

Leseprobe aus:

Thomas de Padova  
Quantenlicht



Mehr Informationen zum Buch finden Sie auf  
[www.hanser-literaturverlage.de](http://www.hanser-literaturverlage.de)

© 2024 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

HANSER





**THOMAS  
DE PADOVA**

# **QUANTENLICHT**

**DAS JAHRZEHNT  
DER PHYSIK  
1919 – 1929**

Hanser

1. Auflage 2024

ISBN 978-3-446-28134-9

Copyright © 2024 Thomas de Padova

© 2024 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke  
des Text und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

Umschlag: Anzinger & Rasp, München

Motiv: Jupp Wiertz »Deutschland – Berlin bei Nacht«,

Museum für Kunst und Gewerbe Hamburg

Satz: Nadine Clemens, München

Druck und Bindung: GGP Media GmbH, Pößneck

Printed in Germany



**MIX**  
Papier | Fördert  
gute Waldnutzung  
**FSC® C014496**

# INHALT

Licht an: Der Fotoeffekt 9

## TEIL I LICHT UND MATERIE (1919–1922) 29

Schwarze Strahler 31

*Berlin 1919: Planck und Einstein haben eine gemeinsame Reise nach Rostock geplant, als der eine den Nobelpreis erhält, der andere Welt-  
ruhm erlangt und das Licht plötzlich seine Leichtigkeit verliert*

Das bonzenfreie Kolloquium 59

*Berlin, April 1920: Wie Niels Bohr mit den Atomen jongliert, fasziniert  
Lise Meitner und ihre Physikerkollegen. In der deutschen Hauptstadt  
begegnet der charismatische Däne erstmals den Vordenkern der  
Quantenphysik und schwingt sich zum Mentor einer ganzen Forscher-  
generation auf*

Schlagabtausch in Badehaus 8 89

*Bad Nauheim, September 1920: Einstein = dada. Diese Gleichung hat  
es in sich. Kurz nach Beginn der Anti-Einstein-Kampagne in der  
Berliner Philharmonie trifft sich die Fachwelt an einem Kurort. Dort  
warten außer Planck eine ganze Reihe Reporter auf das Duell zweier  
Kontrahenten*

»Was, so jung und schon unbekannt?« 109

*Jena, September 1921: Nachtzug, Jugendherberge und dann im Anzug zu den Vorträgen: Bei seiner ersten großen Fachkonferenz sieht man den 19-jährigen Studenten Werner Heisenberg selten allein. Sein Begleiter: der anderthalb Jahre ältere Wolfgang Pauli, der in Physikerkreisen bereits von sich reden macht*

Auf Wiedersehen im Hilbert-Raum 128

*Göttingen, Juni 1922: Auch Mathematiker wollen in der Quantentheorie mitmischen. Lässt sie sich axiomatisch begründen wie die Relativitätstheorie? Niels Bohr stellt sich zwei Wochen lang allen Fragen. Heisenberg beginnt, von Kopenhagen zu träumen. Doch Pauli zieht das große Los*

## TEIL II WELLEN UND TEILCHEN (1923–1924) 151

Licht + Licht = Dunkelheit 153

*Kopenhagen, Juli 1923: Einstein sieht die Lichtquantenhypothese durch Experimente aus Übersee eindrucksvoll bestätigt. Bohr will nichts von einer zweigleisigen Lichttheorie wissen. In der Straßenbahn gehen ihre Argumente hin und her. Eine Gespensterdebatte*

Flucht aus Berlin 172

*Berlin, November 1923: Einen Tag vor dem Hitlerputsch in München hat Einstein Deutschland Hals über Kopf verlassen. Planck ist entsetzt. Wird sein Kollege Berlin nun für immer den Rücken kehren? Seine vielen Verbindungen ins Ausland kommen Einstein einmal mehr zugute. Und der Physik, die die Spur von Materiewellen aufnimmt*

Das Eis bricht 194

*Kopenhagen, März 1924: Heisenberg hat seine Doktorprüfung mit Ach und Krach bestanden und ist nach Göttingen gezogen, wo ihn der*

*Theoretiker Max Born unter seine Fittiche nimmt. Plötzlich lebt er auf: eine Einladung nach Dänemark! Und eine Wanderung mit dem Philosophen unter den Physikern*

Der reiche Onkel aus Amerika 207

*Göttingen, Juni 1924: Der Bankier Henry Goldman hat Einstein zu einem exklusiven Road Trip eingeladen, ohne ihm zu sagen, wohin die Reise gehen soll. Am Ziel warten zwei Steinway-Flügel in einem großen Saal. Auf dem einen spielt ab und an ein junger Theoretiker, den Einstein bisher nur dem Namen nach kennt*

**TEIL III QUANTENLICHT UND QUANTENATOM (1925–1929) 227**

Mythos Helgoland 229

*Kopenhagen, März/April 1925: Während Bohr den Widerstand gegen die Lichtquanten aufgibt, stecken Heisenberg und Pauli die Köpfe zusammen. Zurück in Göttingen, gelingt dem Jüngeren der Durchbruch zu einer neuen Quantentheorie. Der Ältere knackt das Atom dank einer Mathematik, die Max Born aus dem Hut gezaubert hat. Aber was, bitte schön, sind Matrizen?*

Der vorgezogene Gipfel 249

*Leiden, Dezember 1925: Für ein paar Tage wohnen Bohr und Einstein Zimmer an Zimmer. Eine hochkarätige Begegnung, tabakumwölkt, und viele offene Fragen zur Doppelnatur des Lichts*

Tanz auf dem Atom 265

*Berlin, April 1926: Eine Metropole lernt Charleston, Planck und Einstein üben sich im Überkreuzrechnen mit Matrizen. Kaum haben sie erste Rechenschritte gemeistert, kommt Heisenberg in die Hauptstadt. Ein paar Wochen zu spät. Denn auch die Moden in der Quantentheorie sind kurzlebig.*



Die Unbestimmtheit der Welt 293

*Ort: Blegdamsvej 17 in Kopenhagen, Zeit: unscharf. Man kann die Quantenwelt mit dem Heisenberg-Auge sehen, man kann sie auch mit dem Bohr-Auge betrachten. Wenn man beides gleichzeitig versucht, dann wird man irre*

Babylon Brüssel 316

*Brüssel, Oktober 1927: Bis zum ersten großen internationalen Quantengipfel nach dem Krieg hat es lange gedauert. Nun ist die Sprachverwirrung groß: Wahrscheinlichkeitswellen, Unbestimmtheit, Komplementarität. Und Lichtquanten nennen sich plötzlich Photonen. Setzt sich Licht aus solchen Teilchen zusammen oder nicht?*

Der lange Weg zum Quantenlicht 362

Licht aus: Nach dem Ende einer Ära 389

Dank 391

Anmerkungen 392

Literaturverzeichnis 407

Bildnachweis 422

Register 423

## LICHT AN: DER FOTOEFFEKT

Berlin Kurfürstendamm: In den Zwanzigerjahren hat die Flaniermeile einen ganz anderen Charakter als die Prachtstraße Unter den Linden. Kein Stadtschloss, keine Universität, keine Staatsbibliothek, keine in Stein gehauene Tradition und Gemächlichkeit, sondern kreative Unruhe, gehobenes Amüsement und ein pulsierendes Nachtleben, Läden, die eröffnet, ausgebaut werden und irgendwann wieder verschwinden, Mode- und Fachgeschäfte, Cafés und Tanzlokale, Theater und Galerien.

Am Ku'damm 232 sind es zum Beispiel die Ausstellungsräume jener Künstler, die sich in der »Berliner Secession« zusammengeschlossen haben und die Kaiser Wilhelm II. seinerzeit – »Kunst aus der Gosse!« – aus seinem Gesichtskreis verbannte.<sup>1</sup> Nebenan ein Atelier für fotografische Porträts. Ein Schaukasten auf dem Bürgersteig lenkt die Aufmerksamkeit der Passanten auf das Studio:<sup>2</sup> Kinder- und Prominentenfotos, Tanz- und Theateraufnahmen, dazu die Anzeige »Ausbildung von Amateuren und Berufsphotographen«.<sup>3</sup>

Wer ein Atelier am Ku'damm 230 führt, der möchte »modern sein wie der Boulevard selbst«.<sup>4</sup> Die Fotografin Suse Byk hat namhafte Kundschaft. Der Maler Max Liebermann, der Dichter Alfred Döblin oder die Sozialreformerin Alice Salomon lassen sich von ihr porträtieren. In ihrem Studio lernen die spätere Modefotografin Yva oder die Architekturfotografin Lore Feininger. Suse Byk führt viele junge Frauen in ihr Metier ein und ermutigt sie zum Schritt in die Selbstständigkeit.

Ihre spärlich überlieferten Äußerungen zur Fotografie klingen zurückhaltend. Als Fotografin müsse sie sich in Menschen hineinversetzen, nicht nur ihre schöne Seite sehen, »sondern ihr Wesen schon bei kurzem Kennenlernen erfassen«. Nur so sei es möglich, sie in einem für sie charakteristischen Augenblick wiederzugeben.<sup>5</sup>

Von Porträts erwartet sie vor allem Lebendigkeit. Den Auslöser im richtigen Moment zu betätigen setzt ihrer Ansicht nach eine wache, einfühlsame Beobachtung voraus. Passend dazu die Erinnerungen der von Lampenfieber geplagten Schauspielerin und Tänzerin Valeska Gert, der Suse Byk die Scheu vor den Aufnahmen nimmt: »Sie filmte so leicht und so elegant, dass ich jede Angst verlor und eine Riesenfreude an dieser Arbeit bekam.«<sup>6</sup>

Der erste Kontakt der Fotografin zu Albert Einstein könnte über ihren Cousin zustande gekommen sein. Alfred Byk ist ein ehemaliger Assistent Max Plancks und Professor für physikalische Chemie. Regelmäßig besucht er die Veranstaltungen der Physikalischen Gesellschaft am Reichstagufer und nimmt teil an den Diskussionen über die Relativitäts- und Quantentheorie.

