Wegbereiter wider Willen – *Einstein* und die Quantentheorie

J. Audretsch

Wir erinnern im Jahr 2005 daran, dass *A. Einstein* vor 100 Jahren mit einer bahnbrechenden Arbeit die Spezielle Relativitätstheorie begründet hat. Es folgten wichtige Arbeiten *Einsteins* zum Photoeffekt und zur *Bose-Einstein*-Kondensation. Bei der Feier dieser bahnbrechenden wissenschaftlichen Erfolge tritt oft in den Hintergrund, dass *Einstein* darüber hinaus einen wichtigen Anstoß zur Entwicklung der Quantentheorie gegeben hat. Es war ein Anstoß wider Willen, denn *Einstein* hat die Quantentheorie nicht gefallen. Der Anstoß entstand dadurch, dass andere Physiker die ablehnende Kritik *Einsteins* ins Positive gewendet haben. Provoziert durch die Kritik haben sie gezeigt, dass *Einsteins* Forderungen, wie eine befriedigende Quantentheorie auszusehen habe, nicht zu erfüllen sind. Diese Forderungen lassen sich experimentell widerlegen. Gerade dadurch, dass *Einstein* die falschen Vorstellungen massiv vertreten hat, hat er eine Entwicklung der Quantentheorie angeregt, die zu dem zurzeit immer schneller anwachsenden Gebiet der Quanteninformationstheorie und zu den Erfolgen beim Studium der Grundlagen der Quantentheorie geführt hat. Im Folgenden soll kurz beschrieben werden, welche Forderungen *Einstein* an eine befriedigende Formulierung der Quantentheorie gestellt hat und welche Konsequenzen sich aus ihnen ergeben. Es soll dabei systematisch und nicht historisch vorgegangen werden.

1 „Würfelt" er?

Dass *Einstein* mit der Quantentheorie, wie sie sich um 1925 herum in der heute gültigen Form entwickelt hat, seine Schwierigkeiten hatte, ist oft durch das folgende berühmt gewordene Zitat belegt worden. Es entstammt einem Brief *Einsteins* an *Born* vom 04.12.1926: „*Die Quantenmechanik ist sehr achtung-gebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, dass das doch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, dass der nicht würfelt* …" [1].

Einstein stand nicht allein mit dieser Ansicht. *Max Planck* hatte das gleiche Vorurteil, wie man seinem Brief an *Sommerfeld* vom 02.02.1929 entnehmen kann: „In dem Kampf zwischen Determinismus und Indeterminismus stehe ich entschieden auf der Seite des ersteren …". *Einstein* hat hartnäckig an seinen Vorstellungen festgehalten. Sein Brief an *Max Born* vom 07.09.1944 belegt das: „*Du glaubst an den würfelnden Gott und ich an die volle Gesetzlichkeit von etwas objektiv Seiendem* …" [1].

Allerdings wäre *Einsteins* Haltung falsch beschrieben, wenn man nur seine Kritik an der Quantentheorie betonen würde. Man muss genauso stark hervorheben, dass *Einstein* nie bezweifelt hat, dass die Aussagen der Quantentheorie mit den experimentellen Ergebnissen vollständig übereinstimmen. Durch die Jahrzehnte hindurch ließen sich immer alle Prognosen der Quantentheorie sehr gut bestätigen, wenn die experimentellen Möglichkeiten entsprechend fortgeschritten waren. Daher war für *Einstein* die Quantentheorie auch nicht falsch oder gar widerlegt. Er hätte sie aber gerne durch eine Theorie ersetzt bzw. zu einer Theorie ausgebaut, die seinen naturphilosophischen Vorstellungen von der Natur entsprach.

2 Lokaler Realismus

Welche Forderungen hat *Einstein* an eine physikalische Theorie gestellt? Das ist von ihm selber vielfach in leicht differierender Weise dargestellt worden. Hier sollen Formulierungen gegeben werden, die sich an die Formulierungen in der Arbeit von *A. Einstein*, *B. Podolsky* und *N. Rosen* aus dem Jahre 1935 anschließen [2].

