

# Informations - Informationen - Informazioni - Notes

## DE PRINCIPIIS

Avant-propos de la rédaction. *A l'avenir, nous publierons, de temps en temps, sous la rubrique DE PRINCIPIIS une suite de brefs essais d'une portée philosophique et théorique rédigés par des théoriciens compétants et spécialisés dans une des branches des sciences naturelles. Pour cette collaboration la rédaction s'adressera, en général, elle-même aux auteurs.*

Redaktionelle Vorbemerkung. *Unter der Rubrik DEPRINCIPIIS erscheinen in zwangloser Folge kleinere Aufsätze theoretisch-philosophischen Inhalts von hierzu besonders berufenen Theoretikern einer naturwissenschaftlichen Teildisziplin. In der Regel werden diese Beiträge von der Redaktion eigens angefordert.*

Avvertenza della redazione. *Sotto la rubrica DE PRINCIPIIS appariranno di quando in quando brevi articoli di carattere teorico-filosofico ad opera di teorici d'un ramo delle scienze naturali specialmente competenti in tale materia. Questi lavori vengono per solito richiesti dalla redazione stessa.*

Editorial Remark. *Under the heading of DE PRINCIPIIS brief essays of theoretical-philosophical content by especially qualified theorists in particular fields of the natural sciences appear in loose sequence. As a rule such contributions will be requested by the editors.*

## Die philosophische Bedeutung der Idee der Komplementarität<sup>1</sup>

VON W. PAULI, Zürich

1. Die Veröffentlichung dieses Vortrages erfolgt in der Hoffnung, mit diesem kleinen Beitrag diejenigen größeren Bestrebungen zu fördern, welche im allgemeinen das Ziel verfolgen, die verschiedenen Teildisziplinen, in welche unsere Geistigkeit auseinandergefallen ist, einander wieder näherzubringen. Die Abspaltung der Naturwissenschaften und der Mathematik als selbständige Teildisziplinen aus einer ursprünglich einheitlichen, aber vorwissenschaftlichen Naturphilosophie, welche im 17. Jahrhundert einsetzte, war zwar eine notwendige Bedingung für die weitere geistige Entwicklung des Abendlandes. Aber heute scheinen mir die Voraussetzungen für ein erneuertes Einverständnis der Physiker und der Philosophen über die erkenntnistheoretischen Grundlagen der wissenschaftlichen Naturbeschreibung erfüllt zu sein. Die Entwicklung der Atomistik und Quantentheorie seit 1900 hat nämlich dazu geführt, daß die Physik allmählich gezwungen war, ihren stolzen Anspruch, im Prinzip die *ganze* Welt verstehen zu können, aufzugeben. Alle Physiker, welche die Entwicklung bejahen, die in der systematischen Konstruktion des mathematischen Formalismus der Wellenmechanik im Jahre 1927 einen vorläufigen Abschluß fand, müssen zugeben, daß wir heute zwar Naturwissen-

schaften, aber kein naturwissenschaftliches Weltbild mehr besitzen. Eben dieser Umstand könnte aber als Korrektur der früheren Einseitigkeit den Keim eines Fortschrittes in Richtung auf ein einheitliches Gesamtweltbild in sich tragen, in welchem die Naturwissenschaften nur ein Teil sind. Hierin möchte ich die allgemeinere Bedeutung der Idee der Komplementarität erblicken, welche dank dem dänischen Physiker NIELS BOHR aus dem Boden der Physik gewachsen ist.

Im Gegensatz zur Relativitätstheorie wurde diese Wendung in der modernen Physik bis jetzt nur von einer kleinern Zahl philosophischer Fachvertreter zur Kenntnis genommen. Andererseits haben einige Physiker die moderne Quantenphysik als Bestätigung spezieller philosophischer Richtungen, wie z. B. des Positivismus, gedeutet. Im Gegensatz zu dieser Ansicht möchte ich hier den Standpunkt vertreten, daß die erkenntnistheoretische Situation, vor welche die moderne Physik gestellt ist, von keinem philosophischen System vorhergesehen wurde.

Im folgenden möchte ich nun an einfachen Beispielen erläutern, wie innerhalb der Physik die Idee der Komplementarität eine Synthese von entgegengesetzten und einander zunächst widersprechenden Voraussetzungen ermöglicht hat. Zur Erreichung dieses Ziels waren allerdings weitgehende Verallgemeinerungen des alten Ideals der Kausalität und sogar des Begriffes der physikalischen Realität notwendig.