Als ältester Sohn des jüdischen Chemiefabrikanten Heinrich Byk ist er mit den angewandten Wissenschaften groß geworden. Die väterliche Firma produziert Schlafmittel, die auch bei der Narkose eingesetzt werden, und profitiert davon, dass sich die Fotografie immer breiteren Bevölkerungsschichten öffnet.<sup>7</sup> In einem ihrer Werke werden lichtempfindliche Emulsionen und Fotopapiere angefertigt und in einer eigens dafür eingerichteten Forschungsabteilung der rasanten technischen Entwicklung angepasst.

Kurzzeitig hat auch Heinrich Byks jüngerer Bruder Siegmund in dem Unternehmen mitgewirkt. Er ist ebenfalls Chemiker und der Vater von Suse Byk, die das familiäre Erbe auf ihre Weise fortführt. Ihre Lebensgeschichte liegt im Verborgenen. Nach eigener Aussage hat sie ihr Handwerk nicht als Autodidaktin gelernt.<sup>8</sup> Vermutlich hat sie die »Photographische Lehranstalt« des Berliner Lette-Vereins besucht, wo neben Fotografinnen auch Technische Assistentinnen und Metallografinnen ausgebildet werden. Sie erhalten dort Unterricht in Anatomie und Optik, Chemie und Elektrizitätslehre, kommen mit neuester Technik in Berührung, mikroskopieren und experimentieren mit den jüngst entdeckten Röntgenstrahlen.<sup>9</sup>

In Suse Byks Ausbildungszeit vor dem Krieg waren die Belichtungs-

zeiten länger, wie auch die Haare der Frauen und ihre Röcke. Und wie steif ihr die Haltung der Personen in den alten Familienalben nun erscheint! »Es war ein langer und nicht leichter Weg von dem ›Bitte recht freundlich‹ zu der heutigen lebendigen Charakteristik«, so die Fotografin rückblickend.<sup>10</sup>

Ihr Interesse gilt der Expressivität und Wandlungsfähigkeit des menschlichen Gesichts. Proben Ausdruckstänzerinnen wie Valeska Gert oder Vera Skoronel vor ihrer Kamera, dann arbeitet Suse Byk die Plastizität ihrer Gesichter durch starke Kontraste heraus oder verwandelt sie durch Überbelichtung in zweidimensionale Masken. Abseits der Bühne, wenn Kunden wie Einstein ihr Atelier am Kurfürstendamm aufsuchen, um sich mit professionellen Lichtbildern und Fotokarten auszustatten, handhabt sie die Lichtführung behutsamer.

## EINE NEUE GRÖSSE DER WELTGESCHICHTE

Im November 1919 sitzt Einstein vor ihrer Kamera. Er ist 40 Jahre alt, trägt Anzug und Krawatte, passend zu seiner herausgehobenen Stellung in Berliner Wissenschaftskreisen. Sein Haar, von dem bereits gesagt wird, es ähnele dem eines Künstlers, ist dicht, aber längst nicht so lang und wirr wie in späteren Jahren, als es zum Markenzeichen seiner Unangepasstheit wird.

Einstein am Wendepunkt seiner Karriere: Kein anderes von Suse Byks Fotos wird jemals so viel Beachtung finden wie dieses. Gut möglich, dass sie im Wettlauf mit Pressefotografen die Nase vorn hat, weil ihr Cousin ihr den entscheidenden Hinweis gegeben hat. Genauso plausibel erscheint es aber, dass die Fotografin direkt von der *Vossischen Zeitung* beauftragt worden ist, der das plötzlich aufflammende internationale Interesse an Einsteins Person nicht entgangen sein kann. Oder hat Berlins traditionsreichste Zeitung zunächst bei Einstein angefragt und dieser Suse Byk daraufhin selbst ins Spiel gebracht? Zwei Jahrzehnte später, als das Magazin *Life* in den USA eine Fotoserie mit ihm anstrebt, wird Einstein

darauf pochen, dass die Bilder nur von »Miss Jacobi« gemacht werden dürfen, womit Lotte Jacobi gemeint ist. Auch sie ist eine von ihm geschätzte Fotografin mit jüdischen Wurzeln, die er aus seiner Zeit in Berlin kennt.

Am 30. November 1919 präsentiert die *Vossische Zeitung* das Einstein-Porträt an prominenter Stelle in ihrer Sonntagsbeilage – allerdings kleinformatig und mit einer allzu bescheidenen Bildunterschrift: »Prof. Albert Einstein, der Mitschöpfer der Relativitätstheorie, deren Voraussagen jetzt eine glänzende Bestätigung durch Verarbeitung der Beobachtung der letzten Sonnenfinsternis erhalten haben. Phot. Suse Byk«.

Im Hause Ullstein merkt man bald, der Bedeutung des Ereignisses und Einsteins Anteil daran nicht gerecht geworden zu sein. Auch aus der Fotografie ist mehr zu machen. Nur zwei Wochen später wird sie noch einmal gedruckt, diesmal auf der Titelseite des auflagenstärksten Blatts, der *Berliner Illustrierten Zeitung*, die bereits 1914 die Schwelle von einer Million verkauften Exemplaren überschritten hat.

Hunderttausende, Millionen Deutsche sehen den Wissenschaftler, von dem einige bereits gehört haben, nun zum ersten Mal: gedankenversunken, den Blick gesenkt. Unter dem Foto die markige Zeile: »Eine neue Größe der Weltgeschichte: Albert Einstein ...«. Und weiter in etwas kleinerer Schrift: »... , dessen Forschungen eine völlige Umwälzung unseres Naturverständnisses bedeuten und den Erkenntnissen eines Kopernikus, Kepler und Newton gleichwertig sind. Phot. Suse Byk«.

Einsteins Kopf füllt die gesamte Titelseite der Illustrierten. Die Redaktion hat die Porträtaufnahme an den Rändern beschnitten und auf Zeitungsformat vergrößert. In der Haltung des »Denkers« sitzt Einstein da, das Haupt auf seine rechte Hand gestützt. Eine Pose, so alt wie Walther von der Vogelweide, auf Pergament gemalt in der bekanntesten mittelalterlichen Liederhandschrift, dem Codex Manesse. Mit ihm, dem mittelalterlichen Dichter, teilt Einstein den feingeistigen, melancholischen Gesichtsausdruck.

Auch die seitliche Beleuchtung verweist auf die bildenden Künste: Einsteins Kopf ist eingetaucht in ein typisches Rembrandt-Licht, die eine



Albert Einstein auf der Titelseite der »Berliner Illustrierten Zeitung«.

Gesichtshälfte hell, die andere dunkel. Seine Augenlider wölben sich unter starken Kontrasten, die rabenschwarzen Pupillen betonen die unverwandte Konzentration.

Das Porträt scheint wie geschaffen dafür, Einstein einen Platz im Pantheon der Wissenschaft zu sichern. So jedenfalls müssen es die Bildredakteure der *Berliner Illustrierten Zeitung* gesehen haben, die, statt einen zweiten Fotografen auf Einstein anzusetzen, Suse Byks Foto noch einmal verwendet haben. Und diesmal soll das Publikum dem Forscher so nah wie möglich kommen: durch ein »Close-up«, eine Großaufnahme, die Leserinnen und Leser teilhaben lässt an einem wissenschaftlichen Großereignis, das den meisten von ihnen unverständlich bleiben muss.

Das Titelfoto gibt einen Vorgeschmack auf den Presserummel, der den Physiker von nun an überallhin begleiten wird: Einstein in London, Einstein in New York, Einstein in Paris, Einstein in Tokio, Einstein in Jerusalem, Einstein in Buenos Aires – jede seiner Reisen in den Zwanzigerjahren ist durch Fotos dokumentiert. Überall jubelt man ihm zu, ob auf

dem vom Krieg zerrissenen und desillusionierten europäischen Kontinent oder jenseits der Weltmeere. Die internationale Öffentlichkeit feiert ihn als Genius, der eine neue Wahrheit verkündet.

Plötzlich wird Physik chic. Mit Einstein bekommt sie ihr unverwechselbares Gesicht. Auf eine Theorie, die von versetzten Zeitmaßstäben und gekrümmten Räumen handelt, können viele Zeitungen kaum anders reagieren als mit Bildern. Einstein-Fotos und personalisierte Geschichten bieten eine anschauliche Alternative zu abstrakten Abhandlungen über die Relativitätstheorie. Suse Byks Foto und die Aufnahmen ihrer Berufskollegen erreichen ein breiteres Publikum als die schreibende Zunft mit ihren Artikeln. »Die Erde ist noch rund, aber die Geschichten sind viereckig geworden«, kommentiert der Schriftsteller Ödön von Horváth die neue Bilderwelt der Illustrierten und des Kinos.<sup>11</sup>

## LICHT AUF KRUMMEN BAHNEN

Hinter Einsteins plötzlicher Berühmtheit verbergen sich weitere Bilder: spektakuläre Astrofotografien. Zwei britische Forscherteams haben sie während einer Sonnenfinsternis im Mai 1919 in Brasilien und im Golf von Guinea gemacht. Er selbst hatte solchen Aufnahmen entgegengefeuert.

Wie breitet sich Licht im Weltall aus? Bereits als Schüler war Einstein gedanklich auf einem Lichtstrahl durch das Universum geritten. Während die elterliche Fabrik »Einstein und Cie« die Gemeinde Schwabing vor den Toren Münchens mit einer modernen Beleuchtungsanlage aus acht Bogen- und 170 Glühlampen illuminiert hatte, war ihm bewusst geworden, dass man mit Licht nicht nur Geld verdienen kann. Wer die Welt bei Lichtgeschwindigkeit betrachtet, dem öffnen sich neue Horizonte.

