



**Jürgen Ehlers**

---

**Feierstunde anlässlich der Enthüllung der Gedenktafel für Albert Einstein am Portal des Akademieflügels der Staatsbibliothek zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz am 25. November 1994**

Gedenkansprache

In: Berichte und Abhandlungen / Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften (vormals Preußische Akademie der Wissenschaften) ; 1.1995, S. 304-308

Persistent Identifier: [urn:nbn:de:kobv:b4-opus-28596](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:b4-opus-28596)

---

Die vorliegende Datei wird Ihnen von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften unter einer Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Germany (cc by-nc-sa 3.0) Licence zur Verfügung gestellt.



## Gedenkansprache

*Jürgen Ehlers*

Meine sehr verehrten Damen und Herren,  
es gibt wohl in der Geschichte der Physik und vielleicht sogar in der Geschichte der Naturwissenschaften kaum einen Monat, in dem sich eine so spannende und zukunftssträchtige Entwicklung vollzogen hat, wie im November 1915 hier in Berlin. In vier aufeinanderfolgenden Arbeiten am 4., am 11., am 18. und schließlich am 25. November legte Einstein der Preußischen Akademie der Wissenschaften auf insgesamt nur 25 Druckseiten, seine – in seinen eigenen Worten – „letzten Irrtümer“ auf dem sehr mühsamen und langjährigen Weg zu seiner Gravitationstheorie nieder und erreichte schließlich in der letzten dieser Arbeiten die Formulierung dessen, was wir heute als das Kernstück der Raumzeit- und Gravitationstheorie betrachten, nämlich seine Feldgleichung der Gravitation. Im letzten Absatz bringt er seine tiefe Befriedigung über den Abschluß dieser Arbeiten zum Ausdruck, der für ihn wohl auch mit dem Gefühl der Befreiung von einer seit Jahren drückenden Last verbunden war. Einstein sagt in seinem am 25. November 1915 übergebenen Manuskript: „Damit ist endlich die allgemeine Relativitätstheorie als logisches Gebäude abgeschlossen. Das Relativitätspostulat in seiner allgemeinsten Fassung, welches die Raumzeitkoordinaten zu physikalisch bedeutungslosen Parametern macht, führt mit zwingender Notwendigkeit zu einer ganz bestimmten Theorie der Gravitation, welche die Perihelbewegung des Merkur erklärt.“ Das sind geradezu antike Sätze, die wohl auch auf Einsteins Stimmung in jener Zeit schließen lassen.

Die Allgemeine Relativitätstheorie unterscheidet sich von allen anderen physikalischen Theorien in einer wichtigen Hinsicht: Nur in dieser Theorie ist die Struktur der Raumzeit, also der Arena, in der sich die physikalischen Vorgänge abspielen, nicht fest vorgegeben. Vielmehr werden die Maßverhältnisse – diejenigen Gesetze also, die die Geometrie beherrschen, die die Beziehungen zwischen Abständen und durch Uhren meßbaren Zeitintervallen regeln – als ein von den sich in der Raumzeitarena abspielenden Vorgängen beeinflusstes physikalisches Feld aufgefaßt. Die Feldgleichung, die am 25. November 1915 zuerst endgültig formuliert wurde, präzisiert die Art, in der die Raumzeitstruktur mit der Materie wechselwirkt. Anschaulich läßt sich das wie folgt ausdrücken: Jeder Körper formt, krümmt, verzerrt die Maßverhältnisse der Raumzeit in seiner Umgebung, und dadurch, daß jeder Körper in diese Raumzeit eingebettet ist, spürt er auch etwas von der Anwesenheit der übrigen Körper.