2. Das in der Physik berühmt gewordene Beispiel zweier einander widersprechender Vorstellungen, das uns hier beschäftigen soll, ist das des «Teilchenbildes» und des «Wellenbildes». Daß Teilchen keine Wellen und Wellen keine Teilchen sind, läßt sich bereits erkennen, wenn einem Energiestrom eine halbdurchlässige Platte entgegengestellt wird. Besteht dieser Strom aus einem Wellenvorgang oder aus *vielen* Teilchen, so wird ein bestimmter Bruchteil der Energie an der Platte reflektiert und der Rest hindurchtreten. Was geschieht jedoch, wenn im Fall des Teilchenstroms dessen Intensität so vermindert wird, daß während des Versuches praktisch nur ein einziges Teilchen die Platte trifft? Dieses wird im Gegensatz zum Fall des Wellenvorganges als unteilbares Individuum entweder durch die Platte hindurchtreten oder von ihr reflektiert werden, aber sicher nicht auf beiden Seiten der Platte zugleich erscheinen können. Der Unterschied der Konsequenzen beider Bilder ist also ebenso unüberbrückbar wie der analoge Unterschied der beiden logischen Relationen «entweder-oder» und «sowohl als auch».

Dennoch hat sich empirisch herausgestellt, daß das Licht sowohl Eigenschaften hat, die sich nur mit Hilfe des Wellenbildes, als auch andere, die sich nur mit Hilfe des Teilchenbildes beschreiben lassen. Zu den ersteren gehören die heute bereits klassisch gewordenen Interferenz- und Beugungserscheinungen. Das ihnen Gemeinsame besteht darin, daß das Licht derselben Quelle in mindestens zwei verschiedene Wege aufgespalten wird, die nachher wieder zusammentreffen. Bei letzterem Vorgang addieren sich jedoch nicht die Intensitäten der Teilstrahlen, sondern die Amplituden (Superpositionsprinzip), deren Quadraten die Intensitäten proportional sind. Die resultierende Intensität hängt sonach periodisch von der Phasendifferenz der Teilwellen ab, für die außer den optischen Konstanten der vom Licht durchlaufenen Medien die Längen der zurückgelegten Wege maßgebend sind. Die genaue geometrische

<sup>1</sup> Vortrag, gehalten in der Philosophischen Gesellschaft in Zürich im Februar 1949. Der physikalische Sachverhalt konnte im § 2 des Vortrages nur qualitativ kurz skizziert werden. Bezüglich der Einzelheiten möge auf die einschlägigen Arbeiten von N. BOHR, *Atomtheorie und Naturbeschreibung* (Berlin 1931), sowie seinen Artikel im Einstein-Band der Library of living Philosophers (Evanston, 1949), ferner auf W. HEISENBERG, *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie* (Leipzig 1930), verwiesen werden. Der frühere Vortrag des Autors in der Philosophischen Gesellschaft Zürich, *Raum Zeit und Kausalität in der modernen Physik*, ist in der Zeitschrift Scientia 59, 65 (1936) veröffentlicht worden.

Bestimmtheit dieser Phasendifferenz ist sonach eine notwendige Voraussetzung des Auftretens der Interferenzerscheinungen. Diese erweisen sich jedoch als von der Intensität des Lichtes unabhängig, sofern nur die zum Nachweis des Lichtes benützten Apparate genügend lange Zeit in Funktion sind.

Ein besonders auffallendes Beispiel einer Erscheinung, für deren Deutung das Teilchenbild das naturgemäße ist, bildet andererseits der lichtelektrische Effekt, der in der Auslösung von Elektronen an einer Metallplatte durch Licht besteht. Während nämlich die Intensität des auffallenden Lichtes nur die *Anzahl* der pro Zeiteinheit ausgelösten Elektronen bestimmt, erweist sich die Energie der Elektronen als unabhängig von der Lichtintensität und als nur abhängig von der Wellenlänge (oder Schwingungszahl) des einfallenden Lichtes. Wie EINSTEIN 1905 gezeigt hat, läßt sich das Phänomen des lichtelektrischen Effektes quantitativ mit Hilfe der Vorstellung beschreiben, daß die Energie  $E$  und die Bewegungsgröße  $P$  des Lichtes bestimmter Wellenlänge und Fortpflanzungsrichtung in «Lichtquanten» oder «Photonen» der Größe

$$E = h \nu, \quad P = h \cdot 1/\lambda \quad (1)$$

raumzeitlich konzentriert bleibt. Dabei bedeutet  $\nu$  die Schwingungszahl,  $\lambda$  die mit dieser gemäß

