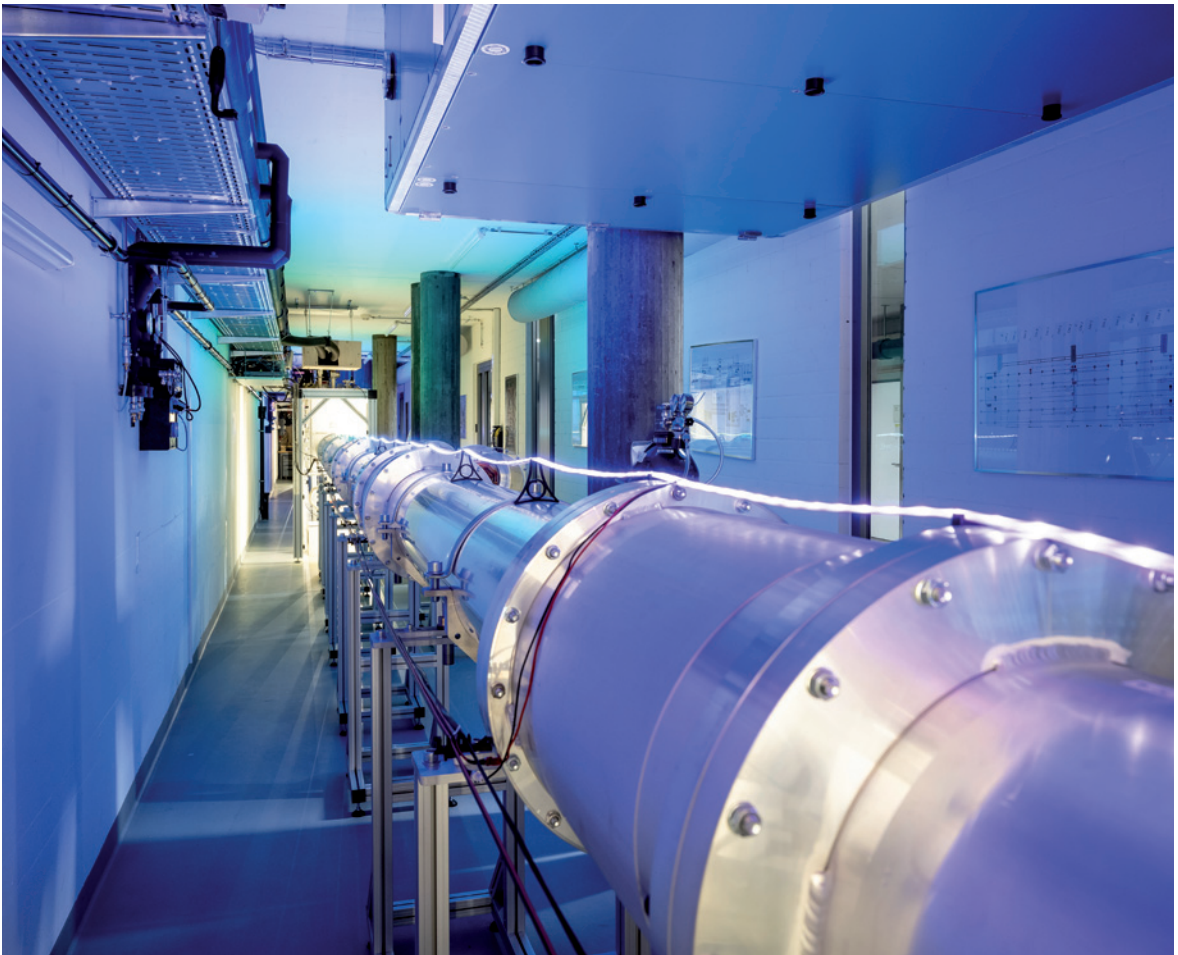


# Vierteljahrschrift

2|2023  
Jahrgang 168

der Naturforschenden Gesellschaft  
in Zürich NGZH



## 4 Ein Phänomen jenseits von Raum und Zeit

Verschränkte Quantenobjekte sind auch über grosse Distanzen «magisch» miteinander verbunden. Was zunächst unmöglich scheint, wurde in aufwändigen Experimenten bestätigt – so auch kürzlich an der ETH Zürich.

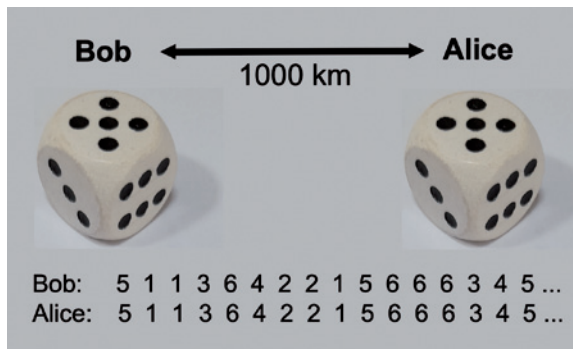
# Brief des Präsidenten

Wir nehmen in dieser Nummer der Vierteljahrschrift den Physiknobelpreis 2022 als Schwerpunktthema. Und dies aus gutem Grund: Die Auszeichnung wurde für Arbeiten vergeben, die die Zukunft der Menschheit vergleichbar beeinflussen werden, wie etwa die Entdeckung der Gesetze der klassischen und relativistischen Mechanik, der Elektrizität, der Chemie und der Atome, die das Leben auf unserem Planeten grundlegend transformiert haben.

Wie bei all diesen früheren naturwissenschaftlichen Durchbrüchen bleibt ein Interesse der Öffentlichkeit praktisch aus und die auf den betreffenden Erkenntnissen basierenden neuen Technologien werden die Gesellschaft durchdringen, bevor diese sich darauf vorbereiten konnte (oder wollte). Insbesondere die Schulen der mittleren Bildungsstufe (die auch heute noch kaum Themen der Physik des 20. Jahrhunderts behandeln), werden einen deutlichen weiteren Schritt von der durch die Gesellschaft gelebten Realität entfernt sein und Maturand:innen werden keine Ahnung haben, wie man einen Quantencomputer mit den in den Gymnasien behandelten Themen in Zusammenhang bringen kann.

Die vorliegende Nummer unserer Zeitschrift kann die immense Wissenslücke auch nicht auffüllen, aber sie soll zeigen, wie stark sich die heutige physikalische Forschung von der Schulphysik entfernt hat, die Ihnen, liebe Leserin, lieber Leser, möglicherweise noch bekannt ist. Vielleicht ist dies ein Ansporn für Sie, sich für dieses Thema vermehrt zu interessieren und vor allem die Jugendlichen darauf hinzuweisen.

Auf Hochschulstufe ist die Entwicklung selbstverständlich angekommen und manifestiert sich in der Gründung vieler neuer Institute und Kompetenzzentren, die «Quantum» im Namen führen, wie z.B. das Quantum Center an der ETH Zürich (<https://qc.ethz.ch>). Auch die SCNAT hat eine Schweizerische Quanten Kommission SQC ins Leben gerufen, um dem Ausschluss der Schweiz aus dem Europäischen



Wenn Würfel verschränkt werden könnten, liessen sich damit geheime Schlüssel zwischen Bob und Alice erzeugen, aber keine Information übermitteln. (Bild: F. Gassmann)

Forschungsprogramm «Horizont Europa» entgegenzuwirken. Es ist zu hoffen, dass die Politik in Sachen Rahmenabkommen zur Einsicht kommt, bevor die naturwissenschaftliche Forschung in der Schweiz ihre hervorragende Rolle eingebüsst haben wird.

Unsere Versuche zur Gewinnung jüngerer Neumitglieder trat soeben in eine neue Phase: Unser erster Podcast im «NGZH Journal Club» ist jetzt online. Lesen Sie im Artikel von René Oetlerli auf Seite 17, welche Überlegungen zu diesem Format geführt haben und wie Sie den Podcast hören können, ohne sich mit Social Media beschäftigen zu müssen.

Am Montag 10. Juli 2023 findet unsere Hauptversammlung in der Zentralbibliothek ab 18 Uhr statt (vgl. die beiliegende Einladung auf dem Faltblatt). Nutzen Sie die Möglichkeit, nach dem offiziellen Teil mit mir über Verschränkung zu diskutieren. Ich würde mich freuen, auf Ihre Fragen und Kommentare einzugehen. Und bringen Sie gerne auch Ihre Enkel mit!

Fritz Gassmann

**ngzh**

• • • • •  
Naturforschende  
Gesellschaft in Zürich  
[www.ngzh.ch](http://www.ngzh.ch)

## – AKTUELL

4

# Einsteins Konzept widerlegt

## – QUANTENPHYSIK

6

Verschränkte Photonen – Phänomen  
ausserhalb von Raum und Zeit

## – PHYSIK IM ALLTAG

11

Die Bellsche Ungleichung einfach  
erklärt

## – DAS EXPERIMENT

14

Das heikle Wechselspiel von falschen  
Hypothesen und experimentellen  
Daten

## – ERDBEBENFORSCHUNG

18

Wie sich Erdbeben in der Schweiz  
auswirken könnten

## – PODCAST

19

NGZH Journal Club – der Podcast der  
NGZH ist jetzt online

## – FÜHRUNG

20

Eine Zeitreise zu geologischen  
Leckerbissen des Kantons Zürich

22

IMPRESSUM

23

AGENDA

## AUS DEM ARCHIV

Die NGZH verfügt über ein reichhaltiges Archiv an interessanten Publikationen, die im Laufe ihrer langen Geschichte veröffentlicht wurden. Das umfangreiche Material ist auf unserer Webseite frei zugänglich.

Alle Dokumente und auch die Aufzeichnungen der Online-Vorträge vom letzten Winter finden sich unter: [www.ngzh.ch/publikationen](http://www.ngzh.ch/publikationen)

Titelbild: Mit dieser Versuchsanlage führten Forscher der ETH Zürich einen erfolgreichen schlupflochfreien Bell-Test durch und bestätigten damit, dass das von der Quantenmechanik vorausgesagte Phänomen der Verschränkung selbst für makroskopische Schaltkreise möglich ist. Das Bild zeigt einen Teilabschnitt der 30 Meter langen Quantenverbindung zwischen zwei supraleitenden Schaltkreisen. Das Innere der Anlage ist nahe auf den absoluten Nullpunkt abgekühlt. (Bild: ETH Zürich / D. Winkler)

# Einsteins Konzept der «lokalen Kausalität» widerlegt

**ETH-Forschenden gelang der Nachweis, dass weit entfernte, quantenmechanische Objekte viel stärker miteinander korreliert sein können als dies bei klassischen Systemen möglich ist. Für dieses Experiment nutzten sie erstmals supraleitende Schaltkreise.**

Eine Forschergruppe um Andreas Wallraff, ETH-Professor für Festkörperphysik, hat mit einem sogenannten schlupflochfreien Bell-Test das Konzept der «lokalen Kausalität» widerlegt, das von Albert Einstein als Antwort auf die Quantenmechanik formuliert wurde. Die Forscher konnten damit nachweisen, dass weit entfernte, quantenmechanische Objekte viel stärker miteinander korreliert sein können, als dies bei klassischen Systemen möglich ist. Das Besondere daran: Den Zürcher Forschenden gelang dieses Experiment zum ersten Mal mit supraleitenden Schaltkreisen. Diese gelten als heisse Kandidaten für den Bau von leistungsfähigen Quantencomputern.