Schon seine spezielle Relativitätstheorie baut auf der Erkenntnis auf, dass die Geschwindigkeit des Lichts für alle Beobachter unveränderlich ist, eine immerwährende Konstante der Natur. Raum und Zeit können daher keine voneinander unabhängigen Größen sein, auch wenn sich

dies erst bei hohen Geschwindigkeiten bemerkbar macht. In den folgenden zehn Jahren hatte Einstein seine Einsichten in die Ausbreitung des Lichts durch immer neue Gedankenexperimente auf die Probe gestellt. Seine allgemeine Relativitätstheorie verknüpft Raum und Zeit aufs Engste mit der Materie. Große Massenansammlungen wie unsere Sonne verkrümmen den Raum. Infolgedessen kreisen Planeten um die Sonne und breitet sich Licht in Sonnennähe nicht geradlinig aus, sondern weicht von diesem Kurs ab.

Belege dafür haben britische Forscher nun bei einer Sonnenfinsternis gefunden. Während der Finsternis verdeckte der Mond die Sonnenscheibe. Daher zeigen die Fotografien in der Mitte eine tiefschwarze, kreisrunde Fläche, umgeben von einem Strahlenkranz.



Die schwarze Sonne am 29. Mai 1919.

Das Wesentliche aber ist das unauffällige Drumherum. Ein ungeübtes Auge kann die fahlen Lichtpunkte in Sonnennähe kaum erkennen. Die besondere Leistung der britischen Forscher bestand darin, das matte Licht der umliegenden Sterne während der Finsternis einzufangen und die Sternörter präzise zu vermessen. Durch einen Vergleich mit Fotografien derselben Sternregion bei Nacht haben sie nachweisen können, dass



die Positionen der sonnennächsten Sterne während der Finsternis leicht verschoben waren. Anders gesagt: Die Sonne lenkt das von diesen Sternen zur Erde gelangende Licht geringfügig ab. In ihrem Gravitationsfeld läuft Licht auf krummen Bahnen.

Zwischen der Sitzung der Royal Society, bei der die Ergebnisse der Sonnenfinsternis-Expedition der Öffentlichkeit vorgestellt wurden, und Einsteins Porträtsitzung bei Suse Byk lagen höchstens drei Wochen. Schwer vorstellbar, dass Einstein ihr nicht von den astronomischen Bildern erzählte, die Auslöser für das in aller Welt aufflammende Interesse an seiner Person waren. Seine Spontaneität und Heiterkeit schaffen in solchen Situationen oft eine lockere Atmosphäre, »in der alles Gekünstelte, Konventionelle von selbst erlischt«.<sup>12</sup> Ehe die Fotografin unter einem schwarzen Tuch verschwand, könnte er ein paar humorvolle Bemerkungen zur Beleuchtung gemacht haben, die Suse Byk im Unterschied zu den Astrofotografen frei wählen konnte. Vielleicht lenkte er das Gespräch auch darauf, was beim Fotografieren selbst passiert:

Wenn sich die Blende öffnet, fällt Licht auf die Fotoplatte. Es schwärzt die Platte, weil sich das darin vorhandene Bromsilber umwandelt, sobald das Licht seine Energie abgibt. Einsteins physikalischem Verständnis nach geschieht dies Lichtquant für Lichtquant.

## **WAS IST LICHT?**

Auch zur Natur des Lichts hat Einstein ganz eigene Vorstellungen entwickelt. Seit seiner Jugend lässt ihm die Physik der Strahlung keine Ruhe. Was ist dieses Etwas, das sich in der Luft oder im Weltraum mit der ungeheuren Geschwindigkeit von 300 000 Kilometern in der Sekunde ausbreitet? Was ist Licht?

Wir werden dieser Frage in diesem Buch immer wieder begegnen und uns ihr aus unterschiedlichen Perspektiven nähern. Max Planck wirft sie im Herbst 1919 bei der Hauptversammlung der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft in Berlin auf und hebt sie auf eine neue Ebene.<sup>13</sup>

Die scheinbar simple Frage »Was ist Licht?« berührt den Kern einer Theorie, die in den Zwanzigerjahren sukzessiv Form annehmen und die Physik auf den Kopf stellen wird – die Quantentheorie. Mit Planck gesprochen birgt sie »das erste und schwerste Dilemma, vor das die ganze Quantentheorie gestellt ist«. <sup>14</sup> Es lässt sich mit einem einzigen Wort umreißen: Lichtquanten.

Alles, was mit diesem vagen Begriff zusammenhängt, ist Planck nicht geheuer. Anderen Forscherinnen und Forschern geht es ähnlich. Was soll man sich darunter vorstellen? Teilchen ohne Masse? Eine mehr als verrückte physikalische Idee!

Zeit zum Nachdenken hatten sie reichlich, denn der Gedanke an sich ist keinesfalls neu. Im selben Jahr 1905, in dem Einstein die Fachwelt erstmals mit seinen Ansichten zur Ausbreitung des Lichts, zu Raum und Zeit verblüffte, spekulierte er in einem zweiten Aufsatz darüber, was Licht ist. Seine wegweisende Publikation in den *Annalen der Physik* hatte er Freunden gegenüber als »sehr revolutionär« angekündigt. Der Aufsatz selbst war frei von Übermut. Der 26-jährige Einstein eröffnete ihn ganz vorsichtig mit einem »Es scheint mir ...« und sprach lediglich von einem »heuristischen Gesichtspunkt«. <sup>15</sup>

Auf sein Alter lässt sich diese Zurückhaltung nicht zurückführen. Vielmehr zögerte der Sachbearbeiter im Berner Patentamt, der nach dem Studium keine Anstellung an einer Universität hatte finden können, im Angesicht einer großen Entdeckung. Ausdrücklich lobte er die bestehende Lichttheorie, ehe er mit dem Wesentlichen herausrückte: »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 oder erzeugt werden können.« <sup>16</sup>

Mit diesen Worten waren die »Energiequanten«, »Lichtenergiequanten« oder »Lichtquanten«, wie Einstein sie wechselweise nannte, in der Welt.

## QUANTUM FÜR QUANTUM

Das Herzstück seines physikalischen Aufsatzes bildeten theoretische Überlegungen. Einstein konnte die hypothetische Existenz dieser Lichtquanten jedoch nicht nur mathematisch begründen, sondern auf mehrere Experimente verweisen, die seiner Ansicht nach allein auf dieser Basis verständlich erschienen, darunter der »Fotoeffekt«.

Beim Fotoeffekt wird eine Metallplatte nicht einfach durch das Öffnen einer Blende belichtet, sondern gezielt mit ultravioletter Licht bestrahlt. Ultraviolettes Licht ist energiereicher als sichtbares Licht und, wie Planck im Herbst 1919 in seinem Vortrag betont, eine von vielen Spielarten wellenförmiger Strahlung. Das menschliche Auge sei zwar »ein sehr empfindliches, aber doch recht beschränktes Reagenzmittel«. Denn es registriere Strahlen nur innerhalb eines kleinen Spektralbereichs von kaum Oktavenbreite. »Für das übrige Spektrum treten an die Stelle des Auges andere Empfangs- und Messapparate.«<sup>17</sup>

So auch für die UV-Strahlen, die sich von sichtbarem Licht durch ihre größere Frequenz unterscheiden, sprich: Die Zahl der Schwingungen pro Sekunde ist höher, ähnlich wie beim Auf und Ab des Meeres, das in langen, ausgedehnten Wellenzügen oder im schnellen Wechsel von Wellenkämmen und -tälern erfolgen kann.

Beim Fotoeffekt löst das UV-Licht Elektronen, winzige geladene Partikel, aus dem Metall heraus. Dies geschieht allerdings nicht immer, sondern nur dann, wenn die Frequenz des Lichts eine bestimmte Schwelle überschreitet. Ein rätselhafter Befund. Warum genügt es nicht, die Platte mit mehr Licht zu bestrahlen? Auch in diesem Fall kommt mehr Energie an Ort und Stelle an. Doch während eine höhere Lichtintensität folgenlos bleibt, bewirkt bereits ein wenig hochfrequentes UV-Licht einen messbaren Strom von Elektronen.

Einstein erklärte sich die Sache so, dass »lokalisierte Energiequanten« auf das Metall einprasseln. Die Energie einzelner Lichtquanten werde auf einzelne Elektronen übertragen. Sollen nun Elektronen aus dem Metall herausgeschlagen werden und entkommen, dann muss die Bindungs-

energie der Elektronen im Metall überwunden werden, die Energie einzelner Lichtquanten also oberhalb dieser Schwellenenergie liegen.

Einstein zufolge besteht das eingestrahlte UV-Licht der Frequenz  $\nu$  aus unabhängigen Quanten der Energie

$$E = h\nu$$

Diese Gleichung ist für die Geschichte der Quantenphysik bedeutender als jede andere. In ihrer Form und ihrem Gehalt nach ist sie am ehesten zu vergleichen mit dem ebenfalls von Einstein entdeckten Naturgesetz

$$E = mc^2$$

Zwei Energiegleichungen, die für die Seltsamkeit der modernen Physik stehen. Hier wie dort taucht eine Naturkonstante als Proportionalitätsfaktor auf: in der ersten Gleichung ein ungemein winziges Quantum  $h$ , in der zweiten Formel die aberwitzig große Lichtgeschwindigkeit  $c$ . Beide Naturkonstanten führen in Dimensionen jenseits des menschlichen Vorstellungsvermögens. Sie sind verbunden mit überraschenden Phänomenen im Mikro- und Makrokosmos.

