

Klassische Texte der Wissenschaft

Claus Kiefer *Hrsg.*

Albert Einstein · Boris  
Podolsky · Nathan Rosen

Kann die quanten-  
mechanische Beschreibung  
der physikalischen Realität  
als vollständig betrachtet  
werden?



Springer Spektrum

---

# **Klassische Texte der Wissenschaft**

Herausgeber:

Prof. Dr. Dr. Olaf Breidbach

Prof. Dr. Jürgen Jost

Die Reihe bietet zentrale Publikationen der Wissenschaftsentwicklung der Mathematik, Naturwissenschaften und Medizin in sorgfältig editierten, detailliert kommentierten und kompetent interpretierten Neuausgaben. In informativer und leicht lesbarer Form erschließen die von renommierten WissenschaftlerInnen stammenden Kommentare den historischen und wissenschaftlichen Hintergrund der Werke und schaffen so eine verlässliche Grundlage für Seminare an Universitäten und Schulen wie auch zu einer ersten Orientierung für am Thema Interessierte.

---

Claus Kiefer  
Herausgeber

# Albert Einstein, Boris Podolsky, Nathan Rosen

Kann die quantenmechanische  
Beschreibung der physikalischen Realität  
als vollständig betrachtet werden?

kommentiert von Claus Kiefer

 Springer Spektrum

*Herausgeber*

Claus Kiefer  
Institut für Theoretische Physik  
Universität zu Köln  
Köln, Deutschland

ISBN 978-3-642-41998-0

ISBN 978-3-642-41999-7 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-41999-7

Mathematics Subject Classification (2910): 81P05, 81P40, 81P15

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media

([www.springer.com](http://www.springer.com))

*Die allergrößte Freude aber habe ich nach wie vor  
über die Physical Review Arbeit selbst, weil sie so  
richtig als Hecht im Karpfenteich wirkt und alle  
Leute aufwirbelt.*

*Schrödinger an Einstein, 13. Juli 1935*

---

## Vorwort

Das Jahr 2015 markiert nicht nur das hundertjährige Jubiläum der Allgemeinen Relativitätstheorie, sondern auch das achtzigjährige Jubiläum einer der wirkungsmächtigsten Arbeiten der Theoretischen Physik: der hier abgedruckten und kommentierten Arbeit von Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen („EPR“) aus dem Jahr 1935. Während die Relativitätstheorie längst Eingang in den Kanon der Lehrbücher gefunden hat und Einsteins historische Arbeiten deshalb nur noch gelegentlich zitiert werden, finden sich Zitate auf die EPR-Arbeit zuhauf in aktuellen wissenschaftlichen Originalveröffentlichungen, die in renommierten Zeitschriften wie *Physical Review* und *Nature* erscheinen. Diese Veröffentlichungen behandeln nicht nur direkt die Grundlagen der Quantentheorie, sondern auch die bis weit in die Anwendung reichenden Gebiete der Quanteninformation und Quantenoptik. Natürlich kommt hier zum Ausdruck, daß die von EPR aufgeworfene Frage nach der Vollständigkeit der Quantenmechanik nach wie vor eine aktuelle ist. In der hier vorliegenden kommentierten Ausgabe werden deshalb nicht nur der historische Kontext und die Wirkungsgeschichte dieser Arbeit im Detail nachgezeichnet, sondern auch deren Auswirkungen auf die moderne Forschung und die noch immer diskutierten begrifflichen Grundlagen der Quantentheorie. Von Niels Bohr und anderen zunächst als unbedeutend und auf Mißverständnissen beruhend abgetan, erlebt die EPR-Arbeit eine nicht endende Renaissance. Es handelt sich eben doch um eine bedeutende Arbeit!

Der eigentliche Artikel ist eine Arbeit zur Theoretischen Physik und erfordert für die konzentrierte Lektüre physikalische und mathematische Vorkenntnisse. Ihre Aussagen spannen aber einen viel weiteren Bogen, der bis tief in die Philosophie hineinreicht. Ich habe deshalb versucht, diesem Bogen gerecht zu werden und meinen Kommentar so allgemeinverständlich zu halten, wie dies unter den gegebenen Umständen möglich ist. Es sollten also auch diejenigen Leser davon profitieren, die dem rein mathematischen Teil nicht folgen können und nur an den erkenntnistheoretischen Aspekten interessiert sind.

