

## Zu lichtelektrischem Effekt und Wirkungsquantum: über Forscher, historische Fakten und Instrumente

Ulrich Arndt

I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen, Sommerfeldstr. 14, 52074 Aachen,  
Phys. Praktika, Univ.-Prof. Dr. H. Heinke  
ulrich.arndt@rwth-aachen.de

### Kurzfassung

Schülerinnen und Schüler in Physikkursen haben großes Interesse daran, wie die Forscherinnen und Forscher, denen die Lernenden im Unterricht begegnen, ihren Weg gegangen sind. Dies ist ein Versuch herauszufinden, ob das Thema auf ikonischer Ebene vermittelt werden kann. Vorgestellt wird die Entdeckung des lichtelektrischen Effekts (LE) durch H. Hertz (1887) sowie dessen Darstellung durch W. Hallwachs (1888). Es wird aufgezeigt, wie H. Rubens und F. Kurlbaum mit einem „electrically glowing absolutely black body“ und sensitiven Messwerkzeugen dessen Strahlung präzise analysierten (1900) und keine Übereinstimmung mit den damals konkurrierenden Theorien (Wien bzw. Rayleigh) fanden. Max Plancks „Strahlungsgesetz-Interpolation“ dieser Daten und sein Weg zu deren quantentheoretischer Begründung (1900) werden skizziert und durch Heisenbergs Schilderung der Entdeckung der Energie-Quantelung (Tondokument 1958) ergänzt. Die Arbeiten A. Einsteins zum LE (1905/1906) werden im Hinblick auf die Art der Wechselwirkung und der Bewertung durch Planck angesprochen.

### 1. Einleitung

Der Energie-Quantelung begegnen Lernende im SII-Physikunterricht beim Franck-Hertz-Versuch oder bei der  $h$ -Bestimmung aus dem lichtelektrischen Effekt. Bekanntlich hat Planck die Quantisierung der Energie 1900 auf ganz anderem Wege entdeckt: durch die theoretische Analyse von Wärmestrahlungsmessungen. Weil diese Analyse mit Schulmathematik nicht nachvollziehbar ist, soll deswegen auf ikonischer Ebene der Versuch unternommen werden, die Entdeckung des LE durch Heinrich Hertz zu schildern, sodann die Wärmestrahlungsmessungen von Rubens und Kurlbaum als Test bestehender theoretischer Ansätze unter neuem Blickwinkel vorzustellen, um aufzuzeigen, dass die erhaltenen Daten Planck als empirische Basis für seinen Quantisierungs-Ansatz dienen. Die Vereinigung von Hertz' und Plancks Entdeckungen in Einsteins Lichtquantenhypothese wird abschließend mit Plancks Einschätzung nachgezeichnet.

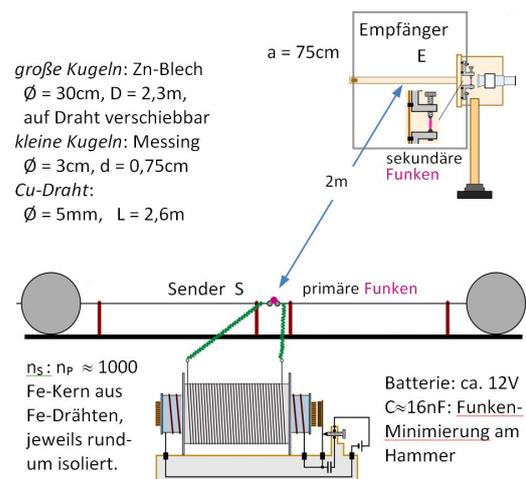
### 2. Zum lichtelektrischen Effekt

Heinrich Hertz erzeugte elektromagnetische Wellen mit Hilfe eines Sender-Dipols (Hertz 1887a),<sup>1</sup> der durch einen Funkeninduktor erregt wurde;<sup>2</sup> dadurch

<sup>1</sup>Hertz hat seine Karlsruher Versuchsanordnung fotografiert. Url: <https://mactory.zkm.de/wp-content/uploads/2015/04/> (Stand 5/2019)

Dort Hertz\_28010\_P\_Hertz\_0026\_UKW-Sender@2x.jpg

<sup>2</sup>Informative Abbildungen zum Ruhmkorff-Funkeninduktor in [36], S.5f., Theorie in [37]. Der Unterbrecher erzeugt in der Primärspule eine Spannung wechselnder Polarität: die Induktionsspitze beim Ausschalten einer Induktivität ist im Unterricht vom Glimmlampenversuch her



**Abb.1:** Hertz' Versuchsanordnung (1887) zum Nachweis elektromagnetischer Wellen. Beim Empfänger E kann die Drahtlückengröße eingestellt werden.

wurden in der Dipol-Mitte lichtstarke Funken erzeugt, (sog. „primäre Funken“). Die ausgesendeten Wellen wies Hertz ca. 2 m entfernt vom Sender mit einer Rahmenantenne nach, (Abb.1): in der Lücke zwischen den Drahtenden konnten „sekundäre Funken“ beobachtet werden.<sup>3</sup>

bekannt. Hier wurde die Variante mit einem Wagnerschen Hammer dargestellt, (Türklingel). Hertz verwendete einen schneller arbeitenden und belastbareren, speziellen Hg-Unterbrecher, dessen Funktionsweise deutlich komplizierter ist, (vgl. [6], S.39, Fig.8 und S.41, Fig.9).

<sup>3</sup>Zu H. Hertz und zum Hertz'schen Nachweis gibt es ein informatives Video, Bayerischer Rundfunk,  $\alpha$ -Centauri,

Um diese lichtschwachen Funken besser sehen zu können, positionierte Hertz lichtdichte Wände so um die Antenne, dass die sekundären Funken noch beobachtet werden konnten, (Hertz 1887b). Entgegen der Erwartung nahm deren Helligkeit ab: genau die Wand W störte, die sich zwischen Sender S und Empfänger E befand. Dies ist zunächst unverständlich, da die Wellenlänge der ausgesendeten elektromagnetischen Strahlung nach Hertz' Abschätzung - korrigiert von Poincaré (Poincaré 1890, Hertz 1892, S.288) - knapp 4m betrug, also wesentlich größer ist als die des Senderfunken-Lichts bei ca.  $10^{-7}$ m.

