Quantenphyſikaliſche Bemerkungen zur Biologie und Pſychologie

Von

Pascual Jordan (Roſtock)

Die gewaltige Vertiefung, welche die phyſikaliſche Erkenntnis erfahren hat, ſeitdem das Rätſel der Quanten, auf das Planck im Jahre 1900 ſtieß, nach jahrzehntelanger angeſpannter Arbeit der Phyſiker ſeine Aufklärung gefunden hat — dieſe Vertiefung der phyſikaliſchen Erkenntnis fordert geradezu dazu heraus, ihre Folgerungen über das Gebiet der Phyſik hinaus bis in das der Wiſſenſchaften vom organiſchen Leben hinein zu unterſuchen. Eine ſolche Unterſuchung wird ſchon dadurch unabweisbar gemacht, daß die neuen Erkenntniſſe gerade *ſolche* Theſen der älteren Phyſik aufheben oder wenigſtens in ihrer Gültigkeit beſchränken, welche bis vor kurzer Zeit von den meiſten Biologen als geradezu dogmatiſch feſtſtehende phyſikaliſche Vorausſetzung der biologiſchen Wiſſenſchaften angeſehen wurden. Die Biologie ihrerſeits hat erſt in allerjüngſter Zeit angefangen, ſich entſchloſſen frei zu machen von jenen dogmatiſchen Vorurteilen, welche jetzt ſeitens der Phyſik ſelber widerlegt worden ſind, und welche für die Biologie ein ſo ſchweres Hemmnis waren, die ſpezifiſchen, von makroſkopiſch-phyſikaliſchen Geſetzen gerade *abweichenden* Geſetzmäßigkeiten des organiſchen Lebens begrifflich zu erfaſſen. Aber auch im poſitiven Sinne erwecken die neuen Begriffsbildungen und Vorſtellungsweiſen der „Quantenphyſik" entſchieden den Eindruck, daß von hier aus ein Herankommen an die biologiſchen Erſcheinungen viel leichter ſein muß, als von den klaſſiſch-phyſikaliſchen Begriffen aus: die neue Phyſik erregt in augenfälliger Weiſe den Verdacht enger Beziehungen ihrer Begriffsbildungen zu Grundtatſachen der Biologie. Im Negativen wie im Poſitiven dürfte ſie berufen ſein, der heutigen Biologie wichtige Anregungen zu vermitteln. Auf biologiſcher Seite hat L. v. Bertalanffy ſchon vor einigen Jahren (1927) die Hoffnung und Überzeugung ausgeſprochen, daß die revolutionären Um-

geſtaltungen in der Phyſik auch für die Biologie bedeutungsvoll und fruchtbar werden ſollten. Obwohl L. v. Bertalanffy unter den Biologen mit dieſer Überzeugung noch ziemlich allein zu ſtehen ſcheint, ſo bildet ſeine Stellungnahme doch eine wichtige Zuſicherung, daß die eigenen Bedürfniſſe der Biologie in naher Zukunft der innigeren Wechſelwirkung von Biologie und Phyſik entgegenkommen dürften.

Seitdem ſind betreffs der Verwertung der quantenphyſikaliſchen Erkenntniſſe für die Fragеſtellungen der Biologie von N. Bohr[1]) wegweiſende Gedanken entwickelt worden. Der Verfaſſer hat verſucht, dieſe Bohrſchen Gedanken ausführlicher zu kommentieren[2]).

Die grundſätzlichen Auffaſſungen der heutigen Quantenmechanik haben ſich ergeben aus einigermaßen ſchwierigen phyſikaliſch-mathematiſchen Theorien und Begriffsbildungen, in welchen eine widerſpruchsfreie Beſchreibung jener unendlichen Fülle quantenphyſikaliſcher Erfahrungen erreicht wurde, welche von den atomphyſikaliſchen Experimentatoren zuſammengetragen wurden, und welche zunächſt ein unverſtändliches Chaos von einander diametral widerſprechenden Feſtſtellungen zu bilden ſchienen. Es bieten ſich naturgemäß nicht unerhebliche Schwierigkeiten dar, wenn man als Phyſiker verſucht, dieſe ſo entſtandenen Begriffsbildungen — die zudem nicht nur aus dem Rahmen der gewohnten klaſſiſch-phyſikaliſchen Vorſtellungen heraustreten, ſondern in gewiſſer Hinſicht ſogar aus dem Rahmen der bisherigen naturwiſſenſchaftlichen Denkformen — den Vertretern der Nachbarwiſſenſchaften darzulegen; und man muß darauf gefaßt ſein, daß erſt allmählich ein Weg gefunden werden kann, die neuen Vorſtellungen aus der Fachſprache der atomphyſikaliſchen Spezialiſten ohne Verluſte an Präziſion in der Allgemeinſprache der Naturforſcher zu überſetzen. Die nachfolgenden Erörterungen, welche die Frage nach der Bedeutung der Quantenphyſik für die Biologie wiederaufnehmen und weiterverfolgen möchten, ſollen dabei auch auf einige Punkte der kürzlich von Bleuler[3]) und von Jenſen[4]) veröffentlichten Kritik der Ausführungen Bohrs und des Verfaſſers eingehen. *Zum Teil*

[1]) N. Bohr, Atomtheorie und Naturbeſchreibung, Vorwort. Ferner Naturwiſſenſchaften *21*, 245, 1933.

[2]) P. Jordan, Naturwiſſenſchaften *20*, 815, 1932. Vgl. ferner auch Neue Jahrb. f. Wiſſ. u. Jugendbild. *10*, 74, 1934.

[3]) Bleuler, Vierteljahrsſchr. d. Naturforſch.-Geſ. Zürich *78*, 152, 1933.

[4]) P. Jenſen, Erkenntnis 4, 165, 1934, (der vorangehende Aufſatz).

ſtützt ſich die (im ganzen ablehnende) Stellungnahme dieſer Verfaſſer auf Mißverſtändniſſe, die durch Undeutlichkeiten (oder zu geringe Ausführlichkeit) meiner früheren Darlegungen veranlaßt ſein müſſen. Einige derartige Punkte kommen im folgenden zur Sprache; es iſt ſehr zu bedauern, daß dabei jedoch nur auf einen ſehr kleinen Bruchteil der Darlegungen dieſer Verfaſſer meinerſeits eingegangen werden kann, da eine mehr ins einzelne gehende Diskuſſion einen ſehr großen Raum beanſpruchen würde. Ich brauche wohl kaum zu betonen, daß ich die ſehr ausführlichen Kritiken dieſer beiden Verfaſſer trotz ihrer ablehnenden Tendenz als wertvolle Beiträge zur Diskuſſion der mich bewegenden Fragen dankbar begrüße.

Es iſt mir eine beſondere Freude, mit dem vorliegenden Aufſatz *gerade in dieſer Zeitſchrift* das Wort ergreifen zu können, welche die Fortentwicklung der von Ernſt Mach ausgeführten erkenntnistheoretiſchen Auffaſſungen als ihre vornehmſte Aufgabe betrachtet, und in welcher ich gewiſſermaßen heimatlichen Boden betrete, da auch für mich die erkenntnistheoretiſchen Lehren Ernſt Machs die Grundlage alles naturwiſſenſchaftlichen Denkens bilden. Das Mißverhältnis, welches vor zwölf bis fünfzehn Jahren beim damaligen Stande der Atomiſtik und Quantentheorie zwiſchen dieſer und den Machſchen Auffaſſungen beſtand, war für mich geradezu der entſcheidende Anreiz zum Studium der Phyſik; die Quantenmechanik hat dieſes Mißverhältnis aufgelöſt und eine wunderbare Beſtätigung der Machſchen Lehren dadurch erbracht, daß ſie die Enträtſelung der damals ſo geheimnisvoll erſcheinenden Quantengeſetze vollzog unter Ausbildung von Vorſtellungen, welche in vollkommenſter Weiſe den Machſchen Gedanken entſprechen. Dieſe Entſprechung wird in beſonders eindrucksvoller Weiſe bewieſen durch den Umſtand, daß die Vorſtellungsweiſen, zu denen die Quantenphyſiker durch die experimentellen Erfahrungen und ihre begriffliche und mathematiſche Analyſe zwangsläufig geführt worden ſind, großenteils Möglichkeiten entſprechen, die ſchon Jahre vorher im philoſophiſchen Kreiſe dieſer Zeitſchrift erörtert worden ſind als ſolche Möglichkeiten, die vom Standpunkt Machſcher Erkenntnistheorie *naheliegend erſcheinen müſſen.* So hat H. Reichenbach ausführlich erläutert, daß das klaſſiſche Kauſalitätsprinzip in ſeiner ſinngemäßen und exakten Formulierung — als eine ſehr allgemeine empiriſch gegebene Geſetzmäßigkeit des Naturgeſchehens aufgefaßt — die Geſtalt einer Limesausſage über Wahrſcheinlichkeitsbeziehun-

gen besitzt; dies führte Reichenbach weiterhin zur Erörterung der Möglichkeit, daß für die Steigerung der Voraussagewahrscheinlichkeit *ein Limes unterhalb der Gewißheit bestehe*, der naturgesetzlich als unüberschreitbar gegeben sei. Die in den Heisenbergschen Ungenauigkeitsrelationen gipfelnde Entwicklung der Quantenmechanik hat das damals als möglich Hingestellte als tatsächlich vorliegend erkannt und in präziser Weise speziell konkretisiert. Aber auch die weiteren, über das eigentliche Gebiet der Physik hinausgehenden Folgerungen, die sich aus den neuen physikalischen Erkenntnissen mehr oder weniger zwangsläufig zu ergeben scheinen, bestätigen Möglichkeiten, die im Kreise dieser Zeitschrift schon lange vertreten worden sind. So kann ich mich in meinen Bemerkungen zur Frage der Willensfreiheit als über ein naturwissenschaftliches Problem vollkommen einig fühlen mit diesbezüglichen Gedankengängen Reichenbachs; ferner stimmt die Fassung des Existenzproblems der Außenwelt, zu der ich am Schluß dieses Aufsatzes gelange, mit Ausführungen überein, die von Carnap bereits vor Jahren gemacht worden sind. Dem Bedauern, daß mir diese Übereinstimmungen bei der Ausarbeitung meiner Gedanken noch nicht bekannt gewesen sind, und deshalb nicht in gebührender Ausführlichkeit berücksichtigt werden konnten, steht die Genugtuung gegenüber, daß die Übereinstimmung der auf unabhängigen Wegen erreichten Resultate eine bestätigende Zusicherung des notwendigen und willkürfreien Charakters dieser Überlegungen bietet.

§ 1. Statistische Naturgesetze[5])

Die wohl bekannteste These der heutigen Quantentheorie ist die, daß anstatt eindeutiger kausaler Determinierung, wie wir sie aus der klassischen, „makroskopischen" Physik kennen, im atomaren Geschehen *statistische* Gesetze auftreten. In der makroskopischen Welt ist durch das *Würfelspiel* das einfachste und anschaulichste Beispiel einer statistischen Gesetzmäßigkeit gegeben: während nach dem Schütteln des Würfelbechers das Ergebnis eines bestimmten Einzelwurfes nicht vorauszusehen ist, kann man für eine lange Serie von Würfen mit einer mit wachsender Länge der Serie schnell zunehmenden Sicherheit eine Fülle von Voraussagen statistischer Art machen. Aber unser physikalisches Wissen läßt uns keinen Augenblick be-

[5]) Die §§ 1 und 2 sind rein physikalischen Inhalts; in §§ 3 und 4 werden die biologischen Anwendungen besprochen.

zweifeln, daß die Unmöglichkeit, das Ergebnis eines *einzelnen* Wurfes vorauszuſagen, keine unbedingte iſt, und daß *grundſätzlich*, bei ganz genauer meſſender Beobachtung der Schüttelbewegung und Ausſchüttbewegung des Bechers (ſowie der anfänglichen Lage der Würfel im Becher) durch eine — freilich ungeheuer komplizierte und umfangreiche — exakt mathematiſche Rechnung das notwendige Reſultat dieſes Einzelfalles theoretiſch errechnet werden könnte.

Die Quantenmechanik behauptet nun, daß in der Atomphyſik der merkwürdige Fall eintritt, daß ein Erſatz eindeutiger kauſaler Determinierung durch lediglich ſtatiſtiſche Geſetzmäßigkeiten *nicht* — wie beim Würfelſpiel — durch Unvollſtändigkeit des menſchlichen Wiſſens bedingt iſt. Vielmehr handelt es ſich hier darum, daß der Ausfall gewiſſer Entſcheidungen *in der Natur ſelbſt* nicht vorausbeſtimmt iſt: auch ein Geiſt, der — wie der „Laplaceſche Geiſt" — alles das tatſächlich wüßte, was heute oder in beliebiger Zukunft Menſchen wenigſtens prinzipiell, theoretiſch, wiſſen könnten (ein Geiſt alſo, der auch jede noch ſo komplizierte mathematiſche Rechnung im Nu ausführen könnte), auch ein ſolcher Geiſt könnte *nicht* aus anderweitigen ſchon vorher zu gewinnenden Beobachtungstatſachen *errechnen*, wie die fragliche Entſcheidung ausfallen wird.

Auf die präziſere exakte Formulierung des ſoeben Geſagten ſoll hier nicht erneut eingegangen werden[6]. Für die Erörterung dieſer neuartigen Theſe — deren Endgültigkeit noch oft zu beſtreiten verſucht wird — iſt die Betrachtung konkreter Beiſpiele viel nützlicher, als die Diskuſſion abſtrakter Formulierungen, bei deren Aufſtellung oder Kritik zu leicht Verwechſlungen eintreten zwiſchen *ſachlichen* Meinungsverſchiedenheiten einerſeits und nur *terminologiſchen* Verſchiedenheiten andererſeits.

