**1. Lokalität**

**Lokalität** *(auch: Mikrokausalität)* **ist im Sinne der Physik der Umstand, dass ein Ereignis sich nur auf**, und d.h. auch über **den unmittelbaren Raum auszuwirken vermag**. **Die Nichtlokalität hingegen beschreibt die Möglichkeit von Fernwirkungen**, d.h. von zwei oder mehreren räumlich getrennten, physikalischen Systemen. Diese beiden Begrifflichkeiten entstehen aus der grundsätzlichen Frage, unter welchen Bedingungen ein Ereignis ein anderes Ereignis beeinflussen kann.

**Die klassische und relativistische Physik ist lokal**. Man kann sich diesen Sachverhalt mithilfe eines Zahnradgetriebes veranschaulichen. Ein bewegtes Zahnrad kann nur ein anderes antreiben, wenn diese beiden direkt oder indirekt über weitere, zwischengelegene Zahnräder ineinandergreifen. Dass aber ein Zahnrad sich dreht und ein anderes, nicht mit diesem Zahnrad in irgendeinem räumlichen Bezug stehendes Zahnrad, sich aufgrund dessen plötzlich auch bewegt ist in unserer Welt nicht möglich. Das heißt unser Makrokosmos ist lokal *(was nicht ganz richtig ist)*. Nehmen wir an, ein Mensch A nimmt einen anderen Ort im Raum als ein Mensch B und ist somit von ihm verschieden. MA kann MB nur beeinflussen, wenn die Auswirkungen seines Handelns den zwischen ihnen beiden liegenden Raum überbrückt. So kann MA beispielsweise zu MB laufen und ihm die Hand schütteln. Oder MA wirft MB einen Ball zu und überwindet somit die räumliche Trennung. Es kann auch MB nach MA rufen und damit über zu Schallwellen formierte Luftmoleküle mit diesem interagieren. Auf subtiler, nicht so klar ersichtlicher Weise durchqueren die Auswirkungen von MA´s Handlungen den Raum bis MB, wenn er diesen sieht *(*[*für uns sichtbare elektromagnetische Wellen*](https://www.philoclopedia.de/einzeldisziplinen/relativit%C3%A4tstheorie/lichtkonstante/)*)*oder mit diesem telefoniert *(elektromagnetische Wellen im Radiofrequenzbereich)*. [Selbst wenn der Mond plötzlich verschwunden wäre, würde es einige Zeit brauchen bis seine gravitativen Auswirkungen im Meer auch nicht mehr da wären. Auch die Auswirkungen der Gravitation verlaufen nicht instantan, sondern müssen Raum überbrücken und können ergo nicht schneller als Licht sein](https://www.philoclopedia.de/einzeldisziplinen/relativit%C3%A4tstheorie/allgemeine-relativit%C3%A4tstheorie/).



**2. Die Frage und das Problem**

Albert Einstein störte sich seit ihrer Geburt an der Quantentheorie, und ihrer komischen Konsequenzen. **Wenn wir bei der Messung gewisse Eigenschaften eines Teilchens *(z.B.: den Ort)*vorfinden, wäre es doch vernünftig anzunehmen, dieses Teilchen hätte die vorgefundenen Eigenschaften auch bereits vor dem Messakt besessen *(z.B.: Lokalisation)*. So zumindest Einstein.** Sein Kollege Niels Bohr war anderer Meinung. Nach ihm sei die [Wahrscheinlichkeitswelle](https://www.philoclopedia.de/einzeldisziplinen/quantenmechanik/wellenfunktion/) real und ein Teilchen vor der Messung eben *verschwommen*.

