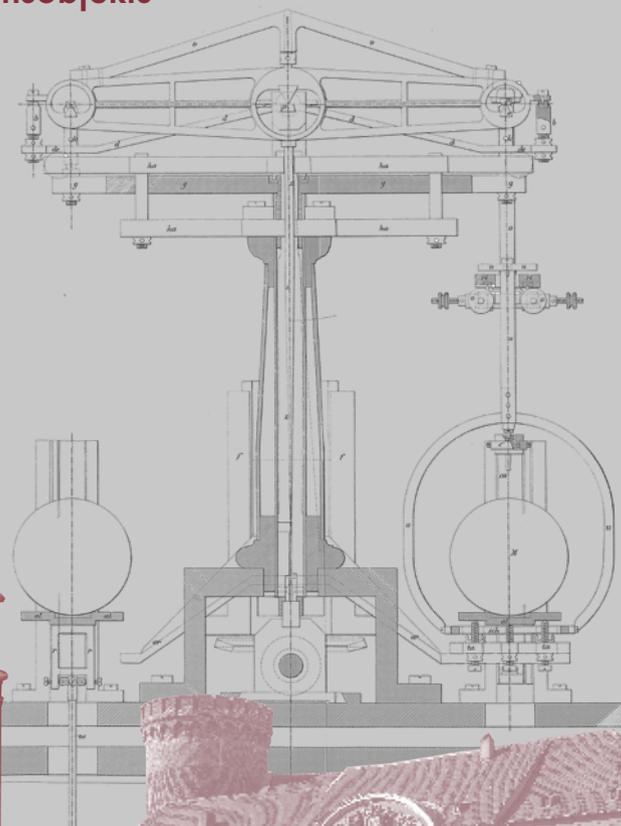


# Studies 3

Hartmut Petzold

## Eine Berliner Waage im Münchner Deutschen Museum Geschichte, Hintergründe und Aktualität eines Museumsobjekts



Deutsches Museum



Eine Berliner Waage im Münchner Deutschen Museum  
Geschichte, Hintergründe und Aktualität eines Museumsobjekts

## **Deutsches Museum Studies**

Herausgegeben von

Eva Bunge, Frank Dittmann, Ulf Hashagen, Marisa Pamplona-Bartsch,  
Matthias Röschner, Helmuth Trischler

Band 3

**Petzold, Hartmut**, Dipl.-Ing., Dr. phil., Studium der Elektrotechnik und Geschichte.  
Bis 2009 Kurator für die Sammlungen und Ausstellungen Informatik, Mathematische  
Instrumente, Zeitmessung, Maß und Gewicht am Deutschen Museum in München.

Hartmut Petzold

**Eine Berliner Waage  
im Münchner Deutschen Museum  
Geschichte, Hintergründe und Aktualität  
eines Museumsobjekts**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind  
im Internet unter <http://dnb.de> abrufbar.

Hartmut Petzold, »Eine Berliner Waage im Münchner Deutschen Museum«  
1. Auflage

© Deutsches Museum Verlag, 2020

Alle Rechte vorbehalten

Redaktion: Forschungsinstitut Deutsches Museum

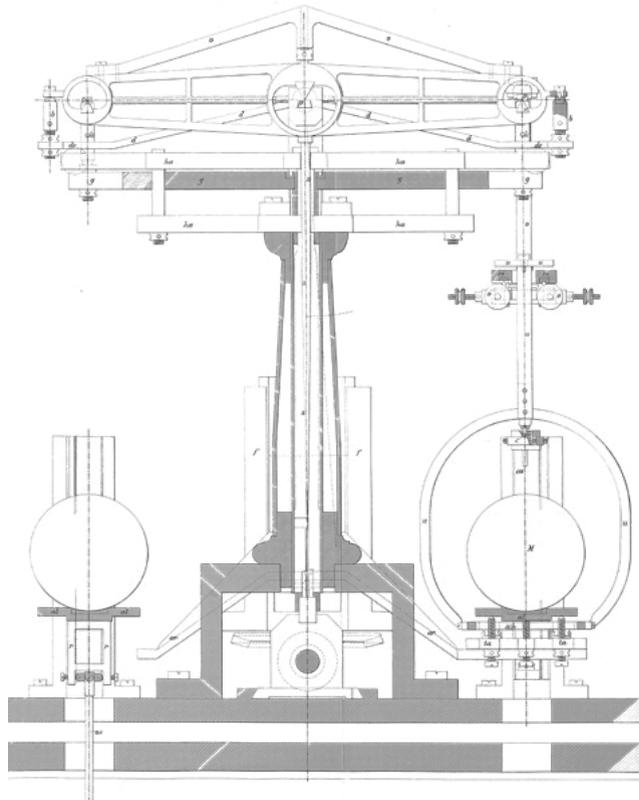
Satz, Layout, Umschlaggestaltung: Jutta Esser

Einzel motive des Umschlags: Abb. 18 sowie Zitadelle Spandau, Kommandantenhaus  
und Juliesturm, Foto: Friedhelm Hoffmann und Richarz/Krigar-Menzel, *Waage*, 1899, S. 44  
(ist auch Frontispiz).

Druck und Bindung: Wenzel GmbH, München

ISSN 2365-9149

ISBN 978-3-940396-89-1



## Inhalt

|     |  |
|-----|--|
| 9   | <u>Nachgeholte Recherchen zu einer unbeachteten Waage im Deutschen Museum</u>  |
| 21  | <u>Newtons Gravitationsgesetz; Gravitationskonstante und mittlere Erddichte; absolute Messung</u>  |
| 30  | <u>Vorausgegangenes: Philipp von Jolly, Hermann von Helmholtz, einheitliches Kilogramm und Astrophysik</u>   |
| 30  | <u>Vorspiel in der Hauptstadt des Königreichs Bayern. Philipp von Jollys »Anwendung der Wage auf Probleme der Gravitation«</u>                     |
| 42  | <u>Einführung des metrischen Systems im Norddeutschen Bund und im deutschen Kaiserreich. Ein kurzer Blick nach Paris und Sèvres</u>                |
| 48  | <u>Hermann Helmholtz, preußischer Mediziner Physiologe und Physiker</u>  |
| 53  | <u>Direktor des physikalischen Instituts der Berliner Universität</u>  |
| 55  | <u>England als Vorbild für Berlin – Berlin als Vorbild für England</u>   |
| 58  | <u>Hermann von Helmholtz. Mitinitiator und Gründungspräsident der Physikalisch Technischen Reichsanstalt. Hausherr des Salons seiner Frau Anna</u> |
| 71  | <u>»Absolute Messung der Gravitation« und Messung der Lichtgeschwindigkeit als »wichtige Aufgaben« der Physik</u>                                  |
| 76  | <u>Verwendung des Pendels zur Bestimmung der mittleren Erddichte und der Gravitationskonstante am Astrophysikalischen Institut in Potsdam</u>      |
| 79  | <u>Poyntings Messungen in Cambridge und Birmingham</u>   |
| 82  | <b><u>Das Berlin-Spandauer Gravitationsmessungsprojekt</u></b>   |
| 82  | <u>Drei akademische Karrieren als Voraussetzung und Hintergrund des Projekts</u>   |
| 92  | <u>Der Antrag an die königlich preußische Akademie der Wissenschaften</u>  |
| 96  | <u>Paul Stückrath, Mechaniker in Friedenau. Aktuelle Waagentechnologie</u>   |
| 102 | <u>»Gravitationskonstante« oder »mittlere Erddichte«? Metronomisches Institut oder Spandauer Zitadelle?</u>  |
| 106 | <u>Aufbau des Messplatzes</u>  |
| 114 | <u>Scheitern des ursprünglichen Plans</u>  |
| 119 | <u>Thiesens Messungen mit der Balkenwaage in Sèvres und Berlin</u>   |
| 126 | <u>Fortsetzung und Abschluss der Arbeiten in der Spandauer Zitadelle nach verändertem Konzept</u>  |
| 131 | <u>Messungsergebnisse</u>  |

- 134 Einige für die Technik des Waagenbaus »lehrreiche Erfahrungen«
- 136 Neue Messungen mit der Torsionswaage in England, Böhmen und Ungarn
- 143 Beurteilung der anderen Messungsprojekte durch Krigar-Menzel und Richarz
- 145 Vorschlag für ein weiterführendes Projekt
- 147 Ein wenig spektakuläres wissenschaftliches Projekt –  
eine wenig spektakuläre wissenschaftliche Karriere**
- 147 Militarisierung der aufstrebenden Industriegesellschaft
- 148 Ungewissheiten und Brüche in der Karriere Krigar-Menzels
- 152 Einblicke in das »kümmerliche Leben« des Privatdozenten Krigar-Menzel
- 154 Ein Professor zwischen wissenschaftlicher und beruflicher Heimat
- 160 Denkmäler für Helmholtz
- 162 Ein vorsichtiger Vorschlag von Max Planck
- 167 »Früher oder später kommt alles ins Museum«**
- 167 Die Waage wird Museumsobjekt
- 172 Ein nachempfundenes Modell im Museum der Spandauer Zitadelle
- 178 Wege zum »heute«: So viele Messungen wie möglich. Maße nicht nur für »irdische  
Kulturen«. International verwaltete Gravitationskonstante. Museen für Messungs-  
ergebnisse und Artefakte
- 185 Danksagung**
- 186 Anhang**
- 186 Archivalien
- 186 Literatur
- 199 Personenregister
- 203 Abbildungsverzeichnis



## Nachgeholte Recherchen zu einer unbeachteten Waage im Deutschen Museum

Wer beim Besuch des riesigen Deutschen Museums in München die Zeit für eine genauere Betrachtung der Dauerausstellung »Maß und Gewicht« findet, die voraussichtlich im Zuge der anstehenden Sanierung und Erneuerung aller Ausstellungen des Deutschen Museums demnächst für einige Jahre geschlossen sein wird, kann in einer Ecke eine Waage entdecken, an deren Balkenenden nicht nur jeweils eine Waagschale aufgehängt ist, sondern an deren Balkenenden an langen



1a Präzisionswaage von Paul Stückrath in der ständigen Ausstellung »Maß und Gewicht« des Deutschen Museums.

Drähten untereinander im großen Abstand jeweils zwei Waagschalen hängen. Wen die Neugier dann auch noch zu einer genaueren Betrachtung treibt, der entdeckt einen sorgfältig gearbeiteten Mechanismus, mit dem das einfache Grundprinzip dieses ältesten aller Waagentypen auf besondere Weise zur Geltung gebracht wird. Die Erklärungstafel teilt mit: »Präzisionswaage mit der Richarz und Krigar-Menzel 1884–96 die Abnahme des Gewichts mit der Höhe und die Anziehung zweier Massen auf 1,6 Promille genau bestimmt haben. Die Messungen führten zu einem genauen Wert der Gravitationskonstanten und erlaubten damit, die Gesamtmasse und mittlere Dichte der Erde zu bestimmen, die Erde also gleichsam zu »wiegen«.«<sup>1</sup>

Als zuständiger Kurator hatte ich mich immer erneut gefragt, was es mit dieser Messung auf sich hatte. Während ich schnell herausfand, dass es sich bei den beiden Persönlichkeiten um die Physiker Franz Richarz (1860–1920) und Otto Krigar-Menzel (1861–1929) handelte, wurde auch klar, dass weitere Nachforschungen größeren Aufwand erfordern würden. Trotzdem nahm ich mir immer wieder vor, der Sache auf den Grund zu gehen. Obwohl die augenscheinlich äußerst genaue Waage wie auch der Text und die Größe der Tafel dafür sprachen, dass sie ein besonderes Ereignis in der Geschichte der Naturwissenschaften repräsentierte, erschienen diese Nachforschungen nie besonders dringlich. Tatsächlich wurde ich während meiner gesamten Zeit am Deutschen Museum auf diese Waage nie angesprochen – ganz im Gegensatz zu anderen, auch weniger spektakulären Objekten. Weder meine Kollegen innerhalb des Museums noch einer der zahlreichen Lehrer, die ihre Schulklassen durch das Museum führten, noch ein Journalist von einer Zeitung, vom Radio oder vom Fernsehen, aber auch keiner der die Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik erforschenden Historiker scheint bisher ein Motiv gefunden zu haben, das dieses Objekt in den Fokus des Interesses gerückt hätte. Aufgrund der Bearbeitung dringlicherer Fragen habe auch ich meine Beschäftigung damit immer erneut verschoben – letztlich bis zu meinem Ausscheiden aus dem Deutschen Museum.<sup>2</sup>

Dass ich mich einige Jahre später der Geschichte dieser Waage und dem mit ihr unternommenen Gravitationsmessungsprojekt erneut zuwandte, ergab sich, als ich mich aufgrund meines Umzugs nach Berlin auch dort immer wieder an beides erinnerte. Dabei weitete sich mein Blick darauf nicht nur aus, sondern er wurde mit jeder der dann entdeckten Einzelheiten in eine neue Richtung gelenkt. Dies galt bereits für die verschiedenen Berliner Örtlichkeiten, an denen das historische Unternehmen geplant, gestaltet und schließlich durchgeführt worden war. So war es der im letzten Viertel des 19. Jahrhunderts neu entstehende und sich zur Brut-

<sup>1</sup> Eintrag im Eingangsbuch des Deutschen Museums Präzisionswaage (Doppelwaage) von Paul Stückrath, 1884 Original, Inv.-Nr. 25082. »Wage [sic] und Versuchsanordnung zur Bestimmung der mittleren Erddichte«. Stifter: Richarz, F. Marburg.

<sup>2</sup> Inzwischen findet man auf der Website des Deutschen Museums ein Foto der Waage: <http://www.deutsches-museum.de/ausstellungen/naturwissenschaft/mass-gewicht/> (19.8.2019).

stätte der Feinmechanik entwickelnde Berliner Vorort Friedenau, in dem die Waage konstruiert und gebaut wurde. Die Wägungen selbst fanden dagegen in der Nachbarstadt Spandau statt, deren Geschichte weiter zurückreicht als die der preußischen Hauptstadt Berlin, mit der sie zur Zeit der Wägungen längst durch die Eisenbahn verbunden war. Auch der am Ende des 19. Jahrhunderts schnell expandierende Vorort Charlottenburg und der Telegrafenberg bei der ebenfalls mit der Eisenbahn erreichbaren anderen Nachbarstadt Potsdam rückten ins Blickfeld meiner Nachforschungen. Nachdem das preußische Militär sowohl Potsdam als auch Spandau schon seit zwei Jahrhunderten in unterschiedlicher Weise geprägt hatte, erfuhr diese Gestaltung nach der Gründung des Kaiserreichs eine eindrucksvolle Intensivierung. Spandau wurde zu einem der Zentren der Rüstungsindustrie des Reichs und als Wohnort der Arbeiterfamilien ausgebaut, während eine wachsende Zahl von Kasernen, Offiziers- und Beamtenvillen das bisher von den Residenzen des Königshauses bestimmte Bild von Potsdam veränderte.



1b Mechanismus der Waage; Vergrößerter Ausschnitt aus Abb. 1 a.

Nach längeren Nachforschungen, bei denen ich unterschiedlichsten Fragestellungen folgte, war ich sicher, dass die Entscheidungen über die Konstruktion der Waage ausschließlich als Teil der Planung des im Ausstellungstext erwähnten Gravitationsmessungsprojekts getroffen worden waren. An eine spätere Verwendung war nicht gedacht und sie sollte nach Abschluss des Projekts auch nicht stattfinden. Abgesehen von der der Aufstellung in der Vitrine geschuldeten Länge der Aufhängungsdrähte für die unteren Waagschalen, können die Besucher des Deutschen Museums in München noch genau jene technischen Details der Waage betrachten, über deren positive und negative Auswirkungen auf den Verlauf des Projekts auch kurz nach der Entstehung, 1897/98, verfasste Publikationen der Fachexperten berichten. Für meine Nachforschungen bedeutete dies, dass ich die Begründungen der in den Jahren 1883/84 über die Konstruktion dieser Waage getroffenen Entscheidungen in ihrer ganzen historischen Komplexität nachzuvollziehen hatte.

So habe ich versucht, aus dem aufgefundenen Quellenmaterial ein schlüssiges Bild des damaligen akademisch-wissenschaftlichen Gravitationsmessungsprojekts mitsamt seinen Hintergründen zu kompilieren. Ich wollte zeigen, wie sich die von den beteiligten oder auch nur tangierten Persönlichkeiten und Institutionen verfolgten Interessen in der Gestaltung des Gesamtunternehmens und auch in der technischen Ausführung der Waage niederschlugen. Zu beachten waren dabei die damaligen oft dramatischen Veränderungen des Entwicklungsstands der Naturwissenschaften und der aufstrebenden Industrietechnik.

Kaum weniger Aufmerksamkeit erforderte der Aspekt, dass Planung und Durchführung dieses historischen Gravitationsmessungsprojekts vor dem Hintergrund der tiefgreifenden politischen Veränderungen in Europa stattfanden, in deren Folge die Hauptstadt Preußens nicht nur zur Hauptstadt des neuen deutschen Kaiserreichs avancierte, sondern auch zur neuen kulturellen Metropole neben London, Paris und Wien. Der so lang ersehnte deutsche Nationalstaat sollte sowohl seiner schnell wachsenden und zunehmend wissenschaftliche Erkenntnisse nutzenden Industrie als auch dem seine Waren nach international standardisierten Maßeinheiten bemessenden Handel ein starkes Fundament bieten. Während man den seit langem beklagten Rückstand der naturwissenschaftlichen Einrichtungen gegenüber den französischen und britischen Institutionen dauerhaft überwinden wollte, zeichneten sich bereits die neuen Herausforderungen durch die Industrien und Forschungseinrichtungen in den USA ab. Gleichzeitig blieb die mächtiger gewordene preußische Staatsadministration weiterhin bemüht, ihre dominierende Rolle innerhalb des neuen Reichs auch mit dem Ausbau wissenschaftlicher Einrichtungen zu sichern.

Eine Besonderheit der 1870er und 1880er Jahre bestand darin, dass die von der Regierung neugegründeten und großzügig gestalteten natur- und ingenieurwissenschaftlichen Einrichtungen, wie das Astrophysikalische Observatorium, die Technische Hochschule und die »Physikalisch-Technische Reichsanstalt« (PTR) nicht mehr in Berlin selbst angesiedelt wurden, sondern in den westlichen Vororten Potsdam und Charlottenburg. Noch heute imponiert, wie sich damals aus den vielfältigen, oft kontroversen Motiven einerseits und den Einsichten in die Notwendigkeit internationaler Kooperationen und Übereinkünfte andererseits eine für die Naturwissenschaften und die Ingenieurtechnik – die zivile wie auch die militärische – überaus fruchtbare Situation herausbildete. Die sichtbaren Erfolge dieser Bemühungen fanden innerhalb und außerhalb der Reichsgrenzen schnell Anerkennung, sogar Bewunderung und Nachahmung.

Erst im Verlauf meiner Auseinandersetzung mit den zahlreichen Details und Aspekten des Projekts wurde mir klar, dass dabei die internationalen Bemühungen um die Vereinheitlichung der Maße und Gewichte eine nicht nur gewichtige, sondern zentrale Rolle gespielt hatten. Die in Paris 1875 mit der »Meterkonvention« und der Einrichtung des »Bureau international des poids et mesures« (BIPM) erfolgte international einvernehmliche Institutionalisierung dieser Anstrengungen sollte den Forderungen der Naturwissenschaftler und der Ingenieure in den aufstrebenden Industrien ebenso gerecht werden, wie den Politikern und Juristen, die für die Handelsgesetze verantwortlich waren. Für sie alle galt dabei die Balkenwaage in ihren vielfach variierten Konstruktionen als das klassische Instrument zur Messung des Gewichts und der Masse der verschiedensten Dinge. Als mit ihrer Hilfe die offiziellen Kopien des in Paris aufbewahrten »kilogramme des archives« mit der damals maximal erreichbaren Genauigkeit hergestellt wurden, galt sie während einiger Jahre auch als das bestgeeignete Instrument für die Gravitationsmessung.

War die Gravitation bisher vor allem für die Astronomen bei der Berechnung der Bahnen der Planeten und Kometen von Bedeutung gewesen, so rückten die Fortschritte in der mechanischen Waagentechnologie nun auch die Möglichkeiten zur Messung ihrer Wirkungen auf der Erdoberfläche ins Blickfeld. Man versprach sich eine genauere Bestimmung sowohl der Anziehungskraft zwischen zwei beliebigen irdischen Massen als auch der Erdanziehung, die diese überlagert und mit dem Abstand vom Erdmittelpunkt abnimmt. Dafür musste nicht nur die Empfindlichkeit der speziell konstruierten Waagen ins Extreme gesteigert werden. Auch die Waagschalen mit den zu vergleichenden Lasten mussten in einem so großen Abstand übereinander angeordnet sein, dass der in Erscheinung tretende Unterschied der Erdanziehung eine messbare Größe erreichte.

Meine Nachforschungen zu den Persönlichkeiten und Institutionen, die diese Wägungen planten und betrieben, führten mich unerwartet in die Kunst- und Musikszene der Hauptstadt – denn bei der Planung und Durchführung des Projekts liefen die Fäden bei dem schon damals berühmten Professor Hermann von Helmholtz (1821–1894, geadelt 1883 zu »von Helmholtz«) zusammen, der bereits vor seiner Berufung nach Berlin die visuelle und akustische menschliche Sinneswahrnehmung mitsamt ihrer kulturellen Bedeutung zum Gegenstand seiner naturwissenschaftlichen Erforschung der Welt gemacht hatte. An der von weniger Erfolg bestimmten Karriere des 40 Jahre jüngeren Krigar-Menzel, der sich vergeblich mühte, Helmholtz' Vorbild zu folgen, lassen sich einige der Gegensätze aufzeigen, die das königlich-akademische Kulturleben im Berlin des Kaiserreichs bestimmten – wobei diesem auch das Gravitationsmessungsprojekt zuzurechnen ist.

Meine Vermutung, dass der zweite Teil des Doppelnamens von Krigar-Menzel etwas mit dem berühmten Maler Adolph von Menzel (1815–1905, geadelt 1898) zu tun haben könnte, bestätigte sich schnell, war dieser doch sowohl dessen Onkel als auch sein Adoptivvater. Zur Herkunft des ersten Namensteils stellte sich heraus, dass es sich bei dem Vater um den wenig bekannten königlichen Musikdirektor Hermann Krigar (1819–1880) handelte – wobei dieser wiederum der Sohn jenes preußischen Hütteninspektors und späteren Oberbergrats Johann Friedrich Krigar (1774–1852) war, der als Gründer und Leiter der Königlichen Eisengießerei aus Schlesien nach Berlin berufen worden war und dort nach einer im Auftrag der Regierung durchgeführten Studienreise nach England 1816 die erste Lokomotive auf dem Kontinent gebaut hatte. So bestand bei Krigar-Menzel neben der engen Verbindung zur Künstler- und Musikerszene auch eine feste familiäre Verankerung in der preußischen Tradition.

Obwohl er über viele Jahre an der Berliner Universität als Privatdozent und auch an der Technischen Hochschule als Professor für theoretische Physik wirkte, blieb Krigar-Menzel in der keineswegs knappen Literatur über die ereignisreiche Geschichte der Physik des zu Ende gehenden 19. und beginnenden 20. Jahrhunderts beinahe ohne Erwähnung. Gerade weil er schon damals unter den zahlreichen als bedeutend anerkannten und biografisch vielfach gewürdigten Wissenschaftlern keinen Platz gefunden hat, bin ich bei ihm den auffindbaren Ereignissen aus seiner Biografie stärker nachgegangen als bei den anderen Protagonisten. Tatsächlich ergaben sich dabei zusätzliche Einblicke in die Bedingungen, unter denen er das Gravitationsmessungsprojekt nach vielen Jahren zwar erfolgreich, jedoch, im Gegensatz zu den in den gleichen Jahren erfolgten Entdeckungen der elektromagnetischen Wellen, der Röntgenstrahlen oder auch der Radioaktivität, wenig spektakulär zu Ende gebracht hatte.

Im Gegensatz zur dürftigen Quellenlage bei Krigar-Menzel finden sich zu seinen nur wenig älteren Kollegen Arthur König (1856–1901) und Franz Richarz auch einige Mitteilungen und Würdigungen, die über die Kurzeinträge in den biografischen Nachschlagewerken hinausgehen. Motiviert durch ihre Zusammenarbeit mit Helmholtz planten sie das Gravitationsmessungsprojekt im Rahmen ihrer eher klassischen akademischen Karrieren und bereiteten die Wägungen in der Spandauer Zitadelle praktisch vor.

Wenn der im zitierten Museumstext nicht erwähnte Helmholtz in meiner Geschichte die alle angesprochenen Aspekte integrierende Persönlichkeit darstellt, so entspricht dies zweifellos der historischen Realität. Nachdem er sich als Wissenschaftler schon seit den 1840er Jahren großes Ansehen erworben hatte, spielte er seit 1871 als Institutsdirektor an der Universität und seit 1887 als Gründungsdirektor der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in der Berliner Wissenschaftspolitik eine vielseitige, nachhaltige und immer gewichtige Rolle. Er hatte die Herausbildung der Physik als eigenständige Disziplin seit der Mitte des 19. Jahrhunderts mitgestaltet und repräsentierte sie seit seiner Berufung nach Berlin wie nur wenige andere. Immer schon hatte er die neuen Erkenntnisse der sich noch emanzipierenden naturwissenschaftlichen Einzeldisziplin Physik auch aus dem Blickwinkel des qualifizierten Mediziners und Physiologen verfolgt und mit gewichtigen Beiträgen aktiv mitgestaltet, wobei er seit den 1880er Jahren auch die für ihn neuartigen Fragestellungen aus der aufstrebenden Industrie mit einbezog.

Im breiten Spektrum der Aktivitäten von Helmholtz' stellte das Gravitationsmessungsprojekt nur eines unter zahlreichen anderen Projekten dar, die er nicht selbst bearbeitete, deren Grundsatzfragen er jedoch in seinem Weltbild mit reflektierte und deren wissenschaftliche Bedeutung er kraft seiner bewusst gepflegten wissenschaftlichen Autorität und seiner gesellschaftlichen Beziehungen garantierte und organisatorisch absicherte. Den Abschluss des Projekts sollte er nicht mehr erleben, denn als er 1894 starb, waren die eigentlichen Wägungen nach langwierigen Vorbereitungen gerade erst in Gang gekommen und die Ergebnisse noch nicht absehbar.

Nachdem die messtechnische Erforschung der Gravitation in den 1880er Jahren auch in anderen Ländern mit jeweils eigenständigen Projekten mehrfach neu angegangen worden war, scheint das Interesse erst einmal abgeklungen zu sein. Bei allen diesen Projekten war die Bedeutung der schließlich als »Gravitationskonstante« bezeichneten abstrakten Proportionalkonstante im Newtonschen Gravitationsgesetz immer im Schatten der besser vorstellbaren Konstante der »mittleren Erddichte« geblieben. Erst im neuen Jahrhundert sollte die Gravitationskonstante zu einem der Ecksteine im neuerrichteten Theoriegebäude der Physik werden und es bis heute bleiben.

Als die für das Berlin-Spandauer Projekt entwickelte Waage vierzehn Jahre nach dessen Abschluss ins im Aufbau befindliche »Deutsche Museum von Meisterwerken der Naturwissenschaften und der Technik« in München kam und sich dabei vom Messungsinstrument zum Museumsobjekt wandelte, hatten neue wegweisende Arbeiten, darunter jene von Max Planck (1858–1947) und Albert Einstein (1879–1955), der Wissenschaft bereits jene Perspektiven eröffnet, die dann für die Zurückblickenden alles Vorausgegangene überstrahlen sollten. Trotzdem waren die Museumsgründer 1910 davon überzeugt, dass sie mit der Übernahme der Waage die Erinnerung an einen nationalen Beitrag zum allgemeinen Fortschritt wachhalten könnten. In der Flut immer neuer und noch spektakulärer Errungenschaften in den Naturwissenschaften und der Ingenieurtechnik und der dabei schnell wachsenden Anzahl weiterer als »bedeutend« etikettierter Objekte geriet sie dann jedoch auch im Museum beinahe völlig in Vergessenheit.

Bei den mehr oder weniger zeitgleich erfolgenden Messungsprojekten in den verschiedenen Ländern spielten immer auch die unterschiedlichen nationalen Interessen eine Rolle. Bestärkt durch die Konsequenzen aus zahlreichen, nur wenige Jahre zurückliegenden Kriegen, drängten sie den traditionell gepflegten akademischen Internationalismus zurück, da die einzelnen Wissenschaftler in die staatlichen Institutionen eingebunden und damit von politischen Entscheidungen abhängig waren.

Während meiner physik-, kultur- und gesellschaftsgeschichtlichen Recherchen erfuhr der Fokus meiner Nachforschungen eine unerwartete Ausweitung. Ich entdeckte, dass im Stadtgeschichtlichen Museum in der Spandauer Zitadelle eine miniaturisierte Nachbildung des damaligen Messungsaufbaus mitsamt der darin eingebauten Waage gezeigt wird. Die Anfertigung dieses fachmännisch ausgearbeiteten Modells war ein Vierteljahrhundert nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs in einer in der Zitadelle eingerichteten Schule mit pädagogischen Motiven initiiert und ausgeführt worden. Als Lehr- und Demonstrationsmittel sollte es den Schülern, Lehrern und auch den Schulpolitikern in den Jahren des Wiederaufbaus und der gesellschaftlichen Neuorientierung die schon damals verdrängte Episode aus der Geschichte dieser preußischen Festung bewusstmachen. Inzwischen ist die Schule längst aus der Zitadelle ausgezogen und das dort verbliebene Modell hat sich ebenfalls in ein Museumsobjekt verwandelt. Für mich ergab sich daraus die neue Aufgabe des Aufzeigens der geschichtlichen und aktuellen Verbindungen zwischen den beiden in so großem Abstand voneinander präsentierten Museumsobjekten.

Auch deshalb habe ich die Perspektive des ehemaligen Museumskurators nicht unterdrückt. In dessen Augen können die vor Jahrzehnten und Jahrhunderten geschaffenen »toten« Museumsobjekte grundsätzlich zu jedem Zeitpunkt Aktualität beanspruchen, auch wenn deren Art sich mit den Jahren unablässig verändert hat und in der Zukunft weiter verändern wird. Im Museum stehen sie gleichberechtigt nebeneinander und nur das – vom jeweiligen Kurator auf der Basis seines Wissens verfasste – Textschild macht die unterschiedlichen Entstehungs- und Verwendungszeiten erkennbar. So besteht eine besondere Eigenschaft der Museumsobjekte darin, dass sie ihre ebenfalls in verschiedenen historischen Zeitabschnitten lebenden Betrachter auffordern, nach Verbindungen zum sich ständig weiter verschiebenden »heute« zu suchen. In meinem ehemaligen Beruf hatte dies eine zentrale Rolle gespielt. Es wurde mir neu und verschärft ins Bewusstsein gebracht, als ich die Entstehung und zweckgerichtete Anwendung der Waage in den 1880er und 1890er Jahren nicht allein aus dem damaligen und dem heutigen Blickwinkel zu betrachten hatte. Mit dem Modell des Messungsaufbaus stellte sich zusätzlich die Frage, welche Sicht auf die Waage in den Jahrzehnten nach dem Zweiten Weltkrieg, im zum damaligen Westberlin gehörenden Spandau den Wunsch zu dessen Anfertigung auslöste.

