

Revolutionäre der Quantenphysik

Alain Aspect, John Clauser und Anton Zeilinger haben mit ihren Experimenten wesentliche Grundlagen für die Quantentechnologie gelegt.

Thorsten Schumm und Harald Weinfurter



John F. Clauser (geb. 1942 in Pasadena, Kalifornien, USA, oben Anfang der 1970er-Jahre in seinem Labor) studierte am Caltech und promovierte an der Columbia University. Nach Stationen am Lawrence Berkeley National Lab und am Lawrence Livermore National Lab forschte er an der University of California, Berkeley. Seit 1997 arbeitet er selbstständig als Physiker, Berater und Erfinder.

Alain Aspect, John F. Clauser und Anton Zeilinger teilen sich den diesjährigen Physik-Nobelpreis für ihre „Experimente mit verschränkten Photonen, welche die Verletzung der Bell-Ungleichungen nachwiesen und den Weg für die Quanteninformationswissenschaft ebneten“.

Erwin Schrödinger prägte mit „Verschränkung“ den Begriff für ein Phänomen der Quantenphysik, das auch heute noch tiefgehende Fragen aufwirft, aber gleichzeitig zu einer der wichtigsten Ressourcen der Quantentechnologie geworden ist [1]. Albert Einstein wies 1935 zusammen mit Boris Podolsky and Nathan Rosen anhand ihres berühmten Gedankenexperiments [2] darauf hin, dass der lokal-realistische Standpunkt der klassischen Physik bei der Verschränkung infrage gestellt wird. Ein möglicher Ausweg wäre es, den Teilchen individuelle Eigenschaften zuzuschreiben, die in „verborgenen Variablen“ definiert sind. Diese Variablen würden das Verhalten bei Messungen steuern und damit den quantenmechanischen Zufall vortäuschen. Allerdings – darauf hat Einstein bereits hingewiesen – wäre für die Beschreibung verschränkter Paare auch eine „spukhafte Fernwirkung“ notwendig, um die Information schneller als mit Lichtgeschwindigkeit zu übermitteln.

Den Weg aus den reinen Gedankenexperimenten wies in den 1960er-Jahren der irische Theoretiker John Stewart Bell

[3]. Er entwickelte die nach ihm benannte mathematische Ungleichung, die besagt, dass bei Vorhandensein verborgener Variablen und ohne spukhafte Fernwirkungen die Korrelation zwischen den Ergebnissen von Messungen an einer großen Zahl von Teilchenpaaren niemals einen bestimmten Wert überschreitet. Die Quantenmechanik sagt jedoch voraus, dass die Messergebnisse von verschränkten Teilchenpaaren gegen die Bellsche Ungleichung verstoßen und es daher erlauben, die Gültigkeit lokal-realistischer Konzepte zu überprüfen.

John F. Clauser und Stuart Freedman (1944 – 2012) befassten sich Anfang der 1970er-Jahre an der UC Berkeley mit Bells Ideen. In ihrem Experiment [4] werden jeweils die Photonenpaare, die bei einer Zerfallskaskade im Kalzium entstanden, auf einen Polarisator geleitet (parallele Glasplatten unter Brewster-Winkel), der nur eine bestimmte (lineare) Polarisationsrichtung durchlässt. Damit gelang Clauser und Freedman ein Analogon zum Stern-Gerlach-Experiment, mit dem sie zeigen konnten, dass die gemessenen Korrelationen gegen Freedmans Variante der Bell-Ungleichung verstießen und somit einen starken Hinweis dafür lieferten, dass sich die Quantenmechanik nicht durch eine lokale Theorie mit versteckten Variablen (engl.: local hidden-variable (LHV) theory) ersetzen ließ.

Dennoch blieben bei diesem wegweisenden Experiment einige Lücken („Loopholes“) für LHV-Theorien bestehen [5]. Die wichtigsten sind die geringe Entfernung zwischen den Messgeräten zusammen mit der Tatsache, dass deren Orientierung nur selten geändert wurde. Ein anderes Loophole entsteht, wenn man annimmt, dass die wenigen Photonenpaare, die auch wirklich detektiert wurden, zwar die Freedman- oder die Bell-Ungleichung verletzen. Die LHV könnten aber bewirken, dass die Resultate der nichtdetektierten Photonenpaare die Korrelationen wieder reduzieren und zu keiner Verletzung führen. Und schließlich könnten, da die Messeinstellungen schon lange vorher gewählt waren, auch die LHVs entsprechend an die Photonenpaare verteilt worden sein. Die LHV-Theorien sind ungemein flexibel.