Abgedruckt sind außer der deutschen Übersetzung der EPR-Arbeit auch die Übersetzung von Bohrs Folgearbeit gleichen Titels aus dem gleichen Jahr sowie Einsteins 1948 auf deutsch verfaßter Artikel für die Zeitschrift *Dialectica*. In meinen Zitaten auf die EPR- und die Bohr-Arbeit beziehe ich mich auf diese Übersetzungen.

Herrn Prof. Dr. Jürgen Jost danke ich für die Einladung zu diesem Buch und für die kritische und konstruktive Begleitung während dessen Entstehung; ebenso danke ich dem

Springer-Verlag und insbesondere Herrn Clemens Heine für die effiziente Hilfe. Für eine kritische Durchsicht des Manuskripts und hilfreiche Diskussionen möchte ich mich bei Prof. Dr. H.-Dieter Zeh, Dr. Erich Joos und Prof. Dr. Klaus Volkert herzlich bedanken.

Köln, im November 2014

*Claus Kiefer*



---

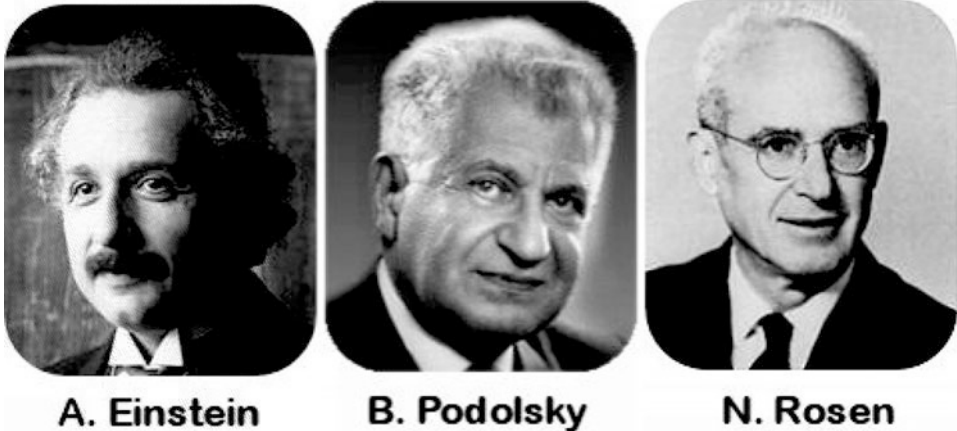
# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Die Vorgeschichte</b>	1
1.1	Einsteins Beiträge zur frühen Quantentheorie	3
1.2	Interpretationen der Quantentheorie vor 1935	9
1.3	Die Bohr-Einstein-Debatte bei den Solvay-Tagungen	14
1.4	John von Neumann und der Kollaps der Wellenfunktion	23
<b>2</b>	<b>Die Arbeit von Einstein, Podolsky und Rosen</b>	27
2.1	Abdruck der Arbeit	28
2.2	Kritische Zusammenfassung	35
2.3	Die Bohmsche Version des Gedankenexperiments	41
2.4	Die Rolle von Einsteins Koautoren	44
2.5	Kritische Wertung	49
<b>3</b>	<b>Einsteins Arbeit von 1948</b>	55
<b>4</b>	<b>Rezeptions- und Wirkungsgeschichte</b>	61
4.1	Abdruck von Bohrs Arbeit	62
4.2	Bohrs Antwort	74
4.3	Schrödinger und die Verschränkung	77
4.4	Pauli und Heisenberg	80
4.5	Weitere frühe Reaktionen	82
<b>5</b>	<b>Weitere Entwicklungen</b>	85
5.1	Die Bohmsche Theorie	86
5.2	Die Bellschen Ungleichungen	90
5.3	Die Vielwelteninterpretation	95
5.4	Der klassische Grenzfall	99
<b>6</b>	<b>Relevanz für die Zukunft</b>	105
	<b>Anhang: Der Formalismus der Quantentheorie</b>	109
	<b>Literatur</b>	115
	<b>Sachverzeichnis</b>	123