Im Bewusstsein der Bedeutung der fortschreitenden und im Rückblick zum Kalender gefrierenden Zeit galt es, neben der Abfolge der in dieser Geschichte zu beachtenden, oft eng zusammenliegenden einzelnen Zeitpunkten auch die angesprochenen, einander meist überlappenden Zeitintervalle zu berücksichtigen. Dazu gehören die Lebensdaten der erwähnten Personen, die ich, wie in historischen Darstellungen üblich, bei ihrer ersten Erwähnung in Klammer gesetzt habe. Ungewohnter erscheint die Unterscheidung zwischen zwei verschiedenen, abgeschlossenen Zeiträumen, dem in welchem die erwähnten Artefakte für ihre ursprünglichen Zwecke entwickelt, hergestellt oder gebaut und genutzt wurden und jenem ihrer musealen Bewahrung und Präsentation. Nicht unerwartet, zeigte sich dabei, dass es über den offenen und bis zur jeweiligen Gegenwart reichenden zweiten Bewahrungs- und Präsentations-Zeitraum nur relativ wenig zu erzählen gibt, ganz im Gegensatz zum abgeschlossenen und viel kürzeren ersten. So spielt der größere Teil des im Folgenden erzählten Geschehens im Zeitraum zwischen 1884 und 1896, der auch im eingangs zitierten musealen Erklärungstext für die Waage zitiert wird. In den anderen Abschnitten geht es um frühere und spätere Ereignisse, deren Schilderung zusätzliche Schlaglichter auf die Geschichte dieser Waage wirft.

Die aktuelle Einordnung der einzelnen Messungsprojekte in die Chronologie der wissenschaftlichen Erkenntnisse erfolgt üblicherweise und mit einigem Recht nicht anhand der oft langen Zeiträume, in deren Verlauf sie stattfanden, sondern anhand des Datums des veröffentlichten Abschlussberichts, der die Endergebnisse und -erkenntnisse den Interessenten zugänglich machte. Heute erleichtert dieses Datum das Auffinden der Berichte in den chronologisch geordneten Regalen der Bibliotheken – die auf diese Weise ihre Verpflichtung als Museen wissenschaftlicher Publikationen erfüllen. Auch in den Museen der materiellen Artefakte werden die Beschriftungen der einzelnen Objekte gewöhnlich mit einer einzelnen, als geeignet befundenen Jahreszahl versehen, wobei diese dann nicht selten zur Legitimierung von Prioritäten zitiert wird.

Die Beachtung der höchst unterschiedlich abgegrenzten Zeitintervalle betrifft auch die Tatsache, dass die Geschichte der hier betrachteten Waage mit zahlreichen allgemein bekannten und prominenten Persönlichkeiten verknüpft ist, darunter auch einigen, deren Namen zur Charakterisierung bestimmter Perioden der Geschichte der Naturwissenschaften, der bildenden Kunst und der Politik Eingang in die Lehrbücher gefunden haben. Dazu zählen Helmholtz und Menzel im Bereich der Naturwissenschaft und der Kunst ebenso, wie in der Politik der langjährige Kronprinz und kurzzeitige Kaiser Friedrich III. (1831–1888) und dessen Nachfolger Wilhelm II. (1859–1941). Ähnliches gilt auch für den Astronomen Wilhelm Foerster (1832–1921) und die Physiker Max Planck und Terry Quinn (geb. 1938), deren so engagierte wie qualifizierte Beurteilungen des historischen Geschehens aus eigenem Erleben sich als verlässliche Stützen meiner Rekonstruktion des damaligen Geschehens erwiesen.

Einen zusätzlichen Zugang zum historischen Geschehen eröffnen auch die erwähnten Örtlichkeiten und Gebäude, in und um Berlin, München, Paris oder London, die heute immer noch besucht und besichtigt werden können. Vor allem sind jedoch die mit historischem Datum versehenen Ergebnisse der damaligen und diesen noch vorausgegangenen Gravitationsmessungen heute keineswegs vergessen. Vielmehr werden sie, chronologisch geordnet, als Referenz für neue Messungsprojekte herangezogen, wobei die Kategorie »von historischem Wert« nicht unbedingt »veraltet« oder »überholt« bedeutet. Aus der Sicht des ehemaligen Museumskurators kann man den vor Jahrzehnten und Jahrhunderten in oft langen Messungsreihen ermittelten Werten der Gravitationskonstante, die im ursprünglich literarischen, heute auch elektronisch-virtuellen Museum der physikalischen Messungsergebnisse aufbewahrt werden, ebenso Aktualität zuschreiben, wie der Waage im Münchner und dem Modell im Spandauer Museum für materielle Objekte.

In meiner Absicht einer breiten Aktualisierung der durch materielle Museumsobjekte, Institutsgebäude, Messungsergebnisse, Texte oder auch Ortsangaben überlieferten historischen Ereignisse fühle ich mich nicht zuletzt durch die Tatsache bestärkt, dass es in der informationstechnisch vielfach vernetzten Welt nur einiger Klicks oder Wischs mit dem Finger bedarf, um das Bild der Spandauer Zitadelle mit dem der Waage, den biografischen Einzelheiten zu den erwähnten Persönlichkeiten, oder auch den physikalischen Erklärungen und historischen Messungsergebnissen in der aktuellen virtuellen Realität zu verknüpfen – wobei auch das dabei entstehende Bild dem Diktat des ständig weiter fortschreitenden »heute« unterliegt.

Ins Zentrum dieses Buchs habe ich die Durchführung des damaligen Gravitationsmessungsprojekts mit seinen zahlreichen zu lösenden Einzelproblemen, seinen Voraussetzungen, seinen unmittelbaren Randbedingungen, seinem Verlauf und seinen Ergebnissen gestellt. Weil die dabei angesprochenen und beschriebenen Einzelheiten ohne genauere Detailkenntnisse nur schwer nachvollziehbar sind, habe ich in den vorangestellten Abschnitten die wichtigsten der angesprochenen Themen ausführlicher erläutert. So ruft der erste Abschnitt einiges vom physikalischen Schulwissen über das Gravitationsgesetz und die Gravitationskonstante in Erinnerung. Danach geht der zweite Abschnitt auf das Projekt des Münchner Professors Philipp Jolly (1809–1884, geadelt 1854) ein, da dieses das Berliner Interesse an einer eigenen Gravitationsmessung mit der Balkenwaage auslöste und sowohl für dessen Planung als auch für die im Verlauf der Wägungen getroffenen Maßnahmen die wichtigsten Orientierungen bot. Neben einem besonderen Abschnitt, in dem die Motive erörtert werden, die Helmholtz zur Unterstützung des Projekts veranlassten, erschien auch eine Skizzierung der damaligen internationalen Aktivitäten um die Schaffung und Pflege eines einheitlichen Maßsystems unverzichtbar. In manchen kürzeren Abschnitten wird einiges über die Veränderungen in der englischen akademisch-wissenschaftlichen Szene in Erinnerung gerufen, während andere die zeitgleich in Gang gekommenen weiteren Gravitationsmessungsprojekte beleuchten.

Einen besonderen Abschnitt habe ich den Konsequenzen gewidmet, die sich aus den scheinbar endlosen Arbeiten in der Spandauer Zitadelle für das Leben von Krigar-Menzel ergaben – wobei dieser in gewisser Weise zum Helden der ganzen Geschichte gerät. Im vorletzten Abschnitt werden die Überführung der Waage ins Münchner Deutsche Museum und die daran anknüpfenden Ereignisse um die erst einige Jahrzehnte spätere Entstehung des Modells im Spandauer Museum umrissen. Schließlich geht der letzte Abschnitt auf die Bedeutung des Berlin-Spandauer Messungsprojekts für die weitere und aktuelle Situation der Wissenschaft Physik ein.

Bei der Zusammenfassung meiner Einsichten zur vorliegenden geschlossenen Darstellung hatte ich neben den an der Wissenschafts- und Technikgeschichte interessierten Lesern auch die interessierten Besucher des Deutschen Museums und des Spandauer Stadtgeschichtlichen Museums mit ihrem breiten Spektrum oft sehr spezieller Interessen vor Augen. Um ihnen die vielfältigen Aspekte dieser Waage und der historischen Zusammenhänge näher zu bringen, habe ich versucht, die unterschiedlichen Details, die es zu beachten lohnt, für alle Interessierten nachvollziehbar zu beschreiben und den jeweiligen Experten keinen Anlass zum Naserümpfen zu liefern. Dabei können einzelne Abschnitte überblättert werden, ohne dass der rote Faden ganz verloren geht.

## Newton's Gravitationsgesetz; Gravitationskonstante und mittlere Erddichte; absolute Messung

Vergleichbar mit der ebenfalls allgegenwärtigen fortschreitenden Zeit steht die gesamte Natur unter der Herrschaft der Gravitation – mitsamt der Menschheit, die schon vor Jahrtausenden die Balkenwaage erdachte, um die Gravitationswirkung vergleichend und auch quantitativ zu erfassen. Die Gravitation garantiert, dass die Kaffeetasse stehen bleibt, wo man sie hingestellt hat und dass der Kaffee aus der Kanne in sie hinein trifft. Sie ist aber auch verantwortlich dafür, dass die Tasse, wenn sie aus der Hand rutscht, zu Boden fällt und dort zersplittert – und doch gilt sie als die schwächste unter den in der Physik bekannten Kräften. Wie es eine vielzitierte Anekdote mitteilt, sorgte sie auch dafür, dass vor mehr als drei Jahrhunderten jener Apfel von einem Baum in England fiel, der angeblich Isaac Newton (1643-1727) auf die Idee brachte, dass die gleiche Kraft, welche die Planeten auf ihren Bahnen hält, auch einen Apfel vom Baum auf die Erde fallen lässt.

In Wirklichkeit war Newton allerdings erst nach einer jahrelangen Auseinandersetzung mit den damals bekannten Berechnungen der Bahnen der Himmelskörper zu seiner Erkenntnis gelangt.<sup>3</sup> Dann war es ihm jedoch gelungen, die zwischen zwei Massen wirkende Anziehungskraft auf einfache Zusammenhänge zurückzuführen und diese mit dem 1686 veröffentlichten und seither nach ihm benannten Gesetz zu beschreiben. Seine Feststellung, dass sich die von ihm als »Gravitation« bezeichnete Kraft proportional zu den Größen der beiden Massen und umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands ihrer Schwerpunkte verhalte, wurde seither vielfach bestätigt – sie wurde in ihrer Allgemeingültigkeit allerdings auch angezweifelt.<sup>4</sup> Drei Jahrhunderte später sollte der international anerkannte Wissenschaftshistoriker I. Bernard Cohen (1914–2003) die Entdeckung des Gravitationsgesetzes als »Höhepunkt der wissenschaftlichen Revolution« bezeichnen. Daraus sei nicht nur »die neuzeitliche Physik« hervorgegangen, sondern dieses Gesetz sei auch »zum Grundpfeiler, ja gerade zum Paradigma erfolgreicher Wissenschaft« geworden.<sup>5</sup> Schon zuvor, 1948, hatte die internationale »Generalkonferenz für Maß und Gewicht« (»Conférence générale des poids et mesures«, CGPM) den Entdecker des Gravitationsgesetzes mit der Benennung der Maßeinheit für die Kraft als »Newton« auf besonders nachhaltige Weise gewürdigt.<sup>6</sup>

3 Newton hatte die so unmittelbar einleuchtende und kaum widerlegbare Geschichte vom herabfallenden Apfel selbst in Umlauf gesetzt. Cohen, *Gravitationsgesetz*, 1987, S. 12.

4 So von Carl Braun 1896, auf dessen Gravitationsmessungsprojekt an anderer Stelle eingegangen wird.

5 Cohen, *Gravitationsgesetz*, 1987, S. 12.

6 Als ein Newton wird seither das Maß für die Kraft bezeichnet, die aufgebracht werden muss, um einen ruhenden Körper der Masse 1 kg innerhalb einer Sekunde gleichförmig auf die Geschwindigkeit 1 m/sec zu beschleunigen.  $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{sec}^2$ .

Mit dem Gravitationsgesetz hatte Newton die Gravitation der mathematischen Behandlung zugänglich gemacht, auch wenn er das Gravitationsgesetz – für uns heute ungewohnt – in Worten formulierte. Bei seinen eigenen Berechnungen hatte er lediglich die Verhältnisse zwischen den Massen, Abständen und Kräften herangezogen und die uns heute geläufige mathematische Formel nie verwendet. So hatte er auch die als »Gravitationskonstante« bezeichnete Proportionalitätskonstante nicht benötigt, die zur mathematisch korrekten Aufstellung dieser Formel erforderlich wird. Von Bedeutung für seine Rechnungen war jedoch eine quantitative Schätzung für die Masse der Erde, die nach seinem Gesetz sowohl die Bewegung des Mondes, der Planeten und der Kometen als auch die Bewegung der sehr viel kleineren Massen im menschlichen Alltag maßgeblich bestimmt. Newton ging von der realistischen Annahme aus, dass die mittlere Erddichte dem fünf- oder sechsfachen von der Dichte des Wassers entspricht.<sup>7</sup> Seither stand die Ermittlung eines genaueren Werts der mittleren Dichte der Erde im Brennpunkt des Interesses der Wissenschaft.

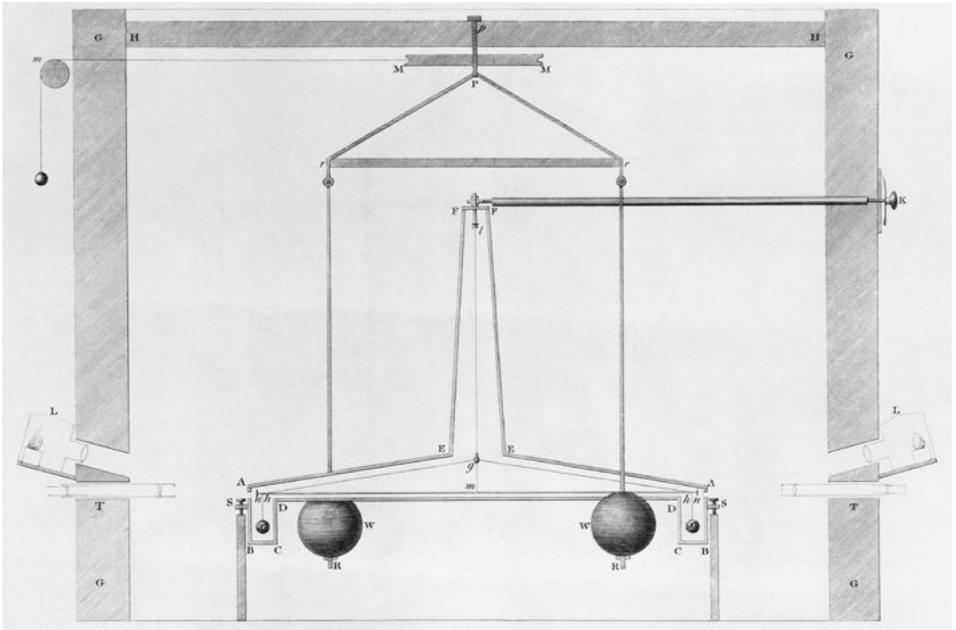
Als Beginn der quantitativen Überprüfung des Gravitationsgesetzes gelten die Messungen, die Henry Cavendish (1731–1810) ein Jahrhundert nach Newtons Erkenntnissen, 1797, in London durchführte. Er verwendete dafür die anschauliche und seither viel zitierte Formulierung des »Wägens der Erde«, die sich auch im eingangs zitierten Erklärungstext des Deutschen Museums wiederfindet. Für seine Messungen benutzte er eine große Torsionswaage, deren horizontal ausgelenkter Waagbalken eine Länge von beinahe zwei Metern erreichte. Sie war einige Jahre zuvor von dem verstorbenen Naturphilosophen und Geologen John Michell (1724–1793) erdacht und aufgebaut worden, wobei dessen Vorbild wiederum das sehr viel kleinere Instrument gewesen war, mit dem Charles Augustin de Coulomb (1736–1806) 1785 die elektrostatische Anziehungskraft gemessen hatte. Das dabei genutzte Prinzip beruht auf der Proportionalität zwischen der Rückstellkraft des verdrehten Aufhängungsdrahts und dem Drehwinkel.<sup>8</sup>

Unter Eliminierung der vertikal gerichteten Erdanziehung wirkte die Torsionswaage in horizontaler Richtung und ermöglichte es so, die von Newton prognostizierte Anziehungskraft zwischen zwei bekannten Massen – Cavendish verwen-

<sup>7</sup> Newton hatte mit seiner Annahme der mittleren Erddichte von 5000 bis 6000 kg/m<sup>3</sup> den heutigen Messwert von 5514 kg/m<sup>3</sup> gut getroffen. Vgl. Rothleitner/Schlamming, *Schwere Experimente*, 2015, S. 1514.

<sup>8</sup> Michell war gestorben, bevor er mit eigenen Messungen hatte beginnen können. Vgl. McCormach, *Michell*, 2012. Vgl. auch: Gonzalez, *Anachronism*, 2001. Aufbau und Vorgehensweise bei der Messung werden ausführlich beschrieben in: Ramsauer, *Grundversuche*, 1953, S. 19–26.

dete zwei große Bleikugeln von je 158 kg und zwei kleine von je 729 g – mit der Rückstellkraft des verdrehten Aufhängungsdrahts ins Gleichgewicht zu bringen. Über eine geeignete optische Vorrichtung konnte er auf einer Skala sowohl den Drehwinkel ablesen, als auch das Einschwingen bis zur Ruhestellung des Waagbalkens verfolgen.<sup>9</sup>



2 Torsionswaage von Henry Cavendish.

9 Rechengang:

$$\frac{F_{\text{Probe}}}{F_{\text{Erde}}} = \frac{\frac{m_1 \cdot m_2}{R_{12}^2}}{\frac{M_{\text{Erde}} \cdot m_2}{R_{\text{Erde}}^2}} = \frac{m_1 \cdot R_{\text{Erde}}}{M_{\text{Erde}} \cdot R_{12}^2}$$

Dabei ist  $F_{\text{Probe}}$  die in der Torsionswaage gemessene Anziehungskraft zwischen der großen Masse  $m_1$  und der kleinen  $m_2$ .  $F_{\text{Erde}}$  ist das Gewicht von  $m_2$ , also die Gravitationskraft, mit der die Erde darauf einwirkt.  $R_{12}$  und  $R_{\text{Erde}}$  bezeichnen die jeweiligen Abstände. Die Masse  $m_2$  der kleinen Kugel muss dazu gar nicht bekannt sein, denn sie hebt sich heraus. Nach der Messung von  $F_{\text{Probe}}$  ist  $M_{\text{Erde}}$  die letzte verbleibende Unbekannte und kann einfach bestimmt werden. Cavendish, *Experiments*, 1798. Ramsauer, *Grundversuche*, 1953, S. 19–26.

Die Ablesung des Messungsergebnisses auf der Skala war nicht einfach, da sich das Einschwingen auf die Ruheposition, entsprechend der Dimensionierung der Torsionswaage über viele Minuten und sogar Stunden hinziehen konnte. Cavendish hatte auch erfahren, wie leicht die Ergebnisse seiner Messungen von zahlreichen Störursachen verfälscht wurden. Um möglichst viele davon zu identifizieren und zu beseitigen, hatte er die Messungen unter den sich während eines ganzen Jahres ändernden klimatischen Bedingungen immer erneut wiederholt und aus der Vielzahl der dabei ermittelten unterschiedlichen Ergebnisse mit einem mathematisch-wissenschaftlich anerkannten Verfahren den von Wetter und Klima unabhängigen und seither zitierten Einzelwert errechnet.<sup>10</sup>

Da sich aus diesen Messungsergebnissen auch die Gravitationskonstante unmittelbar berechnen lässt, wurde die heute oft als »Gravitationswaage« bezeichnete Torsionswaage zunehmend in immer neuen Varianten zu diesem Zweck benutzt. Wie gut sie sich als Gravitationswaage eignete, wird nicht zuletzt dadurch belegt, dass der aus Cavendishs Messungsergebnissen berechnete Wert der Gravitationskonstante vom heute anerkannten Wert nur um 1,2 Prozent abweicht.

Neben klimatischen Einflüssen standen damals und stehen noch heute jeder messungstechnischen Bestimmung des Werts der Gravitationskonstante prinzipielle Schwierigkeiten entgegen. Der Physiker Frithjof Nolting (geb. 1968), der in den 1990er Jahren an einem Gravitationsmessungsprojekt des physikalischen Instituts der Universität Zürich beteiligt war, fasste die entscheidenden Gründe in vier Punkten zusammen: Erstens ist die Gravitation bei weitem die schwächste unter den in der Physik bekannten Kräften, so dass auch kleinste Störungen starke Abweichungen bewirken. Zweitens können Gravitationskräfte nicht abgeschirmt werden, so dass bei allen Experimenten die zu messende Kraft durch Kräfte aus der Umgebung überlagert wird. Drittens hängt die Gravitationskonstante, soweit bisher bekannt, von keiner anderen fundamentalen Konstante ab, die für eine indirekte Messung benutzt werden könnte. Und viertens muss die Genauigkeit der verwendeten Instrumente bis zu einer Empfindlichkeit getrieben werden, die grundsätzlich technologische Grenzen erreicht.<sup>11</sup>

Nachdem einige dem Vorbild von Cavendish folgende Gravitationsmessungen kaum Beachtung erfahren hatten, fand ein Projekt, das der Münchner Professor Jolly in den 1870er Jahren unternahm, vor allem deshalb ein nachhaltiges Echo, weil er eine klassische Balkenwaage benutzte.<sup>12</sup> Er konnte zeigen, dass die Kraft, mit der die Masse eines auf die Waagschale gestellten Gewichts von der

<sup>10</sup> Cavendish, *Experiments*, 1798.

<sup>11</sup> Nolting, *Determination*, 1998, S. 1f.

<sup>12</sup> Vgl. Oittner-Torkar, *Bleikugel*, 1990.

Erde angezogen wird, tatsächlich mit dem Quadrat des Abstands vom Erdmittelpunkt abnimmt. Über seine messtechnische Überprüfung des Gravitationsgesetzes in nicht-astronomischen, irdisch-alltäglichen Dimensionen berichtete er in zwei Veröffentlichungen unter dem allgemein gehaltenen Titel »Anwendung der Wage auf Probleme der Gravitation«.<sup>13</sup>

Jolly umschrieb die Proportionalkonstante im Newtonschen Gesetz vorsichtig und etwas umständlich als »Zug eines Punktes in der Entfernungseinheit«. In den gleichen Jahren sprachen auch die französischen Physiker Jean-Baptiste Baille (1841–1918) und Marie Alfred Cornu (1841–1902) von der »attraction réciproque de deux unités de masses placées à unité de distance«.<sup>14</sup> Offensichtlich waren es dann Arthur König und Franz Richarz, die mit dem Rückhalt von Helmholtz erstmals die seither gängige deutsche Bezeichnung »Gravitationskonstante« verwendeten und als Ziel ihres Projekts explizit die »Bestimmung der Gravitationskonstante« benannten. Ungeachtet dieses entschlossenen Schritts ist auch in den schriftlichen Zeugnissen zu ihrem Projekt noch eine eigentümliche Unbestimmtheit im Umgang mit dieser Konstante erkennbar. Trotz des so eindeutig formulierten Ziels in ihrer im Dezember 1884 von Helmholtz der Preußischen Akademie vorgelegten Projektbeschreibung schenken sie einer klaren Unterscheidung zwischen der Bedeutung der »mittleren Erddichte« und der »Gravitationskonstante« offensichtlich wenig Beachtung. So ist es die »mittlere Erddichte«, die im großen Abschlussbericht vom Februar 1899 als »Fundamentalkonstante« bezeichnet wird, während sich zur »Gravitationskonstante« nur die schon von Jolly verwendete, zwar korrekte, jedoch aus heutiger Sicht lapidar erscheinende Definition »die Anziehung von 1g auf ein anderes in 1 cm Entfernung« findet.<sup>15</sup>

Auch in England lässt sich diese Unklarheit erkennen. 1891 hatte John Henry Poynting (1852–1914) die endgültigen Ergebnisse seiner über viele Jahre vorbereiteten Messungen veröffentlicht und sie mit dem Titel überschrieben »On a Determination of the Mean Density of the Earth and the Gravitation Constant by means of the Common Balance«.<sup>16</sup> Dann hatte es jedoch nur ein Jahr später, 1892, Charles Vernon Boys (1855–1944) gegenüber der Royal Society in London bereits

13 Gisela Oittner-Torkar hat in einem verdienstvollen Aufsatz über Jolly und dessen Wägungen für das damalige Jahrbuch des Deutschen Museums auf diesen Zusammenhang hingewiesen: Oittner-Torkar, *Bleikugel*, 1990.

14 Cornu/Baille, *Détermination*, 1873. Cornu/Baille, *Etude*, 1878. Cornu/Baille, *Mesure*, 1878. Cornu/Baille, *Influence*, 1878. Ein an die Lehrer in Bayern gerichteter Bericht des Professors an der königlichen Industrieschule in Augsburg August Kurz (geb. 1835) belegt zumindest den Wunsch, dass diese Thematik auch in den Schulen behandelt werden sollte. Kurz, *Schwerkraft*, 1888, S. 30f.

15 Richarz/Krigar-Menzel, *Waage*, 1899, S. 56.

16 Poynting, *Determination*, 1892. Received May 13. Read June 4 1891. Auch in: Poynting, *Collected Papers*, 1920. Deutsche Übersetzung unter dem Titel: Ueber die Bestimmung der mittleren Dichte der Erde und der Gravitationskonstante mittels der gewöhnlichen Wage. 1892.

sehr entschieden abgelehnt, seine Messungen als »weighting the earth« zu charakterisieren. Er kommentierte dies in seinem programmatisch mit »On the Newtonian Constant of Gravitation« überschriebenen Bericht: »I could not introduce as the object of my work anything so casual as an accidental property of an insignificant planet. [...] The earth has no more to do with the investigation than the table has upon which the apparatus is supported.«<sup>17</sup>

Die in den 1890er Jahren erkennbare Aufwertung der Bedeutung der Gravitationskonstante gegenüber der mittleren Erddichte dürfte auch in den Gesprächen eine Rolle gespielt haben, die Krigar-Menzel inzwischen mit Max Planck führte. Planck trieben damals bereits Überlegungen um, die der Gravitationskonstante als Bezugsgröße für ein neuartiges Maßsystem jene ganz neue Qualität und Bedeutung zumessen sollte, die bis heute maßgeblich ist. Auch wenn ich keinen konkreten Beleg gefunden habe, so erscheint es mir kaum vorstellbar, dass Planck mit dem inzwischen als Privatdozent am gleichen Institut angesiedelten Krigar-Menzel nicht über seine Deutung der Gravitationskonstante gesprochen haben sollte. Wahrscheinlich sah sich letzterer durch solche Gespräche auch zu der ausführlichen Definition veranlasst, die er in einer populärwissenschaftlich gehaltenen Fassung des Abschlussberichts mitteilte: »Gravitationskonstante ist der Proportionalitätsfactor G in der das Newtonsche Anziehungsgesetz darstellenden Gleichung. Das Gesetz sagt aus, dass die Anziehungskraft K zwischen zwei Massenpunkten  $m_1$  und  $m_2$  im Abstand r proportional  $\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$  ist:

Also lautet diese Gleichung:  $K = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$

Dabei sollen alle Größen im absoluten Maass (cm, g, sec) gemessen werden, also als Einheit der Kraft diejenige Kraft gewählt werden, welche einem Gramm während einer Secunde die Beschleunigung von 1 cm [sic! Offensichtlicher Druckfehler. Korrekt ist cm/sec<sup>2</sup>, HP] ertheilt. Nach dieser Festsetzung ist der Zahlenwerth von G die Maasszahl derjenigen Kraft, mit welcher ein Gramm ein zweites Gramm im Abstände von 1 cm anzieht.«<sup>18</sup>

Die in dieser Definition enthaltene Forderung, dass alle Größen im »absoluten Maass« gemessen und benannt werden sollten, erinnert nicht nur an die Schlussfolgerungen, die Planck in diesen Jahren zog – wobei offen ist, wie weit ihm Krigar-Menzel dabei folgte. Sie lenkt den Blick auch auf die während des gesamten

<sup>17</sup> Boys, *Newtonian Constant*, 1894, S. 330. Zitiert von Frithjof Nolting in: Nolting, *Determination*, 1998, S. 5.

<sup>18</sup> Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante*, 1897, S. 145. Richarz/Krigar-Menzel, *Waage*, 1899, S. 56.