Wir denken folgende phyſikaliſche Verſuchsanordnung (deren Durchführung, wenn nicht in genau dieſer, ſo doch ähnlicher Form durchaus im Bereiche des praktiſchen Könnens der heutigen Atomphyſiker liegt): Ein einzelnes Radiumatom iſt iſoliert worden; es wird nun abgewartet, *wann* dies Atom radioaktiv *zerfällt*. Unſer tatſächliches heutiges Wiſſen ermöglicht *keine* theoretiſche Vorausſage, ob dies Atom ſchon in der nächſten Minute, oder erſt nach Jahrmillionen zerfallen wird. Wir können nur eine *Wahrſcheinlichkeitsausſage* machen: Wenn das Atom zu einer Zeit t noch nicht zerfallen iſt, ſo iſt die Wahrſcheinlichkeit, daß es dann innerhalb der

[6]) Vgl. a. a. O.

nächſten Minute zerfallen wird, gleich einer Zahl *w, die von t völlig unabhängig iſt.* Anders ausgedrückt: ein zur Zeit *t* exiſtierendes Radiumatom hat eine *von ſeiner Vorgeſchichte unabhängige* Wahrſcheinlichkeit, in der nächſten Minute zu zerfallen. Dieſe Geſetzmäßigkeit wirkt ſich nicht nur darin aus, daß in einem großen *Haufen* von Radiumatomen (etwa einem Milligramm) die Anzahl *N* noch nicht zerfallener Atome mit der Zeit exponentiell abnimmt:

$$N = N_0 e^{-\lambda t};$$

ſondern es gibt noch eine Fülle anderer nachprüfbarer Ausſagen (hinſichtlich der unregelmäßigen, zufälligen *Schwankungen* in der Strahlung eines Radiumpräparates), die ebenfalls als mathematiſche Konſequenzen aus dem obigen ſtatiſtiſchen Elementargeſetz folgen. Ihre ausnahmsloſe empiriſche Beſtätigung erhebt dies ſtatiſtiſche Elementargeſetz zum Range eines der beſtgeprüften und beſtbeſtätigten phyſikaliſchen Naturgeſetze; zudem ſteht dies Geſetz an Klarheit und *Einfachheit* gewiß nicht zurück etwa hinter dem Newtonſchen Gravitationsgeſetz oder ſonſt einem der berühmten Geſetze der klaſſiſch-makroſkopiſchen Phyſik.

Wir befinden uns gegenüber dieſem Radiumatom alſo in einer ganz anderen Lage, als etwa gegenüber den Planetenbewegungen, deren Studium ja in ſo entſcheidender Weiſe die Begriffe und Denkweiſen der klaſſiſch-makroſkopiſchen Phyſik geformt hat. Unſere Kenntnis des Newtonſchen Gravitationsgeſetzes erlaubt uns, alle künftigen Konſtellationen und Bewegungen der Planeten *eindeutig vorauszuberechnen,* ſobald nur einmal für einen einzigen Zeitpunkt die Örter und Geſchwindigkeiten der Planeten empiriſch feſtgeſtellt ſind. Aber auf keine Weiſe, durch keine am Radiumatom durchführbare Beobachtung, ſind wir imſtande, eine Vorausbeſtimmung zu gewinnen für den Zeitpunkt des künftigen Zerfalles dieſes Atoms.

Bevor wir unſeren Gedankengang fortſetzen, ſeien folgende Bemerkungen zu Bleulers Kritik eingeſchaltet: Bleuler kritiſiert die Formulierung des phyſikaliſchen Kauſalitätsprinzips: „Durch den beobachtbaren Zuſtand des Syſtems zu einer Zeit *t* iſt der beobachtbare Zuſtand zu einer ſpäteren Zeit *t'* eindeutig beſtimmt". (Das Syſtem iſt dabei als „abgeſchloſſen" angenommen, alſo als iſoliert gegen unkontrollierte äußere Beeinfluſſungen). Bleuler hält es nun für *trivial,* daß eine derartige Kauſalität *nicht* beſteht, weil eben „der beobachtbare Zuſtand zur Zeit *t* niemals alle die Vorausſetzungen gibt, die zur Berechnung eines ſpäteren Zuſtandes erforderlich ſind". Dabei überſieht Bleuler jedoch, daß — im Gegenſatz zu ſeiner Anſicht — dieſes Prinzip *innerhalb der geſamten klaſſiſchen Phyſik tatſächlich erfüllt iſt:* Es gilt für die Planetenbewegung, es gilt für das elektromagnetiſche Feld der Radiowellen, überhaupt für jedes Beiſpiel

aus der rein makroſkopiſchen Phyſik. Wenn es nun für die Atomphyſik *nicht* gilt, ſo iſt damit ein tiefeinſchneidender *Unterſchied* von Makrophyſik und Mikrophyſik feſtgeſtellt, der durch terminologiſche Abänderungen nicht aus der Welt geſchafft werden kann. Es iſt übrigens auch nicht richtig, daß dieſe oben formulierte phyſikaliſche Kauſalitätsvorſtellung erſt von der *modernen* Phyſik erdacht ſei. Sie iſt im Gegenteil ſchon den Naturforſchern des 19. Jahrhunderts völlig geläufig geweſen; Du Bois-Reymond konnte ſich bekanntlich bei ſeiner berühmt gewordenen Erläuterung dieſer Kauſalitätsvorſtellung auf Laplace zurückbeziehen.

Bleuler ſtellt dieſem phyſikaliſchen Kauſalitätsbegriff einen *„natürlichen Kauſalitätsbegriff"* gegenüber, der (den nicht quantitativ erfaßbaren organiſchen und pſychologiſchen Erſcheinungen angemeſſen) lediglich in qualitativer, auf quantitative Beſtimmung verzichtender Weiſe feſtlegt, *„daß in der Regel auf Gleiches gleiches folgt"*. Dagegen iſt von unſerer Seite gar nichts einzuwenden: es beſteht wohl durchaus nicht in dem von Bleuler angenommenen Maße eine tatſächliche (nicht nur ſcheinbare, terminologiſche) Meinungsverſchiedenheit. Zu betonen iſt aber, daß auch im Sinne dieſes Bleulerſchen „natürlichen Kauſalbegriffes" im mikrophyſikaliſchen Geſchehen in gewiſſem Umfang eine *Akauſalität* feſtzuſtellen iſt. *Zwei* Radiumatome, die zu gleicher Zeit entſtanden ſind, und (ſolange beide exiſtieren) ganz die gleiche „Lebensgeſchichte" haben, werden trotzdem im allgemeinen zu ganz verſchiedenen Zeitpunkten zerfallen. Hier folgt auf Gleiches alſo gerade Verſchiedenes: Zerfall des einen, und vorläufiges (vielleicht Millionen Jahre dauerndes) Fortbeſtehen des anderen Atoms[7]).

Endlich rechnet Bleuler es auch zu den Anwendungen des natürlichen Kauſalbegriffes, wenn feſtzuſtellen iſt, daß das *Vorhandenſein einer Wahrſcheinlichkeit* für ein beſtimmtes Ereignis (oder die Vergrößerung oder Verkleinerung dieſer Wahrſcheinlichkeit) eine beſtimmte, geſetzmäßig wirkende *Urſache* hat. Ein Streit über die Zweckmäßigkeit einer ſolchen Terminologie iſt natürlich unfruchtbar. Zur Sache iſt aber zu ſagen, daß die Quantenphyſik gar nicht daran denkt, das Vorhandenſein ſolcher „Urſachen von Wahrſcheinlichkeiten" abzuleugnen: im Gegenteil iſt es gerade die große Leiſtung der theoretiſchen Quantenmechanik, die Geſetzmäßigkeiten dieſer „Urſachen von Wahrſcheinlichkeiten" ganz umfaſſend und allgemein, für alle überhaupt möglichen Probleme der Mikrophyſik, mathematiſch exakt zu fixieren und berechnen zu können. Anläßlich dieſer (und mancher anderer) Bemerkungen Bleulers iſt zu ſagen, daß ein großer Teil ſeiner kritiſchen Ausführungen ſich auf Angelegenheiten bezieht, betreffs deren in Wahrheit gar keine weſentliche Meinungsverſchiedenheit beſteht. Es iſt ein bedauerliches, und wohl nur allmählich in geduldiger Bemühung zu überwindendes Folgeergebnis der wiſſenſchaftlichen Spezialiſierung, daß die Wechſelbeziehungen zwiſchen entfernteren Zweigen der Naturwiſſenſchaft ſo ſehr erſchwert werden durch divergierende beiderſeitige Sprachgewohnheiten — eine Schwierigkeit, die auch von Bleuler bereits hervorgehoben iſt.

Wir haben bislang aber nur ſoviel klargeſtellt, daß *unſer heutiges Wiſſen* vom Radiumatom nicht in ähnlicher Weiſe, wie unſer aſtro-

[7]) Vgl. übrigens auch das noch zu beſprechende, in gewiſſer Weiſe noch frappantere Beiſpiel der polariſierten Lichtquanten.

nomiſches Wiſſen, eindeutige Vorausberechnungen erlaubt. Es ſcheinen zunächſt noch zwei Auffaſſungen möglich: Es könnte — analog, wie beim Würfelſpiel — die ſtatiſtiſche Geſetzlichkeit des Radiumzerfalls Ausfluß und mathematiſche Folge einer ſtreng kauſalen Geſetzlichkeit ſein; ſo daß *in der Zukunft* die Phyſiker durch neue Wiſſenserweiterung doch noch dahin kommen könnten, daß ſie es einem Radiumatom irgendwie „anzuſehen" vermögen, wann es zerfallen wird. Zweite Möglichkeit: Es könnte ſtatt deſſen das fragliche ſtatiſtiſche Geſetz ein *primäres* Naturgeſetz ſein, das *nicht* eine Folge ihm zugrunde liegender kauſaler Geſetze iſt. Daß dem ſo ſein muß, wird, wie ſchon oben ausgeſprochen, von der Quantenmechanik behauptet.

Man verſteht die Begründung dieſer Behauptung wieder am beſten an Hand eines konkreten Beiſpiels. Wir betrachten einen durch ein Nicholſches Prisma gegangenen, alſo *linear polariſierten* Lichtſtrahl. Wird dieſem ein zweites Nicholſches Prisma in den Weg geſtellt, deſſen Polariſationsebene irgendeinen beliebigen Winkel — nennen wir ihn φ — mit derjenigen des erſten einſchließt, ſo wird ein Bruchteil J_1 der Intenſität durch das zweite Prisma hindurchgehen, mit einer um den Winkel φ gedrehten Polariſationsebene; der Bruchteil $J_2 = 1 - J_1$ wird dagegen reflektiert, und ſeine Polariſationsebene ſteht ſenkrecht auf derjenigen der anderen Zerlegungskomponente. (Die Werte von J_1, J_2 ſind bekanntlich durch

$$J_1 = \cos^2 \varphi; \; J_2 = \sin^2 \varphi$$

gegeben).

Betrachten wir nun aber ein *einzelnes Lichtquant* aus dem fraglichen Strahl, ſo iſt zu ſagen: Für dieſes Lichtquant gibt es *zwei verſchiedene Möglichkeiten;* es kann *hindurchgehen,* und es kann *reflektiert* werden — in beiden Fällen nimmt es dann die entſprechende neue Polariſationsebene an. Ob es das eine oder das andere tun wird, können wir nicht vorausbeſtimmen. *Wir kennen nur das ſtatiſtiſche Geſetz*[8]): Die Wahrſcheinlichkeit des Hindurchgehens iſt $\cos^2 \varphi$; die Wahrſcheinlichkeit des Reflektiertwerdens iſt $\sin^2 \varphi$.

Wenn man an dieſem Beiſpiel die Hypotheſe durchführen wollte, daß der ſtatiſtiſchen Geſetzlichkeit eine kauſal-determiniſtiſche zugrunde liege, ſo müßte man ſagen: Das einzelne Lichtquant beſitzt

[8]) Betreffs der ausführlichen quantenmechaniſchen Behandlung der Polariſation, auch im elliptiſchen Fall, vgl. P. Jordan, ZS. f. Phyſik *44*, 292, 1927.

eine gewiſſe verborgene Eigenſchaft, — die unſerer *heutigen* Einſicht verborgen iſt, die aber in Zukunft noch der direkten Unterſuchung zugänglich gemacht werden wird — von der es abhängt, ob am zweiten Nicholſchen Prisma die Entſcheidung im einen oder im anderen Sinne ausfallen wird. Nun iſt aber zu bedenken, daß ja für das zweite Prisma *unendlich viele verſchiedene Einſtellungsmöglichkeiten* (gekennzeichnet durch den Winkel φ) beſtehen, zu denen jedesmal andere Werte der Wahrſcheinlichkeiten J_1, J_2 gehören: wir müßten alſo dem Lichtquant, um die Hypotheſe einer Voraus-Beſtimmtheit aller derartigen Entſcheidungen durchzuführen, *unendlich viele* verborgene Eigenſchaften zuſchreiben. Die Sache wird noch toller, wenn man an die Möglichkeit denkt, das Lichtquant der Reihe nach eine ganze Anzahl von Nicholſchen Prismen paſſieren zu laſſen, wobei in jeder einzelnen Paſſage die Wahrſcheinlichkeiten für Durchgang oder Reflexion abhängen davon, wie am vorangehenden Prisma die Entſcheidung ausgefallen iſt. Das ſorgfältige Durchdenken dieſer Situation führt zu dem merkwürdigen, aber ganz eindeutigen Ergebnis: Es iſt *mathematiſch unmöglich*, die Hypotheſe einer zugrunde liegenden kauſalen Geſetzlichkeit zu *vereinbaren* mit unſerem tatſächlichen, geſicherten Wiſſen betreffs der hier vorliegenden ſtatiſtiſchen Geſetzmäßigkeiten.

Nach dieſem anſchaulichen Beiſpiel wird man verſtehen, daß J. v. Neumann[9]) ganz allgemein und umfaſſend den folgenden *mathematiſchen Satz* aufſtellen und beweiſen konnte: *Es iſt unmöglich, die* (uns heute genau bekannten!) *ſtatiſtiſchen Geſetzmäßigkeiten der Quantentheorie auf ein kauſal funktionierendes Modell zurückzuführen.*

Bei den ſtatiſtiſchen Geſetzen des Würfelſpiels liegt es ja ſo, daß ſie in ganz klarer Weiſe *mathematiſche Folgeergebniſſe* von exakt-kauſalen Geſetzen ſind: mit Hilfe der mathematiſchen Beweismethoden der klaſſiſchen „ſtatiſtiſchen Mechanik" kann man dieſe Würfelſtatiſtik *herleiten* aus den kauſalen mechaniſchen Geſetzen, denen die einzelnen Würfelbewegungen unterliegen. Und wenn die empiriſche Forſchung irgendwo ſtatiſtiſche Geſetze ermittelt, die zu demſelben *mathematiſchen Typus* von Wahrſcheinlichkeitsgeſetzen gehören, wie die Würfelſtatiſtik, dann wird ſchwerlich jemand daran zweifeln, daß der ſoeben empiriſch ermittelten ſtatiſtiſchen Geſetzlichkeit eine in der Zukunft noch zu ermittelnde kauſale Geſetzlich-

[9]) J. v. Neumann, Göttinger Nachr. 1927, S. 1; S. 245.

keit zugrunde liegt. Aber die Atomphyſik hat uns mit einem ganz anderen mathematiſchen Typus ſtatiſtiſcher Geſetzmäßigkeiten bekanntgemacht; für dieſe iſt die Zurückführung auf kauſale Geſetze ausgeſchloſſen.

