

DIE NATURWISSENSCHAFTEN

23. Jahrgang

6. Dezember 1935

Heft 49

Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik.

Von E. SCHRÖDINGER, Oxford.

(Fortsetzung¹.)

Inhaltsübersicht.

- § 6. Der bewußte Wechsel des erkenntnistheoretischen Standpunktes.
- § 7. Die ψ -Funktion als Katalog der Erwartung.
- § 8. Theorie des Messens, erster Teil.
- § 9. Die ψ -Funktion als Beschreibung des Zustandes.
- § 10. Theorie des Messens, zweiter Teil.

§ 6. Der bewußte Wechsel des erkenntnistheoretischen Standpunktes.

Im vierten Abschnitt hatten wir gesehen, daß es nicht möglich ist, die Modelle glatt zu übernehmen und den jeweils unbekanntem oder nicht genau bekannten Variablen doch auch bestimmte Werte zuzuschreiben, die wir bloß nicht kennen. Im § 5 sahen wir, daß die Unbestimmtheit auch nicht eine wirkliche Verwaschenheit ist, denn es gibt jedenfalls Fälle, wo eine leicht ausführbare Beobachtung die fehlende Kenntnis verschafft. Was bleibt nun übrig? Aus diesem sehr schwierigen Dilemma hilft sich oder uns die herrschende Lehrmeinung durch Zuflucht zur Erkenntnistheorie. Man bedeutet uns, daß kein Unterschied zu machen sei zwischen dem wirklichen Zustand des Naturobjekts und dem, was ich darüber weiß, oder besser vielleicht dem, was ich darüber wissen kann, wenn ich mir Mühe gebe. *Wirklich* — so sagt man — sind ja eigentlich nur Wahrnehmung, Beobachtung, Messung. Habe ich mir durch sie in einem gegebenen Augenblick die bestmögliche Kenntnis vom Zustande des physikalischen Objekts verschafft, die naturgesetzlich erlangbar ist, so darf ich jede darüber hinausgehende Frage nach dem „wirklichen Zustand“ als *gegenstandslos* abweisen, sofern ich überzeugt bin, daß keine weitere Beobachtung meine Kenntnis davon erweitern kann — wenigstens nicht, ohne sie in anderer Hinsicht um ebensoviel zu schmälern (nämlich durch Veränderung des Zustandes, s. w. u.).

Das wirft nun einiges Licht auf die Genesis der Behauptung, die ich am Ende von § 2 als etwas sehr weitgehend bezeichnete: daß alle Modellgrößen prinzipiell meßbar sind. Man kann dieses Glaubenssatzes kaum entraten, wenn man sich gezwungen sieht, den eben erwähnten philosophischen Grundsatz, dem als obersten Schirmherrn aller Empirie kein Verständiger die Achtung versagen wird, als Diktator zu Hilfe zu rufen in den Nöten physikalischer Methodik.

Die Wirklichkeit widerstrebt der gedanklichen Nachbildung durch ein Modell. Man läßt darum

den naiven Realismus fahren und stützt sich direkt auf die unbezweifelbare These, daß *wirklich* (für den Physiker) letzten Endes nur die Beobachtung, die Messung ist. Dann hat hinfort all unser physikalisches Denken als einzige Basis und als einzigen Gegenstand die Ergebnisse prinzipiell ausführbarer Messungen, denn auf eine andere Art von Wirklichkeit oder auf ein Modell soll unser Denken sich ja jetzt ausdrücklich *nicht* mehr beziehen. Alle Zahlen, die in unseren physikalischen Berechnungen vorkommen, müssen für Maßzahlen erklärt werden. Da wir aber nicht frisch auf die Welt kommen und unsere Wissenschaft neu aufzubauen beginnen, sondern einen ganz bestimmten Rechenapparat in Gebrauch haben, von dem wir uns seit den großen Erfolgen der Q.M. weniger denn je trennen möchten, sehen wir uns gezwungen, vom Schreibtisch aus zu diktieren, welche Messungen prinzipiell möglich sind, das heißt möglich sein müssen, um unser Rechenschema ausreichend zu stützen. Dieses erlaubt einen scharfen Wert für jede Modellvariable einzeln (ja sogar für einen „halben Satz“), also muß jede einzeln beliebig genau meßbar sein. Wir dürfen uns nicht mit weniger begnügen, denn wir haben unsere naivrealistische Unschuld verloren. Wir haben nichts als unser Rechenschema, um anzugeben, wo die Natur die Ignorabimus-Grenze zieht, d. h. was eine *bestmögliche* Kenntnis vom Objekt ist. Und könnten wir das nicht, dann würde unsere Meßwirklichkeit doch etwa sehr vom Fleiß oder der Faulheit des Experimentators abhängen, wie viel Mühe er daran wendet, sich zu informieren. Wir müssen ihm also schon sagen, wie weit er kommen könnte, wenn er nur geschickt genug wäre. Sonst wäre ernstlich zu befürchten, daß es dort, wo wir das Weiterfragen verbieten, wohl doch noch einiges Wissenswerte zu fragen gibt.