Die Funken-Entstehung in der Antenne wird immer dann begünstigt, wenn Licht der Sender-Funken auf die Drahtlücke des Empfängers fällt, (Hertz 1887a, S.443f.). Hertz suchte systematisch nach der Ursache dieses Effekts: da es vorrangig um die sekundäre Funkenentstehung ging, wurde der Empfänger E durch ein Funkenmikrometer F ersetzt, das auch an einen Funkeninduktor angeschlossen war: der Abstand der Mikrometerkugeln wurde so groß gewählt, dass gerade keine Funkenentladung mehr eintrat. Hertz änderte mit Sorgfalt und Ausdauer Parameter für Parameter der Anordnung,<sup>4</sup> um herauszufinden, was die Sekundärfunken wieder einsetzen ließ. Einige Abänderungen sollen hier genannt sein: das Kugel-Material der beiden Funkenstrecken; deren Abstand und gegenseitige Orientierung; das Material der Zwischenwand W wurde variiert: feste, flüssige und gasförmige Materialien kamen zum Einsatz. Die letzteren beiden befanden sich in Gehäusen aus Quarz bzw. hatten ein Quarzglasfenster, weil sich Quarz als besonders begünstigend für die Sekundärfunkenbildung gezeigt hatte. Sodann wurde der Empfänger bei eingesetzter lichtdichter Zwischenwand W mit anderen Lichtquellen bestrahlt: Sonnenlicht, Mg-Blitzlicht, das Licht eines Kohlebogens, und auch der bläuliche Teil einer Kerzenflamme ließen die Sekundärfunkenentladung wieder einsetzen. Dabei bemerkt Hertz insbesondere: „Eine Beschattung der Anode hat einen geringeren Einfluss, eine Beschattung der Kathode hebt den grössten Theil der Wirkung auf.“ (Hertz 1887c, S. 994).

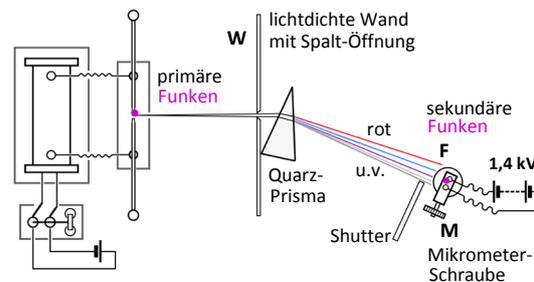
Url: <https://www.youtube.com/watch?v=8-mtuBreP0k> (Stand 8/2019, ab 14:45). Allerdings dürfte Hertz statt der Ringantenne eine quadratische Antenne mit 75cm Kantenlänge benutzt haben, (vgl. Deutsches Museum, Inv.-Nr. 40054 u. [9], S.84, Abb.4.6) und den Vortrag von W. Wiesbeck im KIT-Festakt „Heinrich Hertz - 125 Jahre Strahlen elektrischer Kraft“, Url: <https://www.youtube.com/watch?v=Uz9Lq6iSVXc> (Stand 5/2019)

<sup>4</sup>Genau diese Hartnäckigkeit nahmen sich zwei Jugendforscher-Gruppen am St.-Michael-Gymnasium Monschau zum Vorbild, als sie Untersuchungen zur Hertz'schen Theorie der Berührung fester elastischer Körper durchführten, (Stoßdauer, Kugelkette). Url: [http://www.mgm-monschau.de/data/media/downloads/KugelstossPendelkett-e-1\\_1402689257.pdf](http://www.mgm-monschau.de/data/media/downloads/KugelstossPendelkett-e-1_1402689257.pdf) (Stand 5/2019)

Sodann analysiert Hertz das Licht der Primärfunkenentladung mit Quarz-Prismen: nur der nicht sichtbare UV-Anteil lässt die Sekundärfunkenentladung wiedereinsetzen. Hertz fasst selbstkritisch zusammen:

„Nach den Resultaten unserer Versuche hat das ultraviolette Licht die Fähigkeit, die Schlagweite der Entladungen eines Inductoriums und verwandter Entladungen zu vergrößern. Die Verhältnisse, unter welchen es bei derartigen Entladungen seine Wirkung äussert, sind freilich recht complicirte, und es ist wünschenswerth, die Wirkung auch unter einfacheren Bedingungen, insbesondere unter Vermeidung des Inductoriums zu studiren. Bei dem Versuche, nach dieser Hinsicht Vortheile zu erlangen, bin ich auf Schwierigkeiten gestoßen.“ (Hertz 1887c, S. 1000).

Auch nach dieser Veröffentlichung führte Hertz diese Untersuchung fort, wie eine Anmerkung in seinen Gesammelten Werken zum vorangegangenen Zitat belegt:



**Abb.2:** Hertz' letzte Versuchsanordnung zum Nachweis des lichtelektrischen Effekts. - Hierbei hat Hertz als Spannungsquelle für die Sekundär-Entladung 1000 Pb-Akkumulatoren á 1,4V eingesetzt. Zur Funktionsweise vgl. die nachfolgende Anmerkung 11 von Hertz.

„Bedingungen zu finden, bei welchen der so wenig verstandene Vorgang der Funkenentladung durch eine einfachere ersetzt war (...) ist zuerst Herrn Hallwachs gelungen. (...) Die einfachste Wirkung, welche ich erzielte, war die, dass ich eine Glimmentladung einer Batterie von 1000 kleinen Planté-Akkumulatoren zwischen Messingkugeln in freier Luft durch das [ultraviolette] Licht zum Ueberschlagen brachte, bei einem Abstand der Kugeln, welchen sie ohne Hülfe des Lichtes nicht zu überspringen vermochte.“ (Hertz 1892, Anmerkung 11, S. 289)

Diesen Versuch<sup>5</sup> (Abb.2) zeigt Peter Lingemann (Münster) eindrucksvoll in einem Video.<sup>6</sup>

<sup>5</sup>Die Skizze ist in enger Anlehnung an Original-Abbildungen entstanden, (vgl. [17], Tafel VII, Fig.8 bis Fig.10), wobei Hertz' verbal beschriebene letzte Anordnung eingearbeitet wurde; (vgl. [18], S. 289, Anmerkung 11). Hertz verwendet nicht den großen Dipol, da er diese Untersuchung parallel zur Arbeit [15] ausführte.

<sup>6</sup>[http://www.uranmaschine.de/45310.Photoeffekt\\_nach\\_Heinrich\\_Hertz\\_1887/Fotoeffekt\\_Lichtelektrischer\\_Effekt\\_Film\\_120535.mp4](http://www.uranmaschine.de/45310.Photoeffekt_nach_Heinrich_Hertz_1887/Fotoeffekt_Lichtelektrischer_Effekt_Film_120535.mp4) (Stand 5/2019).

Wie schon von Hertz bemerkt, gelang es seinem Schüler Wilhelm Hallwachs, den lichtelektrischen Effekt ohne Rückgriff auf eine Funkenentladung darzustellen, (Hallwachs 1888). Der „Hallwachs-Effekt“ ist ein Standard-Schulversuch: Entladung einer gut geschmirgelten, elektrisch negativ aufgeladenen Zinkplatte bei Bestrahlen mit UV-reichem Licht (Hg-Dampflampe).<sup>7</sup> Die Herbeiführung einer vermeintlich schnelleren Entladung durch Lichtbündelung mit einer dicken Glas-Linse stoppt bekanntlich den Entladungsvorgang. Nach Wegnehmen des UV-Absorbers setzt die Entladung wieder ein.