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

verknüpfte Wellenlänge,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit und  $h$  die durch PLANCK in die Theorie der Wärmestrahlung eingeführte und *Wirkungsquantum* genannte universelle Konstante. Zum Verständnis des lichtelektrischen Effektes genügt es, anzunehmen, daß die durch (1) gegebenen, elementaren Beträge von Energie und Bewegungsgröße nur als Ganzes emittiert und absorbiert werden können. Diese Annahme bewährte sich auch bei der Deutung anderer den Energieumsatz von Licht betreffenden Phänomene.

Man muß also schließen, daß das oben beschriebene Experiment mit der halbdurchlässigen Platte für Licht geringer Intensität zugunsten des entweder—oder ausfallen wird: ein einzelnes Photon wird entweder hinter oder vor der Platte in einer Photozelle oder photographischen Platte eine Wirkung hervorrufen, aber nicht gleichzeitig auf beiden Seiten. Die Anwendung dieses Teilchenbildes auf Interferenzerscheinungen erweist sich aber als nicht durchführbar. Nimmt man nämlich an, daß ein einzelnes Photon nur *einen* der Lichtwege durchläuft, auf deren Zusammenwirken die Interferenzerscheinung beruht, so müßte die Häufigkeit seiner Wirkung an einem Punkt, die stets der aus der Wellentheorie folgenden Lichtintensität (d.h. dem Quadrat der resultierenden Amplitude) an dieser Stelle proportional ist, von der Existenz von (unter Umständen weit abliegenden) Wegen abhängen, die es nicht durchlaufen hat. Ja, diese Trefferwahrscheinlichkeit müßte sich sogar wesentlich ändern, wenn der Beobachter z. B. eine Öffnung schließt, die das Photon gar nicht passiert hat; denn eine solche Operation ändert im Wellenbild wesentlich die möglichen Wege der Partialwellen, die für die resultierende Trefferverteilung des Photons maßgebend sind. Das Resultat ist übrigens an Stellen besonders drastisch, wo die Wellentheorie die Intensität Null ergibt, da dann die bloße *Möglichkeit* des Auftretens eines Photons an dieser Stelle (statt deren Häufigkeit im allgemeinen

Fall) von der Gesamtheit der möglichen Wege des Photons abhängt. Der Interferenzversuch fällt demnach zugunsten des «sowohl – als auch» aus.

Längere Zeit hindurch schien dieses Dilemma unlösbar. Eine unerwartete Wendung in dieser Situation trat jedoch ein, als sich der Dualismus zwischen Wellenbild und Teilchenbild als *universell* erwies. Er besteht nicht nur für das Licht, sondern ebenso auch für alle materiellen Teilchen. Auch diese zeigen Interferenzerscheinungen, die sich nur mit Hilfe eines Wellenbildes beschreiben lassen. Und zwar sind nach DE BROGLIE Schwingungszahl und Wellenlänge dieser Wellen gemäß der nämlichen Formel (1) mit Energie und Bewegungsgröße der Teilchen zu verknüpfen, die auch für das Licht Geltung hat. (Nur die Formel (2) ist für Materiewellen durch eine allgemeinere zu ersetzen.)