Als Einstein im Herbst 1919 für seine allgemeine Relativitätstheorie und die von ihm vorhergesagte Lichtablenkung an der Sonne weltweit gefeiert wird, glauben allerdings weder Planck noch die meisten anderen Physikerinnen und Physiker an die Existenz irgendwie gearteter Lichtquanten. Denn wie will man damit die vielen optischen Erscheinungen beschreiben, die im Zuge der klassischen Wellentheorie des Lichts schlüssig interpretiert werden können?

Nur hier und da knüpft die Fachwelt an seine Theorie an, etwa bei der Erforschung fotografischer Prozesse. Als Wissenschaftler beim ersten Deutschen Physikertag nach dem Krieg etwas großspurig verkünden, jedes fotochemisch erzeugte Silberteilchen in den von ihnen untersuchten Trockenplatten der Firma Agfa entspreche »einem und nur einem absorbierten Quant«, darf sich Einstein bestätigt fühlen.<sup>18</sup>

## QUANTENLICHT

Dieses Buch schaut zurück auf die Zwanzigerjahre des zurückliegenden Jahrhunderts, in denen eine Welle neuer Erkenntnisse das bis dahin so sicher geglaubte Wissen wegspült. Auf ein großes Jahrzehnt der Physik, in dem Einsteins »sehr revolutionäre« These heftige Auseinandersetzungen über die Frage nach der Wechselwirkung von Licht und Materie auslöst. Eine Dekade, in der die Wissenschaft zur Quantenmechanik vorstößt und die Grenzen des Sagbaren erreicht.

Die Rätselhaftigkeit der Quantenwelt manifestiert sich am stärksten in der Natur des Lichts. Noch im 21. Jahrhundert finden die grundlegenden Experimente zur Quantenphysik – bizarre Versuche zur Quantenverschränkung, Quantenkryptografie oder Nichtlokalität – in optischen Laboratorien statt. Hier bespiegeln Forscherinnen und Forscher noch heute den Zufall und das Versagen von geläufigen Kategorien wie Raum, Zeit und Kausalität. Nicht von ungefähr sollte Einstein bis zu seinem Tod mit seiner eigenen Lichtquantenhypothese ringen.

Anfang der 1920er-Jahre ist sie noch ein Randphänomen. Stattdessen entzündet sich die Fantasie der meisten Theoretiker und Experimentatoren zunächst an jenem Licht, das aus dem Inneren der Atome nach außen dringt. Es zeigt sich in Form von scharfen Linien im Lichtspektrum von Gasflammen oder der Sonne.

Wie der Däne Niels Bohr erkannt hat, bietet die Analyse dieses Lichts eine einzigartige Möglichkeit, den Aufbau der Atome und der chemischen Elemente zu entschlüsseln. Bohr wird zur Leitfigur einer ganzen Forschergeneration. Sein Atommodell begeistert alte Hasen wie Planck, Gleichaltrige wie Einstein und zahlreiche junge Physikerinnen und Physiker, die zu seinen Auftritten nach Berlin und Göttingen, vor allem aber nach Kopenhagen pilgern, unter ihnen Werner Heisenberg, dem 1925 ein entscheidender Durchbruch zu einer völlig neuen Quantentheorie gelingt.

Die Entstehung dieser Quantenmechanik kann freilich weder an einem einzelnen Datum noch an einem Namen festgemacht werden. Zahl-

lose Experimente und mathematische Arbeiten tragen zum Verständnis und der Berechenbarkeit des Atoms bei. Während die Vollendung der allgemeinen Relativitätstheorie im Wesentlichen als Triumph eines einzelnen Wissenschaftlers erscheint, entspringt die Quantenmechanik der Denkanstrengung vieler Köpfe.

Vier Theoretiker stehen im Mittelpunkt dieses Buches. Sie und ihre Geschichten sollen Ruhepunkte in diesem Wimmelbild sein. Und zwar deshalb, weil ihre Beiträge den Erkenntnisprozess und den in den Zwanzigerjahren aufbrechenden Generationenkonflikt in besonderer Weise erlebbar machen. Als zunächst unscheinbares Quantenlicht wandert die Fackel der Erkenntnis von einer Hand zur anderen: von Max Planck zu dem eine Generation jüngeren Albert Einstein, dann weiter zu Niels Bohr und dem noch einmal deutlich jüngeren Werner Heisenberg.

Je weiter ihre Forschungen ausgreifen, umso deutlicher zeigen sich die Grenzen der klassischen Physik, umso unverständlicher erscheinen ihnen die Natur des Lichts und die subatomare Welt – bis Mitte der Zwanzigerjahre, als kaum noch jemand ahnt, wie dieser Knoten gelöst werden könnte, die Entschlüsselung des Atoms beinahe gleichzeitig von zwei weit entfernten Enden her erfolgt: Unmittelbar nachdem, ausgehend von Heisenbergs Ideen, eine Matrizenmechanik ins Leben gerufen worden ist, nimmt die Quantentheorie noch ein zweites Mal Form an, diesmal als Wellenmechanik, leichter zu handhaben und daher von Theoretikern favorisiert. Trotz der völlig unterschiedlichen Herleitung erweisen sich beide Formen als einander äquivalent.

Ein für alle Mal geklärt ist damit nichts. Im Gegenteil: Die Debatten über die Interpretation des Erreichten, über Lichtquanten, den Welleilchen-Dualismus und die nach Heisenberg benannte »Unbestimmtheitsrelation« gehen nun erst richtig los. An der Deutung des mühevoll Erreichten scheiden sich die Geister. Ein babylonisches Stimmengewirr kennzeichnet jene Konferenz im Jahr 1927 in Brüssel, bei der alle vier Forscher zu einem legendären Gipfeltreffen zusammenkommen.

## VON DER GLÜHBIRNE ZUR SOLARZELLE

Allen wirtschaftlichen und politischen Turbulenzen zum Trotz wird die Spanne nach dem Großen Krieg als »goldene Zwanziger« bezeichnet. Als Zeit des Neuanfangs, einer großen Freizügigkeit, außergewöhnlichen künstlerischen und intellektuellen Kreativität hat das Jahrzehnt seinen Zauber bis heute nicht eingebüßt. Als hätten die vorausgegangenen Schrecken des Krieges und der bange Blick in die Zukunft in Teilen der Bevölkerung einen unstillbaren Lebenshunger und eine unersättliche Neugier entfesselt.

Die Großstädte erstrahlen in neuem Licht. Noch zu Beginn des 20. Jahrhunderts dienten vor allem Gaslampen zu ihrer Beleuchtung. Nachdem sich im Jahr 1919 die entsprechenden Sparten der Firmen Siemens und AEG zu dem neuen Unternehmen Osram zusammengeschlossen haben, drängen Bogenlampen und langlebige elektrische Glühlampen die Gasbeleuchtung in ganz Europa zurück. In Städten wie Berlin macht das elektrische Licht die Nacht zum Tage. Nach Einbruch der Dämmerung glänzt Elektropolis im Schein der Straßenlaternen und der Leuchtreklamen von Geschäften und Warenhäusern. Glühbirnen illuminieren Fotoateliers, Tanzsäle und Theaterbühnen.

Im November 1919 etwa öffnet in der deutschen Hauptstadt das Große Schauspielhaus seine Pforten, von den Berlinern »Tropfsteinhöhle« genannt, weil zahllose stalaktitenförmige Zacken dessen Kuppel bilden. Die Innenbeleuchtung ist spektakulär. »Denn an der Spitze jedes Stalaktiten leuchtete schwach eine Glühbirne, und von einem Schalterpult aus ließen sich, wie in einem Planetarium, die Konstellationen der Sternbilder simulieren.«<sup>19</sup>

Heute, 100 Jahre später, hat die Glühbirne von einst ausgedient. Die auf der Quantenphysik aufbauenden optischen Technologien haben unsere Alltagswelt völlig verändert. Smartes Licht ist in Mode, LEDs zum Beispiel, bei denen die Umkehrung des Fotoeffekts zum Tragen kommt.

Quantenlicht leuchtet heute überall. Laserdioden übertragen Daten durch Glasfasernetze in alle Welt. Sie verbergen sich hinter Lichtschran-

ken, in Barcode-Lesegeräten an der Supermarktkasse und in DVD-Playern. Der Laser hat sich mehr und mehr zum technologischen Herzstück des 21. Jahrhunderts entwickelt. Ärzte beheben Fehlsichtigkeiten mit Laserlicht und machen Brillen überflüssig. Mit dem Laser kann man schneiden, bohren und schweißen. In der Industrie werden Laser angesteuert, um beliebig komplex geformte Bauteile aus aufgeschmolzenem Metall oder aus Kunststoff Schicht für Schicht aufzubauen.

Optische Technologien lösen mechanische und elektronische Vorrichtungen auf breiter Front ab. Der Kabelanschluss fürs Fernsehen wird über kurz oder lang verschwinden, weil Glasfasern bessere Dienste tun. Dreh- und Angelpunkt der Technologie des 21. Jahrhunderts ist der Laser. Derweil bemüht sich die Grundlagenforschung nach wie vor um ein besseres Verständnis und die Manipulation von Lichtquanten. Ausdruck dessen sind die vielen Nobelpreise auf dem Gebiet der Quantenoptik seit der Jahrtausendwende.

Anreize für diese Art der physikalischen Forschung gibt es in Hülle und Fülle. Ohne eine intelligente Optik ist eine klimafreundlichere Zukunft schwer vorstellbar. Moderne Solarzellen beruhen auf detaillierten Kenntnissen des Fotoeffekts im Innern von Halbleitermaterialien. Sie erlauben es, mehr und mehr elektrischen Strom aus Sonnenlicht zu gewinnen, während umgekehrt mit immer weniger Strom Licht erzeugt werden kann: gebündeltes rotes oder blaues Laserlicht, bei Bedarf auch diffuses weißes Licht für Beleuchtungszwecke.