### 3. Zur Schwarzkörperstrahlung um 1900

Exkurs: Um 1900 war ein Zentralthema der Physik die Erforschung der Schwarzkörperstrahlung. Wilhelm Wien hatte 1896 dazu eine erfolversprechende Gesetzmäßigkeit für die Strahlungsintensität  $E$  (sekundlich abgestrahlte Energie pro Volumen) aufgestellt (Wien 1896):

$$E_{\text{Wien}}(\nu; T) = \frac{B \cdot \nu^5}{c^5} \cdot \exp\left(-\frac{A \cdot \nu}{c \cdot T}\right). \quad \{1\}$$

Dem jungen Max Planck gelang es 1899, die verbliebenen beiden Parameter theoretisch zu bestimmen (Planck 1899):  $B=b/c^2$  und  $A=a \cdot c$ ; in heutiger Terminologie ist  $b \equiv h$  und  $a \equiv h/k$ .<sup>8</sup> Die beiden Größen  $a$  und  $b$  machte Planck bereits damals als Naturkonstanten aus. In metrologischer Absicht schreibt Planck:

„Dem gegenüber dürfte es nicht ohne Interesse sein zu bemerken, dass mit Zuhilfenahme der beiden (...) Constanten  $a$  und  $b$  die Möglichkeit gegeben ist, Einheiten für Länge, Masse, Zeit und Temperatur aufzustellen, welche unabhängig von speziellen Körpern oder Substanzen, ihre Bedeutung für alle Zeiten und für alle, auch ausserirdische und aussermenschliche Culturen nothwendig behalten und welche daher als »natürliche Maasseinheiten« bezeichnet werden können.“ (Planck 1899, S.480f.)

Mit den Konstanten  $a$  und  $b$ , der Lichtgeschwindigkeit und der Gravitationskonstanten definiert Planck ein Einheiten-System, das wir heute Planck-Skala nennen. Diese setzt in der modernen Physik Maßstäbe bei der Erklärung der Entstehung unseres Universums, (Lesch 2016).

Nun schreibt sich Wiens Gesetz so:

$$E_{\text{Wien}}(\nu; T) = \frac{h \cdot \nu^5}{c^3} \cdot \exp\left(-\frac{h \cdot \nu}{k \cdot T}\right). \quad \{1a\}$$

<sup>7</sup>Lehrmittel-Lieferanten bieten hierzu verzinkte Metallplatten an: das Grundmetall hat leider dieselbe Farbe wie die Verzinkung; dass diese durch Schmirgeln abgetragen ist, kann nur durch Ausbleiben des Hallwachs-Effekts bemerkt werden ...

<sup>8</sup>In [23] erscheint auf S.475 in Gl. (55) ein Faktor 2, der aufgrund von Polarisationsbetrachtungen in [27] auf S. 158, Gl. (235) nicht mehr auftaucht.

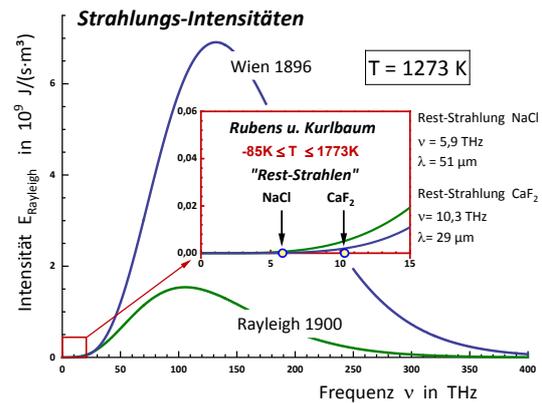


Abb.3: Strahlungs-Intensitäten nach Wien und Rayleigh sowie der von Rubens und Kurlbaum experimentell analysierte langwellige Bereich.

In England schlug Rayleigh im Juni 1900 von Seiten der kinetischen Gastheorie her einen anderen theoretischen Ansatz vor, (Rayleigh 1900, Gl. (6)<sup>9</sup>):

$$E_{\text{Rayleigh}}(\nu; T) = \frac{k \cdot \nu^4}{c^3} \cdot T \cdot \exp\left(-\frac{h \cdot \nu}{k \cdot T}\right). \quad \{2\}$$

Für große Wellenlängen (>30µm) bzw. kleine Frequenzen (<10Thz) sind die Ansätze von Wien und Rayleigh nahezu ununterscheidbar. Die Berliner Experimentalphysiker Heinrich Rubens und Ferdinand Kurlbaum hatten sich vorgenommen, durch Verwendung extrem langwelliger Strahlung Klarheit zu schaffen, (Abb.3).

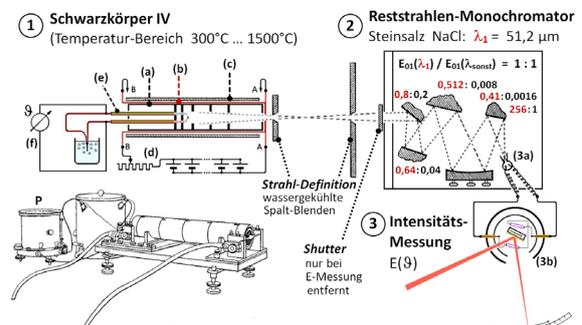


Abb.4: Dreiteiliger Experimental-Aufbau von Rubens und Kurlbaum. Die Übernahme von Abbildungen aus [22], S.833, Fig.2 sowie [34], S.655, Fig.1 geschah mit frdl. Genehmigung des Verlages Wiley-VCH, Hamburg (Rechts-Nachf. Verlag J.A. Barth, Leipzig)

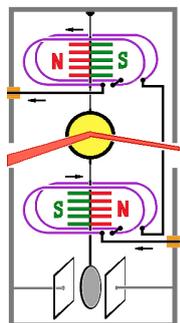
Dazu wurden für den untersuchten Temperaturbereich von -188°C bis 1500°C insgesamt sechs verschiedene Schwarzkörper (SK) verwendet. Abb.4 zeigt den Versuchsaufbau mit SK IV, (Lummer & Kurlbaum 1898 u. 1901). Die SK-Anordnung (Querschnitt links oben) besteht (a) aus einem innen geschwärzten Porzellan-Zylinder<sup>10</sup> mit mehreren Kammern, (b) umgeben von einem dünnen Pt- Zylinder,

<sup>9</sup> Konstanten  $c_1 = ck$  und  $c_2 = hck^{-1}$  in Gl. (6) eingesetzt.

<sup>10</sup>Genauer: einem Rohr mit schwer schmelzbarer Masse, hergestellt in der Königlichen Porzellan-Manufaktur Berlin, vgl. [21], S.109 und [22], S.831.