§ 7. Die ψ -Funktion als Katalog der Erwartung.

In der Darlegung der offiziellen Lehre fortfahrend, wenden wir uns der schon oben (§ 5) erwähnten ψ -Funktion zu. Sie ist jetzt das Instrument zur Voraussage der Wahrscheinlichkeit von Maßzahlen. In ihr ist die jeweils erreichte Summe theoretisch begründeter Zukunftserwartung verkörpert, gleichsam wie in einem Katalog niedergelegt. Sie ist die Beziehungs- und Bedingtheitsbrücke zwischen Messungen und Messungen, wie es in der klassischen Theorie das Modell und sein jeweiliger Zustand war. Mit diesen hat die ψ -Funktion auch sonst viel gemein. Sie wird, im Prinzip, eindeutig festgelegt durch eine endliche Zahl

¹ Vgl. Heft 48, S. 807.

passend ausgewählter Messungen am Objekt, halb soviele als in der klassischen Theorie nötig waren. So wird der Katalog der Erwartungen erstmalig angelegt. Von da verändert er sich mit der Zeit, genau wie der Zustand des Modells in der klassischen Theorie, zwangsläufig und eindeutig („kausal“) — das Abrollen der ψ -Funktion wird beherrscht durch eine partielle Differentialgleichung (erster Ordnung in der Zeit und aufgelöst nach $\partial\psi/\partial t$). Das entspricht der ungestörten Bewegung des Modells in der klassischen Theorie. Aber das geht nur so lange, bis man wieder irgendeine Messung vornimmt. Bei jeder Messung ist man genötigt, der ψ -Funktion (= dem Voraussagenkatalog) eine eigenartige, etwas plötzliche Veränderung zuzuschreiben, die von der gefundenen Maßzahl abhängt und sich darum nicht vorhersehen läßt; woraus allein schon deutlich ist, daß diese zweite Art von Veränderung der ψ -Funktion mit ihrem regelmäßigen Abrollen zwischen zwei Messungen nicht das mindeste zu tun hat. Die abrupte Veränderung durch die Messung hängt eng mit den im § 5 besprochenen Dingen zusammen und wird uns noch eingehend beschäftigen, sie ist der interessanteste Punkt der ganzen Theorie. Es ist genau der Punkt, der den Bruch mit dem naiven Realismus verlangt. Aus diesem Grund kann man die ψ -Funktion nicht direkt an die Stelle des Modells oder des Readings setzen. Und zwar nicht etwa weil man einem Realding oder einem Modell nicht abrupte unvorhergesehene Änderungen zumuten dürfte, sondern weil vom realistischen Standpunkt die Beobachtung ein Naturvorgang ist wie jeder andere und nicht per se eine Unterbrechung des regelmäßigen Naturlaufs hervorrufen darf.

§ 8. Theorie des Messens, erster Teil.

Die Ablehnung des Realismus hat logische Konsequenzen. Eine Variable hat im allgemeinen keinen bestimmten Wert, bevor ich ihn messe: dann heißt, ihn messen, nicht, den Wert ermitteln, den sie hat. Was heißt es aber dann? Es muß doch ein Kriterium dafür geben, ob eine Messung richtig oder falsch, eine Methode gut oder schlecht, genau oder ungenau ist — ob sie überhaupt den Namen Meßverfahren verdient. Jedes Herumspielen mit einem Zeigerinstrument in der Nähe eines anderen Körpers, wobei man dann irgendeinmal eine Ablesung macht, kann doch nicht eine Messung an diesem Körper genannt werden. Nun, es ist ziemlich klar; wenn nicht die Wirklichkeit den Meßwert, so muß wenigstens der Meßwert die Wirklichkeit bestimmen, er muß nach der Messung wirklich vorhanden sein in dem Sinne, der allein noch anerkannt wird. Das heißt, das verlangte Kriterium kann bloß dieses sein: bei Wiederholung der Messung muß wieder dasselbe herauskommen. Durch öftere Wiederholung kann ich die Genauigkeit des Verfahrens prüfen und zeigen, daß ich nicht bloß spiele. Es ist sympathisch, daß sich diese Anweisung genau mit dem Vorgehen des Experimentators deckt, dem der „wahre Wert“ ja auch

nicht von vornherein bekannt ist. Wir formulieren das Wesentliche folgendermaßen:

Die planmäßig herbeigeführte Wechselwirkung zweier Systeme (Meßobjekt und Meßinstrument) heißt eine Messung an dem ersten System, wenn sich ein direkt sinnentfälliges variables Merkmal des zweiten (Zeigerstellung) bei sofortiger Wiederholung des Vorganges (an demselben Meßobjekt, das inzwischen keinen anderweitigen Einflüssen ausgesetzt worden sein darf) stets innerhalb gewisser Fehlergrenzen reproduziert.