Im amerikanischen Princeton treffen sich 1934 drei Physiker, um zusammen eine wissenschaftliche Arbeit zu verfassen, die sich als eine der meistzitierten Veröffentlichungen des zwanzigsten Jahrhunderts erweisen wird. Es handelt sich um Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen. Albert Einstein (1879 bis 1955), der Schöpfer der Relativitätstheorie, war schon damals weltberühmt. Aus Nazi-Deutschland vertrieben, hatte er im Oktober 1933 eine Stelle am neugegründeten *Institute for Advanced Study* angenommen, einem Institut, das er bis zu seinem Tod 1955 nicht mehr verlassen sollte.

Boris Podolsky, 1896 im russischen Taganrog geboren, emigrierte 1913 in die Vereinigten Staaten. Er wurde 1928 am *California Institute of Technology* (Caltech) promoviert und kam nach Umwegen, die ihn unter anderem nach Leipzig, in das heute ukrainische Kharkov und wieder ans Caltech geführt hatten, 1933 mit einem Stipendium nach Princeton. In Kharkov war unter anderem eine Arbeit zur damals neuen Quantenelektrodynamik entstanden – gemeinsam mit Vladimir Fock und Paul Dirac, einem der Pioniere der Quantenmechanik, der sich zu jener Zeit auf einer Reise durch die Sowjetunion befand.

Podolsky und Einstein kannten sich bereits von früheren Besuchen Einsteins in den USA. Einsteins erster Aufenthalt in Kalifornien, der ihn hauptsächlich an das Caltech führte, fand vom Dezember 1930 bis März 1931 statt. Er erfolgte auf Einladung des Physikers Richard Tolman, dem wichtige Beiträge zur Relativitätstheorie zu verdanken sind. Während dieser Zeit arbeiteten Tolman, Podolsky sowie der aus den Niederlanden angereiste Paul Ehrenfest (1880 bis 1933) an einer Anwendung der Allgemeinen Relativitätstheorie, und zwar ging es um das von Licht erzeugte Gravitationsfeld (Tolman et al. 1931). Diese Arbeit wurde im Januar 1931 zur Veröffentlichung eingereicht. Auch seinen zweiten Kalifornienaufenthalt, der von Ende Dezember 1931 bis Anfang März 1932 stattfand, verbrachte Einstein hauptsächlich am Caltech. Dieses Mal arbeitete Einstein auch mit Podolsky zusammen. Als Ergebnis dieser Zusammenarbeit entstand eine gemeinsame zweiseitige Publikation von Einstein, Tolman und Podolsky zur Quantentheorie (Einstein et al. 1931), die Einsteins Biograph Abraham Pais als freilich wenig erfolgreich bezeichnet hat (Pais 2009, S. 498).



**Abb. 1.1** Die Autoren der EPR-Arbeit

Der dritte im Bunde, Nathan Rosen, wurde 1909 in New York geboren. Nach seiner Promotion 1932 am *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) war Rosen 1934 an die Universität Princeton gelangt. Er hatte sich hauptsächlich mit Atom- und Molekülphysik beschäftigt, interessierte sich aber auch für Relativitätstheorie und hatte 1930 bereits eine Arbeit zu der damals von Einstein verfolgten vereinheitlichten Theorie von Gravitation und Elektromagnetismus publiziert. Es ist deshalb nicht erstaunlich, daß er in diesem Zusammenhang in Princeton Einstein kontaktierte und ihn zu dieser Thematik persönlich um Rat bat. Wie Max Jammer in seinem bekannten Buch zur Quantenmechanik berichtet (Jammer 1974, S. 181), war Rosen sehr erstaunt darüber, mit welcher Freundlichkeit Einstein ihm bei der Diskussion seiner Arbeit begegnete. Als er am darauf folgenden Tag Einstein im Hof des Instituts begegnete, fragte ihn dieser dann: „Junger Mann, warum arbeiten wir nicht zusammen?“.