19. Jahrhunderts vorangetriebenen Bemühungen um die Schaffung einer für alle Zweige der Naturwissenschaften gemeinsamen Basis von Maßeinheiten. Hatten diese Anstrengungen bereits eine der entscheidenden Voraussetzungen für die Herausbildung der Physik als eigenständige naturwissenschaftliche Disziplin dargestellt, so erhielten sie mit der Übertragung der physikalischen Erkenntnisse in die industrielle Nutzung eine zusätzliche Bedeutung. Der Professor an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt Karl Scheel (1866–1936), von dem noch die Rede sein wird, sollte 1910 in einer populärwissenschaftlichen Veröffentlichung von den »Brücken zwischen den einzelnen großen scheinbar ganz verschiedenartigen Zweigen der Physik« sprechen, die in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts geschlagen worden seien. Dabei sei es »nur natürlich« gewesen, die »verschiedenen Formen einer und derselben Energie, welche sich nach feststehenden Verhältnissen unter gewissen Umständen ineinander überführen ließen«, mit »demselben Maße, mit Zugrundelegung einer und derselben Einheit zu messen«. Begünstigt »durch den schnellen Ausbau der Elektrizitätslehre« habe sich aus dieser Erkenntnis, ein alle Zweige der Physik umfassendes einheitliches Maßsystem, »welches auch das absolute genannt wird« entwickelt. Dieses zeichne sich dadurch aus, dass »alle Einheiten miteinander in festen Beziehungen« stehen und sich »alle gemeinsam« auf drei Einheiten aufbauten, »welche man auch die Grundeinheiten nennt, diejenigen der Länge, Masse und Zeit«.<sup>19</sup>

Am Anfang dieser Entwicklung standen die Messungen des Magnetfelds der Erde zu Beginn der 1830er Jahre durch Carl Friedrich Gauß (1777–1855), der mit der Auslenkung des Zeigers gegen die Federkraft seines Messinstruments eine durch den Magnetismus verursachte mechanische Größe als Maß für die Intensität des Magnetfeldes angenommen hatte. Auf diese Weise waren die noch kaum erforschten Naturerscheinungen des Magnetismus nicht nur durch Vergleiche mit anderen Magneten »relativ« messbar geworden, so der von Gauß gewählte Begriff, sondern auch mit den erwähnten »Grundeinheiten«. Da sie dann auch mit den Ergebnissen von Messungen ganz anderer Größen ins Verhältnis gesetzt werden konnten, waren sie von Gauß als »absolute Messungen« bezeichnet worden.<sup>20</sup> Wilhelm Weber (1804–1891) in Deutschland wie auch William Thomson (1824–1907) und James Clerk Maxwell (1831–1879) in England übernahmen dieses Prinzip wenig später für ihre elektrischen Messungen. 1863 formulierte die »British Association for the Advancement of Science« (BAAS) Richtlinien für ein schlüssiges Einheitensystem, das zwischen Basiseinheiten und abgeleiteten Einheiten unterschied und »nutzlose Koeffizienten« vermied. 1874 benannte sie dann

19 Scheel, *Metronomie*, 1911, S. 1f.

20 Wiederkehr, *Weber*, 1968.

Zentimeter, Gramm und Sekunde als Basiseinheiten und etablierte damit das in den folgenden Jahrzehnten international verwendete »CGS-Einheitensystem« (aus engl. »centimetre, gram, second«).<sup>21</sup>

Bei der Wägung mit der Balkenwaage wurde die unbekannte, auf der einen Waagschale aufgelegte Last schon immer so gemessen, dass man auf der anderen Waagschale so lange bekannte Gewichte auflegte, bis der von der Last ausgelenkte Waagbalken seine horizontale Position wieder eingenommen hatte. Die Genauigkeit des Ergebnisses hing einerseits davon ab, wie genau die horizontale Position des Waagbalkens bestimmt werden konnte, andererseits vom kleinsten verfügbaren Gewicht, das, in der erforderlichen Zahl vervielfacht, auf die zweite Waagschale aufgebracht wurde – aus heutiger Sicht ein »digitales« System. Im Verlauf des 19. Jahrhunderts wurde der korrekte Vergleich mit anderen physikalischen Messungsergebnissen dabei möglich, nachdem die aufgelegten Gewichte allgemein anerkannt dem »absoluten« Kilogramm entsprachen.<sup>22</sup> Nur so konnte dann daraus auch die Gravitationskonstante errechnet und mit Zahl und Maßeinheiten angegeben werden – und sich an dessen Ende vom »nutzlosen Koeffizienten« zur »Naturkonstante« im Planckschen System »natürlicher Maßeinheiten« emanzipieren.

Die Physiker, die in diesen Jahrzehnten noch mit dem Selbstverständnis und der Abgrenzung ihrer Disziplin beschäftigt waren, stützten ihre Erkenntnisse wesentlich auf Messungsergebnisse, die mit selbst konstruierten, höchst unterschiedlichen Instrumenten gewonnen worden waren. Dabei hatten sie sich nicht nur der Forderung nach einem einheitlichen Maßsystem zu stellen, sondern auch Sorge dafür zu tragen, dass dieses von Wissenschaftlern in allen Ländern gleichermaßen verwendet wurde. Helmholtz, der sich als Repräsentant der Physik in der Hauptstadt des neuen deutschen Kaiserreichs der Lösung dieser komplexen Aufgabe in besonderer Weise verpflichtet fühlte, achtete darauf, dass die Messungen an seinem Universitätsinstitut und später auch in der von ihm geleiteten, neu gegründeten Physikalisch-Technischen Reichsanstalt nicht nur im »absoluten Maass (cm, g, sec)« ausgeführt wurde. Er war auch darum bemüht, dass diese Maße entsprechend der »Meterkonvention« von 1875 mit maximaler Genauigkeit an die international anerkannten Maßverkörperungen für Meter und Kilogramm angeglichen waren. So wurden bei der Aufgabenstellung für das 1884 beantragte Gra-

<sup>21</sup> Quinn, *From artefacts to atoms*, 2012, S. 128.

<sup>22</sup> Quinn teilte noch mit, dass das Kilogramm im heutigen SI-Maßsystem (»Système International d'Unités«) als einzige Basiseinheit noch immer durch ein Artefakt festgelegt ist. Quinn, *Beam balance*, 1992, S. 142. Inzwischen gilt seit 2019 eine Neudefinition der CGPM allein über Naturkonstanten. Eine nach diesen Vorgaben von der PTB angefertigte »Silizium-Einkristallkugel für Neudefinition des Kilogramms ab 2019« befindet sich unter der Inv.-Nr. 2019-541 in der Sammlung des Deutschen Museums. Mitteilungen von Daniela Schnevoigt vom Deutschen Museum am 8. und 19.8.2019.

vitationsmessungsprojekt auch die ersten Arbeitsberichte aus dem Bureau international des poids et mesures im französischen Sèvres berücksichtigt.<sup>23</sup> Mit der ebenfalls 1875 erfolgten Gründung dieser Institution hatten die seit Jahrzehnten anhaltenden Anstrengungen um ein international anerkanntes System einheitlicher Maße auf der Basis von reproduzierbaren Maßverkörperungen den Durchbruch zu der Situation erzielt, die bis heute Bestand hat.

Im Rückblick könnte man die kurzen Erklärungen zur Gravitationskonstante von Krigar-Menzel und Richarz geradezu als Indiz für den Abschluss einer vergangenen Epoche interpretieren, denn nur wenige Monate nach Erscheinen ihres Berichts verknüpfte Max Planck am 18. Mai 1899 die Gravitationskonstante, nun klar von der »mittleren Erddichte« getrennt, exklusiv mit den neuartigen Fragestellungen, die er im Rahmen seiner Untersuchungen des Strahlungsspektrums eines »schwarzen Körpers« entwickelt hatte. Mit einer neu eingeführten Konstante – dem heute nach ihm benannten »Wirkungsquantum« – und der Lichtgeschwindigkeit fügte er sie zu jenem noch absoluteren Einheitensystem zusammen, das später die Raum-Zeit-Skala für die Quantentheorie der Gravitation festlegen sollte.<sup>24</sup> Damit eröffnete er die Perspektive auf die bis heute aktuell gebliebene Sichtweise, in der die Gravitationskonstante als eine der »Naturkonstanten« gilt, deren Wert im gesamten Universum gleich ist und sich auch im Verlauf der Zeit nicht ändert.

23 Kleinevoß, *Bestimmung*, 2002, S. 6. Cornu/Baille, *Détermination*, 1873. Gillies, *Background*, 1999. König/Richarz, *Neue Methode*, 1884. Rothleitner u. Schlamminger nehmen an, dass Poisson die Konstante 1811 eingeführt hat und dass Richarz und Krigar-Menzel 1885 den Ausdruck »Gravitationskonstante« und auch die heute noch übliche Bezeichnung »G« verwendet haben. Tatsächlich verwendeten ihn jedoch König und Richarz! Rothleitner/Schlamminger, *Schwere Experimente*, 2015. Sie folgen dabei Roche, *Mathematics*, 1998, S. 161f. (persönliche Auskunft von Schlamminger).

24 Kleinevoß, *Bestimmung*, 2002, S. 1. Planck, *Strahlungsprobleme*, 1899, S. 479–480.

## Vorausgegangenes: Philipp von Jolly, Hermann von Helmholtz, einheitliches Kilogramm und Astrophysik

Vorspiel in der Hauptstadt des Königreichs Bayern.

Philipp von Jollys »Anwendung der Waage auf Probleme der Gravitation«

1881 veröffentlichte die Königliche Bayerische Akademie der Wissenschaften den Abschlussbericht zu den Gravitationsmessungen, die Philipp von Jolly an der Münchner Universität durchgeführt hatte. Der damals bereits 72jährige hatte im Verlauf seiner wissenschaftlichen Karriere wesentlich zur Herausbildung der Physik als eigenständiger Disziplin mit ständig wachsender Bedeutung beigetragen.

In Mannheim geboren, hatte Jolly zu Beginn der 1830er Jahre in Heidelberg und Wien die Fächer Mathematik, Physik und Technik studiert. Da er glaubte, allein mit theoretisch-naturphilosophischem Wissen den aktuellen Anforderungen naturwissenschaftlicher Forschung nicht gerecht werden zu können, hatte er sich in verschiedenen Werkstätten von Mechanikern und Glasbläsern auch praktische Kenntnisse und handwerkliche Fertigkeiten angeeignet. Er war dann nach Berlin gegangen, wo der mit der bestehenden Situation ebenfalls unzufriedene Heinrich Gustav Magnus (1802–1870) gerade begann, den akademischen Lehrbetrieb mit seinem privaten physikalischen Laboratorium zu bereichern. Magnus war seit 1834 außerordentlicher, seit 1845 ordentlicher Professor für Technologie und Physik an der nach der Konzeption von Wilhelm von Humboldt (1767–1835) errichteten, 1810 eröffneten und seit 1828 nach dem damaligen preußischen König Friedrich Wilhelm III. (1770–1840) benannten Berliner Universität. 1833 hatte er begonnen, eine Sammlung von Lehrmitteln und Instrumenten zusammenzustellen und diese 1842 in sein Privathaus am Kupfergraben 7 verlegt – das heute als Sitz der Deutschen Physikalischen Gesellschaft nach ihm benannt ist. Dort hielt er seine Vorlesungen und gründete 1843 das »Berliner Physikalische Kolloquium«, um Studenten und jungen Wissenschaftlern die Möglichkeit zu bieten, ihre Arbeiten zur Diskussion zu stellen. Auch der damalige Militärchirurg Helmholtz sollte dort seinen Horizont erweitern und einige seiner bedeutendsten späteren Mitstreiter kennenlernen.<sup>25</sup>

Der von Magnus eingeschlagene Weg hatte Jolly zur eigenen akademischen Karriere motiviert. Zurück im badischen Heidelberg und dort 1834 zum Doktor promoviert, hatte er seit 1839 als außerordentlicher Professor für Mathematik, seit 1846 als ordentlicher Professor für Physik gewirkt und ein erstes Experimentierlaboratorium eingerichtet. Dann überzeugte ihn jedoch die persönliche Einladung des bayerischen Königs Maximilian II. (1811–1864) zur Übernahme der Leitung

<sup>25</sup> Oittner-Torkar, *Bleikugel*, 1990. Wolff, *Magnus*, 1995. Kant, *Physiker-Schule*, 1995. Rechenberg, *Helmholtz*, 1994, S. 46.

des physikalischen Instituts an der Münchner Universität in der Nachfolge des verstorbenen Georg Simon Ohm (1789–1854). Noch in dessen Todesjahr 1854 trat er die neue Stelle an. Die Aussicht auf die Zusammenarbeit mit dem international angesehenen Carl August von Steinheil (1801–1870, geadelt 1848) und anderen Vertretern der international anerkannten Münchner Schule der Optik und Präzisionsmechanik dürfte ihm diese Entscheidung erleichtert haben.



3 Philipp von Jolly (1809–1884, geadelt 1854).

Die Berufung Jollys war nur eine der Maßnahmen, mit denen der mit einer preußischen Prinzessin verheiratete Nachfolger des 1848 vom Bayerischen Königsthron zurückgetretene Ludwig I. (1786–1868) in den sechzehn Jahren seiner Regierung die politische und kulturelle Situation in seinem Land veränderte. Maximilian hatte in den Jahren 1829 bis 1831 nicht nur in München bei dem Philosophen Friedrich Wilhelm von Schelling (1775–1854, geadelt 1812), sondern auch in Berlin und Göttingen studiert und sich dabei neben den Lehren des Hauptvertreters eines systematischen und quellenkritischen Historismus, Leopold von Ranke (1795–1886, geadelt 1865), auch die jenes Friedrich Dahlmann (1785–1860) zu Herzen genommen, der dann 1837 als einer der »Göttinger Sieben« und 1848/49 als Mitglied der Nationalversammlung und Mitverfasser der Frankfurter Reichsverfassung hervortreten sollte. Die so erworbene Bildung hatte bei dem bayerischen Thronfolger die Überzeugung gestärkt, dass er als »konstitutioneller König« sowohl die Geschichtswissenschaften als auch die Natur- und Technikwissenschaften und deren Institutionen besonders zu fördern hatte. Dafür nahm er den Unwillen der katholisch-konservativen Bevölkerung in Kauf, die sich über die Berufung von protestantischen und liberalen Professoren aus nördlich des Mains liegenden Ländern erregte und für diese die in Bayern noch immer gängige Bezeichnung der »Nordlichter« prägte.

Sein entschlossenes Handeln trug auch Früchte, als er den selbst um Veränderungen in der akademischen Lehre bemühten Hugenotten Jolly nach München holte und ihn durch die Nobilitierung auch gleich gesellschaftlich aufwertete. Jolly wurde schon bald auch wissenschaftspolitisch aktiv, beteiligte sich an der Neuorganisation der bayerischen technischen Lehranstalten und übernahm 1861 die Funktion des bayerischen Bevollmächtigten für die Bundesversammlung in Frankfurt/Main. Dort machte er als Protokollführer seinen Einfluss bei der Entscheidungsfindung zur Einführung des Metersystems geltend. Nach der Reichsgründung beteiligte sich Jolly als ständiger wissenschaftlicher Berater an den Aktivitäten der Normaleichkommission des Königreichs Bayern, zu denen auch die periodische Revision der zahlreichen örtlichen Eichämter gehörte.<sup>26</sup> Mit den so gewonnenen Erfahrungen, sowohl im Hinblick auf die technischen Aspekte der Messungsinstrumente als auch auf die konkreten Argumente für und wider das dezimale Metersystem, übernahm er 1872 die Funktion eines Delegierten der Bayerischen Regierung bei den Verhandlungen der »Commission Internationale du Mètre« in Paris.<sup>27</sup> So war er auch an den Vorbereitungen zur internationalen

<sup>26</sup> Die bayerische Normaleichkommission arbeitete auch noch nach der Reichsgründung bis zu ihrer Auflösung 1908 selbständig. Vgl. Meyer-Stoll, *Maß- und Gewichtsreformen*, 2010, S. 221.

<sup>27</sup> Böhm, *Jolly*, 1886, S. 24f. Voit, *Jolly*, 1885. Quinn erwähnt Jolly als Teilnehmer am Treffen der Internationalen Meterkonvention vom 24. Sept. 1872. Quinn, *From artefacts to atoms*, 2012, S. 50.

»Meterkonvention« von 1875 beteiligt – die gleichzeitig eine »Kilogrammkonvention« war. Sie betraf die Tätigkeit der Eichämter in allen Ländern unmittelbar, wenn sie die im Alltag verwendeten Waagen und Gewichte überprüften und mit dem staatlichen Eichstempel versehen.

Die wissenschaftlich zu begründenden Anforderungen, die sich aus den Fragen der Vereinheitlichung von Maßen und Messungsverfahren ergaben, berührten die Qualität der gängigen und neu entwickelten Messinstrumente unmittelbar. Dabei widmete sich Jolly vor allem der technischen Verbesserung der Balkenwaage. In einer akademischen Würdigung sollte später erklärt werden, dass aufgrund seiner sich über zehn Jahre hinziehenden Arbeiten »die Verfeinerung der Wägung um mehrere Decimalen vorgerückt sei«.<sup>28</sup>

Als 1877 die Versammlung der »Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte« in München stattfand, referierte Jolly über die Erkenntnisse, die er aus seinen bereits mehrjährigen Untersuchungen über das Verhalten der Balkenwaage insbesondere unter dem Einfluss von Temperaturveränderungen gewonnen hatte. Dabei fokussierte er die generelle Fragestellung, wie »unter Anwendung der Wage Probleme der Gravitation zur Lösung gebracht werden können«, auf den »Nachweis der Gewichtsabnahme der Körper mit ihrer Entfernung vom Erdmittelpunkte«. Das Echo auf seine Ausführungen war so stark, dass er bereits seine »zunächst erzielten Resultate« nicht nur in den Denkschriften der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, sondern auch in den von Helmholtz in Berlin mit herausgegebenen »Annalen der Physik und Chemie« publizierte.<sup>29</sup>

»Die Leistungsfähigkeit dieses ältesten der Messinstrumente lässt sich dahin bezeichnen«, so erklärte er zum technischen Entwicklungsstand der Balkenwaage, »dass in Vergleichung zweier Kilogrammstücke gleichen Materials mit einmaliger Wägung der unvermeidliche Fehler auf  $\pm 0,05$  mg, dass also in dem arithmetischen Mittel der Resultate wiederholter Wägungen der Fehler leicht auf  $\pm 0,01$  mg eingeengt erscheint«. Ihre Temperaturempfindlichkeit sei jedoch so groß, dass sie sich geradezu »als ein Thermoskop« erweise, das »an Empfindlichkeit mit der Thermosäule weiteifert«. Deshalb sei er sich auch sicher, »dass Gewichtsvergleichen von Gewichtsstücken ungleichen Materiales erst durch Wägungen im luftleeren Raume mit grösserer Exactheit sich vollziehen lassen«. Er fasste seine Erfahrungen in der Warnung an die Fachkollegen zusammen, dass die Durchführung genauer Messungen »unvermeidlich mit Schwierigkeiten und mit nicht unbeträchtlichem Zeitaufwande verbunden« sei. Zwar könne das Ziel »durch methodisch geordnete

<sup>28</sup> [o. Verf.], Jolly, 1885, S. 276. Meyer-Stoll, *Maß- und Gewichtsreformen*, 2010, u.a. S. 151ff. Foerster, *Lebenserinnerungen*, 1911, S. 89.

<sup>29</sup> Jolly, *Anwendung*, 1878.

Beobachtungen« rascher erreicht werden, jedoch müsse man zuvor die Bedingungen herausfinden, »unter welchen erst exacte Resultate gesichert erscheinen«. Dass es sich bei diesem Hinweis um keine Trivialität handelte, sollte sich nicht nur bei seinem eigenen Unternehmen, sondern einige Jahre später auch bei dem Berlin-Spandauer Projekt drastisch zeigen.

Zur »Bestimmung der Zehntel der Milligramme« sei die »Ableseung der Stellung des Waagebalkens mit Zeiger am Gradbogen« nicht mehr ausreichend«, erklärte Jolly. »Erst unter Anwendung von Spiegelablesungen können kleine Differenzen in der Stellung des Balkens noch mit Exactheit verfolgt werden.« Er hatte dafür »über der Mitte des Waagebalkens, senkrecht zur Längenrichtung des Balkens« einen Spiegel befestigt und etwa 3 m davon entfernt eine Skala installiert, die mit einem »Ablesefernrohr« beobachtet werden konnte. Dabei »erzeugte bei einer Belastung von einem Kilogramm ein Uebergewicht von 2 mg einen Ausschlag von 17,9 Scalentheilen. Ein Scalentheil entspricht also einem Uebergewichte von 0,1173 mg.«<sup>30</sup>

Die so erreichte »Vervollkommnung der Waage in Construction und Ausführung« gäbe Veranlassung zu neuen Anwendungen. Da »Änderungen im Drucke eines Kilogramms, welche den zehnmillionten Theil des Gewichtstückes betragen«, messbar seien, läge es nahe, solche »Probleme aufzusuchen, in welchen solche kleine Druckdifferenzen in Frage kommen« und dabei biete sich »zunächst« die Messung der »Wirkung der Schwere der Erde« an. Er rechnete vor: »Die Beschleunigung durch die Schwere nimmt nach dem Gravitationsgesetze mit dem Quadrate der Entfernung vom Erdmittelpunkte ab, in gleichem Verhältnisse nimmt also auch der Druck eines Körpers auf die Unterlage ab. Ein Körper vom Gewichte  $Q_1$  in der Entfernung  $r$  vom Erdmittelpunkte hat in der Entfernung  $r + h$  nur noch ein Gewicht  $Q_2 = Q_1 \cdot (1 - 2h/r)$ . Für  $h = 5$  m würde, der mittlere Erdhalbmesser = 6366189 m gesetzt, die Gewichtsabnahme eines Kilogramms sich schon zu 1,57 mg berechnen.« So bestand seine Botschaft an die Fachkollegen nicht zuletzt darin, dass die Abnahme der Anziehungskraft der Erde bereits bei Höhenunterschieden von nur einigen Metern, wie sie das menschliche Alltagsleben bestimmten, nicht nur bemerkbar war, sondern mit der klassischen Balkenwaage auch gemessen werden konnte.

Jolly führte der Versammlung seine Versuchsanordnung vor und beschrieb ausführlich, wie er die Wägungen mit einer Waage durchführte, deren Temperaturverhalten er zuvor genau bestimmt hatte. Er hatte sie »in einer Höhe von 5,5 m über dem Fussboden des Laboratoriums auf einem an der Wand befestigten Tische aufgestellt. Der Boden des Waagekastens war durchbohrt und an Haken der Schalen waren Drähte aufgehängt, die an ihren unteren Enden Waagschalen trugen. An jedem Hebelarm bestand also das Gehänge aus zwei Waagschalen, einer oberen

30 Jolly, *Anwendung*, 1878, S. 114.



4 Die von Carl Stollneuther nach den Vorgaben von Philipp von Jolly hergestellte Waage.

und einer unteren. Der Abstand beider Schalen betrug 5,29 m. Die herabhängenden Drähte waren gegen Bewegung durch Luftzug durch hölzerne Canäle geschützt, die in verschliessbaren Kästen zur Aufnahme der unteren Waagschalen endeten.« Zwischen oberem und unterem Kilogrammgewicht hatte er bei einem angenommenen Erdradius von 6366 189 Metern einen Gewichtsunterschied von 1,5099 Milligramm ermittelt, dem jedoch ein errechneter Wert von 1,662 Milligramm entgegenstand. Er glaube nicht, so führte Jolly aus, dass dieser Unterschied aus der verbliebenen Ungenauigkeit der Waage zu erklären sei. Eher sei er auf die von anderen Massen ausgehenden Gravitationseinwirkungen zurückzuführen, die in der Berechnung nur unzulänglich berücksichtigt waren. »Das physikalische Institut liegt in einem der tieferen Stadttheile, ist massiv gebaut und ist von massiven Gebäuden umgeben oder denselben naheliegend, während in der Rechnung vorausgesetzt ist, dass keine störenden Ursachen einwirken.«<sup>31</sup>

Max Planck, der damals als Student Jollys Gravitationswägungen verfolgte, sollte sich 1946, erinnern, dass diese »zu keinen positiven Ergebnissen« geführt hätten, da es ihm nicht gelungen sei, »die zahlreichen, die Messung beeinträchtigenden Nebeneinflüsse wie Temperatur, Feuchtigkeit usw. zu eliminieren«. Trotzdem, oder gerade deshalb, habe Helmholtz, der offenbar 1877 an der Münchner Tagung der »Naturforscher und Ärzte« teilnahm, »lebhaftes Interesse« daran gezeigt und sich »die Versuchsanordnung in allen Einzelheiten zeigen« lassen.<sup>32</sup> Helmholtz war damals Direktor des physikalischen Instituts an der Berliner Universität und sollte die Weiterführung der Aktivitäten des 12 Jahre älteren Münchner Kollegen schon bald selbst zur vordringlichen Aufgabe der Physik erklären. Der bereits zitierte Nachruf konnte dann 1885 darauf verweisen, dass Jollys »geistvolle Versuche« inzwischen von der Berliner Akademie aufgegriffen worden seien und »in etwas veränderter Form mit grossen Mitteln« weitergeführt werden würden.<sup>33</sup>

Zum Abschluss seines Berichts kündigte Jolly an, dass er seine Überlegungen mit weiteren Wägungen nachprüfen wolle. »Versuche in einem isolirt stehenden Thurm würden durch die Lage selbst und würden dadurch, dass grössere Abstände der Waagschalen in Anwendung gebracht werden könnten, vielleicht auch durch mindere Veränderlichkeit der Temperaturen der unteren und oberen Stationen, exactere Resultate liefern.« Dabei wolle er sich auch nicht auf weitere Messungen

31 Jolly, *Anwendung*, 1878, S. 112f. und 123f.

32 Planck erinnerte sich, dass er bei dieser Vorführung selbst anwesend gewesen und wahrscheinlich erstmals »mit Helmholtz persönlich in Berührung« gekommen sei. Planck, *Persönliche Erinnerungen*, 1973, S. 2. Planck, *Vorträge, Reden, Erinnerungen*, 2001, S. 42. Dass Planck sein Studium mit dem Wintersemester 1877 bei Helmholtz in Berlin fortsetzte, spricht dafür, dass dessen Besichtigung des Versuchsaufbaus schon 1877, und damit in einem frühen Stadium, stattgefunden hatte. Als Planck dann zum Abschluss seines Studiums nach München zurückkehrte und dort noch bis 1885 tätig war, konnte er auch noch die späteren Messungen Jollys verfolgen.

33 [o. Verf.], *Jolly*, 1885, S. 276f.

der Abnahme der Erdanziehung mit der Höhe beschränken, teilte er mit. »Günstigere äussere Verhältnisse würden auch erlauben einen Versuch der Wägung der Erde auszuführen, d.h. zu bestimmen, wieviel mal mehr materielle Punkte die Erde besitzt als ein Körper bekannter Grösse und bekannter Dichtigkeit.« Sein Plan war es, bei gleicher Aufstellung der Waage unter den unteren Waagschalen eine große Kugel aus Blei aufzustellen und so eine entsprechende »Vermehrung des Zuges« zu erzeugen. Zuvor wollte er »unter Zugrundelegung der für die mittlere Dichtigkeit der Erde aufgefundenen Zahl« den Halbmesser der Bleikugel so bestimmen, dass sie bei einem Kilogrammstück eine Gewichtszunahme von 1 mg bewirken würde, wobei diese »dann rückwärts auf einem neuen Wege zur Bestimmung der mittleren Dichtigkeit der Erde benutzt werden könnte«. <sup>34</sup>

Die Möglichkeit zur Weiterführung der Wägungen in der geplanten Weise ergab sich, weil in den Jahren 1878 bis 1881 im Rahmen der Erweiterung des Universitätsgebäudes an der Rückseite des Südflügels ein von drei Seiten freistehender Turm, heute als »Aulaturm« bezeichnet, errichtet wurde und dieser ihm, wie er sich in seinem Bericht ausdrückte, »durch die Liberalität der Universitätsverwaltung« zur Verfügung gestellt wurde. <sup>35</sup> Im Inneren dieses Turms bestand zwischen den an den Wänden entlanggeführten Treppen »ein freier Raum von 1,5 m Seite und 25 m Höhe«. Für seine neuen Wägungsreihen installierte Jolly in der obersten Etage die für 5 kg Maximalbelastung ausgelegte Waage und das Ablesefernrohr »erschütterungsfrei«, wobei er die Waage mit den oberen Waagschalen in einem Holzkasten unterbrachte. Die beiden nun 21,005 m langen Drähte zu den unteren, in zwei getrennten Holzkästen untergebrachten Waagschalen schützte er durch zwei Röhren aus Zinkblech und dichtete die mit Türen versehenen beiden Kästen mit Gummibändern ab.

Zwischen den unteren Kästen und dem Fußboden des Turms ließ er so viel Platz, dass dort die beschriebene Bleikugel aufgestellt werden konnte. Um eine möglichst homogene Bleimasse zu erreichen ließ er diese aus 115 flachen und sorgfältig aufeinander gepassten Platten zusammensetzen. Mit einem Durchmesser von 0,995 m hatte sie ein Gewicht von 5775,2 kg.

Als Gewichtsstücke verwendete er »vier Glaskolben von gleichem Volumen und gleichem Gewicht«, eliminierte daraus die »Luftgewichte« nach einem von dem französischen Physiker und Chemiker Henri Victor Regnault (1810–1878) angegebenen Verfahren für Gaswägungen, <sup>36</sup> füllte zwei davon mit Quecksilber zu gleichen Kilogrammgewichten und schmolz alle vier Kolben »mit der Glasbläser-

<sup>34</sup> Jolly, *Anwendung*, 1878, S. 133f.

<sup>35</sup> Jolly, *Zweite Abhandlung*, 1881, S. 332.

<sup>36</sup> Regnault war Mitglied der Akademie der Wissenschaften, Professor an der Ecole Polytechnique in Paris und am Collège de France, sowie Chefingenieur des französischen Bergbauwesens.

lampe« zu. »Die vier Kolben in den vier Wagschalen verdrängen also rechts und links stets gleiche Luftgewichte, welches auch immer die Änderung des Barometerstandes etc. sein mag.« Als Zulagegewichte verwendete er Platinblechstücke von 50, 20 und 10 mg, wobei er die »Abweichungen des Nominalwerthes dieser Gewichtsstücke von ihrem wirklichen Werthe [...] unter Zugrundelegung eines Normalkilogramms, einer Copie des ›Berliner Kilogramms‹«, ermittelte.<sup>37</sup> Da sich die langen Aufhängedrähte dann trotz der schützenden Röhren als sehr temperaturempfindlich erwiesen, ummantelte er sie zusätzlich mit Stroh und stülpte auch noch Pappkartons über die drei Holzkästen.<sup>38</sup>

Mit der Herstellung der Waage und den während den Messungen erforderlich erscheinenden Veränderungen hatte Jolly den qualifizierten Münchner Mechaniker Carl Stollnreuther (1816–1892) beauftragt, der dann die Möglichkeiten der Balkenwaage bis zu ihren technischen Grenzen auslotete. Stollnreuther hatte in der mathematisch-mechanischen Werkstatt von Georg von Reichenbach (1771–1626, geadelt 1813), Josef von Utzschneider (1763–1840, geadelt 1808) und Josef Liebherr (1767–1840), welche die erwähnte berühmte Münchner Mechanikertradition repräsentierte, gelernt und betrieb als Instrumentenmacher und Gaseichmeister seit 1845 eine Werkstatt in der Münchner Herzogspitalgasse 19.<sup>39</sup> Auch Stollnreuthers Waage gelangte 1905 in das gerade gegründete Deutsche Museum, wo sie heute allerdings nur auf Wunsch im Depot besichtigt werden kann. Dagegen ist die Bleikugel im Treppenhaus neben dem so anschaulichen Aufbau des Foucaultschen Pendels aufgestellt – und ruft trotz erklärendem Text oft nur verständnisloses Kopfschütteln hervor.<sup>40</sup>

Jolly fasste das Ziel seiner Versuchsreihe im Turm zusammen: »Die Differenz der Gewichtszunahmen mit und ohne Bleikugel, und der Quotient dieses Zuges und des Zuges der Erde allein gibt unter Benutzung des Gravitationsgesetzes das Mittel ab, die Dichtigkeit der Erde mit der Dichtigkeit des Bleies, und, da die Dichtigkeit des Bleies bekannt ist, die mittlere Dichtigkeit der Erde zu bestimmen.« Erneut unterstrich er: »Bei allen exacten Messungen nehmen die Orientierungs-

<sup>37</sup> Beim »Berliner Kilogramm« handelte es sich offenbar um das Platinkilogramm, das Alexander von Humboldt 1817 im Auftrag der preußischen Regierung erworben hatte. 1860 war es im Conservatoire national des Arts et Métiers (CNAM) in Paris mit dem Archivkilogramm verglichen und zu 0,999 999 842 kg befunden worden. Meyer-Stoll, *Maß- und Gewichtsreformen*, 2010, S. 159f. und 217, Fußnote 30.

