

Zur Wissenschaftstheorie der Quantenphysik

Von Wolfgang Büchel

W. Stegmüller hat im zweiten Band der „Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und analytischen Philosophie“¹ Ausführungen zur Interpretation der Quantenphysik, insbesondere der Unschärfenbeziehung vorgelegt, bei denen „bewußt eine etwas provozierende Darstellung gewählt wurde“, „um weiteres Nachdenken über dieses wichtige Problem zu stimulieren“ (438). Er wirft mehr oder weniger der Gesamtheit der physikalischen Lehrbücher (als Beispiele werden *A. March*, *Landau-Lifshitz*, *L. I. Schiff* und *G. Süßmann* genannt) und der einschlägigen naturphilosophischen Arbeiten (als Beispiele werden *H. Reichenbach*, *E. Nagel*, *K. Hübner* und *R. Carnap* genannt) vor, die Unschärfenbeziehung falsch interpretiert zu haben (441); erst *P. Suppes*, der gleichzeitig Experte in mathematischer Statistik, moderner Logik und Physik sei, habe 1961 den Fehler aufgedeckt (442). Dieser Vorwurf war schon im ersten Band der „Probleme und Resultate“ erhoben worden²; als ein Rezensent bemerkt hatte, die dort gegebene Argumentation sei vielleicht zu kurz, um zu überzeugen, und es gebe auch lesenswerte deutschsprachige Arbeiten zur Deutung der Unschärfenbeziehung, die vom Verf. nicht erwähnt seien³, hatte St. kategorisch geantwortet: „Wenn mir jemand von einer neuen Deutung der Unbestimmtheitsrelation berichtet, so weiß ich *a priori*, daß darin ein Fehler liegen muß. An dieser Relation gibt es nämlich überhaupt nichts zu interpretieren, weil die Bedeutung der Unbestimmtheitsrelation unzweideutig festliegt. Diese Bedeutung ist allerdings ziemlich trivial und unterscheidet sich vor allem von allen anderen Interpretationen, welche gewöhnlich in diese Relation *hineingeheimnißt* werden: Sie besagt nicht mehr und nicht weniger, als daß das Produkt der Standardabweichungen zweier als Zufallsvariablen aufgefaßter konjugierter Größen mindestens gleich ist einem bestimmten Wert.“⁴

Provokationen wollen aufgenommen und beantwortet werden, nach Möglichkeit auch in deutscher Sprache, da wir nach St. „einen ungeheuren Rückstand gegenüber der englischsprachigen Welt aufzuholen haben.“⁵ St. erklärt selbst, er erwarte, mit seiner „radikalen Auffassung“ auf Polemik zu stoßen⁶; demgemäß kann es wohl nicht als unziemlich erscheinen, wenn im folgenden der Nachweis versucht wird, daß der Grund der Meinungsverschiedenheiten weniger in einem Fehler der Physiker als in der verkürzten Darstellung eines komplexen Problems durch St. liegen dürfte.

Die These, die St. bei den kritisierten Autoren ablehnen zu müssen glaubt, lautet: Aus der Unschärfenbeziehung folgt, daß eine gleichzeitige exakte Messung von Ort und Impuls nicht möglich ist. Dabei will St. jedoch die tatsächliche Unmöglichkeit

¹ W. Stegmüller, *Theorie und Erfahrung (Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie, II)*. 8^o (XVI u. 485 S.) Berlin — Heidelberg — New York 1970, Springer. 76.— DM. — Die im Text angegebenen Seitenzahlen beziehen sich auf dieses Werk.

² W. Stegmüller, *Wissenschaftliche Erklärung und Begründung* (Berlin 1969) 507 f.

³ H. Schleibert in: *Zeitschr. f. allg. Wissenschaftstheorie* 1 (1970) 147.

⁴ W. Stegmüller in: *Zeitschr. f. allg. Wissenschaftstheorie* 1 (1970) 257 f. Hervorgehoben im Original.

⁵ Ebd. 263.

⁶ Ebd. 257.

von Japanern hergestellt wird“, dann ist St.s Aussage unzutreffend, weil man ja, wie oben gezeigt, durch Herstellung entsprechend ausgesuchter Kollektive das Produkt der Streuungen unter jeden beliebigen vorgegebenen Wert hinunterdrücken kann. Die Streuungsprodukte sind folglich bei Kollektiven von Japanern nur in dem ersten Sinn konstant, bei Kollektiven von Elementarteilchen dagegen auch in dem zweiten Sinn.