## Ein alter Streit

Ein Bell-Test basiert auf einer Versuchsanordnung, die vom britischen Physiker John Bell in den 1960er-Jahren erdacht wurde (s. Artikel auf S. 6 und S. 11). Bell wollte damit eine Frage klären, über die bereits in den 1930er-Jahren die damaligen Grössen der Physik gestritten haben: Stimmen die Voraussagen der Quantenmechanik, die der Alltagsintuition zuwider laufen, oder gelten im atomaren Mikrokosmos ebenfalls die klassischen Vorstellungen von Kausalität, wovon Albert Einstein überzeugt war? Bell schlug vor, an zwei verschränkten Teilchen gleichzeitig eine zufällige Messung durchzuführen und diese anhand der Bell'schen Ungleichung zu überprüfen. Stimmt Einsteins Konzept der lokalen Kausalität, dann wird die Bell'sche Ungleichung bei diesen Experimenten immer erfüllt. Im Gegensatz dazu sagt die Quantenmechanik voraus, dass die Ungleichung verletzt wird.

Anfang der 1970er-Jahre konnten John Francis Clauser, der letztes Jahr mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet wurde, und Stuart Freedman erstmals konkret mit einem Experiment zeigen, dass die Bell'sche Ungleichung verletzt wird. Allerdings

mussten Clauser und Freedman bei ihren Experimenten gewisse Annahmen machen, damit sie die Versuche überhaupt durchführen konnten. Es hätte theoretisch also immer noch sein können, dass Einstein mit seiner Skepsis richtig lag. Im Laufe der Zeit konnten dann immer mehr dieser sogenannten Schlupflöcher geschlossen werden, bis es schliesslich 2015 gelang, die ersten wirklich schlupflochfreien Bell-Tests durchzuführen.

## Vielversprechende Anwendungen

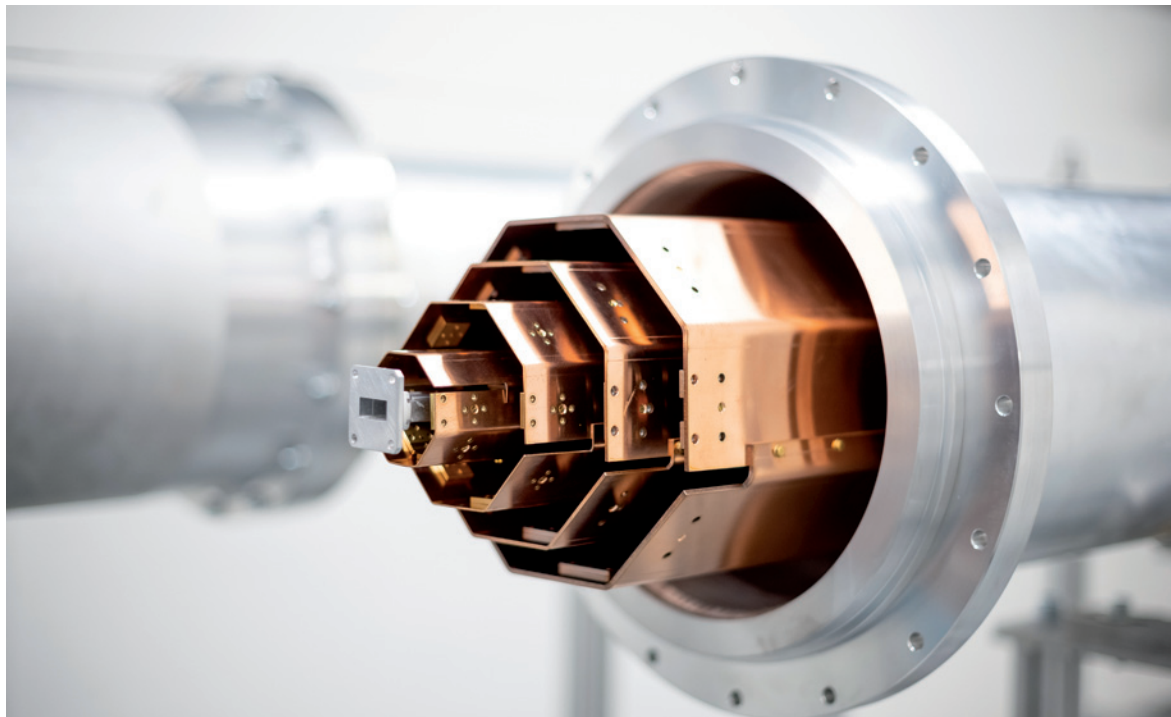
Wallraffs Gruppe kann diese Ergebnisse nun bestätigen. Die in der renommierten Fachzeitschrift «Nature» veröffentlichte Arbeit zeigt, dass das Thema trotz der Bestätigung vor sieben Jahren nach wie vor aktuell ist. Zum einen bestätigt das Experiment der ETH-Forscher, dass supraleitende Schaltkreise ebenfalls nach den Gesetzen der Quantenmechanik funktionieren, obwohl sie im Vergleich zu mikroskopischen Quantenobjekten wie Photonen oder Ionen eine beachtliche Grösse haben.

Zum anderen haben Bell-Tests auch eine praktische Bedeutung. Mit abgeänderten Bell-Tests kann man beispielsweise in der Kryptographie demonstrieren, dass Informationen tatsächlich verschlüsselt übermittelt werden (vgl. dazu Abschnitt auf S. 13).

## Die Suche nach dem Kompromiss

Für ihre Experimente benötigen die Forscher eine aufwändige Versuchsanlage. Damit der Bell-Test tatsächlich schlupflochfrei ist, müssen die Forschenden nämlich sicherstellen, dass vor dem Abschluss der Quantenmessungen keinerlei Informationen zwischen den beiden verschränkten Schaltkreisen ausgetauscht werden können. Da Informationen höchstens mit Lichtgeschwindigkeit übermittelt werden können, muss die Messung deshalb weniger Zeit benötigen als ein Lichtteilchen braucht, um von einem Schaltkreis zum anderen zu gelangen. Es gilt also, einen Kompromiss zu finden: Je grösser die Distanz zwischen den beiden supraleitenden Schaltkreisen, desto mehr Zeit steht für die Messung zur Verfügung – und desto aufwändiger wird die Versuchsanordnung, muss doch das Experiment im Vakuum nahe dem absoluten Nullpunkt durchgeführt werden.





Einblick ins Innere eines Abschnitts der 30 Meter langen Quantenverbindung. Ein Aluminium-Wellenleiter (Mitte), der bis fast zum absoluten Nullpunkt gekühlt ist, verbindet die beiden Quanten-Schaltungen. Mehrere Schichten Kupferschilder schirmen den Leiter vor thermischer Strahlung ab. (Bild: ETH Zürich / D. Winkler)

Die kürzeste Distanz zur erfolgreichen Durchführung eines schlupflochfeinen Bell-Tests beträgt etwa 33 Meter: Ein Lichtteilchen benötigt im Vakuum rund 110 Nanosekunden, um diese Distanz zu überwinden – ein paar Nanosekunden mehr, als die Forscher für die Durchführung des Experiments benötigen.

### 30 Meter Vakuum

Wallraffs Team hat in einem Keller auf dem ETH-Campus eine eindruckliche Anlage aufgebaut. An beiden Enden steht ein Kryostat, in dem sich ein supraleitender Schaltkreis befindet. Die beiden Kühlapparaturen sind über eine 30 Meter lange Röhre miteinander verbunden, deren Innerstes auf eine Temperatur knapp über dem absoluten Nullpunkt (–273,15 Grad Celsius) abgekühlt wurde.

Vor Beginn jeder Messung wird von einem der beiden supraleitenden Schaltkreise ein Mikrowellen-Photon zum anderen übermittelt, so dass die beiden Schaltkreise fortan verschränkt sind. Zufallsgeneratoren entscheiden dann, welche Messungen an den beiden Schaltkreisen im Rahmen des Bell-Tests durchgeführt werden. In einem nächsten Schritt werden die Messergebnisse auf beiden Seiten miteinander verglichen.

### Grossräumige Verschränkung

Die Auswertung von mehr als einer Million Messungen zeigt, dass die Bell'sche Ungleichung mit einer sehr hohen statistischen Sicherheit verletzt wird. Damit bestätigt sich: Die Quantenmechanik lässt auch bei makroskopischen elektrischen Schaltungen nicht-lokale Korrelationen zu und supraleitende Schaltkreise lassen sich auch über eine grosse Distanz miteinander verschränken. Das eröffnet interessante Anwendungsmöglichkeiten im Bereich verteiltes Quantencomputing und Quantenkryptographie.

Für den Bau und Test der Anlage benötigten die Forscher über sechs Jahre und der Aufwand, um die gesamte Versuchsanordnung auf eine Temperatur nahe beim absoluten Nullpunkt zu kühlen, war beträchtlich. Doch im Prinzip, so ist Wallraff überzeugt, könnte man auf gleiche Weise auch Anlagen bauen, die noch grössere Distanzen überwinden. Das wäre zum Beispiel interessant, um weit voneinander entfernte Quantencomputer zu verbinden.

Felix Würsten

Literatur

Storz S. et.al. 2023. Loophole-free Bell inequality violation with superconducting circuits. *Nature* 617, 265–270. doi: 10.1038/s41586-023-05885-0

# Verschränkte Photonen – Phänomen ausserhalb von Raum und Zeit

**Alain Aspect, John F. Clauser und Anton Zeilinger ist es gelungen, ein Phänomen der Quantenphysik experimentell zu beweisen, dessen Existenz Albert Einstein als unmöglich erachtete, obschon es durch die erfolgreiche Quantentheorie seit 1926 vorhergesagt wurde. Verschränkung ist das einzige im Bereich der Naturwissenschaften bekannte Phänomen, das sich nicht in Raum und Zeit abspielt. Dieses Erkenntnis bedeutet eine Revolution des physikalischen Weltbildes, analog etwa zur Vereinigung von Raum und Zeit durch Einsteins Relativitätstheorie.**

## **Kontroversen um den berühmten EPR-Artikel von 1935**

In der heute immer noch oft zitierten Publikation von Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen (abgekürzt EPR) diskutierten die Autoren ein Gedankenexperiment mit zwei Elementarteilchen, die beim Zerfall eines Vorgängerteilchens entstehen und diametral auseinanderlaufen. Gemäss der Quantentheorie werden beide Teilchen durch eine einzige Zustandsfunktion beschrieben, weshalb die Heisenbergsche Unschärferelation gelten muss: Man kann nicht am einen Teilchen den Ort und am anderen den Impuls (Impuls = Masse mal Geschwindigkeit) gleichzeitig genau messen.

Einstein hat dies als Unsinn betrachtet und als «spukhafte Fernwirkung» bezeichnet. Wie sollte denn nur eine Messung am einen Teilchen das entfernte Teilchen instantan beeinflussen können? Er vermutete, dass die Quantentheorie unvollständig sei und durch bislang unbekannte «versteckte Variablen» ergänzt werden müsse. Er hoffte, dass dadurch auch die Unschärferelation und weitere schwer verständliche Eigenschaften der Quantentheorie verschwinden würden.