<sup>38</sup> Jolly, *Zweite Abhandlung*, 1881, S. 332 und 339f.

<sup>39</sup> Meyer-Stoll, *Maß- und Gewichtsreformen*, 2010, S. 267 und 270. Münchner Adressbuch.

<sup>40</sup> Die 5775,2 kg schwere Bleikugel von Jolly hat die Inv.-Nr. 2729,1 die von C. Stollnreuther in München hergestellte Waage die Inv.-Nr. 2729,2. Offiziell (lt. Eingangsbuch) wurde die Stiftung vom Physikalischen Institut der Ludwig-Maximilians-Universität in München am 27.6.1905 übergeben. Da noch kein geeigneter Ausstellungsplatz gefunden war, kamen Bleikugel und Waage erst im September 1906 ins Museum. Mitteilung von Manfred Spachtholz im Deutschen Museum 15.10.2015. Die nach dem französischen Physiker Léon Foucault (1819–1868) benannte Pendeldemonstration zur Sichtbarmachung der Erdrotation war von diesem erstmals 1851 in Paris vorgeführt worden.



5 Jollys Bleikugel im Deutschen Museum.

versuche die grössere Zeit in Anspruch. Es kommt eben darauf an, die unvermeidlichen Fehlerquellen aufzudecken und zuzusehen, auf welche Grenzen dieselben eingeengt werden können.« Da auch er die »unvermeidlichen, von der Construction der Wage abhängigen Fehler« im Einzelnen doch nicht vollständig berücksichtigen konnte, was, wie er vermutete, »vielleicht bei Wägungen im luftleeren Raume möglich sein« würde, sei ihm nichts anderes übrig geblieben, »als die Gesamteinflüsse auf möglichst kleine Werthe einzuengen, und durch Vermehrung der einzelnen Beobachtungen exactere Mittelzahlen zu erzielen.«<sup>41</sup>

Die theoretischen Werte der Erdbeschleunigung berechnete er nach einem von Siméon Denis Poisson (1781–1840) mitgetheilten Verfahren für einen Ort auf »einem Festlande in unregelmäßiger Gestalt« und bestimmter Höhe über dem Meeresniveau.<sup>42</sup> Der Universitätsturm befand und befindet sich »an einer der tieferen Stellen der Stadt, mehr als 10 m tiefer als der Bahnhof, er ist von grossen monumentalen Bauten umgeben, und die Gebäude der Stadt überragen beträchtlich die Sohle des Thurmes. Alles wirkt zusammen zu einem nach aufwärts gerichteten Zuge in dem Falle, in welchem das Gewicht sich in der unteren Schale, und zu einem abwärts gerichteten Zuge, in dem Falle, in welchem das Gewicht sich in der oberen Schale befindet. Die Gewichts-differenz wird daher um den gleichen Betrag vermindert erscheinen.«

Nachdem Jolly seine »orientierenden Versuche« im Turm mit und ohne Bleikugel noch im Verlauf des Jahres 1878 abschließen konnte, führte er vom Herbst 1879 bis zum Sommer 1880 500 Einzelmessungen durch. Der daraus ermittelten Abnahme des Gewichts von 31,686 Milligramm stand sein errechneter Wert von 33,059 Milligramm gegenüber. Die mittlere Erddichte berechnete er aus dem gemessenen Wert zu 5,692 g/cm<sup>3</sup>. Zum Vergleich listete er auch die anderen bisher bekanntgewordenen Werte auf und veröffentlichte seinen ausführlichen Bericht erneut unter dem Titel »Die Anwendung der Wage auf Probleme der Gravitation. (zweite Abhandlung)« in den Denkschriften der Bayerischen Akademie und anschließend in den Annalen, wo sie 1881 erschienen.<sup>43</sup> Aus diesen Ergebnissen sollten dann zwei Jahrzehnte später Richarz und Krigar-Menzel als Wert der Gravitationskonstante  $6,47 \pm 9,11 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{s}^{-2}\text{kg}^{-1}$  errechnen und ihn als Vergleichswert zu ihrem eigenen Ergebnis mitteilen.<sup>44</sup>

41 Jolly, *Zweite Abhandlung*, 1881, S. 332f., 339, 346.

42 Jolly zitiert: Poisson, *Traité de Mécanique I*, 1833, S. 492. Jolly, *Zweite Abhandlung*, 1881, S. 334. Vgl. Kurz, *Schwerkraft*, 1888, S. 30.

43 Jolly, *Zweite Abhandlung*, 1881, S. 334f. und 347f.

44 Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 109–113. Jolly selbst hatte die Konstante in seinem ausführlichen Bericht über die Probleme der Wägung und der Ermittlung der mittleren Erddichte weder besonders erwähnt noch errechnet und sie mit der Formulierung »der Zug eines Punktes in der Entfernungseinheit« umschrieben. Darauf verwies Kurz 1888; Kurz, *Schwerkraft*, 1888, S. 30f.

Zur Abweichung von den bisher ermittelten Werten teilte Jolly die Vermutung mit: »Die mit der Wage erhaltene mittlere Dichtigkeit der Erde weicht von dem mit der Torsionswaage erhaltenen Mittel um nahezu 2% ab. Es kann sein, dass ein Theil dieser Differenz in dem geologischen Bau der Erde begründet ist, dass etwa unter der Trümmermasse, welche die Hochebene von Bayern bildet, festes Gestein von grösserer Dichtigkeit sich hinzieht. Erst die Ausführung ähnlicher Messungen an anderen Orten wird darüber Aufschluss bringen.« Diese Annahme sollte der damals in Aachen wirkende Geodät Robert Helmert (1843–1917) in einer Fußnote seines vor der Fertigstellung stehenden Lehrbuchs der Höheren Geodäsie als Irrtum bezeichnen, »denn Anomalien in  $g_1$  im Betrage von 1 bis 2% sind erfahrungsgemäß nicht annehmbar«. <sup>45</sup> Für das Berlin-Spandauer Projekt konnte Helmersts 1884 erschienenes Fundamentalwerk dann bereits genutzt werden.

Im Rückblick erscheint es nicht unwichtig, dass mit Max Planck und dem ein Jahr älteren Heinrich Hertz (1857–1894) zwei Persönlichkeiten bei Jolly studiert hatten, die der Physik den Weg zu ihrer dominierenden Rolle im 20. Jahrhundert eröffnen sollten. Plancks Erinnerungen an dessen Gravitationswägungen wurden bereits erwähnt. 1924 sollte sich Planck in einer Gastvorlesung an der Münchner Universität an seine Studienzeit bei Jolly erinnern und dann nachdenklich feststellen, dass die Physik »wohl kaum in irgendeinem halben Jahrhundert [...] ihr Antlitz so von Grund auf und so vollkommen unerwartet gewandelt« habe. Damals habe ihm Jolly als ein »auf der Höhe der Zeit stehender Physiker« und »ehrwürdiger Lehrer« die Physik als eine »hochentwickelte, nahezu voll ausgereifte Wissenschaft« geschildert, die »wohl bald ihre endgültige stabile Form angenommen haben würde«. Auch die theoretische Physik »nähere sich merklich demjenigen Grade der Vollendung, wie ihn etwa die Geometrie schon seit Jahrhunderten besitze«. <sup>46</sup> Dass Jolly trotz dieser im Rückblick als eingeschränkt erscheinenden Sicht eine Weiterentwicklung der Physik durchaus für möglich hielt und sie auch förderte, zeigte sich nicht zuletzt darin, dass er Planck mit einer Arbeit über die »mechanische Wärmetheorie« als Doktoranden akzeptierte und unterstützte. <sup>47</sup>

Ähnliches gilt für Jollys damaligen Studenten Heinrich Hertz, der schon bald aufgrund seiner wegweisenden Experimente berühmt werden sollte. Im ersten Jahr seines Physikstudiums in München, 1877, hatte ihn wohl auch Jollys Sicht auf diese noch junge Disziplin so betroffen gemacht, dass er bedauerte, nicht gelebt zu haben als »Teleskop und Mikroskop noch neu waren«. Offensichtlich sah er in den höchst anspruchsvollen Experimenten, die Jolly damals noch im Labor mit seiner

<sup>45</sup> Jolly, *Zweite Abhandlung*, 1881, S. 354. Helmert, *Theorien II*, 1884, S. 382, Fußnote.

<sup>46</sup> Planck, *Vom Relativen zum Absoluten*, 1973, S. 169, Planck, *Persönliche Erinnerungen*, 1973, S. 2, Planck, *Vorträge, Reden, Erinnerungen*, 2001, S. 103. Der Wissenschaftshistoriker Ernst Peter Fischer bezeichnete die damalige Sicht von Jolly als »ein Paradebeispiel für menschliches Irren«. Fischer, *Planck*, 2007, S. 36.

<sup>47</sup> Planck, *Wärmetheorie*, 1879.

Waage anstellte, vor allem, dass die Grenzen der praktischen Mechanik und damit auch der Messtechnik erreicht waren. Dies war zweifellos auch Jolly bewusst, als er Hertz den Rat gab, die schon damals historischen, jedoch trotzdem grundlegenden Werke zur analytischen Mechanik von Pierre-Simon Laplace (1749–1827) und Joseph-Louis de Lagrange (1736–1813, geadelt 1808) zu studieren und ihn in seinem Entschluss bestärkte, seine Studien in Berlin bei Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887) und Helmholtz fortzusetzen. Er sollte dann dort nicht nur Helmholtz' Doktorand, sondern von 1880 bis 1882 auch dessen hochgeschätzter Assistent werden und mit ihm bis zu seinem Lebensende engen Kontakt pflegen.<sup>48</sup>

### Einführung des metrischen Systems im Norddeutschen Bund und im deutschen Kaiserreich. Ein kurzer Blick nach Paris und Sèvres

Als Jolly sich in München im Dienst des bayrischen Königreichs der Verbreitung eines einheitlichen Maßsystems auf der Basis des in Paris deponierten Meter- und Kilogrammstandards zuwandte, schloss er sich einem Vorhaben an, das zwar an vielen Stellen seit langem verfolgt wurde, dem sich aber auch zahlreiche, oft festverankerte Hindernisse entgegenstellten.<sup>49</sup> In seinen Erinnerungen hat der langjährige Direktor der Berliner Sternwarte und der Normal-Eichungskommission, Wilhelm Foerster, die damalige Situation mit einem vielsagenden Beispiel charakterisiert: Der Deutsche Zollverein hatte 1858 zwar ein einheitliches »Zollpfund« eingeführt, es jedoch den beteiligten Ländern überlassen, dieses in kleinere Einheiten aufzuteilen. Die alte, aus fortlaufender Halbierung entstandene Aufteilung in 32 Lot – heute würde man sie als binär bezeichnen – wurde damals aufgegeben. Foerster sollte sie auch noch in seinen 1911 veröffentlichten Erinnerungen »rein technisch, vom Gesichtspunkt der Fabrikation und Berichtigung der einzelnen Stufen betrachtet«, als »viel vollkommener« bezeichnen als die Dezimalteilung, »die eben nur rechnerisch die größten Vorteile bietet und sich dadurch entscheidend für den Verkehr empfiehlt« – und die wir heute, so könnte man hinzufügen, beinahe als naturgegeben verinnerlicht haben. Damals habe man insbesondere in Preußen »jene alte Bedeutung der 32-Teilung« nicht gewürdigt und das Pfund »lächerlicherweise in 30 Lot geteilt« und als »einzigem Vorteil« gesehen, »daß die mittlere Monatsdauer von 30 Tagen alles, was täglich ein Lot betrug, auf monatlich ein Pfund brachte«.<sup>50</sup>

Vor diesem Hintergrund und kurz nachdem in Frankfurt die Administration des inzwischen bestehenden Norddeutschen Bunds im August 1869 die Einführung des metrischen Systems ab dem Jahr 1870 dekretiert hatte, wurde Foerster

48 Kuczera, *Heinrich Hertz*, 1987, S. 31f. Fölsing, *Hertz*, 1997, S. 67.

49 Zur Frühgeschichte des Pariser Archivilogramms: Jenemann, *Kilogramm der Archive*, 1996, S. 183–213.

50 Foerster, *Lebenserinnerungen*, 1911, S. 88f.



6 Wilhelm Foerster (1832–1921).

zum Direktor von dessen Normal-Eichungskommission ernannt und ihm die Leitung der erforderlichen Maßnahmen übertragen. Dazu gehörte nicht nur die schnelle Planung und Errichtung eines neuen, den aktuellen Ansprüchen an die Messungstechnik gerecht werdenden »Instituts für Metronomie« in Berlin, sondern auch die Aufsicht über die technische Ausstattung der zahlreichen örtlichen Eichämter. Ähnlich wie Jolly wurde auch Foerster auf diese Weise zum praxiserfahrenen Experten für die in schneller Entwicklung befindliche Präzisionsmesstechnik.<sup>51</sup> Schon 1867 hatte er mitgewirkt, als die von dem preußischen Generalleutnant Johann Jacob Baeyer (1794–1885) organisierte »Generalkonferenz der mitteleuropäischen Gradmessung« ihre Entscheidung zur Verbreitung des metrischen Systems traf und seither dieses Ziel »unberührt von der damaligen Abneigung leitender wissenschaftlicher Kreise Berlins« weiterverfolgt hatte.

An der Berliner Akademie der Wissenschaften verteidigte man damals das preußische Maßsystem, das insbesondere der Königsberger Astronom Friedrich Wilhelm Bessel (1784–1846) mit höchst anspruchsvollen, auch international anerkannten Untersuchungen und Messungen fundiert hatte. Auf dieses Maßsystem sei man damals »mit Recht sehr stolz« gewesen, sollte sich Foerster erinnern, »besonders auch im Hinblick auf den Stillstand, ja man kann sagen, auf den Rückgang, den die Verwaltung des metrischen Systems in Paris seit den großen Tagen seiner am Ende des 18. Jahrhunderts erfolgten Begründung erlitten hatte, so daß Bessel in der Tat über den Kontrast der idealen Präntentionen dieses Systems mit der unzureichenden Durchführung desselben spotten konnte.«<sup>52</sup>

Tatsächlich hatte man in Frankreich zur Kenntnis nehmen müssen, dass die inzwischen restaurativ-feudal und nach wie vor ländlich geprägte Bevölkerung keine Notwendigkeit für einen Verzicht auf die althergebrachten Maße sah und sich der tief in ihren Alltag eingreifenden und als willkürlich empfundenen Maßnahme der damaligen revolutionären Staatsadministration widersetzte. Cornelia Meyer-Stoll spricht sogar von einer »Traumatisierung«, die bei der Umstellung auf das neue Maßsystem nicht nur bei der französischen Bevölkerung bestanden, sondern auch jenseits des Rheins nachgewirkt habe.<sup>53</sup>

Bei alledem war und blieb die Tatsache, dass sowohl das Abgleichen althergebrachter als auch neu eingeführter Gewichte mit der Waage zu erfolgen hatte, deren Anzeige in jedem Einzelfall als einzig mögliche Begründung für ein gerechtes und auch justiziables Vorgehen angesehen wurde. Die dabei geltende Regel, dass die empfindlichere Waage den richtigen Wert anzeige, erhielt jedoch mit der anhaltenden technischen Weiterentwicklung der Waagen eine neue Bedeutung.

51 Quinn, *From artefacts to atoms*, 2012, S. 90.

52 Foerster, *Lebenserinnerungen*, 1911, S. 89f.

53 Meyer-Stoll, *Maß- und Gewichtsreformen*, 2010, S. 103. Vgl. Alder, *Revolution to measure*, 1994.

Trotz aller Widerstände sollten die ein halbes Jahrhundert zuvor im revolutionären Paris vereinbarten Maßnahmen zur internationalen Verbreitung einheitlicher Maße und Gewichte ihre Überzeugungskraft behalten. Dem Rat der Akademie folgend hatte damals die französische verfassunggebende Versammlung ein dezimal unterteiltes System für Meter und Kilogramm dekretiert, das auf zwei zentral aufbewahrten materiellen Verkörperungen, dem »Mètre des Archives« für die Länge und dem »Kilogramme des Archives« für das Gewicht, beruhte. Die revolutionäre Staatsadministration hatte auch demonstrativ in einem historischen Pariser Kirchengebäude das »Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM)« eingerichtet.<sup>54</sup> Diese als nationales Zentrum zur Förderung der Industrie und des Handels eingerichtete Institution wurde im neuen Revolutionsjahr 1848 nicht nur zum nationalen Aufbewahrungsort für die beiden Maßverkörperungen bestimmt, sondern ihm wurde auch die Verantwortung für die Verbreitung von Meter und Kilogramm mitsamt der korrekten Abgleichung der Eichmaße in Frankreich und auch in allen anderen interessierten Staaten übertragen. Für diese stellte sich seither die Frage, ob und wie weitgehend sie sich den Maßnahmen und Entscheidungen einer französischen Nationalbehörde unterordnen wollten.

Im viel stärker industrialisierten England geriet die 1851 in London abgehaltene große Industrieausstellung (»Great Exhibition of the Works of Industry of all Nations«) zum entscheidenden Ereignis, das den Wunsch nach einem international einheitlichen Maßsystem auch dort intensivierte. Da jedes Land die Qualitäten seiner Ausstellungsstücke mit eigenen Maßen beschrieben hatte, war ein objektiver Vergleich schwergefallen und hatte auch der Jury bei ihrer Beurteilung und Preisvergabe zu schaffen gemacht. In der Folge brachte die britische »Society for the Encouragement of Arts, Manufactures and Commerce« zwei Jahre später in einem ausführlichen Memorandum an die »Lords Commission of the Treasury« die Vorteile eines einheitlichen Maßsystems zum Ausdruck und forderte die britische Beteiligung an den auf Paris ausgerichteten internationalen Bemühungen.<sup>55</sup>

1869 ergriff der französische Kaiser Napoleon III. (1808 1873) die Initiative und gründete eine seinem Ministerium für Handel und Landwirtschaft unterstellte »Commission Internationale du Mètre«. Dieses Ministerium lud die an einer Beteiligung interessierten Regierungen der anderen Staaten auch gleich ein, ihre Dele-

<sup>54</sup> Zur Förderung der nationalen Industrie hatte der Abbé Grégoire 1794 im Nationalkonvent den Antrag gestellt: »La création d'un conservatoire pour les arts et métiers, où se réuniront tous les outils et machines nouvelles inventés et perfectionnés, va éveiller la curiosité & l'intérêt, et vous verrez dans tous les genres des progrès très rapides. [...] L'expérience seule, en parlant aux yeux, aura droit d'obtenir l'assentiment [...]. Il faut éclairer l'ignorance qui ne connaît pas, et la pauvreté qui n'a pas les moyens de connaître. [...] On y réunira les instruments et les modèles de tous les arts, dont l'objet est de nourrir, vêtir et loger.« Le 19 vendémiaire an III [10 octobre 1794], la loi instaurant le Conservatoire des arts et métiers est votée., <http://www.arts-et-metiers.net/musee/une-fondation-revolutionnaire> (14.6.2018).

<sup>55</sup> Quinn, *From artefacts to atoms*, 2012, S. 6f.

gierten zu einem ersten Treffen am 13. August 1870 nach Paris zu schicken. Obwohl der Kaiser dann drei Wochen vor diesem Termin den Krieg gegen Preußen erklärte, kamen Delegierte aus siebzehn Staaten zusammen, einschließlich jener aus Österreich und der Schweiz. Auch wenn die Vertreter aus Preußen und Bayern fehlten, war die Versammlung entschlossen, ihr Vorhaben durch den Krieg und die politischen Gegensätze nicht verhindern zu lassen und diskutierte die entscheidenden Fragen. Kontroverse Positionen bestanden darüber, ob die im inzwischen in »Conservatoire Impérial des Arts et Métiers« umbenannten Pariser Institut archivierten Referenzstandards für Meter und Kilogramm auch weiterhin für alle anderen Länder gelten sollten oder ob und wie unter Einbeziehung der jeweils aktuellen naturwissenschaftlichen und werkstofftechnischen Erkenntnisse neue Maßverkörperungen geschaffen werden sollten. Längst war klar, dass diese sich im Lauf der Jahrzehnte aufgrund langsamer chemischer Prozesse nicht nur materialmäßig, sondern auch in ihren Maßen und ihrem Gewicht verändert hatten und in Zukunft weiter verändern würden. Diskutiert wurde auch, welche Anforderungen an die in größerer Zahl herzustellenden Kopien gestellt werden sollten, bevor sie den beteiligten Staatsregierungen als Referenzmaße zur Verfügung gestellt werden konnten.

Schon am nächsten Treffen, das im April 1872 in der Hauptstadt der nunmehr bestehenden bereits dritten französischen Republik stattfand, nahm als Delegierter des im benachbarten Versailles ebenfalls neu gegründeten deutschen Kaiserreichs erstmals Foerster teil. Dem folgte schon im September 1872 ein weiteres Treffen, an dem sich dann tatsächlich die Delegierten aller interessierten Staatsregierungen beteiligten. Unter ihnen befanden sich neben Jolly als Vertreter der bayerischen Interessen und dem prominenten Joseph Henry (1797–1878) als Vertreter der Regierung der USA auch Delegierte aus dem Osmanischen Reich und aus einigen der jungen und auf ihre Eigenständigkeit bedachten lateinamerikanischen Staaten. Auch wenn die Unterschiede in den Voraussetzungen kaum größer sein konnten, so bestand doch bei allen Einigkeit darüber, dass ein internationales Maßsystem endlich geschaffen werden müsse.<sup>56</sup> Naturgemäß blieb die zukünftige Rolle des wieder mit dem alten Namen versehenen »Conservatoire National des Arts et Métiers« (CNAM) und der ihm auch weiterhin auferlegten nationalen Verpflichtungen noch ungeklärt.

In der Folge organisierte das französische Außenministerium vom März bis zum Mai 1875 jene internationale »Conférence diplomatique du mètre« am Quai d'Orsay in Paris, während der dann am 20. Mai im Rahmen einer internationalen »Meterkonvention« die Gründung eines »Comité international des poids et

56 Liste der Teilnehmer und Ziele in: Quinn, *From artefacts to atoms*, 2012, S. 49–52.

mesures« (CIPM) mit einem ständigen Arbeitsinstitut »Bureau international des poids et mesures« (BIPM) beschlossen wurde. Obwohl eine Verpflichtung zur Übernahme des metrischen Systems durch die Unterzeichnerstaaten im Vertrag nicht enthalten war, sollte ihm England erst 1884 beitreten. Auch traten britische Wissenschaftler bei den frühen Verhandlungen und Entscheidungen kaum in Erscheinung. Noch 1910 sollte Foerster als langjähriger Beobachter der internationalen Szene über die Gegebenheiten in England urteilen: »Die Selbstregierung und Selbstverwaltung ist bis in die kleinsten Kreise dort so machtvoll und entscheidend, zugleich aber so abgeneigt gegen alles polizeiliche Reglementieren und Überwachen, daß umfassende neue Einrichtungen nur in Jahrzehnten allmählich Wurzel fassen können.«<sup>57</sup>

Schon bald wurde auch entschieden, dass dieses BIPM nicht im CNAM, sondern im Pavillon de Breteuil eingerichtet werden sollte. Dieser am Rand von Paris in unmittelbarer Nachbarschaft zur berühmten Porzellanmanufaktur von Sèvres befindliche Pavillon war 1870/71 schwer beschädigt worden als die dort lagernden deutschen Truppen von der französischen Artillerie beschossen worden waren. Nachdem ihn die französische Regierung 1875 dem neuen CIPM zur Verfügung gestellt hatte, erfolgte der Wiederaufbau nach dessen Vorgaben. Foerster, der zuerst als preußischer und dann als Delegierter der Reichsregierung an den Verhandlungen von Anfang an beteiligt war und entscheidend dazu beitrug, dass der Metervertrag trotz des Kriegs zustande kam, spricht in seinen Erinnerungen vom »sogenannten Pavillon de Breteuil« als einem »kleinen Schlößchen, welches, zum Park von St. Cloud gehörig, früher von den Prinzen des Hauses Orléans und zuletzt von der Cousine des Kaisers Napoleon III., der Prinzessin Mathilde, bewohnt worden war«. Das wieder aufgebaute Schlößchen habe dann neben dem Saal für die internationalen Konferenzen auch einige Arbeitszimmer und Dienstwohnungen aufgenommen, während daneben, »anlehnend an die Felswände des Hügels, das Depot der neuen Prototype und das zentrale Laboratorium des internationalen Maß- und Gewichtswesens mit den neuesten und besten Einrichtungen errichtet wurden.«<sup>58</sup> Dabei war es wiederum Foerster, der die neuesten Erfahrungen aus dem gerade erst fertiggestellten Bau des Metronomischen Instituts bei der »Kaiserlichen Normal Aichungs Commission« (NAC) am Berliner Enckeplatz einbringen konnte.<sup>59</sup>

Auch zur Entscheidung für den Pavillon de Breteuil hatte Foerster maßgeblich beigetragen. Er hatte sich für eine Lösung eingesetzt, die auch jenen französischen Interessen entgegenkommen sollte, die nach der militärischen Niederlage und der

57 Quinn, *From artefacts to atoms*, 2012, S. 62f. Foerster, *Lebenserinnerungen*, 1911, S. 119.

58 Foerster, *Lebenserinnerungen*, 1911, S. 157f. Bilder und Raumplan in Quinn, *From artefacts to atoms*, 2012, Plates 24–33.

59 Quinn, *From artefacts to atoms*, 2012, S. 101f.

in seinen Augen besonders verhängnisvollen Verpflichtung zur Abtretung von Elsaß-Lothringen auf die Berliner Vorstellungen mit Ablehnung oder Misstrauen reagierten. So erwähnte er in seinen Erinnerungen auch, dass die langjährigen Angehörigen der Zentralstelle des im CNAM in der Pariser Innenstadt amtierenden französischen Maß- und Gewichtsdienstes, deren Verdienste er hervorhob, dort auch den geeigneten Platz für die neue, nunmehr internationale Einrichtung gesehen hätten. Er habe dies abgelehnt, sich aber für eine Ansiedelung an anderer Stelle in Paris eingesetzt. Mit Zustimmung anderer französischer Vertreter habe man sich schließlich auf das Schlösschen in Sèvres geeinigt. Trotzdem hätten sich französische Vorbehalte auch weiterhin gehalten. »Dieses Institut solle eigentlich nichts Geringeres werden, als eine Art von ständiger Filiale deutscher Wissenschaft und Technik in Paris, sozusagen ein Beginn der Mediatisierung französischer Verwaltung«, zitierte Foerster eine der von ihm als »nationalistisch« bezeichneten Einschätzungen.<sup>60</sup>

### Hermann Helmholtz, preußischer Mediziner Physiologe und Physiker

Die geschilderten Ereignisse bildeten auch den Hintergrund der eindrucksvollen wissenschaftlichen und wissenschaftspolitischen Karriere von Hermann Helmholtz. Da dieser sich offenbar nirgends explizit zu den Intentionen geäußert hat, die er bei dem Berlin-Spandauer Gravitationsmessungsprojekt verfolgte, können dazu nur indirekte Schlüsse gezogen werden. Deshalb soll auf seinen aus heutiger Sicht ungewöhnlichen Werdegang und den dabei herausgebildeten breiten preußisch geprägten wissenschaftlichen Horizont ausführlicher eingegangen werden – auch weil dabei etwas Licht auf die weit weniger bekannten Karrieren seiner drei am Gravitationsmessungsprojekt beteiligten Schüler fällt. Immerhin hatte er zur Zeit der Antragstellung als Sechzigjähriger in Berlin eine Position erreicht, die seinen Münchner Porträtisten Franz von Lenbach (1836–1904, geadelt 1882) zu der seither vielzitierten Titulierung als »Reichskanzler der Wissenschaft« veranlasste.<sup>61</sup> Damit wird sicherlich eine wichtige Seite seiner Persönlichkeit charakterisiert, denn Lenbach wusste, was er sagte. Er war mit dem tatsächlichen Reichskanzler Otto von Bismarck (1815–1898) gut bekannt und hatte sowohl ihn als auch Helmholtz mehrfach gemalt.

<sup>60</sup> Quinn, *From artefacts to atoms*, 2012, S. 101f. Mit der zitierten französischen Einschätzung sei der russische Delegierte konfrontiert worden, erinnerte sich Foerster. Foerster, *Lebenserinnerungen*, 1911, S. 147. Quinn, *From artefacts to atoms*, 2012, S. 78. Noch 1969 sollte der Physiker und Wissenschaftshistoriker John Desmond Bernal von »a kind of scientific Empire« sprechen, mit dem die Wissenschaftler des deutschen Kaiserreichs die nord-, mittel- und osteuropäischen Länder dominierten. Zit. bei Schroeder-Gudehus, *Challenge*, 1973, S. 99.

<sup>61</sup> Zitiert bei Koenigsberger, *Helmholtz*, 1902, Bd. 3, S. 96f.

1821 in Potsdam geboren, hatte Helmholtz nach dem Besuch des von seinem Vater geleiteten Gymnasiums »Große Stadtschule« in Potsdam seit 1838 am als »Pépinère« bezeichneten, zur Ausbildung von Militärärzten errichteten »Medicinisch-chirurgischen Friedrich-Wilhelm-Institut« in Berlin Medizin studiert.<sup>62</sup> Er hatte 1842 seine Doktorarbeit auf dem Gebiet der mikroskopischen Anatomie verfasst, war seit 1842 »Chirurgus« am Berliner Krankenhaus »Charité« gewesen, hatte seit 1843 als »Escadronchirurgus im Königlichen Garde-Husaren-Regiment zu Potsdam« seinen Militärdienst in Potsdam geleistet und war dort 1845 für kurze Zeit als »attachierter Chirurg« zur Staatsprüfung wieder an die Charité in Berlin beurlaubt worden. Dabei hatte er nicht nur seine Aufgaben als Arzt wahrgenommen, sondern auch über »das Wesen der Fäulnis und Gärung« und den »Stoffverbrauch bei der Muskelaction« geforscht. Schon damals hatte er sich bei seinen Fragestellungen nicht auf den medizinischen Horizont einschränken lassen und auch im erwähnten Laboratorium von Magnus praktisch experimentiert.<sup>63</sup> Seine mathematische Begabung hatte ihn früh motiviert, die so erworbenen vielfältigen Erkenntnisse mit den analytisch-mathematischen Theorien zur Mechanik, Hydrodynamik und insbesondere dem noch wenig erforschten Elektromagnetismus zu koordinieren. In der Konsequenz entwickelte er die Überzeugung, dass naturwissenschaftliche Erkenntnisse und Theorien sowohl mathematisch formuliert als auch durch Messungen mit technischen Instrumenten bestätigt werden mussten, wobei deren Empfindlichkeit den spezifischen Erkenntnissen die jeweiligen Grenzen setzte.