Einsteins Anforderungen an die Quantentheorie sind unmittelbar an den Theorien der klassischen Physik abgelesen worden. Sie betrafen zum einen die Struktur der Wirklichkeit:

Einstein-Realität: Eigenschaften physikalischer Systeme (z. B. einen Ort zu haben) sind diejenigen physikalischen Größen, deren Wert man mit Sicherheit vor der entsprechenden Messung vorhersagen kann. Diese Eigenschaften liegen also bereits vor der Messung vor. Ihre Werte (z. B welcher Ort) sind unabhängig davon, ob sie gemessen werden oder nicht. Sie sind Elemente der physikalischen Realität.

Zu seiner zweiten Forderung war er durch seine eigenen Ergebnisse zur Speziellen Relativitätstheorie motiviert, die ebenfalls eine Theorie der klassischen Physik ist.

Einstein-Lokalität: Jedes System hat seine Eigenschaften unabhängig von anderen Systemen. Die Eigenschaften werden also nicht geändert durch Einwirkung auf räumlich getrennte andere Systeme.

Er meinte damit, dass man die Eigenschaften eines Systems nicht dadurch ändern kann, dass man ein anderes System, das im Prinzip beliebig weit entfernt sein kann, manipuliert. Selbstverständlich leugnet er nicht, dass von einem entfernten System eine Wirkung mit höchstens Lichtgeschwindigkeit ausgehen kann, die ein anderes System abändert. Er wendet sich aber gegen eine wie auch immer geartete „spukhafte Fernwirkung" (Brief *Einstein* an *Born* vom 03.03.1947 [1]). Alle Phänomene der Physik sollen nach *Einstein* mit lokal-realistischen Theorien beschreibbar sein. Verkürzt gesagt lautet *Einsteins* Forderung, dass alle physikalischen Theorien die Wirklichkeitsvorstellungen widerspiegeln sollen, wie wir sie mit den Theorien klassischen Physik verbinden. Kann es eine solche Theorie für die Phänomene im Quantenbereich geben? Die übliche Formulierung der Quantentheorie erfüllt die Forderungen nicht. Kann man daher die Quantentheorie durch eine Alternativtheorie ersetzen? Oder ist die Quantentheorie in der Form, in der wir sie kennen, zumindest unvollständig und kann zu einer lokal-realistischen Theorie ergänzt werden? Um Antworten auf diese Fragen zu finden, wollen wir eine ungewöhnliche Methode anwenden: Wir wollen den Zauberer *Hardy* bei seinem Zauberkunststück beobachten [3, 4, 5]. Wie jeder Zauberer kann er nicht wirklich zaubern. Er benutzt vielmehr einen Trick. Aber welchen?

	Alice	**Bob**	
1. Fall:	Farbe? grün!	Farbe? grün!	← tritt in einem gewissen Prozentsatz ($\neq 0$) der Fälle ein.
2. Fall:	Farbe? grün!	Gemüse? Erbsen!	Wenn eine Antwort „grün!" lautet, dann lautet die andere passend „Erbsen!".
	Gemüse? Erbsen!	Farbe? grün!	
3. Fall:	Gemüse?	Gemüse?	
	Mit Sicherheit antwortet mindestens einer der beiden mit „Karotten!"		

Box 1: Die Antworten, die Alice und Bob auf die verschiedenen Fragenpaare geben.

3 Hardys Zauberkunststück

Der große Zauberer *Hardy* verblüfft sein Publikum mit dem folgenden Zauberkunststück: Er hat eine Assistentin mit Namen Alice und einen Assistenten mit Namen Bob. Das Publikum sieht, wie der Zauberer Alice und Bob jeweils etwas übergibt. Alice und Bob gehen anschließend jeder in einen anderen gut nach außen isolierten Raum. In diese Räume können weder elektromagnetische Wellen noch Schallwellen oder andere Signale eindringen.