Allerdings ist diese Quantentechnologie janusköpfig wie jegliche wissenschaftliche Erkenntnis. Schon jetzt ist sie zur »Axt in der Hand des Verbrechers« geworden, wie sich Einstein einst ausdrückte. Das Auge einer Kampfdrohne etwa ist eine Ausgeburt der Quantenphysik, Laser eignen sich ebenso für die Waffen- wie für die Medizintechnik.



## VON GIPFELTREFFEN ZU GIPFELTREFFEN

Dieses Buch blickt aus einer besonderen Perspektive zurück auf die Zeit zwischen zwei großen Kriegen, auf eine Dekade, die von großen gesellschaftlichen Umbrüchen, wirtschaftlichen und politischen Turbulenzen geprägt ist. Es erzählt von den Ursprüngen des Quantenlichts. Die einzelnen Kapitel tauchen ein in die Gedankenwelt Plancks und Einsteins, Bohrs und Heisenbergs, die sich nicht in Elfenbeintürmen verstecken. Um offene Fragen zu klären, reisen sie durch Deutschland und um die Welt, laden sich wechselseitig zu Vorträgen und längeren Gastaufenthalten ein.

In den Zwanzigerjahren werden junge Kreative von der Metropole Berlin angezogen wie die Motten vom Licht. Die Erforschung des Atoms aber verlagert sich in eben dieser Spanne mehr und mehr an andere Orte. Denn in München, Göttingen und an Bohrs neu gegründetem Forschungsinstitut in Kopenhagen werden junge Physikerinnen und Physiker deutlich schneller an die aktuelle Wissenschaft herangeführt. Einstein schaut bewundernd auf die große Zahl junger Talente, die beispielsweise in München »wie aus dem Boden gestampft« und deren Geister »veredelt« würden.<sup>20</sup>

Heisenberg ist einer dieser Neulinge. Sein kometenhafter Aufstieg, sein gedanklicher Aufschwung zur Quantenmechanik und zur Unbestimmtheitsrelation verdanken sich dem Hin und Her zwischen den genannten Städten. Anfangs schöpft er in München aus dem Wissen seines Professors über Spektrallinien, dann vertieft er sich in Göttingen in grundlegende mathematische Konzepte, in Kopenhagen bringt ihn Bohr, der Philosoph unter den Physikern, auf neue gedankliche Pfade.

Auch Einstein und Planck tingeln nach Kopenhagen. Die vier Protagonisten dieses Buchs treffen sich paarweise, zu dritt oder zu viert, manchmal überraschend: Einstein zum Beispiel führt ein exklusiver Road Trip mit dem amerikanischen Banker Henry Goldman zur ersten Begegnung mit Heisenberg. Diese und andere Zusammenkünfte sind denkwürdig genug, dass die Geschichte der Zwanzigerjahre und des

Quantenlichts in diesem Buch entlang solcher Treffen erzählt werden soll. Im Sport würde man von »Spitzenbegegnungen« sprechen.

Derartige Gipfeltreffen haben ihren Nimbus. Selbst wenn man nichts von ihnen wüsste als die nackte Tatsache, dass sie stattgefunden haben, bliebe der Fantasie »jeder Spielraum zu erdenken, was hätte gesagt werden müssen, gleichgültig, was faktisch gesagt worden ist«, so der Philosoph Hans Blumenberg. »Eine grandiose Unbestimmtheit.«<sup>21</sup>

So gesehen, genügt dieses Buch seiner eigenen Unbestimmtheitsrelation. Die hier vorgestellten Gipfeltreffen öffnen der Fantasie gelegentlich Tür und Tor. Sie machen deutlich, dass das historische Material niemals ausreicht, eine vergangene »Wirklichkeit« zu rekonstruieren. Man kann Briefe, persönliche Erinnerungen der Beteiligten und Berichte Dritter heranziehen, doch der Forderung des Historikers Leopold von Ranke, zu zeigen, »wie es eigentlich gewesen«, wird man nie genügen.

Zum Beispiel deshalb nicht, weil Individuen sehr unterschiedliche Erlebnisse und Erinnerungen haben. Weil sie ihre Briefe nicht frei von Interessen schreiben. Weil man aus ihren autobiografischen Schriften und Memoiren womöglich eher erfährt, wie es hätte gewesen sein sollen, als »wie es eigentlich gewesen«.

## HUNDERT UND EIN BILDNIS

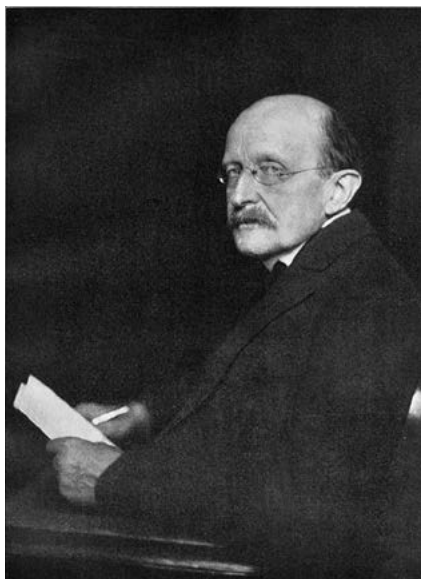
Bei all der Unbestimmtheit klammert man sich gerne an Bilder. »Das Licht ist der objektivste Zeuge«, schreibt Einstein einem Berliner Fotograf zu Beginn Zwanzigerjahre ins Fotoalbum.<sup>22</sup> Als wenige Jahre später die ersten Kleinbildkameras aufkommen, fangen auch passionierte Amateure Momente im Alltag ein: Einstein und Bohr in Sesseln lümmelnd, Heisenberg beim Sonntagsspaziergang mit Bohr und dessen Familie, Planck und Bohr in Kopenhagen vor einer mit mathematischen Formeln beschriebenen Tafel.

Zum Ende des Jahrzehnts fotografiert Suse Byk den Physiker Max Planck für einen Porträtband.<sup>23</sup> Planck sitzt am Schreibtisch, einen Stift

in der rechten und ein Schriftstück in der linken Hand. Weil sich die Fotografin seitlich von ihm postiert hat, muss er den Kopf für die Aufnahme nach links drehen. Diese Bewegung setzt sich in den von ovalen Brillengläsern umrahmten Augen fort.

Anders als der gedankenversunkene Einstein auf dem Porträtfoto vom November 1919 schaut Planck mit ernster Miene direkt in die Kamera. Sein Gesicht ist völlig ebenmäßig ausgeleuchtet, der Blickkontakt aber wirkt so, als fühlte er sich bei seiner Arbeit gestört.<sup>24</sup> Warum jetzt dieses Foto?

Das Porträtfoto findet Eingang in ein Buch mit dem Titel *Menschen der Zeit. Hundert und ein Bildnis aus deutscher Gegenwart*, in einen jener Sammelbände, die an den Nationalstolz appellieren und die nun in immer größerer Zahl auf den Markt kommen.<sup>25</sup> Ende der Zwanzigerjahre suchen Fotografen landauf, landab danach, was die »Deutschen« ausmacht. So publiziert Erich Retzlaff den Porträtband *Die von der Scholle. Sechshundfünfzig photographische Bildnisse bodenständiger Menschen*, seine Kollegin Erna Lendvai-Dirksen *Das deutsche Volksgesicht*.



Max Planck im Jahr 1929.

Suse Byk steuert zu *Menschen der Zeit* drei unterschiedliche Porträts bei, darunter eines von der Frauenrechtlerin Alice Salomon. Sie ist weit davon entfernt, sich mit ihren Fotografien auf bestimmte Typen festzulegen. Aber es entbehrt nicht einer bitteren Ironie, dass man auch sie für ein deutschümelndes Fotobuch in Anspruch nimmt, wenige Jahre bevor sie ihr Atelier am Kurfürstendamm räumen muss.

Unweit ihres Studios grölen Nazis nun laut »Die Wacht am Rhein«. Sie stürmen Berliner Theaterbühnen und Hörsäle, um das »Deutsche Theater jüdischer Nation« und die »Jüdische Physik« zu bekämpfen. Ende der Dreißigerjahre wird die Fotografin Deutschland verlassen. Ihr Cousin Alfred Byk und ihre Meisterschülerin Yva, die wohl zu spät versucht hat, noch nach New York zu entkommen, werden beide am 13. Juni 1942 nach Sobibor deportiert und in den Gastod geschickt.<sup>26</sup>

Suse Byks Spuren verlieren sich in den USA. Ihr Name ist heute nur noch wenigen bekannt. Ihre fotografischen Arbeiten sind verstreut und nie Teil einer geschlossenen Sammlung geworden.<sup>27</sup>

Einstein, schon zu Beginn der Zwanzigerjahre antisemitischen Anfeindungen gegen seine Relativitätstheorie ausgesetzt, hat die finstersten Fratzen des »deutschen Volksgesichts« gesehen. Am Tag vor dem Hitlerputsch in München im November 1923 ist er schon einmal Hals über Kopf ins holländische Leiden geflüchtet. Zehn Jahre später, kurz vor der tatsächlichen Machtergreifung der Nationalsozialisten, setzt er sich wieder beizeiten ins Ausland ab und zieht in die Vereinigten Staaten. Diesmal für immer. Von dort wird er Alfred Byks Töchtern, den »daughters of my esteemed colleague«, im November 1938 noch ein Empfehlungsschreiben zu ihrer Ausreise nach Australien ausstellen.<sup>28</sup>

Zu einem letzten spektakulären Zusammentreffen mit Heisenberg und Bohr kommt es im Jahr 1930 wiederum in Brüssel. Bei diesem Gipfeltreffen versucht Einstein – abermals vergeblich –, die Unbestimmtheit der Quantenwelt mit einem raffinierten Gedankenexperiment aus den Angeln zu heben. Dazu ersinnt er einen schwarzen Kasten, aus dem beim Öffnen eines speziellen Verschlusses nur ein einziges Lichtquant entweicht.