Das ist die persönliche Vorgeschichte für die gemeinsame Arbeit von Einstein, Podolsky und Rosen (Abb. 1.1), die als EPR-Arbeit in die Geschichte eingehen wird. Die wissenschaftliche Vorgeschichte ist weitaus verschlungener und führt zurück zum Anfang des letzten Jahrhunderts. Mit den Arbeiten von Planck 1900 und von Einstein 1905 begann mit leisen Schritten das, was in den Jahren 1925–27 in die Quantentheorie mündete, eine Theorie, um deren Verständnis auch Einstein, Podolsky und Rosen 1934/35 in Princeton ringen.

Keine Theorie hat unser physikalisches Weltbild so verändert wie die Quantentheorie. Sieht man von der bisher nicht erfolgten Einbindung der Gravitation ab, so beschreibt diese Theorie erfolgreich alle Wechselwirkungen, vom Bereich makroskopischer Körper bis hinab zu den Skalen der Elementarteilchen, wie sie zum Beispiel am Teilchenbeschleuniger LHC in Genf untersucht werden. Die Grundgleichungen der Quantentheorie wurden unzählige Male experimentell getestet und lassen von daher keinen Zweifel an ihrer Gültigkeit aufkommen. Dennoch gibt es auch heute noch keine Einigkeit über die Inter-

pretation der Theorie, was sich nicht zuletzt an den zahlreichen Verweisen auf die Arbeit von Einstein, Podolsky und Rosen zeigt. Woher rührt dieses Unbehagen an einer Theorie, deren Formalismus unbestritten ist? Wir werden erkennen, daß sich die Interpretationsdebatte in erster Linie darum dreht, was wir unter Realität verstehen beziehungsweise verstehen wollen.

Der Anstoß für die EPR-Arbeit stammt eindeutig von Einstein. Nicht nur ist er der älteste der drei und überragt seine Koautoren wissenschaftlich um Längen, er hat auch wesentlich zu den Vorstufen der Quantentheorie beigetragen und die Entwicklung der eigentlichen Theorie von 1925 an intensiv und kritisch mitverfolgt. Wir werden sehen, wie hier ein roter Faden bis zur EPR-Arbeit (und darüber hinaus) sichtbar wird. Allerdings benötigte Einstein für die Ausarbeitung den kritischen Dialog mit Kollegen, weshalb diese Arbeit ohne Podolsky und Rosen nicht, jedenfalls nicht in dieser Form, geschrieben worden wäre.

---

## 1.1 Einsteins Beiträge zur frühen Quantentheorie

Einsteins Liaison mit der Quantentheorie beginnt bereits dreißig Jahre vor dem Zusammentreffen der drei Physiker in Princeton. Nachdem er sich vergeblich um eine Stelle im akademischen Bereich bemüht hatte, war Einstein seit 1902 technischer Experte III. Klasse am Eidgenössischen Amt für geistiges Eigentum (Patentamt) in Bern. Es sollten einige turbulente Jahre folgen, sowohl in privater als auch in wissenschaftlicher Hinsicht. Er heiratete Anfang 1903 seine Studienfreundin Mileva Marić. Aus dieser Beziehung gab es bereits eine Tochter, das Lieserl, die Mileva Anfang 1902 geboren hatte, als sie sich in ihrer Heimat, dem serbischen Novi Sad, aufhielt. Einstein hat seine Tochter, deren Schicksal unbekannt ist, nie gesehen. Sein erster Sohn Hans Albert kam im Mai 1904 in Bern zur Welt.<sup>1</sup>