(elektrisch geheizt, 40cm lang,  $\varnothing = 4\text{cm}$ , mit Dicke 0,01mm), (c) dazu koaxialen Wärmedämmungs-Zylindern, (d) mit einer leistungsstarken Stromversorgung für den Pt-Zylinder, (e) einem Thermo-Element<sup>11</sup> (Pt/Pt-Rh) als Temperatur-Sensor mit der rechten Lötstelle innerhalb der primären Heizkammer und dem linken Lötspunkt in einem Eiswasserbad; (f) das Element speist ein empfindliches, temperatur-kalibriertes Drehspulinstrument als Pyrometer P mit Strom. Zwei wassergekühlte Blenden definieren die Richtung der Wärmestrahlung. Die Strahlung wird mit der „Reststrahl-Methode“ monochromatisiert. Nach Braunbek wird dabei von Kristallen diejenige Strahlung bevorzugt (bei NaCl im Verhältnis 4:1) reflektiert, deren Frequenz mit einer Eigenfrequenz des Kristallgitters übereinstimmt. Wird also ein Strahlungsgemisch sukzessive von gleichartigen polierten Kristalloberflächen reflektiert, (s. Abb.4), so resultiert daraus als „Reststrahlung“ im Wesentlichen nur diejenige mit der angeregten Eigenfrequenz, (Braunbek 1971). Die Wellenlänge der ausgewählten Strahlung wurde mit einem Drahtgitter (Du Bois & Rubens 1893) durch Beugung (Rubens & Aschkinass 1898) zu  $51,2\ \mu\text{m}$  bestimmt. Für NaCl ist  $28^\circ$  der optimale Einfallswinkel, (Czerny 1923). Die zu untersuchende Strahlung verliert durch die Monochromatisierung deutlich an Intensität, (Abb.4).

Rubens konstruierte daher als Sensor eine hochempfindliche Thermosäule mit Horntrichter: Abb. 4, Detail (3a), (Rubens 1898, Fig.1-3, S. 65f.). Der dort generierte Strom wurde mit einem empfindlichen Panzergalvanometer (Abb.5) gemessen, das mit seiner Eisen-Ummantelung die vom Strom in den Berliner Straßenbahnschienen herrührenden Magnetfelder vom sensitiven Teil der Apparatur abschirmt, (Du Bois & Rubens 1900). An einem dünnen Faden sind zwei Gruppen von Permanentmagnet-Stäbchen fixiert, die jeweils entgegengesetzte Polarität haben, damit das Erdmagnetfeld ohne Wirkung bleibt.



Der in der Thermosäule generierte Strom fließt so durch zwei Spulenpaare, dass die Magnetgruppen sich gleichsinnig drehen; die Drehung wird per Lichtzeiger auf einer Skala abgelesen, (rechts unten in Abb.4). Hieraus kann dann die Strahlungs-Intensität  $E$  bestimmt werden.

Um die Ergebnisse von Rubens und Kurlbaum in ein Intensitäts-

**Abb.5:** Panzer-Galvanometer, innerer Teil. Thermostrom und Lichtzeiger-Auslenkung sind proportional.

Temperatur-Diagramm einordnen zu können, haben wir zu beachten, dass die Forscher bei konstanter

<sup>11</sup>Im SI-Unterricht können die Lernenden mittels eines Thermo-Elektromagnets (Hubkraft 50N) mit der Wirkungsweise eines Thermo-Elements vertraut gemacht worden sein, vgl. [2], S.91, Fig.8; Leybold-Didactic 55711.

Frequenz und variabler Temperatur gemessen haben. Den Wechsel zu dieser anderen Sichtweise auf das Intensitäts-Gebirge  $E(\nu;T)$  zeigt Abb. 6, bereits unter Einbeziehung von Plancks Intensitäts-Gleichung von 1900:

$$E_{\text{Planck}}(\nu; T) = \frac{h \cdot \nu^5}{c^3} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h \cdot \nu}{k \cdot T}\right) - 1} \quad \{3\}$$

Kurlbaum berichtet über die gemeinsam mit Rubens angestellten Versuche am 19.10.1900 in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. In den Verhandlungen steht dazu nur eine Notiz. Die Daten finden sich erstmals in den Sitzungsberichten der Berliner Akademie, (Rubens & Kurlbaum 1900). 1901 werden sowohl die Messwerte und die Ansätze von Wien und Rayleigh<sup>12</sup> als auch der aktuelle Ansatz Plancks aus Gl. {3} alle in einem Diagramm dargestellt: Abb.7 oben, (Rubens & Kurlbaum 1901a/b).