In der gleichen Richtung der Verdeckung des entscheidenden Unterschieds liegt es, wenn St. anschließend bemerkt, daß die Konstante k jedenfalls unvergleichlich größer als das Wirkungsquantum sei, daß dieses Größenverhältnis für das vorliegende Problem aber ohne Relevanz sei. Man wird wohl im Gegenteil sagen müssen, daß es hier gerade um *das* relevante Element geht. Zunächst allerdings erscheint die Aussage St.s über das Größenverhältnis zwischen der Konstanten k und dem Wirkungsquantum als sinnlos, weil k eine andere Dimension hat als das Wirkungsquantum und dimensionsverschiedene Größen sich nicht ohne weitere Voraussetzungen miteinander vergleichen lassen. Man könnte dem abzuhelpen versuchen, indem man sich an den Japanern zwei solche Größen gemessen denkt, daß das Produkt dieser Größen dieselbe Dimension wie das Wirkungsquantum hat. Bei einem derartigen Beispiel würde aber dann offenkundig, daß das Japaner-Beispiel schon darum nicht beweiskräftig ist, weil die Japaner in Wirklichkeit nicht der klassischen Physik unterliegen, wie wir bisher zugunsten St.s voraussetzten, sondern der Quantenphysik, und weil infolgedessen kein Kollektiv von Japanern herstellbar ist, bei dem das Produkt der Streuungen kleiner als das Wirkungsquantum wäre. Daraus ist zu schließen, daß derartige Größen auch bei Japanern nicht gleichzeitig exakt meßbar sind, weil nun die Konstante k auch im zweiten oben angegebenen Sinn „konstant“, d. h. gänzlich unabhängig von der Herstellung des Kollektivs ist. Insofern erscheint es vielleicht nicht als zufällig, daß St. in seinem Japaner-Beispiel zwei Größen wählte, deren Produkt eine andere Dimension hat als das Wirkungsquantum und bei denen es sich infolgedessen auch gemäß der Quantenphysik jedenfalls nicht ohne weiteres ausschließen läßt, daß das Produkt der Streuungen beliebig klein gemacht werden kann. Andernfalls hätte man ihm ja sofort entgegengehalten, daß die Behauptung der Unmöglichkeit einer gleichzeitigen genauen Messung der entsprechenden Größen bei den Japanern (also das entsprechende Gegenstück zu der Aussage [8] auf S. 445) nicht „offenbar absurd“ ist, wie St. für seine Argumentation voraussetzt, sondern im Gegenteil wahr (weil ja St. selbst die Unmöglichkeit der gleichzeitigen exakten Messung von quantenphysikalisch komplementären Größen behauptet, wenn auch mit anderer Begründung als wir).

Zur Diskussion einer weiteren Kritik St.s an der üblichen Auffassung der Unschärfenbeziehung müssen wir auf den Unterschied zwischen den Begriffen „Standartabweichung“ und „Intervall“ eingehen. Wir betrachten den Fall der Ortsmessung an einem Kollektiv von Teilchen. Bei einer ersten Art von Ortsmessung stellen wir den Ort eines Teilchens durch Anlegen eines Maßstabs mit Millimetereinteilung fest, wir bilden den Mittelwert der so erhaltenen Resultate, der etwa 2,5 cm betragen möge, berechnen die Differenzen zwischen den einzelnen Messungen und dem Mittelwert und bilden daraus nach den Regeln der Statistik die Streuung der Resultate, die etwa 0,3 cm betrage, weil die Meßresultate gleichmäßig zwischen 2,0 cm und 3,0 cm streuen. Der so erhaltene Streubereich wird als *Standartabweichung* bezeichnet. Im zweiten Fall wählen wir zur Ortsmessung einen Maßstab, der zwischen 2,0 cm und 3,0 cm ein Loch hat, und messen den Ort der Teilchen durch die Feststellung, daß sie durch das Loch hindurchgegangen sind; Genaueres ist uns über den Durchgangsort nicht bekannt. In diesem zweiten Fall sagen wir, daß der Ort der Teilchen in dem *Intervall* zwischen 2,0 cm und 3,0 cm liege. Von einem Intervall sprechen wir also, wenn es um die Unschärfe des Meßinstruments selbst geht; von einer Standartabweichung, wenn die Unschärfe des Meßinstruments vernach-

lässtigt werden kann und die Differenz zwischen den einzelnen Meßresultaten das Entscheidende ist.