Dies hat zunächst zur Folge, daß auch das Partikelbild eine charakteristische Begrenzung hat, und zwar nicht nur beim Licht, sondern auch bei der Materie. In der Wellenkinematik läßt sich leicht allgemein zeigen, daß Superpositionen von Wellen, sogenannte *Wellenpakete*, einen um so größeren Spielraum  $\Delta(1/\lambda)$  der Wellenzahlen (reziproken Wellenlängen) ihres Spektrums enthalten müssen, je kleiner ihre räumliche Ausdehnung ist und umgekehrt. Allgemein ist das Produkt

$$\Delta x \Delta \left( \frac{1}{\lambda} \right) \sim 1 \quad (3)$$

höchstens von der Größenordnung 1. Gemäß der fundamentalen Verknüpfung (1) von Wellenlänge und Bewegungsgröße folgt daraus

$$\Delta P \Delta x \geq h \quad (4)$$

(wobei sich  $P$  und  $x$  auf Komponenten der zugehörigen Vektoren in derselben Richtung beziehen). Dies ist der Inhalt des berühmten HEISENBERGSchen Ungenauigkeitsprinzips. Es ist nicht möglich, einem materiellen Körper, sei er makroskopisch oder atomar, elektrisch geladen wie ein Elektron oder neutral wie ein Photon, zugleich eine exakte Lage und einen exakten Wert seiner Bewegungsgröße zuzuschreiben. Denn im Wellenbild existieren keine «Pakete», die der Relation (3) widersprechen. (Für Energie und Zeit gilt Analoges, doch brauchen wir nicht darauf einzugehen.)

Dieses universelle Ungenauigkeits- oder Unsicherheitsprinzip ermöglicht es uns, einzusehen, daß die Anwendung des Wellenbildes und des Teilchenbildes nicht mehr in Widerspruch miteinander geraten können, da die Versuchsanordnungen mit dem Resultat zugunsten des «als – auch» (Wellenbild) und die andern Versuchsanordnungen mit dem Resultat zugunsten des «entweder – oder» (Teilchenbild) *einander ausschließen*. Um nämlich zu entscheiden, ob ein Photon den einen oder den andern von zwei (oder mehreren) Wegen einschlagen hat, muß ein Rückstoß nachgewiesen werden, den das Photon auf gewisse Teile der Apparatur (Schirme, Blenden, Spiegel usw.) ausübt. Mit Hilfe der *Erhaltungssätze von Energie und Bewegungsgröße* kann dann auf die Fortpflanzungsrichtung des Photons geschlossen werden. Für die Möglichkeit einer solchen Rückstoßmessung ist nicht nur nötig, daß gewisse Apparateile gegen andere frei beweglich sind, sondern auch daß deren Bewegungsgröße vor ihrer Wechselwirkung mit dem Photon genügend genau bekannt ist. Gemäß der Unsicherheitsrelation (4) bedeutet das jedoch, daß die Lage dieser Apparateile vor dem Versuch dann nur mit einer unvermeidlichen Ungenauigkeit bekannt

ist. Eine quantitative Diskussion, die ich hier nicht wiedergeben kann, zeigt, daß diese Ungenauigkeit stets gerade von einem solchen Betrag ist, daß die für die Ausführung eines Interferenzversuches notwendige Bestimmtheit der Phasendifferenz verlorengegangen ist. Hat man daher nachgewiesen, daß ein Photon einen gewissen Weg sicher nicht eingeschlagen hat, so braucht dieser Weg auch für die Berechnung von Treffwahrscheinlichkeiten nicht in Betracht gezogen zu werden. Andererseits erfordert eine Interferenzanordnung räumlich fixierte Apparateile, bei denen die auf sie übertragene Bewegungsgröße stets unbestimmt bleiben muß. Eine Interferenzanordnung für ein Photon ist demnach ein Ganzes, das sich nicht in durch Raum und Zeit verfolgbare Kausalketten von weiteren das Photon betreffenden Ereignissen zerlegen läßt. Jeder Versuch einer solchen raumzeitlichen Verfolgung des Photons würde ja durch unbestimmbare Ortsveränderungen der Apparateile das Interferenzphänomen zerstören.