Zu diesen privaten Ereignissen und der 48-stündigen Arbeitswoche am Berner Patentamt gesellte sich Einsteins rege wissenschaftliche Tätigkeit. Im Jahr 1905 erschienen von ihm gleich fünf herausragende Arbeiten, die allesamt Geschichte schreiben sollten.<sup>2</sup> Man spricht deshalb von Einsteins *annus mirabilis*, im Anklang an die *anni mirabiles* 1664 bis 1666, in denen Isaac Newton die Grundlage seiner Gravitationstheorie entwickelt hatte. Aus Einsteins wunderbarem Jahr 1905 ist für uns seine Arbeit zur Lichtquantenhypothese wichtig, da es sich hier um die erste bedeutende Abhandlung zur entstehenden Quantentheorie seit den Arbeiten Plancks 1900 und 1901 handelte. Es ist tatsächlich die einzige Arbeit jenes Jahres, die Einstein selbst als revolutionär bezeichnete. In einem Brief an Conrad Habicht<sup>3</sup> vom Mai 1905 schrieb Einstein (Stachel 2001, S. 28):

---

<sup>1</sup> Eine sehr lesenswerte, detaillierte Schilderung von Einsteins Leben bietet Fölsing (1993).

<sup>2</sup> Vgl. hierzu etwa Stachel (2001) oder Kiefer (2005).

<sup>3</sup> Habicht, Einstein und der aus Rumänien stammende Maurice Solovine trafen sich in Bern zu einem informellen Diskussionskreis, den sie „Akademie Olympia“ taufte. In Fölsings Einstein-Biographie heißt es dazu: „Regelmäßig trafen sich die drei Mitglieder abends zu einem frugalen

Ich verspreche Ihnen vier Arbeiten dafür, von denen ich die erste in Bände schicken könnte ... Sie handelt über die Strahlung und die energetischen Eigenschaften des Lichtes und ist sehr revolutionär, wie Sie sehen werden.

Was ist an dieser Arbeit so revolutionär? Schon aus den Eingangszeilen von Einsteins Arbeit wird deutlich, wie sehr ihn eine offensichtliche Inkohärenz in der Naturbeschreibung bekümmerte: das gleichzeitige Auftreten von kontinuierlichen und diskreten Größen. Die Feldstärken des elektromagnetischen Feldes sind kontinuierliche Funktionen und werden durch die Maxwell'schen Gleichungen empirisch erfolgreich beschrieben. Die Materie hingegen besteht aus einer endlichen Anzahl von Atomen und ist deshalb von diskreter Natur. Einstein leitet seinen Artikel mit den folgenden Sätzen ein (Einstein 1905, S. 132):

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der MAXWELLSchen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen ...

Diese Diskrepanz in den Rollen von Feldern und Materie wird ihn sein ganzes Leben beschäftigen. Seine späteren Versuche zur Konstruktion einer einheitlichen Feldtheorie sind zu einem großen Teil durch den Wunsch geprägt, eben diese Diskrepanz zu beseitigen. Im Jahre 1905 führte er den heuristischen Gesichtspunkt<sup>4</sup> ein, daß nicht nur die Energie der Materie sondern auch die Energie der elektromagnetischen Strahlung diskontinuierlich verteilt seien. Diese Annahme dient vornehmlich dem Zweck, Beobachtungen besser beschreiben zu können. Zu diesen Beobachtungen zählen die Hohlraumstrahlung und der photoelektrische Effekt, der Freisetzung von Elektronen aus einem Metall durch die Einstrahlung von ultravioletter Licht. Einstein schreibt dazu (Einstein 1905, S. 133):

Es scheint mir nun in der Tat, daß die Beobachtungen ... besser verständlich erscheinen unter der Annahme, daß die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei. Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können.

---

Mahl mit einem Zipfel Wurst, einem Stück Greyerzer Käse, etwas Obst, Honig und Tee. Das genügte aber, wie sich Solovine erinnerte, daß sie „dabei vor Heiterkeit überschäumten.“ (Fölsing 1993, S. 119).

<sup>4</sup> Dies wird bereits durch den Titel der Arbeit betont. Unter einem heuristischen Gesichtspunkt oder Prinzip versteht der Duden eine „Arbeitshypothese oder vorläufige Annahme als Hilfsmittel der Forschung“ (das griechische Wort *heuriskein* bedeutet etwa „finden“). Ein bekanntes Beispiel ist die Archimedes zugeschriebene Entlarvung einer vorgeblich aus reinem Gold angefertigten Krone als Schwindel; hierzu benutzte er das nach ihm benannte Prinzip, das er der Legende nach beim Baden gefunden und mit dem Ausdruck *Heureka* („Ich habe es gefunden“) bedacht hatte.