St. legt nun Wert auf die Feststellung, daß es sich bei den in der Unschärfenbeziehung auftretenden Unschärfen um Standartabweichungen und nicht um Intervalle handele (444. 446); den von ihm behaupteten Irrtum in den Folgerungen aus der Unschärfenbeziehung führt er unter anderem darauf zurück, daß die Unschärfen fälschlicherweise als Intervalle gedeutet würden (442). Man muß aber auch hier die Physiker vor dem Vorwurf in Schutz nehmen, daß sie etwas in die Unschärfenbeziehung „hineingeheimnißt“, das nicht darin enthalten sei; denn hinter der Unterscheidung zwischen Intervall und Standardabweichung steht die grundlegende physikalische Unterscheidung zwischen „reinem Fall“ und „Gemisch“, die es nur in der quantenphysikalischen und nicht in der klassischen Statistik gibt und die bei St., soweit ersichtlich, nicht zur Sprache kommt. Zur Verdeutlichung dieser Unterscheidung betrachten wir zwei Kollektive von Elementarteilchen, die in verschiedener Weise hergestellt werden: Bei dem ersten Kollektiv gehen die Teilchen durch das große Loch, das in unserem Maßstab zwischen 2,0 cm und 3,0 cm klafft, und es ist dafür gesorgt, daß wir nichts Genaueres über den Durchgangsort wissen können. Zur Herstellung des zweiten Kollektivs benutzen wir Maßstäbe mit einem Loch, das nur 1 mm breit ist; in 10 % unserer Fälle legen wir das Loch zwischen 2,0 cm und 2,1 cm, in weiteren 10 % zwischen 2,1 cm und 2,2 cm usw. bis zum letzten Loch zwischen 2,9 cm und 3,0 cm. Beide Kollektive haben nach ihrer Herstellung eine *Standartabweichung* von 0,3 cm, auch das erste Kollektiv; denn auch für das erste Kollektiv gilt: Wenn wir an ihm unmittelbar anschließend (ideal) genaue zweite Ortsmessungen vornehmen, dann erhalten wir aus diesen Messungen eine Standartabweichung von 0,3 cm. Bei dem ersten Kollektiv beträgt jedoch auch die *Intervallbreite*, d. h. die Unschärfe des Meßinstruments selbst (so wie sie nach der Theorie der Meßfehler definiert ist) 0,3 cm, während sie bei dem zweiten Kollektiv nur 0,03 cm beträgt, und das macht nach der Quantenphysik einen wesentlichen Unterschied aus: Wenn wir an dem zweiten Kollektiv statt der zweiten Ortsmessungen (ideal) genaue Impulsmessungen vornehmen, zeigen diese Impulsmessungen eine Standartabweichung von mindestens $h/(4\pi \cdot 0,03)$ g · cm/sec; machen wir dasselbe an dem ersten Kollektiv, so liegt die Untergrenze der Standartabweichung der Impulsmessungen bei $h/(4\pi \cdot 0,3)$ g · cm/sec, ist also zehnmal kleiner als bei dem zweiten Kollektiv. Diese unterschiedliche Untergrenze für die Standartabweichungen der Impulsmessungen hat ihren Grund nicht in der Standartabweichung der Ortsmessungen, die bei beiden Kollektiven ja die gleiche ist, sondern in der verschiedenen *Intervallbreite* der ersten Ortsmessungen, die zur Herstellung der Kollektive dienen. Durch diese verschiedene Intervallbreite der ersten Ortsmessungen bei gleicher Standartabweichung etwaiger zweiter Ortsmessungen unterscheidet sich das erste Kollektiv als *reiner Fall* von dem zweiten Kollektiv als *Gemisch*. Was in die Unschärfenbeziehung eingeht, ist immer die Intervallbreite der ersten, zur Herstellung des Kollektivs dienenden Ortsmessungen; sie kann nur dann mit der Standartabweichung der etwaigen zweiten Ortsmessungen gleichgesetzt werden, wenn schon anderweitig bekannt ist, daß es sich bei dem Kollektiv um einen reinen Fall und nicht um ein Gemisch handelt. Bei den üblichen Diskussionen der Unschärfenbeziehung werden nur Beispiele betrachtet, die reine Fälle sind, und bei ihnen ist es dann berechtigt, die Intervallbreite durch die Standartabweichung zu ersetzen.

Wir haben bis jetzt die Wiederholungsthese als gültig vorausgesetzt und müssen uns nun mit den Einwänden auseinandersetzen, die *H. Margenau* dagegen vorbringt¹⁰. Sie richten sich allerdings nicht genau gegen die Wiederholungsthese in der

¹⁰ A. a. O. (Anm. 7).

von Japanern hergestellt wird“, dann ist St.s Aussage unzutreffend, weil man ja, wie oben gezeigt, durch Herstellung entsprechend ausgesuchter Kollektive das Produkt der Streuungen unter jeden beliebigen vorgegebenen Wert hinunterdrücken kann. Die Streuungsprodukte sind folglich bei Kollektiven von Japanern nur in dem ersten Sinn konstant, bei Kollektiven von Elementarteilchen dagegen auch in dem zweiten Sinn.