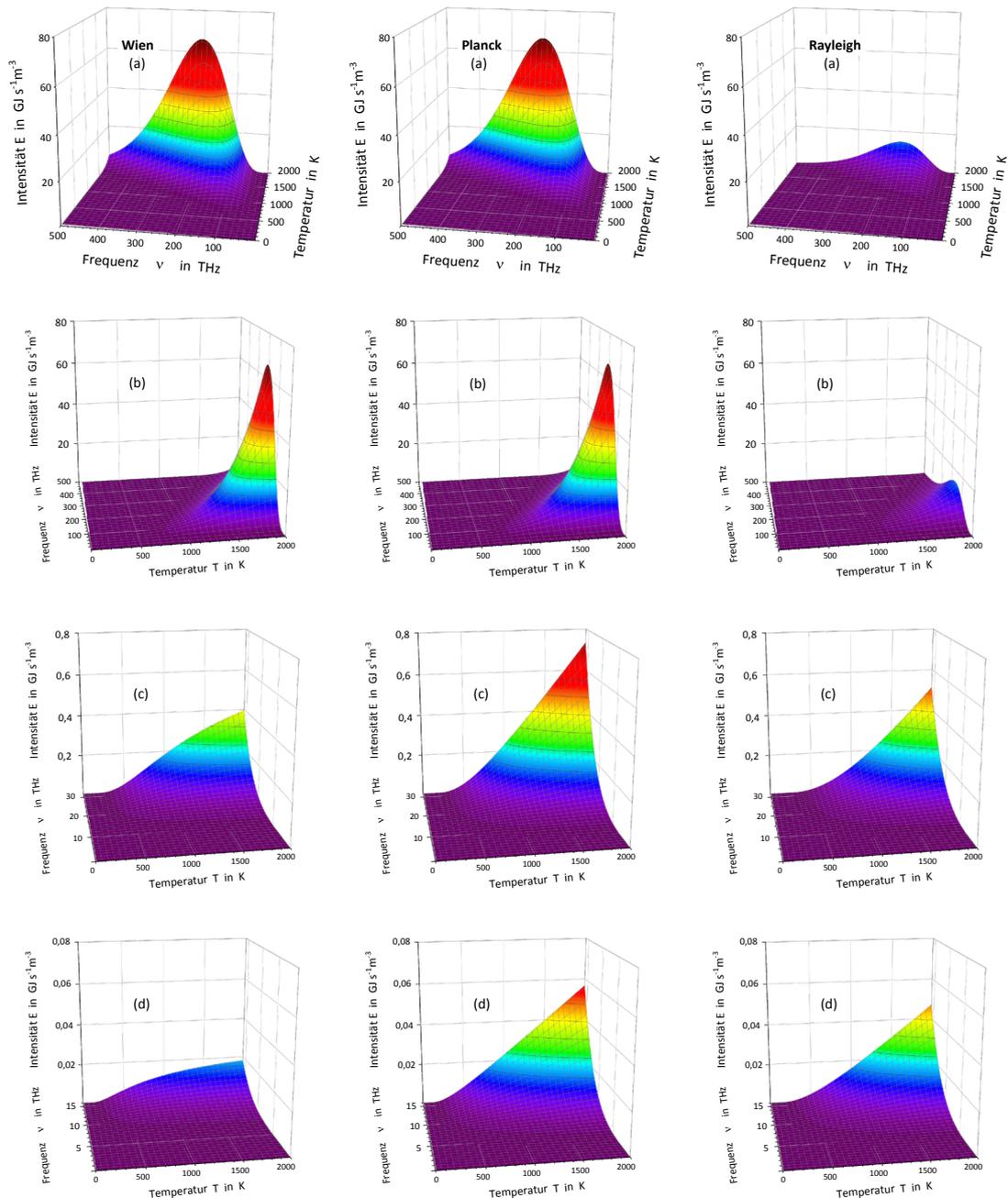
Bei der unterschiedlichen mathematischen Struktur der Ansätze gelang dies dadurch, dass neben dem Fixpunkt bei Zimmertemperatur mit verschwindender Lichtzeiger-Auslenkung ein zweiter bei  $1000^\circ\text{C}$  und 120mm durch Multiplikation mit entsprechenden Faktoren konstruiert wurde, wodurch die Graphen verzerrt werden. Um hieraus eine unverzerrte Darstellung zu erhalten, wurde wie folgt vorgegangen. Es wird vorausgesetzt, dass der Planck-Graph korrekt eingezeichnet ist, (Abb.7 oben, rot). Für 18 Temperaturen  $T_i = \vartheta_i + 273$  wurden dort die  $x_i$ -Werte mit einem Datenanalyse-Programm (achsenkonforme Implementation) abgegriffen. Für die Steinsalz-Reststrahlung ( $\nu_{\text{NaCl}} = 5,9\ \text{THz}$ ) können die entsprechenden Werte  $E_{i\text{Planck}}(\nu_{\text{NaCl}}; T_i)$  ermittelt werden; dies führt auf eine nahezu lineare Beziehung  $E(x)$ . Entsprechend wurden die Messwerte  $x_{\text{RK}}(\vartheta)$  von Rubens und Kurlbaum in ein  $E(T)$ -Diagramm übertragen: Abb.7 unten. Die nun erscheinende extreme Abweichung des Wienschen Ansatzes wird aufgrund der Metamorphose von Abb.6 verständlich, allerdings auch Rayleighs Kritik am Wienschen Ansatz, der für  $T \rightarrow \infty$  nicht divergiert sondern gegen den endlichen Wert  $h\nu^3 c^{-3}$  strebt. Dieser Wert ist doppelt so groß wie der Abstand zwischen den Graphen von Plancks bzw. Rayleighs Ansatz.

#### 4. Zu Plancks Analyse der Wärmestrahlung

Planck hat in den Jahren 1897-1899 intensiv am Thema „Irreversible Strahlungsvorgänge“ gearbeitet, wie in den Sitzungsberichten der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin auf über 100 Seiten zu lesen ist, (vgl. Planck 1906, S.221f.). Diese Phase der Suche nach der richtigen Strahlungsgleichung beschreibt Planck in seinem Nobelvortrag mit den Worten:

„Der erste Versuch zu einer Bewältigung mißlang.“ (Planck 1920, S.123)

<sup>12</sup>Für einen Hinweis hierzu danke ich Herrn Dr. O. Passon (Bergische Universität Wuppertal).



**Abb.6:** Strahlungs-Intensität  $E$  für verschiedene Frequenz-Bereiche im Temperatur-Intervall  $0 \dots 2000\text{K}$   
 (A) nach Wien, (B) nach Planck (C) nach Rayleigh  
 aus Frequenz-Sicht

- (a)  $\nu = 0 \dots 500$  THz, entsprechend  $\lambda \geq 0,6\mu\text{m}$   
 aus Temperatur-Sicht, entsprechend Rubens & Kurlbaum  
 (b)  $\nu = 0 \dots 500$  THz,  
 (c)  $\nu = 0 \dots 30$  THz, entsprechend  $\lambda \geq 10,0\mu\text{m}$   
 (d)  $\nu = 0 \dots 16$  THz, entsprechend  $\lambda \geq 18,8\mu\text{m}$

Für kleine Frequenzen (d) bzw. große Wellenlängen fittet der Rayleigh-Ansatz die quantentheoretisch richtige Beziehung Plancks besser als der Ansatz von Wien.

In den letzten drei Monaten des Jahres 1900 kam es zu einer dramatisch schnellen Entwicklung: bei einem Besuch Rubens' bei Planck am 7.10.1900 brachte Rubens die Tabelle seiner Messungen mit. (Heisenberg 1958, S.8). Noch an diesem Sonntag-Abend teilte Planck Rubens seine Gleichung {3} „auf einer Postkarte mit, die dieser am nächsten Morgen erhielt. Ein oder zwei Tage später darauf ging Rubens wieder zu Planck und konnte ihm die Nachricht bringen, daß die neue Formel vorzüglich mit seinen Beobachtungen stimme. Am Freitag der folgenden Woche, dem 19. Oktober, berichtete Kurlbaum in der Sitzung der Physikalischen Gesellschaft über Rubens' und seine Strahlungsmessungen, und im Anschluß daran teilte Planck seine Formel mit und zeigte ihre Übereinstimmung mit den Beobachtungen an einigen Zahlenbeispielen.“ (Hettner 1922, S.1036 u. Planck 1900a).

Aber nun begann, wie Heisenberg berichtet, für Planck erst die eigentliche Arbeit, (Heisenberg 1958, S.9). Planck schreibt dazu:

„Aber selbst wenn die Strahlungsformel sich als absolut genau bewähren sollte, so würde sie, lediglich in der Bedeutung einer glücklich erratenen Interpolationsformel, doch nur einen recht beschränkten Wert besitzen. Daher war ich von dem Tage ihrer Aufstellung an mit der Aufgabe beschäftigt, ihr einen wirklichen Sinn zu verschaffen (...).

(Planck 1920, S.102).

Dazu war es nötig, „in der Reihe der Schlussfolgerungen, welche zum Wien'schen Energieverteilungsgesetz führten, dasjenige Glied ausfindig zu machen, welches einer Abänderung fähig ist; sodann aber wird es sich darum handeln, dieses Glied aus der Reihe zu entfernen und einen geeigneten Ersatz dafür zu schaffen.“ (Planck 1901, S.553).

