

Wie kam der Baum des Wissens zur Blüte? Der Aufstieg der physikalischen und theoretischen Chemie, mit besonderem Augenmerk auf Berlin und Leipzig

Bretislav Friedrich*

Chemiegeschichte · Physikalische Chemie ·
Quantenmechanik · Theoretische Chemie

Hans-Joachim Freund und Matthias
Scheffler zum 65. Geburtstag sowie
Gerhard Ertl zum 80. Geburtstag
gewidmet

Einleitung

Die physikalische und die theoretische Chemie entstanden mit der Absicht, die Chemie davor zu bewahren, zu einer Sammlung loser Fakten zu werden. Ihre Begründer, Jacobus van't Hoff, Wilhelm Ostwald und Svante Arrhenius, hatten sich Ende des 19. Jahrhunderts vorgenommen, das Allgemeine statt des Speziellen zu suchen, indem sie sich auf die Prozesse der Bildung chemischer Verbindungen – d.h. chemische Reaktionen – statt auf die Verbindungen selbst konzentrierten. Sie machten sich auch die Methoden der Physik, vor allem der Thermodynamik, zunutze, woraus die physikalische und die theoretische Chemie hervorgingen, die fortan Teil jeglicher künftigen Chemie sein sollten. Dass es der physikalischen und der theoretischen Chemie gelungen war, zur gemeinsamen Ausgangsbasis für die Chemie insgesamt zu werden, feierte Ostwald in seiner Proklamation „Die physikalische Chemie ist nicht nur ein Zweig, sondern sie ist die Blüte des Baumes [des Wissens]“. Der Duft dieser Blüte erwies sich als unwiderstehlich für zahlreiche Wissenschaftler, die die Chemie durch die Quantenrevolution und darüber hinaus führen sollten. Sie sollte sich erneut in der Prämisse erfüllen, dass der Weg zur allgemeinen Chemie über die Physik und Mathematik führt. In diesem Beitrag möchte ich die Entwicklung der physikalischen und der theoretischen Chemie chronologisch von ihrer Entstehung im 17. Jahrhundert bis zu ihren Höhepunkten in der Zeit nach der Quantenrevolution bis etwa 1940 darlegen. Besonderes Augenmerk soll dabei den Entwicklungen in Berlin und Leipzig gelten.

[*] Prof. Dr. B. Friedrich
Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft
Faradayweg 4–6, 14195 Berlin (Deutschland)
E-Mail: bretislav.friedrich@fhi-berlin.mpg.de
Homepage: <http://www.fhi-berlin.mpg.de/mp/friedrich>

Die Identifikationsnummer (ORCID) eines Autors ist unter <http://dx.doi.org/10.1002/ange.201609260> zu finden.

© 2016 Die Autoren. Veröffentlicht von Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Dieser Open Access Beitrag steht unter den Bedingungen der Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License, die eine Nutzung und Verbreitung in allen Medien gestattet, sofern der ursprüngliche Beitrag ordnungsgemäß zitiert und nicht für kommerzielle Zwecke genutzt wird und keine Änderungen und Anpassungen vorgenommen werden.

1. Der Beginn der physikalischen und der theoretischen Chemie (1650–1840)

Die Chemie als Wissenschaft entwickelte sich in einem langen Prozess, der nur von wenigen Umbrüchen begleitet war. Einer davon war vielleicht die Veröffentlichung von Robert Boyles Buch *The Sceptical Chymist* im Jahr 1661. Darin versuchte Boyle, die Chemie dem Griff der – wie er sie nannte – „vulgar chymists“ zu entreißen, die mit Kommerz und Medizin befasst waren, um sie als Werkzeug für das Studium des Wirkens der Natur zu installieren.^[1] Er schürte die Skepsis gegenüber den aristotelischen Elementen und den Grundstoffen von Paracelsus und wollte die Chemie auf die Ebene einer experimentellen Grundlagenwissenschaft heben. Seine Vision spiegelt sich in seiner Feststellung wider:^[2] „I look upon experimental truths as matters of great concernment [importance] to mankind.“ Von dieser Vision getrieben führte Boyle unzählige Experimente durch. Einige davon waren von allgemeinem, bleibendem Wert. Das inverse Verhältnis von Druck und Volumen eines Gases, bekannt als Boyles Gesetz, ist vielleicht das beste Beispiel dafür. Er entdeckte es mit einer „pneumatischen Maschine“, die sein Assistent Robert Hook gebaut hatte (Abbildung 1). Boyles Gesetz bedient sich der Physik und der Mathematik, den anderen Werkzeugen zum Verständnis der Natur, die sich nicht nur als miteinander verbunden, sondern sogar als voneinander und von der Chemie untrennbar erweisen sollten.

Die Bezeichnung physikalische Chemie taucht erstmals im Werk des russischen Universalgelehrten Michail Lomonossow auf. Seine Definition von 1752 lautet:^[3] „Physikalische Chemie ist die Wissenschaft, die auf der Basis physikalischer Begriffe und Experimente erklärt, was in komplexen Körpern durch chemische Vorgänge geschieht.“ Diese Definition mutet sehr modern an. Es dauerte jedoch noch mehr als hundert Jahre, bis sie weithin akzeptiert wurde.

Eine der ersten Großtaten der Chemie, die Auswirkungen auf alle Naturwissenschaften hatte, war die Etablierung des Massenerhaltungsgesetzes. Obwohl seine Urform bereits in den Arbeiten Lomonossows enthalten war, stellten es erst die präzisen Versuche von Antoine Lavoisier und seiner Frau Marie-Anne auf eine feste Grundlage (Abbildung 1 enthält



Abbildung 1. Zeitachse der physikalischen Chemie während ihrer Anfangszeit 1650–1840; siehe Text.

ein Doppelporträt der beiden^[*] von Jacques Louis David). Marie-Anne war nicht nur Wissenschaftlerin, sondern auch Malerin, worauf die Staffelei im Hintergrund anspielt. Ihre künstlerische Ausbildung hatte David selbst übernommen.

[*] Diese Darstellung von Madame Lavoisier von 1788, die Gefährtin ihres Mannes im Leben wie im Labor war, als Muse, deren Berührung Monsieur Lavoisiers Hand führt, konterkariert auf wunderbare Weise das Stereotyp der Frau als ungeeignet für die Wissenschaft.



Bretislav Friedrich (geb. 1953) ist Forschungsgruppenleiter am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft und Honorarprofessor an der Technischen Universität Berlin. Nach dem Studium an der Karls-Universität in Prag promovierte er 1981 an der Akademie der Wissenschaften der Tschechischen Republik in chemischer Physik. Seine experimentelle und theoretische Forschung in Göttingen (1986–1987), Harvard (1987–2003) und Berlin (seit 2003) galt und gilt den Wechselwirkungen von Molekülen mit und in Feldern. Daneben hat er schon lange ein Interesse an der Wissenschaftsgeschichte und hat vor allem über die frühe Quantenphysik geschrieben.

Der Glaube daran, dass Physik und Mathematik bei der Erklärung chemischer Phänomene helfen können, spiegelt sich in den Gedanken wider, die Lavoisier in seiner Korrespondenz mit Pierre-Simon Laplace (1782) formulierte:^[4] „Vielleicht wird [...] der Mathematiker [...] eines Tages in der Lage sein, das Ergebnis jeglicher chemischen Reaktion an seinem Pult zu errechnen, in der gleichen Weise [...], in der er die Bewegungen der Himmelskörper berechnet.“ Das klingt wie ein Manifest der theoretischen Chemie: rechnen, um vorherzusagen.

In seinem Meisterwerk von 1789, *Traité élémentaire de chimie* (illustriert von Marie-Anne), stellte Lavoisier eine Liste von 33 chemischen Elementen vor, die Licht sowie kalorische Substanz einschlossen, letzteres als Element der Wärme. Diese Liste bedeutete die endgültige Abkehr von der aristotelischen oder vorwissenschaftlichen Betrachtung der Materie.

Das Gesetz der konstanten Proportionen, entdeckt von Joseph Proust,^[5] übernahm Lavoisiers chemische Elemente und etablierte eine Vorstellung von chemischen Verbindungen als Kombination chemischer Elemente in einem bestimmten ganzzahligen Verhältnis. Als Joseph Gay-Lussac dann das Gesetz der konstanten Proportionen bei Gasen entdeckte, war er davon so verzaubert, dass er erklärte:^[6] „On n'est peut-être pas très éloigné de l'époque à laquelle on

pourra soumettre au calcul la plupart des phénomènes chimiques.“^[*]

Einen weiteren Schritt zur Aufklärung der Beschaffenheit von Materie verdanken wir John Dalton. In seinem Werk *A New System of Chemical Philosophy*, das 1808 erschien, setzte Dalton chemische Elemente mit Atomen gleich, die er als untrennbare und unzerstörbare Teilchen beschrieb, welche ihre Eigenschaften in chemischen Reaktionen beibehalten. Seine Beweisführung erhielt zusätzliches Gewicht durch die Behauptung, Atome besäßen ein bestimmtes Gewicht, und er folgerte dies aus dem Gesetz der multiplen Proportionen, der Stöchiometrie usw. Dalton war maßgeblich beeinflusst von Isaac Newton, der in seiner mechanischen Ableitung von Boyles Gesetz^[7] die Existenz kleiner Teilchen annahm (die über Abstoßungskräfte miteinander wechselwirken, die umgekehrt proportional zu ihrer gegenseitigen Entfernung sind), sie aber nicht Atome nannte. Möglicherweise wollte Newton das Stigma des Atheismus vermeiden, das damals noch immer den atomistischen Lehren von Epikur und Lukretius anhaftete.^[8] Dalton jedoch war furchtlos – und eloquent, wie seine Erklärung^[9] beweist: „We might as well attempt to introduce a new planet into the solar system, or to annihilate one already in existence, [than] to create or destroy a particle of [say] hydrogen.“

1818 stellte Jöns Jacob Berzelius eine Tabelle mit 49 chemischen Elementen vor, die nach ihrem Atomgewicht geordnet waren.^[10] Berzelius, der die Chemie um zahlreiche moderne Begriffe bereicherte und eine Reihe chemischer Elemente entdeckte, führte auch die Bezeichnung Isomer^[11] für eine Entdeckung seines Schülers Friedrich Wöhler (Silbercyanat) und von Justus von Liebig (Silberfulminat, ein Sprengstoff) ein. Wöhler und sein Freund Liebig führten eine systematische Untersuchung an hauptsächlich organischen Verbindungen im Rahmen der erwähnten chemischen Gesetze durch. Die Entdeckung der Isomerie untermauerte die Atomtheorie und ließ die Arbeiten von Alexander Butlerow, Emil Fischer und weiteren über die chemische Struktur vorausahnen.

2. Bedeutende konzeptionelle und institutionelle Entwicklungen in der physikalischen und der theoretischen Chemie (1845–1940)

Robert Boyles Ziel, die Chemie zu einer anerkannten Grundlagenwissenschaft zu entwickeln, wurde im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts von drei Chemikern aufgegriffen, die zu den Begründern der eigentlichen physikalischen Chemie wurden: Jacobus van't Hoff, Wilhelm Ostwald und Svante Arrhenius. Sie waren als Organiker ausgebildet, hegten aber eine Vorliebe für die Physik und Mathematik und teilten zwei zentrale Ansichten: Erstens, dass die Chemie reformbedürftig war, da sie sich in Richtung Taxonomie bewegte, einer losen Faktensammlung, die vor allem von Organikern gepflegt wurde. Zweitens, dass die Chemie, nach

dem Vorbild der Physik, die Sprache der Mathematik sprechen und das Allgemeine suchen statt das Besondere genießen sollte.^[*] Schlüsselmomente der darauf folgenden Bemühungen sind auf der Zeitachse in Abbildung 2 dargestellt.

Die Bezeichnung „physikalische Chemie“, die für diese Art künftiger Chemie verwendet werden konnte und wurde, existierte – wie wir gesehen haben – bereits, war aber nicht weit verbreitet. Einige Pioniere der physikalischen Chemie bevorzugten aber, zumindest vorübergehend, den Begriff „allgemeine“ oder „theoretische“ Chemie.