Nach mehreren Experimenten zeichnete sich zum Ausgang der 1970er-Jahre eine „Tendenz“ in Richtung der quantenmechanischen Interpretation ab, jedoch mit großen Unsicherheiten und intensiven Diskussionen über die Fehlerabschätzungen und die verbleibenden Loopholes.

Hier setzte Alain Aspect an, dessen Interesse an der Quantenmechanik während seiner Zeit als Physiklehrer in Yaoundé in Kamerun entfacht wurde, in der er auf das 1973 erschienene Lehrbuch „Mécanique Quantique“ von Claude Cohen-Tannoudji, Bernard Diu und Franck Lalö stieß. Zurück an der ENS Cachan zeigte ihm 1974 Chris-

tian Imbert, späterer Direktor des Institut d'Optique, eine Sammlung früher Texte zum Phänomen der Verschränkung, darunter Arbeiten von John Bell. Entgegen wohlgeheimer Ratschläge beschloss Aspect im Rahmen seiner Doktorarbeit, die im Übrigen später auch von Bell und Cohen-Tannoudji begutachtet wurde, neue Messungen zur Bellschen Ungleichung zu machen. Aspect beschrieb in seiner Dissertation drei Experimente zu polarisationsverschränkten Photonenpaaren [6].

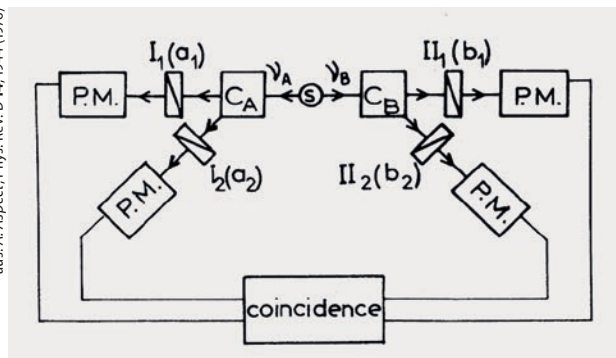
Im ersten Experiment wiederholte er die Messungen von Clauser und Freedman, aber dank neuer Lasertechnologien und Zweiphotonenanregung der Kalziumatome mit wesentlich verbesserter Zählrate und Statistik. Er bestätigte die Verletzung der Freedman-Ungleichung eindeutig und mit bis dahin unerreichter Genauigkeit – genauso wie die Verletzung der noch weitreichenderen CHSH-Ungleichung (nach Clauser, Horne, Shimony und Holt) [7] für absorbierende Polarisatoren.

Im zweiten Experiment verwendete Aspect Polarisatoren mit zwei Ausgängen (je einer pro Polarisationsrichtung horizontal/vertikal) anstelle von absorbierenden Polarisatoren, ähnlich den heute verwendeten Strahlteiler-Würfeln. Die Zahl der Detektoren erweiterte sich von zwei auf vier, eine einzelne Mess-Einstellung lieferte entsprechend vier Koinzidenzraten. Mit vier räumlichen Einstellungen der Polarisatoren lassen sich direkt die „originalen“ CHSH-Ungleichungen überprüfen, was Aspect und seine Mitstreiter weltweit bekannt machte [8].

Im dritten Experiment kamen optische Deflektoren (akusto-optische Modulatoren) im Strahlengang vor den Polarisatoren zum Einsatz [9] (**Abb. unten**). Diese wechseln mit inkommensurablen Frequenzen die Ausgangsrichtung, sodass die Einstellung der Analyserichtung erst nach Aussendung des Photonenpaares („in flight“) vorgenommen wird. Dieses Experiment adressiert, dass die Polarisationsanalyse der beiden verschränkten Photonen einzeln unabhängig erfolgt, also lokal bei der Quelle keinerlei Information über die Einstellung der Analysatoren vorliegt („locality loophole“).

Der von den Photonen zwischen Quelle und Detektor zurückgelegte Weg war jedoch noch immer zu kurz, um eine vollkommen zufällige Orientierung der Polarisatoren zu realisieren [10] und das Locality Loophole komplett zu schließen. Dies gelang Anton Zeilinger und seinem Team 15 Jahre später, über eine Distanz von 400 Metern [11].

aus: A. Aspect, Phys. Rev. D **14**, 1944 (1976)



Das 1976 von Alain Aspect vorgeschlagene Experiment für ein Bell-Experiment beinhaltet zwei stochastische Deflektoren (C_A und C_B), welche die Photonen zu den Polarisatoren ($I_{1,2}$ bzw. $I_{1,2}$) lenken.