3. Die Endlichkeit des Wirkungsquantums, die eine Unterteilung individueller Quantenprozesse ausschließt, stellt also die Physiker vor folgende Situation: Es ist unmöglich, den ganzen Einfluß des Meßapparates auf das gemessene Objekt durch determinierbare Korrekturen in Rechnung zu stellen. Jeder Gewinn an Kenntnis atomarer Objekte durch Beobachtungen muß mit einem unwiderruflichen Verlust anderer Kenntnisse bezahlt werden. Die Naturgesetze verhindern zum Beispiel den Beobachter, eine gleichzeitige Kenntnis sowohl von Energie und Bewegungsgröße als auch von raumzeitlicher Lokalisierung eines Objektes zu erreichen. Welche Kenntnis gewonnen und welche andere Kenntnis unwiderruflich verloren ist, bleibt der freien Wahl des Experimentators zwischen einander ausschließenden Versuchsanordnungen überlassen. Diese Situation wurde von BOHR mit «Komplementarität» bezeichnet. Der Unkontrollierbarkeit des Eingriffes der Beobachtung in das beobachtete System wird dadurch Rechnung getragen, daß die atomaren Objekte nicht in eindeutiger Weise durch die gewöhnlichen physikalischen Eigenschaften beschrieben werden können. Dadurch ist die Voraussetzung einer Beschreibung der Phänomene unabhängig von der Art ihrer Beobachtung nicht mehr erfüllt, und die physikalischen Objekte erhalten einen zwei- oder mehrdeutigen und daher symbolischen Charakter.

Die Beobachter oder Beobachtungsmittel, welche die moderne Mikrophysik in Betracht ziehen muß, unterscheiden sich demnach wesentlich von dem losgelösten Beobachter der klassischen Physik. Unter letzterem verstehe ich einen solchen, der zwar nicht notwendig ohne Wirkung auf das beobachtete System ist, dessen Einwirkung aber jedenfalls durch determinierbare Korrekturen eliminiert werden kann. In der Mikrophysik ist dagegen jede Beobachtung ein Eingriff von unbestimmbarem Umfang sowohl in das Beobachtungsmittel wie in das beobachtete System und unterbricht den kausalen Zusammenhang der ihr vorausgehenden mit den ihr nachfolgenden Erscheinungen. Die unkontrollierbare Wechselwirkung zwischen Beobachter und beobachtetem System bei jeder Messung macht daher die in der klassischen Physik vorausgesetzte deterministische Auffassung der Phänomene undurchführbar. Auch unter wohl definierten physikalischen Bedingungen lassen sich über die Resultate künftiger Beobachtungen im allgemeinen nur statistische Voraussagen machen, während das Resultat der Einzelbeobachtung nicht durch Gesetze bestimmt ist. In diesem Sinne kann man sagen, daß dem modernen Physiker das Irrationale als auswählende Beobachtung entgegentritt. Das nach vorherbestimmten Regeln ab-

laufende Spiel wird durch diese unterbrochen und eine Wandlung mit nicht vorhersagbarem Resultat hervorgerufen, die somit als wesentlich nicht automatisches Geschehen aufgefaßt wird<sup>1</sup>.

4. Dieser Sachverhalt der Komplementarität innerhalb der Physik führt in natürlicher Weise über das engere Gebiet der Physik hinaus zu analogen Situationen bei den allgemeinen Bedingungen der menschlichen Erkenntnis. Innerhalb der Physik braucht allerdings der Begriff des Bewußtseins nicht direkt verwendet zu werden, da als Beobachtungsmittel auch ein automatischer Registrierapparat gedacht werden kann. Von diesem muß nur angenommen werden, daß er in der gewöhnlichen Sprache, eventuell ergänzt durch die Terminologie der klassischen Physik, beschreibbar ist. Dieses Beobachtungsmittel vertritt also ein technisch erweitertes erkennendes Subjekt. Auf diese Weise verallgemeinert die moderne Physik die alte Gegenüberstellung von erkennendem Subjekt auf der einen Seite zu der Idee des Schnittes zwischen Beobachter oder Beobachtungsmittel und dem beobachteten System. Während die *Existenz* eines solchen Schnittes eine notwendige Bedingung menschlicher Erkenntnis ist, faßt sie die *Lage* des Schnittes als bis zu einem gewissen Grade willkürlich und als Resultat einer durch Zweckmäßigkeitserwägungen mitbestimmten, also teilweise freien Wahl auf.

In der Tat hat die Beziehung zwischen Subjekt und Objekt paradoxe Eigenschaften, die eine weitgehende Analogie zu der Beziehung zwischen Beobachtungsmittel und beobachtetem System haben, wie wir ihr in der Quantenphysik begegnen. BOHR kennzeichnet diese Paradoxie der Erkenntnis in folgender Weise<sup>2</sup>: «Einerseits verlangt die Beschreibung unserer Gedankentätigkeit die Gegenüberstellung eines objektiv gegebenen Inhalts und eines betrachtenden Subjektes, während andererseits keine strenge Trennung zwischen Objekt und Subjekt aufrechterhalten ist, da ja auch der letztere Begriff dem Gedankeninhalt angehört». BOHR weist in dieser Verbindung auch darauf hin, daß «die bewußte Analyse eines jeden Begriffes in einem ausschließenden Verhältnis zu seiner unmittelbaren Anwendung steht».