Wie aber sollte man nach dem Allgemeinen in der Chemie forschen? Für das erwähnte Trio, das schließlich zum Triumvirat wurde, hieß die Antwort: indem man sich auf die Prozesse der Entstehung chemischer Verbindungen, also auf chemische Reaktionen konzentrierte und nicht auf das Studium der Verbindungen selbst. Die bahnbrechende Arbeit über das Schlüsselmerkmal einer chemischen Reaktion, die Gleichgewichtskonstante, wurde von zwei Norwegern, Cato Guldborg und Peter Waage, in norwegischer Sprache veröffentlicht.^[12] Das von ihnen entdeckte Gesetz, als Massenwirkungsgesetz bekannt, blieb wohlverborgen, bis Ostwald ein Dutzend Jahre später darauf stieß.

Nach Guldborg und Waage war der Gleichgewichtszustand das Ergebnis eines Austarierens der Kräfte der Hin- und Rückreaktion, die von chemischen Affinitäten gelenkt werden. Ostwald untermauerte die Gültigkeit des Gesetzes mit eigenen Experimenten und machte es, zusammen mit der Idee der chemischen Affinität, zum Hauptgebiet seiner späteren Forschung.

Van't Hoff war einer der Ersten, der die Thermodynamik auf chemische Fragestellungen anwandte. Er entdeckte das Gesetz unabhängig von den anderen und leitete eine Formel ab, die die Abhängigkeit der Gleichgewichtskonstante von der Temperatur beschreibt.^[13] Seine Arbeiten zur Temperaturabhängigkeit inspirierten Arrhenius dazu, eine Beziehung zwischen der Reaktionsgeschwindigkeit und der Temperatur herzustellen und nebenbei das Schlüsselkonzept der Aktivierungsenergie vorzustellen.^[14] Zusätzlich wandte er die Gleichgewichtstheorie auf Elektrolyte an,^[15] was fortan eine der Hauptbeschäftigungen des Triumvirats wurde und ihnen den Namen „Ionisten“ eintrug.

Während der Entstehungsjahre der physikalischen Chemie erlebte das Konzept der chemischen Affinität eine Wandlung von den vagen Ursprüngen als „chemische Kraft“ bis zur Gleichsetzung mit dem Konzept der freien Energie nach Hermann von Helmholtz.^[16] Der Versuch der Ionisten, die Chemie als Wissenschaft weiterzuentwickeln, basierte größtenteils auf der Anwendung der thermodynamischen Methoden auf chemische Prozesse. Sie sprachen von „chemischer Dynamik“, ein Begriff, der später von der „Thermochemie“ abgelöst wurde. „Chemische Dynamik“ tauchte noch 1901 in der Begründung für die Vergabe des Nobel-Preises an van't Hoff auf, während es bei Nernst im Jahr 1920 bereits „Thermochemie“ war.

[*] „Wir sind vielleicht nicht weit von der Zeit entfernt, in der wir in der Lage sein werden, den Großteil der chemischen Phänomene berechnen zu können.“

[*] Justus von Liebig verglich in seinen *Chemischen Briefen* die Nützlichkeit der Chemie für das Verständnis der Natur mit der der Mathematik, deren Rolle er als unverzichtbar rühmte (erster Brief, 1841).



Abbildung 2. Zeitachse der konzeptionellen (links) und institutionellen (rechts) Entwicklungen 1845–1940, die für die physikalische und die theoretische Chemie bedeutsam waren; siehe Text.

Die parallel durchgeführten thermodynamischen Arbeiten Josiah Willard Gibbs, später als „Principia der Thermodynamik“ bezeichnet, wurden von den Chemikern (einschließlich der Ionisten) schlichtweg übersehen, obwohl sie alle Fragen beantworteten, die Chemiker umtrieben – von jenen nach den chemischen Kräften bis zu jenen nach der Natur der elektromotorischen Kraft.^[17] Der Grund dafür war: Gibbs arbeitete in völliger Isolation im ländlichen Connecticut und kommunizierte mit seinen europäischen Kollegen, hauptsächlich Physikern, durch die Übersendung von Nachdrucken seiner Artikel.^[18] Das musste er auch, da diese in den damals wie heute obskuren *Transactions of the Connecticut Academy* erschienen. 1892 übersetzte Ostwald Gibbs Hauptwerk ins Deutsche.^[19]

Zu den dankbarsten Empfängern der Nachdrucke von Gibbs gehörte James Clerk Maxwell. Gibbs' Arbeit faszinierte ihn derart, dass er aus Ton und Gips eine Gibbs-Energie-Fläche als Funktion des Volumens und der Entropie einer wasserähnlichen Substanz formte und die Isothermen und Isobaren darauf nachzog. Gibbs war sichtlich angetan, als der berühmte Maxwell ihm – einem „Chemieingenieur aus Connecticut“^[*] – eine Kopie der Skulptur schickte. Maxwell teilte mit Gibbs auch die Vorliebe für statistische Methoden in der Physik. Maxwells Geschwindigkeitsverteilung nahm

Gibbs' Arbeit auf diesem Gebiet voraus und inspirierte Ludwig Boltzmann. Über die Vorzüge statistischer Methoden sagte Gibbs:^[20] „We avoid the gravest difficulties when ... we pursue statistical inquiries as a branch of ... mechanics.“

Ich möchte nun kurz den institutionellen Rahmen der physikalischen Chemie umreißen. Die erste Forschungsuniversität – basierend auf dem Humboldtschen Prinzip der Einheit von Forschung und Lehre – war die Universität Berlin, gegründet 1810 und erst 1949, während der politischen Umwälzungen im geteilten Berlin, nach den Gebrüdern Humboldt benannt.^[21] Doch nicht an der Universität Berlin entstand das erste Forschungslabor der Chemie, sondern durch Justus von Liebig in den 1820er Jahren an der Universität Gießen.^[22] Er verband ein gut ausgestattetes Labor mit einem Kreis von Studenten, die aktive und kreative Forschung betrieben. Liebig's Schule lieferte ein Modell, das von den rund 30 Universitäten in Deutschland (einschließlich 10 technischer Hochschulen) übernommen wurde. Das führte dazu, dass die deutschen Universitäten Mitte des 19. Jahrhunderts weltweit eine Vorreiterrolle in der chemischen Forschung einnahmen.^{[23][*]}

[*] Gibbs war Professor für mathematische Physik an der Yale University.

[*] Nach Lit. [23] wurden von 1492 bis 1897 auf dem Gebiet der Chemie in Deutschland etwa 5000 Dissertationen, in Frankreich 1500, in der Schweiz 600, in Russland 120 und weniger als 100 in anderen Ländern eingereicht.

Die Universität Leipzig schuf als Erste einen Lehrstuhl für physikalische Chemie.^[*] Sein Inhaber war Wilhelm Ostwald, der zum unerschütterlichsten Fürsprecher des Forschungsgebiets und Gründer einer der einflussreichsten internationalen Schulen der physikalischen Chemie wurde.^[**] Gemeinsam mit van't Hoff begründete er auch die *Zeitschrift für Physikalische Chemie*,^[***] ein Sprachrohr der Chemie der Zukunft mit einem internationalen Team von Herausgebern. In der Einführung zur ersten Ausgabe^[24] schrieb er: „Die physikalische Chemie ist nicht nur ein Zweig, sondern ist die Blüte am Baum [des Wissens].“

Schnell folgten weitere Lehrstühle für physikalische Chemie: Hans Landolt in Berlin und die Ostwald-Schüler Walther Nernst und Arthur Noyes in Göttingen bzw. am Massachusetts Institute of Technology (MIT). 1910 besaß etwa die Hälfte der deutschen Universitäten einen Lehrstuhl oder eine Abteilung für physikalische Chemie.^[22] Das spiegelte die Ansicht wider, dass die physikalische Chemie nicht nur eine Kerndisziplin der Chemie, sondern auch die Grundlage der chemischen Technologie war. Zum Vergleich: Oxford und Cambridge richteten ihre Lehrstühle für physikalische Chemie erst nach dem Ersten Weltkrieg ein.

Die erste dem neuen Forschungsbereich gewidmete Zeitschrift außerhalb Deutschlands war das *Journal of Physical Chemistry* (JPC), das der Ostwald-Schüler Wilder Bancroft herausgab. In den ersten zehn Jahren erschienen darin 300 Artikel, die fast ausschließlich von Amerikanern und Kanadiern geschrieben waren. Ein Viertel davon waren Schüler Ostwalds, darunter Gilbert Newton Lewis, Arthur Noyes und Theodore Richards. Amerikanische Physikochemiker publizierten auch im *Journal of the American Chemical Society* (JACS); 1926 stammte ein Viertel aller darin veröffentlichten Artikel aus der physikalischen Chemie. Ein Zeitzeuge meinte:^[22] „Physical chemistry now seems about to swallow up chemistry proper.“

Und was wird die physikalische Chemie schlucken? Nun, wohl alles außer dem Namen dürfte von der chemischen Physik und der theoretischen Chemie einverleibt werden. Aber auf dem Weg dahin müssen wir zunächst die Quantenrevolution streifen.

Helge Kragh bemerkte dazu:^[25] „Quantum theory owes its origin to the study of thermal radiation, in particular to the ‘black-body’ radiation that Robert Kirchhoff had first defined in 1859–1860.“ Die experimentelle Untersuchung der Hohlraumstrahlung (Strahlung eines schwarzen Körpers) ist ein Erbe von Helmholtz und seiner Zeit als Leiter der Physika-

lisch-Technischen Reichsanstalt (PTR). Max Plancks Entdeckung des Strahlungsgesetzes^[26] bedeutete laut Abraham Pais^[27] das erste Auftreten des Planckschen Wirkungsquantums. Doch es brauchte noch drei weitere Auftreten, bis die Quantenmechanik wirklich da war: Das zweite war in Einsteins Arbeit über die Lichtquanten^[28] (oft fälschlich als Photoeffekt-Artikel bezeichnet)^[*] enthalten, das dritte in seiner Arbeit zur Wärmekapazität von Festkörpern.^[29] Diese Arbeit erregte die Aufmerksamkeit Walther Nernsts, der darin den Schlüssel zu seinem Wärmesatz sah. Als Reaktion darauf berief Nernst die erste Solvay-Konferenz ein.^[**] Das vierte Auftreten verbarg sich in Bohrs Atommodell,^[30] das die bestehenden Quantenvorstellungen mit der Entdeckung des Elektrons und des Atomkerns verband.

Die Entdeckung der Quantenmechanik (Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger und Paul Dirac) wurde von einer Vielzahl weiterer für die physikalische und die theoretische Chemie wichtiger Entdeckungen flankiert, darunter Einsteins Analyse der Brownschen Bewegung^[31] und deren experimenteller Nachweis durch Jean Perrin.^[32] Das führte zur endgültigen Anerkennung der Teilchen- oder Atomstruktur der Materie, sogar durch hartgesottene Physiker (ausgenommen Ernst Mach) und Physikochemiker (Ostwald eingeschlossen). Es beschleunigte darüber hinaus den Niedergang der Theorie, Proteine und andere Makromoleküle seien Kolloide. Die Entdeckung der Röntgenbeugung an Kristallen durch Max von Laue^[33] hatte Auswirkungen auf die Erforschung von Strukturen und das Verständnis starker Elektrolyte – beides Hauptinteressen der physikalischen Chemie jener Zeit und auch später. William Lawrence und William Henry Bragg entdeckten das Gesetz, das der Röntgenbeugung zugrunde liegt und einen Schlüssel zur Analyse der Kristallstruktur lieferte.^[34] Die Arbeiten von Gilbert Newton Lewis^[35] und Irving Langmuir^[36] ließen die Theorie der kovalenten Bindung als Folge eines gemeinsamen Elektronenpaares voraussehen. Schließlich führte die Entdeckung der Richtungsquantelung^[37] und des Spins^[38] zur NMR-Spektroskopie und zu anderen Wundern der Quantenphysik. Unmittelbar auf Schrödingers Wellenmechanik folgte Friedrich Hunds Entdeckung des Tunneleffekts.^[39] Mehr noch: Das Pauli-Prinzip und die Hundschen Regeln – neben den nachjustierten Wasserstoff-Energieniveaus – sorgten dafür, dass Mendelejews Periodensystem der Elemente einleuchtete.^[40] Eugene Wigner wandte die Gruppentheorie auf die Quantenmechanik an und formulierte die Auswahlregeln als erkennbare Signatur einer zugrundeliegenden physikalischen Symmetrie neu.^[41] Die 5. Solvay-Konferenz im Jahre 1927 festigte die Quantentheorie.