Wie kann es sein, dass nach einem Jahrzehnt unentwegter Diskussionen noch immer miteinander unvereinbare Standpunkte aufeinanderprallen?

Als eigenbrötlerischer Patentamtsangestellter »III. Klasse« hatte Einstein mit der Erforschung des Quantenlichts begonnen. Er hatte dem Kind einen Namen gegeben, ohne je zu wissen, was es sei. Von 1933 an wird er, isoliert von Planck, Bohr und Heisenberg, in Amerika leben. »Die ganzen 50 Jahre bewusster Grübeleien haben mich der Antwort der Frage ›Was sind Lichtquanten‹ nicht näher gebracht«, so Einstein wenige Jahre vor seinem Tod. »Heute glaubt zwar jeder Lump, er wisse es, aber er täuscht sich.«<sup>29</sup>

TEIL I

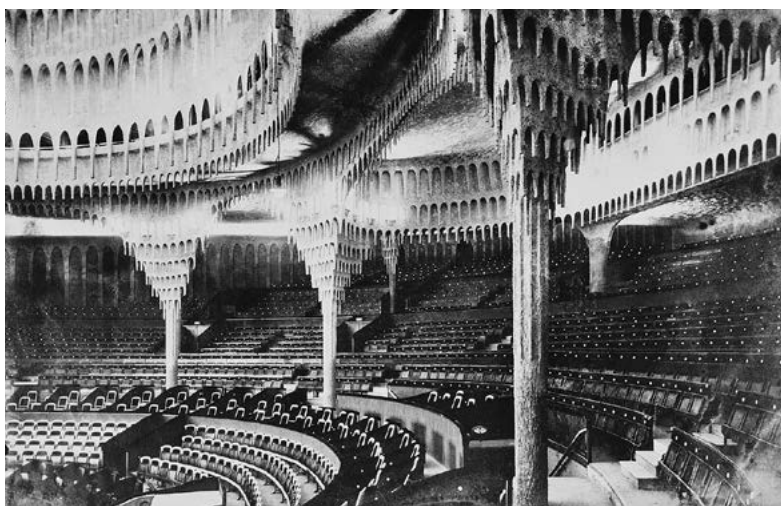
# **LICHT UND MATERIE**

## **(1919–1922)**



## SCHWARZE STRAHLER

*Berlin 1919: Planck und Einstein haben eine gemeinsame Reise nach Rostock geplant, als der eine den Nobelpreis erhält, der andere Weltruhm erlangt und das Licht plötzlich seine Leichtigkeit verliert*



Das Große Schauspielhaus am Bahnhof Friedrichstraße, von den Berlinern »Tropfsteinhöhle« genannt, öffnete im Jahr 1919. Die Stalaktiten bargen Halterungen für Glühbirnen.

Wieder einmal streiken die Berliner Verkehrsbetriebe. Nur über einen improvisierten Ersatzverkehr bleibt die Peripherie mit dem Zentrum verbunden.<sup>1</sup> Dicht aneinandergedrängt sitzen und stehen die Fahrgäste auf Pferdewagen, offenen Lkw-Ladeflächen und Militärwagen. Trittbrettfahrer, wo immer eine Stufe unter der Tür eines Fahrzeugs erobert werden kann.





Im Ufa-Palast am Zoo, im Herbst 1919 eröffnet, feierten Filme von Regisseuren wie Ernst Lubitsch oder Fritz Lang Premiere. Mitte der Zwanzigerjahre bot das Kino mehr als 2000 Zuschauern Platz.

Eine Metropole in Hast. Ihr Tempo verträgt keine Solidaritätsbekundungen mit den Streikenden. Abgesehen von den Arbeitervierteln im Berliner Norden, wo »wilde Fuhrwerke« angegriffen, ihre Kutscher beschimpft und dazu gezwungen werden, den Betrieb einzustellen, zeigt die Bevölkerung wenig Verständnis für die Lahmlegung des öffentlichen Verkehrs.<sup>2</sup>

Max Planck versucht wohl erst gar nicht, irgendwo aufzusteigen. Wie sich einer seiner engsten Kollegen erinnern wird, scheut er sich während der Lahmlegung der Berliner Verkehrsmittel nicht, »den fast zweistündigen von seinem Hause in der Villenkolonie Grunewald zu dem neben dem Denkmal Friedrichs des Großen im Zentrum der Stadt liegenden Akademiegebäude Tag für Tag zu Fuß zurückzulegen«.<sup>3</sup>

Planck geht viel zu Fuß. Zwischen regelmäßigen Wanderungen in den Alpen hält sich der 61-jährige Physiker in der Stadt mit täglichen, mitunter systematischen Spaziergängen fit. Einmal, so seine vormalige Assistentin Lise Meitner, habe er »im Lauf mehrerer Monate nach einem festgelegten Plan die ganze Umgebung von Berlin abgegangen«.<sup>4</sup>

An diesem milden, trockenen Sommertag muss Planck vor allem seine Gedanken ordnen. Er möchte sich noch einmal die Rede durch den Kopf gehen lassen, die er später, beim Festakt, halten wird. In Weimar stimmen die Abgeordneten der Nationalversammlung an diesem 3. Juli über die neuen Reichsfarben ab: Rot? Schwarz-Weiß-Rot? Oder Schwarz-Rot-Gold? Zeitgleich werden in Berlin mehr als 8000 Arbeiter und Angestellte zu den beiden großen Streikversammlungen zusammenkommen. Planck selbst soll eine andere Versammlung eröffnen:<sup>5</sup> die jährliche Festsitzung der Preußischen Akademie der Wissenschaften, deren Mitglied er seit 25 Jahren ist und die sich von nun an nicht mehr »Königliche« Akademie nennen wird. Sehr zu seinem Verdruss.

Die alte wilhelminische Ordnung ist zerstört, eine neue hat der Parlamentarismus aus Plancks Sicht bisher nicht herzustellen vermocht. Stattdessen: politisch motivierte Attentate, radikale Gruppen, die die öffentliche Sicherheit gefährden, Chaos, Hungerunruhen in Hamburg, Eisenbahnerstreiks in Frankfurt, Verkehrstreiks in Berlin.

## **»UNPOPULÄRE« WISSENSCHAFT**

»Der furchtbarste Krieg, den die Welt je gesehen hat, ist beendet«, hebt Planck an, nachdem er ans Rednerpult getreten ist. »Aber was tiefer brennt als alle seine Schrecknisse und Leiden, das ist die Schmach des uns von den Feinden aufgezwungenen Friedensschlusses.« Wehrlos liege Deutschland darnieder, blutend aus 1000 Wunden, und was schlimmer sei, durchzuckt von inneren Fieberschauern, deren Hartnäckigkeit die Aussicht auf Gesundung beinahe auszuschließen scheine.<sup>6</sup>

Im klassischen Dreiteiler steht der Professor vor seinen Akademiekollegen, hinter den ovalen Brillengläsern kleine, stechende Augen. Je größer die Not, fährt er fort, umso mehr sei nun der Einzelne aufgefordert, alles zu tun, was in seinen Kräften stehe, um das Hereinbrechen des gänzlichen Untergangs abzuwenden. Die Wissenschaft gehöre mit zu dem letzten Rest von Aktivposten, die der Krieg den Deutschen gelassen habe.

Und wenn man auf die Wiederaufrichtung des Vaterlandes hoffen wolle, seien diese idealen Güter die allernötigsten.<sup>7</sup>

Damit ist der Rahmen gesetzt. Bei aller Skepsis, die er der Republik entgegenbringt und die noch gewachsen ist, seit die Bedingungen des in Versailles unterzeichneten Friedensvertrags offenliegen – mit Rebellion oder Resignation ist niemandem geholfen. Planck möchte den Glauben der Akademie an den Wert ihres eigenen Tuns wiederherstellen. Für ihn ist die Forschung jetzt relevanter denn je.

Planck betrachtet sie als elitäres Unternehmen. Sie könne niemals mit einem unmittelbaren Interesse der breiten Öffentlichkeit rechnen. »Ja, man darf sagen, dass die reine Wissenschaft ihrem Wesen nach unpopulär ist. Denn das geistige Schaffen, bei dem der arbeitende Forscher in heißem Ringen mit dem spröden Stoff zu gewissen Zeiten einen einzelnen winzigen Punkt für seine ganze Welt nimmt, ist, wie jeder Zeugungsakt, eigenstes persönliches Erlebnis und erfordert eine Konzentration und Spezialisierung, die einem Außenstehenden ganz unverständlich bleiben muss.« Gerade dieser stillen Arbeit habe man es jedoch zu verdanken, dass die deutsche Wissenschaft auf manchen Gebieten immer noch eine führende Rolle im internationalen Wettbewerb spiele. Und solange sie in der bisherigen Weise voranschreite, so lange sei es undenkbar, dass Deutschland aus der Reihe der Kulturnationen gestrichen werde.<sup>8</sup>

Zähne zusammenbeißen und weiterarbeiten – das ist Plancks eindringlicher Appell an die versammelten Vertreter der Wissenschaft. Den Dingen nun erst recht auf den Grund gehen, um nicht ganz zugrunde zu gehen. Nicht kapitulieren, sondern sich in dem von ihm so empfundenen Daseinskampf der europäischen Kulturen durch herausragende Forschungsleistungen behaupten.