Schon als 25jähriger war er zu einem tiefen Verständnis des Prinzips zur Erhaltung der Energie gelangt, das sich für die weitere Entwicklung der divergierenden Naturwissenschaften und auch ihrer technischen Anwendungen als gemeinsames Fundament erweisen sollte. Seine 1846/47 dazu verfassten wegweisenden Veröffentlichungen beeindruckten den damals siebzigjährigen »über die Berliner wissenschaftlichen Geschicke waltenden« Alexander von Humboldt (1769–1859), der daraufhin die vorzeitige Entlassung des ambitionierten jungen Arztes aus dem Militärdienst im auch in Berlin durch die Revolution bestimmten Jahr 1848 veranlasste.<sup>64</sup> Dabei scheint das Verhältnis zwischen Helmholtz und dem preußischen Militär, das ihm den Start in die wissenschaftliche Karriere ermöglicht hatte, während seines ganzen Lebens ungetrübt geblieben zu sein.<sup>65</sup>

<sup>62</sup> 1792 hatte der preußische König Friedrich Wilhelm II. die Errichtung einer chirurgischen »Pépinère«, einer »Pflanzstätte« für Militärärzte, in Berlin befohlen. Dort wurde ein volles medizinisches Studium geboten, ergänzt durch militärische Kenntnisse. Das Studium war frei und die Studenten hatten Kost und Logis im Institut. Es wurden nur so viele Studenten angenommen wie Militärärzte gebraucht wurden. Der Andrang war groß. Die Ausbildung dauerte vier Jahre. Für Studenten, die sich verpflichteten, danach für acht Jahre Dienst als Militärchirurgen zu tun, erfolgte die Ausbildung auf Staatskosten mit zusätzlichem Sold. Vgl.: <https://de.wikipedia.org/wiki/Pépinère> (14.6.2018).

<sup>63</sup> Wolff, *Magnus*, 1994, S. 41.

<sup>64</sup> Formulierung von Koenigsberger, zit. von Rechenberg, *Helmholtz*, 1994, S. 63.

<sup>65</sup> Eine fundierte Einschätzung der politischen Haltung von Helmholtz gibt Cahán in: Cahán, *Helmholtz between Science and Politics*, 2006.

Seine akademische Laufbahn begann Helmholtz an der »Königlich preußischen Akademie der Künste«, wo er während einiger Monate die Studenten in Anatomie unterrichtete. Bereits 1849 konnte er dann die Stelle eines Professors für Physiologie und Pathologie an der Universität in Königsberg antreten. Wie sein in Berlin verbliebener älterer Studienkollege und langjähriger Freund Emil du Bois-Reymond (1818–1896), vertrat und verkündete nun auch Helmholtz als engagierter Universitätsprofessor die Erkenntnisse und Möglichkeiten einer programmatisch als »organische Physik« verstandenen Ausrichtung der Medizin.<sup>66</sup> Mit der Überzeugung, ihre Fächer ausschließlich auf dem Boden der exakten Naturwissenschaften betreiben zu müssen, positionierten sie sich besonders gegen ihren akademischen Lehrer Johannes Müller (1801–1858), der sich als bedeutender Biologe, Physiologe und Naturphilosoph sicher war, in der Existenz einer besonderen »Lebenskraft« die einheitliche Ursache für die Ordnung »aller Lebenserscheinungen« gefunden zu haben.<sup>67</sup>

1851 übernahm Helmholtz eine Professur für Physiologie in Bonn und wechselte 1858 auf seine dritte in diesem Fach an die Universität in Heidelberg. Dort traf er Gustav Robert Kirchhoff wieder, den er schon beim Studium in Berlin kennen und schätzen gelernt hatte und der als Nachfolger Jollys zum Leiter des physikalischen Instituts berufen worden war. Noch in Königsberg hatte Helmholtz mit dem Augenspiegel ein Instrument entwickelt, das in der alltäglichen Praxis der Augenärzte schnell Verbreitung fand, ihm deren Anerkennung verschaffte und bis heute seine wahrscheinlich bekannteste Erfindung geblieben ist.<sup>68</sup> Bei seinen Forschungen zur optischen und akustischen Sinneswahrnehmung bezog er auch weiterhin die neuesten Erkenntnisse aus den experimentell gestützten und mathematisch formulierten Theorien der noch im Entstehen begriffenen Elektrodynamik mit ein.

Seine intensive Beschäftigung mit den physiologischen und physikalischen Fragen zur Wahrnehmung von Farben und Tönen während der Bonner und Heidelberger Jahre mündete in die Publikation der drei Bände seines »Handbuchs der physiologischen Optik« in den Jahren 1856 bis 1867 und der 1863 erscheinenden »Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik«. Mehrfach neu aufgelegt, behaupten diese fundamentalen Werke bis heute ihren Platz in der Physiologie, der Physik, der Akustik und auch in der Musikwissenschaft.<sup>69</sup>

<sup>66</sup> Du Bois-Reymond war seit 1851 Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften, seit 1855 außerordentlicher und 1858 ordentlicher Professor an der Berliner Universität.

<sup>67</sup> So du Bois-Reymond, zit. in Koenigsberger, *Helmholtz*, 1902, Bd. 1, S. 45f. und Rechenberg, *Helmholtz*, 1994, S. 33.

<sup>68</sup> Cahan hält die durch Helmholtz' Augenspiegel bewirkte Innovation für ähnlich bedeutend wie die von Galileis Teleskop. Cahan, *Helmholtz between Science and Politics*, 2006, S. 1098f.

<sup>69</sup> Helmholtz, *Handbuch der physiologischen Optik*, Leipzig 1856, 1860, 1866. Helmholtz, *Tonempfindungen*, 1863, 1865, 1870, 1877.



7 Hermann von Helmholtz (1821–1894).



8 Emil du Bois-Reymond (1818–1896).

Dabei ergab sich eine glückliche Beziehung in die bayerische Residenzstadt, die auch für das positive Verhältnis von Helmholtz zu Jolly nicht ohne Bedeutung geblieben sein dürfte. Auch wirft sie ein weiteres Schlaglicht auf die Wirksamkeit des Königs Maximilian II. als eines von seiner konstitutionellen Sendung überzeugten deutschen Monarchen in der Mitte des 19. Jahrhunderts. Zwei Jahre nachdem dieser Jolly nach München berufen hatte, übernahm er 1857 die Finanzierung eines von Helmholtz entwickelten elektromechanischen, als »Vibrationsmikroskop« bezeichneten Instruments, das es ermöglichte, »Stimmgabelschwingungen durch Elektromagnetismus nach Willkür zu dirigieren, Intensität und Phasenunterschiede vollständig zu beherrschen«. Er konnte damit die Schwingungen von Saiteninstrumenten und die Entstehung bestimmter Klangfarben untersuchen.<sup>70</sup>

Als er diesen Apparat 1859 während der Jahrhundertfeier der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in München vorführte, dürfte er nicht nur mit dem König, sondern auch mit Jolly zusammengetroffen sein. Helmholtz sollte seine Kontakte nach München später auch von Berlin aus weiter pflegen, etwa wenn er seinen Urlaub mehrfach am Starnberger See verbrachte.<sup>71</sup> So war er mit Jolly bereits seit zwei Jahrzehnten bekannt, als dieser ihm den Messungsaufbau für seine Gravitationsmessungen vorführte. Maximilian II. starb 1864 und es blieb seinem ihm als König Ludwig II. (1845–1886) nachfolgenden Sohn vorbehalten, Bayern zuerst als Gegner und dann als Partner Preußens in die sogenannten »Einigungskriege« und nach der Belagerung von Paris schließlich ins neue Kaiserreich zu führen.

Die so eindrucksvoll dokumentierten Forschungen zur Sinneswahrnehmung brachten Helmholtz in der internationalen Wissenschaftsszene viel Anerkennung, sowohl von Seiten der Mediziner und Physiologen als auch von der nun überall an Bedeutung gewinnenden Physik und nicht zuletzt aus der musikalisch-kulturellen Szene. 1866 wurde er in die Königlich Schwedische Akademie der Wissenschaften, 1868 in die Königlich Physiographische Gesellschaft in Lund und auch in die American Academy of Arts and Sciences und 1870 in die Königlich Schwedische Musikakademie aufgenommen, bevor er am 5. Mai 1870 auch zum korrespondierenden Mitglied der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin gewählt wurde.

Gegen Ende der 1860er Jahre war die mathematische Behandlung der Erkenntnisse der noch keineswegs schlüssigen Theorien der Elektrizität und des Magnetismus noch stärker in den Vordergrund seiner Interessen gerückt. Er sah sich dabei in

<sup>70</sup> Helmholtz dürfte zur Entwicklung dieses Instruments durch die in den vorangegangenen Jahren veröffentlichten Arbeiten des französischen Physikers Jules Antoine Lissajous (1822–1880) angeregt worden sein.

<sup>71</sup> Rechenberg, *Helmholtz*, 1994, S. 137 und 181.

der Überzeugung bestärkt, dass diese elementaren Gesetzmäßigkeiten im Rahmen einer wissenschaftlichen Disziplin Physik verstanden werden mussten, die den physiologischen Fragestellungen übergeordnet war. So mokierte er sich über die mangelnden physikalischen Kenntnisse der Elektrotherapeuten, die versuchten, die Fortpflanzung der elektrischen Nervenreizung zu erklären. Unterstützung erfuhr die Verschiebung seiner Interessenlage aber auch durch Bemühungen des preußischen Staatsministeriums, das ihn vom badischen Heidelberg wieder ins rheinpreußische Bonn zu berufen suchte, wo er nicht mehr Physiologie, sondern in der Nachbarschaft von Kirchhoff nun ausdrücklich die mathematische Physik lehren sollte.<sup>72</sup>

Wie seine Biografen anmerkten, habe seine »endgültige Wendung zur Physik« stattgefunden, während er seine Forschung zu Beginn des Jahres 1870 auf die verschiedenen, damals miteinander konkurrierenden Theorien der Elektrodynamik konzentrierte.<sup>73</sup> Als dann Magnus am 4. April 1870 starb und an der Berliner Universität der Lehrstuhl für Technologie und Physik neu zu besetzen war, machte sich sein alter Freund du Bois-Reymond, der schon 1855 auf die Professor für Physiologie berufen worden war und gerade als Rektor der Universität amtierte, erfolgreich für die Berufung von Helmholtz als Nachfolger stark. Dieser nahm sie am 1. Juli 1870 unter der Bedingung an, dass beide Kammern des preußischen Landtags neben dem ausgehandelten stattlichen Gehalt auch den Bau eines neuen physikalischen Instituts bewilligen würden, das in Größe und Ausstattung den aktuellen und zukünftigen Anforderungen gerecht werden sollte.

Zuvor hatte er noch seinem Kollegen und langjährigen Freund William Thomson (1824–1907) – seit 1866 Lord Kelvin – eine Absage erteilt, als dieser ihm eine Professur für experimentelle Physik an der Universität von Cambridge in Aussicht gestellt hatte. Thomson hatte die Stelle in Cambridge zuvor selbst abgelehnt, da er in seinem schon seit 1846 aufgebauten und mit einem Labor ausgestatteten Institut im schottischen Glasgow bleiben wollte. 1871 sollte sie schließlich mit James Clerk Maxwell besetzt werden.

### Direktor des physikalischen Instituts der Berliner Universität

Im Verlauf der Jahre 1870/71 sollte sich nicht nur die persönliche Situation von Helmholtz tiefgreifend verändern, sondern auch die der Stadt Berlin, der deutschen Einzelstaaten und darüber hinaus die ganz Europas. Knapp drei Wochen

<sup>72</sup> Ausführliche Darstellung bei Rechenberg, *Helmholtz*, 1994, S. 171–183.

<sup>73</sup> Rechenberg, *Helmholtz*, 1994, S. 175. Cahan, *Helmholtz between Science and Politics*, 2006, S. 1111.

nachdem er seine Bereitschaft erklärt hatte, an die Berliner Universität zu kommen, hatte der französische Kaiser Preußen den Krieg erklärt. Als Helmholtz Anfang April 1871 seine erste Berliner Wohnung bezog, befand sich der französische Kaiser bereits im Exil in England, Frankreich wurde zum dritten Mal innerhalb eines Dreivierteljahrhunderts Republik, Berlin war nicht mehr nur Hauptstadt von Preußen, sondern auch die des neuen deutschen Kaiserreichs. Weitere zwei Monate später konnte Helmholtz am 16. Juni von seinem ersten Arbeitszimmer im Universitätsgebäude den Aufmarsch des zurückkehrenden Heers vor dem Berliner Schloss beobachten.<sup>74</sup> Ein Teil der fünf Milliarden Francs, die Frankreich während der nächsten drei Jahre als »Kriegsentschädigung« zu bezahlen hatte, wurden »ganz im alten, inzwischen aber rührend antiquierten Stil«, wie es der Historiker Hans-Ulrich Wehler (1931–2014) ausdrückte, als »Reichskriegsschatz« im Juliiurm der Spandauer Zitadelle eingelagert, die, was Helmholtz noch nicht ahnen konnte, ein Jahrzehnt später auch zum Ort der von ihm verantworteten Gravitationsmessungen werden sollte.<sup>75</sup>

Nach eingehender Planung begann der Architekt und Berliner Baubeamte Paul Emanuel Spieker (1826–1921) 1873 mit der Errichtung des versprochenen neuen Gebäudekomplexes, der neben dem Institut für Physik auch das von du Bois-Reymond geleitete physiologische Institut aufnehmen sollte. Außerdem bot es Platz für das kleinere zweite chemische und das pharmakologische Institut. Der auch heute noch eindrucksvolle Gebäudekomplex außerhalb des historischen Stadtkerns zwischen Dorotheenstraße, Neuer Wilhelmstraße und dem Spreuefer konnte 1877/78 bezogen werden und erregte mit seiner großzügigen Gestaltung und Ausstattung internationales Aufsehen.<sup>76</sup> Auch Wohnungen für die Familien von Helmholtz und du Bois-Reymond waren dort untergebracht. Während nach den Zerstörungen im Zweiten Weltkrieg der größere Teil des Gebäudes in der ursprünglichen Form wiedererrichtet wurde und den Betrachtern noch immer einen Eindruck von der Gestaltung durch den preußischen Baubeamten Spieker vermittelt, installierte im neugestalteten westlichen Teil die ARD ihr 1999 eröffnetes Hauptstadtstudio.

Seinen Vorlesungsverpflichtungen scheint Helmholtz nicht unbedingt gerecht geworden zu sein. Er habe sich »offenbar nie richtig vorbereitet«, habe »immer stockend« gesprochen und sich an der Tafel »beständig verrechnet«, so dass dann

<sup>74</sup> Rechenberg, *Helmholtz*, 1994, S. 183–188.

<sup>75</sup> Wehler, *Gesellschaftsgeschichte*, 1995, S. 98.

<sup>76</sup> Auf der anderen Seite der Neuen Wilhelmstraße hatte 1873 das Französische Gymnasium sein neues Gebäude bezogen. An der Stelle des seit 1884 errichteten und 1894 fertiggestellten Reichstagsgebäudes, das heute das Bild dominiert, stand noch das Palais Raczyński. Der davorliegende heutige »Platz der Republik«, damals der »Königsplatz«, einst ein Exerzierplatz war schon seit 1860 neugestaltet worden. Dort wurde 1873 die Siegessäule eingeweiht, die 1938/39 dann um 1,6 km an ihren heutigen Standort versetzt wurde.

auch die Hörer nach und nach weggeblieben seien, sollte sich der von Jollys Vorlesungen in München verwöhnte Planck später erinnern.<sup>77</sup>

### England als Vorbild für Berlin – Berlin als Vorbild für England

Auch wenn die erwähnte Episode der Ablehnung des Rufs aus Cambridge durch Helmholtz im Jahr 1870 eher nebensächlich erscheint, so erinnert sie doch daran, welche Faszination für ihn und seine Berliner Umgebung von England ausging. Schon in seiner Schulzeit dürfte die Beschäftigung mit den für die Entstehung des modernen naturwissenschaftlichen Denkens so entscheidenden Lehren von Isaac Newton und Michael Faraday (1791–1867), um nur zwei herausragende Namen zu nennen, sein Interesse auf das Vereinigte Königreich gelenkt haben, wo die traditionsreiche Royal Society und die noch junge »British Association for the Advancement of Science« (BAAS) diese Erkenntnisse organisatorisch zusammenführte, würdigte und verbreitete. Später war es die erwähnte Auseinandersetzung mit dem Vitalismus des akademischen Lehrers Johannes Müller, für die er und seine gleichdenkenden Studienkollegen sich mit den aus England kommenden Botschaften munitierten. Unter den aktuellen und besonders gewichtigen waren jene des erwähnten William Thomson oder auch die von James Prescott Joule (1818–1889), die beide seiner eigenen Generation angehörten. In seiner Zeit als Professor für Physiologie sollte dann bereits die neue Theorie der Elektrodynamik des jüngeren Maxwell sein weiteres Denken bestimmen.

Wenn bei der Verfolgung der naturwissenschaftlichen Erkenntnisse in England zwangsläufig auch das dort bestehende politische System der konstitutionellen Monarchie ins Blickfeld geriet, so fügte sich dies in das Bild, das in den deutschen Ländern seit der niedergeschlagenen Revolution von 1848/49 – als der damalige Prinz und spätere Kaiser Wilhelm I. (1797–1888) nach England geflüchtet war – die politischen Auseinandersetzungen wesentlich mitbestimmte. Schon zuvor hatte die Heirat der Königin Victoria (1819–1901) mit dem Prinzen Albert von Sachsen-Coburg und Gotha (1819–1861) im Jahr 1840 den Beziehungen nach England einen neuen und nachhaltigen Akzent gesetzt. Auch sahen sich die Verfechter eines nach englischem Vorbild konstitutionell verfassten vereinigten Deutschland durch den latent gegen Frankreich gerichteten deutschen Nationalismus bestärkt.<sup>78</sup>

Ironisch warnte du Bois-Reymond in einem Brief, den er während seines ersten Besuchs in England an seinen Freund Helmholtz schickte, dass er sich »den Geschmack an Deutschland« verderbe, wenn er England besuche.<sup>79</sup> Gleichzeitig

<sup>77</sup> Planck, *Persönliche Erinnerungen*, 1973, S. 3f. Vgl. Buchheim, *Gründungsgeschichte 1*, 1981, S. 80.

<sup>78</sup> 1848 war der als »Kartätschen-Prinz« verrufene Prinz Wilhelm als Bauer verkleidet zuerst in die Spandauer Zitadelle und von dort weiter nach England geflohen. Vgl. Leuthold, *Flucht des Prinzen Wilhelm*, 1998, S. 56f.

<sup>79</sup> Zit. in: Rechenberg, *Helmholtz*, 1994, S. 97.

kündigte er dort seinen damaligen Fachkollegen auch schon an, bevor dieser dann 1853 von Königsberg aus seine erste Reise nach England unternahm. Als geeigneter Anlass bot sich die Teilnahme an der Jahresversammlung der BAAS in Hull an. Auf dem Weg traf er in London kurz mit dem dreißig Jahre älteren Faraday zusammen, dessen Veröffentlichungen er intensiv studiert hatte und dessen Persönlichkeit ihn nun zusätzlich beeindruckte. In Hull wurde sein Einstand mit einem Vortrag über das damals sowohl aus physiologischer wie auch aus physikalischer Sicht aktuelle Thema der »Farbmischung« von den britischen Wissenschaftlern mit Respekt bedacht – wobei er auf das Lob für sein gutes Englisch, das er sich erst kurz zuvor angeeignet hatte, besonders stolz war. Spätestens zu diesem Zeitpunkt war er in der Lage, jederzeit fachliche und sonstige Gespräche in englischer Sprache zu führen, so auch, als er zwei Jahre später erstmals mit dem drei Jahre jüngeren Thomson zusammentraf.<sup>80</sup>

So verwundert es kaum, dass er nach Antritt seiner neuen Stellung in Berlin den Kontakt zum Kreis um den Kronprinzen Friedrich Wilhelm suchte und pflegte. Dieser galt aufgrund seiner Rolle in den »Einigungskriegen« als nationaler Kriegsheld und war mit der ältesten Tochter der englischen Königin verheiratet. Sie trug nicht nur ebenfalls den Namen Victoria (1840–1901), sondern behielt auch in Berlin den Titel einer »Princess Royal of the United Kingdom of Great Britain and Ireland« bei – in der üblichen deutschen Formulierung »Prinzessin von Großbritannien und Irland«. Die Hochzeit hatte nicht in Berlin oder Potsdam, sondern in London stattgefunden und die Ehe sollte am Berliner Hof Anlass für immer neue Spannungen bieten.

Die Gegner scharten sich um den Reichskanzler Bismarck, der, wie es der Historiker Wehler im breiten Fokus seiner »Deutschen Gesellschaftsgeschichte« sicherlich zutreffend darlegte, im englisch inspirierten politischen Liberalismus seinen »Hauptgegner« sah. Aufgrund der Stärke des Liberalismus sei bis in die späten 1870er Jahre die Möglichkeit einer liberalen Reichsregierung weder für die Liberalen noch für Bismarck als ausgeschlossen erschienen. Dabei habe der Kanzler die anglophilen Sympathien des Kronprinzen und »seiner keineswegs an Minderwertigkeitsgefühlen leidenden englischen Frau« ebenso zu den »Imponderabilien, die sich zu dessen Gunsten auswirken konnten« gerechnet, so Wehler, wie »die Verbindung des Paares mit ministrablen Persönlichkeiten des Liberalismus, ihre allseits bekannte Sympathie für ein »liberales Kabinett«, den anhaltenden Demonstrationseffekt des englischen parlamentarischen Lebens, aber auch die andersartige Symbiose von englischem Landadel und Wirtschaftsbürgertum«. Im Gegensatz dazu sei die »innenpolitisch motivierte antilibérale Grundposition« Bismarcks durch die »konservative Affinität zur zaristischen Autokratie« und den »gemein-

80 Rechenberg, *Helmboltz*, 1994, S. 97–99.

samen Staatskonservatismus der Ostmonarchien« bestimmt gewesen. Die Distanz zu London habe sich dann auch mit dem Nimbus von dessen Außenpolitik verbunden, wobei damit, als in den 1880er Jahren die Konflikte um die Kolonien einsetzten, auch die »nun aufbrechende Anglophobie« legitimiert worden sei. Mit Blick auf die Weichenstellungen für den drei Jahrzehnte später beginnenden Ersten Weltkrieg betonte Wehler jedoch, dass sich aus den von Bismarck bestimmten Beziehungen zu England zwar »auch auf längere Sicht« wirkende »Belastungen« ergeben hätten, dass die tatsächlich »tödliche Weichenstellung« jedoch erst nach 1890 mit dem direkt gegen England gerichteten Bau der deutschen Schlachtflotte erfolgt sei.<sup>81</sup> In diesen Jahren sollten dann auch die Gravitationsmessungen in der Spandauer Zitadelle stattfinden.

Auch in England brachte der Zeitpunkt um 1870 weitreichende Veränderungen für die Situation der Naturwissenschaften. Über die dort bestehende Situation sollte Foerster in seinen Erinnerungen bemerken, dass der wissenschaftliche Fortschritt mitunter längere Zeit hindurch »überaus langsam« erfolgt sei, weil zwar die »obersten leitenden Personen sehr glänzend gestellt« gewesen seien, sich dagegen »das übrige Personal [...] fast ausschließlich in sehr beschränkten Lebensverhältnissen« befunden und »dementsprechend subaltern und meistens ohne tiefere wissenschaftliche Bildung« gearbeitet habe.<sup>82</sup> Wohl auch deshalb entstanden an den traditionsreichen Universitäten in Cambridge und Oxford erst jetzt Institute für Physik – sicherlich auch als Echo auf die Ambitionen in der neuen Reichshauptstadt Berlin. Wenn man sich dabei in Cambridge nach der Ablehnung Thomsons bei der Suche nach einem geeigneten Direktor um den Preußen Helmholtz bemühte, wirft auch das ein bezeichnendes Licht auf die Situation.

Bezeichnend für die Situation in Cambridge war auch, dass es der Kanzler der Universität, William Cavendish (1808–1891), siebter Duke of Devonshire und Verwandter des erwähnten zweiten Duke of Devonshire Henry Cavendish war, der die Kosten für Bau und Ausstattung übernahm. Der 1871 berufene Direktor Maxwell leitete den Aufbau und die Beschaffung des Instrumentariums schon bevor das Institut dann 1873 förmlich gegründet und 1874 eröffnet wurde. Ihm war dann nicht nur die Benennung nach dem Gründer William Cavendish ein Anliegen, mit dessen Namen der Ruhm der Physik in England bis heute verknüpft blieb, sondern er gab auch die Schriften von Henry Cavendish neu heraus. Zwar lenkte er damit die Aufmerksamkeit der Fachwelt hauptsächlich auf dessen frühe Erkenntnisse zur Chemie und Elektrizität, aber er erinnerte auch an dessen Beschäftigung mit der Gravitation und seine seither oft zitierte Formulierung »weighting the earth«.

81 Alle zitierten Formulierungen aus Wehler, *Gesellschaftsgeschichte*, 1995, S. 973f.

82 Foerster, *Lebenserinnerungen*, 1911, S. 120.

Obwohl das anhaltende Interesse von Helmholtz an Maxwell auch weiterhin auf dessen fundamentalen Erkenntnissen zur Elektrodynamik beruhte, die dieser erstmals 1864 der Royal Society präsentiert hatte, so dürfte es nun, als er in Berlin sein eigenes neues Institut plante und einrichtete, auch dessen Aktivitäten beim Aufbau und der Leitung des Cavendish-Laboratory gegolten haben.<sup>83</sup>

Eine ähnliche Situation war an der Universität in Oxford entstanden, wo ebenfalls ein physikalisches Institut errichtet und schon 1872 eröffnet wurde. Auch hier standen Mittel einer prominenten englischen Adelsfamilie zur Verfügung. Es war eine Stiftung aus dem Nachlass des Edward Hyde (1609–1674), erster Earl of Clarendon, weshalb das Institut dann als Clarendon Laboratory benannt wurde. Aber auch in London entstand in dieser Zeit an der Royal School of Mines, die kurz zuvor in ein neues Gebäude in der Exhibition Road in South Kensington umgezogen war, ein musterhaftes physikalisches Laboratorium. Errichtet wurde es unter der Leitung von Frederick Guthrie (1833–1886), der selbst auch in Heidelberg und Marburg studiert, danach eine Professur am Royal College der britischen Kronkolonie Mauritius innegehabt hatte und seit 1872 in London an der Royal School of Mines die Lehre im Fach Physik neu organisierte.

Der kurze Blick nach England zeigt, dass auch dort um 1870 die Errichtung physikalischer Institute mit leistungsfähigen Laboratorien ein vorrangiges Thema in der Wissenschaftspolitik darstellte. Wenn an den Instituten in Cambridge und South Kensington nur wenige Jahre nach ihrer Gründung wegweisende Versuche zur genaueren Bestimmung der mittleren Dichte der Erde und der Gravitationskonstante aufgenommen wurden, wird deutlich, dass diese Thematik auch in England als aktuell galt.

### Hermann von Helmholtz. Mitinitiator und Gründungspräsident der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. Hausherr des Salons seiner Frau Anna

In Berlin engagierte sich Helmholtz mit ähnlichen Motiven und Intentionen wie Jolly in Bayern schon bald in der Wissenschaftspolitik des neuen »großpreussisch-klein-deutschen« Reichs (Wehler). Dass dabei sein wissenschaftliches Gewicht größer war und seine wissenschaftspolitischen Pläne weiter reichten als die seines Münchner Kollegen, war noch nicht erkennbar, als er sich ein Jahr nach Antritt seiner Stelle im Sommer 1872 zusammen mit anderen gewichtigen Persönlichkeiten der neuen Reichshauptstadt zur Abfassung einer Denkschrift zusammenfand, in der die Gründung eines »Museums für exakte Wissenschaften« gefordert wurde.<sup>84</sup> Initiator war der Mathematiker und Gymnasialprofessor für Mathematik und

<sup>83</sup> Siehe dazu auch Kim, *Cavendish Laboratory*, 2002, S 4. Falconer, *Cavendish Laboratory*, 2014.

<sup>84</sup> Diese aus heutiger Sicht eigentümliche Bezeichnung der geforderten Institution wie auch die im Folgenden zitierten Formulierungen aus Buchheim, *Denkschrift*, 1986.

Physik Karl-Heinrich Schellbach (1805–1892), der als Mitglied der wissenschaftlichen Prüfungskommission an der Kriegsakademie und der Artillerieschule lehrte. Einleitend wurde darin festgestellt, dass »keine der großen physikalischen Untersuchungen und Versuchsreihen, wie sie die Gelehrten unter unseren westlichen Nachbarn schon seit dem Anfang dieses Jahrhunderts auszuführen vermochten, hätte bei uns unternommen werden können« – mit »bei uns« waren offensichtlich alle nun im Reich vereinigten deutschen Länder gemeint.<sup>85</sup>

»Die Zeit liegt nicht weit hinter uns«, ging die Situationsanalyse weiter, »wo ein Gelehrter aus eigenen Mitteln die nötigen Apparate für Vorlesungsversuche erwerben mußte, und seine Auslagen erst allmählich vom Staate zurückerstattet werden konnten« – Helmholtz dürfte dabei auch an die Finanzierung seines Vibrationsmikroskops durch den bayerischen König gedacht haben. Stattdessen sei es »der tief sinnige philosophische Geist der Deutschen« gewesen, der »sich an der Hand mathematischer Spekulation in allen Zweigen der Naturwissenschaft endlich eine Basis für sichere Naturforschung erworben« habe, auf der er nun »im Verein mit großen Nachbarvölkern die Welt umzugestalten« beginne. Eine der Konsequenzen bestünde jedoch darin, dass »eine Reihe von Industriezweigen, welche den exakten Wissenschaften entsprungen sind«, den »wenigen mechanischen Künstlern, welche wir besitzen«, die Gehilfen entzöge, »indem sie denselben für fabrikmäßige Arbeit einen höheren Lohn bieten«. Dies habe während der letzten Jahre dazu geführt, dass »nicht einmal der Bedarf an bekannten Instrumenten für unsere Lehranstalten von den Mechanikern gedeckt werden« könne. Nun sei es Sache der »Staatsregierung«, gemeint war offensichtlich nicht die preußische, sondern die neue kaiserliche Reichsregierung, »die jetzige für die Zukunft entscheidende Epoche der Wissenschaft, welche die geistige Kraft des Volkes und seine idealen Interessen wach erhält, kräftig zu unterstützen«.<sup>86</sup>

Um diese unzulängliche Situation der akademischen Naturwissenschaften zu verbessern forderten die Unterzeichner die Errichtung von »Museen für Kultur und Verbreitung der exakten Wissenschaften« auf dieselbe Weise, in der »bisher Bibliotheken und Museen gegründet wurden, um Literatur und Kunst zu fördern und zu verbreiten«.<sup>87</sup> Zunächst müsse eine »reich ausgestattete jedermann zugängliche Sammlung« der Instrumente angelegt werden, »die eine wissenschaftliche Bedeutung erlangt haben«. Ihnen müssten auch die Werkzeugmaschinen beigegeben werden, »welche zur Herstellung von Präzisions-Apparaten dienen«. Ein derartiges

85 Zit. nach Buchheim, *Denkschrift*, 1986, S. 100f.

86 Zit. nach Buchheim, *Denkschrift*, 1986, S. 100f.

87 Die Unterzeichner hatten neben der von Friedrich dem Großen in Auftrag gegebenen 1780 fertiggestellten, auch für das Bürgertum zugänglichen Königlichen Bibliothek am Opernplatz, heute Bebelplatz, vor allem die noch im Bau befindliche Nationalgalerie in Berlin, heute »Alte Nationalgalerie«, vor Augen. Sie sollte 1876 von Kaiser Wilhelm I. eröffnet werden, nachdem er ihren Bau noch als preußischer König 1866 angeordnet gehabt hatte.