In beiden Räumen befindet sich Publikum. Es ist nicht wichtig, ob der Zauberer in einen der Räume mitgeht oder nicht. Es wird in jedem Raum eine Münze geworfen und abhängig vom Ergebnis des Münzwurfes eine Frage gestellt. Wenn der Münzwurf im Raum mit Alice das Ergebnis „Bild" hat, lautet die Frage: „Was ist Ihre Lieblingsfarbe?". Und dann gibt Alice zur Antwort entweder „grün!" oder „rot!". Wenn bei Bob der Münzwurf auf „Bild" führt, wird er von seinem Publikum ebenfalls nach der Lieblingsfarbe gefragt und antwortet auch wieder entweder mit „grün!" oder „rot!". Wenn der Münzwurf auf das Ergebnis „Zahl" führt, wird vom Publikum die Frage „Was ist ihr Lieblingsgemüse?" gestellt. Und Bob bzw. Alice antworten auf diese Frage immer entweder mit „Karotten!" oder mit „Erbsen!".

Wenn in beiden Räumen einmal die Münzen geworfen, die Fragen gestellt und die Antworten gegeben sind ist ein Durchgang beendet. Alice, Bob und der Zauberer kommen wieder zusammen und das Fragepaar sowie das Antwortpaar werden notiert. Der Zauberer übergibt beiden erneut jeweils einen Gegenstand und die ganze Prozedur beginnt von vorne. So wird eine große Zahl von Durchgängen absolviert und eine Liste der jeweiligen Frage- und der zugehörigen Antwortpaare angelegt.

Dem Publikum, das am Schluss wieder zusammenkommt, wird die Liste gezeigt. Das Publikum analysiert die Antworten (siehe Box 1) und schaut zunächst nach, wie geantwortet wurde, als sowohl Alice als auch Bob nach Farbe gefragt wurden (1. Fall). Es zeigt sich, dass in einem gewissen, nicht verschwindenden Prozentsatz der Fälle beide mit „grün!" geantwortet haben. Auch wenn der Zauberer das Kunststück an vielen Abenden wiederholt, gibt es stets Fälle, bei denen beide „grün!" geantwortet haben, wenn beide nach der Farbe gefragt wurden. Dann wendet sich das Publikum der Fragenkombination zu, bei der der eine der Befragten nach der Farbe und der andere nach dem Gemüse gefragt wurden (2. Fall). Nachschauen in der Liste zeigt, dass die Antworten immer dann perfekt zu einander gepasst haben, wenn einer mit „grün!" geantwortet hat, denn dann lautete die Antwort des zweiten „Erbsen!". Ohne Ausnahme wurden „grün!" und „Erbsen!" richtig kombiniert. Schließlich werden noch die Antworten verglichen, die gegeben wurden, wenn beide nach dem Gemüse gefragt wurden (3. Fall). Hier stellt das Publikum fest, dass in diesem Fall ohne Ausnahme mindestens einer der beiden mit „Karotten!" geantwortet hat.

So weit so gut. Das Publikum, das alle ihm vom Zauberer gestellten Aufgaben brav durchgeführt hat, fragt sich nun allerdings, warum das Ganze ein Zaubertrick sein soll. Der Zauberer Hardy kann das begründen. Er betont noch einmal, dass er Alice und Bob jeweils etwas gegeben hat. Die Antworten von Alice und Bob – genauer gesagt die Antwortpaare – sind nach wohl bestimmten Regeln gegeben worden, die das Publikum ja bereits abgelesen hatte. Sicherlich ist das nicht zu erreichen, wenn Alice und Bob ihre Antworten rein zufällig auswählen. Entscheidend ist, dass die Antworten in einer ganz bestimmten Weise korreliert sind. Diese Korrelation kann nur durch den Zauberer am Anfang des jeweiligen Durchgangs bewirkt worden sein. Er muss Alice und Bob entsprechende Informationen gegeben haben, aus denen sie jeweils entnehmen können, wie jeder auf die Frage nach der Farbe bzw. dem Gemüse zu antworten hat. Wir können uns vorstellen, dass Alice und Bob jeweils einen Zettel bekommen haben, auf dem z. B. diese Antworten standen und dass der Zauberer mit passenden Häufigkeiten geschickte Antwortkombinationen aufgeschrieben hat. Wenn das so gewesen wäre, müsste er nur noch die Texte auf den Zettelpaaren zusammen mit den Häufigkeiten der verschiedenen Paare verraten und das Publikum wäre hinter seinen Trick gekommen. Was könnte der Zauberer als Antworten aufgeschrieben haben?