Erwin Schrödinger hat für die rätselhafte durch die Quantentheorie vorhergesagte Korrelation zweier voneinander entfernter Teilchen den Begriff «Verschränkung» geprägt. Heftige Diskussionen haben über lange Zeit zu keinem Ergebnis geführt, da man

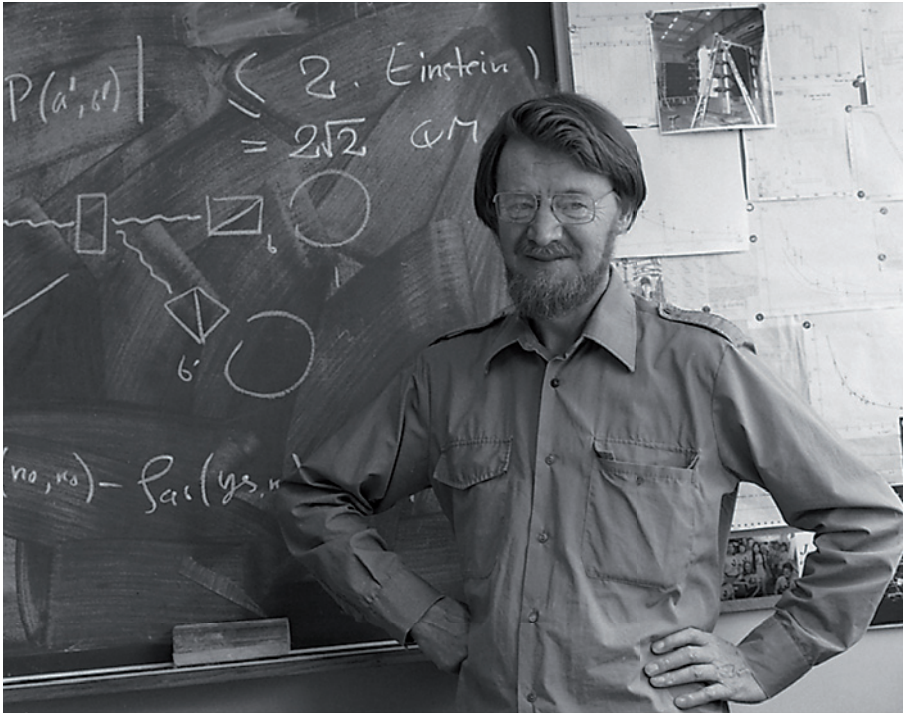
weit davon entfernt war, die Kontroverse durch ein überzeugendes Experiment zu entscheiden. Schliesslich hat man in Anbetracht der Erfolge der Quantentheorie jede weitere Beschäftigung mit dieser Frage dogmatisch als «junk science» diffamiert und Physiker, die sich dennoch darum kümmerten, als nicht ernst zu nehmende Aussenseiter stigmatisiert: «*shut up and calculate!*»

## **Der Durchbruch von Bell 1964**

Der irische Physiker John Stewart Bell (1928-1990) arbeitete am CERN und benutzte ein Sabbatical im Jahr 1964 an der Stanford University, um sich in das ungelöste Problem der Quantentheorie betreffend die «versteckten Variablen» zu vertiefen. Er erkannte nebst anderen Physikern, dass es sich um einen sehr grundlegenden Unterschied zwischen den klassischen Theorien (Relativitätstheorie, Maxwellsche Elektrodynamik) und der Quantentheorie handelt. Erstere basieren auf dem Einsteinschen Konzept des «lokalen Realismus». Dabei bedeutet «lokal», dass sich Signale, Information oder sonstige Wirkungen maximal mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten können und deshalb eine gegenseitige Beeinflussung zweier Teilchen erst nach einer gewissen Zeit auftreten kann. «Realismus» bedeutet, dass physikalische Variablen eines Teilchens einen definierten Wert besitzen, auch bevor sie gemessen werden.

Für makroskopische Körper sind beide Forderungen klar erfüllt: Elementarteilchen und sogar Moleküle bis etwa C<sub>60</sub>, die durch die Quantentheorie beschrieben werden, können sich jedoch «nicht-lokal» und «nichtrealistisch» verhalten, d.h. sie können gleichzeitig an mehreren Orten sein und ihre Variablen können gleichzeitig inkompatible Werte annehmen. So kann beispielsweise die Polarisation von Photonen gleichzeitig horizontal und vertikal sein; man spricht von einem überlagerten Zustand.

Bei seiner Suche nach einem Gedankenexperiment, das nach Umsetzung in ein reales Experiment klar entscheiden könnte, ob versteckte Variablen das Problem lösen könnten, stiess Bell auf eine Publikation des US-amerikanischen Quantenphysikers



John Bell am CERN 1982. Auf der Tafel sieht man den letzten Term der Bellschen Ungleichung von 1964: ...  $P(a', b') \leq 2$  mit dem Vermerk «Einstein» um anzudeuten, dass es sich um eine «versteckte Variablen»-Theorie handelt. Darunter dasselbe Gedankenexperiment mit der Quantentheorie berechnet ergibt  $= 2\sqrt{2}$ , das mit dem Wert 2,828 die Ungleichung verletzt. Darunter ist ein Teil der Skizze für ein Gedankenexperiment mit verschränkten Photonen ersichtlich. Ein analoges reales Experiment würde Klarheit schaffen, ob Einstein oder die Quantentheorie Recht hat. Diese Kontroverse wurde durch die Träger des Physik-Nobelpreises 2022 zu Gunsten der Quantentheorie entschieden. (Bild: CERN, CC BY 4.0)

David Bohm (1917-1992) aus dem Jahr 1957 (siehe auch VJS 4|2021: 25-27). Darin schlug der Autor vor, die versteckten Variablen, von deren Existenz dieser wie Einstein überzeugt war, mit Hilfe von Experimenten mit Photonen zu finden. Weiter fand sich auch ein Hinweis auf die Annihilations-Experimente der chinesisch-stämmigen Physikerin Chien-Shiung Wu (1912-1997) von 1949 an der Columbia University in New York, bei denen senkrecht zueinander polarisierte Zwillingsphotonen entstanden (s. Kasten auf Seite 8). Rückblickend stuft man diese Experimente als die erste Beobachtung von Verschränkung ein (Frank 2023).

Dies inspirierte Bell, ein Gedankenexperiment mit verschränkten Photonen vorzuschlagen, das die Kontroverse betreffend versteckte Variablen entscheiden sollte, wenn es dann einmal realisiert werden könnte. Er entwickelte eine sehr allgemeingültige Ungleichung, die für jedes mögliche Experiment mit jeder möglichen auf versteckten Variablen beruhen-

den lokalen Theorie erfüllt sein muss.

Bell fand interessanterweise Gedankenexperimente mit Photonen, die seine Ungleichung gemäss der Quantentheorie verletzen. Könnte man also solche Experimente durchführen und würden die Ergebnisse mit den durch die Quantentheorie vorhergesagten übereinstimmen, wäre bewiesen, dass die Quantentheorie durch keine lokale Theorie mit versteckten Variablen ersetzt werden kann und dass Verschränkung und Nichtlokalität im Mikrokosmos real sind.

### Clauser setzt Bells Idee 1972 in ein reales Experiment um

Der US-amerikanische Experimentalphysiker John Francis Clauser (geb. 1942) leitete zusammen mit Mike Horne, Abner Shimony und George Holt (CHSH) 1969 die erste experimentell testbare Bell-Ungleichung ab. Auf dieser Grundlage führte er zusammen mit Stuart Freedman 1972 ein Experi-



### Eine unterschätzte Pionierin

Chien-Shiung Wu (1912-1997) wurde in der Nähe von Shanghai geboren und wanderte nach den USA aus, um Physik zu studieren und fiel dort als brillante Studentin auf. Im November 1949 untersuchte sie zusammen mit ihrem Doktoranden Irving Shakhov an der Columbia University in New York die Reaktion zwischen Elektronen und ihren Antiteilchen, den Positronen. Dabei wandelt sich die Masse nach der berühmten Einsteinschen Formel  $E = mc^2$  vollständig in Energie um und es entstehen zwei diametral auseinanderfliegende Photonen mit einer Energie von je 511 kilo-Elektronenvolt (Gammastrahlung). Da die Masse verschwindet, wird der Vorgang «An-nihilation» genannt. Der Physiker John Wheeler hatte einige Jahre zuvor theoretisch begründet, dass die beiden Photonen zueinander senkrecht polarisiert sein müssten und Wu suchte nach einem experimentellen Beweis für Wheelers «Paartheorie».

Mit ihrem meisterhaften experimentellen Aufbau konnte Wu wesentlich mehr Paare messen als frühere Experimentatoren. Rückblickend besteht wenig Zweifel, dass Wu die rätselhafte Korrelation der senkrecht zueinander polarisierten Photonen, die wir heute «Verschränkung» nennen, bemerkt haben muss. Im Letter an die *Physical Review* am Neujahrstag 1950 hat sie jedoch nur die experimentelle Bestätigung der «Paartheorie» erwähnt. Aus gutem Grund musste sie befürchten, dass sie als Chinesin und Frau die Stelle an der Universität verlieren würde, wenn sie sich auf eine Diskussion um «Verschränkung» einlassen würde (Frank 2023).



Chien-Shiung Wu an der Columbia University 1963. Rückblickend hat Wu 1949 zum ersten Mal experimentell verschränkte Photonen nachgewiesen. Ihr Experiment war jedoch zu wenig beiweiskräftig, um versteckte Variablen auszuschließen, weil sie nur mit senkrecht zueinander eingestellten Polarisatoren experimentierte und nur knapp jedes zweite Photon registrieren konnte. Diese Ausbeute von weniger als 50% war 1949 jedoch eine ausserordentliche Leistung. Warum wurde es versäumt, sie bei der Vergabe der Nobelpreise am 10. Dez. 2022 zu erwähnen? (Bild: Flickr's The Commons)

ment durch, das die modifizierte Bell-Ungleichung deutlich verletzte und die Quantentheorie bestätigte. Es war ein Experiment mit einer Zwei-Photonen-Kaskade in Kalzium, bei der die beiden erzeugten Photonen eine verschränkte Polarisation aufweisen.

Dieses Experiment löste Erstaunen aus und gab den Anstoss für weitere Untersuchungen, die notwendig waren, um die Argumente der «lokalen Realisten» zu widerlegen, die im Sinne Einsteins beharrlich weiter für ihre Weltanschauung kämpften.

Sie lieferten zwei wichtige Argumente, warum die durchgeführten Bell-Tests dennoch ungenügend sein könnten: das sog. «Lokalitäts-Schlupfloch» und

das «Detektions-Schlupfloch». Ersteres bedeutete, dass vielleicht die Polarisatorstellungen irgendwie in versteckten Variablen beider Photonen bekannt sein könnten und es deshalb trivial ist, dass sich beide gleich benehmen würden.

Das zweite Argument zielte darauf ab, dass nicht alle Photonen detektiert werden und vielleicht die Auswahl der detektierten aus irgendwelchen Gründen gerade so wäre, dass die rätselhaften Korrelationen vorgetäuscht würden, indem die Statistik durch die nicht beobachteten Photonen verfälscht würde (analog wie politische Abstimmungen durch «verlorene» Stimmzettel verfälscht werden können).