Diese Beschreibung der Wechselwirkung zwischen verschiedenen Körpern ist für den Physiker besonders überzeugend, weil im Gegensatz zu anderen Theorien in der allgemeinen Relativitätstheorie die Wechselwirkungen, d. h. die gegenseitigen



Beeinflussungen der Körper, nicht ad hoc zu den sonstigen Gesetzen hinzugefügt werden müssen, sondern zwangsläufig aus der geometrischen Beschreibungsweise und der daraus folgenden Nichtlinearität der Grundgleichung hervorgehen. Erst lange nach dem Tode Einsteins hat sich herausgestellt, daß solche nichtlinearen Eichtheorien auch zur Beschreibung anderer Wechselwirkungen geeignet sind. Einsteins Ideen und Theorien sind noch nicht – das hatte bereits Herr Ertl angesprochen – in dem Sinne abgeschlossen und Bestandteile der in das Archiv einzuordnenden Physik wie etwa die klassische Mechanik Newtons oder die elektrodynamische Theorie Maxwells; vielmehr regen sie die heutige Forschung nach wie vor an. Sie enthalten noch ungeklärte Probleme, sogar wesentliche Grundlagenprobleme. Ich möchte auf einige dieser offenen Fragen hinweisen.

Als erstes greife ich das Problem der Gravitationswellen auf. Wenn sich zwei Sterne eines Doppelsternsystems auf Bahnen umeinander bewegen, dann verformen sie die metrische Struktur der Welt in ihrer Umgebung, und diese Verformungen breiten sich nach der Einsteinschen Theorie wellenartig in den umgebenden Raum aus – ähnlich den elektromagnetischen Wellen –, sie wirken auf andere Körper in größerer Entfernung ein, sollten also durch Detektoren nachgewiesen werden können. Nach der älteren Newtonschen Theorie wirken die Sterne unmittelbar durch Fernkräfte aufeinander. Dieses Bild wird in der Einsteinschen Theorie grundlegend verändert, sie geht von einer wellenartigen Anregung des Raumes aus. Es gibt inzwischen zwar indirekte Hinweise darauf, daß solche Gravitationswellen nicht nur in den Köpfen der theoretischen Physiker, sondern auch in der Wirklichkeit existieren, aber diese Hinweise sind bis heute nur indirekt, und es stellt eine große Herausforderung dar, einen direkten Nachweis dieser Gravitationswellen, deren Existenz Einstein schon 1916 aus seiner Theorie ableitete, zu führen. Es gibt derzeit etwa ein Dutzend experimentelle Gruppen auf der Welt, die mit verschiedenen Methoden Detektoren entwickeln, die – so hofft man – eine solche Empfindlichkeit erreichen werden, daß man etwa um die Jahrtausendwende in der Lage sein wird, Gravitationswellen nachweisen zu können.

An den Bemühungen um die Gravitationswellendetektoren kann man besonders den noch heute wirksamen Einfluß der Ideen Einsteins erkennen. Nicht allein das Ziel der Untersuchungen – der Nachweis von Gravitationswellen, und damit einer der wesentlichen Vorhersagen seiner Theorie – belegt diesen Einfluß, sondern auch die Mittel, mit denen man versucht, dies zu tun, stehen in mehrerer Hinsicht mit Einsteins Arbeiten in Beziehung.

Eine Möglichkeit, Gravitationswellen nachzuweisen, besteht darin, daß man in einem Interferometer Laserlicht auf verschiedene Wege lenkt. Die verschiedenen Wege, über die das Laserlicht geleitet wird, werden durch eine Gravitationswelle beeinflusst. Durch kleine Änderungen der Intensität des aus dem Interferometer wieder austretenden Lichts hofft man, die Existenz der Gravitationswellen nach-



weisen zu können. Auch einige ihrer Eigenschaften würde man dadurch überprüfen können. Man braucht dazu sehr gut gebündeltes Licht, was zugleich eine sehr genau festgelegte Frequenz und eine sehr genau festgelegte Intensität hat. Daß dies mit Hilfe von Lasern möglich ist, beruht auf einer Erkenntnis, die Einstein in einer sehr wichtigen Arbeit im Jahre 1917 in Berlin veröffentlicht hat: Wenn ein Atom in einem angeregten Zustand ist, aus dem es unter Aussendung von Licht in einen niedrigeren Zustand übergehen kann, dann – das war die Entdeckung Einsteins – wird die Wahrscheinlichkeit eines solchen Übergangs durch die Anwesenheit von Strahlung derselben Frequenz erhöht. Man kann diesen Effekt, „stimulierte Emission“ genannt, zur Verstärkung von bereits schwächer vorhandenem Licht ausnutzen. Diese Erkenntnis wird als ein technisches Hilfsmittel bei dem hoffentlich gelingenden Nachweis der Gravitationswellen verwendet.