École polytechnique Université Paris-Saclay

Alain Aspect (geb. 1947 in Agen, Frankreich) studierte in Paris und Orsay Physik und Optik. Abgesehen von einem Aufenthalt in Kamerun von 1971 bis 1974 blieb er der französischen Hauptstadt treu: Er forschte und lehrte u. a. am Collège de France, am Laboratoire Kastler Brossel, an der École polytechnique und der École supérieure d'optique. 2012 erhielt er von OPTICA (früher OSA) und DPG den Herbert-Walther-Preis „für seine bahnbrechenden experimentellen Beiträge auf dem Gebiet der Quantenverschränkung und der Physik kalter Atome“. Charakteristisch für Aspect sind nicht nur sein markanter Schnurrbart und südfranzösischer Akzent, sondern auch seine große menschliche Wärme und bemerkenswerte wissenschaftliche Tiefe. Er ist ein (Physik-)Lehrer im besten Sinne des Wortes, und seine Schüler und Schülerinnen sind in führenden Universitäten und Forschungseinrichtungen der ganzen Welt zu finden.

Von Neutronen zu neuen verschränkten Photonen

Anton Zeilinger wollte die kontraintuitiven Vorhersagen für einzelne Quantenteilchen, die unseren klassischen Erfahrungen doch immer widersprechen, nicht nur aus dem Formalismus erkennen, sondern auch im Experiment sichtbar machen. Das von seinem Doktorvater Helmut Rauch am Atominstitut der österreichischen Universitäten entwickelte Neutroneninterferometer war damals dafür das ideale Werkzeug. Anton Zeilinger kombinierte nach seiner Promotion 1971 gleich seine Erfahrungen zur Änderung der Spinpolarisation von Neutronen in magnetischen Materialien mit den Möglichkeiten des Neutroneninterferometers. So konnte erstmals gezeigt werden, dass die Wellenfunktion von Spin-1/2-Teilchen bei einer Rotation um 2π das Vorzeichen wechselt – ein wunderbar einfaches Experiment, das direkt Eingang in die Lehrbücher fand.

Durch die Präsentation dieses Experiments auf einer Konferenz in Erice kam Anton Zeilinger erstmals in Kontakt mit John Bell, John Clauser und Alain Aspect. Wichtig war hier auch die Begegnung mit Mike Horne, aus der eine lange, tiefe Freundschaft entstand, vor allem, als Anton Zeilinger sich der Neutronenstreuerguppe von Cliff Shull am MIT anschloss. Mit Shull und Horne erarbeitete Zeilinger ein tieferes Verständnis für Interferenzeffekte von Neutronen in Kristallen sowie einfachere Anordnungen für die Materiewelleninterferometrie. Mit Mike Horne begann er auch, Zweiphotoneninterferometrie zu analysieren, und sie waren die ersten, die Einstein-Podolsky-Rosen-Korrelationen nicht nur für den Spin, sondern auch für andere Freiheitsgrade, vor allem für den Weg formulierten – ein Experiment, das zuerst von Rarity und Tapster durchgeführt wurde [12].



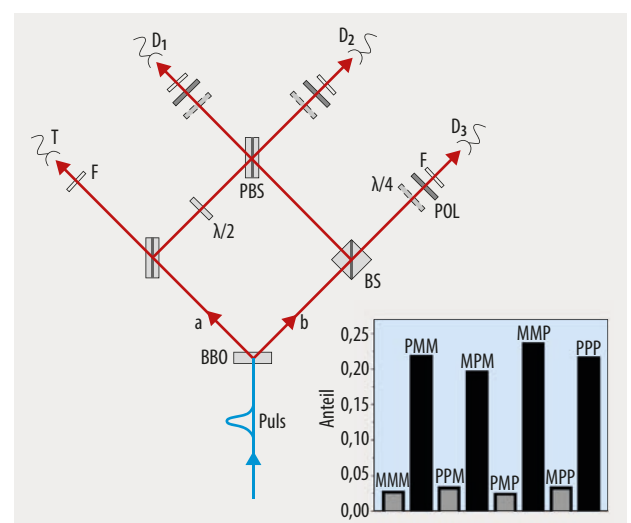
Anton Zeilinger (geb. 1945 in Ried im Innkreis, Österreich) hat Physik und Mathematik an der Universität Wien studiert und 1971 mit einer Arbeit zur Neutronendepolarisation promoviert. Der Habilitation an der TU Wien 1979 folgten Aufenthalte in den USA, Frankreich, Australien und Deutschland. Seine erste Professur trat er 1990 an der Universität Innsbruck an; 1999 wechselte er an die Universität Wien. Seit 2004 forscht er außerdem am IQOQI der Österreichischen Akademie der Wissenschaften in Wien. Zeilinger hat zahllose Auszeichnungen erhalten und war von 2013 bis 2022 Präsident der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. In seinen beiden Büchern „Einsteins Schleier“ (2003) und „Einsteins Spuk“ (2005) hat er sich auf populärwissenschaftliche Weise mit der Quantenphysik befasst.

