

# **AUCH EHNINGEN HAT KEINE VERSTECKTEN VARIABLEN**

Realisierung des Nobelpreisexperiments auf  
dem IBM Quantum System One in Ehningen

White Paper

Daniel Pranjić, M. Sc.

Stuttgart, 13. Oktober 2022

Dieses Jahr wird der Nobelpreis in Physik an die Wissenschaftler Alain Aspect, John F. Clauser und Anton Zeilinger für ihre Experimente mit verschränkten Photonen vergeben. Mit ihren Experimenten konnten sie einen der größten Kritiker an der Verschränkung, nämlich Albert Einstein, schlussendlich doch davon überzeugen, dass die Quantenphysik Naturgesetzen gehorcht, die weder ‚lokal‘ noch ‚real‘ sind. Mit Lokal ist gemeint, dass wenn zwei Systeme hinreichend weit voneinander entfernt sind, nichtmehr miteinander interagieren. Diese Eigenschaft einer Theorie ist Einstein, der für seine Hypothese, dass das Universum ein Tempolimit hat, nämlich die Lichtgeschwindigkeit, sehr wichtig gewesen. Schließlich ist das einer der grundlegenden Bausteine seiner Relativitätstheorie. Auf der anderen Seite ist mit real gemeint, dass zu jedem Element der Realität ein entsprechendes Pendant in der Theorie existieren muss. Ansonsten ist die Theorie, die die Realität beschreibt, nicht vollständig.

(Referenz: [Phys. Rev. 47, 777 \(1935\) - Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? \(aps.org\)](#))

Aber was ist Verschränkung? Erwin Schrödinger (dessen imaginäre Katze berühmt geworden ist), der den Begriff prägte, schrieb in einer seiner Arbeiten 1935:

(Referenz: [Discussion of Probability Relations between Separated Systems | Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society | Cambridge Core](#))

‘When two systems, of which we know the states by their respective representatives, enter into temporary physical interaction due to known forces between them, and when after a time of mutual influence, the systems separate again, then they can no longer be described in the same way as before, viz. by endowing each of them with a representative of its own. I would not call that one but rather the characteristic trait of quantum mechanics, the one that enforces its entire departure from classical lines of thought. By the interaction, the two representatives (or  $\psi$ -functions) have become entangled.’

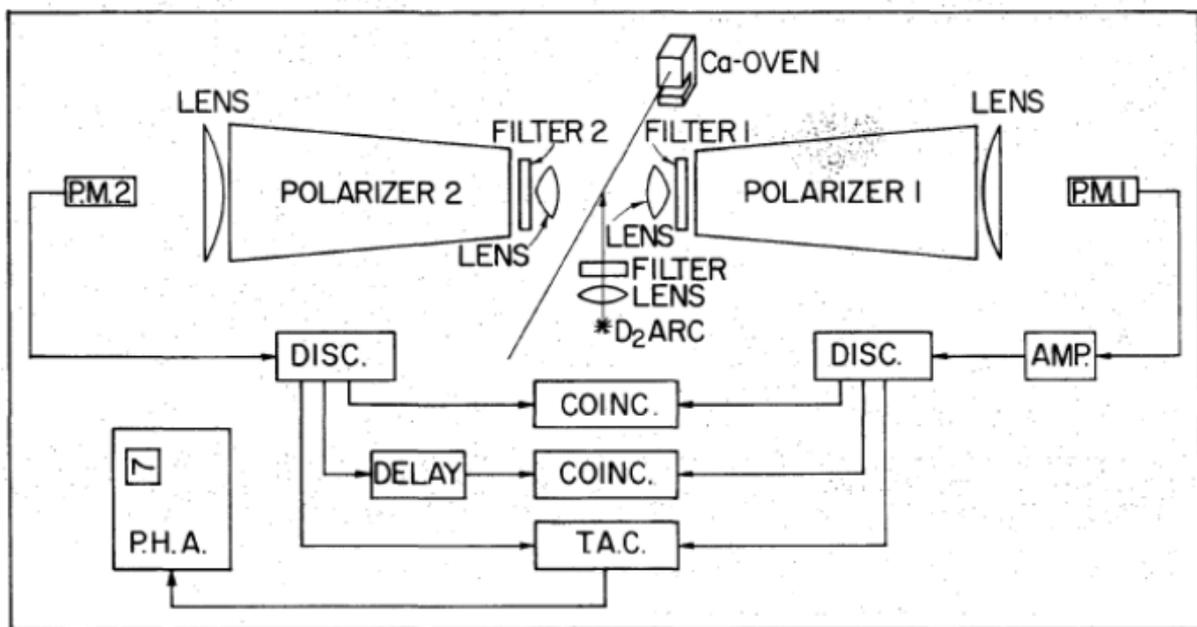
Oder mit anderen Worten, zwei Quantensysteme, die miteinander in Kontakt getreten sind und dann getrennt werden, lassen sich nichtmehr getrennt voneinander beschreiben. Messe ich zum Beispiel den Zustand von System A, erhalte ich Informationen darüber in welchen Zustand sich System B befindet. Wenn ich das in bestimmter Weise mache, kann ich sogar die Wellenfunktion des anderen Systems komplett kollabieren, also mit hundertprozentiger Wahrscheinlichkeit wissen, was bei einer Messung herauskommt. Die Messung an einem System beeinflusst den Zustand des anderen Systems, und zwar instantan – Einstein gefiel das nicht wegen seines Tempolimits und nannte dieses Phänomen daher ‚spukhafte Fernwirkung‘.