»Museum« könnte »Gelehrte und Laien« mit den Fortschritten der Wissenschaft bekannt machen und den Mechanikern die für sie bisher schwer zugänglichen Muster für ihre Arbeiten bieten.<sup>88</sup> Während der Sieg über das zum Hassobjekt stilisierte Frankreich noch nicht abgeklungen und die zum ständigen Andenken daran auf dem Königsplatz errichtete Siegessäule noch im Bau war, scheuten sich die Autoren offensichtlich, in der Denkschrift das unverkennbare Vorbild des CNAM in Paris zu erwähnen, in dessen Gründungsaufruf 1794 im republikanisch-revolutionären Tonfall gefordert worden war: »Il faut éclairer l'ignorance qui ne connaît pas, et la pauvreté qui n'a pas le moyen de connaître.«<sup>89</sup>

Eine gewichtige Orientierung für die Forderung Schellbachs nach einem »Museum« dürfte auch die noch anhaltenden Bemühungen um die Errichtung des Berliner Kunstgewerbemuseums gewesen sein. Bereits 1867 hatte sich in der preußischen Hauptstadt aufgrund einer Initiative der Kronprinzessin Victoria eine Gruppe privater Interessenten zusammengefunden, um mit einer zentralen Bildungsinstitution der Rückständigkeit von Gewerbe und Industrie in Preußen gegenüber England, Frankreich und Belgien entgegenzuwirken. Noch im gleichen Jahr war es zur Gründung eines Deutschen Gewerbe-Museums gekommen, nach dem Vorbild des im Londoner Stadtteil South Kensington mit den Ausstellungsstücken der vorangegangenen Weltausstellungen errichteten Museums – seit 1899 Victoria and Albert Museum. Nach anhaltenden Bemühungen sollte erst 1877 mit der Errichtung des heute als Martin-Gropius-Bau bezeichneten großzügigen Gebäudes für die als »Kunstgewerbemuseum« bezeichnete Institution begonnen werden. Zu dessen pompöser Eröffnung 1881 richtete das South Kensington Museum eine von der Kronprinzessin vermittelte höchst aufwändige Ausstellung aus dem eigenen Bestand ein.<sup>90</sup>

Helmholtz' Engagement für Schellbachs Plan ging offenbar über seine Unterschrift und die Beteiligung an den Treffen kaum hinaus, zumal mit dem Bau seines neuen Universitätsinstituts noch nicht begonnen worden war.<sup>91</sup> Für den in der Berliner Szene gerade erst Angekommenen dürfte das Wichtigste die Bekanntheit mit den anderen Unterzeichnern und deren Intentionen gewesen sein. Beteiligt waren neben seinem alten Freund du Bois-Reymond auch der Physiker und Professor an der Artillerie- und Ingenieursschule Carl Adolf Paalzow (1823–1908), der später als Ordinarius an die 1879 gegründete Technische Hochschule in Charlottenburg berufen werden sollte, sowie der Pädagoge und Schulpolitiker Heinrich Walter Bertram (1826–1904), der als Rektor der neugegründeten Berliner

88 Zit. nach Buchheim, *Denkschrift*, 1986.

89 »Man muss die Unwissenheit, die nichts weiß und die Armut, die nicht die Mittel hat zu wissen, aufklären.«, Übersetzung H. P., s. Fußn. 54.

90 Vgl. Mundt, *Museumsalltag*, 2018, S. 25–84.

91 So Gisela Buchheim in: Buchheim, *Gründungsgeschichte 1*, 1981, S. 8.

Sophien-Realschule und zwischen 1874 und 1901 als Stadtschulrat über großen Einfluss im Gemeindeschulwesen von Berlin verfügte und sich in den Jahren des »Kulturkampf«<sup>92</sup> mit einigem Erfolg für die Errichtung konfessionsloser Schulen und des Fortbildungswesens mitsamt dem Ausbau des Realschulwesens einsetzen sollte.

Besonderes Gewicht hatte auch hier die Beteiligung des überaus aktiven und ambitionierten Astronomen Foerster, der sich in seinen Funktionen als Leiter der Berliner Neuen Sternwarte und der NAC, beide am Enckeplatz im heutigen Stadtteil Kreuzberg, ebenfalls um die Verbesserung des messtechnischen Instrumentariums bemühte. Bereits 1871 hatte er nicht nur den Bau des bereits erwähnten Metronomischen Instituts für die NAC veranlasst, sondern auch mit einer Denkschrift den erfolgreichen Anstoß zur Gründung des erwähnten Astrophysikalischen Observatoriums gegeben – des ersten in der Welt, wie er später betonen sollte. Der viel-geforderte Baubeamte Spieker sollte dafür, nachdem der Neubau für die NAC bereits 1873 fertiggestellt war und das Institutsgebäude für die Universität an der Spree vor der Vollendung stand, 1876 mit der Errichtung eines eindrucksvollen Gebäudes an der höchsten Stelle des Telegrafenberg bei Potsdam beginnen. Diese Erfolge, mit denen die neue preußisch-deutsche Staatsadministration ihre Bereitschaft zur Förderung der Naturwissenschaften durch die Schaffung auch neuartiger Institutionen demonstrierte, dürfte zu Schellbachs Initiative wesentlich beigetragen haben.

Schellbach schickte die Denkschrift am 30. Juli 1872 an den damals als Kriegsheld gefeierten sechszwanzigjährigen Kronprinzen Friedrich Wilhelm, dessen Hauslehrer er früher einmal gewesen war und den dessen Vater Wilhelm I. in seiner neuen Funktion als Kaiser 1871 zum »Protector für die königlichen Museen« ernannt hatte.<sup>93</sup> Während bei diesem der Plan »lebhafteste Unterstützung« fand, stieß er jedoch bei der Akademie der Wissenschaften auf Ablehnung. Ihr schlossen sich dann auch die skeptischen preußischen Mechaniker an und der Plan wurde zu den Akten gelegt.<sup>94</sup>

Jetzt war es vor allem Foerster, der das Vorhaben zur Gründung der neuen Institution zur Behebung der beschriebenen Missstände in den akademischen Einrichtungen mit immer neuen Denkschriften weiterverfolgte. Dabei ersetzte er die Vorstellung eines Museums für exakte Wissenschaften durch das Konzept eines wissenschaftlich-technischen Instituts, mit dem er bereits beim astrophysikalischen Institut erfolgreich gewesen war. Dies dürfte es ihm auch erleichtert haben, neben

92 Im Rahmen des »Kulturkampf« bemühte sich vor allem Bismarck um die Reduzierung des Einflusses der katholischen Kirche in Preußen und im Deutschen Reich. Vorausgegangen war die Verkündigung der Unfehlbarkeit des Papstes in allen Glaubensfragen durch das 1870 beendete erste Vatikanische Konzil.

93 Vgl. Wehry, *Kaiser Friedrich III.*, 2013, S 31f.

94 Buchheim, *Gründungsgeschichte I*, 1981, S. 5–10. Buchheim, *Denkschrift*, 1986.

den genannten zivilen Interessenten auch den militärischen entgegenzukommen – zumal nach den siegreichen Kriegen, mit denen die Gründung des neuen Kaiserreichs erzwungen worden war, auch in den akademischen Kreisen alles Militärische besondere Popularität genoss.

Die Unterscheidung zwischen zivilen und militärischen Zielen, wie sie heute mit gewichtigen Gründen zwar gefordert wird, jedoch noch immer kaum zu erreichen ist, lag in der Zeit des aufstrebenden Imperialismus nicht nur im preußisch-deutschen Reich außerhalb des Denkhorizonts. Auch Helmholtz, der seine Ausbildung selbst dem preußischen Militär verdankte, empfand es als hilfreich, dass der als »Kriegswissenschaftler« und Kartograf hohes Ansehen genießende Generalfeldmarschall und Chef des preußischen Generalstabs Helmuth von Moltke (1800–1891) das Anliegen aufgriff. Als ehemaliger Lehrer und Adjutant stand auch Moltke dem Kronprinzen sehr nahe. In seiner Eigenschaft als Vorsitzender des »Central-Directoriums der Vermessungen im preußischen Staate« berief er noch 1873 eine Fachkommission, die dann bereits im Januar 1874 »Vorschläge zur Hebung der wissenschaftlichen Mechanik und Instrumentenkunde« vorlegen konnte. Darin wurde unterstrichen, »dass für den Staat neben der Pflicht zur Fürsorge in dem vorhandenen Nothstande die ernste Aufforderung bestehe, der Pflege der Präzisionstechnik in Zukunft nicht bloß gelegentlich, sondern vielmehr systematisch seine Aufmerksamkeit zu widmen.«<sup>95</sup>

Bei aller Übereinstimmung in der allgemeinen Zielvorstellung erwiesen sich die tangierten vielfältigen Interessen auch während der folgenden Jahre nicht selten als kontrovers. Drei Jahrzehnte später sollte sich Foerster an die anhaltenden Widerstände gegen die Errichtung dieser Reichsinstitution erinnern: »Staatshilfe für gewerbliche Tätigkeit galt damals fast bei allen jenen leitenden Männern, deren Erfahrungen und Grundsätze aus vorangehenden Entwicklungsstufen des wirtschaftlichen Lebens herrührten, als ein Schritt zum Sozialismus und überhaupt als ein Unterfangen, welches das Gewerbe durch die Möglichkeit offizieller Gunst wirtschaftlich degeneriere und die ›freie Konkurrenz‹ gefährde.«<sup>96</sup>

Die schließlich erzielte Einigung, dass ein »Institut für wissenschaftliche Mechanik« gegründet werden sollte, blieb erneut ohne Umsetzung, weil inzwischen die Schaffung einer technischen Hochschule als vorrangig galt und diese 1879 aus dem Zusammenschluss der Bau- und der Gewerbeakademie die Technische Hochschule auch gegründet wurde.<sup>97</sup> Deren ebenso großzügig wie repräsentativ gestaltetes Gebäude wurde nicht mehr in Berlin, sondern im damals noch eigenständigen Vorort Charlottenburg neben dem erst 1876 bezogenen Neubau der Vereinigten Artillerie- und Ingenieurschule errichtet. Auch dabei dürfte die Stimme von Helmholtz besonderes Gewicht gehabt haben, zumal er in den Jahren 1877/78 als Rektor der Universität amtierte.

95 Zit. in Koenigsberger, *Helmholtz*, 1902, Bd. 2, S. 346.

96 Foerster, *Lebenserinnerungen*, 1911, S. 160f.

97 Koenigsberger, *Helmholtz*, 1902, Bd. 2, S. 346f.



9 Astrophysikalisches Observatorium auf dem Potsdamer Telegrafenberg.

Als dann eine Ende 1882 zustande gekommene Entscheidung zur Gründung eines an die neue Hochschule angeschlossenen Instituts für Mechanik wieder nicht umgesetzt wurde und Helmholtz im Januar 1883 in den erblichen Adelsstand erhoben worden war, entschloss er sich, mit Foerster und nun vor allem auch mit dem seit seiner Studienzeit befreundeten Erfinder und mit Staatsaufträgen groß gewordenen Industrieunternehmer Werner Siemens (1816–1892, geadelt 1888) zu einer neuen Initiative. In zwei neuen Denkschriften forderten sie am 23. Mai und am 16. Juni 1883 die Gründung eines Instituts für »die experimentelle Förderung der exakten Naturforschung und der Präzisionstechnik«. <sup>98</sup> Beteiligt war nun auch der ehemalige Direktor der Gewerbeakademie und nunmehrige Leiter der Abteilung für Maschinenwesen an der neuen Technischen Hochschule Franz Reuleaux (1829–1905), der 1876 als Preisrichter bei der Weltausstellung in Philadelphia mit seiner Beurteilung der deutschen Industrieprodukte als »billig und schlecht« Aufsehen erregt hatte.

Aber auch jetzt sollten noch drei weitere Jahre vergehen, bis Siemens mit seinem Angebot der Stiftung eines Grundstücks und zur Übernahme eines Teils der Kosten den stellvertretenden Reichskanzler Karl Heinrich von Boetticher (1833–1907) zu konkreten Maßnahmen veranlassen konnte. Mit der »Ermächtigung Seiner Majestät des Kaisers« stellte von Boetticher am 7. April 1886 an den Bundesrat und zur anschließenden Vorlage im Reichstag einen Antrag auf Genehmigung der »Einstellung der zur Errichtung einer physikalisch-technischen Reichsanstalt für die experimentelle Förderung der exakten Naturforschung und der Präzisionstechnik erforderlichen Geldmittel in den Reichshaushalts-Etat für 1887/88 auf der Grundlage der in der bezüglichen Denkschrift enthaltenen Vorschläge«. <sup>99</sup>

Foerster, der dann »die Aufgabe der technisch-wissenschaftlichen Vertretung und Erläuterung der bezüglichen Vorlage der Bundesregierung und Budgetkommission des Reichstags« übernahm, sollte sich später erinnern, dass ihm kaum jemals »eine dornenvollere Pflicht auferlegt worden« sei, wobei ihm auch dabei vor allem der Kronprinz Rückhalt geboten habe. »Die Schlagworte ›Staatsbetrieb des Gewerbes‹, oder ›Beeinträchtigung der freien Konkurrenz‹ auf der liberalen Seite und die Worte ›übermäßige Hätschelung der Industrie‹ auf konservativer Seite« hätten eine sachliche Beratung verhindert. Allein der sozialdemokratische Abgeordnete Kaiser – gemeint war offensichtlich der Abgeordnete der Sozialistischen Arbeiterpartei Max Kayser (1853–1888) – habe »mit lebhafter Begeisterung die beabsichtigte Stärkung des ›unmittelbaren Zusammenwirkens der Wissenschaft mit der Arbeit des Volkes‹ gefeiert. <sup>100</sup>

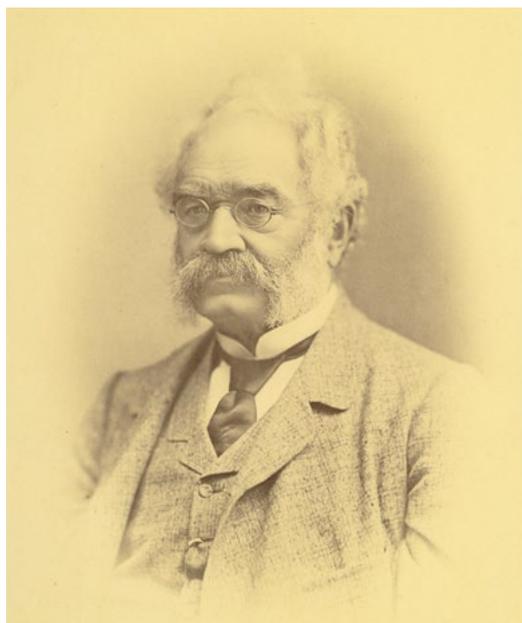
<sup>98</sup> Boetticher, *Vorlage*, 1886.

<sup>99</sup> Boetticher, *Vorlage*, 1886. Helmholtz hatte dafür einen weiteren programmatischen Text verfasst: Helmholtz, *Aufgaben*, 1886.

<sup>100</sup> Foerster, *Lebenserinnerungen*, 1911, S. 188 und 192.



10 Helmuth Karl Bernhard Graf von Moltke.  
Foto um 1870.



11 Werner Siemens. Foto von 1872.

Trotzdem kam es erst einmal zu einer Vertagung der Beschlussfassung und es bedurfte einer weiteren, während der Weihnachtszeit verfassten Denkschrift, die Anfang 1887 allen Mitgliedern des Reichstags übergeben wurde. Sie habe diese endlich doch dazu gebracht, mit großer Mehrheit der Finanzierung der als Physikalisch-Technische Reichsanstalt bezeichneten neuartigen Institution zuzustimmen, wobei diese dann auch gleich gegründet wurde. Die verantwortungsvolle Planung und Organisation des Aufbaus übertrug man mitsamt der Präsidentschaft dem allseitig respektierten und als hochqualifizierte Integrationsfigur anerkannten Helmholtz. Dieser sollte daneben auch weiterhin Vorlesungen an der Universität halten, letztlich bis zu seinem Tod 1894.

Jetzt wurde möglich, was die Verfasser der Denkschriften noch kaum geahnt haben konnten und was hundert Jahre später der amerikanische Historiker David Cahan (geb. 1947) in seinem Standardwerk über die Geschichte der PTR als »richtungweisend für den neuzeitlichen Wissenschaftsbetrieb in der modernen industrialisierten Welt« bezeichnen sollte. Sie habe in den Jahren bis zum Ende des Ersten Weltkriegs gezeigt, »wie private Förderer und der Staat ihre Mittel für die Errichtung einer Institution vereinigen konnten, deren Arbeitsbereich sowohl die reine Naturwissenschaft als auch die industrielle Technik umfaßte«. Dabei habe sie »die besten Elemente damaliger institutioneller Neuerungen in Wissenschaft und Technik« repräsentiert.<sup>101</sup> Sie wies aber auch den Universitäten deutlicher als bisher als vorrangige Aufgabe die Lehre zu, deren Bedeutung durch die in diesen Jahren schnell und anhaltend wachsenden Studentenzahlen zusätzlich unterstrichen wurde.<sup>102</sup>

Mit dem fünf Jahre älteren Artillerieleutnant und Firmengründer Werner Siemens, der selbst wissenschaftlich aktiv war und publizierte, fühlte sich Helmholtz durch eine bereits auf das Kolloquium bei Magnus zurückgehende Freundschaft eng verbunden. Auch Siemens hatte seine erste wissenschaftliche Ausbildung mangels eines vermögenden Elternhauses über eine Verpflichtung zum preußischen Militär erworben. Jetzt sicherte er dem ehemaligen Arzt und Physiologen eine Verbindung zur elektrotechnischen Industrie, bei der sich nach den Jahren des Aufbaus der großen Telegrafienlinien mit dem Aufkommen der elektrischen Beleuchtung der Aufschwung der Starkstromtechnik und der allgemeinen Elektrifizierung gerade erst abzeichnete. Eine Tochter von Helmholtz heiratete mit Arnold von Siemens (1853–1918, geadelt 1888) einen Sohn des Unternehmers, während der Sohn Richard von Helmholtz (1852–1934, geadelt 1888) nach einem Studium an der Technischen Hochschule in München bereits 1876 im Konstruk-

<sup>101</sup> Cahan, *Meister der Messung*, 1992, S. VII.

<sup>102</sup> Cahan erwähnt, dass die beschränkten Möglichkeiten an den physikalischen Universitätsinstituten aufgrund der schnell wachsenden Lehrverpflichtungen beklagt wurden. Cahan, *Meister der Messung*, 1992, S. 65–67.

tionsbüro der Münchner Lokomotivfabrik Krauss & Comp. begonnen hatte und als dessen Leiter schon bald gewichtige Beiträge zum deutschen Lokomotivbau leistete. So waren die Fragen der aufstrebenden Industrie auch in seiner Familie längst Gesprächsthema bevor sich Helmholtz der nicht nur für ihn neuartigen Aufgabe stellte, sie als Leiter der PTR mit naturwissenschaftlichen Erkenntnissen und Messungsverfahren weitsichtig und nachhaltig zu unterstützen.

Dass sich Helmholtz neben den bei der Planung der PTR auftretenden praktischen Fragen auch mit dem Grundsatzproblem des Zusammenwirkens von Mathematik und Messen auseinandersetzte, belegt sein im Gründungsjahr 1887 veröffentlichter langer Aufsatz mit dem Titel »Zählen und Messen – erkenntnistheoretisch betrachtet«. Er hatte ihn aus Anlass des Doktorjubiläums seines Universitäts- und Akademiekollegen Eduard Zeller (1814–1908) verfasst, der als Philosoph und Theologe ebenfalls aus Heidelberg nach Berlin berufen worden war. Darin bedauerte er, dass über die erkenntnistheoretischen Grundlagen dieses fundamentalen Problems »doch verhältnismäßig wenig gearbeitet« worden sei, obwohl gerade darin »die Grundlagen der fruchtbarsten, sichersten und genauesten wissenschaftlichen Methoden« gesehen werden müssten, »die wir überhaupt kennen«. <sup>103</sup> Auch wenn es nur vermutet werden kann, so liegt doch nahe, dass ihn auch die erkenntnistheoretische Seite von Newtons Gravitationsgesetz und der darin enthaltenen Proportionalkonstante beschäftigte, deren messtechnisch zu ermittelnder genauer Zahlenwert vom technischen Entwicklungsstand der Instrumente abhing und auch in Zukunft immer abhängen würde.

Von nicht geringer Bedeutung für die Rolle, die Helmholtz im Wissenschaftsbetrieb spielte, war die Tatsache, dass er seit seiner Berufung nach Berlin in den kulturell einflussreichsten Gesellschaftskreisen der Hauptstadt verkehrte. Seine physiologisch-musiktheoretischen Erkenntnisse und Botschaften hatten ihm in der künstlerisch-musikalischen Szene einigen Respekt verschafft und er verfolgte neben dem wissenschaftlichen auch das kulturelle Leben in seiner ganzen Breite. Die erforderliche Unterstützung bei der Pflege seiner vielfältigen Kontakte sicherte ihm seine zweite Frau Anna Helmholtz (1834–1899, geadelt 1883), deren Salon, trotz wechselnder Adressen, aufgrund ihrer sorgfältig gepflegten Einladungspolitik zu den prominentesten zählte. <sup>104</sup> Annas Vater war der Heidelberger Professor für Staatsrecht Robert von Mohl (1799–1875), der bereits im Kreis um Jolly verkehrt und auch dem Frankfurter Parlament von 1848 angehört hatte, dann im gesamtdeutschen Ministerium Heinrich von Gagerns (1799–1880) für die Justiz zuständig gewesen war und später der Ersten Kammer in Baden angehört hatte. So war sie mit den politischen Empfindlichkeiten und Kontroversen der Zeit gut vertraut.

<sup>103</sup> Helmholtz, *Zählen und Messen*, 1887, S. 17.

<sup>104</sup> Cahan charakterisiert Anna als eine »intelligent, charming mondaine«. Cahan, *Helmholtz between Science and Politics*, 2006, S. 100f.

Nach dem Zweiten Weltkrieg sollte sich Planck erinnern, dass es auch ihm mehrmals vergönnt gewesen sei, »an den geselligen Veranstaltungen der Familie Helmholtz teilzunehmen, bei denen sich ein Kreis erlesener Männer und Frauen und Vertreter der Wissenschaft und der Kunst des Abends zusammenfand«. Anna sei dabei »die Seele der Unterhaltungen« gewesen und habe die »repräsentativen Pflichten« auf sich genommen, während »ihr Gatte sich mehr zwanglos bewegte« und für jeden, »ob vornehm oder gering«, ein freundliches Wort übrig hatte.<sup>105</sup> In der überlieferten langen Liste der Besucher finden sich allerdings weder Foerster noch König, Richarz oder Krigar-Menzel.<sup>106</sup> Dagegen findet man unter den erwähnten Persönlichkeiten neben der Anna besonders nahestehenden Kronprinzessin Victoria auch den Komponisten Richard Wagner (1813–1883) und seine Frau Cosima (1837–1930). Mit ihnen blieb das Ehepaar Helmholtz in lebenslanger Freundschaft verbunden, insbesondere nachdem sie 1876 zur Eröffnung der ersten Festspiele in Bayreuth eingeladen worden waren. Dort hatten sie neben Kaiser Wilhelm I. zahlreiche weitere Größen der Politik- und Kulturszene getroffen, darunter die erwähnten Maler Adolph Menzel aus Berlin und Franz Lenbach aus München – »kurz alle netten Menschen Europas zusammen«, wie es Anna ihren Kindern in einem Brief berichtete.<sup>107</sup> Sowohl die Bilder von Menzel als auch jene von Lenbach vermitteln uns heute Eindrücke der Persönlichkeit von Helmholtz.

Wie es das berühmte Gemälde des damaligen Direktors der Hochschule für die bildenden Künste Anton von Werner (1843–1915) zeigt,<sup>108</sup> traf sich der gleiche Kreis auch bei gesellschaftlichen Ereignissen bei Hof oder, wie es Menzel in einer 1875 von der »Illustrierten Frauenzeitung« verbreiteten Zeichnung festgehalten hat, im Salon der Gräfin Maria von Schleinitz (1842–1912), der nicht weniger berühmt war als der von Anna von Helmholtz.<sup>109</sup>

Helmholtz spielte seit seiner Kindheit begeistert Klavier – er hatte sein Klavier sogar in sein Zimmer in der Pépinière mitgenommen gehabt – und hatte sich im Rahmen seiner physiologischen Studien intensiv mit der Geschichte und den ak-

105 Planck, *Persönliche Erinnerungen*, 1973, S. 7.

106 Eine Liste der häufigen Gäste des Salons bei Wilhelmy, *Berliner Salon*, 1989, S. 659–669.

107 Brief vom 14.8.1876 in: Siemens-Helmholtz, *Lebensbild in Briefen*, 1929, S. 204. Zit. bei Rechenberg, *Helmholtz*, 1994, S. 243f.

108 Das Gemälde »Kronprinz Friedrich auf dem Hofball 1878« von Anton von Werner zeigt den Kronprinzen im Gespräch mit Helmholtz, dem Oberbürgermeister von Berlin Max von Forckenbeck (1821–1892), dem Politiker Robert von Benda (1816–1899), dem Archäologen Ernst Curtius (1814–1896), dem Pathologen und damaligen Dekan der Medizinischen Fakultät Rudolf Virchow. Die Maler Ludwig Knaus (1829–1910) und Adolph Menzel stehen im Hintergrund.

109 Menzel stiftete den Erlös des am 29.6.1874 mit Bleistift gezeichneten Blattes zur Finanzierung des Festspielhauses in Bayreuth. Die Zeichnung wurde dann mit Benennung der einzelnen Personen in der »Illustrierten Frauenzeitung« vom 6. Dezember 1875 abgedruckt. Keisch/Riemann-Reyher, *Menzel Briefe*, 2009, S. 879 und 881.



12 Anton von Werner, »Kaiser Friedrich als Kronprinz auf dem Hofball von 1878«, 1895, Öl auf Leinwand, 118 × 95 cm, Nationalgalerie Berlin.

tuellen Entwicklungen in der Musik beschäftigt. Nachdem er dabei die seit Beginn des Jahrhunderts in Gang gekommenen Bemühungen um einen einheitlichen Stimmton verfolgt hatte, sorgte er dafür, dass sich die Physikalisch-Technische Reichsanstalt auch mit der Stimmgabel als Normal für die Tonfrequenzen beschäftigte und über die einheitliche Schwingungszahl in der musikalischen Kultur wachte, »um ein gemeinschaftliches Musizieren im Reich zu ermöglichen«. <sup>110</sup> Allerdings habe die Hinwendung zur Naturwissenschaft und zur Industrietechnik sein Verhältnis zur Musik auch verändert, weil ihm »durch die wissenschaftliche Analyse jede Fähigkeit des Musikgenusses verloren« gegangen sei. <sup>111</sup>

Eine besondere Verbindung in die staatstragenden Berliner kulturellen Kreise bot ihm auch die Mitgliedschaft im Orden Pour le Mérite. Diesem ursprünglich rein militärischen preußischen Orden war 1842 auf Empfehlung von Alexander von Humboldt eine Friedensklasse »für die Verdienste um die Wissenschaften und Künste« hinzugefügt worden. Helmholtz wurde 1873 aufgenommen und bekleidete seit 1886 das Amt des Vizekanzlers. Das des Ordenskanzlers war im gleichen Jahr dem schon 1870 aufgenommenen Menzel übertragen worden, der es bis zu seinem Tod im Jahr 1905 ausüben sollte. Aufgenommen wurden dort auch Emil du Bois-Reymond 1877, Werner Siemens 1886, der in Wien lebende Komponist Johannes Brahms (1833–1897) 1887 und 1899 auch dessen langjähriger Freund Joseph Joachim (1831–1907), der als international berühmter Violinist schon 1869 als Gründungsdirektor der Königlich akademischen Hochschule für ausübende Tonkunst nach Berlin berufen worden war – und von dem noch die Rede sein wird. Praktische Aufgaben habe der Orden nicht zu erfüllen gehabt. Der Ordenskanzler sei nur in Erscheinung getreten, wenn nach dem Tod eines der »Ritter« dessen Stelle neu zu besetzen war und er den gesamten Kreis bewusster Vertreter preußisch-deutscher Kultur zusammenrufen musste. Auch wenn dies für Menzel, wie die Herausgeberinnen seiner Briefe feststellten, eine »zwanzigjährige, wenig inspirierende Schreibe« bedeutet habe, so festigte sie für ihn, wie auch für Helmholtz, doch die Zugehörigkeit zu einem auserwählten Kreis von Persönlichkeiten, die sich der preußischen Tradition verpflichtet sahen. <sup>112</sup> Auf dem Gemälde Anton von Werners vom Hofball 1878, vgl. Abb. 12, wird die Zugehörigkeit des Malers Menzel und des Naturwissenschaftlers Helmholtz zum ausgewählten Kreis um den Kronprinzen Friedrich deutlich sichtbar durch den umgehängten Orden unterstrichen.

<sup>110</sup> Riegger, *Helmholtz Musicus*, 2006, S. 32f.

<sup>111</sup> Diese Aussage von Helmholtz zitiert der Pädagoge Friedrich Wilhelm Foerster (1869–1966), ein Sohn von Wilhelm Foerster. Foerster, *Erlebte Weltgeschichte*, 1953, S. 68f.

<sup>112</sup> So die Herausgeberinnen der Briefe von Menzel in: Keisch/Riemann-Reyher, *Menzel Briefe*, 2009, S. 1253.