Als sich der Staub der Quantenrevolution gelegt hatte, formulierte Dirac:^[42] „The underlying physical laws necessary for the mathematical theory of ... the whole of Chemistry are thus completely known, and the difficulty lies only in the fact that application of these laws leads to equations that are too

[*] Und das, obgleich Hermann Kopp (1817–1892), Chemieprofessor in Heidelberg und ausgebildet durch Justus von Liebig, sich mit einer der späteren Fragen der physikalischen Chemie befasste, dem Verhältnis zwischen der chemischen Zusammensetzung und den physikalischen Eigenschaften von Substanzen; siehe die „Kopp-Regel“.

[**] Ostwald hatte 147 Schüler, die wissenschaftlich erfolgreich waren; 34 erhielten eine Professur. Einstein und Haber hätten ebenfalls darunter sein können, aber Ostwald lehnte sie ab, als sie sich um eine Stelle in seinem Labor bewarben. Ostwald war jedoch der Erste, der Einstein bereits 1909, dem Jahr, in dem er selbst ihn erhielt, für den Nobel-Preis vorschlug.

[***] Die Zeitschrift war eine von sechs Chemie-Periodika, die zu jener Zeit in Deutschland erschienen.

[*] Diese Arbeit war die einzige aus dem „Annus mirabilis“ 1905, die Einstein selbst als revolutionär betrachtete; siehe unten.

[**] Auf dieser ersten Solvay-Konferenz wurde aus Einstein, einem bis dato unbeschriebenen Blatt aus Bern, eine unter Physikern bekannte Persönlichkeit.

complex to be solved.“ Also lautete die Hauptfrage der theoretischen Chemie: Wie sind diese Gleichungen zu lösen? Die recht erstaunliche Geschäftigkeit, die folgte, brachte einige Antworten zutage.

Die Schrift von Walter Heitler und Fritz London über die kovalente Bindung (1927) definiert den Beginn der Quantenchemie.^[43] Sie bewiesen darin nicht nur, dass die chemische Bindung ihre Existenz einem Quanteneffekt verdankt, sondern lieferten auch das erste Beispiel für die hohe Kunst der mathematischen Näherung, die in der Quantenchemie von entscheidender Bedeutung werden sollte. Dieser Schrift folgte rasch die Einführung der Born-Oppenheimer-Näherung,^[44] des folgenreichen Thomas-Fermi-Modells^[45,46] und der Methode des selbstkonsistenten Feldes durch Hartree.^[47]

Das Jahr 1931 kann aus gutem Grund als Annus mirabilis der theoretischen Chemie bezeichnet werden.^[48] Die Wiederaufnahme von Arrhenius' Aktivierungsenergie mittels der Eigenenergie-Oberfläche der Elektronen durch Fritz London,^[49] Henry Eyring und Michael Polanyi^[50] eröffnete, zusammen mit der Idee einer rollenden Kugel auf dieser Oberfläche, einen völlig neuen Zugang zur Visualisierung und Interpretation einer chemischen Reaktion.^[*] Die rivalisierenden Valenzbindungs- und Molekülorbitaltheorien erwiesen sich im Grunde als komplementär, wie John Van Vleck^[51] als Erster in versöhnlicher Manier feststellte. Zwanzig Jahre später formulierte Charles Coulson kurz und bündig:^[52] „[There is] a kind of uncertainty relation about our knowledge of molecular structure: the more closely we try to describe the molecule, the less clear-cut becomes our description of its constituent bonds.“

Offensichtlich war Eugene Wigner der Erste, der die Elektronenenergie über die Hartree-Fock-Näherung hinaus berechnete (am Beispiel von metallischem Natrium), und er prägte den Begriff „Korrelationsenergie“ für die beobachtete Korrektur.^[53]

Den nächsten Schritt in Richtung einer Theorie der chemischen Reaktion auf der Grundlage der Quantenmechanik taten Polanyi und Eyring, die zu jener Zeit nicht mehr zusammen arbeiteten. Sie kombinierten ihre semiempirischen Potentialhyperflächen mit Erwägungen aus der statistischen Quantenmechanik zur Theorie vom „Übergangszustand“ (Polanyi)^[54] bzw. „aktivierten Komplex“ (Eyring).^[55]

Im gleichen Jahr legte John Van Vleck den Grundstein für die Ligandenfeldtheorie.^[56] Er zeigte, dass in chemischen Komplexen „electrons from a paramagnetic cation are allowed to wander onto the anions and vice versa, so that there is incipient covalence.“^[57]

Die Zeitachse in Abbildung 2 enthält auch die Entdeckung der Kernspaltung, da diese am Ende der oben beschriebenen Ideengeschichte des chemischen Elements steht.

Auf institutioneller Seite wurde der Aufstieg der physikalischen und der theoretischen Chemie durch folgende Entwicklungen gefördert:

- In London wurde die Faraday Society^[58] gegründet, benannt nach einem Begründer der Elektrochemie.

- Die Deutsche Gesellschaft für Elektrochemie (seit 1902 Bunsen-Gesellschaft), die sich der physikalischen Chemie und Elektrochemie verschrieben hat,^[59] wurde mit Ostwald als erstem Präsidenten gegründet.
- In Deutschland entstand die Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften (heute Max-Planck-Gesellschaft). Eines der ersten beiden Institute widmete sich der physikalischen Chemie. Sein Gründungsdirektor war Fritz Haber.^[60]
- Der erste Lehrstuhl für theoretische Chemie wurde an der Universität Cambridge für John Lennard-Jones eingerichtet, der ihn ein „mathematisches Labor“ nannte.^[61]
- Weitere Zeitschriften für physikalische Chemie wurden gegründet, darunter das *Journal de Chimie Physique* in Frankreich und die *Faraday Transactions* in Großbritannien.

Die vielleicht wichtigste Entwicklung in Bezug auf Publikationsmöglichkeiten für die physikalische Chemie nach der Quantenrevolution war die Gründung des *Journal of Chemical Physics* (JCP) mit Harold Urey als Chefredakteur. JCP stellte eine Plattform für rein theoretische Arbeiten zur Verfügung, die beim konkurrierende *Journal of Physical Chemistry* (JPC) keine Akzeptanz fanden. Jedenfalls bezeichnete Harold Urey Veröffentlichungen im schließlich erfolglosen JPC als „burial without a tombstone.“^[62] In der allerersten Ausgabe von JCP sind Kleinode zu finden wie John Slaters Analyse der kovalenten Bindung in Form des Virialsatzes sowie Beiträge von Langmuir, Debye, Pauling, G. N. Lewis, Eyring und anderen. JCP wurde zum Triumph der Physikochemiker, die sich an der Physik und der Mathematik orientierten. Ostwalds Vorhersage aus dem 19. Jahrhundert, dass der Weg zur allgemeinen Chemie über die Physik und Mathematik führen würde, erfuh damit neuen Auftrieb.^[22]

Hiermit beschließen wir unsere Zeitreise durch die ersten heroischen Epochen der physikalischen und der theoretischen Chemie, die von der Einbindung der Thermodynamik und der Quantenmechanik gekennzeichnet waren.

Abbildung 2 enthält auch eine Mahnung, die die Gegenwart betrifft, für die Rechenmethoden in Kombination mit dem Verlassen auf Digitalcomputer charakteristisch sind. Sie stammt von keinem geringeren als Richard Feynman. Feynman war selbst einmal theoretischer Chemiker und entdeckte als Student bei John Slater das, was als Hellmann-Feynman-Theorem bekannt wurde. Sein Rat:^[63] „[I]f you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical ...“ Nun, wahrscheinlich – oder hoffentlich – wird der Quantensimulator oder Quantencomputer das Arsenal an Näherungsgleichungen, die zur Behandlung chemischer Fragen aufgestellt wurden, als Rechenwerkzeuge überflüssig und die theoretische Chemie wahrhaft vorhersagefähig machen.^[64] Natürlich nur, sollte es je einen universellen Quantencomputer geben ...

Im Weiteren werde ich mich auf die Beschreibung der wichtigsten Entwicklungen auf dem Gebiet der physikalischen und der theoretischen Chemie in Berlin und Leipzig beschränken. Dabei präsentiere ich die Forscher, die aus

[*] Diese Arbeit war zugleich ein Vorläufer der chemischen Reaktionsdynamik, die in den 1960er Jahren in Amerika entstand.

diesen beiden Städten heraus am meisten dazu beigetragen haben.

3. Lehrstühle für physikalische Chemie im Leipzig der Kaiserzeit und der Weimarer Republik

Porträts der Leipziger Professoren für physikalische Chemie sind in Abbildung 3 zu sehen.

Nach seiner Ankunft aus Riga fand **Wilhelm Ostwald**^[*] in Leipzig alles andere als hervorragende Bedingungen vor: Das Gebäude erwies sich als „an old pile in every way unfitted for the carrying on of those delicate experiments which brought Ostwald to the forefront of scientific workers“.^[65] Zudem musste er Erstsemester in analytischer und pharmazeutischer Chemie unterrichten, wofür sich Johannes Wislicenus, der führende Chemiker jener Zeit in Leipzig, zu schade war.

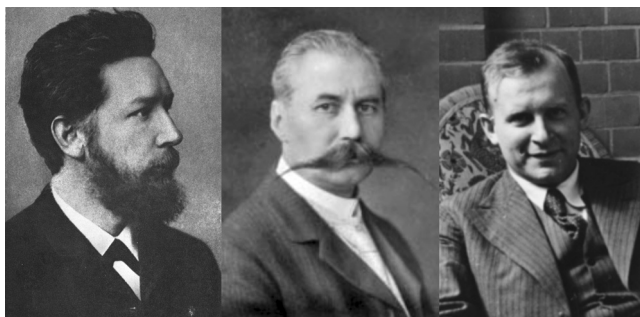


Abbildung 3. Die ersten Lehrstuhlinhaber für physikalische Chemie in Leipzig (von links nach rechts): Wilhelm Ostwald (1853–1932), Max Le Blanc (1865–1943), Karl Friedrich Bonhoeffer (1899–1957).

1898 stellten die Universität und die sächsische Regierung Ostwald endlich das jetzige, viel besser geeignete Gebäude zur Verfügung, das er selbst entworfen hatte.^[66] Ein Kommentator, der für *Nature* schrieb, formulierte es so: Das Gebäude sei „a proof of the appreciation of the importance of the new science and of Ostwald's services“.^[65] Bei der gut besuchten Einweihung des Instituts (Abbildung 4) wurde zugleich das neue Gebiet der physikalischen Chemie gefeiert.

Nach seinem frühen Ruhestand (1906) war Ostwald weiterhin auf vielen Gebieten erfolgreich: von der Philosophie über die Malerei bis zum Engagement für den Frieden. Sein Credo „Vergeude keine Energie, nutze sie!“ ist sowohl im wörtlichen als auch im übertragenen Sinne höchst modern.