Dies iſt die feſte, zuverläſſige Grundlage, von der ausgegangen werden muß, wenn man über die Bedeutung der neuen phyſikaliſchen Erkenntniſſe für außerphyſikaliſche Anwendungen diskutieren will: Es kann nicht für ſehr ſinnvoll gehalten werden, dieſe Diskuſſion durchzuführen unter der Vorausſetzung, daß die Quantentheorie (oder die Phyſik überhaupt) auch falſch ſtatt richtig ſein könnte.

Zum Schluß dieſer Betrachtungen ſei hervorgehoben, daß ein inniger Zuſammenhang beſteht zwiſchen der Notwendigkeit, *ſtatiſtiſche* Begriffe in der Atomphyſik einzuführen, und der Tatſache der quantenphyſikaliſchen *Unſtetigkeiten.*

Für dieſe „Unſtetigkeiten" haben wir ſchon bei den polariſierten Lichtquanten ein charakteriſtiſches Beiſpiel kennengelernt. Für den linear polariſierten Lichtſtrahl der klaſſiſchen Wellenoptik gibt es unendlich viele Abſtufungen ſeines Reagierens dem Nichol gegenüber: je nach dem Winkel zwiſchen der Polariſationsebene des urſprünglichen Lichtſtrahls und der des Nichols kann das Intenſitätsverhältnis zwiſchen durchgelaſſenen und reflektiertem Strahl *jeden Zahlwert* von Null bis unendlich annehmen. Aber für das Lichtquant der heutigen Phyſik gibt es *nur zwei,* ganz verſchiedene, Reaktionsweiſen und *keinerlei Zwiſchenſtufe:* Durchgang oder Reflexion. Solche elementare Unſtetigkeiten begegnen dem Quantenphyſiker auf Schritt und Tritt. Beiſpielsweiſe in Form der Tatſache, daß ein Atom nicht ganz beliebige, ſtetig veränderliche Energiewerte annehmen kann, ſondern nur gewiſſe, diskret verſchiedene Werte, zwiſchen denen es keine Zwiſchenſtufen gibt. (Wonach alſo Energie-*Änderungen* ebenfalls nur unſtetig, in „Quantenſprüngen", erfolgen können.) Unſtetigkeiten, die das alte „natura non facit saltus" widerlegen, können als das elementarſte Charakteriſtikum der Quantenphyſik im Gegenſatz zur klaſſiſchen Makrophyſik betrachtet werden; hiſtoriſch ſind ſie ja auch dasjenige Phänomen geweſen, mit deſſen Entdeckung Planck 1900 die Quantenforſchung eröffnete. Übrigens kann auch die Grundtatſache des atomiſtiſchen Aufbaus der Materie als ſpezieller Ausfluß dieſer allgemeineren Unſtetigkeitsgeſetze der Quantenphyſik betrachtet werden: daß es z. B. Elektronen gibt, daß alſo eine irgendwo vorhandene elektriſche Ladung nur

ganz beſtimmte Werte (ganzzahlige Vielfache der Elektronenladung) annehmen kann, das iſt eine Tatſache, deren Sinn man viel tiefer erfaßt, wenn man ſie als Spezialfall quantenhafter Unſtetigkeiten auffaßt[10]), als wenn man ſich ein allzu klaſſiſch-anſchauliches Bild von kleinen geladenen Kügelchen oder dergleichen macht. Mit dieſen quantenhaften Unſtetigkeiten hängen nun die ſtatiſtiſchen Begriffe unlöslich zuſammen. Ich kann den Nichol, mit dem ich einzelne Lichtquanten reagieren laſſe, *ſtetig* um die Strahlrichtung drehen; es muß alſo im Verhalten der reagierenden Lichtquanten etwas geben, was ſtetiger Änderung fähig iſt, *obwohl* es für jedes Lichtquant nur eine unſtetige Entſcheidung „entweder — oder" gibt: Es ſind die *Wahrſcheinlichkeiten* $J_1 = \cos^2\varphi$ und $J_2 = \sin^2\varphi$, die ſich mit dem Winkel ſtetig ändern. Oder ich kann ein im Grundzuſtand befindliches Atom einer ſtetig variablen Strahlungsintenſität ausſetzen, mit einer Frequenz der Strahlung, welche dies Atom abſorbieren kann: Dann kann das Atom immer nur *entweder* ein Lichtquant abſorbieren, *oder* aber *nicht* abſorbieren. Für dieſe unſtetige Entſcheidung gibt es jedoch (gemäß dem grundlegenden Einſteinſchen Abſorptionsgeſetz) eine mit der Lichtintenſität *ſtetig* variierende *Wahrſcheinlichkeit.* In dieſer Form, alſo in der Form *ſtatiſtiſcher Geſetze,* ſind ſtetig variable „Urſachen" vereinbar mit unſtetig ſich äußernden Wirkungen.

Über die vermutliche Bedeutung der in dieſem Paragraphen behandelten Punkte für biologiſche Fragen wird in § 3 geſprochen. Die Paragraphen 2 und 3 können auch vertauſcht werden: § 3 kann ohne vorherige Kenntnis von § 2 geleſen werden.

§ 2. Der Begriff der Komplementarität[11])

Das Beiſpiel der polariſierten Lichtquanten, das uns bereits geholfen hat, die ſtatiſtiſchen Geſetzlichkeiten der Quantenphyſik in ihrem Zuſammenhang mit den elementaren Unſtetigkeiten zu verſtehen, vermag uns auch in noch tiefere Erkenntniſſe und Begriffsbildungen der Quantenmechanik einzuführen. Wir haben uns ſchon oben davon überzeugt, daß eine Einführung hypothetiſcher, den heutigen Beobachtungsmitteln noch verborgener Qualitäten bei den polariſierten Lichtquanten *nicht* in Frage kommen kann: wir dürfen

[10]) Dies geſchieht durch die ſogenannte Methode der „zweiten Quantelung". Vgl. P. Jordan und E. Wigner, Z. Phyſik 47, 631, 1928.

[11]) Der Leſer kann, wenn er will, dieſen Paragraphen zunächſt überſchlagen und ſogleich zu § 3 übergehen.

überzeugt ſein, daß wir dieſes Problem heute genau ſo vollkommen durchſchauen, wie ſeit Newton das Gravitationsgeſetz; und was wir an dieſem Beiſpiel lernen, iſt *typiſch* für das Weſen der Quantengeſetze überhaupt. In unſeren obigen Betrachtungen haben wir uns allerdings in einſeitiger Weiſe beſchränkt auf *lineare* Polariſation der Lichtquanten, ohne den allgemeineren Fall der *elliptiſchen* Polariſation zu berückſichtigen. Deſſen Hinzunahme würde uns jedoch nichts Neues lehren hinſichtlich der uns hier beſchäftigenden grundſätzlichen Probleme und darf deshalb auch weiterhin unterbleiben.

Zunächſt wollen wir hervorheben, daß es gar nicht möglich iſt, eine *meſſende Beobachtung* an dem linear polariſierten Lichtquant auszuführen, *ohne in ſeinen Polariſationszuſtand in brutaler Weiſe einzugreifen.* Es möge uns die urſprüngliche Lage der Polariſationsebene *unbekannt* ſein: wenn wir jetzt irgend etwas *erfahren* wollen über den vorliegenden Polariſationszuſtand, ſo können wir ja nichts anderes tun, als das Lichtquant erneut einen Nichol paſſieren laſſen. Das bedeutet aber gar nicht, daß wir den vorher vorhanden geweſenen Zuſtand feſtſtellen (*dafür* haben wir bei einem einzelnen Lichtquant überhaupt keine Möglichkeit!). Sondern wir zwingen dem Lichtquant jetzt eine Entſcheidung auf: es ſoll ſeine Polariſationsebene jetzt *entweder* entſprechend dieſem Nichol *oder* ſenkrecht dazu einſtellen. Iſt dieſe Entſcheidung gefallen, ſo *wiſſen* wir, welche Lage die Polariſationsebene *jetzt* hat; aber wir haben damit *nicht* etwas erfahren über den urſprünglich vorhanden geweſenen Zuſtand; ſondern unſer Wiſſen gilt einem Zuſtand, der erſt dadurch *geſchaffen* iſt, daß wir im Beobachtungsprozeß die fragliche Entſcheidung erzwungen haben. (Wobei wir jedoch nur das *Zuſtandekommen* dieſer Entſcheidung herbeiführen, *nicht* aber ihren *Ausfall* beeinfluſſen konnten!).

Dies iſt nun *typiſch* für quantenphyſikaliſche Beobachtungsprozeſſe überhaupt: Wir wollen beiſpielsweiſe von einem irgendwie iſolierten Elektron den genauen *Ort* beſtimmen. Der prinzipielle Weg dafür iſt, das Elektron zu „beſehen" mit einem Mikroſkop, das jedoch nicht auf ſichtbares Licht, ſondern auf Licht von viel kleinerer Wellenlänge eingerichtet iſt (Heiſenberg-Bohrſches γ-Strahlmikroſkop). Die Ausführung dieſes Experimentes bedeutet, daß wir — ganz wie im obigen Polariſationsbeiſpiel — das Elektron zu einer Entſcheidung zwingen. Wir zwingen es, *einen definierten Ort anzunehmen:* vorher nämlich war es im allgemeinen weder hier noch dort; es hatte ſich noch gar nicht für einen beſtimmten Ort entſchie-

den. Ganz analog war ja beim Lichtquant, deſſen Polariſationsebene urſprünglich irgendwie ſchräg zu der des dann von uns angewandten Nichols lag, keineswegs ſchon im voraus entſchieden, ob ſeine diesbezügliche Entſcheidung im einen oder anderen Sinne ausfallen würde.

Wird nun in einem anderen Experiment die *Geſchwindigkeit* des Elektrons gemeſſen, ſo heißt das wiederum: das Elektron wird genötigt, ſich für irgendeinen exakt definierten Wert der Geſchwindigkeit zu entſcheiden; und wir beobachten dann, für *welchen* es ſich entſcheidet. Bei einer ſolchen Entſcheidung wird aber die im vorigen Experiment erzielte Entſcheidung betreffs des *Ortes* wieder *völlig verwiſcht.* Umgekehrt: die Durchführung einer exakten Ortsbeſtimmung verwiſcht völlig den Wert der Geſchwindigkeit. Der Phyſiker ſagt: *Ort und Geſchwindigkeit* (oder Impuls = Maſſe × Geſchwindigkeit) *können nicht zugleich exakt gemeſſen werden.*

Wieſo derartiges möglich iſt, ſieht man wieder ganz klar am Beiſpiel der Polariſation. Es iſt ja — trivialerweiſe! — nicht möglich, das Lichtquant zwei verſchiedene, ſchräg zueinander ſtehende Nichols *zugleich* paſſieren zu laſſen; das geht nur *nacheinander,* und wenn der zweite Nichol paſſiert iſt, ſo iſt die am erſten getroffene Entſcheidung wieder verwiſcht worden: nochmaliger Paſſage des erſten Nichols bedeutet dann wieder eine *neue* Entſcheidung. Wir wollen uns insbeſondere den zweiten Nichol gerade um 45° gegenüber dem erſten verdreht denken: dann haben nach Paſſage des einen bei der Paſſage des anderen Prismas die beiden vorhandenen Möglichkeiten, Durchgang oder Reflexion, *beide dieſelbe Wahrſcheinlichkeit* (alſo 50%). Ganz analog iſt das wechſelſeitige Verhältnis von Ort und Geſchwindigkeit (oder Impuls) bei einem Elektron (nur daß hier nicht zwiſchen je *zwei,* ſondern zwiſchen unendlich vielen Möglichkeiten bei jeder Entſcheidung auszuwählen iſt): bei exakt (hinſichtlich Richtung und Betrag) beſtimmter Geſchwindigkeit ſind für eine nachfolgende Ortsbeſtimmung *alle Orte gleich wahrſcheinlich;* und umgekehrt.

Der fundamentale Unterſchied dieſer Verhältniſſe gegenüber der klaſſiſch-phyſikaliſchen Beobachtung und Ausmeſſung liegt auf der Hand. Einen *Planeten* kann ich durch das Fernrohr beſehen, kann ſeinen Ort und ſeine Geſchwindigkeit — gleichzeitig! — beſtimmen, ohne daß der Zuſtand des Planeten dadurch *beeinflußt* wird. Die Beobachtung bedeutet hier alſo nur ein *Zur-Kenntnis-Nehmen* eines *ſowieſo vorhandenen Tatbeſtandes,* der auch *unabhängig von dieſer*

ſpeziellen Beobachtung da iſt. In der Quantenphyſik dagegen bedeutet jede Beobachtung *einen Eingriff in das Beobachtete;* eine Zuſtandsveränderung am Beobachteten iſt auf Grund der quantenphyſikaliſchen Naturgeſetze mit dem Beobachtungsprozeß zwangsläufig verknüpft. Alſo nicht *ein ſowieſo, unabhängig von dieſem (!) Experiment vorhandener Tatbeſtand* wird wahrgenommen, ſondern wir ſelber *rufen die Tatbeſtände hervor* (oder: nötigen ſie in beſtimmter Richtung zu einer *Klärung*), die dann zur Wahrnehmung gelangen.