## GEMEINSAM NACH ROSTOCK

Vier Monate später macht die »unpopuläre« Wissenschaft Schlagzeilen. Planck selber rückt im November 1919 als Wegbereiter der Quantenphysik ins Rampenlicht. Und zwar just im selben historischen Augenblick, in dem die allgemeine Relativitätstheorie die Weltöffentlichkeit erreicht. Mit einem Mal schauen alle Nationen nach Deutschland, genauer: nach Berlin.

Wie es der Zufall will, haben sich Planck und Einstein zu ebendiesem Zeitpunkt zu einer gemeinsamen Reise verabredet. Sie möchten zusammen an die Ostsee fahren, selbstverständlich der Wissenschaft wegen. Die Universität Rostock hat sie zu ihrer 500-Jahr-Feier eingeladen, um sowohl dem Doyen der theoretischen Physik als auch dem eine Generation jüngeren Einstein die Ehrendoktorwürde zu verleihen.

Niemand freut sich so sehr auf diese Feier wie Moritz Schlick. 15 Jahre zuvor hat er bei Planck promoviert und sich während seiner anschließenden philosophischen Laufbahn eingehend mit den erkenntnistheoretischen Voraussetzungen der Einstein'schen Theorie über Raum, Zeit und Gravitation befasst. Nun möchte er die beiden Physiker bei sich zu Hause in Rostock einquartieren, von ganzem Herzen hoffend, »dass Sie von diesem Anerbieten Gebrauch machen«. <sup>9</sup> Sowohl Planck als auch Einstein haben die Einladung postwendend angenommen.

Da der Herbst beginnt und die Kälte einzieht, sahen sich die Organisatoren der 500-Jahr-Feier mit dem Problem konfrontiert, im Vorfeld genügend Kohlen zusammenzuklauben, um die Gebäude während der mehrtägigen Festivitäten zu heizen. Für die Anreise der Gäste aus Berlin schien dagegen gesorgt. Ein Sonderwagen der Bahn sollte sie nach Rostock bringen.

Den Fahrplan kann die Reichsbahn allerdings nicht einhalten. Wegen anhaltender Kohlennot muss sie den Personenverkehr wieder einmal kurzfristig einstellen. Den Veranstaltern bleibt nichts anderes übrig, als die Feier zu verschieben. <sup>10</sup>

Schlick ist bitter enttäuscht. Planck und Einstein hingegen reagieren

gelassen: Aufgeschoben heiße nicht aufgehoben. Dann würden sie eben am 25. November zusammen zu ihm nach Rostock kommen.<sup>11</sup> Was ist schon eine Verzögerung von 14 Tagen angesichts einer 500-jährigen Universitäts-geschichte!

Statt gemeinsame Tage an der Ostsee zu verbringen, sind also beide noch in Berlin, als dort die ersten Glckwunschschriften und -telegramme eingehen, bei Einstein ein paar Tage früher als bei Planck, obschon die an ihn adressierte Post von weiter her kommt: aus Paris und Breslau, London und Leiden, bald darauf auch aus den USA. Bezeichnenderweise sorgt die Relativitätstheorie zunächst in der internationalen Presse für Schlagzeilen. Die deutschen Zeitungen feiern zuerst Planck. Inmitten trostloser Berichte über Kriegsheimkehrer und Gefangene, über Kriegsschuld und Reparationen, über Kohlenmangel, Notbeleuchtung und Einschränkungen bei der Brotzuteilung tauchen mit einem Mal winzige Energierationen auf: Quanten.

## **ATOME? »HAMS OANS GSEHN?«**

Der Begriff »Quanten« leitet sich ab vom lateinischen Wort »quantum« für »wie viel«. Damit knüpft die Physik an die alte Frage an, ob die Welt aus kleinsten Elementen besteht oder ob sie als Kontinuum verstanden werden kann. Einstein wird den Kerngedanken der Quantenphysik später einmal mit folgendem Satz skizzieren: »Es muss damit gerechnet werden, dass sich manche physikalische Größen, die bislang für kontinuierlich gehalten wurden, in Wirklichkeit aus Elementarquanten zusammensetzen.«<sup>12</sup>

Die Vorstellung von Atomen zum Beispiel reicht weit zurück. Ihre Anfänge liegen in der Antike. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts fassten allen voran die Chemiker Vertrauen in eine Theorie der Atome, die Ordnung in das Periodensystem der Elemente brachte. Viele Physiker blieben skeptisch. »Hams oans gsehn?«, entgegnete etwa Ernst Mach seinem Kollegen Ludwig Boltzmann, der physikalische Erscheinungen mithilfe

statistischer Überlegungen auf die unsichtbaren Bewegungen ebensolcher Atome und Moleküle zurückführte.<sup>13</sup>

In den ersten Jahren des 20. Jahrhunderts machten Experimentatoren die Bewegungen der Atome und Moleküle »sichtbar«, schließlich sogar den Atomkern. Hinsichtlich der Masse spielte das Atom die Rolle eines Elementarquantums, so Einstein rückblickend. Allerdings arbeiteten selbst die empfindlichsten Waagen »bei weitem nicht so genau, dass man die Diskontinuität der Massenveränderung damit feststellen konnte«. Die Masse eines Wasserstoffatoms sei ungeheuer klein und betrage nur 0,000 000 000 000 000 000 000 0017 Gramm.<sup>14</sup>

Der elektrische Strom war ebenfalls eine physikalische Größe, die die Fachwelt lange als kontinuierlich betrachtet hatte. Im Jahr 1897 dann die Entdeckung des Elektrons. Es war noch kleiner als das Atom und – darüber wurde von Beginn an spekuliert – womöglich Bestandteil desselben. Da sich jede negative elektrische Ladung aus Elektronen zusammensetzt, bezeichnete Planck das Elektron um die Jahrhundertwende als »Elementarquantum der Elektrizität«.<sup>15</sup>

Nach und nach zeichnete sich eine Körnigkeit der Natur ab, die die Fachwelt zum Umdenken zwang. Planck, mit der klassischen Physik groß geworden, zweifelte lange an der Existenz der Atome. Am meisten Kopfzerbrechen aber sollte ihm der Konflikt zwischen der Körnigkeit der Materie einerseits und der Kontinuität der elektromagnetischen Strahlung andererseits bereiten. Sein unablässiges Ringen mit diesem Spannungsverhältnis ist symptomatisch für den Umbruch im frühen 20. Jahrhundert.

## MIT DER »VORURTEILSLOSIGKEIT DES GENIES«

Planck gilt deshalb als Vordenker der Quantentheorie, weil er als erster Forscher ein Quantenkonzept in die Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie einführte: eine Stückelung der Energie in winzige Pakete. Seiner Strahlungstheorie zufolge können diese Energieportionen nicht beliebig klein werden.

Am 15. November hebt ihn die deutsche Presse auf den Schild. »Der kontinuierliche Ablauf aller Vorgänge in der Natur, die Stetigkeit aller Naturerscheinungen, war ein Glaubenssatz, an dessen Wahrheit zu zweifeln niemand in den Sinn kam«, berichtet die *Vossische Zeitung*. Mit dieser geheiligten Vorstellung habe Max Planck gebrochen.<sup>16</sup>

Ausgangspunkt dafür seien seine Überlegungen zu Licht- und Wärmestrahlen gewesen. Mit der »Vorurteilslosigkeit des Genies« habe sich der Physiker von dem Gedanken frei gemacht, dass Strahlung in einem stetigen Fluss vor sich gehen müsse. Stattdessen werde immer nur eine bestimmte Menge von Energie ausgestrahlt, nicht aber jeder beliebig kleine und kleinste Bruchteil. Die Strahlung erfolge »quantenweise«.<sup>17</sup>

Am selben Tag eine Hymne im *Berliner Tageblatt*: Planck sei »eine der Zierden der Berliner Universität«. Seine Beschäftigung mit der Theorie der Strahlung habe ihn zunächst zur Entdeckung der nach ihm benannten Strahlungsformel geführt, deren anschließende Deutung die Entwicklung der Quantentheorie eingeleitet.<sup>18</sup>

Die Zeitungen können sich auf das Urteil aus Stockholm berufen. Soeben hat die Schwedische Akademie der Wissenschaften die Nobelpreisträger für die beiden zurückliegenden Jahre bekannt gegeben. Planck ist einer von ihnen.

Seine Briefe lassen erahnen, wie sehr ihn die Ehrung überrascht, die mit einem beachtlichen Preisgeld verbunden ist, ausbezahlt in Schwedischen Kronen, einer stabilen Währung. Planck denkt dabei sicherlich zuerst an seine Kinder: seinen Sohn Erwin, der im Krieg eine Verletzung erlitt und nun ins Reichswehrministerium wechselt, um »Staatsmann zu

werden«, seine Tochter Emma, frisch verheiratet und in Erwartung ihres ersten Kindes, und an den Jüngsten, Hermann, den einzigen Sohn aus zweiter Ehe, der an Kinderlähmung leidet und über dessen Schicksal kaum etwas bekannt ist.<sup>19</sup>

Für ihn selbst hat die Anerkennung vonseiten der Kollegen mehr Gewicht als das Preisgeld. Sein Erfolg sei zum großen Teil das Verdienst der zahlreichen Forscher, die es verstanden hätten, aus seinen Ideen »etwas Reales zu machen und sie aus luftiger Höhe in eine sichere, wenn auch noch nicht nach allen Richtungen geklärte und gefestigte Position zu bringen«, schreibt er dem niederländischen Physiker Hendrik Antoon Lorentz, einem der wenigen Forscher im Ausland, mit denen er auch in den Kriegsjahren im Austausch stand.<sup>20</sup> Planck gibt sich bescheiden. Allenfalls nimmt er für sich in Anspruch, das Fundament für ein gemeinschaftliches Werk gelegt zu haben. Und auch das erst nach einer langen Odyssee.