Max Le Blanc^[**] war eine Art Doppelgänger Fritz Habers. Er studierte wie dieser in Berlin bei August Wilhelm von Hofmann und hatte eine Professur an der Technischen Hochschule Karlsruhe inne. In der Zwischenzeit war er jedoch, anders als Haber, Ostwalds Assistent und Habilitand. 1906 wurde Le Blanc Ostwalds Nachfolger in Leipzig. Damit räumte er den Professorenstuhl in Karlsruhe, der anschlie-



Abbildung 4. Einweihung von Ostwalds Institut in Leipzig mit Ostwald am Rednerpult und S. Arrhenius, J. van't Hoff, W. Nernst, M. Planck, G. H. Wiedemann, H. Landolt, J. Wislicenus sowie anderen im Publikum.

ßend mit Haber als Ordinarius besetzt wurde. Le Blanc war Elektrochemiker und arbeitete hauptsächlich an der Zersetzungsspannung und anderen Aspekten der Elektrolyse.

Karl Friedrich Bonhoeffer^[*] war ein Schüler von Walther Nernst, Assistent von Fritz Haber und Le Blancs Nachfolger in Leipzig. Die Familie Bonhoeffer, vor allem Karl Friedrichs Bruder Dietrich und Schwester Christine, leistete dem Hitlerregime heldenhaften Widerstand.^[67] Karl Friedrich war nach dem Zweiten Weltkrieg am Wiederaufbau der deutschen Wissenschaft beteiligt, wobei er – meist parallel – mehrere Funktionen bekleidete. Seine breit gefächerten wissenschaftlichen Aktivitäten schlossen Untersuchungen zur Kinetik chemischer und biochemischer Reaktionen ein. Dabei nutzte er als einer der Ersten die Deuterierung als Mittel zur Entschlüsselung von Reaktionsmechanismen.

4. Lehrstühle für physikalische Chemie im Berlin der Kaiserzeit und der Weimarer Republik

Porträts der Berliner Professoren für physikalische Chemie sind in Abbildung 5 zu sehen.

Hans Landolt^[**] war der erste Inhaber des neu eingerichteten Lehrstuhls für physikalische Chemie an der Universität Berlin. Landolt war Schüler von Robert Bunsen und widmete sein Leben der Beziehung zwischen der chemischen Zusammensetzung und den physikalischen Eigenschaften von Substanzen.^[68]

Sein Name ist verbunden mit dem Standardnachschlagewerk, den Landolt-Börnstein-Tabellen, deren erste Auflage 1883 erschien. Heute umfassen die Tabellen etwa 400 Bände und sind als Datenbank verfügbar.^[69]

[*] W. Ostwald war 1887–1906 Ordinarius an der Universität Leipzig und seit 1905 Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften.

[**] M. Le Blanc war 1906–1933 Ordinarius an der Universität Leipzig und ab 1925 Mitglied der Leopoldina.

[*] K. F. Bonhoeffer war 1934–1947 Ordinarius an der Universität Leipzig, 1947–1949 Ordinarius an der Universität Berlin, 1948–1949 Direktor des Kaiser-Wilhelm-Instituts (KWI) für physikalische Chemie und Elektrochemie in Berlin, 1949–1957 Gründungsdirektor des Max-Planck-Instituts für physikalische Chemie in Göttingen.

[**] H. Landolt war 1891–1905 Ordinarius an der Universität Berlin und ab 1881 Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften.



Abbildung 5. Die ersten Professoren für physikalische Chemie in Berlin (im Uhrzeigersinn von links oben): Hans Landolt (1831–1910), Jacobus van't Hoff (1852–1911), Walther Nernst (1864–1941; Portrait von Max Liebermann von 1911), Max Volmer (1885–1965), Max Bodenstein (1871–1941), Fritz Haber (1868–1934).

Anlässlich von Landolts Aufnahme in die Preußische Akademie der Wissenschaften sagte Emil du Bois-Reymond, der ständige Sekretär der Akademie, „die physikalische Chemie ist die Chemie der Zukunft“.^[24]

Jacobus van't Hoff^[*] kam 1896 nach Berlin, als die Zahl seiner Errungenschaften bereits sehr groß war.^[70] Ich möchte hier zusätzlich zu seinen epochalen Beiträgen zur chemischen Thermodynamik einige weitere erwähnen.

In seiner Dissertation 1874 schuf er die Grundlagen für die Stereochemie mit der vorausschauenden Hypothese, dass die Bindungen eines Kohlenstoffatoms auf die Eckpunkte eines Tetraeders gerichtet sind.^[71] 57 Jahre später legitimierte Pauling diese Annahmen in seiner Theorie der gerichteten Valenz.^[72]

Van't Hoffs Arbeiten über den osmotischen Druck stellten eine Analogie her zwischen Gasmischungen und Lösungen; dies wurde zur Grundlage für die genaue Bestimmung von Molekulargewichten. Er befasste sich auch mit der Bedeutung seiner Arbeiten für die Biologie der Pflanzen und Tiere.^[73]

In der Chemie hatte van't Hoff eine wahrhaft einzigartige Position inne: Während seiner Studienzeit dominierte die organische Strukturchemie das Gebiet. Es gab Abermillionen nützlicher Anleitungen zur Synthese neuer Verbindungen, aber keine chemische Theorie. Durch die Anwendung der Thermodynamik auf chemische Fragestellungen stellte er die Chemie auf eine dauerhafte theoretische Grundlage. Die chemische Thermodynamik wurde zur theoretischen Chemie

[*] J. van't Hoff war 1896–1911 Honorarprofessor an der Universität Berlin und ab 1896 Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften.

seiner Zeit und zum Bestandteil jeglicher theoretischen Chemie seither.

Damit überrascht es vielleicht nicht mehr so sehr, dass van't Hoff der erste Träger des Chemie-Nobelpreises wurde. Der große Organiker Emil Fischer bekam ihn erst als Zweiter. Auch die beiden anderen Mitglieder des Ionisten-Triumvirats wurden noch im ersten Jahrzehnt der Vergabe dieses Preises mit ihm gewürdigt. Nimmt man die Chemie-Nobelpreise für William Ramsay und Ernest Rutherford dazu, ging genau die Hälfte der Preise während dieses ersten Jahrzehnts an Physikochemiker oder Physiker. Nach meiner Zählung wurde im Langzeitdurchschnitt etwa ein Drittel aller Chemie-Nobelpreise an theoretische oder Physikochemiker oder an Physiker vergeben.

Landolts Nachfolger an der Universität Berlin war Ostwalds früherer Assistent **Walther Nernst**.^[*] Nach seiner Wirkung in Göttingen kam Nernst 1905 mit seinem Automobil in Berlin an (Abbildung 6), um den freien Lehrstuhl zu



Abbildung 6. Walther Nernst 1905 bei seiner Ankunft mit dem Automobil aus Göttingen.

besetzen. Im Jahr darauf ging Wilhelm Ostwald in Leipzig in den Ruhestand und machte damit den Weg frei für Berlins Vorherrschaft auf dem Gebiet der physikalischen Chemie. Zudem leitete Nernst seine Ankunft in Berlin mit einem Paukenschlag ein: der Verkündung seines Wärmesatzes (des dritten Hauptsatzes der Thermodynamik). Die experimentelle und theoretische Basis des dritten Hauptsatzes blieb auch in den folgenden Jahren das Hauptthema seiner Forschungsaktivitäten, was dazu beitrug, dass Berlin seinen Status als eines der ersten Zentren der jungen Quantentheorie festigen konnte.^[74]

Der Name **Fritz Haber**^[**] steht für die Janusköpfigkeit der modernen Wissenschaft. Einerseits ist das von Haber

[*] W. Nernst war 1905–1934 Ordinarius an der Universität Berlin, ab 1905 Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften und 1923–1924 Präsident der PTR.

[**] Fritz Haber war 1911–1933 Direktor des KWI für physikalische Chemie und Elektrochemie, 1912–1920 Honorarprofessor und 1920–1933 Ordinarius der Universität Berlin, ab 1914 Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften.

zusammen mit Carl Bosch und Alwin Mittasch erfundene industrielle Verfahren zur katalytischen Synthese von Ammoniak aus den Elementen Grundlage der Massenproduktion von Düngemitteln („Brot aus der Luft“). Gegenwärtige Schätzungen besagen, dass etwa zwei Siebtel der heutigen Weltbevölkerung ohne das Haber-Bosch-Verfahren nicht überleben könnten. Ungefähr die Hälfte der Stickstoffatome im Körper eines heutigen Europäers oder Amerikaners hat das Haber-Bosch-Verfahren durchlaufen.^[75] Andererseits ist dieses Verfahren auch die Ausgangsbasis für die Herstellung von Sprengstoffen und Munition („Schießpulver aus der Luft“). Im Ersten Weltkrieg wurde Haber zum „Vater der chemischen Kriegsführung“ und richtete sein KWI auf die Entwicklung von Chemiewaffen aus („Gift statt Luft“). Dabei sei allerdings angemerkt, dass Chemiewaffen aus Habers Sicht die Pattsituation des Grabenkrieges aufbrechen, den Feind zur Kapitulation bewegen und damit das Abschlagen von Millionen Soldaten durch Artillerie- und Maschinengewehrfeuer beenden sollten.^{[76][*]}

Bevor er seinen Posten als Direktor des KWI für physikalische Chemie und Elektrochemie in Berlin antrat, verbrachte er siebzehn Jahre an der Technischen Hochschule Karlsruhe. Dort entstanden nicht nur die wissenschaftlichen Grundlagen für das Haber-Bosch-Verfahren, sondern er wurde auch zu einem bekannten Protagonisten der physikalischen Chemie, insbesondere wegen seiner Beiträge zur Thermodynamik von Gasphasenreaktionen.

Die Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft war eine weitere institutionelle Neuerung, die während des „langen“ 19. Jahrhunderts (das erst mit dem Ausbruch des Ersten Weltkriegs endete) aus Preußen kam. Ihr erklärter Zweck war, die Generierung von Wissen über die Möglichkeiten der Universitäten hinaus zu beschleunigen. Anders als die Forschungsuniversität oder die PTR (siehe unten) wurde die Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft nicht breit nachgeahmt. Direkt inspiriert von ihr waren nur das RIKEN in Tokio und das Weizmann-Institut in Rehovot.

Während der Weimarer Republik entwickelte sich Habers Institut zu einem weltweit anerkannten Forschungszentrum am Schnittpunkt zwischen Chemie und Physik (siehe unten). Haber, neben Einstein ein einflussreicher Repräsentant der deutschen akademischen Welt, war auch Mitbegründer der Vorläuferorganisation der Deutschen Forschungsgemeinschaft.^[60]

Im Gegensatz zu vielen seiner Kollegen war Haber ein Anhänger der Weimarer Republik und gehörte zu ihren ausgesprochenen Unterstützern. Allerdings konnten weder seine wissenschaftlichen Verdienste noch sein unbändiger Patriotismus den Statusverlust verhindern, der für Haber aus der Machtübernahme durch die Nazis folgte. Krank und gebrochen starb er nicht einmal ein Jahr, nachdem er aus Deutschland vertrieben worden war, in Basel.^[77]

[*] Die Chemiewaffen, die schließlich von allen wichtigen Kriegsparteien des Ersten Weltkriegs eingesetzt wurden, funktionierten allerdings nicht auf diese Weise. Wie in Lit. [76] formuliert, wurden sie zur (gegenseitigen) Bedrohung und trugen zum unaussprechlichen Leid der Truppen an der West- wie der Ostfront bei.