Ich habe ſoeben das Wort „*dieſem*" mit einem Ausrufzeichen (!) hervorgehoben, um ein in der Kritik von Jenſen (a. a. O.) zutage tretendes Mißverſtändnis meiner früheren Ausführungen aufzuklären. Jenſen meint: „Wenn man das, was an dieſen Überlegungen Jordans zutreffend iſt, *konſequent durchführt,* ſo gelangt man zu Ergebniſſen, *die über die ſeinigen weit hinausgehen*: Nicht erſt durch Meßapparate und Vergrößerungen und auch nicht nur bei der Beobachtung *mikrophyſiſcher* Vorgänge werden Tatbeſtände erſt durch die Beobachtung erzeugt, ſondern es gibt überhaupt ohne Beobachtung (Wahrnehmung) und Denken keine Tatbeſtände, und auch alle *makrophyſiſchen* Sachverhalte, mit denen ſich die Wiſſenſchaft befaßt, kommen erſt durch die Beteiligung von Wahrnehmung und Denken zuſtande. Alſo ein von Menſchen (und menſchenähnlichen Organismen) und ihren Sinnesorganen und Gehirnen unabhängiger „ſowieſo vorhandener objektiver Tatbeſtand" iſt niemals feſtzuſtellen". Die jetzt gegebene Erläuterung wird das hier vorliegende Mißverſtändnis hoffentlich ausſchließen. Es handelt ſich *nicht* um die Trivialität, daß unabhängig von wahrnehmenden Subjekten keine objektiven Tatbeſtände feſtſtellbar ſind. Sondern es handelt ſich wirklich um etwas, wodurch Planeten und Elektronen ſich durchaus *unterſcheiden:* Wenn ich den Ort eines Planeten zu einer Zeit t beobachte, ſo ſtelle ich etwas feſt, was auch unabhängig von *dieſem* (!) konkreten Beobachtungsprozeß, nämlich durch andersartige, indirekte, frühere, ſpätere uſw. ſonſtige Beobachtungen feſtgeſtellt werden kann. Die Reſultate dieſer ſonſtigen Beobachtungen bleiben *unberührt* davon, ob ich meine Beobachtung zur Zeit t *ausführe oder nicht.* Aber wenn ich den Ort eines Elektrons zur Zeit t beobachte (es alſo nötige, zur Zeit t einen definierten Ort anzunehmen), *ſo gerät es dadurch in einen ganz veränderten Zuſtand.*

Alſo eine *exakte* Ortsmeſſung am Elektron läßt ſich mit einer *exakten* Geſchwindigkeitsmeſſung nicht vereinigen. Wohl aber iſt es möglich, Ort und Geſchwindigkeit *mit begrenzter Genauigkeit* gleichzeitig zu meſſen. Es gilt dafür die berühmte Heiſenbergſche *Ungenauigkeitsregel,* welche ausdrückt, daß die Genauigkeit in der Feſtlegung der einen Größe um ſo geringer iſt, je genauer die andere Größe definiert iſt:

$$\triangle x \triangle v_x \geqq \frac{h}{M}.$$

Hier bedeutet $\triangle x$ die Ungenauigkeit in der Feſtlegung der x-Koordinate, $\triangle v_x$ diejenige der x-Komponente der Geſchwindigkeit; M iſt die Maſſe des fraglichen Körpers und h das Planckſche *Wirkungsquantum.* Handelt es ſich nicht um ein Elektron, ſondern um einen Planeten, ſo wird wegen der Größe von M dieſe Ungenauigkeitsregel praktiſch bedeutungslos: eine gleichzeitige Meſſung von Ort und Geſchwindigkeit iſt moglich, und die klaſſiſche Phyſik tritt in Kraft.

Das hier Feſtgeſtellte wird uns anſchaulich noch deutlicher verſtändlich werden, wenn wir einmal gründlich die Tatſache durchdenken, daß erfahrungsgemäß alle phyſikaliſchen Subſtrate — auch das Licht! — *atomiſtiſche Struktur* beſitzen: auch alle *phyſikaliſchen Meßinſtrumente* ſind alſo aus Atomen (materiellen Atomen, Elektrizitätsatomen, Lichtatomen) zuſammengeſetzt. Das zieht aber unmittelbar bedeutſame Folgen nach ſich für das Problem der Beobachtung im atomaren Geſchehen. Grundſätzlich iſt ja mit *jeder* phyſikaliſchen Meſſung auch eine *Rückwirkung des Meßinſtrumentes auf das unterſuchte Objekt* verknüpft; eine Tatſache, die für die makroſkopiſche Phyſik jedoch keine prinzipiell-theoretiſche Bedeutung hat, weil man durch Wahl hinreichend *feiner* Inſtrumente dieſe Rückwirkung beliebig ſchwach machen und ſomit aus den Beobachtungsreſultaten eliminieren kann. Iſt aber das unterſuchte Objekt ſelber von atomarer Feinheit, ſo entfällt die Möglichkeit, *noch feinere* Meßinſtrumente zu wählen: es erſcheint alſo ganz natürlich und unausweichlich, daß jede meſſende Beobachtung mit einem nicht zu vernachläſſigenden *Eingriff* in das Objekt naturgeſetzlich verbunden iſt. Im Falle der Ortsmeſſung eines Elektrons mit dem γ-Strahlmikroſkop verläuft der Vorgang ſo, daß die mit den hochfrequentigen Lichtquanten verbundenen großen Impulſe (Compton-Rückſtöße $h\nu/c$) dem an definiertem Orte geſehenen Elektron einen ſtarken (und unkontrollierbar-undefinierten) Rückſtoß erteilen. *Trotzdem* iſt es möglich, *jede* phyſikaliſche Eigenſchaft eines mikrophyſikaliſchen Objektes zum Gegenſtand einer *exakten* meſſenden Beobachtung zu machen: nur muß man darauf verzichten, ein ſolches Objekt gewiſſermaßen „von allen Seiten her" *auf einmal* zu betrachten (wie es bei den makrophyſikaliſchen Gebilden ohne weiteres möglich iſt): Ich kann den *Eingriff,* den eine Beobachtung am Atom naturgeſetzlich bedingt, nach Belieben auf verſchiedene Seiten des Objekts verlegen, um dann die von dieſer Störung gerade *nicht* betroffene Seite des Objekts klar beobachtbar heraustreten zu laſſen.

Die erläuterten Begrenzungen der mikrophyſikaliſchen Beobachtungsmöglichkeiten laſſen die in § 1 beſprochene Einſchränkung der kauſalen Determination im atomaren Geſchehen als ganz natürlich erſcheinen. Denn die exakte Vorausberechnung etwa in der Aſtronomie ſetzt ja voraus, daß zunächſt einmal, für einen gewiſſen Zeitpunkt, Örter und Geſchwindigkeiten der fraglichen Planeten, Monde, Kometen, Aſteroiden empiriſch genau beſtimmt werden (wobei natürlich praktiſch die Geſchwindigkeitsmeſſung durch mathematiſch äquivalente wiederholte Ortsmeſſung erſetzt werden kann). *Daraus* iſt dann der geſamte zeitliche Verlauf der weiteren Bewegung zu errechnen. Wenn aber, wie bei den Elektronen, eine gleichzeitige Feſtlegung von Ort und Geſchwindigkeit gar nicht möglich iſt, ſo kann das Beſtehen kauſaler Determinierung *gar nicht erwartet werden.*

Um einem eingetretenen Mißverſtändnis zu begegnen: Es handelt ſich hier *nicht* um die *triviale* Tatſache, daß *keine* Meſſung, auch keine makroſkopiſche, *abſolut genau* ſein kann — ſo daß auch die errechneten Folgerungen ſtets mit einer gewiſſen Ungenauigkeit behaftet ſind. Dieſe Ungenauigkeit kann nach klaſſiſcher Auffaſſung *im Prinzip* beliebig klein gemacht werden durch Steigerung der Meßgenauigkeit, welcher in der klaſſiſchen Theorie keinerlei grundſätzliche, unüberſteigbare Schranken geſetzt ſind. Die Vorſtellung einer abſolut genauen Meſſung und abſolut genauen Vorausberechnung iſt alſo in der klaſſiſchen Theorie eine *„erlaubte Idealiſierung“*, die *keinem klaſſiſchen Naturgeſetz widerſpricht.* Was uns hier beſchäftigt, iſt nicht dieſe triviale Tatſache, ſondern vielmehr etwas, was einen *Unterſchied* von Mikro- und Makrophyſik ausmacht. Heben wir aber bei dieſer Gelegenheit hervor, daß die eben berührte klaſſiſche Auffaſſung unhaltbar wäre, wenn nicht der geſamten klaſſiſchen Theorie das Prinzip der *Stetigkeit* („natura non facit saltus“) zugrunde läge: man ſieht hier wieder die innige, unlösliche Verknüpfung, in welcher ſich alle die verſchiedenen Züge einerſeits der klaſſiſchen und andererſeits der Quantentheorie beiderſeits zu einem geſchloſſenen, widerſpruchsfreien logiſchen Ganzen zuſammenfinden.

Wir wollen einen *erkenntnistheoretiſchen Grundſatz* hervorheben, den wir im obigen wiederholt gebraucht haben, ohne ihn beſonders auszuſprechen: Wenn eine Behauptung ſo beſchaffen iſt, daß man ſie auf keine Weiſe (durch das Experiment und durch logiſch-mathematiſche Analyſe) entweder als richtig oder als falſch erweiſen kann, *dann iſt dieſe Behauptung ſinnlos.* Berühmtes Beiſpiel: wenn wir zu der Überzeugung gekommen ſind, daß ein ruhender Weltäther auf keine Weiſe *nachzuweiſen* iſt, dann iſt es *ſinnlos,* trotzdem ſeine Exiſtenz (unter Ausſtattung mit Eigenſchaften, die den Nachweis verhindern) zu behaupten. Ebenſo iſt es erkenntnistheoretiſch un-

möglich, zu ſagen, daß ein Elektron, obwohl man definierte Werte von Ort und Geſchwindigkeit an ihm nicht zugleich *beobachten* kann, trotzdem definierten Ort und definierte Geſchwindigkeit „*beſitzen*" könne oder müſſe; oder daß eine exakt kauſale Determinierung „*exiſtieren*" könne, *ohne nachweisbar zu ſein.* Die letztere Anſicht iſt in der Tat ſeitens der Kritik als Einwand ausgeſprochen worden. Dem Phyſiker von heute, der ſich in der Beſchäftigung mit Relativität und Quanten gezwungenermaßen einige erkenntnistheoretiſche „Routine" zulegen mußte, ſind dieſe einfachen erkenntnistheoretiſchen Grundſätze etwas ſo Geläufiges geworden, daß er ſich ſcheut, ſie immer wieder zu erörtern. Und der Raum gerade dieſer vorliegenden Zeitſchrift darf wirklich nicht für die Erörterung dieſer elementaren erkenntnistheoretiſchen Fragen in Anſpruch genommen werden.

Die Bedeutung der Ungenauigkeitsregeln wird in lehrreicher Weiſe illuſtriert durch die damit eng zuſammenhängende Tatſache der *Unmöglichkeit einer individuellen Unterſcheidung verſchiedener Elektronen.* Wenn wir zwei Elektronen, die ſich zunächſt an zwei weit getrennten Orten *A, B* befinden, zu enger Begegnung bringen, ſie danach wieder trennen und das eine nach *A,* das andere nach *B* bringen, dann *hat es keinen Sinn, zu fragen,* ob zum Orte *A* (und entſprechend nach *B*) wieder „dasſelbe" Elektron zurückgenommen ſei, oder ſtatt deſſen „das andere": Eine poſitive oder negative *Entſcheidung* dieſer Frage iſt *grundſätzlich ausgeſchloſſen;* wir müſſen alſo, dem eben berührten erkenntnistheoretiſchen Grundſatz gemäß, dieſe Frage (oder eine entſprechende *Ausſage*) für ſinnlos erklären. Dies iſt ein auffälliges Beiſpiel dafür, daß ſich in der Quantenphyſik Verhältniſſe ergeben, die einfach außerhalb des *Vorſtellungsvermögens* der klaſſiſchen Theorie liegen; dabei handelt es ſich um eine ganz einfache Folgerung aus den Heiſenbergſchen Ungenauigkeitsbeziehungen. Zwei Umſtände zuſammengenommen bedingen dieſe Unmöglichkeit der individuellen Unterſcheidung. 1. Die beiden Elektronen ſind unſeren Vorſtellungen nach einander *völlig gleich,* ſo daß ein *Wiedererkennen* eines einmal aus dem Auge verlorenen Elektrons unmöglich iſt. *Dieſer* Sachverhalt iſt ganz der gleiche in der klaſſiſchen und in der Quantentheorie. 2. Es iſt andererſeits nicht möglich, durch beobachtende Verfolgung der Bewegung eines Elektrons längs ſeiner „Bahn" der Identität dieſes Elektrons dauernd gewiß zu bleiben. Denn den Ungenauigkeitsregeln gemäß kann ja

diese Bahn nur mit einer gewissen endlichen, nicht unterschreitbaren Ungenauigkeit ausgemessen werden; und wenn das von uns verfolgte Elektron nun einem anderen so eng begegnet, daß beide sich hinsichtlich Ort und Geschwindigkeit *nicht* mehr um Beträge unterscheiden, die größer als die nicht unterschreitbaren Ungenauigkeiten sind, so werden uns die beiden Elektronen *ineinander verschwimmen.* Zu der schon klassisch verständlichen Unmöglichkeit des Wiedererkennens eines bestimmten Elektrons kommt also durch die Quantentheorie die weitere Unmöglichkeit hinzu, ein Elektron dauernd im Auge zu behalten und dadurch als mit sich selbst identisch und von anderen Elektronen verschieden zu erkennen: damit ist aber die „Individualität" der Elektronen gänzlich verlorengegangen.

Der eigentümliche — uns aber im obigen schon ganz anschaulich und natürlich gewordene — Tatbestand, daß bei der messenden Beobachtung *einer* Seite eines quantenphysikalischen Gebildes die *anderen* Seiten unkontrollierbar und undefiniert verschwimmen, ist von Bohr mit dem einprägsamen Worte „*Komplementarität*" bezeichnet worden. So sind Orts- und Impulsmessung „*komplementäre*", in exakter Durchführung einander radikal ausschließende Beobachtungsexperimente. Mit Recht ist darauf hingewiesen worden, daß man die Quantentheorie, um ihren gedanklichen Grundgehalt möglichst deutlich zu bezeichnen, in Analogie zur „Relativitätstheorie" die „*Komplementaritätstheorie*" nennen könnte.