Der Begriff des Bewußtseins verlangt eben einen Schnitt zwischen Subjekt und Objekt, dessen *Existenz* eine logische Notwendigkeit ist, während wiederum die *Lage* des Schnittes bis zu einem gewissen Grade willkürlich ist. Die Nichtbeachtung dieses Sachverhaltes gibt Anlaß zu zwei verschiedenen Arten metaphysischer Extrapolation, die selbst als zueinander komplementär bezeichnet werden können. Die eine ist die des materiellen oder allgemeiner physikalischen Objektes, dessen

<sup>1</sup> Die formale mathematische Operation, die einer tatsächlichen Beobachtung zugeordnet ist und deren Resultat die theoretischen Gesetze nicht bestimmen, ist die sogenannte «Reduktion der Wellenpakete». Die dabei affizierte abstrakte Wellenfunktion (im allgemeinen eine komplexe Größe in einem mehrdimensionalen Raum), hat die Bedeutung eines die Gegensätze der anschaulichen Vorstellungen vereinigenden Symbols. Die statistische Verknüpfung dieser Wellenfunktion mit Beobachtungsreihen an gleichartigen und in gleicher Weise vorbehandelten Einzelsystemen ist analog zur oben erwähnten Verknüpfung der Trefferwahrscheinlichkeit eines Photons mit dem klassischen Wellenfeld. Dieser neue Typus eines Naturgesetzes vermittelt zwischen den Ideen des Diskontinuums (Teilchen) und des Kontinuums (Welle) und kann daher im Sinne von BOHR als «Korrespondenz» aufgefaßt werden, die den klassisch deterministischen Typus des Naturgesetzes rationell verallgemeinert.

<sup>2</sup> N. BOHR, *Atomtheorie und Naturbeschreibung*, Kap. III, p. 62 (Berlin 1931).

Beschaffenheit unabhängig sein soll von der Art, in welcher es beobachtet wird. Wir haben gesehen, daß die moderne Physik, durch Tatsachen gezwungen, diese Abstraktion als zu eng aufgeben mußte. Die komplementäre Extrapolation ist die der Hindu-Metaphysik vom reinen Subjekt des Erkennens, dem kein Objekt mehr gegenübersteht. Persönlich habe ich keinen Zweifel, daß auch diese Idee als unhaltbare Extrapolation erkannt werden muß. Der abendländische Geist kann einen solchen Begriff eines überpersönlichen kosmischen Bewußtseins, dem kein Objekt gegenübersteht, nicht anerkennen und muß die durch die Idee der Komplementarität vorgezeichnete Mitte einhalten. Von dieser aus betrachtet wird durch den Begriff des Bewußtseins bereits eine Zweifelt von Subjekt und Objekt vorausgesetzt.

An Stelle des objektlosen Allbewußtseins des Orients hat die abendländische Psychologie den Begriff des Unbewußten aufgestellt, dessen Beziehung zum Bewußtsein ähnlich paradoxe Züge aufweist, wie wir sie innerhalb der Physik antreffen. Einerseits weist die moderne Psychologie eine weitgehend objektive Realität der unbewußten Psyche nach, andererseits stellt jede Bewußtmachung, d.h. Beobachtung, einen prinzipiell unkontrollierbaren Eingriff in die unbewußten Inhalte dar, wodurch der objektive Charakter der Realität des Unbewußten begrenzt und dieser zugleich eine Subjektivität verliehen wird.

Es würde mich zu weit führen, hier noch auf andere Analogien zur physikalischen Komplementarität einzugehen, die in das Gebiet der Biologie fallen und auch das Problem des psychophysischen Parallelismus betreffen.

Ich hoffe, daß es mir gelungen ist, Ihnen einen Eindruck von der synthetischen Kraft der Idee der Komplementarität zu geben, welche durch prinzipielle Begrenzungen des Anwendungsbereiches gegensätzlicher Vorstellungen die Widerspruchsfreiheit eines mit diesen operierenden Begriffssystems gewährleistet.