Was also ist beispielsweise die [HUR](https://www.philoclopedia.de/einzeldisziplinen/quantenmechanik/heisenbergsche-unsch%C3%A4rferelation/)? Sagt sie nur etwas über unsere Kenntnis von oder die Wirklichkeit selbst aus? Haben quantenphysikalische Objekte wie auch Gegenstände in unserer klassischen Erfahrung immer einen Ort und Impuls und wir können diese dort nur nicht messen? Oder sind Quantenobjekte, so wie wir sie beschreiben, auch wirklich und sind vor der Messung in Ort, Impuls, Spin etc. nun einmal unbestimmt? In der Physik ist strenggenommen nur das ein Teil des Weltbildes, was auch nachgewiesen werden kann. Wenn man aber ein Teilchen misst, beeinflusst man es dadurch zwangsläufig und verfälscht somit die Messung. **Wie aber soll man nun etwas empirisch ergründen, ohne es zu messen?**

**3. EPR-Effekt**

**3.1. das Anliegen**

Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen *(daher****EPR)*** **glaubten nicht,**[**dass zwei komplementäre Eigenschaften eines Quantenobjektes nicht gleichzeitig exakt messbar seien**](https://www.philoclopedia.de/einzeldisziplinen/quantenmechanik/heisenbergsche-unsch%C3%A4rferelation/). Die ungemessenen Teilcheneigenschaften seien allein uns unbekannt, nicht undefiniert. Sie wollten daher zeigen, dass die bisherige Quantenmechanik als Naturbeschreibung unvollständig ist. Damit meinten EPR, dass es **verborgene Variablen** gebe, die bereits vor der Messung die unbekannten Eigenschaften beinhalten. Jede dieser Eigenschaften würde bei der Entdeckung dann nicht festgelegt, sondern nur entdeckt. **Und da die Quantenmechanik keine solche Variable enthält, ist sie unvollständig bzw. nicht real**. Dafür müssten sie aber zuerst beweisen, dass ein Teilchen zu jedem Zeitpunkt einem bestimmten Aufenthaltsort und einer bestimmten Geschwindigkeit zuzuordnen ist.

**3.2. der Versuchsaufbau**

Es gibt mehrere experimentelle Anordnungen, die den EPR-Effekt aufzeigen. Welche dabei beleuchtet wird, ist sekundär. Primär geht es um das dahinterstehende Argumentationsprinzip. Daher nun eine relativ einfache und anschauliche Variante. Zunächst befinden sich zwei Teilchen mit komplementären Eigenschaften in einem Quellort und wechselwirken in diesem miteinander. Dieser kann beispielsweise ein größeres, bis dato ruhendes Teilchen sein, aus dessen Zerfall die zwei kleineren hervorgehen. Nach dem *„****Spinerhaltungssatz***“ ist der Gesamtspin *(Summe der Spins der einzelnen Teilchen)* der Teilchen *(Eigendrehimpuls)*, sofern diese nicht mit weiteren Parametern wechselwirken, stets der gleiche. Man kann sich das so vorstellen, dass sich das eine Teilchen genau so stark nach waagrecht wie das andere senkrecht um die eigene Achse bewegt. Die Vorzeichen sind entgegengesetzt und der Gesamtspin beider Teilchen Null. Vom Quellort aus bewegen sich die beiden Teilchen nun mitsamt ihren komplementären Observablen etwa diametral voneinander weg. Wenn man jetzt den Spin des einen Teilchens misst, müsste sich nach dem *„Spinerhaltungsssatz“* unverzüglich auch den des anderen definieren. Damit hatten EPR einen Weg gefunden, eine Teilcheneigenschaft zu messen, *(vermutlich)* ohne das zugehörige Teilchen zu beeinflussen. Man misst quasi indirekt über ein anderes Teilchen. Sie haben zwei Teilchen miteinander **verschränkt**. **Sobald ich etwas über eine Eigenschaft eines Teilchens A weiß, kann ich aufgrund dessen sofort auch etwas über eine entsprechend komplementäre Eigenschaft eines verschränkten Teilchens B aussagen**. Hierin sahen EPR einen Widerspruch der Heisenbergschen Unschärferelation