Dieser Erklärung wird noch manches hinzuzufügen sein, sie ist keine tadellose Definition. Empirie ist komplizierter als Mathematik und läßt sich nicht so leicht in glatte Sätze einfangen.

Vor der ersten Messung kann für sie eine beliebige quantentheoretische Voraussage bestanden haben. Nach ihr lautet die Voraussage jedenfalls: innerhalb der Fehlergrenzen wieder derselbe Wert. Der Voraussagenkatalog (= die ψ -Funktion) wird also durch die Messung verändert in bezug auf die Variable, die wir messen. Wenn das Meßverfahren schon von früher her als verläßlich bekannt ist, dann reduziert gleich die erste Messung die theoretische Erwartung innerhalb der Fehlergrenzen auf den gefundenen Wert selbst, welche Erwartung auch immer vorher bestanden haben mag. Das ist die typische abrupte Veränderung der ψ -Funktion bei der Messung, wovon oben die Rede war. Aber nicht nur für die gemessene Variable selbst ändert sich im allgemeinen der Erwartungskatalog in unvorhergesehener Weise, sondern auch für andere, insbesondere für ihre „kanonisch konjugierte“. Wenn etwa vorher eine ziemlich scharfe Vorhersage für den Impuls eines Teilchens vorlag und man mißt jetzt seinen Ort genauer als damit, nach Satz A von § 2, verträglich ist, so muß das die Impulsvorhersage modifizieren. Der quantenmechanische Rechenapparat besorgt das übrigens ganz von selbst: es gibt gar keine ψ -Funktion, die, wenn man vereinbarungsgemäß die Erwartungen an ihr abliest, dem Satz A widersprechen würde.

Da sich der Erwartungskatalog bei der Messung radikal verändert, ist das Objekt dann nicht mehr geeignet, um die statistischen Voraussagen, die vorher gemacht waren, in ihrer ganzen Ausdehnung zu prüfen; am allerwenigsten für die gemessene Variable selbst, denn für die wird ja jetzt immer wieder (nahezu) derselbe Wert kommen. Das ist der Grund für die Vorschrift, die schon in § 2 gegeben wurde: man kann die Wahrscheinlichkeitsvorhersage zwar schon vollinhaltlich prüfen, aber man muß dazu den ganzen Versuch ab ovo wiederholen. Man muß das Meßobjekt (oder ein ihm gleiches) wieder genau so vorbehandeln, wie das erstmal, damit wieder derselbe Erwartungskatalog (= ψ -Funktion) gelte wie vor der ersten Messung. Dann „wiederholt“ man sie. (Dieses Wiederholen bedeutet also jetzt ganz etwas anderes als früher!). Alles das muß man nicht zweimal, sondern sehr oft tun. Dann wird sich die vorausgesagte Statistik einstellen — das ist die Meinung.

Man beachte den Unterschied zwischen den Fehlergrenzen und der Fehlerstatistik *der Messung* einerseits und der theoretisch vorausgesagten Statistik andererseits. Sie haben nichts miteinander zu schaffen. Sie stellen sich ein bei den zwei ganz verschiedenen Arten von *Wiederholung*, von denen soeben die Rede war.

Hier ergibt sich die Gelegenheit, die oben versuchte Umgrenzung des *Messens* noch etwas zu vertiefen. Es gibt Meßinstrumente, die in der Stellung stehen bleiben, in der die Messung sie gelassen. Auch könnte der Zeiger durch einen Unfall stecken bleiben. Man würde dann immer wieder genau dieselbe Ablesung machen, und nach unserer Anweisung wäre das eine ganz besonders genaue Messung. Das ist es auch, bloß nicht am Objekt, sondern am Instrument selbst! In der Tat fehlt in unserer Anweisung noch ein wichtiger Punkt, der aber nicht gut vorher gegeben werden konnte, nämlich was eigentlich den Unterschied ausmacht zwischen dem *Objekt* und dem *Instrument* (daß an dem letzteren die Ablesung gemacht wird, ist mehr eine Äußerlichkeit). Wir sahen soeben, das Instrument muß unter Umständen, wenn nötig, wieder in seinen neutralen Anfangszustand zurückversetzt werden, bevor man eine Kontrollmessung macht. Dem Experimentator ist das wohlbekannt. Theoretisch erfaßt man die Sache am besten, indem man vorschreibt, daß grundsätzlich das Meßinstrument vor jeder Messung der gleichen Vorbehandlung zu unterwerfen ist, so daß *für es* jedesmal derselbe Erwartungskatalog (= ψ -Funktion) gilt, wenn es an das Objekt herangebracht wird. Am Objekt dagegen ist geradezu jeder Eingriff verboten, wenn eine *Kontrollmessung* gemacht werden soll, eine „Wiederholung erster Art“ (die zur Fehlerstatistik führt). Das ist der charakteristische Unterschied zwischen Objekt und Instrument. Für eine „Wiederholung zweiter Art“ (welche zur Prüfung der Quantenvorhersage dient) verschwindet er. Da ist der Unterschied zwischen den beiden auch wirklich sehr unbedeutend.