Etwas später analysierten Zeilinger und Horne zusammen mit Danny Greenberger die Korrelationen nicht nur für Paare von verschränkten Teilchen, sondern auch für drei und mehr Teilchen. Das Trio erkannte, dass für eine Messung aller Teilchen (für bestimmte Zustände und Analysatoreinstellungen) perfekte Korrelationen auftreten sollten, während die LHV-Theorien gerade das Gegenteil, nämlich perfekte Antikorrelationen, vorhersagen! Für Anton Zeilinger ergab sich sofort die Herausforderung, diese nach ihren Entdeckern benannten GHZ-Zustände tatsächlich zu beobachten. Damals gab es außer Dreiteilchenstreuung kein valides Konzept, die Quelle zu realisieren. Neutronen waren wegen zu geringer Dichten und dem Fehlen geeigneter Wechselwirkungen keine Option. So begann Anton Zeilinger mit seiner neuen Gruppe an der Universität Innsbruck ab 1991, mit Photonenpaaren zu experimentieren, die sich durch parametrische Fluoreszenz (Spontaneous Parametric Down Conversion) erzeugen ließen. Die Frage war aber, ob und wie man damit auch GHZ-Zustände erzeugen könnte.

In diesen Jahren am Beginn der Quanteninformatik entdeckte Charles Bennett mit Kollegen das Prinzip der Quantenteleportation und des Dense Codings, Artur Ekert hatte erkannt, dass die Bellsche Ungleichung auch zur Quantenschlüsselverteilung dienen kann, und Marek Żukowski fand ein Schema („Entanglement Swapping“), um Teilchen auch ohne Wechselwirkung zu verschränken. All diese Methoden bilden heute das Grundgerüst zukünftiger Quantennetzwerke und werden quasi für Teilaufgaben im Quantencomputer eingesetzt. Damals stellte ihre Realisierung aber eine große Herausforderung dar. Nachdem die Innsbrucker Gruppe einerseits erkannt hatte, wie sich das für diese Methoden noch fehlende Element, die Bell-Zustandsanalyse, mittels Zweiphotoneninterferenz zumindest teilweise umsetzen lässt, und zusammen mit Paul Kwiat seine Idee für eine effiziente Quelle polarisationsverschränkter Photonen realisiert hatte, konnten all diese Experimente tatsächlich durchgeführt werden [13].

Doch wie erhält man GHZ-Zustände? Die bei der Quantenteleportation und beim Entanglement Swapping vorkommenden Zustände sind alles Produktzustände zweier Paare ohne jedwede Dreiteilchenverschränkung. Als Charles Bennett damals zu Besuch in Innsbruck war, meinte er auf einem Spaziergang zu einer Wallfahrtskapelle, dass doch gerade alles so gut laufe und kein Wunsch mehr offen sei – außer vielleicht der nach den GHZ-Zuständen. Und tatsächlich, bald darauf, in der Schlange vor dem Kaffeeautomaten an der Uni Innsbruck, kritzelte Anton Zeilinger ein Schema auf ein Post-it, mit dem es funktionieren sollte. Durch Interferenz zweier Paare eröffnen sich unterschiedlichste Möglichkeiten, die vier Photonen an den Ausgängen zu finden. Detektiert aber jeder der Beobachter ein Photon, lassen sich die Korrelationen durch einen GHZ-Zustand beschreiben. Aus diesem Konzept ergab sich schließlich der erste experimentelle Test mit 3-Photonen-GHZ-Zuständen [14] (**Abb. unten**). Später gelangen in Anton Zeilingers Wiener Gruppe und in mittlerweile zahlreichen anderen Experimenten weltweit noch viele weitere Experimente mit GHZ-Zuständen mit mehr und mehr Photonen (heute bereits bis zu 12), aber auch mit anderen, verschränkten Mehrphotonenzuständen wie Cluster-, W- oder Dicke-Zuständen [13].