### »Absolute Messung der Gravitation« und Messung der Lichtgeschwindigkeit als »wichtige Aufgaben« der Physik

Die Verfasser der Denkschrift vom 16. Juni 1883 waren sich einig, dass das geforderte »Physikalisch-Mechanische Institut«, wie sie es damals noch bezeichneten, aus einer »wissenschaftlichen« und einer »technischen« Abteilung bestehen müsse. In seinem als »Votum« bezeichneten Teil der Denkschrift beschrieb Helmholtz die Aufgaben der wissenschaftlichen Abteilung und hob hervor, dass deren »wesentliche Bedeutung« nicht allein in der weiteren Entwicklung »der eigentlichen Wissenschaft« liege, sondern auch und vor allem in der »Beförderung der Präzisionsmechanik«. Gerade die »rein wissenschaftliche Forschung« hätte wichtige Aufgaben zu lösen, die weder »mit den Privatmitteln einzelner Beobachter« noch durch »die zum Zwecke des Unterrichts gegründeten Laboratorien unserer Universitäten« bearbeitet werden könnten, weil »zu ihrer Bewältigung theils kostbarere Hilfsmittel an Instrumenten und Lokalitäten, theils auch freiere Arbeitszeit erfahrener und urtheilsfähiger Beobachter« erforderlich seien. Bisher müsse dies »der Regel nach ohne Unterstützung aus öffentlichen Mitteln« erfolgen.<sup>113</sup>

Zweifellos auch mit Blick auf die Erfolge des untriebigen Foerster verwies Helmholtz auf einen Weg, wie er »zur Pflege der Astronomie« schon seit Jahrhunderten begangen worden sei. Es sei »fast ausschließlich« sie gewesen, deren Pflege der Staat mit den Sternwarten »in eigenen, vorzugsweise der wissenschaftlichen Forschung und nur in zweiter Linie dem Unterricht gewidmeten Instituten« übernommen habe. Gerade dort habe sich dann auch gezeigt, dass »trotz des weiten Abstandes, durch welchen die Objekte dieser Wissenschaft von allen Interessen irdischen Nutzens getrennt zu liegen scheinen«, sich die »alte Regel« bewährt habe, »daß jede ernste wissenschaftliche Arbeit ihre praktische Anwendung schließlich da bringt, wo man es vorher am wenigsten vermuthet hätte. Abgesehen davon, daß die Astronomie durch die Vorstellungen, welche sie uns vom Bau des Weltsystems giebt, eine totale Revolution in unserer ganzen Weltanschauung hervorgebracht hat, hängt unsere Schifffahrt und die Sicherung der bürgerlichen, wie der historischen Zeitrechnung wesentlich von ihr ab. Auch die Kunst der praktischen Optik, der höheren Uhrmacherei, sowie alle Verfeinerungen der Längen- und Winkelmessungen haben sich direkt an den von ihr gestellten Aufgaben entwickelt.« Deshalb sei dies auch der Weg, »den wir zu gehen haben, wenn wir die Deutsche Mechanik auch nach andern Richtungen hin leistungsfähig machen wollen«.<sup>114</sup>

Helmholtz merkte zudem an, dass neben der Astronomie auch »die ihr verwandte Geodäsie« bereits über eigene »rein wissenschaftliche Institute und Organisationen« verfüge und bezog sich dabei auch auf das erwähnte Projekt einer »Europäischen Gradmessung«, das Johann Jacob Baeyer in seiner Eigenschaft als

113 Helmholtz, *Votum*, 1883, S. 33.

114 Helmholtz, *Votum*, 1883, S. 33.

Direktor des 1870 in Berlin gegründeten Königlich-Preußischen Geodätischen Instituts initiiert hatte. Wie bei den Sternwarten, »so bestehe auch dort eine nicht zureichende technische Unterstützung ›durch die Kunst der Mechanik‹«. <sup>115</sup>

Nach dieser auch für naturwissenschaftlich unqualifizierte Politiker nachvollziehbaren Einleitung, ging Helmholtz auf die aktuellen Bedürfnisse der Physik ein. Dort läge »eine Reihe durchaus ebenso wichtiger Aufgaben vor, die entweder bisher nur sehr ungenügend gelöst sind, oder die, den zunehmenden Kenntnissen der Wissenschaft entsprechend, von Zeit zu Zeit mit verbesserten Methoden wieder in Angriff genommen werden müssen und zu ihrer Durchführung erheblicher äußerer Mittel bedürfen«. In der Physik beschäftige man sich mit Fragen, die mit den astronomisch-geodätischen Aufgaben in engem Zusammenhang« stünden, erklärte er und nannte an erster Stelle »die genaue Bestimmung der Intensität der Schwere und die Vergleichung dieser Intensität an verschiedenen Stellen der Erdoberfläche«. Die internationale Kommission für die Europäische Gradmessung habe »diesen Gegenstand in den letzten Jahren vielfach berathen, da derselbe eine wichtige Controlle der geodätischen Nivellements ergeben und für die Bestimmung der lokalen Unregelmäßigkeiten der Erdoberfläche von hervorragender Wichtigkeit sein würde«. Es fehle jedoch ein Laboratorium, »in welchem die Vorversuche über die wünschenswerte größere Verfeinerung der Beobachtungsmethoden ausgeführt werden« könnten. <sup>116</sup>

Davon unterschied er als zweites Problem »die absolute Messung der Gravitation, oder die Bestimmung der mittleren Dichtigkeit der Erde«. Nachdem dabei »bisher nur ein mäßiger Grad von Genauigkeit erreicht« worden sei, müssten »die Massen der Himmelskörper auf dasselbe Maaß wie die irdischen zurückgeführt werden, ebenso wie man die Längenmessungen des Meridians und die Beobachtung der Venusdurchgänge gebraucht, um die kosmischen Entfernungen auf irdisches Längenmaaß zu reduciren und die Größe der Gravitation genau zu bestimmen«. Dies sei »für die allgemeine Physik und für die Gewinnung eines von der wahrscheinlich veränderlichen Drehung der Erde unabhängigen Zeitmaaßes von hervorragender Wichtigkeit«. <sup>117</sup>

Helmholtz' Hinweis auf die »Längenmessung des Meridians« bezog sich auf die bereits erwähnte Festlegung der Längeneinheit Meter durch die Meterkonvention von 1875, der die bereits ein Jahrhundert zurückliegende, im Jahr 1791 von der französischen verfassunggebenden Versammlung beschlossene Einführung des Meters als gesetzliches Einheitsmaß vorausgegangen war, wobei diese eine Empfehlung der französischen Académie des Sciences umgesetzt hatte. Die als Meter bezeichnete Länge war dabei, streng dezimal, als der zehnmillionste Teil der Meridianlänge zwischen Pol und Äquator definiert worden. Dafür hatten Jean-

<sup>115</sup> Helmholtz, *Votum*, 1883, S. 33.

<sup>116</sup> Helmholtz, *Votum*, 1883, S. 34.

<sup>117</sup> Zit. nach: Helmholtz, *Beilage III*, 1886, S. 34.

Baptiste Joseph Delambre (1749–1822), Pierre Méchain (1744–1804) und Jean Joseph Tranchot (1752–1815) 1792 die Entfernung zwischen den Breitengraden von Dünkirchen und Barcelona mit der damals möglichen maximalen Genauigkeit vermessen.<sup>118</sup>

Mit seinem Verweis auf die Beobachtung der Venusdurchgänge bezog sich Helmholtz auf die Erkenntnisse aus den vier aufwändigen Expeditionen in den Jahren 1874 und 1882, die Foerster, wie er später in seinen Erinnerungen erklären sollte, mit Unterstützung der Admiralität, »unter freudiger Zustimmung des Ministers Delbrück und auch mit vollem Einverständnis Bismarcks« unternommen hatte, um »an geeigneten Stellen der Erde uns an der großen gemeinsamen Kultur-aufgabe der Beobachtung jener Erscheinungen zu beteiligen«.<sup>119</sup> Die große Bedeutung dieser Messungen bestand nicht zuletzt darin, dass die nächsten Venusdurchgänge erst 2004 und 2012 stattfinden sollten. Die Messungen ermöglichten eine genauere Bestimmung des Abstands zwischen Erde und Sonne und damit auch der Größe des in der Astronomie gebräuchlichen Maßes der »Astronomischen Einheit« (AE).<sup>120</sup> Diese konnte danach mit neuer Genauigkeit in Meter umgerechnet und den »irdischen« physikalischen Berechnungen zugänglich gemacht werden.

Wie bereits erwähnt, legte Helmholtz offensichtlich großen Wert darauf, dass in der Physik, und insbesondere in dem geforderten neuen Institut, Maße verwendet wurden, die nicht nur den aktuellen Erkenntnissen der Messungstechnik, sondern auch den international vereinbarten Maßeinheiten entsprachen. Auch wenn er es nicht explizit hervorhob, so implizierte dies doch, dass damit auch die wertmäßig mit maximaler Genauigkeit ermittelte Proportionalkonstante im Newtonschen Gravitationsgesetz in den international üblichen Maßeinheiten des CGS-Systems, Zentimeter, Gramm, Sekunde zu erfolgen hatte, wobei diese mit den von CIPM und BIPM in Sèvres gepflegten materiellen Maßverkörperungen übereinstimmen sollten. Offensichtlich sah Helmholtz darin ebenfalls eine »große gemeinsame Kulturaufgabe«.

Die von Helmholtz für sein Votum sicherlich wohlüberlegten Formulierungen bieten Hinweise auf sein damaliges Verständnis von der »Gravitationskonstante«. Nachdem er in seinem Text von 1883 die Begriffe »absolute Messung der Gravitation« und »Bestimmung der mittleren Dichtigkeit der Erde« noch durch die nüchterne Konjunktion »oder« verknüpft gehabt hatte, ersetzte er diese in der zur Vorlage im Reichstag überarbeiteten Fassung seines Votums vom April 1886 durch die von ihm offensichtlich als aussagekräftiger empfundene Formulierung

118 Vgl. dazu ausführlich Meyer-Stoll, *Maß- und Gewichtsreformen*, 2010, S. 15–23.

119 Foerster, *Lebenserinnerungen*, 1911, S. 124 und 142f. Rudolph Delbrück (1817–1903) setzte sich als liberaler Präsident des Reichskanzleramts für den Ausbau des Freihandels ein und trat 1876 nach dem Bruch Bismarcks mit den Liberalen von seinen Ämtern zurück.

120 Laut Definition misst eine AE exakt 149 597 870 700 Meter. Das ist ungefähr der mittlere Abstand zwischen Erde und Sonne.

»gewöhnlich bezeichnet als«. Dabei fällt auf, dass er in keiner der beiden Versionen des Votums den Begriff »Gravitationskonstante« verwendete, obwohl er inzwischen mit dem Antrag von König und Richarz vor der Akademie ein Projekt vertreten hatte, bei dem explizit diese ermittelt werden sollte. Immerhin fügte er als neue Mitteilung ein, dass »gegenwärtig zwei derartige neue Untersuchungen im Gange sind: die eine unter gemeinsamer Unterstützung des Kriegsministeriums und der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, die andere im astrophysikalischen Observatorium zu Potsdam« – und ergänzte, dass der »wissenschaftlichen Abtheilung« der zu gründenden Reichsanstalt dann »eventuell die Weiterführung der Ergebnisse dieser Untersuchungen obliegen« würde.

Als drittes Beispiel »wichtiger« Aufgaben der Physik führte Helmholtz die Messung der Lichtgeschwindigkeit an und verwies auch dabei zuerst auf die Beziehung zur Astronomie: »Die Geschwindigkeit des Lichtes kann in irdischen Entfernungen bestimmt werden und, wie die bisher ausgeführten Messungen zeigen, mit einer Genauigkeit, die hinter der mittels der Venusdurchgänge wahrscheinlich erreichbaren nicht zurückbleiben dürfte. Diese Bestimmung ist ebenfalls geeignet, die kosmischen Entfernungen auf irdisches Längenmaaß zu reduciren, und es wäre, da in den nächsten hundert Jahren kein Venusdurchgang mehr stattfindet, durchaus zu empfehlen, die Arbeit in der angegebenen Richtung fortzusetzen.«

Daran anknüpfend benannte er an vierter Stelle die Erforschung der Bedeutung eines genauen Werts der Lichtgeschwindigkeit für die noch ungeklärten Fragen der Elektrizität und des Magnetismus: »In der Lehre von den magnetischen Wirkungen der elektrischen Ströme spielt eine der Lichtgeschwindigkeit, wie es scheint, genau gleiche Geschwindigkeit, von Wilhelm Weber als die kritische bezeichnet, eine fundamentale Rolle. Ihre Gleichheit mit der Lichtgeschwindigkeit scheint eine wesentliche innere Verwandtschaft zwischen den optischen und den elektrischen Vorgängen anzuzeigen. Die Einsicht in die räthselhaften Seiten namentlich der elektromagnetischen Erscheinungen scheint hier einen leitenden Faden gewonnen zu haben, der uns wahrscheinlich zum tiefsten Grunde derselben führen wird. Für die Elektrotechnik ist die genaue Kenntniß dieser Weberschen Geschwindigkeit von großer praktischer Wichtigkeit, so oft elektrische Strömungen und elektrische Ladungen gleichzeitig in Wirkung treten.«<sup>121</sup> Hier muss daran erinnert werden, dass Heinrich Hertz, inzwischen Professor in Karlsruhe, in den gleichen Wochen des Jahres 1886, in denen dieser Text von Kaiser Wilhelm I. abgesegnet und dem Bundesrat vorgelegt wurde, mit der berühmten Versuchsreihe begann, aufgrund der er ein Jahr später beweisen konnte, dass sich elektromagnetische Wellen mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Licht ausbreiten.

121 Helmholtz bezieht sich auf die Ergebnisse aus den Messungen zur Bestimmung des Verhältnisses der elektrodynamischen und elektrostatischen Ladungseinheiten, die Wilhelm Weber zusammen mit Rudolf Kohlrausch (1809–1858) 1856 durchgeführt hatte. Vgl. Koch Torres Assis/Reich/Wiederkehr, *Absolute System of Units*, 2004.

Ähnlich wie Jollys Schweremessungen so war auch die Messung der Lichtgeschwindigkeit unerwartet zum Thema am neu bezogenen physikalischen Universitätsinstitut geworden. Im Wintersemester 1880/81 hatte sich der junge amerikanische Marineoffizier Albert Abraham Michelson (1852–1931) mit einem Stipendium der US Navy als Physikstudent an der Universität eingeschrieben. Er hatte zuvor in den USA mit den bekannten Verfahren zur Messung der Lichtgeschwindigkeit experimentiert und wollte nun mit der Unterstützung von Helmholtz in Berlin eine von ihm erdachte neuartige Methode mit einem höchstempfindlichen doppelarmigen Interferometer erproben. Finanziert von der Stiftung des Telefonerfinders Alexander Graham Bell (1847–1922) konnte er das neuartige Instrument durch die seit 1864 von den Mechanikern Franz Schmidt (1825–1888) und Herrmann Haensch (1832–1896) in Berlin betriebene – und noch immer bestehende – Firma auch recht schnell anfertigen lassen.<sup>122</sup> Als dann die Messungen jedoch in den Räumen des Universitätsinstituts von den Erschütterungen gestört wurden, welche die unablässig über das Kopfsteinpflaster am Spreuefer rumpelnden Pferdedroschken hervorriefen, sorgte Helmholtz dafür, dass sie im Keller des seit zwei Jahren fertiggestellten Astrophysikalischen Observatoriums auf dem Potsdamer Telegrafenberg durchgeführt werden konnten.



13 Nachbau des Interferometers von Albert A. Michelson.

<sup>122</sup> Livingston, *Michelson*, 1973, S. 75–81. Swenson, *Aether*, 1972, S. 68f. Das Unternehmen Franz Schmidt & Haensch befand sich damals in der Dragonerstraße 19. Der aktuelle Firmensitz der Schmidt u. Haensch GmbH & Co. befindet sich in der Waldstraße 80/81 in Berlin-Reinickendorf. Haensch war Mitbegründer der »Deutsche(n) Gesellschaft für Mechanik und Optik« (DGMO) und Gründungsmitglied der PTR; <http://schmidt-haensch.com/de/unternehmen/geschichte/> (13.6.2018).

Wie weitsichtig dies war sollte sich zeigen, als Michelson die Messung sechs Jahre später, 1887, – als in Berlin die so lange angemahnte PTR endlich gegründet wurde und Hertz in Karlsruhe mit seinen entscheidenden Versuchen beschäftigt war – in Chicago zusammen mit Edward Williams Morley (1838–1923) unter verbesserten Voraussetzungen wiederholte. Die Erkenntnisse aus diesem seither als »Michelson-Morley-Experiment« bezeichneten Versuch widersprachen der bisher gepflegten Hypothese des Bestehens eines ruhenden Äthers und trugen entscheidend zum neuen Weltbild der Physik bei. Ein Nachbau von Michelsons erstem Interferometer kann heute im rekonstruierten damaligen Messungsraum besichtigt werden. Nicht weniger zeitgemäß als damals das Astrophysikalische Observatorium hält das seit 2001 in dessen Gebäude tätige »Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung« (PIK) diesen Raum und das nachgebaute Instrument traditionsbewusst in Ehren.

### Verwendung des Pendels zur Bestimmung der mittleren Erddichte und der Gravitationskonstante am Astrophysikalischen Institut in Potsdam

An eben diesem neuen Astrophysikalischen Observatorium auf dem Telegrafenberg bei Potsdam hatte Johannes Wilsing (1856–1943) das zweite von Helmholtz in seinem Votum erwähnte Projekt zur »absoluten Messung der Gravitation« initiiert. Darauf soll kurz eingegangen werden, bevor in den späteren Kapiteln das erste, vom Kriegsministerium und der Akademie der Wissenschaften unterstützte, ausführlich beschrieben wird.

Wilsing war im gleichen Jahr 1881 an das Potsdamer Institut gekommen, in dem Michelson dort seine Messungen mit dem neuen Interferometer durchführte. Zuvor hatte er in seiner 1880 am physikalischen Institut der Berliner Universität fertiggestellten Dissertation die Einflüsse des Luftdrucks und der Temperatur auf die Bewegung eines Pendels untersucht.<sup>123</sup> 1893 sollte er zum Beobachter, 1898 zum Chefbeobachter ernannt und vor allem mit seinen Arbeiten zur Spektralphotometrie bekannt werden.

Bestärkt durch Jollys Nachweis, dass die Torsionswaage nicht das einzige Instrument war, das sich zur genauen Bestimmung der mittleren Erddichte eignete, war Wilsing überzeugt, dass sich dafür das bei geodätischen Messungen seit langem bewährte Pendel als noch geeigneter als die Balkenwaage erweisen würde. Nach den berühmten älteren Messungen von Maskelyne, Hutton, Carlini und Airy mit dem Pendel in seiner klassischen Form sei dessen Verwendung nicht wegen zu geringer Empfindlichkeit zu Gunsten der empfindlicheren Torsionswaage aufgegeben wor-

123 Wilsing, *Einfluss*, 1880.



14 Johannes Wilsing (1856–1943).

den, sondern aufgrund der »Unsicherheit, welche die unvollständigen Kenntnisse der Masse und Dichtigkeit des ablenkenden Gebirgszuges« verursacht habe.<sup>124</sup> Aber auch wenn sich das Pendel bisher nicht als empfindlich genug erwiesen habe, »um durch kleinere, genau bestimmbare Massen in merklicher Weise beeinflusst zu werden«, so ließe sich die erforderliche Empfindlichkeit »ohne Schwierigkeit« dadurch erreichen, »dass man den Schwerpunkt des Pendels dicht unter die Drehungsaxe verlegt«. Man könne darin »eine Combination der beiden ältesten Methoden« sehen, also des klassischen Pendels und der Torsionswaage. Gegenüber der »von Hrn. von Jolly mit ausgezeichnetem Erfolg angewandten Methode der Wägung« mit der Balkenwaage biete es den Vorteil, »dass die Empfindlichkeit des Pendels eine beträchtlich grössere« sei.<sup>125</sup> Wilsing wollte dies in einer systematischen Untersuchung beweisen und führte im September 1884, während König und Richarz noch ihren Antrag an die Akademie vorbereiteten, am Observatorium mit einer provisorischen Konstruktion bereits eine erste Versuchsreihe durch, »zur Orientirung über die praktische Durchführbarkeit dieser Modification«.<sup>126</sup>

Sein Spezialpendel bestand aus einer 1 m langen prismatischen Stange aus dünnem Eisenblech, an deren Enden zwei Bleikugeln von je 300 g befestigt waren und deren Lagerung sich in der Mitte befand. Die Gravitationskraft, die von zwei in geringer Entfernung angebrachten größeren Massen ausging, bewirkte bei vertikaler Justierung der Pendelstange kleine Auslenkungen in horizontaler Richtung. Um das langsame Einschwingen auf die Ruhestellung mit maximaler Genauigkeit verfolgen zu können, hatte auch er eine optische Anordnung mit Spiegeln erdacht.

»Ist die Gleichgewichtsstellung gefunden, und werden dann die anziehenden Massen horizontal neben die Bleikugeln gebracht, so lässt sich aus der Ablenkung des Pendels unmittelbar das Verhältniss ihrer Anziehung zur Gravitationsconstante bestimmen. Durch Umkehrung der Richtung der ablenkenden Kraft kann man die zu messende Wirkung verdoppeln.«

Der Astronom der Akademie, Professor Arthur von Auwers (1838–1915), legte Wilsings Projektbeschreibung mit dem Titel »Über die Anwendung des Pendels zur Bestimmung der mittleren Dichtigkeit der Erde« am 15. Januar 1885 der Akademieklasse in Berlin vor – nur einen Monat nachdem Helmholtz die Projektbeschreibung von König und Richarz vorgelegt hatte. Ebenfalls ohne einen Hinweis auf den Unterschied zur »mittleren Erddichte« wurde im Text auch die

<sup>124</sup> Der englische Mathematiker und Astronom Nevil Maskelyne (1732–1811) führte 1774 am schottischen Berg Schiehallion Pendelmessungen durch, um die Erddichte zu bestimmen. Der schottische Mediziner, Chemiker und Geologe James Hutton (1726–1797) benutzte das Pendel für lokale Erduntersuchungen. Der italienische Astronom und Geodät Francesco Carlini (1783–1862) führte 1824 Pendelbeobachtungen am Mont Cenis durch. Der englische Mathematiker und Astronom George Biddell Airy (1801–1892) führte mehrfach Gravitationsmessungen mit dem Pendel durch. Vgl. zur Geschichte der Pendelmessungen: Gonzalez, *Anachronism*, 2001.

<sup>125</sup> Wilsing, *Anwendung des Pendels*, 1885, S. 13.

<sup>126</sup> Wilsing, *Anwendung des Pendels*, 1885, S. 15.

Bestimmung der »Gravitationskonstante« als Aufgabe benannt. Er hoffe, so teilte Wilsing dort auch gleich mit, »in nächster Zeit mit einem von Johann Adolf Repsold (1838–1919) in Hamburg ausgeführten Apparate die Beobachtungen auf dem Astrophysikalischen Observatorium weiter fortführen und zum Abschluss bringen zu können«. <sup>127</sup>

Tatsächlich konnte von Auwers der Akademieklasse schon zwei Jahre später, 1887, Wilsings Abschlussbericht vorlegen. Zum gleichen Zeitpunkt beschloss der Reichstag die Finanzierung der PTR, während König und Richarz, die ursprünglich damit gerechnet hatten, ihr Projekt ebenfalls schon erfolgreich beenden zu können, in der Spandauer Zitadelle noch immer mit Vorversuchen und Maßnahmen zur Erreichung konstanter Klimaverhältnisse im Messungsraum beschäftigt waren. Wilsing teilte mit, dass man aus »den erlangten Resultaten« schließen dürfe, dass »das Pendel in der hier beschriebenen Form für die Bestimmung der mittleren Dichtigkeit der Erde sehr geeignet ist und als ein Instrument, welches mit ausserordentlicher Empfindlichkeit die erforderliche Praecision in seinen Angaben verbindet, eine nützliche Bereicherung des physikalischen Messapparats abgeben wird«. Von der Gravitationskonstante war nun nicht mehr die Rede. <sup>128</sup>

### Poyntings Messungen in Cambridge und Birmingham

Auch in anderen Ländern wurden in diesen Jahren Gravitationsmessungsprojekte unternommen. Da die international wahrgenommenen Veröffentlichungen dazu gewöhnlich erst nach deren erfolgreichem Abschluss erschienen, ist unklar, was König, Richarz und Krigar-Menzel schon zuvor darüber erfuhren. Dies galt auch für die bereits erwähnten Versuche zur genaueren Messung der mittleren Dichte der Erde, die Maxwell im englischen Cambridge dem jungen John Henry Poynting im neuen Cavendish-Institut ermöglichte.

Poynting hatte sein im Owens College in Manchester begonnenes Mathematikstudium 1872 mit einem Stipendium für das Trinity College in Cambridge fortgesetzt und mit einem herausragenden Studienabschluss beendet. Zurück am Owens College hatte er sich danach auf der Stelle eines »demonstrators« der Bestimmung der mittleren Dichte der Erde mit der Balkenwaage gewidmet. Dass er gleichzeitig in einer statistischen Untersuchung die Verbreitung der Trunksucht in England untersucht hatte, lenkte ein Jahrhundert später den Blick der Wissenschaftshistorikerin Isobel Falconer auf seine religiöse Verwurzelung im englischen Unitarismus: »These two elements, public service and painstaking experimental measurements of gravitational effects, were to dominate much of his career«. <sup>129</sup>

<sup>127</sup> Wilsing, *Anwendung des Pendels*, 1885. Das Unternehmen A. Repsold & Söhne wurde seit 1871 von Johann Adolf Repsold in der dritten Generation geführt. Es bestand bis 1919.

<sup>128</sup> Wilsing, *Resultate*, 1887.

<sup>129</sup> Falconer, *Poynting*, 1999, S. 526.

Wie schon bei Jolly in München, von dessen Versuchen Poynting erst später erfahren sollte, ging es ihm hauptsächlich um die Auslotung der Möglichkeiten der »gewöhnlichen« Waage, wobei auch er in der Messung der Gravitation die Aufgabe mit den höchsten Anforderungen sah. Anregungen dazu dürfte er nicht zuletzt durch die Londoner internationale Ausstellung wissenschaftlicher Instrumente im Jahr 1876 erfahren haben, auf der auch zahlreiche neue Konstruktionen zur Nutzung des Prinzips der »gewöhnlichen« Waage gezeigt worden waren.<sup>130</sup>

Nachdem er seine Versuche 1877 mit einer »chemischen Waage« noch im Keller unter dem chemischen Laboratorium des Owens College begonnen hatte, konnte er sie dann mit einem Forschungsstipendium in Cambridge im Untergeschoss des Cavendish-Instituts fortsetzen. Dessen Chef Maxwell charakterisierte die Versuchsreihe zwar als »tedious«, aber voller Respekt auch als »heroic«.<sup>131</sup> Da Poynting glaubte, mit größeren Massen arbeiten zu müssen und sich seine bisher benutzte Waage dafür nicht eignete, wandte als er sich mit der Unterstützung von Maxwell im Sommer 1878 um Hilfe an die Royal Society. Poynting begründete seinen Antrag damit, dass seine bisherigen Messwerte »have no value in themselves, but they serve as an example of the employment of the balance for more delicate work than any which it has yet been supposed able to perform«. Er sei überzeugt, dass der Unterschied zwischen zwei Gewichten »in any one series of weightings« mit größerer Genauigkeit gemessen werden könne als man es bisher für möglich hielt. Dafür wolle er – ganz so wie ein Jahr zuvor Jolly in München – die Brauchbarkeit der »gewöhnlichen Waage« für die Durchführung des Cavendish-Experiments beweisen. Bisher habe man nicht geglaubt, dass mit der Balkenwaage so kleine Kräfte gemessen werden könnten wie es mit der Torsionswaage möglich war.<sup>132</sup>

Tatsächlich übernahm die Royal Society die Finanzierung einer für schwere Lasten geeigneten »großen Präzisionswaage«. Es handelte sich um eine Waage in der Art der »bullion-balances«, wie sie sich in den Banken für das genaue Abwiegen der schweren Gold- und Silberbarren bereits bewährten.<sup>133</sup> Mit der nach seinen Anforderungen auszuführenden Konstruktion beauftragte Poynting den deutschstämmigen Mechaniker Ludwig Oertling (1818–1891), der in England das größte Unternehmen zur Herstellung für Präzisionswaagen betrieb. Oertling, aus dessen Werkstatt bereits die bisher verwendete »chemische Waage« gekommen war, hatte schon einige derartige »bullion-balances« ausgeliefert. Mit dieser großen Waage, de-

130 Vgl. Achenbach/Falk, *Bericht*, 1881.

131 Falconer, *Poynting*, 1999, S. 527.

132 Poynting, *Method*, 1879, S. 7–9.

133 Falconer, *Poynting*, 1999, S. 526f.

ren Waagbalken die eindrucksvolle Länge von 123 cm aufwies, setzte Poynting seine Wägungen weiter fort, auch nachdem er 1880 die neu eingerichtete Professur für Physik am Mason College der Universität von Birmingham übernommen hatte.<sup>134</sup>

Ähnlich wie Jolly in München sollte auch Poynting später betonen, dass sich die Schwierigkeiten als weit größer erwiesen, als er anfangs angenommen hatte. Wegen der Größe der Waage hätten sich vor allem die von den Luftströmungen hervorgerufenen Störungen besonders stark ausgewirkt, wobei sich bei der Überprüfung der Messergebnisse immer neue Fehler gezeigt hätten. Die Suche nach deren Ursachen und nach Maßnahmen, um sie durch Veränderungen an der Waage und dem Messungsaufbau zu beseitigen, zog sich auch bei ihm über zwölf Jahre hin. Erst Anfang 1890 habe alles zu seiner Zufriedenheit funktioniert, so dass er noch im gleichen Jahr von Mai bis September die abschließende Messreihe erstellen konnte. Seine Ergebnisse und Erkenntnisse fasste er in einem umfassenden Abschlussbericht zusammen, den er im Juni 1891 der Royal Society präsentierte und dessen 1892 publizierte englische Fassung noch im gleichen Jahr auch in deutscher Übersetzung erschien. Neben der Bestimmung der mittleren Dichte der Erde benannte nun auch er die Bestimmung der Gravitationskonstante als Ziel.<sup>135</sup> Falconers Urteil trifft sicherlich zu: »Poynting achieved a union between his concerns with a heroic experimental tradition and the search for a fundamental unified theory of nature so typical of the Cambridge physicists«.<sup>136</sup>

<sup>134</sup> Ludwig Oertling war der Sohn von Johann August Daniel Oertling (1803–1866), einem Gesellen von Heinrich Pistor (1778–1847), der in Berlin die Werkstatt für wissenschaftliche Instrumente und chemische Waagen »August Oertling« gründete. Sie bestand bis zum Ende der 1880er Jahre. Robens/Jayaweera/Kiefer, *Balances*, 2014, S. 607f. Vgl. auch die von Tony Morris im Juni 2012 mitgeteilten biografischen Angaben <http://www.oertling.com/> (13.6.2018). Wie Falconer mitteilte, wurde die Waage auch noch 1999 im National Physical Laboratory benutzt. Falconer, *Poynting*, 1999, S. 526.

<sup>135</sup> Poynting, *Determination*, 1892. Deutsche Übersetzung: Poynting, *Bestimmung*, 1892.

<sup>136</sup> Falconer, *Poynting*, 1999, S. 529.