Wir entnehmen daraus noch, daß man bei einer zweiten Messung auch ein anderes gleichgebautes und gleichvorbereitetes Instrument verwenden darf, es muß nicht notwendig *dasselbe* sein; man tut das ja auch zuweilen, zur Kontrolle des ersten. Ja es kann vorkommen, daß zwei ganz verschieden gebaute Instrumente zueinander in der Beziehung stehen, daß, wenn man mit ihnen nacheinander mißt (Wiederholung erster Art!) ihre beiden Anzeigen einander ein-eindeutig zugeordnet sind. Sie messen dann am Objekt wesentlich dieselbe Variable — d. h. dieselbe bei passender Beschriftung der Skalen.

§ 9. Die ψ -Funktion als Beschreibung des Zustandes.

Die Ablehnung des Realismus legt auch Verpflichtungen auf. Vom Standpunkt des klassischen Modells ist der jeweilige Aussageinhalt der ψ -Funktion sehr unvollständig, er umfaßt nur etwa

50% einer vollständigen Beschreibung. Vom neuen Standpunkt aus muß er vollständig sein aus Gründen, die schon am Ende von § 6 gestreift wurden. Es muß unmöglich sein, ihm neue richtige Aussagen hinzuzufügen, ohne ihn sonst zu verändern; sonst hat man nicht das Recht, alle Fragen, die über ihn hinausgehen, als gegenstandslos zu bezeichnen.

Daraus folgt, daß zwei verschiedene Kataloge, die für dasselbe System unter verschiedenen Umständen oder zu verschiedenen Zeiten gelten, sich wohl teilweise überdecken können, aber nie so, daß der eine ganz in dem anderen enthalten ist. Denn sonst wäre er einer Ergänzung durch weitere richtige Aussagen fähig, nämlich durch diejenigen, um die der andere ihn übertrifft. — Die mathematische Struktur der Theorie genügt dieser Forderung automatisch. Es gibt keine ψ -Funktion, welche genau dieselben Aussagen wiedergibt wie eine andere und noch einige mehr.

Daher müssen, wenn die ψ -Funktion eines Systems sich verändert, sei es von selbst, sei es durch Messungen, in der neuen Funktion stets auch Aussagen fehlen, die in der früheren enthalten waren. Im Katalog können nicht bloß Neueintragungen, es müssen auch Streichungen stattgefunden haben. Nun können Kenntnisse wohl *erworben*, aber nicht *eingebüßt* werden. Die Streichungen heißen also, daß die vorhin richtigen Aussagen jetzt falsch geworden sind. Eine richtige Aussage kann bloß falsch werden, wenn sich der *Gegenstand* verändert, auf den sie sich bezieht. Ich halte es für einwandfrei, diese Schlußfolgerung so auszudrücken:

Satz 1: Wenn verschiedene ψ -Funktionen vorliegen, befindet sich das System in verschiedenen Zuständen.

Wenn man bloß von Systemen spricht, für die überhaupt eine ψ -Funktion vorliegt, so lautet die Umkehrung dieses Satzes:

Satz 2: Bei gleicher ψ -Funktion befindet sich das System im gleichen Zustand.

Diese Umkehrung folgt nicht aus Satz 1, sondern ohne Verwendung desselben direkt aus der Vollständigkeit oder Maximalität. Wer bei gleichem Erwartungskatalog noch eine Verschiedenheit für möglich hält, würde zugeben, daß jener nicht über alle berechtigten Fragen Auskunft gibt. — Der Sprachgebrauch fast aller Autoren heißt obige zwei Sätze gut. Sie konstruieren natürlich eine Art neuer Realität, ich glaube, auf völlig legitime Art. Sie sind übrigens nicht trivial tautologisch, nicht bloße Worterklärungen für „Zustand“. Ohne die Voraussetzung der Maximalität des Erwartungskataloges könnte die Veränderung der ψ -Funktion durch bloßes Einholen neuer Informationen bewirkt sein.

Wir müssen sogar noch einem Einwand gegen die Ableitung des Satzes 1 begegnen. Man könnte sagen, jede einzelne von den Aussagen oder Kenntnissen, um die es sich da handelt, ist doch eine Wahrscheinlichkeitsaussage, der die Kategorie

richtig oder *falsch* gar nicht in bezug auf den Einzelfall zukommt, sondern in bezug auf ein Kollektiv, das zustande kommt, indem man das System tausendmal in derselben Weise präpariert (um alsdann dieselbe Messung folgen zu lassen; vgl. § 8). Das stimmt, aber wir müssen ja alle Mitglieder dieses Kollektivs als identisch gelagert erklären, weil für jedes dieselbe ψ -Funktion, derselbe Auslagenkatalog gilt und wir nicht Unterschiede zugeben dürfen, die im Katalog nicht zum Ausdruck kommen (vgl. die Begründung des Satzes 2). Das Kollektiv besteht also aus identischen Einzelfällen. Wenn eine Aussage für *es* falsch wird, muß auch der Einzelfall sich geändert haben, sonst wäre auch das Kollektiv wieder das gleiche.