Wie sich herausstellt ist es kein Widerspruch zur Relativitätstheorie, da Information weiterhin nur mit maximal Lichtgeschwindigkeit übertragen werden kann. D.h. wenn Alice und Bob sich ein maximal verschränktes Teilchenpaar teilen und sich weit voneinander entfernen, Alice dann den Zustand ihres Teilchens misst und ihre Information an Bob übergeben möchte, dann erhält Bob diese Information nicht schneller als Licht zu ihm gelangen kann. Trotzdem kollabiert der Zustand von Bobs Teilchen instantan mit Alices Teilchen. Daher war der Standpunkt der Debatte unter den Physikern, dass entweder versteckte Variablen existieren, die wir nicht kennen, die Theorie aber lokal-real ist oder dass die Theorie keine versteckten Variablen hat und nicht lokal-real ist.

Diese Debatte grenzte an die Philosophie – es war nicht bekannt, wie man im Experiment messen kann, ob die Naturgesetze lokal-real sind oder nicht. Es gab Beweise vom berühmten Mathematiker John von Neumann, dass es unmöglich ist die Quantenphysik mit versteckten Variablen zu vervollständigen und so ging für die meisten Physiker dieser Zeit diese grundlegende Frage unter. Es wurden zwar weiter Interpretationen für die Quantenphysik aufgestellt, wie die Viele-Welten- oder Bohm-Interpretation, doch nur ein kleiner Teil beschäftigte sich weiterhin mit den Grundbausteinen der Quantentheorie. Einer der Gründe dafür ist, dass die anderen Interpretationen keine testbaren Vorhersagen lieferten, die sich von denen der Standardquantenphysik unterscheiden. Viele Physiker hielten diese Vorschläge daher für eher esoterisch und diskutierten diese lieber nur in den Kaffeepausen oder überließen es den Philosophen.

Erst 1964 als John Bell, die nach ihm benannten Ungleichungen aufstellte, gab es eine Möglichkeit im Experiment die Natur auf lokalen Realismus bzw. den versteckten Variablen zu testen. (Referenz: [Physics Physique Fizika 1, 195 \(1964\) - On the Einstein Podolsky Rosen paradox \(aps.org\)](https://arxiv.org/abs/195.1964)) Mit dieser spektakulären theoretischen Entdeckung wurde aus dem zuvor philosophischen Thema ein physikalisches. Es stellte sich aber heraus, dass sein Gedankenexperiment Annahmen über Detektoren gemacht hatte, die damals nicht auf reale Detektoren im Experiment übertragbar waren.

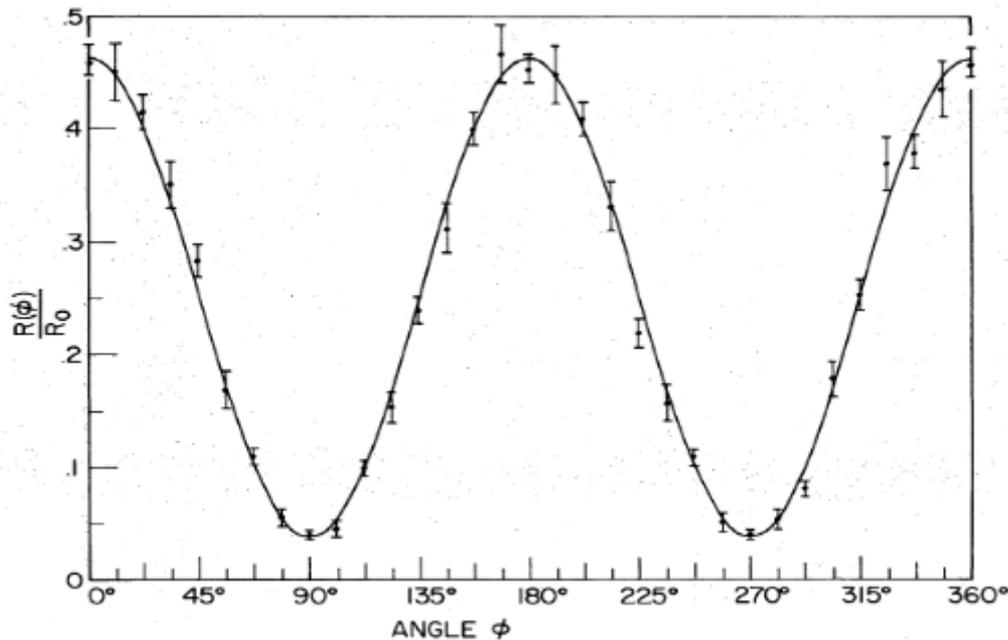
Dieses Hindernis wurde aber im Jahre der Mondlandung 1969 durch John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony und Richard Holt beseitigt, indem sie eine Variation der Bell Ungleichung aufstellten – die nach ihnen benannte CHSH Ungleichung. Nun war es prinzipiell möglich gewesen durch ein Experiment mit verschränkten Photonen und bestehender Technologie der grundlegenden Frage des lokalen Realismus nachzugehen.