## **DIE ELEKTRISCHE SONNE**

Als sich Planck der Physik leuchtender Körper zuwandte, lagen Berlins nächtliche Straßen im warmen, behaglichen Schimmer der Gaslaternen. Nur an ausgewählten Orten wie dem Potsdamer Platz warfen elektrische Kohlebogenlampen ihr grelles Licht auf das Pflaster, auf Hauswände und bemalte Reklametafeln von Cafés, Bars und Restaurants. Solche Lampen waren als Erste dazu imstande, die Nacht zum Tage zu machen.

Ihre Leuchtkraft entsprang zwei Kohlestiften. Um zwischen diesen beiden Elektroden einen Lichtbogen zu zünden, wurden sie kurz zusammengeführt und dann wenige Millimeter voneinander getrennt. Von da an sorgte ein nur zu diesem Zweck erfundener Regler für einen gleichmäßigen Abstand der elektrisch aufgeheizten Kohlestifte, die bei Temperaturen von etwa 3000 Grad Celsius langsam abbrannten, dabei ein gleißendes Licht abstrahlten und irgendwann ausgewechselt werden mussten.

Im Licht der Bogenlampen verdampfte auch der letzte Rest der Dun-



kelheit. Sie beleuchteten weitläufige öffentliche Plätze oder Hafenanlagen, Fabrikhallen und große Werkstätten. Für gewöhnliche Innenräume waren die »elektrischen Sonnen« zu hell.

Als Alternative bot sich wiederum Kohle an: ein stromdurchflossener Kohlefaden in einer Glühbirne. Seit Emil Rathenau die Nutzungsrechte für das Patent der Edison-Glühlampe für Deutschland erworben hatte, fabrizierte die von ihm begründete »Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft« die einschraubbaren elektrischen Leuchtkerzen in Berlin. Das Lampengeschäft der AEG expandierte rasch. Ebenso rasch stellte sich heraus, dass Kohle nicht das beste Material für einen Glühfaden ist. Da ein Kohlefaden leicht durchbrennt, eignet er sich nur für niedrige Temperaturen. Während die Kohlebogenlampe eine zu hohe Leuchtkraft entfaltet, ist die der Kohlefadenlampe tendenziell zu gering.

Metalle haben eine höhere Schmelztemperatur und senden eine intensivere, weniger rötliche Strahlung aus. Schon in den 1890er-Jahren experimentierte man mit Metalldrähten aus Osmium, später aus Tantal und Wolfram, das erst bei 3400 Grad Celsius zu zerfließen beginnt. Doch auch solche Glühwendel verwandeln maximal vier oder fünf Prozent der Energie in sichtbares Licht. Der Rest geht als unsichtbare Strahlung verloren und erwärmt die Umgebung.

Das ist typisch für alle Quellen, die aufgrund ihrer Temperatur Licht aussenden. Die Sonne etwa emittiert nicht nur das Licht mit all den Farbanteilen, die im Regenbogen zutage treten. Darüber hinaus strahlt sie zum Beispiel kurzwelliges ultraviolettes Licht ab, vor dem wir unsere Haut besonders schützen müssen. Auf der anderen Seite ihres Strahlungsspektrums findet sich das langwellige Infrarotlicht, das wir ebenfalls nicht mit dem Auge wahrnehmen können. Es macht auch die behagliche Wärmestrahlung eines Kachelofens aus.

## »SCHWARZE KÖRPER«

Für eine Glühbirne, die allein zum Zweck der Beleuchtung eingeschaltet wird, sind UV- und Infrarotlicht schlichtweg Energieverluste. Um die Abstrahlung bei unterschiedlichen Temperaturen und Wellenlängen besser zu verstehen, um verschiedene Lichtquellen bewerten und miteinander vergleichen zu können, erfand man eine neue Art von Strahlungsquelle: den »schwarzen Körper«. Er lässt sich am besten durch einen Hohlraum mit einem kleinen Loch realisieren. Salopp gesprochen, ist der »schwarze Körper« ein idealisiertes Vogelhäuschen mit sehr kleiner Öffnung. Ein solches Vogelhaus wird in der Sonne nicht heißer und heißer. Bei gleichbleibender Erwärmung von außen stellt sich irgendwann ein thermisches Gleichgewicht ein.

Wie verhält es sich nun mit der Strahlung im Innern? Wie viel und welche Art von Wärmestrahlung ein Hohlraum durch die kleine Öffnung aussendet, hängt erstaunlicherweise allein von der Temperatur der Wände ab, nicht aber von deren materieller Beschaffenheit. Je höher die Temperatur, desto mehr Wärmestrahlung, die sich über die unterschiedlichsten Wellenlängen verteilt.

Planck wollte diese Temperaturabhängigkeit der Strahlung verstehen und in eine einzige universelle Formel fassen, woran sich vor ihm schon andere Forscher versucht hatten. So viele, dass Einstein später meinte: »Es wäre erhebend, wenn wir die Gehirnschubstange auf eine Waage legen könnten, die von den theoretischen Physikern auf dem Altar dieser universellen Funktion  $f$  hingeopfert wurde.« Auch die klassische Physik sei ihr schließlich zum Opfer gefallen. Allerdings erst, nachdem Planck als Einziger bei seinen Bemühungen Erfolg gehabt habe. »Jener ganze Komplex von Resultaten, theoretischen Vorstellungen und Problemstellungen, welcher heute dem Physiker auftaucht, wenn er das Wort ›Quanten‹ hört, welcher ihm das Dasein belebt und zugleich so schwer macht, ist aus jenen Arbeiten herausgewachsen.«<sup>21</sup>

Planck wusste die Nähe zur Physikalisch-Technischen Reichsanstalt für sich zu nutzen. Sie lag auf halbem Weg zwischen seiner Villa im Grune-

wald und der Berliner Universität. In der Reichsanstalt näherten sich Experimentatoren in den späten 1890er-Jahren dem Idealbild des »schwarzen Körpers« an. Ihre Modellapparaturen, halb Vogelhäuschen, halb Thermoskanne, bestanden aus den besten verfügbaren Materialien.

Die Entwürfe mussten dem jeweils untersuchten Temperaturbereich angepasst werden. Für Strahlungsversuche bei niedrigen Temperaturen eignete sich ein doppelwandiges Gefäß, dessen Innenwände mit Lampenruß oder Platinchlorid geschwärzt waren. Um einen solchen Hohlraum gleichmäßig von außen zu kühlen oder zu erwärmen, ließen die Forscher in den Raum zwischen den beiden Wänden flüssige Luft oder feste Kohlensäure, Eis oder Dampf ein.

Für Experimente bei höheren Temperaturen hatten sie zuerst einen Schamottofen vorgesehen, entschieden sich dann jedoch für eine elektrische Erwärmung und einen Heizmantel aus Platin. Im Innern dieser Umhüllung befand sich ein Rohr aus Porzellan, das man bei der königlichen Porzellanmanufaktur in Charlottenburg geordert hatte. Es war geschwärzt mit einer Mischung aus Chrom-, Nickel- und Kobaltoxyd und erlaubte Messungen der abgegebenen Wärmestrahlen bis zu 1500 Grad Celsius.<sup>22</sup>

## **DAS UNIVERSUM AUF EINER POSTKARTE**

Während Planck die Experimente an der Reichsanstalt aufmerksam verfolgte, überschlugen sich plötzlich die Ereignisse. Am ersten Sonntag im Oktober 1900 bekamen die Plancks Besuch von dem Physiker Heinrich Rubens und dessen Frau.<sup>23</sup> Der kräftig gebaute Rubens, ein ausgezeichnete Experimentator, arbeitete mit den Forschern der Reichsanstalt zusammen. Er selbst hatte Methoden ausgetüftelt, aus langwelliger Strahlung schmale Wellenlängenbereiche auszusondern.

An diesem Sonntag erfuhr Planck, dass die experimentellen Ergebnisse bei großen Wellenlängen und hohen Temperaturen die bisherigen Modellrechnungen nicht bestätigten. Die neuen Messwerte wichen deut-

lich davon ab. Rubens wies ihn auch auf einen neuen gesetzmäßigen Zusammenhang bei langwelliger Strahlung hin.<sup>24</sup> Ein britischer Physiker, der Baron Rayleigh, hatte im Juni desselben Jahres eine Arbeit dazu im *Philosophical Magazine* veröffentlicht.<sup>25</sup>

Wie passte all dies zusammen? Kaum war das Ehepaar Rubens gegangen, setzte sich Planck an den Schreibtisch. Nach seiner langjährigen Auseinandersetzung mit der Strahlungstheorie ging plötzlich alles ganz schnell. Quasi im Handstreich verband er altes und neues Wissen miteinander und schickte Rubens noch am selben Abend auf einer Postkarte die von ihm berechnete Strahlungsformel für sämtliche Wellenlängen und Temperaturen zu.<sup>26</sup> Keine drei Tage später teilte ihm Rubens mit, Plancks Formel passe vorzüglich zu den Messwerten, was in den Wochen darauf auch andere Experimentatoren bestätigten.

Wir verdanken diese Schilderung einem von Rubens' Doktoranden, der die »geradezu dramatische Schnelligkeit und Folgerichtigkeit« der Entwicklung bestaunte.<sup>27</sup> Mit wachsendem zeitlichen Abstand wird dieses Staunen größer und größer. Denn die über Nacht abgeleitete Formel lässt Schlüsse zu, die weit jenseits des damaligen Wissenshorizonts liegen – zum Beispiel über die Restwärme des Urknalls:

Etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall war das Universum deutlich abgekühlt. Auf einmal klarte es auf und verwandelte sich von einem undurchsichtigen Plasma, ähnlich dem Zustand einer Kerzenflamme, in ein durchsichtiges Gas. Die dabei frei gewordene Strahlung lässt sich bis heute als kosmische Hintergrundstrahlung erkennen und mit Satelliten präzise messen.