Mit der neuen Quelle für verschränkte Photonenpaare konnte auch noch in Innsbruck der oben erwähnte Bell-Test mit räumlich weit getrennten Beobachtern durchgeführt werden: Mit schnellen Generatoren für Quantenzufallszahlen und entsprechend schnell schaltbaren Polarisationsanalysatoren waren die beiden circa 400 Meter Luftlinie voneinander entfernten Beobachter eindeutig raum-zeitlich getrennt. Bei einer gesamten Messzeit von weniger als 100 Nanosekunden war die Zeit von 1,3 Mikrosekunden, die ein Lichtsignal für diese Strecke braucht, wesentlich länger, sodass die Beobachter keine Informationen über die Messungen austauschen konnten. Zwar war somit das Lokalitäts-Loophole geschlossen, da aber nur etwa fünf Prozent der Paare detektiert wurden, blieb das Detektions-Loophole für LHV-Theorien weit offen.



Mithilfe von 3-Photonen-GHZ-Zuständen konnten Anton Zeilinger und sein Team deren nichtklassische, widersprüchliche Korrelationen nachweisen (links: Versuchsschema, rechts: Messwerte).

H. Weinfurter, nach [14]

Nachdem hocheffiziente, supraleitende Einzelphoton-detektoren entwickelt worden waren, konnte Anton Zeilinger mit seiner Gruppe in Wien mehr als zehn Jahre später das Experiment in einem langen Gang von ca. 100 Meter Länge unter der Wiener Hofburg durchführen. 2015 konnte sein Team zeitgleich mit zwei weiteren Gruppen sowohl das Lokalisitäts- als auch das Detektions-Loophole schließen [16]. Zuletzt gelang es, die Zufallszahlen der Bell-Tests durch das Licht, das vor vielen Milliarden Jahren von weit entfernten Quasaren ausgesandt wurde, zu erzeugen [17]. Damit ist die Möglichkeit für irgendeine Konspiration der lokal verborgenen Variablen fast bis an den Urknall zurückgedrängt.

Weitere Karrieren

Die weiteren, ebenso vielfältigen wie oft bahnbrechenden Leistungen der drei diesjährigen Nobelpreisträger, die bereits 2010 gemeinsam den Wolf-Preis in Physik erhielten, lassen sich hier natürlich nicht umfassend behandeln. So beobachtete John Clauser 1974 erstmals eine subpoissonische Statistik für Licht und bewies damit experimentell, dass sich Photonen wie lokalisierte Teilchen und nicht wie kurze Impulse elektromagnetischer Strahlung verhalten können. In den Jahren 1987 bis 1991 schlug er Atominterferometer als nützliche hochempfindliche Trägheits- und Schwerkraftsensoren vor (und ließ sie patentieren). Zusammen mit Matthias Reinsch erfand er das Talbot-Lau-Interferometer, das er in den 1990er-Jahren zusammen mit Shifang Li zum Bau eines Atominterferometers nutzte. 1998 erfand und patentierte er die Verwendung der Talbot-Lau-Interferometrie für die „Ultrahochauflösende interferometrische Röntgenbildgebung“. Diese Erfindung ermöglicht die medizinische Röntgen-Phasenkontrast-Bildgebung von Weichgewebe.

Alain Aspect wandte sich ab 1985 der Laserkühlung neutraler Atome zu, die heute zum Beispiel Anwendung in optischen Atomuhren findet. Ab 1992 verband er die Quantenoptik und Laser-Atomkühlung zum neu entstehenden Feld der Atomoptik, um sich in den folgenden Jahren mit den Welleneigenschaften lasergekühlter Atome sowie mit Bose-Einstein-Kondensation zu beschäftigen. Und selbstverständlich darf auch die Verschränkung – dieses Mal in atomaren Mehrteilchensystemen – nicht fehlen. Vielleicht gelingt Aspect auch noch eine Demonstration der Bell-Ungleichungen ohne Schlupflöcher auch mit Materiewellen.