§ 10. Theorie des Messens, zweiter Teil.

Nun war vorhin gesagt (§ 7) und erläutert (§ 8) worden, daß jede *Messung* das Gesetz, das die stetige zeitliche Veränderung der ψ -Funktion sonst beherrscht, suspendiert und an ihr eine ganz andere Veränderung hervorbringt, die von keinem Gesetz beherrscht, sondern vom Resultat der Messung diktiert wird. Während einer Messung können aber nicht andere Naturgesetze gelten als sonst, denn sie ist, objektiv betrachtet, ein Naturvorgang wie jeder andere, sie kann den regelmäßigen Ablauf der Natur nicht unterbrechen. Da sie den der ψ -Funktion unterbricht, kann die letztere — so hatten wir in § 7 gesagt — *nicht* als versuchsweises Abbild einer objektiven Wirklichkeit gelten wie das klassische Modell. Aber im letzten Abschnitt hat sich nun doch so etwas herauskristallisiert.

Ich versuche nochmals, schlagwortartig pointiert, zu kontrastieren: 1. Das Springen des Erwartungskataloges bei der Messung ist *unvermeidlich*, denn wenn das Messen irgendeinen Sinn behalten soll, so *muß* nach einer guten Messung *der Meßwert* gelten. 2. Die sprunghafte Änderung wird sicher *nicht* von dem sonst geltenden zwangläufigen Gesetz beherrscht, denn sie hängt vom Meßwert ab, der unvorhergehen ist. 3. Die Änderung schließt (wegen der „Maximalität“) bestimmt auch *Verlust* an Kenntnis ein, Kenntnis ist unverlierbar, also *muß* der *Gegenstand* sich verändern — *auch* bei den sprunghaften Änderungen und bei ihnen *auch* in unvorhergesehener Weise, *anders* als sonst.

Wie reimt sich das? Die Dinge liegen nicht ganz einfach. Es ist der schwierigste und interessanteste Punkt der Theorie. Wir müssen offenbar versuchen, die Wechselwirkung zwischen Meßobjekt und Meßinstrument objektiv zu erfassen. Dazu müssen wir einige sehr abstrakte Überlegungen vorausschicken.

Die Sache ist die. Wenn man für zwei vollkommen getrennte Körper, oder besser gesagt, für jeden von ihnen einzeln je einen vollständigen Erwartungskatalog — eine maximale Summe von Kenntnissen — eine ψ -Funktion — besitzt, so besitzt man sie selbstverständlich auch für die beiden

Körper zusammen, d. h. wenn man sich denkt, daß nicht jeder von ihnen einzeln, sondern beide zusammen den Gegenstand unseres Interesses, unserer Fragen an die Zukunft bilden¹.

Aber das Umgekehrte ist nicht wahr. *Maximale Kenntnis von einem Gesamtsystem schließt nicht notwendig maximale Kenntnis aller seiner Teile ein, auch dann nicht, wenn dieselben völlig voneinander abgetrennt sind und einander zur Zeit gar nicht beeinflussen.* Es kann nämlich sein, daß ein Teil dessen, was man weiß, sich auf Beziehungen oder Bedingtheiten zwischen den zwei Teilsystemen bezieht (wir wollen uns auf zwei beschränken), folgendermaßen: wenn eine bestimmte Messung am ersten System *dieses* Ergebnis hat, so gilt für eine bestimmte Messung am zweiten diese und diese Erwartungsstatistik; hat aber die betreffende Messung am ersten System *jenes* Ergebnis, so gilt für die am zweiten eine gewisse andere Erwartung; tritt am ersten ein *drittes* Ergebnis auf, so gilt wieder eine andere Erwartung am zweiten; und so weiter, in der Art einer vollständigen Disjunktion aller Maßzahlen, welche die eine gerade ins Auge gefaßte Messung am ersten System überhaupt liefern kann. Solchermaßen kann irgendein Meßprozeß oder, was dasselbe ist, irgendeine Variable des zweiten Systems an den noch nicht bekannten Wert irgendeiner Variablen des ersten geknüpft sein, und natürlich auch umgekehrt. Wenn das der Fall ist, wenn solche Konditionalsätze im Gesamtkatalog stehen, *dann kann er bezüglich der Einzelsysteme gar nicht maximal sein.* Denn der Inhalt von zwei maximalen Einzelkatalogen würde für sich schon ausreichen zu einem maximalen Gesamtkatalog, es könnten nicht noch die Konditionalsätze hinzutreten.