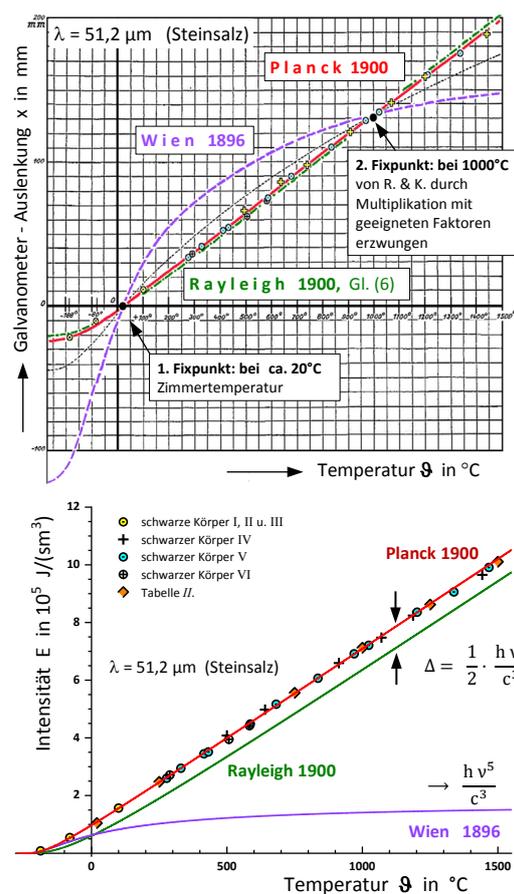
Es folgte eine intensive Analyse Plancks, „bis sich nach einigen Wochen der angestrengtesten Arbeit meines Lebens das Dunkel lichtete (...).“ (Planck 1920, S.102).

So sagt Planck am 14. Dezember 1900 in der Sitzung der Physikalischen Gesellschaft: „Indessen liegt mir heute (...) vielmehr daran, Ihnen den eigentlichen Kernpunkt der ganzen Theorie möglichst übersichtlich darzulegen (...). Wir betrachten aber - und dies ist der wesentlichste Punkt der ganzen Berechnung - [die Energie]  $E$  als zusammengesetzt aus einer ganz bestimmten Anzahl endlicher gleicher Teile und bedienen uns dazu der Naturkonstanten  $h = 6,55 \cdot 10^{-27}$  [erg  $\times$  sec]. Diese Constante mit der gemeinsamen Schwingungszahl  $\nu$  der Resonatoren multiplicirt ergibt das Energieelement  $\varepsilon$  in erg, und durch Division von  $E$  durch  $\varepsilon$  erhalten wir die Anzahl  $P$  der Energieelemente, (...).“

(Planck 1900b, S. 238f.) Kurz:

$$E = P \cdot \varepsilon, \quad \text{mit } \varepsilon = h \cdot \nu \quad \text{und } P \in \mathbb{N}. \quad \{4\}$$

Plancks Entdeckung der Quantisierung der (vgl. Planck 1901, S. 556, Gl. (4) u. S. 561 Mitte) kommentiert Heisenberg so: „Diese Arbeit hat Planck mehr als



**Abb.7:** Zum Messergebnis von Rubens & Kurlbaum oben: ergänzte Original-Skizze ([34], S. 660, Fig.8; Tabelle II, S. 664, unten: Intensitäts-Darstellung; die Umrechnung  $x \rightarrow E$  erfolgte m.H. der Planckschen Intensitäts-Gleichung.

ein halbes Jahrzehnt beschäftigt. Ich erwähne diese Zeitspanne, weil es oft in den populären Schriften so aussieht, als würde eine große Entdeckung sozusagen über Nacht gemacht; als komme dem Forscher ein glücklicher Einfall und damit wäre das Problem gelöst. Fast immer aber steht hinter diesem glücklichen Einfall eine lange Forschungsarbeit, oft die angestrengteste Arbeit von vielen Jahren.“ (Heisenberg 1958, S.8).

Zu Plancks privatem Schicksal eine Bemerkung von Erwin Schrödinger:

„Erfolg, Ehren, Anerkennung, innere Befriedigung im Bewusstsein größter Leistung - und doch vom bittersten Unglück verfolgt sein ganzes Leben lang, immer ärger, immer ärger, genau wie im Buch Hiob.“ (Hermann 2000) Plancks erste Frau Marie verstarb 1909; alle vier Kinder aus dieser Ehe verstarben früh: Sohn Karl fiel 1916 vor Verdun, Tochter Grete verstarb 1917 bei der Geburt ihres ersten Kindes, ebenso im Kindbett 1919 Tochter Emma, Januar 1945 wird Sohn Erwin im Zusammenhang mit einem Hitler-Attentat hingerichtet. (Hermann 1973, S.135).

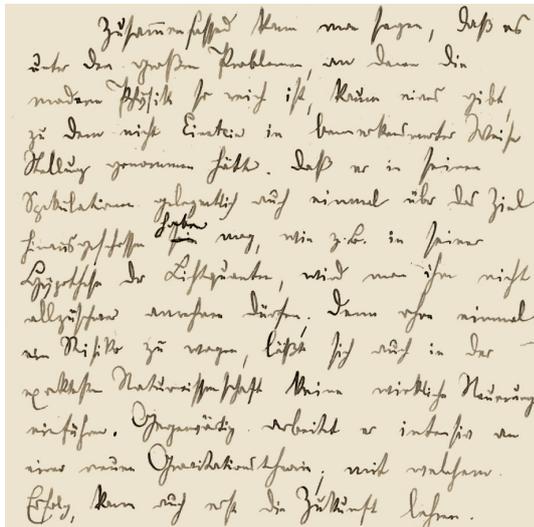
## 5. Zu Einsteins Lichtquantenhypothese

Die Arbeit Einsteins zum Photoeffekt in 1905 ist allgemein bekannt; daher soll hier nur auf Folgendes hingewiesen werden: Einstein schließt darin ausdrücklich nicht aus, dass Photonen ihre Energie auch teilweise an die Elektronen abgeben können. (Einstein 1905, S.145). - Die Einleitung des Artikels (S.132f.) und der Beginn von §8 („Über die Erregung von Kathodenstrahlen durch Belichtung fester Körper“, S.145 f.) vor Aufstellen der lichtelektrischen Einstein-Gleichung

$$P \varepsilon = \frac{R}{N} \beta \cdot v - P \quad \{5\}$$

sind meiner Ansicht nach als Beispiel dafür geeignet, wie im Unterricht Schülerinnen und Schülern durch die Lektüre von Originalliteratur bedeutende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler durch ihr Werk näher gebracht werden können.<sup>13</sup>

In seiner Arbeit von 1906 schreibt Einstein, Planck habe die Lichtquantenhypothese bereits implizit verwendet, (Einstein 1906, S.199).



