstens eine Aufzeigung der ontischen Wirklichkeit der Naturgesetze.

6. Dieser Beweis erfolgt in drei Schritten: Erstens: Erfahrung der unwahrscheinlichen Ordnung in der Welt, welche dem Wahrscheinlichkeits-Gesetz der Entropie ($S = k \log \text{nat } W$) widerspricht. Zweitens: Unterscheidung von Traum und Wirklichkeit gerade an Hand der Gesetzmässigkeits-Voraussetzung. Drittens: Prognostizierbarkeit künftiger Ereignisse auf Grund der Naturgesetze.

7. Frage nach einer "*essentiellen Objektivierbarkeit*" der Naturgesetze: Wenn diese ein *reales* Determinations-Moment darstellen, welche besondere Seinsweise kommt ihnen dann zu? Begriffsbestimmung als das, was einer Klasse von physikalischen Entitäten

(Materiefelder, Gravitationsfelder, elektro-magnetische Felder) allgemein strukturell gemeinsam ist. Damit ergeben sich als weitere Bestimmungen des ontischen Charakters der Naturgesetze: Immaterialität, Unräumlichkeit, Überzeitlichkeit.

8. Ein Vergleich mit der aristotelischen Vier-Ursachen-Lehre ergibt, dass die Natur-Gesetzlichkeit zumindest Ähnlichkeit mit der *causa formalis* hat (Charakter des Allgemeinen und Strukturellen) und daher ontologisch zu unterscheiden ist von der "Kausalität im engeren Sinne", der jeweils individuellen Wirk-Ursächlichkeit oder Wechselwirkung als *causa efficiens* (Vertikal- und Horizontal-Determination).

9. Modal-Charakter der Naturgesetze: Hypothetische Notwendigkeit, genauer: Zwangsläufigkeit der Ereignisse, und somit *ontischen Kontingenz* der Gesetze: Unter der Voraussetzung, dass dieses oder jenes Gesetz existiert, geschieht dies oder jenes; aber das Gesetz *muss nicht* sein.

10. Einführung und Erläuterung des Begriffes "*Energie-Strukturen*" zur Charakterisierung der physikalischen Realität in ihrem dynamisch-energetischen und rational-gesetzmässigen Charakter. Modal-Analyse.

11. *Immanenz-Charakter* der Energie-Strukturen und damit des ihnen strukturell Gemeinsamen, der Naturgesetze, innerhalb der beobachteten und beurteilten Welt des Menschen. Damit ist der weiteste Rahmen gespannt für das Problem der "Nicht-Objektivierbarkeit" mikrophysikalischer Ereignisse, d.h. ihrer Unabtrennbarkeit vom Beobachtungsakt.

12. Hierarchischer Aufbau der strukturell-gesetzmässigen Determination der Wirklichkeits-Bereiche und damit Möglichkeit einer inneren Einheit der wissenschaftlich-philosophischen Forschung.