In der gleichen Richtung der Verdeckung des entscheidenden Unterschieds liegt es, wenn St. anschließend bemerkt, daß die Konstante k jedenfalls unvergleichlich größer als das Wirkungsquantum sei, daß dieses Größenverhältnis für das vorliegende Problem aber ohne Relevanz sei. Man wird wohl im Gegenteil sagen müssen, daß es hier gerade um *das* relevante Element geht. Zunächst allerdings erscheint die Aussage St.s über das Größenverhältnis zwischen der Konstanten k und dem Wirkungsquantum als sinnlos, weil k eine andere Dimension hat als das Wirkungsquantum und dimensionsverschiedene Größen sich nicht ohne weitere Voraussetzungen miteinander vergleichen lassen. Man könnte dem abzuhelpen versuchen, indem man sich an den Japanern zwei solche Größen gemessen denkt, daß das Produkt dieser Größen dieselbe Dimension wie das Wirkungsquantum hat. Bei einem derartigen Beispiel würde aber dann offenkundig, daß das Japaner-Beispiel schon darum nicht beweiskräftig ist, weil die Japaner in Wirklichkeit nicht der klassischen Physik unterliegen, wie wir bisher zugunsten St.s voraussetzten, sondern der Quantenphysik, und weil infolgedessen kein Kollektiv von Japanern herstellbar ist, bei dem das Produkt der Streuungen kleiner als das Wirkungsquantum wäre. Daraus ist zu schließen, daß derartige Größen auch bei Japanern nicht gleichzeitig exakt meßbar sind, weil nun die Konstante k auch im zweiten oben angegebenen Sinn „konstant“, d. h. gänzlich unabhängig von der Herstellung des Kollektivs ist. Insofern erscheint es vielleicht nicht als zufällig, daß St. in seinem Japaner-Beispiel zwei Größen wählte, deren Produkt eine andere Dimension hat als das Wirkungsquantum und bei denen es sich infolgedessen auch gemäß der Quantenphysik jedenfalls nicht ohne weiteres ausschließen läßt, daß das Produkt der Streuungen beliebig klein gemacht werden kann. Andernfalls hätte man ihm ja sofort entgegengehalten, daß die Behauptung der Unmöglichkeit einer gleichzeitigen genauen Messung der entsprechenden Größen bei den Japanern (also das entsprechende Gegenstück zu der Aussage [8] auf S. 445) nicht „offenbar absurd“ ist, wie St. für seine Argumentation voraussetzt, sondern im Gegenteil wahr (weil ja St. selbst die Unmöglichkeit der gleichzeitigen exakten Messung von quantenphysikalisch komplexeren Größen behauptet, wenn auch mit anderer Begründung als wir).

Zur Diskussion einer weiteren Kritik St.s an der üblichen Auffassung der Unschärfebeziehung müssen wir auf den Unterschied zwischen den Begriffen „Standartabweichung“ und „Intervall“ eingehen. Wir betrachten den Fall der Ortsmessung an einem Kollektiv von Teilchen. Bei einer ersten Art von Ortsmessung stellen wir den Ort eines Teilchens durch Anlegen eines Maßstabs mit Millimetererteilung fest, wir bilden den Mittelwert der so erhaltenen Resultate, der etwa 2,5 cm betragen möge, berechnen die Differenzen zwischen den einzelnen Messungen und dem Mittelwert und bilden daraus nach den Regeln der Statistik die Streuung der Resultate, die etwa 0,3 cm betrage, weil die Meßresultate gleichmäßig zwischen 2,0 cm und 3,0 cm streuen. Der so erhaltene Streubereich wird als *Standartabweichung* bezeichnet. Im zweiten Fall wählen wir zur Ortsmessung einen Maßstab, der zwischen 2,0 cm und 3,0 cm ein Loch hat, und messen den Ort der Teilchen durch die Feststellung, daß sie durch das Loch hindurchgegangen sind; Genaueres ist uns über den Durchgangsort nicht bekannt. In diesem zweiten Fall sagen wir, daß der Ort der Teilchen in dem *Intervall* zwischen 2,0 cm und 3,0 cm liege. Von einem Intervall sprechen wir also, wenn es um die Unschärfe des Meßinstruments selbst geht; von einer Standartabweichung, wenn die Unschärfe des Meßinstruments vernach-

lässigt werden kann und die Differenz zwischen den einzelnen Meßresultaten das Entscheidende ist.