Oben: Alain Aspect im Jahr 2013 (Bild: Thaler CC BY-SA 3.0)

Links: John Francis Clauser (Bild: Lyons CC BY-SA 4.0)

### Die präzisen Experimente von Aspect 1981-82

Der junge Physiker Alain Aspect (geb. 1947) war von den Bell-Ungleichungen derart fasziniert, dass er beschloss, seine Dissertation diesem Thema zu widmen. Er besuchte deshalb Bell am CERN, um seine Ideen für Experimente mit ihm zu besprechen (vgl. SPG 2023). 1974 begann er mit Experimenten am Institut d'Optique an der Université d'Orsay (Paris) und schloss damit seine Thèse d'Etat 1983 erfolgreich ab. Zuvor publizierte er ein Experiment mit einer enorm hohen statistischen Genauigkeit, wobei die Verletzung der entsprechenden Bell-Ungleichung über 40 Standard-Abweichungen nach einer Messzeit von nur wenigen Minuten betrug. Dies bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit, dass das Resultat bloss per Zufall entstand, kleiner ist als die Wahrscheinlichkeit, 800 mal hintereinander eine Sechs zu würfeln.

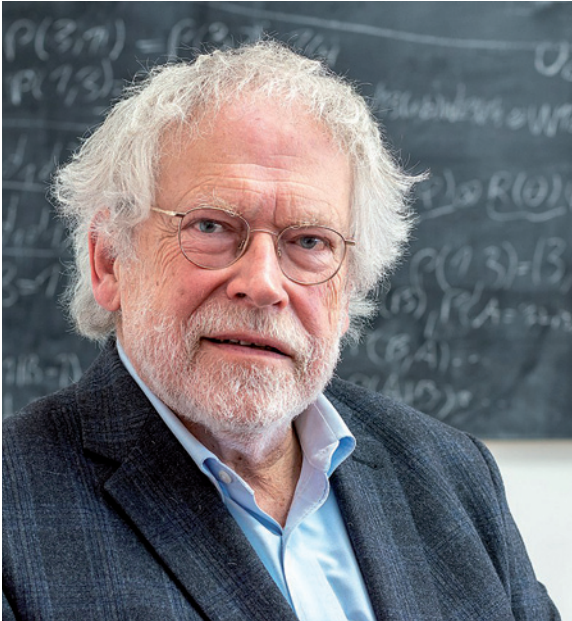
Wichtig war, dass Aspect bei diesen Experimenten auch dafür sorgte, dass die Polarisations Ebenen der Photonen vor dem Eintritt in die polarisierenden Strahlteiler um verschiedene Winkel gedreht wurden (vgl. dazu den Artikel über die «Bellsche Ungleichung» auf S. 11). Die Entscheidung, welcher der möglichen Drehwinkel gewählt wurde, fiel ein Computer auf der Basis von Zufallszahlen, nachdem die Zwillingsphotonen erzeugt wurden. Dann folgten die Messungen der Photonen so rasch, dass auch

Signale mit Lichtgeschwindigkeit zu wenig Zeit gehabt hätten, um Information zwischen den beiden Messstellen auszutauschen.

So wurde das «Lokalitäts-Schlupfloch» auf überzeugende Weise eliminiert und den «lokalen Realisten» blieb nur noch ein dünner Hoffnungsfaden mit dem immer noch offenen «Detektions-Schlupfloch», das am schwierigsten zu überwinden war, weil einzelne Photonen leicht verloren gehen.

Glücklicherweise entwickelten sich auch die experimentellen Möglichkeiten in grossem Tempo weiter. 1960 wurde der Laser erfunden und 1967 wurde an nichtlinearen, doppelbrechenden Kristallen der «Spontaneous Parametric Downconversion»-Effekt experimentell entdeckt und auch theoretisch verstanden.

Solche Kristalle produzieren aus eingestrahelten Photonen in genau bestimmten Richtungen fliegende Zwillingsphotonen niedrigerer Energie, deren Polarisierungen verschränkt sind. Die Ausbeute ist nur ein verschränktes Paar auf etwa 10 Millionen bis 1 Milliarde eingestrahelter Photonen, was für Experimente aber ausreicht. Auch waren die dafür notwendigen Kristalle nicht aussergewöhnlich: zum Beispiel leistet  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (Kaliumdihydrophosphat) gute Dienste; ein Kristall, der einfach herzustellen ist und als Zusatz für Energy-Drinks oder als Dünger für Aquariumpflanzen verwendet wird. Zusammen mit Laserdioden können damit



Anton Zeilinger im Jahr 2021 (Bild: Godany CC BY-SA 4.0)

kleine und billige Verschränkungs-Photonenquellen gebaut werden. Ab etwa 1986 wurde Downconversion das Arbeitspferd für Verschränkungsexperimente (vgl. auch Vorträge von Gassmann 2021).

### Die spektakulären Experimente von Zeilinger ab 1990

Als Anton Zeilinger (geb. 1945) an der Universität Innsbruck zum Professor ernannt wurde, wechselte er von der Neutronenphysik auf die Photonenphysik, dessen Zukunftspotenzial er damals erahnte. Bereits 1993 entdeckte er zusammen mit seiner Forschungsgruppe das Phänomen des «Verschränkungs-Austausches» (entanglement swapping), das bald im Zusammenhang mit Quantencomputern zentrale Bedeutung erlangte. 1999 wurde ihm ein Lehrstuhl für Experimentalphysik an der Universität Wien angeboten und die ganze Gruppe zügelte nach Wien.

Zeilinger verstand es, seine Experimente publikumswirksam zu inszenieren, was ihm bald den Spitznamen «Mister Beam» einbrachte. So schickte er verschränkte Photonen in einem Glasfaserkabel in einem 400 Meter langen Kanal unter der Donau hindurch oder über 144 Kilometer in der Luft übers Meer zwischen La Palma und Teneriffa und erweiterte schrittweise die Distanz, über welche die «spukhafte Fernwirkung» funktioniert. Jian-Wei

Pan aus China, einer seiner früheren Studenten und später Mitarbeiter in Zeilingers Gruppe, konnte 2020 diesen Rekord auf 1120 Kilometer ausdehnen und via den chinesischen Satelliten «Micius» einen Prototyp eines Quanten-Internet-Links herstellen.

Im Hinblick auf den Nobelpreis von besonderer Bedeutung war, dass Zeilinger mit seiner Forschungsgruppe ein Bell-Experiment aufbauen konnte, das alle Schlupflöcher gleichzeitig (nicht in separaten verschiedenen Experimenten) eliminieren konnte, womit definitiv gezeigt wurde, dass es Phänomene ausserhalb Raum und Zeit gibt. Diese Erkenntnis bedeutet eine Revolution des physikalischen Weltbildes.

Fritz Gassmann

#### Literatur

Deutschlandfunk 2022. <https://www.deutschlandfunk.de> → Audio-Archiv → Physik-Nobelpreis 2022 → Sendung vom 4.10.2022.

EPN 2023a: Europhysics News 53/5: 8-9.

EPN 2023b: Europhysics News 54/1: 11-31.

Frank M. 2023. The little-known origin story of the science that won the 2022 Nobel Prize in Physics. Scientific American, April 2023: 38-45.

Gassmann F. 2021. Vorträge 22./29. Nov.

SPG 2023: Schweizerische Physikalische Gesellschaft, Mitteilungen 69: 9-17.

# Die Bellsche Ungleichung einfach erklärt

John Bell hat 1964 ein Gedankenexperiment beschrieben und eine dazu passende mathematische Ungleichung aufgestellt. Alle drei Physik-Nobelpreisträger 2022 haben nach Bells Ideen konkret durchführbare Experimente zusammen mit den dazu passenden Ungleichungen entwickelt. Hier wird eine einfach zu verstehende Bell-Ungleichung aus der Mengenlehre abgeleitet, die durch nichtlokale Korrelationen der Quantentheorie verletzt wird.

## Ein Bell-Test für Menschengruppen

Wir untersuchen Eigenschaften einer beliebigen Gruppe von Menschen wie beispielsweise einer Schulklasse. Wir möchten eine mathematische Ungleichung finden, die immer erfüllt sein muss, wenn die betrachteten Eigenschaften lokal und realistisch sind. Dies heisst, sie sind mit den einzelnen Personen verbunden und haben keinen Einfluss auf die entsprechenden Eigenschaften anderer Personen (lokal). Weiter sind wir überzeugt, dass die betrachteten Eigenschaften auch existieren, bevor wir die Personen untersuchen (realistisch). Wir betrachten nur binäre Eigenschaften, die die Gruppe jeweils in genau zwei Untergruppen teilen.

Als Beispiel wählen wir die Augenfarbe braun/nicht braun, die Haarfarbe schwarz/nicht schwarz und das Geschlecht weiblich/nicht weiblich. Wir bezeichnen die Anzahl schwarzhaariger, braunäugiger Menschen in unserer Gruppe als  $N(s,b)$ . Nun unterteilen wir diese Untergruppe weiter nach dem Geschlecht in zwei Teile und können folgende triviale Gleichung aufstellen (braune Flächen in Abb. 1):  

$$N(s,b) = N(s,b,w) + N(s,b,\bar{w})$$

Das durchgestrichene  $w$  steht dabei für «nicht weiblich». Die braunen Flächen umfassen also alle Menschen, die braune Augen und schwarze Haare haben.

Lässt man nun in den beiden Termen auf der rechten Seite der obigen Gleichung jeweils einen der eingrenzenden Bedingungen weg, erhalten wir in jedem Fall gleich viele oder mehr Menschen. In Abb. 1 kommen also noch die rosa und blaue Flächen dazu. Wir können also die unter Abb. 1 angegebene Ungleichung formulieren, die in unserer Erfahrungswelt

immer erfüllt ist: «Es gibt in einer Menschengruppe weniger schwarzhaarige, braunäugige Menschen als schwarzhaarige weibliche Menschen + braunäugige nicht-weibliche Menschen».

Indem man in Abb. 1 jede Teilfläche als Prozentsatz der Gesamtfläche ausdrückt, erhält man eine Wahrscheinlichkeits-Ungleichung, die den Vorteil hat, dass man die drei Terme auch in einzelnen Erhebungen mit unterschiedlichen Beobachtungszahlen gewinnen kann (um den statistischen Fehler genügend klein zu halten, muss man jedoch genügend viele Menschen untersuchen). Bezeichnet man die Wahrscheinlichkeiten mit  $p$  für probability, ergibt sich:  $p(s,b) \leq p(s,w) + p(b,\bar{w})$ . Das ist der einfachste Bell-Test mit 3 Termen.

Bells Ungleichung (Bell 1964) war komplizierter (sie enthält 4 Terme) und basiert auf einer längeren mathematischen Herleitung. Sie beruhte wie die obige Ungleichung darauf, dass Eigenschaften von Körpern *realistisch und lokal* sind. Bells grosse Leistung war, dass er seine Ungleichung mit einem Photon-Gedankenexperiment verknüpfen und mit Hilfe der Quantentheorie durchrechnen konnte. Er fand dabei erstaunlicherweise Situationen, bei denen seine Ungleichung verletzt wird, d.h. falsch ist.