Aus dem hier auftauchenden Begriff der Energiequanten sollte sich später der Name Quantentheorie entwickeln. Einstein kannte natürlich die Pionierarbeiten Max Plancks aus dem Jahr 1900; so weiß man aus seinen Briefen an Mileva, daß er sich bereits seit 1901 mit ihnen beschäftigt hat.

Planck hatte in seinem berühmten Vortrag vor der Deutschen Physikalischen Gesellschaft am 14. Dezember 1900 eine Ableitung seines Strahlungsgesetzes für die Hohlraumstrahlung vorgestellt.<sup>5</sup> Unter Hohlraumstrahlung versteht man die elektromagnetische Strahlung in einem von Wänden umschlossenen Hohlraum (zum Beispiel einem Ofen), die dadurch entsteht, daß man die Wände auf eine konstante Temperatur  $T$  erwärmt. Der Physiker Gustav Robert Kirchhoff, von Abraham Pais als Großvater der Quantentheorie bezeichnet, hatte bereits 1859 geschlossen, daß die Hohlraumstrahlung durch eine Energiedichte  $\rho(\nu, T)$  beschrieben werden könne, die eine materialunabhängige Funktion der Frequenz  $\nu$  der Strahlung<sup>6</sup> und der Temperatur  $T$  ist. Die Aufgabe an die Physiker bestand nun darin, diese Energiefunktion zu finden. Wie sich herausstellen sollte, war dies eine überaus schwierige und langwierige Aufgabe! Auch Planck widmete sich ihr. Um zu einer Lösung zu gelangen, mußte er freilich von liebgewonnenen Überzeugungen und einem großen Teil seines bisherigen Forschungsprogramms abrücken. Es blieb ihm nichts anderes übrig, als die statistischen Überlegungen seines Wiener Kollegen und Widersachers Ludwig Boltzmann in die Suche nach dieser Funktion einzubeziehen. Planck stand bisher dem Atomismus skeptisch gegenüber und sah keinen Platz für eine zentrale Rolle der Statistik in der Physik. Jetzt sah er sich gezwungen, eine Kehrtwendung zu vollführen.

Planck benutzte als Modell für die Hohlraumwände einfache Oszillatoren („Resonatoren“), was ja wegen der Unabhängigkeit der Strahlung von der Beschaffenheit der Wände sinnvoll war; damit konnte man gut rechnen. Für seine Rechnung wählte er einen Umweg über die Entropie. Er wußte zwar, wie die Strahlungsenergie mit der mittleren Energie eines Resonators zusammenhängt, hatte aber keine Vorstellung davon, wie diese Resonatorenenergie aussieht. Er hatte indes eine Vorstellung davon, wie man die Entropie der Resonatoren berechnen könnte, nämlich durch die auf Boltzmann zurückgehende statistische Definition der Entropie als die mit einem gegebenen makroskopischen Zustand verträgliche Anzahl der mikroskopischen Realisierungen. Im konkreten Fall mußte die Gesamtenergie  $E$  auf die einzelnen Resonatoren verteilt werden. Falls die Energie kontinuierlich verteilt wäre, ergäben sich für diese Verteilung unendlich viele Möglichkeiten und somit ein unsinniges Resultat für die Entropie. Planck versuchte deshalb den heuristischen Ansatz, eine kleinstmögliche Energiemenge zu postulieren und dadurch zu endlich vielen Verteilungsmöglichkeiten zu gelangen. Der entscheidende Satz in seinem Vortrag lautet (Planck 1900, S. 239):

---

<sup>5</sup> Die Geschichte, die zu Plancks Entdeckung führte, ist oft erzählt worden. Eine lesenwerte Zusammenfassung bietet Giulini (2005).

<sup>6</sup> Die Hohlraumstrahlung ist durch eine bestimmte Verteilung der Energie über alle Frequenzen – ein sogenanntes Energiespektrum – gekennzeichnet.