Das bekannteste und anschaulichste Beispiel quantenphysikalischer Komplementaritäten ist der *Dualismus von Wellen und Korpuskeln.* Wir wissen heute dank Einstein und de Broglie, daß wir *nur eine Seite* der Erscheinungen richtig wiedergeben, wenn wir das *Licht* als eine *Wellenbewegung,* oder wenn wir einen *Kathodenstrahl* als einen Strahl dahinfliegender *korpuskularer Teilchen* (Elektronen) kennzeichnen. Tatsächlich zeigt das Licht „andererseits" auch korpuskulare Struktur; und der Kathodenstrahl ist „andererseits" auch ein Wellenstrahl, genau so gut wie das Licht. Diese Tatsachen, die durch zwei Jahrzehnte ein unauflösbares Rätsel und einen unbehebbaren inneren Widerspruch zu bilden schienen, haben durch die Quantenmechanik ihre aufklärende, widerspruchsfreie und abschließende begriffliche und mathematische Beschreibung gefunden. Es ist ein besonders wunderbarer und reizvoller Zug der quantenmechanischen Komplementarität, daß durch sie die *widersprechendsten Eigenschaften* miteinander vereinbar gemacht werden. Daß irgend-

eine Strahlung ſich niemals *zugleich als Wellen- und als Korpuskularſtrahlung erweiſen* kann, das bleibt (ſelbſtverſtändlich!) vollkommen unabänderlich, für die Quantentheorie ebenſo, wie für die klaſſiſche: denn dieſe beiden grundverſchiedenen Begriffe *können* eben nicht zur Deckung gebracht werden. Wohl aber wird es für quantenphyſikaliſche Begriffe möglich und verſtändlich, daß *dieſelbe Strahlungsart* ſich *einmal* als Wellenſtrahlung, und *ein andermal* als korpuskulare Strahlung offenbart: Die mit der Wellennatur des Lichtes verknüpften Eigenſchaften einerſeits und die mit der korpuskularen („atomiſtiſchen") Natur des Lichtes andererſeits verknüpften Eigenſchaften ſind *komplementär* zueinander in dem Sinne, daß ſie niemals in einem und demſelben Experiment *zugleich* in Erſcheinung treten können. Experimente, welche die *Wellenſeite* des Lichtes klar heraustreten laſſen, drängen (durch den *Eingriff*, der mit jedem Beobachtungsvorgang verknüpft iſt) die korpuskulare Natur des Lichtes zurück ins Unbeſtimmte, Unbeobachtbare; andere Experimente, welche die *Korpuskelſeite* des Lichtes zum Hervortreten zwingen, laſſen alle die Eigenſchaften undefiniert werden, welche uns ſonſt die Wellennatur des Lichtes verraten könnten. Mit dieſem wunderbaren Kunſtgriff der Komplementarität bringt die Natur es fertig, Eigenſchaften und Geſetzmäßigkeiten, die ſich ſo ſehr widerſprechen, daß ſie niemals zugleich zuſammen beſtehen können, doch *an ein und demſelben phyſikaliſchen Objekt* zuſammen zu verknoten. Die Betrachtung dieſer dualiſtiſchen Natur aller Strahlungen läßt aber wiederum erkennen und ganz anſchaulich, geradezu *fühlbar* werden, daß die quantenphyſikaliſche Komplementarität (und ſomit auch die mikrophyſikaliſche Akauſalität) *in der Natur ſelbſt begründet iſt*, und nicht etwa nur einen Ausdruck bildet für eine *derzeitige* Begrenzung unſeres Wiſſens und Könnens, deren Überwindung zu erhoffen und zu erſtreben wäre.

Ein quantitatives *Maß* für die Unmöglichkeit einer direkten Vereinbarung von Wellen- und Korpuskulartheorie der Strahlung erhält man aus der Überlegung, daß ein „*Wellenpaket*" von endlicher räumlicher Ausdehnung nur dann aus der Superpoſition rein harmoniſcher Teilwellen aufgebaut werden kann, wenn *mindeſtens* ein gewiſſer endlicher Bereich von Wellenlängen zu dieſer Superpoſition herangezogen wird. Dieſe Überlegung liefert die mathematiſche *Begründung* für die oben ohne nähere Erläuterung ihrer Herleitung eingeführten Heiſenbergſchen Ungenauigkeitsbeziehungen.

§ 3. Determinismus und Indeterminismus bei Organismen[12])

Indem wir uns nunmehr den biologiſchen und pſychologiſchen Problemen zuwenden, in denen wir, Bohrs Gedankengängen folgend, Zuſammenhänge mit den durch die Quantenforſchung erſchloſſenen Geſetzmäßigkeiten der atomaren Welt vermuten, empfinden wir die Notwendigkeit einer techniſchen Vorbemerkung. Der Verfaſſer dieſes Aufſatzes iſt Phyſiker; er fühlt ſich auf heimiſchem Boden bei der Erläuterung phyſikaliſcher Erkenntniſſe; und er iſt ſich gewiß, daß die eingetretenen revolutionären Umgeſtaltungen der phyſikaliſchen Vorſtellungswelt auch ſeitens der biologiſchen Wiſſenſchaften künftig eingehend berückſichtigt werden müſſen. Hinſichtlich der nachfolgenden Verſuche gewiſſer *Konkretiſierungen* dieſer Überzeugung fühlt ſich der Verfaſſer jedoch genötigt, ausdrücklich diejenige *Nachſicht* der Biologen und Pſychologen zu erbitten, auf welche die Bemerkungen und Fragеſtellungen eines Nichtfachmannes unvermeidlicherweiſe angewieſen ſind.

Wenn der Quantenphyſiker glaubt, dem Biologen einiges Wichtige ſagen zu können, ſo bedeutet das natürlich keineswegs, daß er der Meinung wäre, die Grundſätze der biologiſchen Erſcheinungen aus ſeinen eigenen Erkenntniſſen heraus *deduzieren* oder die Grundprobleme der Biologie „löſen" zu können. Aber tatſächlich iſt das als ein Einwand gegen die Bedeutſamkeit der Quantenphyſik für die Biologie ausgeſprochen worden, daß es nicht möglich ſei, aus den quantenphyſikaliſchen Ergebniſſen heraus die *teleologiſchen* Grundphänomene theoretiſch zu verſtehen oder herzuleiten. Eine ſolche Herleitung kann aber vernünftigerweiſe niemals beabſichtigt ſein und niemals für möglich gehalten werden. Die Biologie bildet ein Wiſſensgebiet *außerhalb* der Phyſik; ſo wenig es möglich iſt, etwa die Geſetze der Elektrodynamik aus denen der Mechanik abzuleiten (bekanntlich haben die Phyſiker nach Maxwell ſogar darauf verzichtet, die *Zurückführung* der elektrodynamiſchen Geſetze auf *mechaniſche Modelle* zu erörtern), ſo wenig kann man die biologiſchen Geſetze aus den phyſikaliſchen Geſetzen ableiten wollen: es können alſo phyſikaliſche Bemerkungen zur Biologie nicht etwa deshalb getadelt werden, weil ſie eine ſolche Ableitung weder leiſten, noch erſtreben. Diejenigen Erſcheinungen und Geſetzmäßigkeiten, durch

[12]) Dieſer Paragraph kann ohne vorherige Kenntnis von § 2 ſogleich nach § 1 geleſen werden.

welche die lebenden Organismen ſich charakteriſtiſch *unterſcheiden* von den anorganiſch-phyſikaliſchen Gebilden, werden naturgemäß auch nicht ſeitens der Phyſik aufgeklärt werden können. Vielmehr muß die Phyſik gegenüber der Biologie ſich beſchränken auf die Teilnahme an der Erörterung der Frage, welche Rollen die verſchiedenen Seiten der phyſikaliſchen Geſetzmäßigkeiten innerhalb des Geſamtkonzertes der biologiſchen Phänomene ſpielen. Dabei iſt natürlich ſehr damit zu rechnen, daß beſtimmte Züge der phyſikaliſchen Geſetzmäßigkeiten innerhalb des biologiſchen Erſcheinungsgebietes zu einer viel größeren und ausgeprägteren Bedeutung gelangen, als ſie innerhalb des anorganiſch-phyſikaliſchen Gebietes ſelbſt beſitzen.

In unſerer Erörterung dieſer Probleme beſchränken wir uns ſtreng auf ſolche Punkte, hinſichtlich welcher *unvermeidliche* oder doch mindeſtens *ſehr wahrſcheinliche Folgerungen* aus den neuen phyſikaliſchen Erkenntniſſen anzumelden ſind. Keineswegs wollen wir den kühnen Verſuch wagen, ein neues *Geſamtbild* vom Weſen der Lebenserſcheinungen zu zeichnen. Es werden deshalb auch viele der wichtigſten biologiſchen Problemkomplexe hier ganz unerwähnt bleiben müſſen lediglich deshalb, weil eben bezüglich dieſer Problemkomplexe vom Standpunkt des Quantenphyſikers aus vorerſt nichts Neues zu ſagen iſt. Es bedeutet aber durchaus *nicht* etwa eine *ablehnende* Stellungnahme unſererſeits (oder eine *Gegenſätzlichkeit* unſerer hier vorgetragenen Auffaſſungen), wenn beiſpielsweiſe auf die bedeutſamen Unterſuchungen von Hering, Semon und Bleuler[13]) über die *Mneme* und ihre Bedeutung für das teleologiſche Reaktionsvermögen nicht eingegangen wird. Nicht die Darlegung einer neuen, alle biologiſchen Erſcheinungen umfaſſende Theorie des Lebens wird hier verſucht, ſondern lediglich die Klärung der phyſikaliſchen Unterlagen, mit denen jede künftige Theorie der Lebenserſcheinungen zu rechnen haben wird.

Für die *Phyſiologie*, die ja dauernd mit phyſikaliſch-chemiſchen Methoden, Begriffen und Geſetzmäßigkeiten arbeitet, iſt es *einfach unumgänglich*, daß fundamentale Neuerkenntniſſe der Phyſik daraufhin geprüft werden, welche Veränderungen ſie für die phyſikaliſchen Vorausſetzungen der Phyſiologie mit ſich bringen. Und zwar iſt hinſichtlich der neuen Quantenphyſik die Sachlage im Prinzip ganz klar.

[13]) Vgl. die ſchöne Darſtellung von E. Bleuler, Naturwiſſ. *21*, 100, 1933.

Die Quantenphyſik lehrt uns, daß die klaſſiſchen Begriffsbildungen und Vorſtellungsweiſen der Phyſik — welche auch die bisherigen phyſikaliſchen Vorausſetzungen der Biologie gebildet haben — nur im Bereich der *makroſkopiſchen* Gebilde zutreffend ſind; daß dagegen völlig andere Begriffsbildungen und Geſetzlichkeiten in Betracht kommen in der *mikrophyſikaliſchen*, atomaren Welt. Ob die neuen Erkenntniſſe für die Biologie Bedeutung haben oder nicht, das wird alſo davon abhängen, ob die Organismen „makrophyſikaliſche" oder „mikrophyſikaliſche" Syſteme ſind; und natürlich reicht die primitive Tatſache, daß etwa ein Säugetier ein aus ſehr vielen Atomen beſtehendes, ſogar mit freiem Auge ſichtbares Gebilde iſt, noch keineswegs dazu aus, es als „makroſkopiſch" im Sinne des Atomphyſikers anſprechen zu können.

Daß für makroſkopiſche phyſikaliſche Gebilde die exakten Kauſalgeſetze der klaſſiſchen Phyſik gelten, obwohl für jedes einzelne der Atome, aus denen ſie zuſammengeſetzt ſind, nur Wahrſcheinlichkeitsgeſetze ſeines Verhaltens beſtehen, das beruht ja darauf, daß ein makroſkopiſches phyſikaliſches Gebilde von jeder in ihm vorhandenen Atomart *zahlloſe gleiche* und *gleichen Bedingungen* ausgeſetzte Exemplare enthält — ſo daß im Geſamteffekt aus den ſtatiſtiſchen Einzelreaktionen der Einzelatome ein genau beſtimmtes Geſamtreſultat zuſtandekommt. Im Organismus aber zeigen alle Teile des Syſtems wunderbar feine und höchſt verwickelte *Strukturen:* Den ſchon mit freiem Auge ſichtbaren Strukturen liegen die viel komplizierteren zugrunde, die uns das Mikroſkop enthüllt; und dieſe Strukturen ſetzen ſich fort bis unterhalb der Grenzen mikroſkopiſcher Sichtbarkeit, ſicherlich zum Teil bis in kolloidale und molekulare Dimenſionen herunter. Entſprechend beſitzen auch die Materiemengen, die bei den feinſten, aber gerade entſcheidend wichtigen phyſiologiſchen Reaktionen mitſpielen, in vielen Fällen ſicherlich nur molekulare Größe; empiriſch ſcheint ja z. B. ſichergeſtellt, daß ſchwächſte Lichtwahrnehmungen ſchon durch *ein paar Lichtquanten* erzeugt werden können. Natürlich beſteht bei alledem kein Hindernis, beiſpielsweiſe die Geſetze der Statik (Hebelgeſetz uſw.) auf die Unterſuchung der am Knochengerüſt angreifenden Kräfte anzuwenden; auch ſtellt ja etwa ein Muskelſtück in beſtimmtem Sinne zweifellos eine weitgehend „homogene" Maſſe dar, deren Spannungs- und Bewegungszuſtände in gewiſſem Umfang durch die klaſſiſche Elaſtizitätstheorie zu analyſieren ſind. Dennoch dürfte andererſeits kaum ein Zweifel möglich ſein: gerade hinſichtlich ſolcher Reaktio-

nen, die für die Geſamttätigkeit des Organismus eine „*dirigierende*" Rolle ſpielen (Gehirnzellenreaktionen bei Wirbeltieren; Kernreaktionen bei Einzellern uſw.), kommen atomare (molekulare) Materiemengen und quantenhafte Energieumſetzungen in Betracht. Für die Erforſchung der zentralſten Regionen des Organismus und die Analyſe ihrer Funktionen wird alſo *nicht* die Makrophyſik, ſondern nur die *Mikrophyſik* die phyſikaliſchen Unterlagen bieten können.

Wir möchten dies hervorheben, daß es ſomit ganz *unausweichlich* iſt, den neuen Erkenntniſſen der Quantenphyſik in der Biologie Rechnung zu tragen. Dieſer Unausweichlichkeit gegenüber iſt es zunächſt durchaus belanglos, ob die neue Phyſik der Phyſiologie Erleichterung und unmittelbare Förderung ihrer Arbeit verſpricht, oder im Gegenteil eine unerwünſchte, erſchwerende Komplizierung. Einerlei, ob die neuen phyſikaliſchen Erkenntniſſe den heute aktuellen Fragеſtellungen der Biologie entgegenkommen oder in ganz andere Richtungen weiſen; ob ſie Auskünfte geben, die der Biologie erwartet und willkommen ſind oder unerwartet: auf alle Fälle muß die neue Phyſik *berückſichtigt* werden. Denn die Phyſiologie kann nicht fortfahren, mit phyſikaliſchen Vorausſetzungen zu arbeiten, die inzwiſchen überholt und ſchlechtweg unrichtig ſind.

In dieſem Paragraphen ſollen einige der Folgerungen erörtert werden, die ſich aus den in § 1 beſprochenen Neuerungen der phyſikaliſchen Vorſtellungen zu ergeben ſcheinen; die biologiſchen Perſpektiven, die durch die in § 2 erläuterten phyſikaliſchen Erkenntniſſe eröffnet werden, ſollen in § 4 zur Sprache kommen.