Max Bodenstein^[*] war ebenfalls einer von Ostwalds glänzenden ehemaligen Assistenten. Bevor er von der Universität Berlin als Nachfolger Nernsts berufen wurde, machte er sich einen Namen, indem er Einsteins Gesetz der photochemischen Äquivalenz rettete. Dieses Gesetz schien mit Experimenten unvereinbar zu sein. Bodenstein rettete es mit der Einführung des Konzepts einer (photoinduzierten) Kettenreaktion.^[78]

Wie Ostwald und Nernst hatte Bodenstein eine große internationale Gefolgschaft, zu der der einflussreiche Physikochemiker George Kistiakowsky in Harvard gehörte. Kistiakowsky beschrieb Bodenstein nach einer Überlieferung von Dudley Herschbach^[79] wie folgt: „[Upon his emigration from Russia, Kistiakowsky] went directly to Bodenstein in Berlin and said ‘I want to work with you’. Bodenstein was a *Geheimrat*-type professor, typically visited his lab wearing white spats and carrying a cane. On his first visit to see Kisty, his new student, Bodenstein admired the nice glass vacuum apparatus Kisty had set up; that was essential for all gas-kinetics experiments in those days. He asked Kisty if he had made it, and Kisty admitted he’d the glassblower do it. Bodenstein promptly smashed it to bits with his cane, saying ‘No student of mine will have the glassblower build his apparatus,’ and walked out. That led Kisty to become a legendary glassblower.“

Max Volmer^[**] war in jungen Jahren bekannt für die Untersuchung photochemischer Reaktionen im Hochvakuum. Im Ersten Weltkrieg war er bei Nernst an der Universität Berlin eingeschrieben. Unmittelbar nach dem Waffenstillstand, noch immer in Nernsts Labor, kam Otto Stern hinzu. Fortan arbeiteten beide an der Kinetik intermolekularer Deaktivierungsprozesse, z.B. an der des Abklingens der Fluoreszenz. Die Gleichung, die diesen Verlauf beschreibt, ist heute als Stern-Volmer-Gleichung bekannt. 1922 wurde Volmer Professor für physikalische Chemie an der technischen Hochschule Charlottenburg (der heutigen Technischen Universität Berlin). Dort arbeitete er bis zum Ende des Zweiten Weltkriegs an der Kinetik von Phasenübergängen.

1943 wurde Volmer zum Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften gewählt. Seine Berufung wurde jedoch vom berüchtigten Reichsminister für Wissenschaft, Kunst und Volksbildung, Bernhard Rust, mit folgender Begründung verhindert: „Zur Repräsentation des nationalsozialistischen Staates ist die politische Haltung Volmers nicht klar genug.“ Gegen ihn wurden außerdem Verfahren eingeleitet, weil er jüdischen Wissenschaftlern geholfen haben soll.^[80]

Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde er zusammen mit einem halben Dutzend weiterer prominenter deutscher Wissenschaftler verpflichtet, der Sowjetunion bei der Entwicklung von Kernwaffen zu helfen. Nach seiner Rückkehr aus

[*] M. Bodenstein war 1923–1936 Ordinarius an der Universität Berlin und ab 1925 Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften.

[**] M. Volmer war 1922–1945 Ordinarius an der technischen Hochschule Charlottenburg, wurde 1943 zum Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften gewählt, aber nicht ernannt, und war 1955–1958 Präsident der Akademie der Wissenschaften der DDR.

der Sowjetunion in die DDR ließ er sich in Potsdam-Babelsberg nieder. In der DDR bekleidete er mehrere Ämter, darunter das des Präsidenten der Akademie der Wissenschaften. Volmer war Amateur-Entomologe; seine Schmetterlingssammlung ist im Potsdamer Naturkundemuseum ausgestellt.^[81]

5. Hermann von Helmholtz, Max Planck und die Entdeckung des Hohlraumstrahlungsgesetzes

Hermann von Helmholtz^[*] war ein Universalgelehrter mit zu seiner Zeit unerreichter Bandbreite. Er leistete maßgebliche Beiträge auf zahlreichen Gebieten der Wissenschaft: Physik, Chemie, Medizin, Astronomie und andere. Man nannte ihn den Reichskanzler der Physik; das Porträt von Ludwig Knaus in Abbildung 7 passt zu diesem Titel. Von besonderer Bedeutung in der physikalischen Chemie waren seine Arbeiten auf dem Gebiet der Thermodynamik, zu denen auch eine endgültige Formulierung des Energieerhaltungssatzes gehörte.^[82]

Die bedeutsame Entdeckung, dass Energie nur in endliche Quanten zerlegt werden kann, ist indirekt ebenfalls auf Helmholtz zurückzuführen: auf seine herausragende Rolle als Gründungspräsident der PTR. Die Reichsanstalt war neben den Forschungsuniversitäten und der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft eine weitere institutionelle Neuerung aus Preußen während des langen 19. Jahrhunderts. Dieses nationale metrologische Institut wurde von dem Berliner Industriellen Werner von Siemens gegründet; dort setzte man Helligkeitsnormen für die rasch wachsende Beleuchtungsindustrie fest, woran Siemens ein persönliches Interesse hatte. Mit Helmholtz' Segen befasste sich die Reichsanstalt ab den 1890er Jahren mit dem Problem der Hohlraumstrahlung.^[83]

Gustav Kirchhoff, der das Problem der Hohlraumstrahlung bereits um 1860 formuliert hatte, wurde 1875 Berliner, als er endlich den zum wiederholten Male ergangenen Ruf an die Universität Berlin annahm. Deshalb war es Max Planck als Student möglich, sowohl Vorlesungen von Helmholtz als auch von Kirchhoff zu besuchen, und er konnte später Kirchhoffs Nachfolger auf dem Lehrstuhl für theoretische Physik werden.

Zum Kreis der Physiker (zumeist frühere Studenten von Helmholtz), die an der PTR am Problem der Hohlraumstrahlung arbeiteten, gehörten Otto Lummer, Heinrich Rubens, Ernst Pringsheim, Ferdinand Kurlbaum und Willy Wien. Friedrich Paschen widmete sich dem Problem in seinem Labor in Hannover. Alle diese Forscher gehörten, ebenso wie Max Planck, der gleichen Generation an.

Abbildung 8 zeigt das historische Strahlungslabor an der PTR. Der schwarze Körper bestand aus einem Porzellanrohr innerhalb eines weiteren Porzellanrohrs, an dem Heizdrähte und Thermolemente angebracht waren. Die Vorrichtung stammte aus der Königlichen Porzellanmanufaktur, die unter der Schirmherrschaft Friedrichs des Großen in Berlin ent-



Abbildung 7. Hermann von Helmholtz (1821–1894), porträtiert 1881 von Ludwig Knaus im Auftrag der Nationalgalerie zu Berlin.

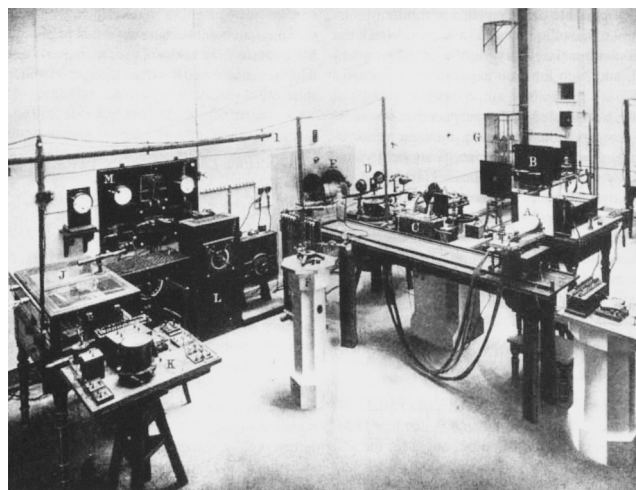


Abbildung 8. Strahlungslabor an der PTR. Der schwarze Körper befindet sich auf dem optischen Tisch, der auf Pfeilern ruht, die vom Bau des Gebäudes stammen.

standen war. Der wärmeisolierte schwarze Körper konnte auf einem optischen Tisch in verschiedene Messpositionen bewegt werden.

Was wurde alles ermittelt? Sobald es quantitative Ergebnisse zur spektralen Verteilung im schwarzen Körper gab,

[*] H. von Helmholtz war 1871–1894 Ordinarius an der Universität Berlin, ab 1870 Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften und 1887–1894 Gründungsdirektor der PTR.

fiel Willy Wien auf, dass die Maxima der Verteilungskurven sich proportional zur Temperatur ins Blaue verschieben und dass die maximale spektrale Energiedichte mit der fünften Potenz der Temperatur ansteigt – das Wiensche Verschiebungsgesetz. Zusammen mit Friedrich Paschen fand er eine Ausgleichsformel für die bekannten Verteilungen der Strahlungsenergie im kurzwelligen Bereich, die mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz übereinstimmten. Die Wien-Paschen-Kurve wurde von Planck gestützt, der 1899 erklärte, sie sei eine Folge des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik.^[83] Dabei hätte man es bewenden lassen können, aber die Forscher an der PTR führten genaue Messungen im bis dato unerforschten, durch die Luftabsorption gestörten langwelligen Bereich durch. Diese Messungen ergaben, dass die Wien-Paschen-Anpassung hier unzureichend und die klassische Rayleigh-Jeans-Theorie für den langwelligen Bereich asymptotisch korrekt war (siehe Abbildung 9).

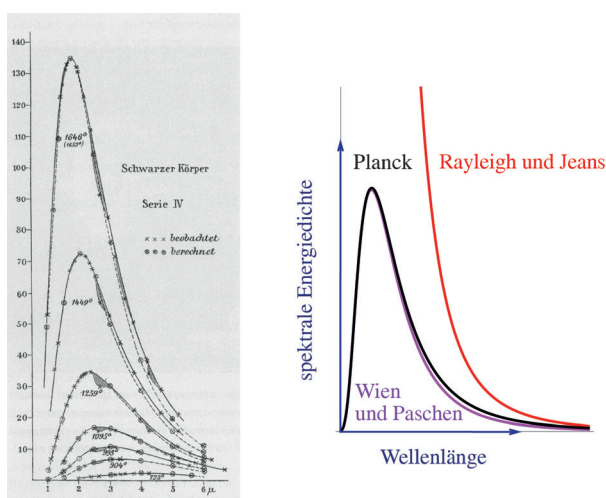


Abbildung 9. Links: Spektrale Verteilung der Leistungsdichte eines schwarzen Körpers, veröffentlicht 1899 von Otto Lummer und Ernst Pringsheim. Die gestrichelten Kurven beschreiben die Verteilung nach Wien und Paschen. Rechts: Theoretische Kurven von Rayleigh und Jeans (rot), Wien und Paschen (violett) sowie Planck (schwarz) mit der Definition der Koordinatenachsen.

Hier kommt wieder Max Planck ins Spiel, dieses Mal als der „zögerliche Revolutionär“^[84] der – wie er es nannte – einen „Akt der Verzweiflung“ beging. Planck machte sich daran, die Formel für die Strahlungskurve zu finden, die um jeden Preis – wie hoch auch immer – gefunden werden musste.^[83] Dazu musste Planck die „Physik anpassen“, und zwar an die Realität der Hohlraumstrahlung: Erstens musste er die Annahme „natura non facit saltum“ aufgeben und eine „nichtklassische“ Naturkonstante einführen (das Plancksche Wirkungsquantum). Zweitens musste er sich eines statistischen Arguments^[81] bedienen, noch dazu eines, das zur nichtklassischen Statistik ununterscheidbarer Bosonen gehörte.

[*] Statistische Mechanik war Planck damals ein Gräuel.

Das Wiensche Verschiebungsgesetz und die genauen Versuchsergebnisse aus der PTR dienten Planck als Prüfkriterien während seiner Suche. Wien sollte 1911, neun Jahre früher als Planck, den Nobel-Preis für seinen Beitrag zur Entdeckung des Hohlraumstrahlungsgesetzes erhalten.

Friedrich Hund beschrieb Plancks Quantenhypothese als Frühgeburt, da die meisten Belege für den Einfluss des Planckschen Wirkungsquantums damals unbekannt oder so gut wie unverstanden waren.^[85]

6. Die Hauptakteure der Quantenmechanik in Berlin und Leipzig

Die Quantenmechanik entstand aus mehr oder weniger unkoordinierten, kollektiven internationalen Bemühungen, wie es sie vorher in der Geschichte der Naturwissenschaften weder dem Umfang noch den Ergebnissen nach je gegeben hatte. Abbildung 10 zeigt Porträts der Berliner Begründer der Quantenmechanik.