4 Ein Erklärungsversuch

Haben Alice und Bob Zettel bekommen, auf denen spezielle Kombinationen der Farben und Gemüse standen? Welche Kombinationen könnten das sein? Es müssen wegen der Antwort auf die erste Fragenkombination („Farbe?", „Farbe?") ein oder mehrere Zettelpaare verteilt worden sein, bei denen auf jedem Zettel „grün" stand (siehe Box 2). Wir betrachten in Folgendem nur diese Zettelpaare. Es steht beim Verteilen der Zettel noch nicht fest, welche Fragen an Alice und Bob gerichtet werden. Es könnte also ein solches Zettelpaar vorliegen und es könnte tatsächlich die Kombination („Farbe?", „Gemüse?") gefragt werden. Bob muss daher auf seinem Zettel als Gemüsesorte „Erbsen" eingetragen haben, damit seine Antwort den Beobachtungen im 2. Fall entspricht. Andererseits könnte aber auch die Kombination („Gemüse?", „Farbe?") gefragt werden (2. Fall). Damit wieder beide richtig antworten, muss Alice auf ihrem Zettel ebenfalls „Erbsen" als Gemüsesorte stehen haben. Die Forderung, dass Alice und Bob bei diesen Zettelpaaren im ersten und zweiten Fall die richtige Antwort ablesen, legt also bereits vollständig fest, was auf den Zetteln stehen muss. Es könnte aber auch der dritte Fall eintreten, und es wird („Gemüse?", „Gemüse?") gefragt. Dann müsste mit Sicherheit mindestens einer der beiden mit „Karotten!" antworten. Die Antworten, die beide von Ihren Zetteln ablesen, lauten aber fälschlicherweise „Erbsen!" und „Erbsen!" (siehe Box 2). Damit ist das Zettelverfahren gescheitert und damit sind selbstverständlich auch alle anderen Verfahren gescheitert, bei denen statt der Zettel irgendwelche Objekte an Alice und Bob verteilt werden, aus denen eindeutig auf die zu gebenden Antworten geschlossen werden kann, bevor die beiden Fragen gestellt wurden. Eine solche Situation, in der klassische Information verteilt wird, lässt sich immer eindeutig auf die Zettelsituation abbilden.

Selbstverständlich kann man einwenden, dass die beiden Räume, in denen Alice und Bob befragt wurden, nicht gut isoliert waren. Um diesen technischen Einwand zu widerlegen, muss man die Fragen eines Fragenpaars möglichst gleichzeitig stellen und die Räume so weit von einander entfernen, dass ein Informationsaustausch nur mit Überlichtgeschwindigkeit stattfinden kann und daher unmöglich ist. Die Antworten von Alice und Bob zeigen auch dann noch die oben beschriebenen Regelmäßigkeiten. Als Ergebnis halten wir fest, was Hardys Zauberkunststück zeigt: Es gibt keinen Trick, um das Kunststück mit Mitteln der klassischen Physik durchzuführen. Oder hat der Zauberer vielleicht gar keinen Trick angewandt, und er kann wirklich zaubern (oder er hat paranormale Fähigkeiten)?