Ein Element der *Unſtetigkeit* iſt in die Biologie eingeführt worden durch die Entdeckung der *Mendelſchen Vererbungsregeln:* wir wiſſen auf Grund der heutigen Vererbungswiſſenſchaft, daß die konſtituierenden Eigenſchaften eines Tieres oder einer Pflanze *nicht* innerhalb einer Art von Individuum zu Individuum *ſtetig variabel* (innerhalb gewiſſer Grenzen) ſind. Vielmehr erweiſt ſich der Phänotypus eines Individuums moſaikartig beſtimmt durch Einzeleigenſchaften, die nur diskreter, unſtetiger Abſtufungen ohne ſtetige Zwiſchenſtufen fähig ſind[14]). Dieſe Entdeckung darf durchaus als eine *Parallele* zur *Atomiſtik* der phyſikaliſchen Welt bezeichnet werden; es iſt eine wahre *Atomiſtik der Erbanlagen,* die ſich durch die Arbeit der Vererbungsforſcher vor uns enthüllt hat. In wunder-

[14]) Von der Frage der vererbbaren Eigenſchaften, deren Träger außerhalb der Chromoſomen im Plasma der Keimzellen ihren Sitz haben ſollen, ſehen wir hier ab.

barer Analogie zum Auftreten derselben Atome in verschiedenen Molekülen sehen wir ja sogar teilweise *dieselben Erbfaktoren* (etwa Blüten- oder Fellfärbungen bestimmend) bei *verschiedenen* biologischen *Arten* in Wirksamkeit. Sicherlich handelt es sich übrigens nicht nur einerseits um eine *Parallele*, sondern andererseits auch direkt um eine biologische Folge und Auswirkung der physikalischen Atomistik: Das Nichtvorhandensein stetiger Übergänge in der unstetigen Abstufung der Erbanlagen dürfte zweifellos bedeuten, daß die einfachen, nicht mehr zerlegbaren Gene *einzelne* (wenn auch sehr große) *Moleküle* darstellen. *Wir sehen deshalb in der Vererbungslehre die überzeugendste und breiteste empirische Unterlage der These, daß die Organismen nicht makrophysikalische, sondern mikrophysikalische Systeme sind.*

Die Unstetigkeiten der Erbanlagen bedingen (ganz analog den atomistisch-quantenhaften Unstetigkeiten in der Physik) die Notwendigkeit, *statistische Begriffe* einzuführen. Schon die Mendelschen Vererbungsgesetze selbst sind ja statistische Gesetze. Doch handelt es sich hier *nicht* um eine „*primäre* Statistik", sondern um die einfache statistische Gesetzmäßigkeit, die sich aus den im Einzelfall sehr komplizierten Suchbewegungen des Schwarmes der mit verschiedenen Erbanlagen ausgestatteten Spermatozoen als Folge ergibt — ebenso, wie das einfache statistische Gesetz des Würfelspiels das Folgeresultat der sehr komplizierten Schüttelbewegung ist.

Eine *primäre Statistik* dürfte jedoch vorliegen bei den Zustandsänderungen der Gene selbst, also bei den *Mutationen.* Bleuler hat — ein Umstand, der die großen technischen Schwierigkeiten einer Unterhaltung über die Grenzen der Spezialgebiete hinweg beleuchtet — Tatsachen, die eine Bestätigung und Präzisierung meiner diesbezüglichen Auffassung liefern, als *Einwände* gegen meine Auffassung angesehen: „Neuestens haben Hanson und Heys sogar nachgewiesen, daß die bei Drosophila durch Radiumstrahlung erzeugte Mutationsrate der angewandten Dosis direkt proportional sei, und Jollos fand, daß in aufeinanderfolgenden Generationen applizierte gleiche Mutationsreize sich in ihren Wirkungen summieren können. Sind das nicht kausale Zusammenhänge?" Es zeigt sich hier, daß durch den in Bleulers Einführung des „natürlichen Kausalbegriffs" enthaltenen absichtlichen Verzicht auf größtmögliche Schärfe der Begriffsbildung doch erhebliche Gefahren von Verwechslungen und Mißverständnissen herbeigeführt werden. Tatsächlich entspricht die hier vorliegende Situation offenbar *genau* dem

obigen phyſikaliſchen Beiſpiel der Lichtabſorption durch Atome. Unter hinreichend *vielen* Atomen wird ſtets eine mit der einwirkenden Lichtintenſität *proportionale* Anzahl ein Lichtquant abſorbieren. Es beſteht — in dieſem phyſikaliſchen, und in dem von Hanſon und Heys unterſuchten biologiſchen Fall — für den *Einzelfall* nicht eine kauſale Vorherbeſtimmung; ſondern es gibt für ein *einzelnes* Atom oder eine *einzelne* Keimzelle der Droſophila lediglich eine *mit der Intenſität der Einwirkung proportionale Wahrſcheinlichkeit* des poſitiven Reagierens.

Es liegt aber im Begriff der Wahrſcheinlichkeit, daß auch ſolche Ereigniſſe, deren Wahrſcheinlichkeit ganz ungeheuer klein iſt, doch ſchließlich einmal eintreten müſſen. (Konkretes Beiſpiel: mit berechenbarer, von Null verſchiedener Wahrſcheinlichkeit kann und muß einmal eine abnorm ſtarke Intenſitätsſchwankung in der Strahlung eines Radiumpräparates eintreten.) Es ſteht alſo nicht im Gegenſatz zur eben gemachten Erläuterung der ſtatiſtiſchen Auffaſſung der Mutationen, ſondern es iſt gerade eine notwendige Folge davon, daß man bei einer konkreten Mutation, die ſich als hiſtoriſches Ereignis einmal vollzogen hat, *neben* der Suche nach Urſachen, die zu jener Zeit eine Zunahme der Wahrſcheinlichkeit für dieſe Mutation bewirkt haben könnten, *auch* die andere Möglichkeit ins Auge zu faſſen hat, daß hier vielleicht ein an ſich ſehr unwahrſcheinliches Ereignis tatſächlich einmal eingetreten iſt. Der experimentelle Vererbungsforſcher, der ſich mit der künſtlichen Erzeugung von Mutationen befaßt, wird ſich um ſolche Möglichkeiten *nicht* zu kümmern brauchen. Wohl aber ſcheint es mir, daß bislang kein Geſichtspunkt gegeben iſt, der uns der Notwendigkeit überheben könnte, zu erwägen, ob dieſe zweite Möglichkeit nicht vielleicht für die Problematik der Entwicklung des organiſchen Lebens während der geologiſchen Epochen eine recht bedeutende Rolle ſpielen könnte.

Wir wollen aber die Frage der extrem unwahrſcheinlichen Ereigniſſe für jetzt auf ſich beruhen laſſen, und uns wieder den ſtatiſtiſch „normalen", nicht extrem unwahrſcheinlichen Fällen zuwenden. Aus den obigen diesbezüglichen Erläuterungen ergibt ſich, daß in der bisherigen Beurteilung eines berühmten biologiſchen Problems der Tatſache der *unſtetigen Variabilität der Erbanlagen* noch nicht in völlig folgerichtiger und gebührender Weiſe Rechnung getragen zu ſein ſcheint. Wir meinen das Problem der *Vererbung erworbener Eigenſchaften:* Der Phyſiker, der ſeit der Planckſchen Entdeckung

ſo intenſiv genötigt worden iſt, alle ſich aus dem Auftreten unſtetiger „Quantenſprünge" im Naturgeſchehen ergebenden methodologiſchen Fragen gründlich zu durchdenken, kann die bisherige, faſt allgemein für abſchließend gehaltene Widerlegung der Möglichkeit einer Vererbung erworbener Eigenſchaften nicht für überzeugend halten. Denn es iſt in den bisherigen Diskuſſionen zumeiſt verſäumt worden, dieſe Frage in eine Form zu bringen, die der Unſtetigkeit der Erbanlagen Rechnung trägt. Die einzige, mit unſerem vererbungswiſſenſchaftlichen Erkenntnisſtand vereinbare Formulierung der Hypotheſe der Vererbung erworbener Eigenſchaften iſt offenbar dieſe: *Tritt im Phänotypus eines Organismus (während deſſen individuellen Lebens) als Anpaſſungserſcheinung eine Abweichung vom durchſchnittlichen Typus ein, ſo entſteht in den Keimzellen dieſes Individuums eine Wahrſcheinlichkeit für eine Mutation, die den Genotypus der Nachkommen in einer der anfänglichen phänotypiſchen Abweichung ähnlichen Weiſe verändert.* Man beachte, daß die anfängliche phänotypiſche Anpaſſung hinſichtlich der Stärke ihrer Ausbildung *ſtetiger* Abſtufung fähig iſt. Folglich kann ſie nur eine (gleichfalls ſtetig variable) *Wahrſcheinlichkeit* für eine unſtetige Änderung des Genotypus bewirken.

Ich möchte bekennen, daß ich die Hypotheſe in dieſer Formulierung (die ja ſo naheliegend iſt, daß ſie wohl auch von anderer Seite ſchon vorgetragen ſein dürfte) für nicht nur noch nicht empiriſch widerlegt, ſondern ſogar für ſehr wahrſcheinlich richtig halte. Daß ihre poſitive experimentelle Beſtätigung ſehr ſchwer zu erreichen iſt, das iſt genau das, was man vernünftigerweiſe erwarten muß. Innerhalb *einer einzigen Generation* (wenn man das obige Jollosſche Reſultat verallgemeinern darf, ſo könnte ein durch viele Generationen fortgeführtes Experiment ausſichtsreicher werden) können nur *ſehr ſchwache* Vererbungswirkungen der Anpaſſungserſcheinung zuſtandekommen. *Ohne* unſere moderne Kenntnis der unſtetigen Variabilität der Erbanlagen könnte man alſo vermuten, daß der Nachkommenſchaft eine ganz *ſchwache* und *geringfügige* Modifikation vererbt würde. Da aber in Wahrheit aus Unſtetigkeitsgründen eine Veränderung des Genotypus nicht beliebig „klein" ausfallen kann, vielmehr nur die zwei Möglichkeiten entweder *keiner* oder einer ſchon *erheblichen* Abänderung beſtehen, ſo muß ſich die *Schwachheit* des Effektes in der Form zeigen, daß eben die *Wahrſcheinlichkeit* einer ſolchen Mutation ſehr klein iſt; ein poſitiver Ausfall des Experimentes *muß ſtatiſtiſch ſehr ſelten ſein.* Unter

dieſem Geſichtspunkt betrachtet ſcheinen mir die bisherigen Experimente nicht endgültig gegen die Hypotheſe zu entſcheiden[15]).

Was ich früher (a. a. O.) über Determiniertheit und Indeterminiertheit der Reaktionen eines individuellen Organismus ausgeführt habe, möchte ich hier nicht ausführlich wiederholen. Es iſt jedoch notwendig, auf den Gegenſtand zurückzukommen, um einigen Einwänden und Mißverſtändniſſen zu begegnen.

Jenſen (a. a. O.) weiſt berechtigtermaßen darauf hin, daß in der Biologie das Wort „Determinierung" auf zwei verſchiedene Dinge anwendbar ſei, die er (nach Petzoldt) als „ſukzedane" und „ſimultane" Determinierung unterſcheidet; man könnte vielleicht auch von „kauſaler" und „morphologiſcher" Determinierung ſprechen. In der *Phyſik* kommt *nur* die erſtere vor; in der Biologie jedoch auch die letztere, die etwa durch folgendes Beiſpiel illuſtriert werde (das, wenn ich Jenſens Meinung recht verſtanden habe, dieſem Begriff entſpricht): Ein Zoologe, der von einem gewiſſen Tier nur eine Pfote zu ſehen bekommt, wird nach deren Unterſuchung imſtande ſein, *das ganze Tier* weitgehend zu beſchreiben. Zu unſerem augenblicklichen Thema gehört dieſe ſimultane oder morphologiſche Determinierung *nicht; hier* iſt alſo, wenn wir kurzweg von Determiniertheit ſprechen, *nur* die kauſale oder ſukzedane gemeint.

Das grundſätzliche Glaubensbekenntnis einer beſtimmten Epoche der Biologie hat durch Du Bois-Reymond eine glänzende, an Klarheit und Schönheit nicht zu überbietende Formulierung erhalten. Die Fragestellung, auf die meine früheren Erörterungen über Determiniertheit oder Indeterminiertheit der organiſchen Reaktionen ſich bezogen, kann ganz einfach ſo ausgeſprochen werden: *Können wir dieſe von* Du Bois-Reymond *vorgetragene Auffaſſung heute noch als richtig anerkennen?*

Dazu iſt zunächſt zu ſagen, daß die phyſikaliſchen Vorausſetzungen, von denen Du Bois-Reymond damals ausgehen konnte und mußte, heute widerlegt ſind. Man glaubte damals, daß die Bewegungen und Wechſelwirkungen der Atome Naturgeſetzen unterlägen, die von grundſätzlich ganz demſelben Typus wären wie die den Planetenbewegungen zugrunde liegenden mechaniſchen Geſetze. Heute wiſſen wir dagegen, daß dem nicht ſo iſt, daß vielmehr in der Atomphyſik ganz neue Formen von Naturgeſetzlichkeit vorgefunden werden, die von der klaſſiſchen Makrophyſik total verſchieden ſind. Zweitens iſt dann zu fragen, ob dieſe Einſchränkung des

[15]) Die heutige allgemeine Ablehnung dieſer Hypotheſe ſtützt ſich übrigens wohl zum großen Teil auf die anſcheinend recht verbreitete, aber durchaus irrige Meinung, daß dieſe Hypotheſe mit der Tatſache der Unſtetigkeit der Erbanlagen von vornherein *logiſch unvereinbar* ſei.

Gültigkeitsbereiches der von Du Bois-Reymond vorausgesetzten physikalischen Gesetze für die Anwendung in der Biologie bedeutsam ist: über diese Frage haben wir aber oben schon gesprochen und die These aufgestellt, daß tatsächlich die Organismen *mikrophysikalische* und nicht makrophysikalische Systeme seien. Also wir kommen dazu, die Du Bois-Reymondsche Auffassung als durch die Erkenntnisse der Quantenphysik liquidiert anzusehen.