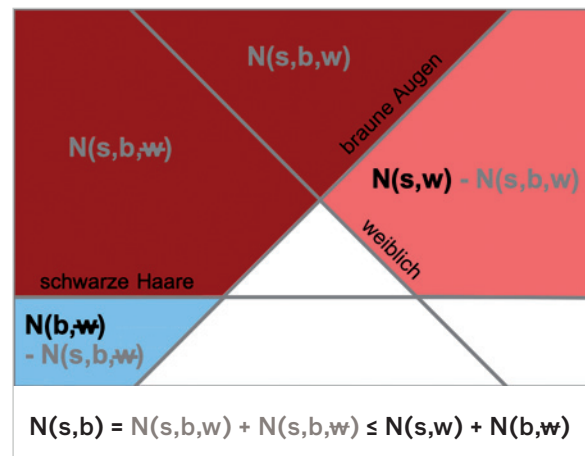


Abb. 1: Bellsche Ungleichung mit 3 Termen, wobei die Flächen proportional zu den entsprechenden Personenzahlen  $N(\ )$  seien. Die Ungleichung gilt für jede beliebige auch krummlinige Unterteilung, weil sie sich schreiben lässt als: Braun  $\leq$  Braun + Rosa + Blau. In Grenzfällen können die Flächen Rosa und Blau beide Null werden, dann gilt das Gleichheitszeichen =, sonst immer das Ungleichheitszeichen <. (Bild: Fritz Gassmann)



## 12 FORSCHUNG – PHYSIK IM ALLTAG

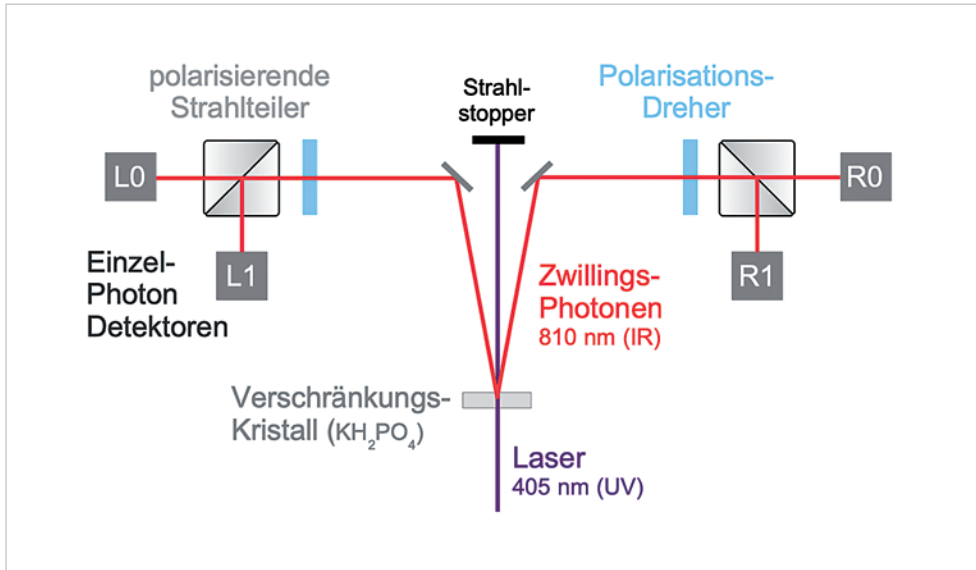


Abb. 2: Prinzipskizze der Experimente von Clauser, Aspen und Zeilinger. Mit Hilfe von Koinzidenzzählern wird gemessen, mit welcher Wahrscheinlichkeit Zwillingen-photonen in LO und RO gelangen. Erklärungen im Text. (Bild: Fritz Gassmann)

Wie kann der einfachste Bell-Test verletzt werden? Die Experimente der Nobelpreisträger hatten im Prinzip den in der Abb. 2 skizzierten Aufbau (vgl. auch «Bellsche Ungleichung», Wikipedia). In einem Verschränkungskristall entstehen aus einem hochfrequenten Photon (violett) zwei verschränkte infrarote Photonen (rot) mit je halber Energie. Diese haben vorerst keine Polarisation, da sie sich in einem überlagerten Zustand befinden (*nichtrealistisch*). In je einem Polarisationsdreher kann der undefinierte Zustand jedoch um beliebige Winkel gedreht werden.

Wir berechnen nun auf der Basis der Quantentheorie, mit welcher Wahrscheinlichkeit  $p(x,y)$  das linke Photon im Detektor LO und das rechte Photon im Detektor RO landen. Dabei sind  $x$  und  $y$  die Stellungen der Polarisationsdreher links und rechts, wobei für die Messresultate nur die Winkeldifferenzen  $y-x$  massgebend sind. Diese Wahrscheinlichkeiten können in Experimenten mit Hilfe von Koinzidenzzählern gemessen und mit den theoretischen Werten verglichen werden.

Wir nehmen an, dass das linke Photon etwas früher im polarisierenden Strahlteiler ankommt als dasjenige auf der rechten Seite. Der Strahlteiler ist so gebaut, dass unpolarisierte Photonen mit Wahrscheinlichkeit  $\frac{1}{2}$  in den Detektor LO gelangen. Sobald dies geschieht, ist der Zustand des linken Photons bestimmt. An diesem Vorgang erkennt man,

dass im Rahmen der Quantentheorie eine Messung nicht einfach als Ablesung einer Eigenschaft interpretiert werden kann, sondern dass sie den Zustand aktiv erzeugt.

Mit dem so definierten Zustand des linken Photons ist instantan auch der Zustand des Zwillingenphotons auf der rechten Seite als parallel dazu definiert (*Nichtlokalität*), da verschränkte Photonen gemäss der Quantentheorie immer im gleichen Zustand sind, egal wie weit sie voneinander entfernt sind (auch astronomische Distanzen sind zugelassen!).

Ohne Polarisationsdreher würde nun das rechte Photon mit Wahrscheinlichkeit 100% in den Detektor RO gelangen. Der Polarisationsdreher dreht jedoch die Polarisation des Photons um den Winkel  $b-s$  gegenüber dem linken. Nach dem Gesetz von Etienne Louis Malus (um 1810) ist deshalb die Wahrscheinlichkeit gleich  $\cos^2(b-s)$ , dass das rechte Photon in den Detektor RO gelangt. Damit können wir den Bell-Test mit den optimalen Werten  $s=0^\circ$ ,  $b=30^\circ$ ,  $w=60^\circ$  berechnen (andere Werte geben kleinere oder gar keine Verletzung des Bell-Tests). Dabei verwenden wir die Regel, dass die Wahrscheinlichkeit für gleichzeitige Klicks der Detektoren LO und RO gleich dem *Produkt* der beiden separaten Wahrscheinlichkeiten ist:

$$\begin{aligned}
 p(s,b) &= \frac{1}{2} \cos^2 30^\circ = \frac{3}{8} & (\cos 30^\circ = \sqrt{3}/2) \\
 p(s,w) &= \frac{1}{2} \cos^2 60^\circ = \frac{1}{8} & (\cos 60^\circ = \frac{1}{2}) \\
 p(b,w) &= \frac{1}{2} \sin^2 30^\circ = \frac{1}{8} & (\sin 30^\circ = \frac{1}{2})
 \end{aligned}$$



Der letzte Term braucht eine zusätzliche Überlegung: Hier müssen die *nicht weiblichen*  $w$ , nicht die weiblichen  $w$  gezählt werden, es muss also die Gegenwahrscheinlichkeit verwendet werden. Diese ist für den Winkel von  $30^\circ$  zwischen  $b$  und  $w$  gleich  $1 - \cos^2 30^\circ = \sin^2 30^\circ$ . Der Bell-Test lautet nun  $\frac{3}{8} \leq \frac{1}{8} + \frac{1}{8}$ , was offensichtlich falsch ist, der Bell-Test wird also bei Wahl dieser Winkel verletzt.

Sollten Experimente dieselben Resultate wie die obige quantentheoretische Rechnung ergeben, wäre bewiesen, dass es im Mikrokosmos *nicht lokal-realistisch* zugeht. Die drei Physik-Nobelpreisträger von 2022 haben dies experimentell zweifelsfrei gezeigt und damit das physikalische Weltbild revolutioniert. Verschränkung ist heute ein experimentell bewiesenes *nichtlokales* und *nichtrealistisches* Phänomen ausserhalb Raum und Zeit, das durch keine Theorie mit lokalen versteckten Variablen, wie Einstein dies wollte, erklärt werden kann.

### Kryptografie mit Zwillingenphotonen

Ein junger polnischer Doktorand an der Oxford University, Artur Ekert, hat 1991 erkannt, dass die rätselhaften nicht-lokalen Quantenkorrelationen als kryptografische Schlüssel verwendet werden könnten. Diese Idee öffnete eine Türe zur Quanteninformati-Community und bereits 1995 demonstrieren Physiker der Université de Genève die Verteilung eines Schlüssels via Glasfaserkabel der Swisscom zwischen Lausanne, Nyon und Genf (Gisin 2023). Aus diesem Projekt wurde als Spinoff 2001 die Firma «ID Quantique» in Genf gegründet. Zeilinger interessierte sich ebenfalls für Quanteninformation und patentierte 1999 sein EPR-Protokoll zum Schlüssel-Austausch.

Weshalb kann ein Schlüssel ausgetauscht werden aber trotzdem soll es unmöglich sein, damit instantane Informationsübermittlung zu entwickeln? Der Schlüsseltausch basiert darauf, dass zwei Stationen, L und R, von einer zwischen ihnen liegenden Quelle verschränkte Photonen erhalten und diese messen. Wenn die Polarisatoren parallel gestellt sind, gehen die Photonen bei beiden Stationen in die analogen Detektoren, d.h. beide in 0 oder beide in 1 (vgl. Abb. 2). Fasst man diese Detektornummern als Binärzahlen auf, entsteht so an beiden Stationen dieselbe binäre Zufallszahlenfolge, was äquivalent zu zwei identischen Schlüsseln ist. Es ist aber nicht möglich, diesen Vorgang zur Übertragung von Information zu

verwenden, weil das erstankommende Photon den Kanal 0 oder 1 zufällig auswählt und nicht gesteuert werden kann.

Zusätzlich zum Schlüsselaustausch lässt sich durch einen Bell-Test feststellen, ob jemand versucht, die Verbindung zu hacken. Zu diesem Zweck wechselt man an beiden Stationen unabhängig voneinander und zufällig die Polarisationsdreher zwischen optimalen Positionen. Durch anschliessenden Austausch der eingestellten Positionen via das normale Internet lässt sich durch einen Bell-Test feststellen, ob die Photonen verschränkt waren. Falls dabei die Bell-Ungleichung erfüllt wird, war dies nicht der Fall und der Schlüssel wird verworfen und es wird ein anderer Übertragungsweg gesucht. Dieser Test beruht darauf, dass es keinen «Quantenkopierer» gibt, d.h. dem Hacker ist es nicht möglich, das ankommende Photon zu kopieren, um es zu analysieren und die Kopie weiterzuschicken, damit niemand etwas merken sollte (die Kopie ist nicht mehr verschränkt mit dem Photon der Gegenstation).