Diese bedingten Vorhersagen sind übrigens nicht etwas, das hier plötzlich neu hereingeschnitten kommt. Es gibt sie in jedem Erwartungskatalog. Wenn man die ψ -Funktion kennt und eine bestimmte Messung macht und die hat ein bestimmtes Ergebnis, so kennt man wieder die ψ -Funktion, voilà tout. Bloß im vorliegenden Fall, weil das Gesamtsystem aus zwei völlig getrennten Teilen bestehen soll, hebt sich die Sache als etwas Besonderes ab. Denn dadurch bekommt es einen Sinn, zu unterscheiden zwischen Messungen an dem einen und Messungen an dem anderen Teilsystem. Das verschafft jedem von ihnen die volle Anwartschaft auf einen privaten Maximalkatalog; andererseits bleibt es möglich, daß ein Teil des erlangbaren Gesamtwissens auf Konditionalsätze, die zwischen den Teilsystemen spielen, sozusagen verschwendet ist und so die privaten Anwartschaften unbefriedigt läßt — obwohl der Gesamtkatalog maximal ist, das heißt obwohl die ψ -Funktion des Gesamtsystems bekannt ist.

¹ Selbstverständlich. Es können uns nicht etwa Aussagen über die Beziehung der beiden zueinander fehlen. Denn das wäre, mindestens für den einen der beiden, etwas, das zu seiner ψ -Funktion hinzutritt. Und das kann es nicht geben.

Halten wir einen Augenblick inne. Diese Feststellung in ihrer Abstraktheit sagt eigentlich schon alles: Bestmögliches Wissen um ein Ganzes schließt nicht notwendig das gleiche für seine Teile ein. Übersetzen wir das in die Sprechweise von § 9: Das Ganze ist in einem bestimmten Zustand, die Teile für sich genommen nicht.

— Wieso? In irgendeinem Zustand muß ein System doch sein.

= Nein. Zustand ist ψ -Funktion, ist maximale Kenntnissumme. Die muß ich mir ja nicht verschafft haben, ich kann ja faul gewesen sein. Dann ist das System in keinem Zustand.

— Schön, dann ist aber auch das agnostische Frageverbot noch nicht in Kraft und ich darf mir in unserem Falle denken: in irgendeinem Zustand (= ψ -Funktion) wird das Teilsystem schon sein, ich kenne ihn bloß nicht.

= Halt. Leider nein. Es gibt kein „ich kenne bloß nicht“. Denn für das Gesamtsystem liegt maximale Kenntnis vor. —

Die Insuffizienz der ψ -Funktion als Modellersatz beruht ausschließlich darauf, daß man sie nicht immer hat. Hat man sie, so darf sie gut und gern als Beschreibung des Zustands gelten. Aber man hat sie zuweilen nicht, in Fällen, wo man es billig erwarten dürfte. Und dann darf man nicht postulieren, daß sie „in Wirklichkeit schon eine bestimmte sei, man kenne sie bloß nicht“; der einmal gewählte Standpunkt verbietet das. „Sie“ ist nämlich eine Summe von Kenntnissen und Kenntnisse, die niemand kennt, sind keine. —

Wir fahren fort. Daß ein Teil des Wissens in Form disjunktiver Bedingungssätze *zwischen* den zwei Systemen schwebt, kann gewiß nicht vorkommen, wenn wir die beiden von entgegengesetzten Enden der Welt heranschaffen und ohne Wechselwirkung juxtaponieren. Denn dann „wissen“ die zwei ja voneinander nichts. Eine Messung an dem einen kann unmöglich einen Anhaltspunkt dafür geben, was von dem anderen zu erwarten steht. Besteht eine „Verschränkung der Vorausagen“, so kann sie offenbar nur darauf zurückgehen, daß die zwei Körper früher einmal im eigentlichen Sinn *ein* System gebildet, das heißt in Wechselwirkung gestanden, und *Spuren* aneinander hinterlassen haben. Wenn zwei getrennte Körper, die einzeln maximal bekannt sind, in eine Situation kommen, in der sie aufeinander einwirken, und sich wieder trennen, dann kommt regelmäßig das zustande, was ich eben *Verschränkung* unseres Wissens um die beiden Körper nannte. Der gemeinsame Erwartungskatalog besteht anfangs aus einer logischen Summe der Einzelkataloge; während des Vorgangs entwickelt er sich zwangläufig nach bekanntem Gesetz (von Messung ist ja gar nicht die Rede). Das Wissen bleibt maximal, aber es hat sich zum Schluß, wenn die Körper sich wieder getrennt haben, nicht wieder aufgespalten in eine logische Summe von Wissen um die Einzelkörper. Was *davon* noch erhalten ist, kann, eventuell sehr stark, unter-

maximal geworden sein. — Man beachte den großen Unterschied gegenüber der klassischen Modelltheorie, wo natürlich bei bekannten Anfangszuständen und bekannter Einwirkung die Endzustände einzeln genau bekannt wären.