5 Der Zaubertrick

Im Publikum befindet sich ein Physiker, der sich mit dieser Annahme nicht richtig anfreunden kann, und der schon etwas von den „wunderbaren" Eigenschaften verschränkter Quantensysteme gehört hat. Sein Tipp: Der Zauberer arbeitet mit einem zusammengesetzten Quantensystem, das aus zwei Teilen besteht, und sich in einem verschränkten Zustand befindet. Dieser Gesamtzustand ist ganz speziell präpariert. Die Teilsysteme werden jeweils Alice und Bob übergeben, und die führen in ihrem Raum an dem Teilsystem, das sie erhalten haben, wohl bestimmte Messungen durch. Je nach Frage, die ihnen gestellt wird („Gemüse?" oder „Farbe?"), führen sie eine andere Messung durch. Aus dem Messergebnis, das sie erhalten, können sie nach einer Vorschrift eindeutig ablesen, wie sie die Frage zu beantworten haben. Soweit die Vermutung des Physikers.

Der Zauberer kann nur noch bestätigen, dass das tatsächlich sein Trick war. Nun folgt eine längere Begründung im Detail, bei der er angibt, in welchen Zustand das quantenmechanische Zwei-Teile-System von ihm versetzt wurde, wie an den Teilsystemen gemessen wurde und wie die

Es muss wegen 1. Fall
Zettelpaare geben, auf denen steht:

Alice	Bob
grün	grün ......

Damit für diese Zettelpaare im 2. Fall
die Fragekombination richtig beantwortet
wird, muss auf den Zetteln stehen:

Alice	Bob
grün Erbsen	grün Erbsen

Es müsste aber stets bei der 3. Fragekombination
(Gemüse?, Gemüse?) mindestens einer mit „Karotten!" antworten.

Diese Forderung ist nicht zu erfüllen.

Box 2: Die Erklärungsversuche im Rahmen der klassischen Physik scheitern.

Messergebnisse von Alice und Bob zu Antworten zu verarbeiten waren. Natürlich muss er auch noch verraten, ob er ein Photonenpaar oder zwei Teilchen mit Spin-1/2 oder ein anderes zusammengesetztes System zur Realisierung verwendet hat.

Nehmen wir an, dass der Zauberer ein verschränktes zusammengesetztes System aus zwei Photonen präpariert hat. Die Polarisationsrichtungen wie sie in Abb. 1 dargestellt sind, kodieren dann die Gemüsesorten und die Farben. Alice und Bob messen an ihren Photonen jeweils die Polarisationsrichtungen. Dabei kann der Analysator auf die Gemüsesorten gedreht werden oder aber auf die Farbsorten. Wenn sich das 2-Photonen-System im verschränkten Zustand

$$\left|\chi^{AB}\right\rangle = N\left(\left|r^{A}, r^{B}\right\rangle - a^{2}\left|E^{A}, E^{B}\right\rangle\right) \qquad (1)$$

befindet, ergeben viele Messpaare gerade die Ergebnisse der oben geschilderten drei Fälle. Zustände bei Alice und Bob werden mit hochgestelltem Index A und B gekennzeichnet. r bedeutet „rot", g bedeutet „grün", K bedeutet „Karotten" und E bedeutet „Erbsen". N ist ein Normierungsfaktor und die reelle Zahl a soll nicht gleich 1 sein. Leser, die etwas mit Quantentheorie vertraut sind, können leicht nachprüfen, dass sich dann alle Aussagen von Box 1 ergeben. Der Beweis findet sich in Box 3.

Das Prinzip des Beweises lässt sich leichter an einem anderen verschränkten 2-Photonen-Zustand veranschaulichen, der allerdings nicht auf die Ergebnisse des Zauberkunststückes führt. Der *Bell*-Zustand

$$\left|\Phi^{AB}\right\rangle = N\left(\left|r^{A}, r^{B}\right\rangle + \left|g^{A}, g^{B}\right\rangle\right) \qquad (2)$$

ist eine Superposition aus dem Zustand, bei dem bei Alice und Bob „grün" vorliegt und dem Zustand, bei dem bei beiden „rot" vorliegt. Beide Farben sind durch die Polarisationsrichtungen in Abb. 1 gegeben. Die Kippfigur des *Necker*'schen Würfels von Abb. 2 veranschaulicht diesen verschränkten 2-Photonen-Zustand. Der Neckersche Würfel stellt natürlich nur eine Analogie dar. Die beiden linken unteren Eckpunkte (Kugel und Würfel) entsprechen den Zuständen „grün" bzw. „rot" vom Teilsystem, das sich bei Alice