Diese Kryptografieanwendung hat weltweit riesige Aufmerksamkeit auf sich gezogen und das Interesse vieler Forschungsgruppen auf die Quantenoptik gelenkt. In kurzer Zeit entstanden neue Ansätze zu Quanten-Computern, zur Teleportation von Quantenzuständen und zum Quanten-Internet; der Weg zu Nobelpreisen wurde geöffnet.

Fritz Gassmann

### Literatur

Bell J.S. 1964. On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. *Physics* 1(3): 195-200.

Gisin N. 2023. Quantum non-locality: from denigration to the Nobel Prize, via quantum cryptography. *Europhysics News* 54/1: 20-23

# Das heikle Wechselspiel von falschen Hypothesen und experimentellen Daten

Falsche Hypothesen gehören zum naturwissenschaftlichen Prozess des Wissenserwerbs dazu. Wie könnten sie auch nicht. Einstein sagte einmal: «Wenn wir wüssten, was wir tun, würde das nicht Forschung heißen, oder?» Eine falsche Hypothese aufzustellen, ist nichts Dummes, solange die Hypothese schlüssig und – das ist der zentrale Aspekt – experimentell widerlegbar ist. Wissenschaftshistorisch besonders interessante Beispiele sind dabei diejenigen, welche, ihrer Unkorrektheit zum Trotz, tieferen Einsichten förderlich waren. Irrtümer können unter Umständen Türöffner für neue Erkenntnisse sein.

## Phlogiston und Dunkelheitsstrahlen

Nehmen wir als erstes Beispiel die Phlogistontheorie. Sie war ein von Georg Ernst Stahl entwickeltes Modell, welches über den Grossteil des 18. Jahrhunderts hinweg die dominierende Modellvorstellung dafür lieferte, was gewisse Stoffe brennbar, bzw. unbrennbar machte. Phlogiston war dabei eine hypothetische Substanz, welche den brennbaren Dingen beigemischt war und welche beim Verbrennungsvorgang entwich. Es entsprach somit dem bei Becher und Paracelsus für die Brennbarkeit eines Stoffes verantwortlichen alchemistischen Prinzip des Schwefels.

Als vor allem durch Antoine Lavoisier gegen Ende des 18. Jahrhunderts durchgeführte Experimente auf die zentrale Rolle von Sauerstoff in Verbrennungsvorgängen hinwiesen, war die Phlogistontheorie schlagartig weg vom Fenster: Stahlwolle, die verbrennt, wird schwerer, während die Luft darüber Masse verliert. Das lässt sich durch eine chemische Reaktion von Eisen mit Sauerstoff aus der Luft mit Eisenoxid als festem Reaktionsprodukt nachvollziehbar erklären.

Eine dem brennenden Eisen entweichende Substanz jedoch, welche das verbrannte Material schwerer zurücklassen würde, müsste eine negative Masse besitzen – eine nur schwer zu akzeptierende Eigenschaft eines Stoffes.

Trotz falscher Grundidee führte die fast hundert Jahre vorherrschende Phlogistontheorie dazu, dass Säure/Basen- und Reduktions/Oxidations-

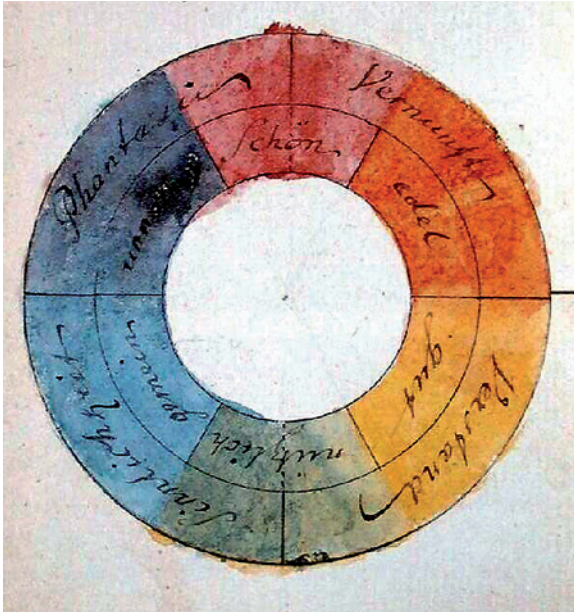
reaktionen (an Luft verbrennende Stoffe werden durch Sauerstoff oxidiert) systematisch untersucht und die beobachteten Regelmässigkeiten in einem theoretischen Konzept zusammengefasst werden konnten. Ein falsches zwar, aber genau dieser Fakt offenbarte sich ja erst durch die sich anhäufenden experimentellen Resultate.

## Unnötig umständliche Lichttheorie

Ein Beispiel für eine falsche Hypothese, welche im Gegensatz zum eben beschriebenen Beispiel in eine wissenschaftliche Sackgasse führte, stellt die Lichttheorie nach Goethe dar. In postmodernistischen Kreisen wird sie als herausragendes Beispiel intellektueller Kreativität und darüber hinaus als ernst-



Georg Ernst Stahl (1659-1734) war ein deutscher Alchemist, Chemiker, Mediziner, Hof- und Leibarzt sowie Metallurg, der als Professor in Halle (Saale) wirkte. Als Chemiker entwickelte er die Theorie vom hypothetischen «Phlogiston», als Mediziner war er Vertreter der auch als frühe Form eines psychodynamischen Krankheitskonzepts angesehenen Anima-Lehre. Kupferstich von Johann Georg Mentzel. (Bild: Herzog August Bibliothek Wolfenbüttel CC BY-SA)



Farbenkreis zur Symbolisierung des menschlichen Geistes- und Seelenlebens. Aquarellierte Federzeichnung von Goethe aus dem Jahr 1809. (Bild: Wikimedia Commons, ursprünglich hochgeladen auf de.wikipedia)

zunehmende Alternative zum «Wissenschaftsmainstream» gepriesen. Naturwissenschaftlich betrachtet, ist sie, was ihre Interpretation der Lichtbrechungsexperimente Newtons betrifft, eine durchaus faszinierende, wenn auch nach Ockham unnötig umständliche, aber in sich schlüssige intellektuelle Spielerei.

Analysiert man ihre Konsequenzen aber im Licht der schier Menge experimentell gestützter naturwissenschaftlicher Einsichten der vergangenen 200 Jahre, erweist sie sich als dermassen falsch, dass ihrer Besprechung in einer naturwissenschaftlichen Schrift eigentlich kein Platz zustehen sollte.

Von den in diesem Essay besprochenen Beispielen falscher Hypothesen, kann man Goethes Lichttheorie als einzige unter der Rubrik «interessant, aber unwichtig» ad acta legen. Hat sie nicht zu tieferen Einsichten geführt, stand sie zumindest keinen solchen im Wege.

### Die Griechen haben scheinbar schon alles gewusst

Was passiert, wenn ganze Gesellschaften an Hypothesen haften bleiben, obwohl letztere von experimentellen Resultaten klar widerlegt werden (bzw. widerlegt werden würden, wenn man denn

Experimente durchführen würde), soll mit dem Vier-Elemente-Weltbild anhand der beiden Beispiele des Goldmachens und des Aderlasses dargelegt werden.

Die Chrysopoeia der Alchemisten ist die über viele hundert Jahre versuchte Transmutation von einem billigen Material zu Gold. Auf der Basis einer theoretischen Grundlage – den vier Elementen nach Empedokles – zu versuchen, aus zum Beispiel Blei Gold herzustellen, ist keine dumme Idee, sondern liegt vielmehr auf der Hand.

Aus heutiger Sicht könnte man dieses Experiment sogar als wissenschaftlichen Imperativ bezeichnen. Die zugrundeliegende Hypothese, dass alle Materie aus unterschiedlichen Anteilen derselben vier Elemente bestünde, war testbar und führte zur ersten bewussten experimentellen Auseinandersetzung mit der Natur in der Geschichte der Menschheit und war somit ein wichtiger Vorläufer modernen Wissenserwerbs.



Statue des Philosophen Empedokles von Friedrich Beer auf der Attika des Naturhistorischen Museums Wien. (Bild: Hubertl, Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0)





Aderlass in Bayern im 15. Jahrhundert. Miniatur aus einem Manuskript der Bayerischen Landesbibliothek. (Bild: München, Cgm 340, Blatt 129r)

Was die Alchemie aber klar von Naturwissenschaft unterscheidet, ist, von astrologisch-magischen Aspekten mal abgesehen, eben genau die fehlende Bereitschaft, das theoretische Konzept aufgrund der widersprechenden experimentellen Resultate über Bord zu werfen.

Man sollte meinen, dass über tausend Jahre fehlgeschlagenes Goldmachen ausreichen sollten, das zugrundeliegende Konzept als Unsinn zu entlarven. Aber der Glaube, dass alles, was dem goldenen Zeitalter der Griechen entsprungen war, der Wahrheit entsprechen musste, lag allzu stark in den Köpfen der gebildeten Menschen verankert. Was die Griechen erkannt hatten, war unumstößlich. Was die Griechen nicht wussten, war nicht wert, gewusst zu werden. Was den Griechen widersprach, musste eine fehlgeleitete Interpretation der Welt sein. Und dass Thomas von Aquin im 13. Jahrhundert die christliche Dogmatik mit der aristotelischen Philosophie verwob, war einer Falsifikation der Vier-Elemente-Hypothese gewiss nicht förderlich.

Derselben Numerologie folgend, entwickelte Galen im zweiten Jahrhundert seine Humoralpathologie: die medizinische Hypothese der vier

Körpersäfte Blut, Phlegma, schwarzer und gelber Galle, welche Krankheiten verursachten, wenn sie aus dem Gleichgewicht gerieten. War es erst einmal so geschehen, blieb nur das Mittel des Aderlasses, um den überschüssigen Saft aus dem Körper abfließen zu lassen und so dem kranken Körper die Möglichkeit zu geben, sich dem Gleichgewicht wieder anzunähern.

Und wieder ist diese falsche Hypothese für die entsprechende Zeit und das geringe Ausmass medizinisch-anatomischen Wissens *an sich* erst einmal keine dumme Idee. Wenn auch erwähnt sein sollte, dass sie gewissen hippokratischen Fortschritten, wie dem Einfluss von Umwelt und Wasserqualität auf die Gesundheit nicht nur keinen Tribut zollte, sondern ihr streckenweise sogar widersprach.

Nun benötigt man weder herausragende Vorstellungskraft noch vertieftes medizinisches Fachwissen, um zum Schluss zu kommen, dass Aderlass in den meisten Fällen keinen positiven Effekt auf die Patienten gehabt haben dürfte. Im Gegenteil dürfte der Blutverlust in der Folge eines Aderlasses häufiger als nicht zur Zustandsverschlechterung eines ohnehin schon geschwächten Patienten geführt haben.

Man kann sich gut vorstellen, wie die Effektivität des Aderlasses im Fall des Ablebens eines zur Ader Gelassenen mit einem leider zu spät angesetzten oder vom ungebildeten Barbier falsch ausgeführten Schnitt «zurückargumentiert» wurde. Welche Resultate hätte wohl eine wissenschaftliche Doppelblindstudie über die Wirksamkeit des Aderlasses ergeben? Wieder war es die Unfähigkeit, experimentelle Daten mehr zu gewichten als falsche Hypothesen, die an weltanschaulichen Dogmen festhalten liess.