Anton Zeilinger blieb seit seinen frühen Neutroneninterferenzexperimenten den Strahlen als Freiheitsgrad der Quantensysteme treu, da Interferenz mit Strahlen einfacher zu verstehen und (für die Öffentlichkeit) auch einfacher zu kommunizieren ist als Interferenz im Zustandsraum. Materiewelleninterferometrie blieb nach wie vor ein wichtiges Thema für Zeilinger, seine Experimente mit den Bucky Balls, C_{60} -Molekülen, erlangten breite Aufmerksamkeit und fanden ebenfalls bereits Aufnahme in die Lehrbücher. Zeilingers Wiener Arbeitsgruppe erregte auch Aufsehen mit weiteren Quantenkommunikationsexperimenten, zum Beispiel mit Quantenschlüsselverteilung mit abgeschwächten Lichtpulsen und verschränkten Zuständen

zwischen La Palma und Teneriffa über eine Entfernung von 143 Kilometer. Und schließlich gelang es Zeilingers Team, ein Teleskop in Graz für die Kommunikation mit dem chinesischen Quantensatelliten MICIUS zu adaptieren und so mit der chinesischen Gruppe den ersten globalen, sicheren Schlüsselaustausch zwischen den Bodenstationen in China und Österreich durchzuführen.

Das, was die drei diesjährigen Physik-Nobelpreisträger als reine Grundlagenforschung begonnen haben, ist heute die Basis einer völlig neuartigen Technologie. Der Antrieb, in reiner Grundlagenforschung die kontraintuitiven Konsequenzen der Quantenmechanik nachzuweisen, führte uns zu einem breiten Anwendungspotenzial, das in zahlreichen Initiativen weltweit umgesetzt wird.

Literatur

- [1] A. Streltsov, H. Kampermann und D. Bruf, Schrödingers Katzenfutter, *Physik Journal*, Juli 2019, S. 39
- [2] A. Einstein, B. Podolsky und N. Rosen, *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935)
- [3] J. S. Bell, Sechs mögliche Welten der Quantenmechanik (Einf. v. A. Aspect), Oldenbourg, München (2012), Rezension: bit.ly/3zY7XNS
- [4] S. J. Freedman und J. F. Clauser, *Phys. Rev. Lett.* **28**, 938 (1972)
- [5] J. F. Clauser und A. Shimony, *Rep. Prog. Phys.* **41**, 1881 (1978)
- [6] A. Aspect, Thèse, Université Paris Sud (1983), <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00011844/document>
- [7] J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony und R. A. Holt, *Phys. Rev. Lett.* **23**, 880 (1969)
- [8] A. Aspect, Ph. Grangier und G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 91 (1982)
- [9] A. Aspect, J. Dalibard und G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 1804 (1982)
- [10] Siehe Diskussion in: A. Aspect, *Nature* **398**, 189 (1990)
- [11] G. Weihs et al., *Phys. Rev. Lett.* **81**, 5039 (1998)
- [12] J. G. Rarity und P. R. Tapster, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 2495 (1990)
- [13] J.-W. Pan et al., *Rev. Mod. Phys.* **84**, 777 (2012)
- [14] G. Weihs, Th. Jennewein, Ch. Simon, H. Weinfurter und A. Zeilinger, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 5039 (1998)
- [15] J.-W. Pan, D. Bouwmeester, M. Daniell, H. Weinfurter und A. Zeilinger, *Nature* **403**, 515 (2000)
- [16] O. Gühne, *Physik Journal*, Februar 2016, S. 18
- [17] D. Rauch et al., *Phys. Rev. Lett.* **121**, 080403 (2018)

Die Autoren



Thorsten Schumm studierte Physik in Berlin und Innsbruck und führte seine Doktorarbeit 2002 bis 2005 als bi-nationale „Cotutelle de Thèse“ in der Gruppe von Alain Aspect und Chris Westbrook am Institut d’Optique in Orsay und bei Jörg Schmiedmayer (wiederum ein Schüler Anton Zeilingers) in Heidelberg durch. Hier beschäftigte er sich mit Materiewelleninterferometrie auf Atomchips. Nach einem Postdoc-Aufenthalt in Toronto wechselte er 2006 an die TU Wien.

Nach einem Postdoc-Aufenthalt in Toronto wechselte er 2006 an die TU Wien.

Harald Weinfurter studierte Physik an der TU Wien und promovierte dort 1987. Von 1991 bis 1999 arbeitete er an der Universität Innsbruck in der Gruppe von Anton Zeilinger und habilitierte sich 1996. Seit 1999 ist er als Professor an der Fakultät für Physik der LMU München sowie am Max-Planck-Institut für Quantenoptik tätig.



Friedrich Schmidt, LMU München

Prof. Dr. Thorsten Schumm, Atominstitut, Technische Universität Wien, 1020 Wien, Österreich; **Prof. Dr. Harald Weinfurter**, Fakultät für Physik, Ludwig-Maximilians-Universität München, Schellingstr. 4, 80799 München