befindet. Die rechten Eckpunkte stehen für die Zustände des Teilsystems bei Bob. Das quantenmechanische Messen wird „durch Hinsehen“ des Lesers realisiert. Die Figur kippt in eine von zwei Möglichkeiten. Entweder sind als Ergebnis bei einer solchen Messung die beiden Kugelzustände vorn oder die beiden Würfelzustände sind vorn (Blick von oben oder von unten auf den Würfel). Immer wird bei Überführung des einen Teilsystems in einen Zustand auch das andere in den korrelierten Farbzustand überführt. Vor der Messung „durch Hinsehen“ ist der Zustand des *Necker*'schen Würfels eine klassisch unmögliche Superposition. Man kann keinen *Necker*'schen Würfel zusammenschrauben.
Als ein weiterer nicht-klassischer Effekt tritt aber zur Superposition noch hinzu, dass z. B. Bob „an seiner Ecke“ mit verdrehten Analysatoren (vergl. Abb. 1) messen kann. Alice macht eine Farbmessung, und als Messergebnis erhält sie „grün“. Bei Bob ist damit auch der Kugelzustand (Farbzustand) vorn. Er misst mit verdrehten Analysatoren, d. h. er fragt nach der Gemüsesorte, und bekommt als Antwort entweder „Erbsen“ oder „Karotten“. Damit ist eine Vielzahl korrelierter Antwortpaare möglich, die mit gewissen quantenmechanischen Wahrscheinlichkeiten auftreten. Bei dem vom Zauberer verwendeten Zustand von Gleichung (1) liegt eine ähnliche Situation vor, allerdings ergeben sich andere Korrelationen und Häufigkeiten. Sie sind oben in Kapitel 3 beschrieben worden.

Messungen in der orthonormierten $|E\rangle$-$|K\rangle$-Basis oder der dagegen gedrehten $|r\rangle$-$|g\rangle$-Basis.

$$|r\rangle = a|E\rangle + b|K\rangle;\ a \neq 1, a^2 + b^2 = 1 \tag{1}$$
$$|g\rangle = b|E\rangle - a|K\rangle;\ a, b \in \mathbb{R} \tag{2}$$

Aufgelöst:

$$|E\rangle = a|r\rangle + b|g\rangle \tag{3}$$
$$|K\rangle = b|r\rangle - a|g\rangle \tag{4}$$

Verschränkter Ausgangszustand (N ist Normierungsfaktor):

$$|\chi^{AB}\rangle = N\left(|r^A, r^B\rangle - a^2|E^A, E^B\rangle\right) \tag{5}$$

Umformen: (3) an verschiedenen Stellen in Gl. (5) eingesetzt:

$$|\chi^{AB}\rangle = N\left(|r^A, r^B\rangle - a^2\left(a|r^A\rangle + b|g^A\rangle\right)\left(a|r^B\rangle + b|g^B\rangle\right)\right) \tag{6}$$
$$|\chi^{AB}\rangle = N\left(|r^A, r^B\rangle - a^2\left(a|r^A\rangle + b|g^A\rangle\right)|E^B\rangle\right) \tag{7}$$
$$|\chi^{AB}\rangle = N\left(|r^A, r^B\rangle - a^2|E^A\rangle\left(a|r^B\rangle + b|g^B\rangle\right)\right) \tag{8}$$

Gl. (1) in Gl. (5) eingesetzt:

$$\begin{aligned}|\chi^{AB}\rangle &= N\left(\left(a|E^A\rangle + b|K^A\rangle\right)\left(a|E^B\rangle + b|K^B\rangle\right) - a^2|E^A, E^B\rangle\right)\\ &= N\left(\left(b^2|K^A, K^B\rangle + ab\left(|K^A, E^B\rangle + |E^A, K^B\rangle\right)\right)\right)\end{aligned} \tag{9}$$