Durch das Sättigen eines bestimmten Übergangs in Calcium konnten die verschränkten Photonen erzeugt werden.

(Referenz: [https://www.researchgate.net/publication/243454499\\_Polarization\\_Correlation\\_of\\_Photons\\_Emitted\\_in\\_an\\_Atomic\\_Cascade](https://www.researchgate.net/publication/243454499_Polarization_Correlation_of_Photons_Emitted_in_an_Atomic_Cascade))

Der Aufbau des Experiments dauerte Clauser und Kocher zwei Jahre und die Messung der Daten ungefähr 200 Stunden, da die Effizienz maximal verschränkte Photonen zu erzeugen sehr gering war.



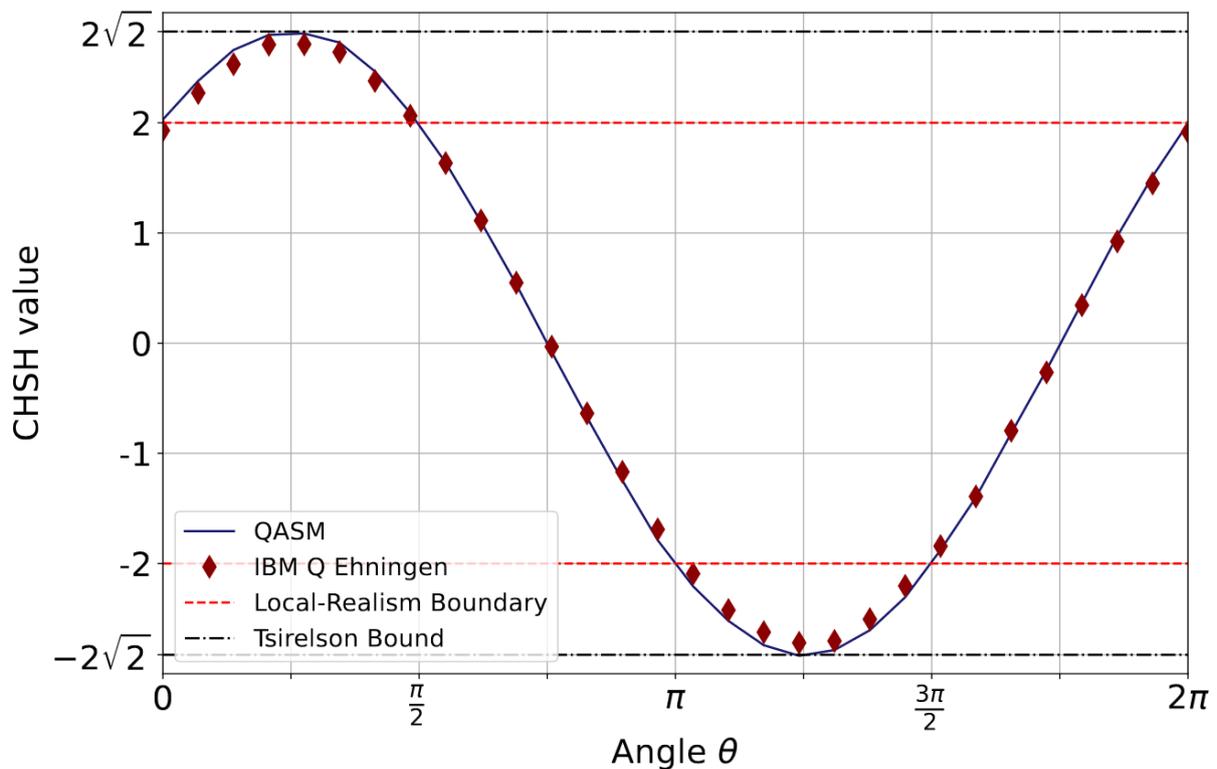
In diesem komplizierten Experiment wurden die Koinzidenzen der Photonen gemessen und durch Verändern des relativen Winkels der beiden Polarisatoren zueinander, konnten sie eine Polarisationskorrelation messen, die der theoretischen Kurve der Quantentheorie entsprach. Trotz des großen Erfolgs war dadurch die Lokalität noch nicht ausgeschlossen. In jeder Theorie gibt es Annahmen unter denen Relationen hergeleitet werden und im Fall der Bell Ungleichungen ist die Annahme, dass die beiden Detektoren unabhängig voneinander in zufällige Bezugsrichtungen messen. Der nächste Schritt war es also das Experiment zu modifizieren und u.a. auch die Detektoren weit genug voneinander zu bringen, sodass die Detektoren untereinander sich nicht schnell genug beeinflussen können, wie das Licht durch den Aufbau geführt wird. Der erste dem dies gelang war Alain Aspect, der 1981/82 zusammen mit seinen Kollaboratoren Grangier, Roger und Dalibard an der Sache dran war. Er konnte eine Verletzung der Bell Ungleichung mit einer 10-fachen Standardabweichung durchführen, verglichen mit der 6-fachen Standardabweichung von Freedman und Clauser. Aspect stellte sicher, dass die Unabhängigkeit der Bezugsrichtung der Detektoren voneinander gewährleistet wird, indem während die Photonen zu den Detektoren fliegen, die Wahl der Bezugsrichtung zufällig bestimmt wird. Für wahrhaft zufällige Einstellungen war die Distanz der Detektoren mit 12 Metern zu klein. Erst mehr als 15 Jahre später im Jahr 1998 gelang es der Gruppe von Anton Zeilinger die Distanz auf 400 Meter zu erhöhen und mit Hilfe zahlreicher technischer Verbesserungen, alle Zweifel zu beseitigen, dass die Natur nicht durch eine lokal-reale Theorie beschrieben werden kann. (Referenz: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.81.5039>).