Der im § 8 beschriebene Meßprozeß fällt nun genau unter dieses allgemeine Schema, wenn wir es anwenden auf das Gesamtsystem Meßobjekt + Meßinstrument. Indem wir so ein objektives Bild dieses Vorganges, wie von irgendeinem anderen, konstruieren, dürfen wir hoffen, das seltsame Springen der ψ -Funktion aufzuklären, wenn schon nicht zu beseitigen. Also der eine Körper ist jetzt das Meßobjekt, der andere das Instrument. Um jeden Eingriff von außen zu vermeiden, richten wir es so ein, daß das Instrument mittels eines eingebauten Uhrwerks automatisch an das Objekt herankriecht und ebenso wieder fort-kriecht. Die Ablesung selbst verschieben wir, weil wir doch zunächst untersuchen wollen, was „objektiv“ geschieht; aber wir lassen das Ergebnis zu späterer Verwendung automatisch im Instrument sich aufzeichnen, wie das ja heute oft gemacht wird.

Wie steht es jetzt, nach automatisch vollzogener Messung? Wir besitzen nach wie vor einen maximalen Erwartungskatalog für das Gesamtsystem. Der registrierte Meßwert steht natürlich nicht darin. Mit Bezug auf das Instrument ist der Katalog also sehr unvollständig, er sagt uns nicht einmal, wo die Schreibfeder ihre Spur hinterlassen hat. (Man erinnere sich der vergifteten Katze!) Das macht, unser Wissen hat sich in Konditionalsätze sublimiert: *wenn* die Marke bei Teilstrich 1 ist, *dann* gilt für das Meßobjekt dies und das, *wenn* sie bei 2 ist, dann dies und jenes, wenn sie bei 3 ist, dann ein drittes usw. Hat nun die ψ -Funktion des Meßobjektes einen Sprung gemacht? Hat sie sich nach dem zwangläufigen Gesetz (nach der partiellen Differentialgleichung) weiterentwickelt? Keines von beiden. Sie ist nicht mehr. Sie hat sich, nach dem zwangläufigen Gesetz für die *Gesamt- ψ* -Funktion, mit der des Meßinstruments verheddert. *Der Erwartungskatalog des Objekts hat sich in eine konditionale Disjunktion von Erwartungskatalogen aufgespalten* wie ein Baedeker, den man kunstgerecht zerlegt. Bei jeder Sektion steht außerdem noch die Wahrscheinlichkeit, daß sie zutrifft — abgeschrieben aus dem ursprünglichen Erwartungskatalog des Objekts. Aber *welche* zutrifft — welcher Abschnitt des Baedekers für die Weiterreise zu benützen ist, das läßt sich nur durch wirkliche Inspektion der Marke ermitteln.

Und wenn wir *nicht* nachsehen? Sagen wir, es wurde photographisch registriert und durch ein Malheur bekommt der Film Licht, bevor er entwickelt wird. Oder wir haben aus Versehen statt eines Films schwarzes Papier eingelegt. Ja dann haben wir durch die mißglückte Messung nicht nur nichts Neues erfahren, sondern haben Kenntnis eingebüßt. Das ist nicht erstaunlich. Durch einen äußeren Eingriff wird natürlich die

Kenntnis, die man von einem System hat, zunächst immer verdorben. Man muß den Eingriff schon sehr behutsam organisieren, damit sie sich nachher wieder zurückgewinnen läßt.

Was haben wir durch diese Analyse gewonnen? *Erstens* den Einblick in das disjunktive Aufspalten des Erwartungskataloges, welches noch ganz stetig erfolgt und durch Einbetten in einen gemeinsamen Katalog für Instrument und Objekt ermöglicht wird. Aus dieser Verquickung kann das Objekt nur dadurch wieder herausgelöst werden, daß das lebende Subjekt vom Resultat der Messung wirklich Kenntnis nimmt. Irgendeinmal muß das geschehen, wenn das, was sich abgespielt hat, wirklich eine Messung heißen soll, — wie sehr es uns auch am Herzen liege, den Vorgang so objektiv wie möglich herauszupräparieren. Und das ist der *zweite* Einblick, den wir gewinnen: *erst bei diesem Inspizieren*, welches die Disjunktion entscheidet, passiert etwas Unstetiges, Sprunghaftes. Man ist geneigt, es einen *mentalen* Akt zu nennen, denn das Objekt ist ja schon abgeschaltet, wird nicht mehr physisch ergriffen; was ihm wider-