### Lyssenkoismus

Ein sonderbares, scheinbar anachronistisches, dramatisches Beispiel dafür, was passieren kann, wenn die einer theoretischen Doktrin widersprechenden experimentellen Daten nicht nur aus dem Weg konfabuliert werden, sondern als Angriff auf die Nation gesehen werden und zu politischer Verfolgung und Mord an den entsprechenden Forschern führen, ist der Lyssenkoismus.

Als Lyssenkoismus wird die von Trofim Lyssenko in den 1930er-Jahren entwickelte, pseudowissenschaftliche Hypothese bezeichnet, dass Eigenschaften von Organismen – Kulturpflanzen wie





Der sowjetische Agrarwissenschaftler Trofim Denissowitsch Lyssenko, hier in einer Aufnahme von 1938, erlangte unter Josef Stalin grossen politischen Einfluss. Seine pseudowissenschaftliche Theorie des Lyssenkoismus hat die Entwicklung der Genetik in der Sowjetunion und den von ihr abhängigen Staaten um Jahrzehnte zurückgehalten. (Bild: Wikimedia Commons Gemeinfrei)

Menschen – nicht darwinistisch über Gene, sondern lamarckistisch über Umwelteinflüsse vererbt werden. Eine These, welche in ihrer Radikalität schon damals wissenschaftlich nicht mehr haltbar war. In der Sowjetunion als bourgeois und reaktionär verschrien, sahen sich Forscher der sich in dieser Zeit entwickelnden Genetik zunehmend Repressalien ausgesetzt. Im Zuge der von Stalin angeordneten «Grossen Säuberung» von 1937/38 wurden viele der führenden Genetiker, welche es wagten, ihre wissenschaftlichen Ergebnisse zu veröffentlichen, des Landes verwiesen, verhaftet oder erschossen.

Gleichzeitig wurden konforme Resultate massiv geschönt oder schlichtweg erfunden. Natürlich konnten die ausbleibenden Zuchterfolge gerade bei Nutzpflanzen nicht für immer geheim gehalten und Ernteausfälle westlichen Saboteuren in die Schuhe geschoben werden. Trotz einer nur halbwegs vertuschbaren Hungersnot und zunehmender, wenn auch verständlicherweise vorsichtiger Kritik gerade durch mutige Vertreter der wissenschaftlichen Akademien und schliesslich sogar des Präsidenten der Prüfkommision für Saatgut, wurden die Kern-

sätze des Lyssenkoismus 1948 festgehalten (Wagenitz, 2011): 1. Die Vererbung ist an die lebende Substanz geknüpft, es gibt keine Gene. 2. Erworbene Merkmale können vererbt werden. 3. Beim Pfropfen können Erbfaktoren und damit Merkmale von der Unterlage auf das Pfropfreis übergehen. 4. Arten können spontan und unvermittelt, ohne Zwischenschritte, aus anderen Arten hervorgehen (etwa Roggen aus Weizen). 5. Arten machen sich untereinander keine Konkurrenz, sondern kooperieren miteinander. 6. In der Biologie sind alle statistischen Methoden irreführend und abzulehnen. 7. Auch Zellen können spontan aus nicht zellulärem Material neu entstehen.

Dass sich eine solche Doktrin im Angesicht in Gänze ausbleibender experimenteller Unterstützung über ein Vierteljahrhundert halten konnte, ist nur mit dem Wissen um die totalitäre Prägung des sowjetischen Staates zu begreifen – und dem Fakt, dass Stalin nicht nur leidenschaftlicher Hobbygärtner, sondern selber überzeugter Lamarckist war.

### Epilog

Ob Flacherdler oder 5G-Antennenphobiker, Homöopathen, Anthroposophen oder Anhänger der Germanischen Neuen Medizin, Chemtrailschwurbler oder Hohlweltgläubige – wir sind umgeben von Menschen, die naturwissenschaftliche Fakten – das heisst experimentelle Tatsachen – nicht akzeptieren und durch letztere als falsch identifizierte Hypothesen nicht ablegen können.

Lassen Sie uns alle eine Lehre daraus ziehen und ganz selbstkritisch uns selber durchleuchten, ob da nicht vielleicht Dogmen versteckt liegen, die unserem wissenschaftlichen Verständnis im Wege stehen könnten. Bei mir mag das die Diskontinuität des Raumes sein, die von der Schleifenquantengravitation gefordert wird. Raumzeit muss doch glatt sein, oder?

Was sind Ihre Grenzen des Widerlegbaren?

René Oetterli

### Literatur

Wagenitz G. 2011. Lyssenkos Agrobiologie (Lyssenkoismus) contra Genetik in der Sowjetunion und der DDR. Jahrbuch der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen, 232.

# Wie sich Erdbeben in der Schweiz auswirken könnten

Statistisch gesehen erlebt jede Person in der Schweiz im Laufe ihres Lebens mindestens ein Erdbeben, das ernste Schäden verursacht. Damit gehören Erdbeben neben Pandemien und Strommangellagen zu den grössten Risiken der Schweiz. Im Vergleich zu anderen Naturgefahren treten sie zwar seltener auf, können aber bedeutsame Schäden verursachen.

Der Schweizerische Erdbebendienst (SED) hat nun im März ein neues Erdbebenrisikomodelle veröffentlicht, das es erstmals erlaubt, die zu erwartenden Schäden fundiert zu beziffern. Während die Erdbebengefährdung abschätzt, wie oft und wie stark die Erde an bestimmten Orten in Zukunft beben könnte, beschreibt das Erdbebenrisiko die Auswirkungen auf Personen und Gebäude. Im Erdbebenrisikomodelle werden dazu detaillierte Informationen zur Erdbebengefährdung, zum Einfluss des lokalen Untergrunds, zur Verletzbarkeit von Gebäuden sowie zu den betroffenen Personen und Werten kombiniert.

## Grösstes Risiko in den Städten

Das grösste Erdbebenrisiko besteht gemäss dem neuen Modell in den Städten Basel, Genf, Zürich, Luzern und Bern. Zwar unterscheidet sich die Erdbebengefährdung in diesen Regionen, aber wegen ihrer Grösse befinden sich in allen fünf Städten zahlreiche Personen und Werte, die bei einem Erdbeben betroffen wären. Zudem verfügen diese Städte über viele, teils

besonders verletzbare Gebäude, die oft auf einem weichen Untergrund stehen, der Erdbebenwellen verstärkt.

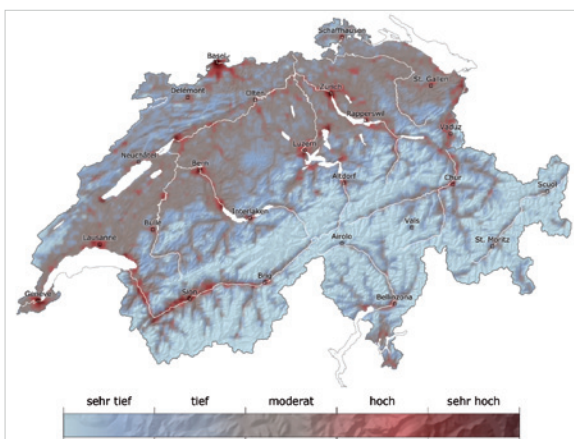
Die meisten Gebäudeschäden infolge von Erdbeben sind in den Kantonen Bern, Wallis, Zürich, Waadt und Basel-Stadt zu erwarten. Gemäss den Modellberechnungen ist zu erwarten, dass Erdbeben über einen Zeitraum von 100 Jahren allein an Gebäuden und ihren Inhalten wie Möbel einen wirtschaftlichen Schaden von 11 bis 44 Milliarden Schweizer Franken verursachen. Der SED rechnet damit, dass insgesamt etwa 150 bis 1600 Personen ihr Leben verlieren könnten und bis zu 175 000 kurz- bis langfristig obdachlos werden. Hinzu kommen Schäden an Infrastrukturen und Verluste durch Hangrutschungen, Feuer oder Betriebsunterbrüche, die durch das Erdbeben ausgelöst werden. Das Erdbebenrisiko verteilt sich dabei nicht gleichmässig über die Zeit, sondern ist durch seltene, katastrophale Erdbeben dominiert, die meistens ohne Vorwarnung auftreten.

Neben Risikoeinschätzungen für gewisse Orte kann der Erdbebendienst neu anhand des Erdbebenrisikomodelle Szenarien erstellen. Damit lassen sich unter anderem die heute zu erwartenden Auswirkungen historischer Schadensbeben in der Schweiz veranschaulichen. Bei einer Wiederholung des Basler Bebens von 1356 mit einer Magnitude von 6,6 wäre in der Schweiz beispielsweise mit etwa 3000 Toten und Gebäudeschäden im Umfang von ungefähr 45 Milliarden Franken zu rechnen.

Basierend auf dem Erdbebenrisikomodelle wird der Erdbebendienst nach jedem Beben mit einer Magnitude von 3 oder grösser eine schnelle Schadensabschätzung veröffentlichen. Die schnelle Schadensabschätzung informiert die Bevölkerung und Einsatzkräfte bei grösseren Beben über die zu erwartenden Folgen. Als eines der ersten Länder weltweit verfügt die Schweiz damit über eine frei zugängliche Grundlage, um fundierte Entscheide im Bereich Erdbebenvorsorge und Ereignisbewältigung zu treffen.

Schweizerischer Erdbebendienst

Informationen zum neuen Risikomodelle finden sich unter [www.seismo.ethz.ch/de/about-us/archive-news/2023/#it\\_00318.xml](http://www.seismo.ethz.ch/de/about-us/archive-news/2023/#it_00318.xml)



Die neue Erdbebenrisikokarte der Schweiz zeigt, wo bei einem Erdbeben mit den grössten Schäden und den meisten Betroffenen gerechnet werden muss. (Bild: SED)

# NGZH Journal Club – der Podcast der NGZH ist jetzt online

Wie in der Vierteljahrsschrift 3|2022 angekündigt, verstärken wir unser Engagement in den sozialen Medien mit einem weiteren Kommunikationskanal: Seit Mai dieses Jahres ist die NGZH nun auch in der Podcastwelt vertreten. Damit möchte unsere Gesellschaft insbesondere ein jüngeres Publikum ansprechen und dieses für naturwissenschaftlich-technische Themen interessieren. Ermöglicht wurde dieses Vorhaben massgeblich durch die finanzielle Unterstützung der SCNAT.

## Aktuelles aus der Wissenschaft

Immer auf Monatsbeginn lassen die Biologin Barbara Schnüriger, der Physiker Fritz Gassmann und der Chemiker René Oetterli den vergangenen Monat naturwissenschaftlich Revue passieren. Sie sprechen über aktuelle Publikationen aus den Bereichen Naturwissenschaften, Technologie, Medizin und Mathematik und ordnen aktuelle Themen in einen grösseren Kontext ein. Dabei kommen auch persönliche Erfahrungen und Erinnerungen zur Sprache, die das Gespräch auflockern.

Im Lauf der Zeit sind auch Gastauftritte und Interviews mit Vertreterinnen und Vertretern von anderen Disziplinen geplant, so dass sich das Feld der Themen nach und nach erweitern wird.