**Abb.8:** Aus dem Wahlvorschlag Plancks zu Einsteins Aufnahme in die Berliner Akademie vom 12. Juni 1913. (Mit frdl. Genehmigung aus dem Archiv der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften BBAW, PAW (1812-1945), II-III-36, Bl. 37r)

Bei Planck rief diese Ansicht Einsteins damals Verwunderung hervor, wie in dem nur handschriftlich vorliegenden Original seines Wahlvorschlags für Einsteins Aufnahme in die Berliner Akademie aus 1915 zu lesen ist. Da der Text oft verkürzt zitiert wird, hier der typographische Text von Abb.8: „Zusammenfassend kann man sagen, daß es unter den großen Problemen, an denen die moderne Physik so reich ist, kaum eines gibt, zu dem nicht Einstein in bemerkenswerter Weise Stellung genommen hätte. Daß er in seinen Spekulationen gelegent-

<sup>13</sup> Den Sprachduktus vor mehr als hundert Jahren wird die Lehrkraft kommentieren, ebenso die ungeübte Gleichungs-Syntax.

lich auch einmal über das Ziel hinausgeschossen haben mag, wie z.B. in seiner Hypothese der Lichtquanten, wird man ihm nicht allzusehr anrechnen dürfen; denn ohne einmal ein Risiko zu wagen, läßt sich auch in der exaktesten Naturwissenschaft keine wirkliche Neuerung einführen. Gegenwärtig arbeitet er intensiv an einer neuen Gravitationstheorie; mit welchem Erfolg kann auch erst die Zukunft lehren.“

## 6. Literatur

- [1] Braunbek, W.(1971): Reststrahlmethode. In: Franke, H., Hrsg.(1971): dtv-Lexikon der Physik, Bd. 7, Stuttgart 1971, S.316
- [2] Cortel, A. (2007): Thermoelectric generators. In: Physics Education 42, Nr.1, 88-92. <https://iopscience.iop.org/issue/0031-9120/42/1>
- [3] Czerny, M. (1923): Über eine neue Form der Rubensschen Reststrahlenmethode. In: Zeitschrift für Physik 16, Nr.1, 321-331
- [4] Du Bois, H.; Rubens, H. (1893): Ueber Polarisation von Wärmestrahlen durch Drahtgitter. In: Naturwissenschaftliche Rundschau 8, Nr.36, S.454, Fig.1. [http://www.digizeitschriften.de/download/PPN385489110\\_0008/PPN385489110\\_0008\\_\\_LOG\\_0715.pdf](http://www.digizeitschriften.de/download/PPN385489110_0008/PPN385489110_0008__LOG_0715.pdf) (Stand 5/2019)
- [5] Du Bois, H.; Rubens, H. (1900): Panzergalvanometer. In: Zeitschrift für Instrumentenkunde 20, Nr.3, 65-78. <https://ia902706.us.archive.org/10/items/zeitschriftfrin06gergoog/zeitschriftfrin06gergoog.pdf> (Stand 5/2019)
- [6] Du Moncel, Th. (1867): Notice sur L'Appareil D'Induction Électrique de Ruhmkorff, Paris 1867, 5. Auflage
- [7] Einstein, A. (1905): Über einen die Erzeugung und Verwandlung betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. In: Annalen der Physik 322, Nr.6, 132-148. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.19053220607> (Stand 5/2019)
- [8] Einstein, A. (1906): Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption. In: Annalen der Physik 325, Nr.6, 199-206. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.19053220607> (Stand 5/2019)
- [9] Gollwitzer, J. (2007): Die Anfänge der Funktechnologie. In: Wolfschmidt, G. (Hrsg.): Von Hertz zum Handy. Entwicklung der Kommunikation (= Nuncius Hamburgensis - Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften, Band 6), 77-124, Norderstedt 2007
- [10] Hallwachs, W. (1888): Ueber den Einfluss des Lichtes auf electrostatisch geladene Körper. In: Annalen der Physik 269, Nr.2, 301-312. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.18882690206> (Stand 5/2019)
- [11] Heisenberg, W. (1958): Festrede zum 100. Geburtstag von Max Planck, In: Stimmen aus