Man möge nicht einwenden, daß mit dieser Feststellung lediglich eine Auffassung getroffen werde, die sowieso nur noch historische Bedeutung habe. Als A. Wagner 1909[16]) die damals vorhandenen Ansätze „antimechanistischer" Theorienbildungen sammelte, standen die vereinzelten (untereinander stark divergierenden) Vertreter solcher Theorien noch der geschlossenen Front der offiziellen „mechanistischen" Lehrmeinung gegenüber, die im wesentlichen mit der Du Bois-Reymondschen Auffassung identisch geblieben war. Soweit ich die heutige Lage zu übersehen vermag, scheint es mir, daß auch jetzt noch die allerdings allmählich wachsende Zahl derjenigen Biologen, die sich die Unbefangenheit einer vorurteilslosen empirischen Erforschung der dem organischen Leben charakteristischen teleologischen, organismischen usw. Gesetzlichkeiten errungen haben, in der Minderheit sind gegenüber den an der „Notwendigkeit einer physikalisch-chemischen Erklärung der Lebenserscheinungen"[17]) festhaltenden, und die Durchführung dieser Erklärung offenbar im Sinne des Du Bois-Reymondschen physiologischen Forschungsprogramms auffassenden Biologen.

Wenn wir feststellen, daß heute die physikalischen Voraussetzungen der mechanistischen Biologie liquidiert sind, so ist damit natürlich noch keineswegs andererseits auch eine positive Beziehung der Quantenphysik zur nichtmechanistischen (vitalistischen, teleologischen oder organismischen) Biologie gegeben. Aber auch die zunächst nur negative Feststellung, zu der wir gelangt sind, ist bedeutungsvoll genug. Bei früherer Gelegenheit (a. a. O.) habe ich hingewiesen auf den Zusammenhang dieser Feststellung mit dem Problem der *Willensfreiheit.* Ich bin von verschiedensten Seiten belehrt worden, daß die dabei von mir formulierte Frage gar nicht *„das"* Problem

[16]) A. Wagner, Geschichte des Lamarckismus. Stuttgart 1909.

[17]) H. Winterstein, Kausalität und Vitalismus vom Standpunkte der Denkökonomie. Berlin 1928.

der Willensfreiheit ſei, und möchte deshalb jetzt etwas ausführlicher dieſen Punkt beſprechen.

Das Schlagwort „Willensfreiheit" bezeichnet nicht nur eine einzige, in ganz beſtimmter Weiſe zu formulierende Frage, ſondern vielmehr einen ganzen *Komplex* verwandter oder zuſammengehöriger Probleme. Eine Fülle verſchiedener hierher gehöriger Frageſtellungen iſt aufgeſtellt und diskutiert worden; zu allſeitig anerkannten Antworten iſt man allerdings nicht gelangt. Wenn wir von beſtimmten neuen Erkenntniſſen aus dieſes Problem wieder aufnehmen, ſo iſt keineswegs zu verlangen, daß die von uns behandelte Frageſtellung nun genau übereinſtimmt mit einer ſchon ſeit langem formulierten Frage. Selbſtverſtändlich iſt es ſo, daß der größte Teil der unter dieſem Schlagwort diskutierten Frageſtellungen von einer vertieften Erkenntnis aus nicht ſo oder ſo zu beantworten, ſondern vielmehr als *unſachgemäße* Frageſtellung zu erkennen und *abzulehnen* ſein wird; es iſt ja eine allgemeine Erſcheinung, daß in ſchwierigen Problemkomplexen nicht etwa die ſinngemäßen Frageſtellungen ſchon lange fertig formuliert ſind, bevor die Antworten gefunden werden; ſondern die ſachgemäße Frageſtellung und deren Beantwortung ſtehen in engſtem zeitlichen und logiſchem Zuſammenhang.

Nach Du Bois-Reymondſcher Vorſtellung konnte der Laplaceſche Geiſt (in ſeiner rein quantitativen, nicht qualitativen Überlegenheit gegenüber dem menſchlichen Naturforſcher) die zu erwartenden Reaktionen eines Menſchen oder Tieres auf beſtimmte äußere Einflüſſe exakt und *eindeutig vorausberechnen;* die Frage, ob dieſe Auffaſſung richtig, oder im Gegenteil durch die Theſe einer grundſätzlich akauſalen Unberechenbarkeit menſchlicher Handlungen zu erſetzen iſt, hat doch wohl für den Problemkomplex der Willensfreiheit eine nicht wegzuleugnende Bedeutung.

Der unbefangene Blick auf die Erfahrungstatſachen läßt übrigens die Vermutung entſtehen, daß tatſächlich auch eine enge poſitive Beziehung waltet zwiſchen dem teleologiſchen Vermögen der Organismen einerſeits und der akauſalen Unberechenbarkeit der organiſchen Reaktionen andererſeits. Denn in unſerer inneren Erfahrung ſpüren wir den Vorgang der freien Willensentſcheidung als ein Mittel, unter verſchiedenen möglichen Reaktionsweiſen *die zweckmäßigſte auszuwählen.* Man muß ſich daran gewöhnen, ſolche primitive, aber grundlegende Tatſachen der Empirie für bedeutungsvoller zu halten, als die Vorurteile, die ſich aus veralteten Doktrinen ergeben.

§ 4. Das Beobachtungsproblem in der lebenden Subſtanz[18])

Die neuen Erkenntniſſe, die wir betreffs des mikrophyſikaliſchen *Beobachtungsproblems* gewonnen haben, laſſen uns auch in der Biologie altbekannte Tatſachen unter ganz neuen Geſichtswinkeln ſehen. Vor allem hat Bohr (a. a. O.) einen fundamentalen Gedanken ausgeſprochen, der eine Tatſache, die uns vollkommen vertraut iſt, die man aber bislang niemals für eine theoretiſch und prinzipiell bedeutſame Tatſache zu halten eine Veranlaſſung gefunden hatte, in einem ganz neuen Licht erblicken läßt. Nämlich die einfache Tatſache, daß jedem Verſuch, die inneren Zuſtände eines Lebeweſens genauer zu unterſuchen, ſehr enge Grenzen gezogen ſind, *wenn man eine Tötung* (oder mindeſtens Schädigung) *des Lebeweſens vermeiden will.* Bohr vermutet auch hier ein *naturgeſetzliches Komplementaritätsverhältnis,* welches ein weſentliches Charakteriſtikum des Lebendigen ſein dürfte: Nur die *Leiche* eines Organismus bietet ſich beliebiger Unterſuchung dar; das Leben ſelbſt verhüllt ſich der zu eindringlichen Beobachtung, und es erliſcht, wenn es zu radikal ans Licht gezogen wird. Wir haben ja gelernt, den *Vorgang der Beobachtung* bei mikrophyſikaliſchen Objekten nicht mehr, wie in der Makrophyſik, als einen im weſentlichen nur im erkennenden Subjekt verlaufenden, das *Objekt* gar nicht berührenden Vorgang anzuſehen: wir wiſſen, daß der Prozeß der Beobachtung *einen Eingriff in das Objekt ſelbſt bedeutet.*

Gegen dieſen Bohrſchen Gedanken iſt eingewandt worden, daß mit der Zeit noch die Erfindung immer beſſerer Beobachtungsinſtrumente für die inneren Zuſtände des lebenden Organismus zu erwarten ſei: „Schon jetzt kann man am lebenden Menſchen die Herztätigkeit elektriſch kontrollieren, oder in der Hirnrinde elektriſche Funktionen nachweiſen, die je nach ihrer Art verſchieden lokaliſiert ſind oder für einzelne Krankheiten, ja für Anſtrengung der Aufmerkſamkeit charakteriſtiſche Formen annehmen (Berger, Kornmüller). Da iſt es denkbar, daß man einmal einen Apparat erfindet, ſo fein, daß er durch Induktion oder irgendeinen anderen Indikator die Ströme im Gehirn in ihrer Verteilung erkennbar macht. Auch die Qualität der Ströme (Schwingungtypus?) iſt nicht prinzipiell unerfaßbar“. (Bleuler, a. a. O.)

Dazu iſt von unſerem Standpunkt aus folgendes zu ſagen:

[18]) In dieſem Paragraphen wird der Inhalt von § 2 als bekannt vorausgeſetzt.

Zweifellos werden die Beobachtungsinſtrumente für die organiſchen Abläufe in der Zukunft noch viel feiner und erfolgreicher geſtaltet werden als heute. Es fragt ſich jedoch, ob dieſe Verfeinerung und Vervollſtändigung der Beobachtungen im Prinzip (in beliebig ferner Zukunft) beliebig weit getrieben werden kann, oder ob es auf Grund der Naturgeſetze hierfür beſtimmte *Grenzen* gibt, denen man ſich immer beſſer annähern wird, die man aber niemals überſchreiten kann. Von der heutigen biologiſchen Erfahrung *allein* ausgehend, wäre man ſchwerlich dazu gekommen, das letztere für zutreffend zu halten (oder überhaupt dieſe Alternative in Erwägung zu ziehen). Nachdem wir aber in der Phyſik — alſo in einer Wiſſenſchaft, die dank der verhältnismäßigen Einfachheit der von ihr betrachteten Gegenſtände zur vollkommenſten, *mathematiſchen Präziſion und Sicherheit* ihrer Ergebniſſe gelangen konnte — gelernt haben, daß es in der Natur derartige Grenzen der Beobachtungsmöglichkeiten gibt, werden wir doch nicht umhin können, jedenfalls die Frage der Beobachtungsmöglichkeiten innerhalb der lebenden Subſtanz ſehr viel vorſichtiger zu beurteilen und ernſtlicher zu prüfen, als wir ſonſt geneigt geweſen wären.

Es kann übrigens auch bei einer näheren Prüfung der heutigen und der vernünftigerweiſe zu erwartenden künftigen Beobachtungsmethoden für die inneren Zuſtände eines Organismus keineswegs eine Ablehnung dieſes Bohrſchen Gedankens begründet werden. Was die von Bleuler herangezogenen elektriſchen Methoden betrifft, ſo liegt auf der Hand, daß es ſich hier doch um weſentlich „makroſkopiſche" Effekte handelt, und daß — wie groß auch die künftigen Erfolge dieſer höchſtwichtigen und wunderbaren Unterſuchungen ſein mögen — es niemals möglich ſein wird, derartige Methoden bis zur Erforſchung des inneren Zuſtandes der *einzelnen Hirnrindenzellen* zu verfeinern. Wenn man, *ohne* den lebendigen Organismus zu *zerſchneiden,* die Unterſuchung ſeines inneren Zuſtandes bis zu höchſtmöglicher Vollkommenheit treiben will, ſo wird die *Durchleuchtung* immer ein unentbehrliches Hilfsmittel bleiben. Wäre die erörterte Bohrſche Theſe falſch, ſo ſollte es alſo *im Prinzip* (d. h. ohne Verletzung von phyſikaliſchen und biologiſchen *Naturgeſetzen,* wenn auch vielleicht unter Vorausſetzung einer die normale menſchliche billionenfach übertreffenden Intelligenz und techniſchen Geſchicklichkeit) möglich ſein, ohne Schädigung des Lebeweſens die Unterſuchung ſo weit zu treiben, daß bis zur meſſenden Beobachtung der einzelnen Atome vorgedrungen und die durch die *atomphyſikaliſche*

Komplementarität gesetzten Grenzen der Beobachtung erreicht würden. Stellt man sich dies näher vor (denkt man insbesondere an die Comptonschen Rückstöße $h\nu/c$, die sich bei solcher Durchstrahlung ergeben müßten), so wird man sich schwerlich der Überzeugungskraft der Bohrschen Vermutung entziehen können, daß diese Untersuchung das fragliche Lebewesen in eine Leiche verwandeln wird; daß also eine *biologische Komplementarität* der Untersuchung des Lebewesens *noch viel engere Grenzen* setzt, als bereits durch die Tatsache gesetzt sind, daß der Organismus sich aus Atomen zusammensetzt, und daß für jedes dieser Atome die Gesetze der Quantenphysik gelten.

Wo und wie diese Grenzen im einzelnen liegen, das kann natürlich nur durch eingehende künftige Forschungen ermittelt werden — wie denn überhaupt die Erforschung dieser von Bohr konzipierten biologischen Komplementarität geradezu *das* Thema bilden dürfte für eine große und fruchtbare Epoche biologisch-physiologischer Forschung. Insbesondere kann heute wohl noch nicht entschieden werden, ob die bekannten, bei der zu medizinischen Zwecken durchgeführten Durchleuchtung eintretenden Schädigungen bereits einen Hinweis auf die biologischen Beobachtungsgrenzen bilden, oder ob es sich hier nur um sekundäre, nicht prinzipielle Effekte handelt, deren weitgehender Reduktion kein naturgesetzliches Hindernis grundsätzlich entgegensteht. Meine frühere Beurteilung dieses Punktes (a. a. O.) war vielleicht nicht vorsichtig genug. (Interessante Diskussionsbemerkungen zu diesem Punkte verdanke ich Herrn Pohl in Göttingen.)

Offenbar gilt, wenn die von Bohr angenommene biologische Komplementarität tatsächlich besteht, die These von der akausalen Unvorhersehbarkeit organischer Einzelreaktionen in noch viel größerem Ausmaß, als bereits durch die Erwägungen von § 3 sichergestellt schien. Es dürfte danach auch, wie ich (a. a. O.) in meinem Versuch der Kommentierung der Bohrschen Ideen näher ausgeführt habe, kein Hindernis mehr vorhanden sein, hinsichtlich des inneren Gefühls der Willensfreiheit und der physiologischen Akausalität eine enge *Parallelität* anzunehmen.

In diesem Zusammenhang möge eine kurze Betrachtung des Problems der Willensfreiheit von der Seite der *psychologischen* Erfahrung ausgeführt werden. Eine verbreitete und geläufige Auffassung des Willensproblems argumentiert etwa folgendermaßen: Ein Mensch

von beſtimmtem Charakter wird hinſichtlich ſeiner Willensentſcheidungen durch *Motive* zwangsläufig gelenkt; bei gegebenem Charakter muß eine gegebene Situation mit Notwendigkeit ganz beſtimmte Willensentſchlüſſe bedingen. Wir müſſen uns bei der kritiſchen Prüfung dieſer Auffaſſung wieder an den oberſten Grundſatz poſitiviſtiſcher Erkenntnistheorie erinnern: es kann nichts als beſtehend anerkannt werden, was nicht irgendwie *nachweisbar* iſt. Es iſt unmöglich, zu erklären, daß eine Determinierung der menſchlichen Handlungen durch Charakter und Motive *beſteht*, wenn es nicht wenigſtens *ohne Widerſpruch gegen die Naturgeſetze denkbar* iſt, daß auf Grund genauer Beobachtung der vorhandenen Charaktereigenſchaften und Willensmotive *vorausgeſagt* werde, welche Handlungen in einem konkreten Falle zu erwarten ſind; und zwar *eindeutig und exakt* vorausgeſagt, nicht nur qualitativ und wahrſcheinlichkeitsmäßig, wie es trivialerweiſe der „Menſchenkenner" tatſächlich kann.