#### Summary

The situation called "complementarity" by N. Bohr is explained with the aid of the example furnished by the spheres of application of the contrasting concepts of "wave" and "particle" in modern atomic physics. It consists in the fact that the experimental arrangements to which the one or the other of these intuitive pictures is applied necessarily are mutually exclusive as a consequence of the fundamentally never completely determinable interaction between instruments of observation and observed system. The analogy is pointed out between this complementary situation and the paradoxes in the relation "subject—object" in general, as well as the pair of opposites employed in more recent psychology, "conscious—unconscious", in particular.

## STUDIORUM PROGRESSUS

### Die Grundlagen des Tetanus und Tonus der quergestreiften Skelettmuskelfasern der Wirbeltiere

Von PAUL KRÜGER<sup>1</sup>, Heidelberg

Die sinnfälligste Äußerung tierischen Lebens ist die *Beweglichkeit*, was natürlich nicht heißen soll, daß bei Pflanzen keine Bewegungen vorkommen.

Man unterscheidet *Protoplasmabewegungen*, *Flimmer- und Geißelbewegungen* und *Bewegungen mittels kontraktile Fibrillen*. Diese finden sich als *Myoneme* bei verschiedenen Protozoen, bei Metazoen aber in besonderen Zellen oder Derivaten von solchen, den *Muskelzellen* bzw. *-fasern*.

Mit Ausnahme der Spongien, bei denen man bisher keine Nervenzellen nachweisen konnte, treten die Muskelfibrillen im allgemeinen (Ausnahme Iris der Fische und Amphibien) nur auf Erregungen hin, die durch die *Nervensysteme* übermittelt werden, in Tätigkeit.

Die Bewegungen beruhen auf der Umwandlung chemischer Energie in kinetische und auf physikochemischen Vorgängen. Am besten sind wir darüber bei der Tätigkeit des *quergestreiften Skelettmuskels* der tetrapoden Wirbeltiere unterrichtet. Diese äußert sich hier in der Aufeinanderfolge von Verkürzung (*Kontraktion*) und Erschlaffung (*Expansion*) der Fibrillen. Struktur und Funktion scheinen also bei diesen besonders eng verknüpft zu sein. Es ist also verständlich, wenn ein solches Substrat und Geschehen schon seit langem wissenschaftliches Interesse gefunden haben. Erkenntnisse durch tieferes Eindringen in diese Vorgänge und Zusammenhänge müssen grundsätzliche Bedeutung besitzen. Es gibt deshalb wohl nicht viele Gebiete der Histologie und Physiologie, die so intensiv in Angriff genommen worden sind wie dieses. An diesen Untersuchungen sind aus den gleichen Gründen auch Pharmakologen, Pathologen und Kliniker — Neurologen und Chirurgen — beteiligt.

Neben dieser Fähigkeit der Muskeln, *Bewegungen auszuführen*, kommt ihnen noch eine andere Aufgabe zu, die der ersteren gerade entgegengesetzt ist: den Körper oder die Teile desselben in einer bestimmten, auf Grund von Bewegungsvorgängen eingenommenen Stellung zu *halten*, auch gegen einwirkende Kräfte.

Diesen Dauerzustand hat man als *Tonus* bezeichnet. Schon sehr frühzeitig wurde versucht, die mit diesen Feststellungen aufgetauchten Probleme, welche Vorgänge der Muskelkontraktion zugrunde liegen und worauf der Muskeltonus beruht, mit den verschiedensten Methoden der Lösung nahezubringen.

Die erste Frage wurde fast ausschließlich unter Verwendung der Skelettmuskeln des «Frosches» und Kaninchens angegangen. Dabei wurde aber übersehen, daß zuvor die zweite Frage geklärt sein muß. Bei dieser handelt es sich ja um die Alternative, beruht der Tonus der Muskeln auf bestimmten Eigenschaften der Fasern, d. h. sind nur besonders strukturierte Fasern zu tonischen Leistungen fähig und anders beschaffene nur zu tetanischen Kontraktionen, oder liegt nur ein, in allen Muskelfasern enthaltenes Substrat vor, dessen verschiedene Reaktion — tetanische Kontraktion oder tonische

<sup>1</sup> Zoologisches Institut, Universität Heidelberg.