St. legt nun Wert auf die Feststellung, daß es sich bei den in der Unschärfenbeziehung auftretenden Unschärfen um Standardabweichungen und nicht um Intervalle handele (444. 446); den von ihm behaupteten Irrtum in den Folgerungen aus der Unschärfenbeziehung führt er unter anderem darauf zurück, daß die Unschärfen fälschlicherweise als Intervalle gedeutet würden (442). Man muß aber auch hier die Physiker vor dem Vorwurf in Schutz nehmen, daß sie etwas in die Unschärfenbeziehung „hineingeheimnishten“, das nicht darin enthalten sei; denn hinter der Unterscheidung zwischen Intervall und Standardabweichung steht die grundlegende physikalische Unterscheidung zwischen „reinem Fall“ und „Gemisch“, die es nur in der quantenphysikalischen und nicht in der klassischen Statistik gibt und die bei St., soweit ersichtlich, nicht zur Sprache kommt. Zur Verdeutlichung dieser Unterscheidung betrachten wir zwei Kollektive von Elementarteilchen, die in verschiedener Weise hergestellt werden: Bei dem ersten Kollektiv gehen die Teilchen durch das große Loch, das in unserem Maßstab zwischen 2,0 cm und 3,0 cm klafft, und es ist dafür gesorgt, daß wir nichts Genaueres über den Durchgangsort wissen können. Zur Herstellung des zweiten Kollektivs benutzen wir Maßstäbe mit einem Loch, das nur 1 mm breit ist; in 10 % unserer Fälle legen wir das Loch zwischen 2,0 cm und 2,1 cm, in weiteren 10 % zwischen 2,1 cm und 2,2 cm usw. bis zum letzten Loch zwischen 2,9 cm und 3,0 cm. Beide Kollektive haben nach ihrer Herstellung eine *Standartabweichung* von 0,3 cm, auch das erste Kollektiv; denn auch für das erste Kollektiv gilt: Wenn wir an ihm unmittelbar anschließend (ideal) genaue zweite Ortsmessungen vornehmen, dann erhalten wir aus diesen Messungen eine *Standartabweichung* von 0,3 cm. Bei dem ersten Kollektiv beträgt jedoch auch die *Intervallbreite*, d. h. die Unschärfe des Meßinstruments selbst (so wie sie nach der Theorie der Meßfehler definiert ist) 0,3 cm, während sie bei dem zweiten Kollektiv nur 0,03 cm beträgt, und das macht nach der Quantenphysik einen wesentlichen Unterschied aus: Wenn wir an dem zweiten Kollektiv statt der zweiten Ortsmessungen (ideal) genaue Impulsmessungen vornehmen, zeigen diese Impulsmessungen eine *Standartabweichung* von mindestens $h/(4\pi \cdot 0,03) \text{ g} \cdot \text{cm}/\text{sec}$; machen wir dasselbe an dem ersten Kollektiv, so liegt die Untergrenze der *Standartabweichung* der Impulsmessungen bei $h/(4\pi \cdot 0,3) \text{ g} \cdot \text{cm}/\text{sec}$, ist also zehnmal kleiner als bei dem zweiten Kollektiv. Diese unterschiedliche Untergrenze für die *Standartabweichungen* der Impulsmessungen hat ihren Grund nicht in der *Standartabweichung* der Ortsmessungen, die bei beiden Kollektiven ja die gleiche ist, sondern in der verschiedenen *Intervallbreite* der ersten Ortsmessungen, die zur Herstellung der Kollektive dienen. Durch diese verschiedene *Intervallbreite* der ersten Ortsmessungen bei gleicher *Standartabweichung* etwaiger zweiter Ortsmessungen unterscheidet sich das erste Kollektiv als *reiner Fall* von dem zweiten Kollektiv als *Gemisch*. Was in die Unschärfenbeziehung eingeht, ist immer die *Intervallbreite* der ersten, zur Herstellung des Kollektivs dienenden Ortsmessungen; sie kann nur dann mit der *Standartabweichung* der etwaigen zweiten Ortsmessungen gleichgesetzt werden, wenn schon anderweitig bekannt ist, daß es sich bei dem Kollektiv um einen reinen Fall und nicht um ein Gemisch handelt. Bei den üblichen Diskussionen der Unschärfenbeziehung werden nur Beispiele betrachtet, die reine Fälle sind, und bei ihnen ist es dann berechtigt, die *Intervallbreite* durch die *Standartabweichung* zu ersetzen.

Wir haben bis jetzt die Wiederholungsthese als gültig vorausgesetzt und müssen uns nun mit den Einwänden auseinandersetzen, die *H. Margenau* dagegen vorbringt¹⁰. Sie richten sich allerdings nicht genau gegen die Wiederholungsthese in der

¹⁰ A. a. O. (Anm. 7).