Die Empfindlichkeit der Gravitationswelleninterferometer wird vor allem dadurch begrenzt, daß die Lichtintensität der Laser schwankt. Die Statistik dieser zufälligen Schwankungen wiederum beruht auf der quantenhaften Beschaffenheit des Lichts. Dieser Sachverhalt wurde zuerst 1905 in Einsteins revolutionärer Arbeit über das Photon erkannt.

Schließlich sei auch auf die Verstärker aufmerksam gemacht, die man benötigt, um bei astronomischen Untersuchungen die Abstände zu anderen Himmelskörpern, insbesondere etwa den Abstand zum Mond zu messen, indem man – als eine Art Echolotmessung – Radarsignale zum Mond schickt und dann wieder empfängt. Hierbei muß das zurückkommende Licht enorm verstärkt werden, um die sehr wenigen wieder zurückkommenden Photonen überhaupt nachweisen zu können. Das geschieht unter wesentlicher Verwendung des sogenannten Photoeffekts, für dessen quantitative Erklärung Einstein 1921 den Nobelpreis erhielt.

Ich möchte noch einen weiteren Bereich der wissenschaftlichen Arbeit Einsteins erwähnen, die Interpretation der Quantentheorie. Einstein war einer der wesentlichen Schöpfer der älteren Quantentheorie. Obwohl er sich später von der Quantentheorie abgewandt hat, da er die Art ihrer statistischen Gesetze und insbesondere die Art, wie in der Quantentheorie „verboten“ wird, Naturvorgänge als Tatsachen zu beschreiben, die sich unabhängig von der menschlichen Wahrnehmung abspielen, so hat er doch wesentliche Ideen auch noch als Kritiker der Quantentheorie entwickelt. Genannt sei ein sehr wichtiges Gedankenexperiment, das Einstein 1935 in einer bis heute immer wieder diskutierten Arbeit mit Podolski und Rosen veröffentlicht hat. Nach der Quantentheorie gibt es meßbare Größen an einem Objekt, die so beschaffen sind, daß die Messung einer dieser Größen – etwa die Messung des Ortes eines Teilchens – nicht gleichzeitig mit der Messung einer anderen Größe – etwa des Impulses – erfolgen kann. Man muß sich also z. B. entscheiden, ob man bei einem Elektron den Ort möglichst genau messen will *oder* aber den Impuls, beides gleichzeitig ist in einem Meßvorgang nicht möglich. Nun



gibt es eine sehr merkwürdige Folgerung aus der Quantentheorie, auf die zuerst Einstein mit den genannten Mitarbeitern hingewiesen hat. Man kann Zustände herstellen, bei denen etwa der relative Ort und auch der Impuls eines Gebildes genau festgelegt sind und bei dem dieses Gebilde in zwei verschiedene Teilchen zerfällt. Das eine Teilchen „läuft“ zur linken Seite, das andere zur rechten. Durch die Art, wie diese zwei Teilchen aus einem zerfallenden Zustand zustande gekommen sind, kann man aufgrund der Quantentheorie durch Messung des Impulses an dem „rechten“ Teilchen den Impuls des „linken“ Teilchens vorhersagen, obwohl man an diesem Teilchen gar keine Messung vornimmt. Andererseits könnte man an dem „rechten“ Teilchen statt des Impulses den Ort messen und dann den Ort des „linken“ Teilchens vorhersagen. Das mag an sich noch nicht so verwunderlich sein. Das Merkwürdige aber ist, daß einerseits die Messungen des Ortes und des Impulses miteinander unverträglich sind und andererseits jede Messung einer dieser Größen am rechten Teilchen sichere Vorhersagen über die entsprechende Größe des linken Teilchens sogar dann ermöglicht, wenn nach der Relativitätstheorie kein Signal Information über den rechts durchgeführten Meßvorgang schnell genug nach links in den Bereich zu übertragen vermag, wo die betreffende Vorhersage überprüft werden kann. Die Quantentheorie behauptet eine mit der klassischen Physik unverträgliche „nichtlokale“ Verknüpfung meßbarer Eigenschaften. Solch eine Verknüpfung empfand Einstein als mit seiner Realitätsvorstellung unvereinbar. Man kann solche Experimente nun tatsächlich so einrichten – das ist zuerst 1986 in berühmten Experimenten von Aspect in Paris gelungen –, daß man sich erst nachdem sich diese beiden Teilchen bereits getrennt haben und etliche Meter voneinander entfernt sind, entscheidet, ob man an dem einen Teilchen nun eine oder eine andere, damit unverträgliche Größe messen will. Inzwischen hat sich durch diese und ähnliche Messungen die Richtigkeit der Aussagen der Quantentheorie erwiesen.