- dem Maxgymnasium 6, Sept. 1958, 6-17; wiederabgedruckt in: Heisenberg, W.: Gesammelte Werke Bd. IV, München u. Zürich 1986, 99-110. Ein *Tondokument* (Auszug aus der Rede) ist unter den *Zusatzmaterialien* zu finden: Heisenberg-Audio München 1958. Vgl. hierzu auch [12], S.31 ff.
- [12] Hermann, A. (1969): Frühgeschichte der Quantentheorie. 1899-1913, Mosbach in Baden 1969
- [13] Hermann, A. (1973): Max Planck, Reinbek bei Hamburg 1973
- [14] Hermann, A. (2000): „Ich dachte mir nicht viel dabei“. Die wichtigste Gedankenschöpfung des 20. Jahrhunderts: Wie Max Planck auf die Idee der Quantentheorie kam. In: Süddeutsche Zeitung, Sa. 9.12.2000, SZ am Wochenende, Seite ROM1
- [15] Hertz, H. (1887a): Ueber sehr schnelle elektrische Schwingungen. In: Annalen der Physik und Chemie 267, Nr.7, 421-448 u. Tafel III, Fig.23-29. Url: ohne Tafel III: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.18872670707>; Tafel III im *Zusatzmaterial*. Wiederabgedruckt in [18], S. 32-58, dort Figuren in Text integriert.
- [16] Hertz, H.: (1887b): Über einen Einfluss des ultravioletten Lichts auf die elektrische Entladung. In: Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin Jahrgang 1887, 2. Halbband, 487-490, Url: <http://bibliothek.bbaw.de/bibliothek-digital/digitalequellen/schriften/anzeige/index.html?band=10-sitz/1887-2&seite:int=46> und ff. (Stand 5/2019)
- [17] Hertz, H. (1887c): Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung. In: Annalen der Physik und Chemie 267, Nr.8, 983-1000 u. Tafel VII, Fig. 8-11. Url ohne Tafel VII: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.18872670827>; Tafel VII im *Zusatzmaterial*. Wiederabgedruckt in [18], S.69-86, dort Figuren in Text integriert.
- [18] Hertz, H. (1892): Gesammelte Werke, Bd.II, Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft, Leipzig 1892. Url: [https://de.wikisource.org/wiki/Elektrische\\_Kraft\\_Hertz:001](https://de.wikisource.org/wiki/Elektrische_Kraft_Hertz:001) u. ff.
- [19] Hettner, G. (1922): Die Bedeutung von Rubens Arbeiten für die Plancksche Strahlungsformel. In: Die Naturwissenschaften 10, Nr.48, 1033-1040. Url: <https://www.digizeitschriften.de/dms/img/?PID=GDZPPN001131281> u. ff. (Stand 5/2019)
- [20] Lesch, H. (2016): Was ist die Planck-Welt? In: alpha-Centauri v. 17.03.2019, Erstaussstrahlung 10.07.2016, 14:45h, Online bis 08.11.2022. Url: <https://www.br.de/mediathek/video/alpha-centauri-17032019-was-ist-die-planck-welt-av:5b0b1ea3fcf6530017739210> (Stand 5/2019)
- [21] Lummer, O. u. Kurlbaum, F. (1898): Der elektrisch geblühte „absolut schwarze“ Körper und seine Temperaturmessung. In: Verhandlungen der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin 17, 106-111
- [22] Lummer, O. u. Kurlbaum, F. (1901): Der elektrisch geblühte „schwarze“ Körper. In: Annalen der Physik 310, Nr.8, 829-836. Url: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.19013100809> (Stand 5/2019)
- [23] Planck, M. (1899): Über irreversible Strahlungsvorgänge. Fünfte Mittheilung (Schluss). In: Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin 1899, 1. Halbband, 440-480. Url: <http://bibliothek.bbaw.de/bibliothek-digital/digitalequellen/schriften/anzeige/index.html?band=10-sitz/1899-1&seite:int=454> u. ff. (Stand 5/2019)
- [24] Planck, M. (1900a): Ueber eine Verbesserung der Wien'schen Spectralgleichung. In: Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2, 181 u. 202-204. Url: <https://ia802605.us.archive.org/11/items/verhandlungende01goog/verhandlungende01goog.pdf>
- [25] Planck, M. (1900b): Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum. In: Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2, 235 u. 237-245. Url: s. [24]
- [26] Planck, M. (1901): Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum. In: Annalen der Physik 309, Nr.3, 553-563. Url: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.19013090310>
- [27] Planck, M. (1906): Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung, Leipzig 1906. Url: <https://ia802609.us.archive.org/28/items/vorlesungenberd04plangoog/vorlesungenberd04plangoog.pdf> (Stand 5/2019)
- [28] Planck, M. (1920): Die Entstehung und bisherige Entwicklung der Quantentheorie. (Nobelvortrag, gehalten vor der Königlich Schwedischen Akademie der Wissenschaften zu Stockholm am 2. Juni 1920). In: Planck, M.: Wege zur physikalischen Erkenntnis, Leipzig 1944, 4.Aufl., 98-111. 5. erw. Aufl. unter dem Titel „Vorträge und Erinnerungen“ Stuttgart 1949. Url: [http://www.theo-physik.uni-kiel.de/~bonitz/D/vorles\\_17ws/planck\\_nobel.pdf](http://www.theo-physik.uni-kiel.de/~bonitz/D/vorles_17ws/planck_nobel.pdf) (Stand 5/2019)
- [29] Poincaré, H. (1890): Contribution à la theorie des expériences de M. Hertz. In: Comptes Rendus des Séances de L'Academie des Sciences 111, Nr.7, 322-326, Url: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3067d/f321> und ff. (Stand 5/2019)
- [30] Lord Rayleigh (1900): Remarks on the Law of Complete Radiation. In: The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 49, Nr. 301, 539-540. Url:

- <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14786440009463878> (Stand 5/2019)
- [31] Rubens, H. (1898): Ueber eine neue Thermo- säule. In: Zeitschrift für Instrumentenkunde 18, Nr.3, 65-69. Url: <https://ia800901.us.archive.org/8/items/zeitschriftfrin12gergoog/zeitschriftfrin12gergoog.pdf> (Stand 5/2019)
- [32] Rubens, H.; Aschkinass, E. (1898): Die Rest- strahlen von Steinsalz und Sylvin. In: Annalen der Physik und Chemie 301, Nr.6, 241-256. Url: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.18983010602> (Stand 5/2019)
- [33] Rubens, H.; Kurlbaum, F. (1900): Über die Emission langwelliger Wärmestrahlen durch den schwarzen Körper bei verschiedenen Tem- peraturen. In: Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin 41, 929-941. Url: [http://bibliothek.bbaw.de/bibliothek-digital/digitalequellen/schriften/anzeige/index\\_html?band=10-sitz/1900-2&seite:int=228](http://bibliothek.bbaw.de/bibliothek-digital/digitalequellen/schriften/anzeige/index_html?band=10-sitz/1900-2&seite:int=228) u. ff. (Stand 5/2019)
- [34] Rubens, H; Kurlbaum, F. (1901a): Anwendung der Methode der Reststrahlen zur Prüfung des Strahlungsgesetzes. In: Annalen der Physik 309, Nr.4, 649-666. Url: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.19013090402> (Stand 5/2019)
- [35] Rubens, H.; Kurlbaum, F. (1901b): On the Heat-Radiation of Long Wave-Length emitted by Black Bodies at different Temperatures. In: Astrophysical Journal 14, 335-348. Url: <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1901ApJ....14..335R/0000335.000.html> u. ff. (Stand 5/2019)
- [36] Secor, H.W. (1920): The How and Why of Radio Apparatus. A Treatise on the Principles Underlying the Operation of Wireless Transmitting and Receiving Instruments, New York 1920. Url: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015067209000;view=1up;seq=7> u. ff. (Stand 5/2019)
- [37] Valentiner, S. (1927): Auf der Induktion beruhende Apparate. In: Geiger, H. u. Scheel, K. (Hrsg.): Handbuch der Physik XVI, Apparate und Messmethoden für Elektrizität und Magnetismus, Berlin 1927, 87-120
- [38] Wien, W. (1896): Ueber die Energievertheilung im Emissionsspectrum eines schwarzen Kör- pers. In: Annalen der Physik 294, Nr.8, 662-669 Url: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.18962940803>

reiche Diskussionen. Frau Dipl.-Bibl. I. Clevn (Bibliothek der Phys. Institute) gehört mein Dank für das sorgfältige Einscannen von Tafeln aus schwer zugänglichen historischen Quellen (*Zusatzmaterial*). Dem Maximiliansgymnasium München, insb. Frau E. Rommel, bin ich für eine digitale Audio-Kopie der Heisenberg-Rede von 1958 zu Dank verpflichtet, Herrn M. Schwarzenau vom Stadtarchiv München für die entsprechende Kopie der Schulschrift „Stimmen aus dem Maxgymnasium“ und Frau Dr. V. Enke vom Archiv der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften für ein Photo des Manuskripts aus dem Wahlvor- schlag Planks zu Einstein. Ebenso danke ich der Familie Heisenberg und der Heisenberg-Gesell- schaft, insb. Herrn Prof. Dr. Kleinknecht, für die Genehmigung, einen Ausschnitt der Heisenberg- Tonaufzeichnung öffentlich zur Verfügung zu stellen, (*Zusatzmaterial*).

### Danksagung

Frau Univ.-Professor Dr. Heinke danke ich für die Ermöglichung dieser Arbeit, den Herren Dr. R. De- temple, Dr. Chr. Salinga und Dr. A. Voigt für hilf-