Mittlerweile schickt man verschränkte Photonenpaare durchs Weltall über Satelliten und lässt sie bis zu 2400 km entfernt an einem anderen Ort auf der Erde landen.

(Referenz: <https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/5.0073040>).

Kleines Fazit bis hierher: Vom Begriff der Verschränkung und dem Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon 1935, hat es fast 30 Jahre gebraucht überhaupt zu wissen, wie man experimental an die Fragestellung herangehen kann. Nochmal 35 Jahre länger hat es bis zur experimentellen Validierung gedauert. Und in diesem Jahr - knapp 100 Jahre später wird der zugehörige Nobelpreis an drei der an dieser Geschichte beteiligten Physiker verliehen.

In unserer heutigen Zeit ist durch den experimentellen Fortschritt vieles leichter geworden. Tatsächlich kann man das Experiment auf unseren heutigen Quantencomputern ohne große Schwierigkeiten nachstellen. Wir vom Fraunhofer IAO haben deshalb auf dem Quantencomputer in Ehningen von unserem Partner IBM genau das gemacht.



Nach dem Prinzip des lokalen Realismus, darf der ‚CHSH value‘ (aus der CHSH Ungleichung) nicht größer 2, aber auch nicht kleiner als -2 werden. Man sieht aber eindrucksvoll, dass bei bestimmten Rotationswinkeln, diese Grenze leicht überschritten wird und wir sogar sehr nahe den theoretisch möglichen Maximalwert, dem sogenannten Tsirelson Bound kommen, trotz des Rauschens der heutigen Quantenhardware. Realisiert wurde dies durch analoge Quantenschaltkreise, die wie im Originalexperiment, sogenannte Bell-Paare erzeugen, die maximal verschränkt sind. In vier zufälligen Einstellungen für die Messrichtung und in Abhängigkeit von dem Rotationswinkel wurden dann die Experimente ausgeführt. Glücklicherweise ist die Effizienz der Erzeugung von maximal verschränkten Qubits deutlich höher als damals mit den Calcium Atomen, wodurch uns die Durchführung des Experiments 10 Minuten anstatt 200 Stunden gedauert hat. Das Experiment aufzubauen, ging schnell, da IBM mit ihrem Quantencomputer eigentlich bereits die ganze Vorarbeit geleistet haben und wir über die Cloud darauf zugreifen können. Nur in einem Punkt existiert der Haken, dass die beiden Qubits nah beieinander sind und die vollständige Unabhängigkeit der Detektoren voneinander dadurch nicht gewährleistet ist. Dennoch wird veranschaulicht wie die Technologie heutzutage vorangeschritten ist.