fahren, ist schon vorbei. Aber es wäre nicht ganz richtig, zu sagen, daß die ψ -Funktion des Objekts, die sich *sonst* nach einer partiellen Differentialgleichung, unabhängig vom Beobachter, verändert, *jetzt* infolge eines mentalen Aktes sprunghaft wechselt. Denn sie war verlorengegangen, es gab sie nicht mehr. Was nicht ist, kann sich auch nicht verändern. Sie wird wiedergeboren, wird restituiert, wird aus der verwickelten Kenntnis, die man besitzt, herausgelöst durch einen Wahrnehmungsakt, der in der Tat bestimmt nicht mehr eine physische Einwirkung auf das Meßobjekt ist. Von der Form, in der man die ψ -Funktion zuletzt gekannt, zu der neuen, in der sie wieder auftritt, führt kein stetiger Weg — er führte eben durch die Vernichtung. Kontrastiert man die zwei Formen, so erscheint die Sache als Sprung. In Wahrheit liegt wichtiges Geschehen dazwischen, nämlich die Einwirkung der zwei Körper aufeinander, während welcher das Objekt keinen privaten Erwartungskatalog besaß und auch keinen Anspruch darauf hatte, weil es nicht selbständig war.

(Schluß folgt.)

Über die Variabilität des Ringmosaikvirus (X-Virus) der Kartoffel¹.

VON E. KÖHLER, Berlin-Dahlem.

Unter der Bezeichnung Ringmosaikvirus (oder auch X-Virus) faßt man eine Gruppe von Mosaikviren der Kartoffel zusammen, die dadurch charakterisiert sind, daß sie auf den Blättern des Tabaks, ihrer Testpflanze, als Krankheitszeichen eigentümliche Ringmuster hervorrufen. Wichtige Charakteristika sind ferner folgende: Leichte Übertragbarkeit mit dem Saft, relativ hohe Widerstandsfähigkeit gegen Erhitzen, keine Übertragbarkeit durch die Blattlausart *Myzus persicae*, hohe Verdünnungsresistenz. Das Ringmosaikvirus besitzt eine außergewöhnliche Verbreitung in den Kartoffelbeständen der ganzen Welt. An wirtschaftlicher Bedeutung tritt es hinter gewissen anderen Viren zurück, da die meisten Kartoffelsorten gegen dieses Virus ausgesprochen tolerant sind und nicht oder jedenfalls nicht merklich geschädigt werden.

Dem Umstand, daß die meisten Sorten (Klone) so hochgradig tolerant sind, hat das Virus auch seine weite Verbreitung zu verdanken. Der Mensch hatte keine Veranlassung, es bei toleranten Sorten durch Selektion zu unterdrücken. Daher sehen wir auch, daß alle toleranten Sorten einer unaufhaltsamen Verseuchung durch dieses Virus unterliegen, während die weniger toleranten durch die Gegenwirkung des Menschen in großem Umfang davon befreit bleiben.

Eine besonders hervorsteckende Eigenschaft des Ringmosaikvirus ist seine Variabilität. Kaum 2 Stämme, die wir durch einfaches Überimpfen von Kartoffeln auf Tabak gewinnen, sind einander

vollkommen gleich. Dazu kommt die zuerst von KENNETH M. SMITH gemachte Beobachtung, daß solche Stämme auf dem Tabak im Laufe der Zeit eine Verstärkung erfahren können, daß also augenscheinlich Virulenzänderungen eine Rolle spielen.

In der letzten Zeit haben JAMES JOHNSON und KOCH an nordamerikanischen Kartoffeln die Feststellung gemacht, daß innerhalb der Ringmosaikgruppe 2 Typen unterschieden werden müssen, die sie als potato ring spot-Virus und Mottle-Virus bezeichnen. Von diesen zeichnet sich das letztere durch eine etwas erhöhte Hitzeresistenz aus. In manchen nordamerikanischen Sorten kommen beide Typen im Gemisch vor, manche Sorten enthalten augenscheinlich entweder nur das eine oder nur das andere Virus. Von jedem Typus lassen sich Stämme unterschiedlicher Virulenz isolieren. Durch unsere eigenen Untersuchungen konnten wir diese Feststellungen weitgehend bestätigen, und zwar sind dem potato ring spot-Virus u. a. unsere früher isolierten Stämme Mb 12 (von „Magnum bonum“), E 1 (von „Erdgold“), H 19 (von „Kl. Sp. Wohltmann“), M 23 (von „Kl. Sp. Wohltmann“) zuzusprechen. Von diesen ist Mb 12 der virulenzschwächste und nahezu latent, M 23 der virulenzstärkste. Das Mottle-Virus haben wir vorwiegend in der Sorte „Erstling“ (synon. „Duke of York“) angetroffen. Manche aus der nördlichen Provinz Hannover stammende Herkünfte dieser Sorte waren fast rein mit diesem Virus durchsetzt, nur gelegentlich fanden wir darin auch Beimengungen eines anderen Typus. Wir konnten 3 Mottle-Stämme unterschiedlicher Virulenz isolieren, die als Erstl. 34, Erstl. 25 und Erstl. Mix bezeichnet wurden, von ihnen ist das

¹ Nach einem auf dem VI. Internationalen Botanikerkongreß in Amsterdam gehaltenen Vortrag. Eine ausführliche Abhandlung ist in Vorbereitung.