**3.3. die Idee**

EPR argumentieren nun wie folgt. Da die Teilchen jetzt verschränkt sein müssten, quasi etwa durch Erhaltungssätze miteinander gekoppelt sind, müsste man beide auch durch einen einzigen quantenmechanischen Zustand, mithilfe bloß einer [Wellenfunktion](https://www.philoclopedia.de/einzeldisziplinen/quantenmechanik/wellenfunktion/) beschreiben können. Wenn also die Teilcheneigenschaften vor dem Zeitpunkt der Messung unbestimmt seien. Und wenn nur die Wenn-dann-Korrelation komplementärer Teilcheneigenschaften bekannt seien. Dann müsste nun beispielsweise die exakte Messung des Impulses von einem der beiden verschränkten Teilchen den Ort des anderen definieren. Gleiches gilt für Teilchen gegensätzlicher Polarisation. Falls ein Photon waagerecht polarisiert ist, dann ist das andere sicher senkrecht polarisiert. So weit, so gut. Für einen solchen Effekt müssten die verschränkten Teilchen Informationen miteinander austauschen. [Die Maximalgeschwindigkeit für einen Informationsaustausch liegt laut der speziellen Relativitätstheorie bei Lichtgeschwindigkeit](https://www.philoclopedia.de/einzeldisziplinen/relativit%C3%A4tstheorie/lichtkonstante/). **Wenn sich jedoch ein Teilchen am einen und das andere am anderen Ende des Universums befände und die Messungen sehr zeitnah erfolgen, dann ist ein rechtzeitiger Informationsaustausch nicht möglich**. **Würden aber experimentell nun beide Messungen mit hoher Genauigkeit gelingen, dann müssten die Teilcheneigenschaften bereits vorher festgelegt sein. Das Postulat von EPR war letztlich, dass jedem Element der physikalischen Realität bei einer vollständigen Theorie eine Entsprechung zukommen müsse**. **Und weil die Quantenmechanik, allen voran die HUR,  die ungemessenen Teilcheneigenschaften außer Acht lässt, sei sie unvollständig oder falsch.**

**4. Bellsche Ungleichung**

**Die Bellsche Ungleichung gilt in allen physikalischen Theorien, die realistisch und lokal, sprich klassisch sind**. Formuliert wurden sie 1964 von dem Physiker Bell und kann als eine Antwort auf den EPR-Effekt gesehen werden. **Die Quantenmechanik verletzt die Bellsche Ungleichung**. Das bedeutet, dass **die Quantenmechanik auch nicht durch Hinzufügen verborgener Variablen vervollständigt werden kann und folglich tatsächlich keine realistische und lokale  Theorie ist**. Deshalb ist das **EPR-Argument obsolet**.

Die **Theorie verborgener Variablen** besagt, dass verschränkte Teilchen feste Eigenschaften besitzen, die aber unserer unmittelbaren Messung nicht zugänglich sind. Diese **wurde durch die gemessene Verletzung der Bellschen Ungleichung bei verschränkten Photonenpaaren falsifiziert**. Damit schaffte die Bellsche Ungleichung, was lange Zeit als unmöglich galt, **eine** *„****empirische Messung a priori****.“* Der Grundgedanke ist ähnlich wie bei EPR. Die Einzelheiten hochkomplex, weswegen ich mich auf  das Wesentliche beschränken möchte. Wenn es nun eine verborgene Variable, wie sie Einstein, Podolsky und Rosen postulierten, gäbe, dann werden die Teilcheneigenschaften bereits vor der lokalen Trennung festgelegt. In diesem Falle würden die Messergebnisse so ausfallen, dass die Bellsche Ungleichung immer eingehalten ist. Dies ist jedoch nicht der Fall, vielmehr bestätigen die mittlerweile u.a. durch Alain Aspect realisierten, praktischen Messungen die Quantentheorie. Ergo gibt es keine verborgenen Variablen und die Quantentheorie hat sich bewährt.