Die neuere Pſychologie bietet aber tatſächlich Veranlaſſung, eine ſolche Vorherbeſtimmung als durch die Geſetze der Pſychologie ſelbſt verhindert anzuſehen. Wir denken hier an die Grunderfahrungen der *Pſychoanalyſe:* ohne uns in die vielen noch umſtrittenen Fragen dieſes Forſchungsgebietes einzulaſſen, dürfen wir doch folgendes als geſicherte Tatſachen anſehen. Eine Vorausbeſtimmung der menſchlichen Willensentſcheidungen kann im allgemeinen nicht gelingen ohne Kenntnis der Zuſtände („Komplexe") im *Unbewußten* der betreffenden Perſon[19]). Eine pſychologiſche Unterſuchung und Beobachtung der Zuſtände des Unbewußten („*Bewußtmachung*") bedeutet aber einen *Eingriff* ſehr einſchneidender Art, die Zuſtände des Unbewußten werden dabei erheblich *abgeändert:* hierauf beruht ja die pſychoanalytiſche *Therapie*, welche pathogene Komplexe eben *durch Bewußtmachung zerſtört.* Wir haben hier alſo wieder eine ähnliche Situation, wie in der Quantenphyſik: es iſt nicht möglich, die Beobachtungen, welche nach determiniſtiſcher Auffaſſung nötig wären, um die Unterlagen der Vorausſage zu liefern, tatſächlich durchzuführen, ohne daß dabei eine die ganze Vorausbeſtimmung über den Haufen werfende Veränderung der beobachteten Zuſtände eintritt.

[19]) Es beſteht vielleicht mancherſeits die Meinung, daß das Vorhandenſein von „Komplexen" ſtets ein *pathologiſcher* Zuſtand ſei, und daß es möglich ſei, eine Perſon von *allen* „Komplexen" zu *befreien* — ſo daß nachher die obige Argumentierung nicht mehr anwendbar wäre. Eine ſolche Meinung ſcheint mir aber abwegig.

Freud hat die hier auftretende „*pſychologiſche Komplementarität*“ in einer Formulierung geſchildert[20]), welche in geradezu frappanter Weiſe an Bohrſche Sätze erinnert: „*Nicht nur, daß der Sinn der Symptome regelmäßig unbewußt iſt; es beſteht auch ein Verhältnis von Vertretung zwiſchen dieſer Unbewußtheit und der Exiſtenzmöglichkeit der Symptome*“.

Unabhängig von den durch die Pſychoanalyſe erſchloſſenen tieferen pſychologiſchen Vorgängen laden, wie bereits hervorgehoben (a. a. O.), ſchon bekannte Tatſachen der pſychologiſchen Alltagserfahrung zu einem Vergleich pſychologiſcher und quantenphyſikaliſcher Geſetzmäßigkeiten ein. Jedermann bekannt iſt der primitive Umſtand, daß die *pſychologiſche Selbſtbeobachtung* hinſichtlich ihrer Möglichkeiten und Leiſtungen begrenzt wird durch den Effekt, daß die diesbezügliche Einſtellung der beobachtenden Aufmerkſamkeit ſelber eine Modifikation des pſychiſchen Geſamtzuſtandes bedeutet und im allgemeinen Modifikationen auch ſpeziell an den gerade zu beobachtenden Abläufen hervorruft. Dieſer Effekt iſt offenbar wiederum ganz analog dem mikrophyſikaliſchen Effekt der Beeinfluſſung eines beobachteten Objektes durch den Beobachtungsprozeß; und die Art und Weiſe, in welcher die Quantenmechanik es verſtanden hat, unter voller Würdigung dieſes Effektes doch zu ganz klaren Begriffsbildungen und Vorſtellungen zu gelangen, dürfte auch für die künftige Entwicklung der Pſychologie, ebenſo wie der Biologie, lehrreiche Anregungen bieten. Von klaſſiſch-phyſikaliſchen Denkgewohnheiten aus müßten wir ja einen ſolchen Effekt als ein *Hindernis* der Forſchung betrachten, welches, ſoweit es nicht irgendwie *umgangen* werden kann, exakte und willkürfreie Reſultate überhaupt nicht zuſtande kommen läßt. (Nochmals ſei daran erinnert, daß die klaſſiſche Phyſik, um zu klaren, präziſen Vorſtellungen zu kommen, die Idealiſation des gegenüber dem beobachteten Objekt „*unendlich feinen Meßinſtrumentes*“ einführen muß; durch dieſe Idealiſation wird die *ſtörende Rückwirkung des Meßinſtrumentes auf das Objekt* wenigſtens für die prinzipielle Vorſtellung zu Null gemacht). Für die Quantenmechanik bedeutet jedoch dieſer Effekt *nicht* eine „Störung“, welche die Anwendbarkeit präziſer, exakter Begriffe begrenzt, und deren Ausſchaltung deshalb zu erſtreben iſt; vielmehr iſt dieſer Effekt gerade *ein Hauptbeſtandteil* der durch die

[20]) Vorleſungen über Pſychoanalyſe, Wien 1920; S. 316.

Theorie zu beſchreibenden und in exakte Geſetze zu faſſenden Naturvorgänge.

In den außerphyſikaliſchen Wiſſenſchaften ſind bislang wohl analoge Vorkommniſſe — entſprechend der klaſſiſchen Vorſtellung vom Verhältnis Objekt-Subjekt — nur als zu eliminierende oder zu umgehende unerwünſchte Störungen aufgefaßt worden. Jedenfalls legt Jenſen (a. a. O.) Wert darauf, zu erläutern, daß die pſychologiſche Selbſtbeobachtung auf gewiſſen Wegen von dieſem Effekt unabhängig gemacht werden könne. Es beſteht von unſerem Standpunkt aus keine Veranlaſſung, den intereſſanten Einzelheiten der diesbezüglichen Jenſenſchen Ausführungen zu widerſprechen; feſtgehalten werden muß nur daran, daß dieſe Grenzen der pſychologiſchen Selbſtbeobachtungsmöglichkeiten durch ſorgfältiges, methodiſches Verfahren zwar ein gewiſſes Stück zurückgeſchoben, keineswegs aber grundſätzlich beſeitigt werden können. Ein inſtruktives Beiſpiel dafür bildet der Prozeß des *Einſchlafens*, bei welchem ja die pſychologiſche Selbſtbeobachtung leicht ſoweit getrieben werden kann, daß die „hypnagogiſche" erſte Überleitung zum Traume noch einigermaßen beobachtet werden kann. Im weiteren Verlauf ſtellt ſich jedoch ein unaufhebbares Verhältnis komplementärer Ausſchließung heraus zwiſchen dem endgültigen Eintreten des Schlafes und der Fortdauer bewußter, beobachtender Denktätigkeit. Übrigens ſind von Weininger („Geſchlecht und Charakter") gewiſſe ganz bekannte, jedoch ſelten beachtete Empfindungen beſchrieben („Heniden"), für welche es charakteriſtiſch iſt, daß ſie verſchwinden, ſobald ihnen intenſivere Aufmerkſamkeit zugelenkt wird. Es iſt mir nicht bekannt, ob die ſehr bemerkenswerten Betrachtungen Weiningers zu dieſem Gegenſtand ſeitens der Fachpſychologie Beachtung gefunden haben.

Es iſt von Bohr ausgeſprochen worden, daß auch die *„philoſophiſche Frage nach der objektiven Exiſtenz der Erſcheinungen"* durch die Erkenntniſſe der Quantenphyſik in neuem Lichte erſcheint. Hier iſt wohl die *revolutionärſte* Folgerung der Quantentheorie für das wiſſenſchaftliche Denken angeſchnitten, und es wird nicht leicht ſein, die gewohnte Meinung zu erſchüttern, daß das Verhältnis Objekt-Subjekt ein längſt und endgültig geklärtes Problem darſtelle, bezüglich deſſen keine Abänderungen möglich ſeien. Der moderne Phyſiker wird freilich nach der Entwicklung der neueſten Zeit auch in dieſem Punkte nicht mehr ohne weiteres bereit ſein,

überkommene Doktrinen als etwas Unabänderliches anzusehen. Wir haben durch die Relativitätstheorie gelernt, alte Ansichten über die Beziehungen von Raum und Zeit, welche früher einfach als Formulierung schlechtweg unumstößlicher und geradezu aprioriſch-notwendiger Tatsachen erschienen, als *empiriſch begründet* und als *nur in beſchränktem Umfang* (angenähert) *gültig* aufzufaſſen: experimentelle Erfahrungen, die weit hinausführen über den Bezirk vorwiſſenſchaftlicher Alltagserfahrungen und wiſſenſchaftlicher Beobachtung an Körpern von „kleiner" Geſchwindigkeit, führen auch über die Gültigkeitsgrenzen der älteren Raumzeitvorſtellungen hinaus. Die klaſſiſche Kauſalitätsvorſtellung iſt ebenfalls bis in unſere Zeit als aprioriſch und unabänderlich ausgegeben worden; dennoch mußten die Phyſiker auch in dieſer Frage die klaſſiſchen Begriffe den Erfahrungstatſachen zum Opfer bringen. Der Phyſiker wird danach nicht grundſätzlich abgeneigt ſein, auch in der überkommenen Auffaſſung des Verhältniſſes Objekt-Subjekt eine Begriffsbildung zu ſehen, *welche einem beſtimmten Stande der wiſſenſchaftlichen Erfahrung entſpricht,* und welche abzuändern und zu vertiefen iſt, *wenn weſentlich neue experimentelle Erfahrungen es verlangen.* Die quantenphyſikaliſche Komplementarität, die eigentümliche Verſchmelzung der atomphyſikaliſchen Beobachtungsprozeſſe mit verändernden Eingriffen des Beobachters in den beobachteten Zuſtand bedeuten ja aber tatſächlich, daß hier Verhältniſſe vorliegen, die den Rahmen der klaſſiſchen Objekt-Subjekt-Vorſtellung ſchlechtweg ſprengen.

Bei früherer Gelegenheit (a. a. O.) iſt die oben beſprochene Analogie des mikrophyſikaliſchen Beobachtungsproblems mit dem Problem der pſychologiſchen Selbſtbeobachtung zum Anlaß genommen worden, den revolutionären Verdacht auszuſprechen, daß zwiſchen „Innenwelt" und „Außenwelt" nur ein *gradueller* Unterſchied beſtehe, der alſo das Vorhandenſein von *Zwiſchenſtufen* möglich machen würde. Ich hoffe, dieſem Gegenſtande eine beſondere Unterſuchung widmen zu können[21]), und muß mich an dieſer Stelle noch einmal mit diesbezüglichen Andeutungen begnügen; dieſe ſollen jedoch hier nicht ganz unterdrückt werden, weil gerade dieſer Punkt lebhafte Einwendungen der Kritik hervorgerufen hat.

Bleuler (a. a. O.) formuliert die übliche Auffaſſung ſehr markant: „Von der Außenwelt liefern uns die Sinne Symbole. Daß

[21]) Iſt inzwiſchen erſchienen in den „Naturwiſſenſchaften" 22, 485, 1934. (Nachſchrift bei der Korrektur.)

dieſelbe wirklich „objektiv" exiſtiert, iſt nicht zu beweiſen; wir können aber nicht anders, als es annehmen; die Praxis zwingt uns dazu, und theoretiſch würde uns eine andere Anſchauung in die Abſurdität des Solipſismus führen". Jenſen (a. a. O.) beruft ſich bei ähnlichen Formulierungen ausdrücklich auf die „Poſitiviſten" Mach, Avenarius, Petzoldt. Dieſe, gängige, Auffaſſung ſetzt einen *abſoluten* Unterſchied zwiſchen ſolchen Erfahrungen und Erlebniſſen, welche „Symbole der Außenwelt" liefern, und ſolchen, die das *nicht* tun; und der oben ausgeſprochene Verdacht, daß ſtatt deſſen nur ein gradueller Unterſchied zwiſchen Außenwelt und Innenwelt beſtehe, wird nur dann aufrechterhalten werden können, wenn man der oben mit Bleulers Worten gekennzeichneten Alternative entgehen kann. Tatſächlich ſcheint das leicht, wenn man ſich an den ſchon berührten Grundſatz poſitiviſtiſcher Erkenntnistheorie erinnert. (Die abweichende „offizielle" Lehre der „poſitiviſtiſchen Schule" halte ich für durchaus unfolgerichtig). Wenn die objektive Exiſtenz der von uns „angenommenen" Außenwelt *grundſätzlich nicht bewieſen (auch nicht widerlegt) werden kann,* dann iſt nach poſitiviſtiſchem Grundſatz *ſowohl die Bejahung, als auch die Verneinung* („Solipſismus") dieſer Exiſtenzbehauptung weder falſch noch richtig, ſondern *ſinnlos.*

Damit verſchwinden die primitiven Hinderungen, die ſich der Theſe von der nur graduellen Verſchiedenheit von Innenwelt und Außenwelt entgegenzuſtellen ſcheinen. In der ſchon angekündigten beſonderen Darſtellung hoffe ich dieſe Theſe ausführlicher zu erläutern.

Natürlich ſind dieſe radikalſten Gedanken, die wir hier zum Schluß angedeutet haben, durchaus nicht unbedingt *notwendige Folgerungen* der Quantenmechanik; man kann alſo nicht etwa Einwände gegen dieſe Gedanken auch für Einwände gegen die Quantenmechanik halten. Immerhin jedoch ſcheinen mir dieſe Gedanken durch die Quantenphyſik — alſo durch eine wiſſenſchaftliche Diſziplin, deren Ergebniſſe man verſtehen oder nicht verſtehen, keineswegs aber *ableugnen* kann — ausgeſprochenermaßen *nahegelegt;* und *auf jeden Fall* ſind die *Probleme,* auf welche dieſe Gedanken ſich beziehen, heute von Grund aus neu aufgerollt: die bisher für befriedigend und endgültig gehaltenen Antworten können nicht mehr ohne erneute, tief eindringende Prüfung als zuverläſſig angeſehen werden.

Freilich wäre es kaum nötig geweſen, unſeren im Gebiete der

Atomphyſik begonnenen Streifzug bis in dieſe fernſten Fragen auszudehnen, um die Überzeugung zu rechtfertigen, daß die neue Phyſik *neue naturwiſſenſchaftliche Denkformen* geſchaffen hat, deren aufklärende Kraft weit hinausreicht über die Grenzen der Phyſik, und gewiſſe fundamentale Probleme und Tatbeſtände in weit auseinandergehenden Zweigen der Naturwiſſenſchaft zum erſten Male als *verwandt* und *verknüpft erkennen* läßt.