Wahrscheinlichkeiten für die möglichen Messergebnisse:
Aus Gl. (6) folgt:

$$p(g^A, g^B) = N a^2 b^2 \neq 0. \tag{10}$$

Das ist der erste Fall. Aus Gl. (7) und (8) folgt:

$$p(g^A, K^B) = 0 \text{ und } p(K^A, g^B) = 0 \tag{11}$$

Wenn der eine mit „grün“ antwortet, dann antwortet der andere stets mit „Erbsen!“. Das ist der 2. Fall. Mit Gl. (8) ergibt sich der 3. Fall:

$$p(E^A, E^B) = 0. \tag{12}$$

Box 3: Die quantentheoretische Rechnung gibt die Beobachtungen richtig wieder.

6 Das Ergebnis

Die Geschichte vom Zauberer hat einen soliden physikalischen Hintergrund. Mit zusammengesetzten Quantensystemen, die sich im verschränkten Zustand von Gl. (1) befinden, sind Experimente durchgeführt worden, die in Analogie zu dem oben beschriebenen Zauberkunststück bestehen. Durch sie wurden die quantenmechanischen Aussagen, die den Aussagen in Box 1 entsprechen, gut bestätigt [6, 7]. Wie wir gesehen haben, widersprechen diese Aussagen dem lokalen Realismus. Für den gleichen Anwendungsbereich prognostizieren somit beliebige lokal-realistische Theorien einerseits und die Quantentheorie andererseits verschiedene Ergebnisse. Es gibt daher ein *experimentum crucis*, das eine Entscheidung zwischen den Theorien ermöglicht. Wir wissen, dass das Zauberkunststück gelingt. Die Quantentheorie wird bestätigt. Damit sind die lokal-realistischen Theorien experimentell widerlegt. Das *Einstein*'sche Programm ist gescheitert. *Bohr* sagte im Spaß, „dass er (*Einstein*) aufhören sollte, Gott zu erzählen, was er tun soll“ [8]. Erinnern wir uns daran, was *Einsteins* Grundmotiv war. Er wollte seine an der klassischen Physik orientierte Vorstellung von der Realität bestätigt finden. Stattdessen hat sich gezeigt: Die Wirklichkeit im Quantenbereich ist „anders“. Sie ist nichtlokal. Wir müssen weitere Einzelheiten der Struktur dieser Wirklichkeit an der Quantentheorie ablesen. Das geschieht, indem wir

Abb. 1: Orientierung der Analysatoren

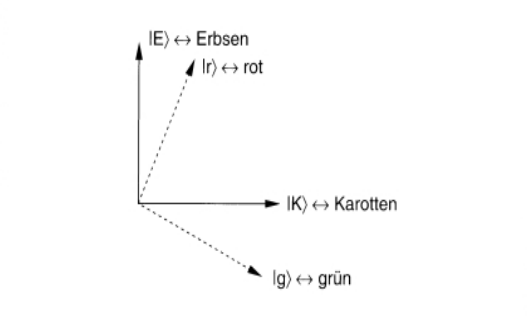
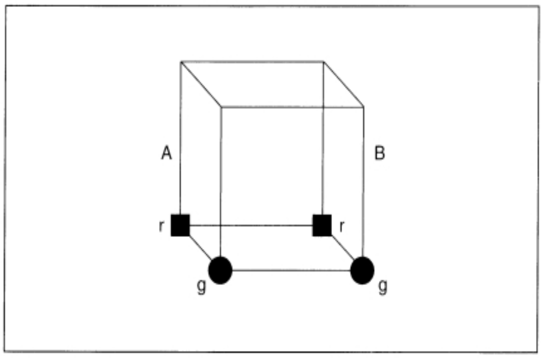


Abb. 2: Der *Necker*'sche Würfel: Ein klassisch unmögliches Objekt als Analogie zum verschränkten System.