von uns zugrunde gelegten Formulierung, sondern gegen eine schärfere Fassung, die in der Wissenschaftstheorie der Quantenphysik als „Projektionspostulat“ bezeichnet wird und besagt: Durch eine Messung wird ein quantenphysikalisches Objekt in einen Zustand versetzt, der ein Eigenzustand der gemessenen Observablen mit dem erhaltenen Meßwert als Eigenwert ist. Das Projektionspostulat geht über die Wiederholungstheese hinaus; denn es behauptet z. B. einschlußweise die Weiterexistenz des Objekts nach der Messung, während die Wiederholungstheese die Möglichkeit einer Vernichtung des Objekts durch die Messung offenläßt und nur sagt: Wenn unmittelbar anschließend eine zweite Messung vorgenommen wird, dann ... Die Vernichtung des Meßobjekts durch die Messung kommt in der Quantenphysik öfters vor; wenn man etwa die Richtung des Impulses eines Lichtquants messen will, so läßt man das Lichtquant durch eine Sammellinse gehn und dann auf einer in der Brennebene der Linse liegenden Photoplatte einen Schwärzungspunkt erzeugen. Durch die Erzeugung des Schwärzungspunktes wird das Lichtquant annihilirt, und außerdem war schon vorher der Impuls des Lichtquants beim Durchgang durch die Linse in unkontrollierbarer Weise verändert worden. Die Lage des Schwärzungspunktes auf der Photoplatte in der Brennebene kann also nur als Messung des *Impulses vor dem Eintritt in die Linse* angesehen werden. Demgemäß hatte schon *W. Pauli* zwei Arten von Messungen unterschieden¹¹: Messungen erster Art, für die das Projektionspostulat gilt und die als Feststellung des Wertes der gemessenen Größe *nach* der Messung angesehen werden können, und Messungen zweiter Art, die den Zustand des Objekts zwar verändern, aber in einer solchen Weise, daß aus dem erhaltenen Ergebnis der Zustand des Objekts *vor* der Messung eindeutig erschlossen werden kann. Wir wollen die Messungen erster Art als *Voraussagemessungen* und die Messungen zweiter Art als *Rückschlußmessungen* bezeichnen; mit dieser Terminologie ist natürlich durchaus offengelassen, daß eine Rückschlußmessung auch eine Voraussagemessung sein kann und umgekehrt. Das Projektionspostulat und die Wiederholungstheese gelten dann nur für Voraussagemessungen; folglich gilt auch die von uns dargelegte Unmöglichkeit einer gleichzeitigen genauen Messung von Ort und Impuls nur für Voraussagemessungen. Die von St. kritisierten Autoren haben immer solche Voraussagemessungen im Auge, sagen das aber nicht explizit, und insofern ist tatsächlich eine Präzisierung der Aussagen über die Möglichkeit gleichzeitiger Messungen erforderlich. Diese Präzisierung wird aber auch von St. nicht gegeben, denn die von ihm aufgrund der Argumentation von *Suppes* behauptete Unmöglichkeit der gleichzeitigen genauen Messung von Ort und Impuls gilt ebenfalls nur für Voraussagemessungen oder höchstens für zwei gleichzeitige Rückschlußmessungen, ohne daß diese Einschränkung von St. erwähnt würde; bei der Kombination etwa einer Voraussage-Ortsmessung mit einer Rückschluß-Impulsmessung lassen sich, wie M. zeigt und wie nie bestritten wurde, sehr wohl Möglichkeiten zur gleichzeitigen genauen Orts- und Impulsmessung angeben. („Gleichzeitigkeit“ bedeutet hier, daß die Voraussage aufgrund der früheren und der Rückschluß aus der späteren Messung sich auf denselben Zeitpunkt beziehen.)

M. übernimmt die Unterscheidung von *Pauli* und tadelt nur, daß *Pauli* die Möglichkeit von Messungen, die das Objekt in unkontrollierbarer Weise verändern oder gar zerstören, nicht in Betracht gezogen habe¹². Dieser Vorwurf erscheint unberechtigt; denn wenn *Pauli* bei Rückschlußmessungen die Kontrollierbarkeit des Einflusses des Meßgerätes auf das Objekt fordert, so bezieht sich das nur auf den Zusammenhang zwischen Meßresultat und Wert der zu messenden Größe vor der Messung; wenn dieser Zusammenhang gewahrt ist, kann die Einwirkung des Meß-

¹¹ In: *S. Flügge* (Hrsg.), *Handbuch der Physik V/1: Prinzipien der Quantentheorie I* (Berlin 1958) 72 f.

¹² *H. Margenau* in: *Philosophy of Science* 30 (1963) 147 ff.

geräts auf das Objekt im übrigen „unkontrollierbar“ sein und sogar zu einer Zerstörung des Objekts führen. (Im obigen Beispiel der Impulsmessung an einem Lichtquant wird der Impuls beim Durchgang durch die Linse in unkontrollierbarer Weise geändert und das Objekt selbst bei der Erzeugung des Schwärzungspunktes zerstört; trotzdem kann man aus der Lage des Schwärzungspunktes auf den Impuls vor dem Eintritt in die Linse schließen.) M. weist weiter darauf hin, daß auch eine Voraussagemessung nicht immer ausreiche, um die quantenphysikalische Zustandsfunktion des Objekts so eindeutig festzulegen, wie es das Projektionspostulat fordert. Dieser Einwand trifft, soweit er berechtigt ist, nicht unsere Wiederholungsthese; denn die Unkenntnis der Zustandsfunktion, die nach einer Voraussagemessung gegebenenfalls noch übrigbleibt, wirkt sich *nicht* auf die unmittelbar anschließende Messung derselben Observablen, sondern nur auf die anschließende Messung einer von der ersten Observablen verschiedenen Observablen aus. Als Beispiel sei der oben diskutierte Fall des Maßstabs betrachtet, der zwischen 2,0 cm und 3,0 cm ein Loch hat, durch welches die Teilchen hindurchgehen. Wir haben oben gesagt, daß die Standardabweichung einer anschließenden Impuls-(Rückschluß-)Messung bis auf den Wert $h/(4\pi \cdot 0,3) \text{ g} \cdot \text{cm}/\text{sec}$ hinuntergedrückt werden könne. Das ist aber nur möglich, wenn wir zusätzlich wissen, daß die Teilchen alle aus der gleichen Richtung auf den Maßstab zuflogen, d. h., daß sie alle vor der Orts-(Voraussage-)Messung, welche der Durchgang durch den Maßstab darstellt, den gleichen Impuls hatten. Wenn es sich aber nicht um die Streuung einer anschließenden Impulsmessung, sondern um die Streuung einer (unmittelbar) anschließenden Ortsmessung handelt, ist die Kenntnis des früheren Impulses der Teilchen nicht erforderlich; insofern ist die Wiederholungsthese in der von uns gegebenen Formulierung von dieser Problematik nicht betroffen.