**Dies alles spricht sehr stark für tatsächliche Zufälle, Instantität, Nichtlokalität, Nichtrealität und all die anderen Quanten-Merkwürdigkeiten**.

**5. keine klassische Theorie**

EPR haben nicht nur die Grundlage für den Beweis der Nichtrealität geliefert, die sie ja eigentlich widerlegen wollten. Sie haben, unbewusst der Tragweite ihrer Idee, auch das ebenso komische Phänomen der Nichtlokalität von Quantenobjekten aufgedeckt.

**So werden laut der**[**Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik**](https://www.philoclopedia.de/einzeldisziplinen/quantenmechanik/interpretationen-der-quantenmechanik/)**in selbiger insbesondere drei Prinzipien aufgegeben:**

* **Realität**
* **Lokalität**
* **Kausalität**

Damit wurden die metaphysischen Grundprämissen von EPR experimentell widerlegt. Die Quantenmechanik erfüllt entgegen ihrer Vermutung nicht alle Eigenschaften einer klassischen Theorie. Es gibt zwar neben der Kopenhagener noch weitere Deutungen, die einzelne Prinzipien wieder aufgreifen. So ist die Quantenwelt nach der bohmschen Mechanik zwar real, aber nicht lokal. Die [Viele-Welten-Interpretation](https://www.philoclopedia.de/einzeldisziplinen/quantenmechanik/interpretationen-der-quantenmechanik/) erfordert gar Myriaden unbeobachteter Welten. Und so lässt sich etwas flapsig sagen: es ist egal, wie man die Quantenmechanik interpretiert, sicher ist dass sie vollkommen komisch weil kontraintuitiv ist. Im Folgenden werde ich mit der Kopenhagener Deutung, da die bekannteste, operieren.

[Die Akausalität von Teilen der Quantenmechanik ist in der Heisenbergschen Unschärferelation beschrieben und im verlinkten Aufsatz näher erläutert](https://www.philoclopedia.de/einzeldisziplinen/quantenmechanik/heisenbergsche-unsch%C3%A4rferelation/).

**5.1. nicht-real**

**Eine physikalische Theorie ist  realistisch, wenn Eigenschaften unabhängig von Messungen existieren**. Es ist dabei sekundär, ob diese Eigenschaften uns bekannt sind, oder *(z.B.: aufgrund verborgener Variablen)* nicht. **Demnach ist die Quantenmechanik nicht-real, da im Laufe des Messprozesses nicht zuvor existierende Eigenschaften abgelesen, sondern neue Eigenschaften erst hergestellt werden**.

**2. nicht-lokal**

**Eine physikalische Theorie ist lokal, wenn sich zwei räumlich getrennte Teilchen nicht unmittelbar aufeinander auswirken können**. **Demnach ist die Quantenmechanik nicht-lokal**, weil sich die Wahl dessen, was bei einem Teilchen gemessen wird, unmittelbar auf das andere auswirken kann. Oder allgemeiner, **weil sich der quantenmechanische Zustand des Teilchenpaares über beide Messplätze erstreckt.** **Dieses physikalische Phänomen wird als Quantenverschränkung bezeichnet**. **Eine Quantenverschränkung ist eine nichtlokale Verbindung mehrerer Teilchen auf subatomarer Ebene**. Eine *„spukhafte Fernwirkung“* (Einstein) gibt es also tatsächlich und daher bedarf es auch keiner *zwischengeschalteten Rädchen*. Zwei Systeme, die sich an entgegengesetzten Stellen des Universums befinden, können ohne Zeitverzögerung wechselwirken.

**Verweise**:

* #Quantenverschränkung #Relativitätstheorie

Quellen

Bild *(Zahnräder)*: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1b/Fotothek_df_rp-d_0410064_Bernsdorf-Gro%C3%9Fgrabe._Forstm%C3%BChle%2C_Inneres%2C_Getriebe%2C_um_1963-65_%28Bildersammlung_H.jpg>