Abbildung 10. Die Begründer der Quantenmechanik, die an Berliner Einrichtungen arbeiteten (im Uhrzeigersinn von oben links): Max Planck (1858–1947), Albert Einstein (1879–1955), Peter Debye (1884–1966), Max von Laue (1879–1960), John von Neumann (1903–1957), Eugene Wigner (1902–1995), James Franck (1882–1964), Erwin Schrödinger (1887–1961).

Das erste Foto zeigt **Max Planck** im schicksalsträchtigen Jahr 1900 im Alter von 42 Jahren. Dreizehn Jahre zuvor hatte er Gustav Kirchhoff an der Universität Berlin abgelöst, und er war bereits seit sechs Jahren Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften. Interessant ist, dass Helmholtz Plancks Beitrag zur „Thermo-Chemie“ hervorhob, als er ihn für die Akademie nominierte.^[83]

Albert Einstein kam 1914 nach Berlin, um eine Professur an der Preußischen Akademie der Wissenschaften und den Direktorenposten am KWI für Physik anzutreten. Bei seiner Ankunft verglich er sich mit einer „seltenen Briefmarke“,^[86] die von seinen Berliner Unterstützern Planck, Nernst, Rubens und Emil Warburg, dem damaligen Präsidenten der

PTR, gesammelt worden war. Ich finde es sehr bezeichnend, dass sich Planck in seiner Nominierung von Einstein als Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften für dessen Schrift über die Lichtquanten entschuldigte, die er selbst rund zehn Jahre vorher als Redakteur der *Annalen der Physik* zur Veröffentlichung angenommen hatte. Planck und die anderen Unterstützer schrieben in ihrem Brief: „Daß er in seinen Spekulationen gelegentlich auch einmal über das Ziel hinausgeschossen haben mag, wie z. B. in seiner Hypothese der Lichtquanten, wird man ihm nicht allzuschwer anrechnen dürfen; denn ohne einmal ein Risiko zu wagen, läßt sich auch in der exaktesten Naturwissenschaft keine wirkliche Neuerung einführen.“^[87] Offenbar war es einigermaßen akzeptabel, dem schwarzen Körper eine Quantisierung anzulasten, die Quantennatur aber den elektromagnetischen Wellen zuzuschreiben war für viele zu viel, Planck eingeschlossen.

Das KWI für Physik wurde während Einsteins Amtszeit in Berlin nie gebaut, sondern entstand, zunächst als Baustelle, erst 1935 mit **Peter Debye** als Direktor. Es wurde von der Rockefeller-Stiftung finanziert und widmete sich unter Debyes liberaler Leitung der Atom- und Tieftemperaturphysik. Nach dem Ausbruch des Zweiten Weltkriegs konnte Debye mithilfe seiner Kollegen – und seines holländischen Passes – aus Deutschland fliehen.^[88] Sein Aufenthalt in Berlin unter den Nazis wurde ein halbes Jahrhundert später zum Gegenstand scharfer, wenn auch ungerechtfertigter Kritik.^[89]

Max von Laue war ein Fixstern am Berliner Firmament, seit er 1919 an der Seite seines Mentors Planck sein Amt an der Universität angetreten hatte.^[*] 1943 wurde er wegen seiner offenen Opposition gegen die Naziideologie mit einem von Hitler unterzeichneten Erlass zwangsweise in den Ruhestand versetzt.^[**] Als unmittelbarer Vorwand diente eine Vortragsreihe über Einsteins allgemeine Relativitätstheorie in Schweden. Nach dem Zweiten Weltkrieg machten ihn seine wissenschaftliche Reputation und seine untadelige Vergangenheit zu einer Schlüsselfigur beim Wiederaufbau der deutschen Wissenschaft und der Wiederherstellung ihrer internationalen Beziehungen. Er wurde Direktor von Habers KWI und gemeinsam mit Bonhoeffer die treibende Kraft hinter dessen Umbenennung nach seinem Gründungsdirektor.^[90,91]

Erwin Schrödinger wurde 1927 Plancks Nachfolger an der Universität Berlin. Sechs Jahre später verließ er dieses Amt und Deutschland, angewidert von der Politik der Nazis und speziell von deren Antisemitismus.^[91]

In Heinrich Rubens' Labor an der Universität Berlin erdachten **James Franck** und Gustav Hertz 1914 ihr viel bewundertes Experiment, das Bohrs Atommodell nachdrücklich stützte.^[92,93] Unmittelbar nach dem Ersten Weltkrieg leitete James Franck die Abteilung Physik an Habers KWI.^[60] Gemeinsam mit Gustav Hertz, Erich Einsporn, Walter Grotrian und Paul Knipping konzentrierte er sich vornehmlich auf die sorgfältige Messung von Absorptionsspektren und Ionisationsenergien und die Korrelation dieser Messungen mit dem Atommodell von Bohr und Sommerfeld. Ihre Er-

gebnisse lieferten Anregungen für spätere Untersuchungen am Institut, beispielsweise die zentrale Arbeit von Haber und Walter Zisch über die Chemilumineszenz (1922) oder die von Hans Beutler und anderen über die Quantenmechanik von atomaren Stoßprozessen.^[60]

Es gibt noch zwei weitere Begründer der Quantenmechanik in Abbildung 10: die „ungarischen Marsianer“^[94] **Eugene Wigner** und **John von Neumann**, die beide längere Zeit in Berlin weilten. Sie waren Freunde seit dem Gymnasium und studierten auf Wunsch ihrer Eltern chemische Verfahrenstechnik, Wigner an der Technischen Hochschule Charlottenburg und von Neumann an der ETH Zürich. Als Privatdozenten in Berlin verfolgten sie später ähnliche wissenschaftliche Ziele. Ihre Berliner Jahre gingen 1932 zu Ende, als beide in Princeton eingestellt wurden. Wigner erinnerte sich, dass Princeton eher an von Neumann interessiert war, die Universitätsverwaltung aber meinte, es sei klüger, beide zu verpflanzen, denn sie würden, ähnlich einem Kaninchenpaar, gemeinsam glücklicher sein.^[95]

Das Aufeinandertreffen von Gruppentheorie und Quantenmechanik, das Wigner während seiner Berliner Zeit mit von Neumanns Hilfe herbeiführte, hatte eine tiefgreifende und anhaltende Wirkung. Die Gruppentheorie bescherte der Quantenmechanik eine neue These, der zufolge Auswahlregeln anstelle von Erhaltungssätzen als sichtbare Hinweise auf eine grundlegende physikalische Symmetrie galten.^[41] 1927 formulierte Wigner die heute als Quantenversion des Noether-Theorems bekannte Theorie. Als Max von Laue ihn 1930 fragte, welches aus der Gruppentheorie hergeleitete Ergebnis das bisher wichtigste gewesen sei, antwortete Wigner: die Erklärung der Laporte-Regel (das Konzept der Parität) und die Quantentheorie der Vektoraddition (Drehimpuls).^[60]

Abbildung 11 zeigt Porträts der Begründer der Quantenmechanik, die in Leipzig wirkten.

Gregor Wentzel, ein Schüler Sommerfelds, kam 1926 als Extraordinarius für mathematische Physik nach Leipzig. Dort entwickelte er unabhängig von Leon Brillouin und Hendrik Kramers die semiklassische Näherung. 1928 ging er als Nachfolger Schrödingers nach Zürich.

Im Jahre 1927 erhielt **Werner Heisenberg** einen Ruf als Ordinarius für theoretische Physik an die Universität Leipzig. Er war gerade einmal 26 Jahre alt. Mit Peter Debye und Friedrich Hund machte er Leipzig zu einem der Zentren der Physik, insbesondere der Kernphysik, weltweit. Er blieb bis



Abbildung 11. Die Begründer der Quantenmechanik, die an der Universität Leipzig arbeiteten (von links nach rechts): Gregor Wentzel (1898–1978), Werner Heisenberg (1901–1976), Friedrich Hund (1896–1997).

[*] Max von Laue veranstaltete in Berlin zweiwöchentliche Physikkolloquien, die heute seinen Namen tragen.

[**] Laues Enkel, Christian Matthaai, zeigte mir 2005 diesen Erlass.

1942, dann übersiedelte er nach Berlin und übernahm nach Debyes Flucht aus Deutschland den Direktorenposten am KWI für Physik.

Friedrich Hund trat 1929 Wentzels Nachfolge als Professor für mathematische Physik in Leipzig an und blieb bis 1946. Während der Nazizeit verteidigte er die Physik ebenso wie Heisenberg gegen die Angriffe der Verfechter einer „Deutschen Physik“.^[96]

7. Die Hauptakteure der physikalischen Chemie in Berlin und Leipzig nach der Quantenrevolution

Abbildung 12 zeigt Porträts der wichtigsten Physikochemiker in Berlin und Leipzig in der Zeit nach der Quantenrevolution. Eugene Wigner und Friedrich Hund würden hier ebenfalls hingehören.



Abbildung 12. Die Hauptakteure der theoretischen und der physikalischen Chemie nach der Quantenrevolution, die mit Einrichtungen in Berlin und Leipzig verbunden waren (nicht gezeigt sind diejenigen aus den Abbildungen 4, 5, 10 und 11). Von links nach rechts: Otto Sackur (1880–1914), Michael Polanyi (1891–1976), Fritz London (1900–1954), Henry Eyring (1901–1981), Rudolf Ladenburg (1882–1952).

Wigners Mentor in Berlin war **Michael Polanyi**, auch er ein „ungarischer Marsianer“. Er war anerkannter Physikochemiker, Neu-Keynesianer, Wissenschaftsphilosoph und -soziologe sowie Intellektueller^[97] und hinterließ ein Erbe, das noch heute Anregungen für zahlreiche wissenschaftliche Texte liefert.^[98] Dudley Herschbach vertraute mir an, „no one else impressed [him] as living ‘the life of the mind’ so intensely“.^[99] Polanyi, der ab 1920 an Habers KWI arbeitete, befasste sich mit der Struktur der Cellulose, Kristallen, der Physisorption, der heterogenen Katalyse und der Reaktionskinetik, seinem wichtigsten Thema. Mit seinen jungen Wissenschaftlern, die ein einander vertrauendes, aber kritisches Team bildeten, legte er den konzeptionellen Grundstein für eine kinetische Theorie, die in Einklang mit der neuen Quantenmechanik war. Diesem Team gehörten Eugene Wigner, **Fritz London** (Schrödingers Assistent in Berlin) und **Henry Eyring** an, der mit einem Stipendium des National Research Council als Gast aus den USA gekommen war.

Mit ihrer wegweisenden Veröffentlichung von 1931 über die Quantenmechanik der Bildung und Brechung chemischer Bindungen^[50] führten Polanyi und Eyring die visuelle Metapher für das Verständnis des Prozesses ein: „Der chemische Ausgangs- und Endzustand sind zwei Minima der Energie, die von einer Kette von Energiebergen getrennt sind“. Als Modellreaktion betrachteten sie den H-Atom-Austausch in der Reaktion $H + H_2$, von der man annahm, dass sie eine Rolle bei der Umwandlung von Ortho- in Parawasserstoff spielte.

Diese Umwandlung wurde an Habers KWI von Karl Friedrich Bonhoeffer und seinen berühmten Mitarbeitern, darunter den Farkas-Brüdern, erforscht. Kurz darauf stellten Polanyi und Eyring ihre semiempirische Methode vor, bei der spektroskopische Daten verwendet werden, um die Schätzung der elektronischen Energie zu verfeinern. Wigner kombinierte schließlich gemeinsam mit Hans Pelzer die semiempirische Potentialhyperfläche mit Erwägungen aus der statistischen Mechanik zu einer Analyse der Reaktionsgeschwindigkeiten. Diese Analyse wurde zum Ausgangspunkt für die Theorie vom Übergangszustand bzw. aktivierten Komplex.^[60]

Polanyis Jahre in Berlin, über die Wigner sagte,^[97] „I doubt [Polanyi] was ever again as happy as he had been in Berlin“, endeten 1933 mit der Machtergreifung durch die Nazis und der erzwungenen Emigration Polanyis. In seinen späteren Werken über die Soziologie der Wissenschaft, als deren Begründer er gilt, nutzte er seine Berliner Erfahrungen als Ausgangspunkt für seine Überlegungen zur Freiheit der Forschung und zur Selbstorganisation einer idealen wissenschaftlichen Gemeinschaft.