das mathematische Schema der Quantentheorie physikalisch interpretieren. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten, beginnend mit der Kopenhagener Interpretation. Systeme die im verschränkten Zustand von Gl. (2) präpariert sind, ermöglichen experimentell eine präzise Widerlegung von lokal-realistischen Theorien für den Quantenbereich auf der Basis der *Bell*'schen Ungleichung. Für den Aufbau der entsprechenden Experimente und weiterführende Literatur verweisen wir auf [9] (Einführung) und [10] (Lehrbuch). Es kann insbesondere durch diese Experimente heute als gesichert angesehen werden, dass es zur Quantentheorie keine lokal-realistische Alternative gibt.
Einsteins Vorstellungen haben sich für den Quantenbereich nicht durchsetzen lassen. Es war aber keineswegs einfach sie zu widerlegen. Hierzu mussten aus Teilsystemen zusammengesetzte Quantensysteme in verschränkten Zuständen zunächst überhaupt einmal experimentell erzeugt werden und man musste lernen sie zu manipulieren. Die Theorie der verschränkten Zustände musste ausgebaut werden. Es ist verständlich, dass die dabei gewonnenen Einsichten und Ergebnisse auch auf andere physikalische Fragestellungen als *Hardys* Zaubertrick angewandt werden konnten. Tatsächlich hat sich daraus das heute schnell expandierende Gebiet der Quanteninformation entwickelt. Verschränkung ist heute ein physikalisches Hilfsmittel. Es findet Anwendung bei der Quantenteleportation, der Quantenkryptographie, bei Quantencomputern usw.. Was hier gezeigt werden sollte ist, dass zumindest teilweise diese Entwicklungen auch dadurch angestoßen wurden, dass *Einstein* seine Vorstellungen von der physikalischen Wirklichkeit so hartnäckig durchsetzen wollte. Er war unter den Wegbereitern der modernen Quantenphysik der Wegbereiter wider Willen.

Literatur

[1] *Einstein, A., Born, H.* und *Born, M.*: „Briefwechsel", Nymphenburger Verlagshandlung, München 1969.
[2] *Einstein, A., Podolsky, B.* und *Rosen, H.*: „Can quantum-mechanical description of reality be considered complete?", Phys. Rev. 47, 777-780 (1935).
[3] *Hardy, L.*: „Nonlocality for Two Particles without Inequalities for Almost All Entangled States", Phys. Rev. Lett. 71, 1665-1668 (1993).
[4] *Boschi, B., Branca, S., De Martini, F.* und *Hardy, L.*: „A Ladder Proof of Nonlocality without Inequalities: Theoretical and Experimental Results", Phys. Rev. Lett. 79, 2755-2758 (1997).
[5] *Hardy, L.*: „Spooky action at a distance in quantum mechanics", Contemporary Physics, 39, 419-429 (1998).
[6] *Torgerson, J. R., Branning, D., Monken, C. H.* und *Mandel, L.*: „Experimental Demonstration of the Violation of Local Realism without Bell Inequalities", Phys. Lett. A204, 323-328 (1995).
[7] *Di Giusepe, G., De Martini, F.* und *Boschi, D.*: „Experimental Test of the Violations of of Local Realism in Quantum Mechanics without Bell Inequalitites", Phys. Rev. A56, 1-6 (1997).
[8] *N. Bohr* zitiert bei *J. Bronowski*: „The Ascent of Man", Little, Brown and Co., Boston / Toronto 1973, S. 122.
[9] *Audretsch, J.* (Hrsg.): „Verschränkte Welt – Faszination der Quanten", Wiley-VCH, Weinheim 2002.
[10] *Audretsch*, J.: „Verschränkte Systeme – Die Quantenphysik auf neuen Wegen", Wiley-VCH, Weinheim 2005.

Anschrift des Verfassers:
Prof. Dr. *Jürgen Audretsch*, Fachbereich Physik, Universität Konstanz, Fach M673, 78457 Konstanz; E-Mail: Juergen.Audretsch@uni-konstanz.de