Lange Zeit hat man sich damit zufrieden gegeben, daß der Formalismus der Quantentheorie diese Phänomene rechnerisch richtig erfaßt. Aber erst in den letzten 10 Jahren hat man sich den mit dem Meßprozeß verbundenen Interpretationsfragen der Quantentheorie wieder zugewandt. Man bemüht sich, besser zu verstehen, wie diese sehr „merkwürdigen“ Vorgänge mit der im makroskopischen Bereich bewährten, klassischen Beschreibung der Physik in Verbindung gebracht werden können. Und auch hier wird deutlich, wie die Einsteinschen Ideen aus dem Jahre 1935 Diskussionen wieder in Gang bringen, die sich auf die Interpretation der Quantentheorie beziehen.

Das tiefste Problem, das in diesem Zusammenhang abschließend erwähnt werden sollte, besteht darin, daß die sehr erfolgreiche Einsteinsche Theorie der Gravitation eine klassische Feldtheorie ist, von der man bis heute nicht weiß, wie man sie mit der Quantentheorie in Zusammenhang bringen kann. Die grundlegende Situa-



tion der Physik heute kann man darin sehen, daß man einerseits die Vorgänge „im sehr Kleinen“, also im atomaren und subatomaren Bereich, mit Hilfe der Quantenfeldtheorie, andererseits die Raumzeitstruktur und die „Dinge im Großen“ mit Hilfe der allgemeinen Relativitätstheorie sehr gut beschreiben kann. Obwohl diese beiden Theorien ihrer Natur nach eine universelle Geltung beanspruchen müssen, passen sie trotzdem nicht zueinander. Die Begriffe dieser Theorien und ihre Grundgesetze widersprechen einander im Grunde sogar, und es stellt eine große Herausforderung dar, eine Theorie zu finden, die das Erfolgreiche beider Theorien bewahrt und das, was zu Widersprüchen führt, beseitigt. Trotz nachhaltiger Bemühungen, die etwa seit 1930 unternommen wurden, ist dies jedoch bislang nicht gelungen, und so beschäftigt das Lebenswerk Einsteins die Physiker bis in die Gegenwart.

Ich möchte meine Bemerkungen mit einer Formulierung schließen, die besonders deutlich hervorhebt, wie Physiker und Mathematiker durch die Geschlossenheit der allgemeinen Relativitätstheorie beeindruckt waren. Der Mathematiker Hermann Weyl hat sein berühmt gewordenes Buch „Raum – Zeit – Materie“ folgendermaßen eingeleitet: „Mit der Einsteinschen Relativitätstheorie hat das menschliche Denken über den Kosmos eine neue Stufe erklommen. Es ist, als wäre plötzlich eine Wand zusammengebrochen, die uns von der Wahrheit trennte. Nun liegen Weiten und Tiefen vor unserem Erkenntnisblick entriegelt da, deren Möglichkeit wir vorher nicht einmal ahnten. Der Erfassung der Vernunft, welche dem physischen Weltgeschehen innewohnt, sind wir einen gewaltigen Schritt nähergekommen.“