In den frühen 1920er Jahren, nach James Francks Übersiedlung nach Göttingen, übernahm **Rudolf Ladenburg** dessen Abteilung für Physik am Haberschen KWI. Ladenburg und seine Mitarbeiter leisteten Pionierarbeit auf dem Gebiet der Dispersion, die eine zentrale Rolle bei der Entwicklung der Quantentheorie im Allgemeinen und der Formulierung der Matrizenmechanik von Werner Heisenberg im Besonderen spielte. Ab etwa 1930 präsentierte Ladenburg in einer Artikelserie den ersten Nachweis der stimulierten Emission.^[60]

Die Literatur über chemische Physik und Spektroskopie wimmelt von Verweisen auf **Friedrich Hunds** Arbeiten, wie die Hundsche Regel oder die Hundschen Kopplungsfälle. Sein Beitrag zur Molekülorbitaltheorie erhielt von seinem international renommierten Doppelgänger Robert Mulliken viel Anerkennung. Mulliken, der 1966 allein den Nobelpreis für diese Theorie erhalten hatte, nannte sie später nur die „Hund-Mulliken-Theorie“.^[100]

Das Foto ganz links in Abbildung 12 zeigt Otto Sterns Doktorvater, **Otto Sackur**. Sackur war ein Pionier der statistischen Quantenmechanik. Er wurde bekannt für die Herleitung eines Ausdrucks für die Entropie eines (idealen) Gases: der Sackur-Tetrode-Gleichung. Haber holte ihn Ende 1913 an sein KWI, wo er nach Ausbruch des Ersten Weltkriegs der Militärforschung zugeteilt wurde. Im Dezember 1914 starb er bei einem Laborunfall an seiner Werkbank beim Versuch, Cacodylchlorid für die Verwendung als Reizstoff und Treibladung zu bändigen.^[101]

8. Das Empyreum – der höchste Himmel – der Wissenschaft

Anlässlich des Aufbruchs von James Franck nach Göttingen fand sich 1920 eine bemerkenswerte Gesellschaft in Berlin zusammen, von der das Foto in Abbildung 13 einen Eindruck vermittelt. Auf den Sofalehnen sitzen Herr Physik und Herr Chemie – Einstein und Haber. James Franck,



Abbildung 13. Abschiedsfeier für James Franck (1920) vor seiner Abreise von Berlin-Dahlem nach Göttingen. Sitzend von links nach rechts: Hertha Spomer, Albert Einstein, Ingrid Franck, James Franck, Lise Meitner, Fritz Haber, Otto Hahn; stehend: Walter Grottrian, Wilhelm Westphal, Otto von Baeyer, Peter Pringsheim, Gustav Hertz.

flankiert von seiner Frau und Lise Meitner, scherzt mit seiner Assistentin Hertha Spomer, während Otto Hahn sich bereit macht, in die Konversation einzugreifen. In der hinteren Reihe stehen Gustav Hertz, Peter Pringsheim, Otto von Baeyer, Wilhelm Westphal und Francks Assistent Walter Grottrian.^[60] Dieses Foto verkörpert das, was der hervorragende Biochemiker und Essayist Erwin Chargaff vor Augen gehabt haben muss, als er das Berlin der Weimarer Republik als das „very empyrean [highest heaven] of science“ bezeichnete.^[102]

Walter Grottrian, ein bekannter Spektroskopiker zur Entstehungszeit des Fotos, wählte später den Himmel und den der Erde nächsten Stern zu seinem Forschungsgebiet.^[103] Er wurde 1922 Sonnenforscher am Potsdamer Astrophysikalischen Observatorium und 1927 Professor an der Universität Berlin. Der Ruf an das Observatorium kam, als der Einsteinurm – ein Entwurf des großen Expressionisten Erich Mendelsohn – in Betrieb ging. Der Turm beherbergte ein Sonnenteleskop mit einem der damals größten Spektrographen. Sein Hauptzweck sollte die Überprüfung der allgemeinen Relativitätstheorie durch die Messung von Spektrallinien-Verschiebungen durch das Gravitationsfeld der Sonne sein. Das Observatorium wurde 1924 in Einsteins funktionsbedingtem Beisein (als Vorsitzender des Kuratoriums) eingeweiht.

Walter Grottrian hatte ein Hobby: er schrieb Theaterstücke. Eines davon war ein „physikalischer Einakter“ (Abbildung 14), der 1938 für ein Fest der Physik zu Max Plancks 80. Geburtstag einstudiert wurde.^[104] Wie man sich vorstellen kann (oder auch nicht), muss es recht schwierig gewesen sein, 1938 in Deutschland etwas zu schreiben, das humorvoll und dabei politisch unanfechtbar war. Fehlender guter Wille auf der Seite der Nazibehörden, die Geburtstagsfeier überhaupt zu dulden, erschwerte die Sache. Also versuchte das Stück in einer Mischung aus Kinder- und Wissenschaftlerhumor (einige werden meinen, das liefe auf dasselbe hinaus), die Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums zu behandeln. Dazu wurden Versuchspersonen auf der Bühne (verdeckt) Witze vorgelesen; deren „Hahaha“ diente dann zur Bestim-

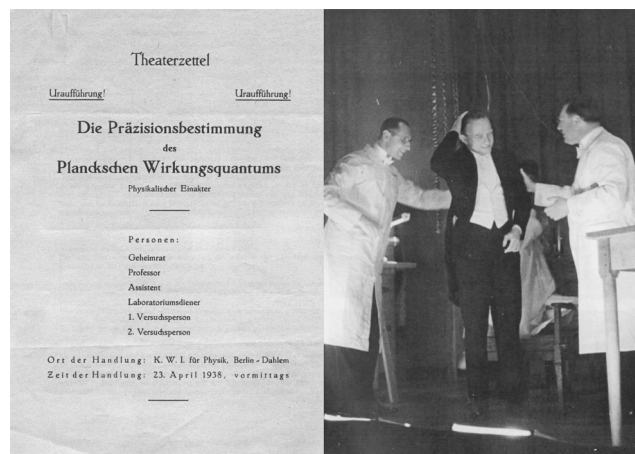


Abbildung 14. Programm und Bühnenfoto eines Stücks von Walter Grottrian, aufgeführt im Harnack-Haus beim Fest der Physik anlässlich des 80. Geburtstags von Max Planck. Das Foto zeigt von links nach rechts Herbert Stuart, Werner Heisenberg und Peter Debye als Schauspieler in dem Einakter.

mung des „ h “, d. h. von h . Der Wert wurde Planck, der nahe der Bühne saß, per Telegramm übermittelt. Das Stück hatte eine Starbesetzung: Arnold Sommerfeld, Peter Debye, Werner Heisenberg, Walter Gerlach, Herbert Stuart und Ernst Ruska. Ruska verkörperte einen folkloristischen berlinern-den Charakter, der die besten Witze machte.

Max von Laues heiseres Lachen war berühmt, und vielleicht hatte dieses Lachen die Handlung des Stückes inspiriert. Jedenfalls war Berlin zu jener Zeit kaum noch der höchste Himmel der Wissenschaft. Es würde vielmehr innerhalb weniger Jahre zu einer regelrechten Hölle werden. Dem Himmel sei Dank, dass von Laue, Bonhoeffer, Grottrian und ihresgleichen überlebten und herbeigeholt werden konnten, um das Empyreum der Wissenschaft zu seiner einstigen Größe zurückzuführen.

Danksagung

Mein Dank gilt Prof. Peter Saalfrank (Universität Potsdam) für die Einladung, auf dem 51. Symposium über Theoretische Chemie am 20. September 2015 den Einführungsvortrag zu halten. Der Vortrag und sein geographischer Fokus dienten als Grundlage für diesen Abriss, dessen Rahmen erweitert wurde, als Prof. Knut Asmis mich zu einem Kolloquium am Wilhelm-Ostwald-Institut der Universität Leipzig einlud (19. Oktober 2015). Danken möchte ich auch Prof. Dieter Hoffmann (Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte), Dr. Phil Bunker (National Research Council, Ottawa) und Dr. Wieland Schöllkopf (Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft) für die kritische Lektüre des Manuskripts, Dirk Andrae (Freie Universität Berlin) für seine Kommentare und Prof. Rudolf Zahradnik (Akademie der Wissenschaften der Tschechischen Republik) für die freundliche Ermutigung. Ganz besonders möchte ich mich bei Bea Wieczorek für die Übersetzung aus dem Englischen und bei Dr. Wieland Schöllkopf für das wissenschaftliche Lektorat der Übersetzung bedanken.

Zitierweise: *Angew. Chem. Int. Ed.* **2016**, 55, 5378–5392
Angew. Chem. **2016**, 128, 5466–5481