Zusammenfassend läßt sich sagen: Wenn wir uns auf Voraussagemessungen beschränken, dann ist unsere Wiederholungsthese von den Einwänden M.s nicht betroffen und es bleibt daher zulässig, vermittels dieser These aus der Unschärfebeziehung die Unmöglichkeit einer gleichzeitigen exakten Orts- und Impuls-(Voraussage-)Messung abzuleiten.

Auf die Unterscheidung von Voraussage- und Rückschlußmessung bezieht sich auch *K. R. Popper* bei einer neuerlichen Auseinandersetzung mit der „Kopenhagener Interpretation“¹³. Er betrachtet Teilchen, die durch einen engen Spalt gehen und ininigem Abstand dann auf einen Auffangschirm treffen; der Spalt stellt eine Voraussage-Ortsmessung dar, der Auftreffpunkt auf dem Auffangschirm eine Rückschluß-Impulsmessung (da er die Flugrichtung erkennen läßt, in der das Teilchen von dem Spalt aus geflogen ist), und durch Kombination dieser beiden Messungen läßt sich für die Teilchen unmittelbar nach dem Durchgang durch den Spalt sowohl ihr Ort als auch ihr Impuls mit beliebiger Genauigkeit festlegen. P. weist darauf hin, daß derartige Überlegungen natürlich auch schon *W. Heisenberg* bekannt gewesen seien, daß *Heisenberg* dazu aber erklärt habe: „Diese Kenntnis der Vergangenheit hat jedoch rein spekulativen Charakter, denn sie geht ... keineswegs als Anfangsbedingung in irgendeine Rechnung über die Zukunft des Elektrons ein und tritt überhaupt in keinem physikalischen Experiment in Erscheinung. Ob man der genannten Rechnung über die Vergangenheit des Elektrons irgendeine physikalische Realität zuordnen soll, ist also eine reine Geschmacksfrage.“¹⁴ P. weist demgegenüber darauf hin, daß es physikalische Umstände gibt, in denen die Kenntnis der Vergangenheit, d. h. das Ergebnis von Rückschlußmessungen, sehr wohl in physikalischen Experimenten in Erscheinung tritt und die Frage der Reali-

¹³ In: *M. Bunge* (Hrsg.), *Quantum Theory and Reality* (Berlin 1967) 20 ff.

¹⁴ *W. Heisenberg*, *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie* II 2 a (Leipzig 1944) 15.