## Verschränkung, Plastik, Parasiten

Die erste Folge des neuen Podcasts trägt den Titel «Verschränkung, Plastik, Parasiten». Fritz Gassmann erzählt in dieser Folge über einen Keller, in dem das bisher grösste System quantenverschränkt wurde; Barbara Schnüriger zeigt auf, wie Wolfsgehirne von Parasiten fies manipuliert werden; und René Oetterli erklärt, wie winzige Kanäle das Recycling von Plastik erleichtern.

## Ergänzung zu traditionellen Kanälen

Dass die NGZH einen Podcast realisiert, hat einen klaren Grund: Alle traditionellen Kommunikationskanäle der NGZH werden von den



heutigen Mitgliedern geschätzt und deshalb will auch niemand diese preisgeben. Doch leider verfängt kein einziger traditioneller Kanal bei der jungen Generation – eine typische No-future-Situation! Der einzig gangbare Weg scheint zu sein, das Spektrum an Kanälen zu erweitern. Ein wissenschaftlicher Podcast, der anspruchsvolle Themen auf unterhaltsame Weise vermittelt, scheint dasjenige Mittel zu sein, das am besten zur NGZH passt und Interessierte innerhalb der jungen Generation ansprechen dürfte.

## So findet man den Podcast

Der Podcast ist derzeit über Spotify (zu finden unter <https://open.spotify.com>) und iTunes abrufbar – einfach in der Suche das Stichwort «NGZH» eingeben, und schon wird er gefunden. Es ist vorgesehen, ihn auch auf weiteren Kanälen zu verbreiten.

## Helfen Sie mit!

Hören Sie rein. Lassen Sie sich faszinieren. Und vor allem: Reden Sie davon und empfehlen Sie den Podcast weiter.

René Oetterli



# Eine Zeitreise zu geologischen Leckerbissen des Kantons Zürich

Am 24. März konnten 22 Mitglieder unserer Naturforschenden Gesellschaft – unter Führung des Sammlungskurators Iwan Stössel und des Herausgebers des aktuellen Neujahrsblattes Thomas Bolliger – die Erdwissenschaftlichen Sammlungen der ETH Zürich besichtigen.

Grundlagen aus dem 19. Jahrhundert  
Den historischen Kern der Sammlungen bilden Objekte der NGZH, welche im frühen 19. Jahrhundert vom Kanton Zürich erworben worden waren. Nach Gründung der Universität und des Polytechnikums gelangten die Bestände an die beiden Zürcher Hochschulen und wurden dort entsprechend den jeweiligen Forschungsinteressen laufend ausgebaut.

Heute sind die Erdwissenschaften eine Paradedisziplin des Forschungsstandortes Zürich. Im nach Fachbereichen geordneten QS-

Ranking der Universitäten der Welt belegte die ETH Zürich in diesem Bereich wiederholt den ersten Platz.

Die traditionelle Heimat der Erdwissenschaften an der ETH Zürich ist das 1916 eingeweihte NO-Gebäude an der Sonneggstrasse 5. Im geräumigen Lichthof wird seit 2009 die öffentliche Dauerausstellung focusTerra in einem dreigeschossigen, turmähnlichen Ausstellungskörper präsentiert. Dagegen werden die wissenschaftlichen Sammlungsbestände unterirdisch aufbewahrt. Und zusätzlich gibt es neuerdings Lagerräumlichkeiten in einem gemeinsam mit der Universität Zürich betriebenen modernen Sammlungsdepot in Buchs.

Anspruchsvolle Erfassung  
Die Erdwissenschaftlichen Sammlungen der ETH Zürich umfassen insgesamt etwa 900 000 Objekte, die auf rund 9000 Schubladen im



Das NO-Gebäude, in dem die Erdwissenschaften an der ETH Zürich untergebracht sind, wurde vom Zürcher Architekten Gustav Gull entworfen. Die Aufnahme zeigt, wie die Bestände der Erdwissenschaftlichen Sammlung kurz nach der Einweihung des Gebäudes in der grossen Halle aufbewahrt und präsentiert wurden. (Bild: ETH-Bibliothek, Bildarchiv)





Ein Blick in die heutige wissenschaftliche Sammlung in den unterirdischen Geschossen des NO-Gebäudes. (Bild: Stefan Ungricht)

**NO-Gebäude und 9000 Schubladen im neuen Depot verteilt sind.**

Die zahlreichen Gegenstände der Sammlungen an der ETH Zürich sind denkbar vielfältig – von Gesteinen über Mineralien und Fossilien hin zu Reliefs – und erschliessen sich darum auch nicht nach einem gemeinsamen System. Im Unterschied etwa zur Pflanzensammlung im Herbarium des Botanischen Gartens an der Zollikerstrasse 107 wurden in den Erdwissenschaftlichen Sammlungen der ETH Zürich die Belege aus dem Kanton Zürich daher auch nie ausgesondert.

Da es kein gemeinsames, übergeordnetes Klassifizierungssystem der Gegenstände gibt, ist die Erfassung der einzelnen Sammlungsteile in einer Datenbank umso wichtiger, um schnell einen vollständigen Überblick auf alle relevanten Objekte zu einer spezifischen Frage erhalten zu können. Diese Inventarisierung ist auch heute noch längst nicht abgeschlossen.

Stefan Ungricht

### Teilen Sie Ihre Schätze

Haben Sie bei einem Ausflug im Kanton oder bei einer Weltreise auf der anderen Seite der Erde einen faszinierenden Stein gefunden, über den Sie gerne mehr wissen möchten? An den regelmässig stattfindenden Beratungen der ETH-Sammlungskuratoren können Sie Ihren Fund bestimmen lassen.

<https://collections.erdw.ethz.ch/>

Möchten Sie der Welt von einem ganz besonderen Stein berichten, den Sie auf einer Ihrer Reisen gefunden haben? Teilen Sie Ihre Erzählung auf dem ETH-Portal «Reisesteine» und tragen Sie bei zu einer anregenden und inspirierenden virtuellen Kollektion!

<https://reisesteine.ethz.ch/de/>



Die Vierteljahrsschrift (VJS) erscheint viermal jährlich:  
März, Juni, September, Dezember

Herausgeber

Naturforschende Gesellschaft in Zürich NGZH

NGZH-Vorstand

Dr. Fritz Gassmann (Präsident)  
Dr. Stefan Ungricht (Vizepräsident)  
Dr. Felix Würsten (Quästor)  
Dr. René Oetterli (Soziale Medien)  
Dr. Heinzpeter Stucki (Archivar)  
Prof. em. Dr. Conradin A. Burga  
Nicole Dettwiler (Studierendenvertreterin)  
Prof. Dr. Rita Gobet  
Prof. em. Dr. Rolf Rutishauser  
Prof. em. Dr. Martin Schwyzer  
Prof. em. Dr. Wilfried Winkler  
Prof. Dr. Felix Zelder

Redaktionskomitee

Fritz Gassmann  
Martin Schwyzer

Gestaltungskonzept

Barbara Hoffmann  
[www.barbara-hoffmann.com](http://www.barbara-hoffmann.com)

Redaktion und Satz

Felix Würsten

Druck

Koprint AG, Alpnach Dorf

Auflage

900

Kontakt

Sekretariat der NGZH  
Sekretariat a.i.  
Fritz Gassmann  
Limmatstrasse 6  
5412 Vogelsang  
[sekretariat@ngzh.ch](mailto:sekretariat@ngzh.ch)

[redaktion@ngzh.ch](mailto:redaktion@ngzh.ch)  
[www.ngzh.ch](http://www.ngzh.ch)

Redaktionsschluss

31. Januar / 30. April  
31. Juli / 31. Oktober

ISSN

0042-5672

Nachdruck

Mit Quellenangabe erlaubt

Mit Unterstützung von:



# Veranstaltungen

1.-3. September 2023

ETH und Universität Zürich

## Scientifica 2023

An der nächsten Scientifica präsentieren die ETH Zürich und die Universität Zürich wieder Forschung zum Anfassen – an Besucherständen, in Vorträgen und Workshops. Das detaillierte Programm wird ab Juli 2023 auf der Website verfügbar sein.

<https://scientifica.ch/>

# Ausstellungen

bis 16. Juli 2023

Kulturama, Museum des Menschen

Englischviertelstrasse 9, Zürich

## Erde am Limit

Eine interaktive Ausstellung über den Zustand der Erde, die den Einfluss des Menschen auf den Planeten verständlich, anschaulich und sowohl auf ernste wie auch spielerische Art erklärt.

Die Erde ist ein besonderer Planet: Auf ihr ist Leben entstanden. Über Jahrtausende hinweg existierte der Mensch, ohne tiefgreifende Spuren in der Umwelt zu hinterlassen. Doch mittlerweile setzt der stetig wachsende Bedarf an Platz und natürlichen Ressourcen die Ökosysteme global unter Druck.

Die Sonderausstellung ERDE AM LIMIT verdeutlicht die Rolle des Menschen in der Natur und fragt: Wie steht es um unseren Planeten? Welche natürlichen Prozesse treiben das Leben an? Welche Konsequenzen hat unser Tun langfristig und wie können wir die Zukunft anders gestalten?

Weitere Informationen: [erdeamlimit.ch](http://erdeamlimit.ch)

Science Pavilion UZH

Campus Irchel, Winterthurerstr. 190, Zürich

## Langsames Chaos

Chaos ist allgegenwärtig. Im Alltag wird darunter Unordnung und Regellosigkeit verstanden. Wussten Sie jedoch, dass Chaos

für Mathematiker:innen Regeln hat? Oder dass es schnell oder langsam sein kann? Und was haben eigentlich Schmetterlinge und das Wetter mit Chaos zu tun?

In dieser Ausstellung erfahren Sie mehr über die Forschung des Instituts für Mathematik an chaotischen Systemen. Es bleibt dabei nicht nur theoretisch. Sie können selbst einen schönen mathematischen Trick nutzen, um durch Unfolding bzw. Entfaltung eines spezifischen Billardkugelverlaufs, zu einer Geraden zu gelangen.

Lassen Sie sich von den raffinierten Tricks der Mathematik und von den hervorragenden Leistungen der UZH-Professorin Corinna Ulcigrai inspirieren. Auch sie fand ihre Inspiration in der Arbeit von verschiedenen Mathematikerinnen.

[www.sciencepavilion.uzh.ch/de/Sehen/aktuelle-ausstellungen/chaos.html](http://www.sciencepavilion.uzh.ch/de/Sehen/aktuelle-ausstellungen/chaos.html)

bis 31. August 2023

Swiss Science Center Technorama

Technoramastrasse 1, Winterthur

## Adventure Rooms

In 60 Minuten aus einem unserer Adventure Rooms entfliehen. Alles mit Hilfe von Rätseln, die auf naturwissenschaftlichen Phänomenen beruhen. Wird es dir und deinen Freunden gelingen? Besuche die beiden AdventureRooms «Spektrum» und «Kontinuum» im Technorama und finde es heraus.

<https://www.technorama.ch/de/home>

Weitere Daten von Veranstaltungen werden laufend in unserer Agenda auf [www.ngzh.ch](http://www.ngzh.ch) veröffentlicht.