- [1] Lawrence Principe, *Nature* **2011**, 469, 30–31.
- [2] Robert Boyle, *Certain physiological essays and other tracts written at distant times, and on several occasions by the honourable Robert Boyle; wherein some of the tracts are enlarged by experiments and the work is increased by the addition of a discourse about the absolute rest in bodies*, 1669, Herringman, London.
- [3] Michail Lomonossow, *Einführung in die wahre physikalische Chemie*, 1752.
- [4] J. L. Heilbron, *Weighing Imponderables and Other Quantitative Science around 1800 (Berkeley Papers in History of Science 1993, 13)*.
- [5] J.-L. Proust, *Ann. Chim.* **1799**, 32, 26–54.
- [6] J.-L. Gay-Lussac, *Mém. Soc. d'Arcueil* **1809**, 2, 207–234.
- [7] Isaac Newton, *Principia*, Sec.V, Proposition XXI, Theorem XVI.
- [8] *The Cambridge Companion to Newton* (Hrsg.: I. B. Cohen, G. Smith), Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
- [9] J. Dalton, *A New System of Chemical Philosophy*, Bickerstaff, London, 1808.
- [10] Beitrag über J. J. Berzelius in *Complete Dictionary of Scientific Biography*, Charles Scribner's Son, New York, 2008 (8. Februar 2016), <http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-2830900428.html>.
- [11] J. J. Berzelius, *Ann. Phys. Chem.* **1830**, 19, 305–335.
- [12] P. Waage, C. M. Guldberg, *Forhandlinger: Videnskabs-Selskabet i Christiania* **1864**, 35; englische Übersetzung: P. Waage, C. M. Guldberg, *J. Chem. Educ.* **1986**, 63, 1044–1047.
- [13] J. van't Hoff, *Etudes de dynamique chimique*, Muller, Amsterdam, 1884.
- [14] S. A. Arrhenius, *Z. Phys. Chem.* **1889**, 4, 226–248.
- [15] S. Arrhenius, *Recherches sur la conductivité galvanique des électrolytes*, P. A. Norstedt und Söner, Stockholm, 1884.
- [16] „Zur Thermodynamik chemischer Vorgänge“: H. von Helmholtz in *Mathematische und naturwissenschaftliche Mittheilungen aus den Sitzungsberichten der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 1882.
- [17] J. W. Gibbs, *Trans. Conn. Acad. Arts Sci.* **1874–1878**, 3, 108–248, J. W. Gibbs, *Trans. Conn. Acad. Arts Sci.* **1874–1878**, 3, 343–524.
- [18] G.-C. Rota, *Indiscrete Thoughts*, Birkhäuser, Boston, 1997.
- [19] *Thermodynamische Studien von J. Willard Gibbs*, W. Engelmann, Leipzig, 1892.
- [20] J. W. Gibbs, *Elementary Principles in Statistical Mechanics*, Scribner's, New York 1902, S. ix.
- [21] R. Anderson, *European Universities from the Enlightenment to 1914*, Oxford University Press, Oxford, 2004.
- [22] J. Servos, *Physical Chemistry from Ostwald to Pauling*, Princeton University Press, Princeton 1990.
- [23] „The Development of Chemical Research“: *Nature* **1901**, 64, 430–431; siehe auch H. C. Bolton, *A Select Bibliography of Chemistry 1492–1897*, Smithsonian Institution, Washington, 1901.
- [24] W. Ostwald, *Z. Phys. Chem.* **1887**, 1, 1–4.
- [25] H. Kragh, *Quantum Generations: a History of Physics in the Twentieth Century*, Princeton University Press, Princeton, 1999.
- [26] M. Planck, *Verh. Dtsch. Phys. Ges.* **1900**, 2, 202–204.
- [27] A. Pais, *Subtle is the Lord*, Oxford University Press, Oxford, 1982.
- [28] A. Einstein, *Ann. Phys.* **1905**, 17, 132–148.
- [29] A. Einstein, *Ann. Phys.* **1907**, 22, 180–190.
- [30] N. Bohr, *Philos. Mag.* **1913**, 26, 1–24.
- [31] A. Einstein, *Ann. Phys.* **1905**, 17, 549–560.
- [32] J. Perrin, *Ann. Chim. Phys.* **1909**, 18, 5–114.
- [33] W. Friedrich, P. Knipping, M. Laue, *Sitzungsber.-Bayer. Akad. Wiss. Math.-Phys. Kl.* **1912**, 303–322.
- [34] W. H. Bragg, W. L. Bragg, *Proc. R. Soc. London Ser. A* **1913**, 88, 428–438; siehe auch P. Forman, *Arch. History Exact Sci.* **1969**, 6, 38–71.
- [35] G. N. Lewis, *J. Am. Chem. Soc.* **1916**, 38, 762–785.
- [36] I. Langmuir, *J. Am. Chem. Soc.* **1919**, 41, 868–934; siehe auch R. E. Kohler, *Hist. Stud. Phys. Sci.* **1974**, 4, 39–87.
- [37] W. Gerlach, O. Stern, *Z. Phys.* **1922**, 8, 110–111; siehe auch B. Friedrich, D. Herschbach, *Phys. Today* **2003**, 56, 53–59.
- [38] G. E. Uhlenbeck, S. Goudsmit, *Naturwissenschaften* **1925**, 47, 953–954.
- [39] F. Hund, *Z. Phys.* **1927**, 40, 742–764; F. Hund, *Z. Phys.* **1927**, 43, 805–826.
- [40] Siehe z. B. B. Friedrich, *Found. Chem.* **2004**, 6, 117–132.
- [41] „Über die Erhaltungssätze in der Quantenmechanik“: E. Wigner, *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl.* **1927**, 375–381; siehe auch: „The emergence of selection rules and their encounter with group theory: 1913–1927“: A. Borrelli, *Stud. History Philos. Modern Phys.* **2009**, 40, 327–337.
- [42] P. A. M. Dirac, *Proc. R. Soc. London Ser. A* **1929**, 123, 714–733.
- [43] W. Heitler, F. London, *Z. Phys.* **1927**, 44, 455–472.
- [44] M. Born, R. Oppenheimer, *Ann. Phys.* **1927**, 84, 457–484.
- [45] L. H. Thomas, *Proc. Cambridge Phil. Soc.* **1927**, 23, 542–548.
- [46] E. Fermi, *Rend. Accad. Naz. Lincei* **1927**, 6, 602–607.
- [47] D. R. Hartree, *Math. Proc. Cambridge Philos. Soc.* **1928**, 24, 89–110.
- [48] K. Gavroglu, A. Simoes, *Neither Physics nor Chemistry, A History of Quantum Chemistry*, The MIT Press, Cambridge, 2012.
- [49] F. London in *Probleme der modernen Physik (Sommerfeld Festschrift)* (Hrsg.: P. Debye), Hirzel, Leipzig, **1928**, S. 104.
- [50] M. Polanyi, H. Eyring, *Z. Phys. Chem.* **1931**, 12, 279–311.
- [51] J. H. Van Vleck, A. Sherman, *Rev. Mod. Phys.* **1935**, 7, 167–228.
- [52] C. A. Coulson, *Proc. R. Soc. London Ser. A* **1951**, 207, 63–73.
- [53] E. Wigner, *Phys. Rev.* **1934**, 46, 1002–1011.
- [54] M. Evans, M. Polanyi, *Trans. Faraday Soc.* **1935**, 31, 875–894.
- [55] H. Eyring, *J. Chem. Phys.* **1935**, 3, 107–115.
- [56] J. Van Vleck, *J. Chem. Phys.* **1935**, 3, 807–813.
- [57] J. Van Vleck, *Int. J. Quantum Chem.* **1971**, 5, 3–20.
- [58] L. Sutton, M. Davies, *The History of the Faraday Society*, Royal Society of Chemistry, London, 1996.
- [59] W. Jänicke, *100 Jahre Bunsen-Gesellschaft*, Steinkopff, Darmstadt, 1994.
- [60] J. James, T. Steinhauser, D. Hoffmann, B. Friedrich, *One Hundred years at the Intersection of Chemistry and Physics*, De Gruyter, Berlin, 2011; siehe auch B. Friedrich, J. James, D. Hoffmann, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, 50, 10022–10049; *Angew. Chem.* **2011**, 123, 10198–10225.
- [61] N. F. Mott, *Biogr. Mem. Fellows R. Soc.* **1955**, 1, 174–176.
- [62] H. Urey, H. A. Barton, *Records of Henry A. Barton*, American Institute of Physics, College Park, 1932.
- [63] R. Feynman, *Int. J. Theor. Phys.* **1982**, 21, 467–488.
- [64] Siehe beispielsweise H. Wang, S. Kais, A. Aspuru-Guzik, M. R. Hoffmann, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2008**, 10, 5388–5393.
- [65] „Some scientific centres. II.—The laboratory of Wilhelm Ostwald“: *Nature* **1901**, 64, 428–430.
- [66] J.-P. Domschke, P. Lewandowski, *Wilhelm Ostwald*, Urania, Leipzig, 1982.
- [67] E. Sifton, F. Stern, *The Tragedy of Dietrich Bonhoeffer and Hans von Dohnanyi (New York Review of Books, 2012, Ausgabe vom 25. Oktober; <http://www.nybooks.com/articles/archives/2012/oct/25/tragedy-dietrich-bonhoeffer-and-hans-von-dohnanyi/>)*.
- [68] Siehe beispielsweise O. N. Witt, *J. Chem. Soc. Trans.* **1911**, 99, 1646–1668.

- [69] Siehe <http://materials.springer.com/welcome>.
- [70] J. H. van't Hoff, *Biographical, Nobel Lectures, Chemistry 1901–1921*, Elsevier, Amsterdam, **1996**, http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1901/hoff-lecture.pdf.
- [71] J. H. van't Hoff, *Arch. Neerl. Sci. Exactes Nat.* **1874**, 9, 445–454.
- [72] L. Pauling, *J. Am. Chem. Soc.* **1931**, 53, 1367–1400.
- [73] J. van't Hoff, *Nobel Lecture: Osmotic Pressure and Chemical Equilibrium*, **1901**, <http://Nobelprize.org>.
- [74] D. K. Barkan, *Walther Nernst and the Transition to Modern Physical Science*, Cambridge University Press, **1999**.
- [75] V. Smil, *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production*, MIT Press, Cambridge, **2000**.
- [76] „The Gas War, 1915–1918: if not a war-winner, hardly a failure“: E. Spiers in *100 Years of Chemical Warfare* (Hrsg.: B. Friedrich, D. Hoffmann, J. Renn, F. Schmaltz, M. Wolf), Springer, Berlin, **2016**.
- [77] M. Szöllösi-Janze, *Fritz Haber 1868–1934: Eine Biographie*, C. H. Beck, München, **1998**.
- [78] W. Nernst, *Z. Elektrochem.* **1931**, 37, 341.
- [79] D. Herschbach, *Mol. Phys.* **2012**, 110, 1549–1590.
- [80] H. Gerischer, *Ber. Bunsen-Ges.* **1994**, 98, 1482–1495.
- [81] *Lexikon der bedeutenden Wissenschaftler* (Hrsg.: D. Hoffmann, H. Laitko, S. Müller-Wille), Elsevier, München, **2004**, S. 402–403.
- [82] M. Meulders, *Helmholtz: From Enlightenment to Neuroscience*, MIT Press, Cambridge, **2010**.
- [83] *Quantum Theory Centenary* (Hrsg.: A. M. Bradshaw), Deutsche Physikalische Gesellschaft, Bad Honnef, **2000**.
- [84] H. Kragh, *Phys. World* **2000**, 13, 31–35.
- [85] F. Hund, *Geschichte der Quantentheorie*, Bibliographisches Institut, Mannheim, **1975**.
- [86] F. Stern, *Einstein's German World*, Princeton University Press, Princeton und Oxford, **1999**.
- [87] S. Grundmann, *The Einstein Dossier*, Springer, Berlin, **2004**.
- [88] „A. Einstein, M. von Laue, Peter Debye und das Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik in Berlin (1917–1939)“: H. Kant in *Das Harnack-Prinzip – Die Kaiser-Wilhelm-/Max-Planck-Gesellschaft und ihre Institute* (Hrsg.: B. Vom Brocke, H. Laitko), de Gruyter, Berlin, **1996**, S. 227–243; „P. Debye“: H. Kant in *The Emergence of Modern Physics: proceedings of a conference commemorating a century of physics, Berlin, 22–24 March 1995* (Hrsg.: D. Hoffmann, D. Hoffmann, F. Bevilacqua, R. H. Stuewer), Università degli studi di Pavia, **1996**, S. 507–520.
- [89] „Peter Debye (1884–1966): Ein typischer Wissenschaftler in untypischer Zeit“: D. Hoffmann, *Gewina* **2006**, 29, 141–168.
- [90] K. Zeitz, *Max von Laue (1879–1960)*, Steiner, Stuttgart, **2006**.
- [91] D. Hoffmann, M. Walker, *Physiker zwischen Autonomie und Anpassung: Die Deutsche Physikalische Gesellschaft im Dritten Reich*, Wiley-VCH, Weinheim, **2006**.
- [92] J. Lemmerich, *The Life of James Franck*, Stanford University Press, Stanford, **2011**.
- [93] S. A. Rice, J. Jortner, *James Franck 1882–1964: A Biographical Memoir*, National Academy of Science Washington, DC, **2010**.
- [94] I. Hargittai, *The Martians of Science: Five Physicists Who Changed the Twentieth Century*, Oxford University Press, Oxford, **2006**.
- [95] A. Szanton, *The Recollections of Eugene P. Wigner: As Told To Andrew Szanton*, Basic Books, Cambridge, **1992**.
- [96] M. Walker, *Nazi science: Myth, truth, and the German atomic bomb*, Harper Collins, New York, **1995**.
- [97] M. J. Nye, *Michael Polanyi and His Generation: Origins of the Social Construction of Science*, The University of Chicago Press, Chicago, **2011**.
- [98] B. Friedrich, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2012**, 51, 2–4; *Angew. Chem.* **2012**, 124, 2–2.
- [99] D. Herschbach, (Harvard University), persönliche Mitteilung, **2015**.
- [100] „Spectroscopy, Molecular Orbitals, and Chemical Bonding“: R. S. Mulliken in *Nobel Lectures, Chemistry 1963–1970*, Elsevier, Amsterdam, **1972**, S. 131–160.
- [101] M. Badino, B. Friedrich, *Phys. Perspective* **2013**, 15, 295–319.
- [102] E. Chargaff, *Heraclitean Fire: Sketches from a Life before Nature*, Rockefeller University Press, New York, **1978**.
- [103] *Lexikon der bedeutenden Naturwissenschaftler, Band 2* (Hrsg.: D. Hoffmann, H. Laitko, S. Müller-Wille), Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, **2004**, S. 126–127.
- [104] D. Hoffmann, H. Röbler, G. Reuther, *Ber. Wissenschaftsgesch.* **2010**, 30, 30–53.

Eingegangen am 4. Oktober 2016
Online veröffentlicht am 24. März 2016