tät der Rechnung über die Vergangenheit demnach keine Geschmacksfrage mehr sei. Wenn man etwa zwei Teilchen zusammenstoßen läßt, deren Gesamtimpuls vor dem Zusammenstoße bekannt war, und dann an dem Teilchen 1 mittels einer Rückschlußmessung den Impuls nach dem Zusammenstoß bestimmt, so ist diese Rückschlußmessung an dem Teilchen 1 aufgrund des Satzes von der Erhaltung des Gesamtimpulses eine Voraussagemessung des Impulses für das Teilchen 2, und das Ergebnis dieser Voraussagemessung an dem Teilchen 2 geht in die Rechnung über die Zukunft des Teilchens 2 ein und führt somit zu experimentell überprüfbaren Aussagen. Besonders zugespitzt zeigen sich diese Zusammenhänge in einer experimentellen Situation, die man in der englischsprachigen Literatur nach einem Artikel von *A. Einstein* aus dem Jahr 1935 als „Einstein-Podolsky-Rosen-Experiment“ (EPR-Experiment) bezeichnet¹⁵, die aber in Wirklichkeit schon vier Jahre früher von *Heisenberg* und *C. F. v. Weizsäcker* diskutiert worden war¹⁶: Ein Elektron und ein Lichtquant stoßen zusammen. Ihr Impuls vor dem Zusammenstoß ist bekannt; nimmt man also an dem Lichtquant nach dem Zusammenstoß eine Impuls-Rückschlußmessung vor, so stellt diese eine Impuls-Voraussagemessung für das Elektron dar. Man kann aber unter den gegebenen speziellen Bedingungen an dem Lichtquant auch eine Rückschlußmessung vornehmen, aus der sich der Ort des Zusammenstoßes erschließen läßt, und diese stellt in gleicher Weise für das Elektron eine Voraussage-Ortsmessung für den Zeitpunkt unmittelbar nach dem Zusammenstoß dar. *Heisenberg* und *v. Weizsäcker* hatten bei der Diskussion dieses Problems darauf hingewiesen, daß es nicht möglich ist, die beiden Rückschlußmessungen gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit an dem Lichtquant vorzunehmen — weil es nicht möglich ist, die Photoplatte, auf der das Lichtquant hinter einer Linse aufgefangen wird, gleichzeitig in die Brennebene und in eine davon verschiedene Bildebene zu legen —, und daß sich infolgedessen für die beiden Voraussagemessungen, die sich für das Elektron aus den Rückschlußmessungen an dem Lichtquant ergeben, wieder die Unschärfenbeziehung gilt. *Einstein* und im Anschluß an ihn *Popper* betrachteten die Situation aus einem anderen Blickwinkel: Werden an beiden Teilchen völlig exakte Rückschluß-Impulsmessungen vorgenommen, so müssen deren Resultate exakt zueinander passen; werden an beiden Teilchen völlig exakte Rückschluß-Ortsmessungen vorgenommen, so müssen deren Resultate ebenfalls völlig exakt zueinander passen. Nach dem Zusammenstoß stehen aber die beiden Teilchen in keinerlei Wechselwirkung mehr miteinander. Damit trotzdem die Resultate der Rückschlußmessungen genau zueinander passen, muß es in jedem Teilchen nach dem Zusammenstoß eindeutig festgelegt sein, welches Resultat sich jeweils bei einer Rückschluß-Orts- bzw. -Impulsmessung ergeben soll. *Popper* ging sogar noch weiter und folgerte: Beide Teilchen müssen unmittelbar nach dem Zusammenstoß sowohl einen eindeutig bestimmten Ort als auch einen eindeutig bestimmten Impuls gehabt haben. Er hatte eine derartige Behauptung früher aus einem anderen Gedankenexperiment ableiten wollen; nachdem er hatte zugeben müssen, daß er dieses sein Gedankenexperiment in physikalischer Hinsicht falsch angelegt hatte, bezog er sich aufgrund eines Hinweises von *Einstein* auf das EPR-Experiment¹⁷. 1964 konnte aber der Physiker *J. S. Bell* in einer Analyse des EPR-Experiments nachweisen, daß die Annahme, jedes Teilchen trage nach dem Auseinanderlaufen für jede der beiden möglichen Rückschlußmessungen eine eindeutige Festlegung in sich, auf einen direkten Widerspruch zu den übrigen physikalischen Gegebenheiten des Problems führt, ganz gleich, wie auch immer und wie verborgen auch immer man sich

¹⁵ *Einstein-Podolsky-Rosen* in: *Physical Review* 47 (1935) 777.

¹⁶ *C. F. v. Weizsäcker* in: *Zeitschr. f. Physik* 70 (1931) 114; vgl. *W. Büchel*, *Philosophische Probleme der Physik* (Freiburg i. Br. 1965) 410 ff.

¹⁷ *K. R. Popper*, *The Logic of Scientific Discovery* (London 1968) nr. 77.

diese Festlegung denken mag¹⁸. In der englischsprachigen Wissenschaftstheorie ist das durch *Bell* entstandene Paradoxon, soweit dem Rez. ersichtlich, bisher nicht erörtert worden. Der Physiker *L. E. Ballentine* bemerkt dazu, es erscheine wie eine Ironie der Geschichte, daß ausgerechnet jene Zusammenhänge, mit denen *Einstein* die Notwendigkeit „verborgener Parameter“ hatte aufzeigen wollen, die immanenten Schwierigkeiten einer derartigen Annahme ganz besonders deutlich hervortreten ließen¹⁹. Die bisherigen Versuche, diese Schwierigkeiten zu umgehen, indem man an den entscheidenden Punkten die Aussagen des quantenphysikalischen Formalismus als nicht exakt, sondern nur näherungsweise gültig ansetzte, haben ganz ebenso wie frühere aus ähnlich spekulativ-wissenschaftstheoretischen (statt empirisch-physikalischen) Motivationen hervorgegangene Zweifel an der Quantenphysik in der konkreten Durchführung lediglich erneut erkennen lassen, daß Abänderungen, die sich innerhalb der tatsächlich bestehenden experimentellen Fehlergrenzen halten, nicht zu dem gewünschten Ziel führen²⁰.

¹⁸ *J. S. Bell* in: *Physics* 1 (1964) 195; *E. P. Wigner* in: *American Journal of Physics* 38 (1970) 1005; vgl. auch *W. Büchel* in: *Theol. u. Philos.* 42 (1967) 187; *ders.* in: *Philosophia Naturalis* 11 (1969) 162.

¹⁹ A. a. O. (Anm. 9) 379.

²⁰ *C. Papaliolios* in: *Physical Review Letters* 18 (1967) 622; *Clark-Turner* in: *Physics Letters* 26 A (1968) 447; *P. M. Pearle* in: *Physical Review D* 2 (1970) 1418.