## Das Berlin-Spandauer Gravitationsmessungsprojekt

Nachdem bisher einige der wichtigsten Voraussetzungen für das Gravitationsmessungsprojekt des physikalischen Instituts der Berliner Universität lediglich angedeutet wurden, wird den einzelnen Aspekten dieses von der preußischen Akademie der Wissenschaften und vom preußischen Kriegsministerium unterstützten Projekts in den folgenden Abschnitten sehr viel mehr Raum gegeben. Dabei gilt das Interesse neben den beteiligten und tangierten Persönlichkeiten immer auch der dafür konstruierten und heute im Deutschen Museum ausgestellten Präzisionswaage.

### Drei akademische Karrieren als Voraussetzung und Hintergrund des Projekts

Am physikalischen Institut der Berliner Universität forderte das Jahr 1884 sowohl von Arthur König als auch von Franz Richarz Entscheidungen über ihre weiteren wissenschaftlichen Karrieren. König hatte sich als Assistent von Helmholtz gerade habilitiert und der erst ans Institut gekommene Richarz wurde am 28. November, nur drei Wochen vor der Antragstellung bei der Akademie, zum Doktor promoviert. Auf ihrer Suche nach neuen und aktuellen Forschungsthemen hatten die Berichte von Jolly und Poynting ihre Aufmerksamkeit so stark erregt, das sie beide – »gänzlich unabhängig von einander«, wie sie später erklären sollten – ähnliche Ideen zur möglichen Effektivierung der dort beschriebenen Messungsverfahren entwickelten.<sup>137</sup> Auch das besondere Interesse ihres akademischen Mentors Helmholtz an diesen Messungen dürfte ihnen kaum entgangen sein. Obwohl sie ihn später in ihren veröffentlichten Texten immer nur als denjenigen erwähnten, der ihre Projektbeschreibung am 18. Dezember 1884 der Akademieklasse »vorgelegt« hatte, so spricht doch alles dafür, dass er das Projekt von der frühesten Planung an bis zu seinem Tod 1894 als im Hintergrund immer präsente akademische Autorität begleitete, seinen Verlauf interessiert verfolgte und in kritischen Momenten auch seinen Einfluss geltend machte.

Der von Geburt an durch eine Rückgratverkrümmung (Kyphose) behinderte König war der älteste der drei am Projekt beteiligten jungen Physiker. 1856 in Krefeld als Sohn eines Volksschullehrers geboren, hatte er nach einer kaufmännischen Ausbildung sein Studium in Bonn und Heidelberg mit einer 1882 in Berlin fertiggestellten Doktorarbeit über die »Beziehungen zwischen der galvanischen Polarisation und der Oberflächenspannung des Quecksilbers« abgeschlossen. Helmholtz hatte deren Ergebnisse für so wichtig gehalten, dass er sie seiner Akademieklasse vortrug und in den Annalen veröffentlichte.<sup>138</sup> Ausschlaggebend dafür, dass er ihm

<sup>137</sup> König/Richarz, *Neue Methode*, 1884.

<sup>138</sup> König, *Beziehungen*, 1882. Helmholtz, *Versuche des Hrn. Arthur König*, 1882.

auch eine Assistentenstelle an seinem Institut anbot, dürfte jedoch sein wachsendes Interesse an den aktuellen Fragen bei der Erforschung der visuellen Wahrnehmung und der physiologischen Optik gewesen sein. So verfasste König nicht nur ausführliche Berichte über Instrumente, die Helmholtz schon Jahrzehnte zuvor entwickelt hatte, darunter das »Opthalmometer« und das »Leukoskop« zur Messung der Farbempfindung. Darüber hinaus entwickelte er selbst, von seinem Lehrer und Förderer unmittelbar unterstützt, einen neuartigen Spektralfarben-Mischapparat, »mit dem man bequem jedes beliebige Mischungsverhältnis beliebiger Spektralfarbenpaare mit ebensolchen Mischungen in einem zweigeteilten Gesichtsfeld miteinander vergleichen« konnte.<sup>139</sup>

»Zuerst unter seiner Leitung, später mehr und mehr selbständig werdend, aber doch der von Helmholtz gewählten Grundfarbe stets treu bleibend, hat König das von Helmholtz begonnene Bild stetig erweitert, vervollkommenet, verfeinert.« Mit diesem Satz sollte der Farbenphysiker Manfred Richter (1905–1990) in einer Würdigung zu Königs hundertstem Geburtstag dessen Beziehung zu Helmholtz charakterisieren – wobei er das Gravitationsmessungsprojekt nur mit einer kurzen Erwähnung würdigte.<sup>140</sup> Die Farbwahrnehmung blieb Königs zentrales Thema und er habilitierte sich auch damit. Besondere Anerkennung in der Fachwelt fand seine damals gemeinsam mit Conrad Dieterici (1858–1929) verfasste Arbeit zur spektralen Empfindlichkeit der Stäbchen und Zäpfchen im menschlichen Auge.<sup>141</sup> Gleichzeitig stellte er 1885 auch eine umfassende Literaturliste für die Neuauflage des »Handbuchs der Physiologischen Optik« von Helmholtz fertig. Nach dessen Tod sollte er »in Übereinstimmung mit den Erben und der Verlagsbuchhandlung« auch die sich bis zum Oktober 1896 hinziehende Fertigstellung dieses fundamentalen Werks übernehmen.<sup>142</sup>

Sein Interesse für spezielle und hochempfindliche Messinstrumente dürfte König auch veranlasst haben, sich mit den von Jolly beschriebenen Problemen der Messung der von der Erde ausgehenden Gravitationskraft zu beschäftigen, konnte doch auch sie als Gegenstand der Wahrnehmung mit den menschlichen Sinnen verstanden werden. Wahrscheinlich hatte ihn Helmholtz im Zusammenhang mit der erwähnten Denkschrift vom Juni 1883 gebeten, darüber nachzudenken, wie die Randbedingungen von Jollys Messungen verbessert werden könnten. Als sich Königs Überlegungen zur Planung eines eigenen Projekts zur Gravitationsmessung verdichteten, dürfte ihm Helmholtz nicht nur das Studium der Einrichtungen und Verfahren zur Präzisionswägung im neuen metronomischen Institut der NAC

<sup>139</sup> König, *Leukoskop Beobachtungen*, 1882. König, *Leukoskop Theorie*, 1883 (fertiggestellt im November 1882). König, *Opthalmometer*, 1883. Richter, *Arthur König*, 1956, S. 4.

<sup>140</sup> Richter, *Arthur König*, 1956, S. 2.

<sup>141</sup> König, *Dichromatische Farbsysteme*, 1884 (offenbar Habilitationsschrift). König/Dieterici, *Empfindlichkeit*, 1884. König/Richarz, *Neue Methode*, 1885.

<sup>142</sup> König, *Vorrede*, 1896.

nahegelegt, sondern ihm neben der Finanzierung durch die Akademie auch die Unterstützung durch das Kriegsministerium in Aussicht gestellt haben.

Auch wenn der Arbeitsaufwand, den ein derartiges Projekt erfordern würde, kaum abschätzbar war und einigen Anlass zur Zurückhaltung bot, so konnte ein auf seine Zukunft bedachter Privatdozent doch kaum ein Forschungsprojekt ablehnen, für das der berühmte Helmholtz seine gesamte Autorität ins Feld führen wollte. Dazu kam, dass sich der neu ans Institut gekommene Doktorand Richarz ebenfalls schon mit der Thematik beschäftigt hatte und sich mit ähnlichen konzeptionellen Überlegungen für ein derartiges Unternehmen trug. Nicht zuletzt dürften auch die Pläne von Wilsing am Potsdamer Observatorium im Berliner Universitätsinstitut als zusätzliche Herausforderung empfunden worden sein.

König glaubte, bereits innerhalb eines Jahres erste Ergebnisse vorlegen zu können<sup>143</sup> und der Start des Projekts ging im Sommer 1885 tatsächlich schnell und vielversprechend über die Bühne. Dann mussten er und Richarz jedoch schon bald erkennen, dass bereits die vorbereitenden Arbeiten in der Spandauer Zitadelle sehr viel mehr Zeit erfordern würden. Nicht nur die erforderliche längere Anreise nach Spandau dürfte ihnen allmählich als zeitraubende Pflicht erschienen sein, sondern vor allem die immer neu zu bedenkenden und wissenschaftlich zu begründenden Entscheidungen über technische Maßnahmen, die dann meist die Organisation handwerklicher Arbeiten und deren Kontrolle nach sich zogen. Mit dem immer schwerer absehbaren Abschluss musste sich auch die Aussicht auf karriereförderliche Erkenntnisse verflüchtigen. Nicht zuletzt dürfte sich auch die körperliche Behinderung von König für die Respektierung seiner Überlegungen durch die an militärische Befehle gewöhnten Ansprechpartner in der Geschützgießerei und der Zitadelle als hinderlich erwiesen haben. Spätestens als dann Anfang 1887 klar wurde, dass Helmholtz das Universitätsinstitut verlassen würde, wandten er und auch Richarz sich wieder ihren anderen Forschungsthemen zu.

So erscheint es nur folgerichtig, dass König im Sommer 1889 seine Mitarbeit an der »Einrichtung des Beobachtungsraums« einstellte und am 19. November 1889 die Akademie um Entbindung von seinen Verpflichtungen für das Gravitationsmessungsprojekt bat. Er begründete diesen Schritt mit seiner »Ende Juli« erfolgten Ernennung zum außerordentlichen Professor an der Universität und »zuzüglich« zum »Vorsteher« der physikalischen Abteilung des physiologischen Instituts, die es ihm unmöglich mache, an den Messungen in Spandau »fernerhin praktisch teilzunehmen«. Bei der Antragstellung, so erklärte er, habe man geglaubt, dass sich die Arbeiten »in zwei bis drei Jahren« zum Abschluss bringen lassen würden. Nachdem die Waage jedoch erst 14 Monate später fertiggestellt worden sei und eine »ungemein zeitraubende Reihe von Vorversuchen« erforderlich waren, hätten er und

<sup>143</sup> König hatte diese Hoffnung am 19. Dezember 1884 vor der Berliner Physikalischen Gesellschaft mitgeteilt. *Nature*, 15. Jan. 1885, S. 260.



15 Arthur König (1856–1901).

Richarz schon im Winter 1887/88 beschlossen, mit Dr. Otto Krigar-Menzel »einen dritten Mitarbeiter« zu gewinnen. Dieser und auch Richarz seien damit einverstanden, »die volle Verantwortlichkeit für die weitere Durchführung der Untersuchung allein zu übernehmen«, teilte König mit und legte deren persönliche Bestätigungen bei.<sup>144</sup> Mit dem speziellen Lehrauftrag »Physiologische Optik« sollte er die erwähnten Ämter dann bis zu seinem Tod 1901 ausüben und sich auch an der Abfassung des Abschlussberichts zu den Spandauer Messungen nicht mehr beteiligen.<sup>145</sup>

Der vier Jahre jüngere in Endenich bei Bonn geborene Franz Richarz hatte ebenfalls in Bonn u. a. bei Rudolf Clausius (1822–1888), einem weiteren Studienfreund von Helmholtz, Physik und Mathematik studiert, bevor er von diesem 1884 in Berlin mit einer Arbeit zur Elektrolyse der Schwefelsäure promoviert worden war.<sup>146</sup> Sein Vater war der Psychiater Franz R. Richarz (1812–1887), der sich für die Verbesserung der »öffentlichen Irrenpflege« engagiert hatte und heute über die Fachkreise hinaus bekannt ist, weil er in seiner privaten Klinik auch den Komponisten Robert Schumann (1810–1856) behandelt hatte. Im Gegensatz zu König, der weiterhin an der Berliner Universität blieb, und Krigar-Menzel, der seine Geburtsstadt Berlin nie verlassen sollte, stellten die Berliner Jahre zwischen 1884 und 1888 in seiner akademischen Karriere nur eine relativ kurze Episode dar. Nachdem Helmholtz die Universität 1887 verlassen hatte um die Leitung der neuen PTR zu übernehmen, entschloss sich Richarz zur Rückkehr nach Bonn um sich dort zu habilitieren.<sup>147</sup> Er verließ Berlin 1888 und überließ es König, Krigar-Menzel mit dem Projekt vertraut zu machen. So stellte das Jahr 1888, in dem August Kundt (1839–1894) die Nachfolge von Helmholtz als Direktor des Universitätsinstituts antrat und die politische Herrschaft vom ersten Kaiser des neuen Reichs Wilhelm I. über den kranken und nur drei Monate regierenden Friedrich III. an dessen Sohn Wilhelm II. übergang, auch für den Verlauf des Gravitationsmessungsprojekts einen besonders kritischen Zeitabschnitt dar.

Richarz sollte in Bonn mehrere Jahre als Privatdozent verbringen, bevor er 1895 in Greifswald eine Professur für Physik antreten konnte, wobei er auch von

144 Richarz/Krigar-Menzel, *Abnahme der Schwere*, 1894, S. 560. Schreiben von König, Richarz und Krigar-Menzel an die Akademie, 19.11.1889. Archiv BBAW. Wissenschaftliche Unternehmungen der phys.-math. Klasse 1884–1910. II–VII, III. Richarz/Krigar-Menzel, *Abnahme der Schwere*, 1894, S. 560.

145 1899 wohnte König im Stadtteil Moabit im 2. Stock der Flemingstr. 1, Berliner Adressbuch 1899. Sein Grab auf dem Friedhof der Johanniskirche ist nicht erhalten.

146 Richarz, *Ozon*, 1884 (Doktorarbeit). Richarz hatte 1879 sein Studium in Berlin begonnen, es dann für den Militärdienst unterbrochen und war 1882 an die Berliner Universität zurückgekehrt. Dort studierte er bei Wilhelm Dilthey (1833–1911), Gotthilf Hagen (1797–1884), Helmholtz, Georg Hettner (1854–1914), Kirchhoff, Ernst Eduard Kummer (1810–1893), Albert Wangerin (1844–1933) und Eduard Zeller (1814–1908). Zuvor hatte er in Bonn von 1878 bis 1879 bei Rudolf Clausius (1822–1888), Johannes Hanstein (1822–1880), August Kekulé (1829–1896), Hermann Kortum (1836–1904), Arnold de Lasaulx (1839–1886), Franz von Leydig (1821–1908) und Rudolf Lipschitz (1832–1903) studiert. Vita in der Doktorarbeit 1884.

147 Als Richarz zurück nach Bonn ging, lehrte dort noch immer der 1869 berufene Rudolf Clausius.

dort aus seiner Verpflichtung gegenüber der Berliner Akademie zur Weiterführung des Projekts so gut wie möglich nachkam. Als Mitverfasser sowohl des Antrags vom Dezember 1884 als auch der verschiedenen Fassungen des Abschlussberichts in den Jahren 1897/98 erscheint er in den Publikationen in gewisser Weise sogar als Garant für die kontinuierliche Weiterarbeit bis zum Abschluss des Projekts zwei Jahre nach dem Tod von Helmholtz. Diesem stand Richarz auch persönlich nahe, korrespondierte mit ihm über Fachfragen und war mit seinem früh verstorbenen Sohn Robert Helmholtz (1862–1889) befreundet. Im Abschlussbericht wird mitgeteilt, dass er von Bonn aus »zunächst noch jedesmal während der Universitätsferien« nach Spandau kam und sich dort, wie dann auch in Greifswald »mehrfach – im ganzen für 3 Jahre – von dem Abhalten von Vorlesungen dispensieren« ließ, um sich »ganz an den Versuchen beteiligen zu können«. <sup>148</sup> 1901 sollte er einem Ruf an die Universität Marburg folgen und dort das gerade erst vom Mathematischen Institut getrennte Physikalische Institut bis zu seinem Tod 1920 leiten.

In Fachkreisen wurde er mit seinen Veröffentlichungen zu den sogenannten Heuslerschen Legierung und zum Gesetz von Dulong und Petit bekannt. <sup>149</sup> Mit dem Polarforscher Alfred Wegener (1880–1930), der als Privatdozent für Meteorologie, praktische Astronomie und kosmische Physik an der Marburger Universität wirkte, veröffentlichte er einen Bericht über den Meteoriten, der 1916 bei dem nordhessischen Städtchen Treysa niederging. <sup>150</sup> Zu seinen nachhaltigsten Leistungen zählt zweifellos die mit jahrelangem Drängen endlich erreichte Errichtung eines neuen Gebäudes für das Physikinstitut der Marburger Universität. 1910 sollte er die bei den Gravitationsmessungen benutzte Waage, die sich seither in seiner Obhut befunden hatte, an das Deutsche Museum in München übergeben.

Der als »dritter Mitarbeiter« gewonnene Otto Krigar-Menzel hatte ursprünglich ein Musikstudium geplant gehabt, dann jedoch 1883 ein Studium der Mathematik und Physik aufgenommen und sich dabei besonders für das von Helmholtz so umfassend erforschte und systematisch beschriebene Zusammenwirken von Physik, Mathematik und der Musik interessiert. Einen ersten Erfolg auf diesem hybriden Gebiet konnte er am 3. April 1887 verzeichnen, als die philosophische Fakultät eine von ihm eingereichte Arbeit über die Tonentstehung bei Streichinstrumenten mit einem Preis »krönte«. Entscheidend dürfte dabei die Zustimmung von Helmholtz gewesen sein, der – während er mit den Reichsbehörden

<sup>148</sup> Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante*, 1898. »Vorgelegt in der Sitzung der phys.-math. Classe am 16. December 1897 [Sitzungsberichte St. III. S. 1121]. Zum Druck eingereicht am 28. Februar, ausgegeben am 5. September 1898.«, S. 6.

<sup>149</sup> Heuslers Publikation erschien »unter Mitwirkung von Franz Richarz u. a.«. Heusler, *Ferromagnetische Eigenschaften*, 1904. Richarz, *Dulong und Petit*, 1908. Friedrich Heusler (1866–1947), Pierre Louis Dulong (1785–1838), Alexis Thérèse Petit (1791–1820).

<sup>150</sup> Richarz, *Beschreibung*, 1918.

bereits über sein Gehalt als zukünftiger Präsident der PTR verhandelte – Krigar-Menzel dann auch gleich aufforderte, seine Ausführungen mit systematischen Messungen und einer mathematisch-theoretischen Durcharbeitung zu einer Dissertation zu erweitern. Der verehrte Professor stellte ihm dafür seine eigenen, in Bonn und Heidelberg verwendeten Messinstrumente mitsamt dem Vibrations-Mikroskop zur Verfügung. Wahrscheinlich verfolgte Helmholtz mit diesem Vertrauensbeweis auch die Absicht, wie schon bei der Überarbeitung seines »Handbuchs der physiologischen Optik« durch König, einen qualifizierten Fachmann für die Aktualisierung seiner »Lehre von den Tonempfindungen« zu finden, die er selbst bereits 1870 und 1877 in jeweils überarbeiteten Neuauflagen herausgegeben hatte.

Krigar-Menzel stellte die Doktorarbeit über die mathematisch-physikalische Theorie der mit dem Streichbogen angeregten schwingenden Saite bereits »Weihnachten 1887« fertig und verteidigte sie am 24. März 1888 vor der Fakultät. Sein besonderer Dank galt darin nicht nur seinem »hochverehrten Lehrer, Herrn Geheimrat von Helmholtz« für die Überlassung der Instrumente und seinen »stets freundlichst erteilten Rath«, sondern auch dessen damaligen Assistenten Otto Lummer (1860–1925) für seine zeitweilige Unterstützung bei den Messungsarbeiten. Lummer, der später mit seinen Arbeiten zur Strahlung des »schwarzen Körpers« bekannt werden sollte, war Helmholtz noch 1887 an die PTR gefolgt. Krigar-Menzel widmete die Dissertation seinem Onkel Adolph Menzel, der den Neffen nach dem Tod von dessen Vater adoptiert hatte.<sup>151</sup> Den Doppelnamen führte er seit 1883.

Die fünfte Auflage der »Lehre von den Tonempfindungen« sollte dann allerdings erst 1896 – im gleichen Jahr wie die der »physiologischen Optik« – erscheinen, wobei sie jedoch nicht von Krigar-Menzel, der damals mit den letzten Wägungen in der Spandauer Zitadelle voll beschäftigt war, sondern, noch im Auftrag von Helmholtz, von dem an der PTR tätigen Richard Wachsmuth (1868–1941) herausgegeben wurde.<sup>152</sup> Krigar-Menzels Dissertation wird darin nicht zitiert. Erwähnt werden dagegen die Versuche zur Verwendung oder Unterlassung der temperierten Stimmung, die Helmholtz noch selbst mit dem befreundeten, international berühmten Geiger Joseph Joachim angestellt hatte.<sup>153</sup> In seinem im Dezember 1895, ein Jahr nach dem Tod von Helmholtz, verfassten Vorwort erklärte Wachsmuth, dass »gemäss einer letzten Willensäußerung des Verewigten« die Aufnahme »der Ergebnisse neuerer Forschungen« unterblieben seien.<sup>154</sup> In den Jahren des

151 Krigar-Menzel, *Bewegung gestrichener Saiten*, 1888, S. 7 und 26.

152 Helmholtz hatte den als wissenschaftlichen Hilfsarbeiter 1893 an die PTR gekommenen Wachsmuth nicht nur damit, sondern auch mit den von Anna von Helmholtz und DuBois-Reymond übersetzten »Neuesten Anschauungen über Elektrizität« von Oliver Lodge beauftragt. Saltzer, *Richard Wachsmuth*, 2014. Helmholtz, *Tonempfindungen*, 1863, 1865, 1870. 1877, 1896.

153 Es ging dabei um die Verwendung oder Unterlassung der temperierten Stimmung. Helmholtz, *Tonempfindungen*, 1896, S. 525.

154 Wachsmuth, *Vorwort*, 1896.



16 Franz Richarz (1860–1920).

aufkommenden Telefons zur elektrischen Übertragung verständlicher Sprache, das damals auch für spektakuläre Musikübertragungen eingesetzt wurde, waren neue Fragestellungen in den Vordergrund gerückt.<sup>155</sup>

Nachdem die Unterlagen über Krigar-Menzel im Archiv der TU Berlin den Bomben des Zweiten Weltkriegs zum Opfer gefallen sind, findet man die wenigen verfügbaren Hinweise auf seine Biografie bezeichnenderweise in der Literatur über die kulturelle Szene im Berlin der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. So war sein Vater Hermann Krigar selbst komponierender Kapellmeister und königlicher Musikdirektor in Berlin gewesen. Im *Musikalisches Konversationslexikon* von 1876 wird er als »begabter Pianist, Componist und Dirigent« bezeichnet, der jedoch, nachdem er »bereits Malerstudien begonnen« hatte, »seiner eigentlichen Neigung, höhere Musikstudien zu machen«, erst »ziemlich spät« gefolgt sei. Nach Studien in Leipzig u. a. bei Felix Mendelssohn-Bartholdy (1809–1847) und Robert Schumann hatte er sich seit 1845 in Berlin als Musiklehrer, Komponist, Chorleiter und Autor betätigt. 1857 war er zum Königlichen Musikdirektor und später auch zum Mitglied des »Königl. musikalischen Sachverständigen-Vereins« ernannt worden, sei dann aber »nur noch selten an die Oeffentlichkeit« getreten.<sup>156</sup> Seine Wohnung sei jedoch bis zu seinem Tod geselliger Treffpunkt zahlreicher Musiker, Komponisten, Kritiker und Schriftsteller geblieben.<sup>157</sup>

Bei der Mutter Emilie Krigar (1842–1921) handelt es sich um die Schwester Adolph Menzels, der sie in Gemälden und Zeichnungen immer wieder liebevoll charakterisiert hat. Ein Nachbar im Berliner »Geheimratsviertel«, – in der Nähe der Matthäikirche am Rand des heutigen, in den Westberliner Jahren errichteten »Kulturforums« – wo Menzel mit der Familie Krigar in der Sigismundstraße 3 Tür an Tür im gleichen Haus wohnte, war Theodor Fontane (1819–1898) in der Potsdamer Straße 124c, der die Angehörigen der Familie Krigar in seinen Briefen immer wieder erwähnte und dessen Tochter Martha Fontane (1860–1917, seit 1899 Fritsch) als Kind Ottos Spielkameradin gewesen war.<sup>158</sup> Im Haus 113 in der Potsdamer Straße, heute 81 A, wohnte der Direktor der Hochschule für die bildenden Künste Anton von Werner. Auch die von Joachim geleitete Musikhochschule war nicht allzu weit entfernt in der Potsdamer Straße 120 in einem Gebäude des ehemaligen astrometeorologischen Instituts untergebracht, von wo sie erst 1902 in den zum Teil noch bestehenden Neubau in Charlottenburg umziehen sollte.<sup>159</sup>

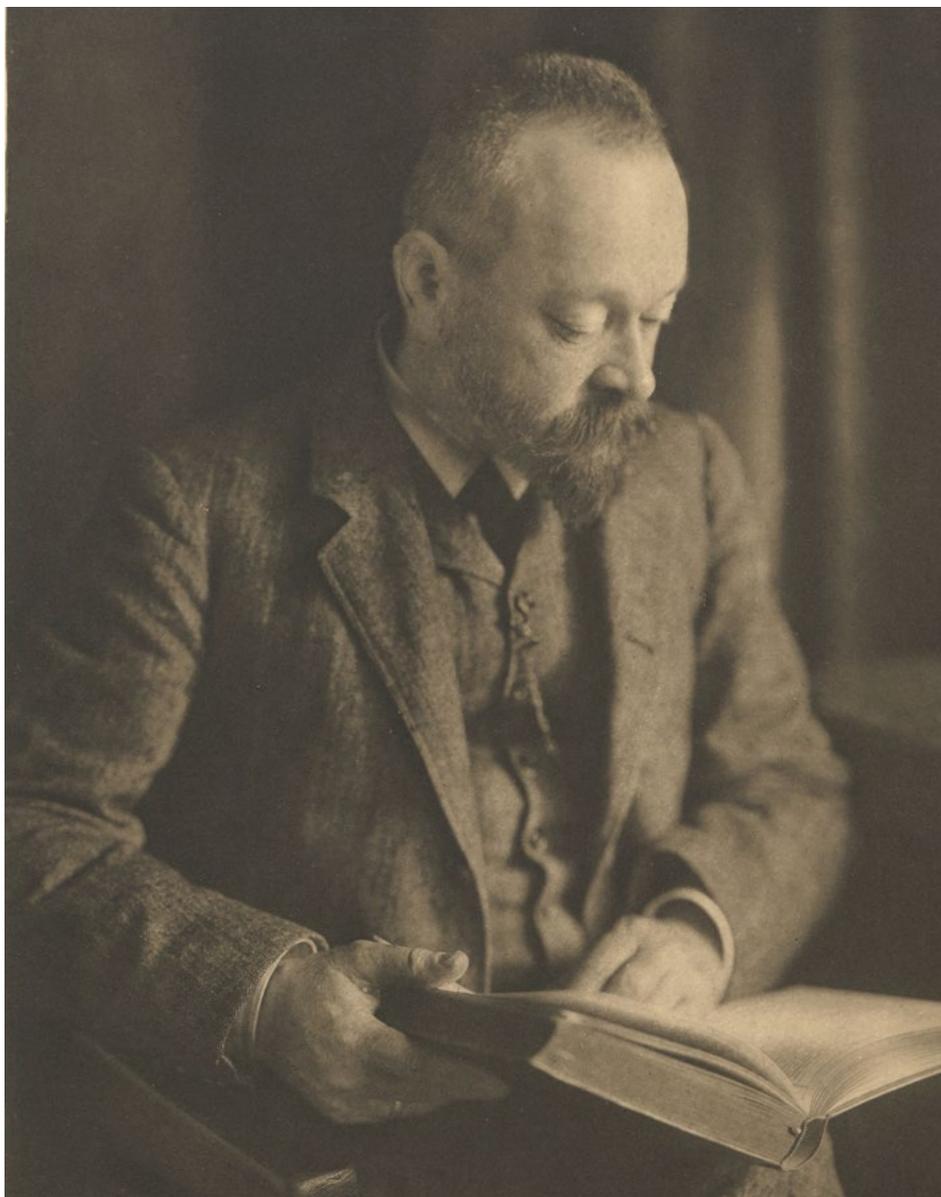
<sup>155</sup> Helmholtz dürfte dabei auch den von Edison entwickelten Phonografen im Auge gehabt haben, der im Deutschen Reich 1878 zum Patent angemeldet worden war. Aber auch die elektrische Übertragung von Sprache und Musik mit dem Telefon war damals hochaktuell geworden, wobei Helmholtz mit Werner Siemens den qualifiziertesten Fachmann als Gesprächspartner hatte.

<sup>156</sup> Mendel/Reissmann, *Musikalisches Konversationslexikon*, Bd. VI, 1876, S. 164.

<sup>157</sup> Lommel, *Menzel*, 1993, S. 19f. u. 74.

<sup>158</sup> Dieterle, *Martha Fontane*, 2006, S. 123–133 und 153f.

<sup>159</sup> Bollé, *Marshall*, 2002, S. 14 und 28f. Das damalige Gebäude der Musikhochschule befand sich an der Ecke von Potsdamer und heutiger Lützowstraße.



17 Otto Krigar-Menzel (1861–1929).

Dass Krigar-Menzel nicht nur ein guter Pianist war, sondern – wie es die Thematik seiner Dissertation nahelegt – auch Geige spielte, wird in einem Brief von Adolph Menzel angedeutet, als er darauf gespannt war, was ihm der damals zehnjährige »liebe Bengel vorgeigen« würde.<sup>160</sup>

Während er mit den Instrumenten von Helmholtz und der Unterstützung von Lummer die messtechnischen Arbeiten für seine Doktorarbeit am physikalischen Institut durchführte, hatte Krigar-Menzel wahrscheinlich auch schon die Gespräche und Vorarbeiten für die Gravitationsmessungen verfolgen können. Als er sich dann 1888, frisch promoviert und von König und Richarz überredet, auf die vielversprechende Herausforderung des Gravitationsmessungsprojekts einließ, waren diese noch voll mit den vorbereitenden Arbeiten in der Zitadelle beschäftigt und die Aufnahme der eigentlichen Messungen war nicht absehbar. Nachdem sich Richarz dann nach Bonn verabschiedet und König seine Mitarbeit aufgekündigt hatte, sollte Krigar-Menzel bei allen weiteren Maßnahmen zwar nicht als Alleinverantwortlicher, aber doch als der die Wägungen praktisch ausführende und kontrollierende Praktiker, wie auch als unmittelbarer Ansprechpartner in Berlin und Spandau die Hauptlast tragen.

### Der Antrag an die königlich preußische Akademie der Wissenschaften

Am 16. Dezember 1884, eineinhalb Jahre nachdem Helmholtz sein Votum über die Aufgaben des neu zu gründenden Reichsinstituts für »die experimentelle Förderung der exacten Naturforschung und der Präcisionstechnik« verfasst hatte, richteten der damals 28jährige »Dr. Arthur König, Privatdozent a. d. Universität, Assistent am Physikalischen Institut« und der 24jährige Dr. Franz Richarz, ohne Angabe einer akademischen Position, an die »physikalisch-mathematische Classe« der preußischen Akademie der Wissenschaften das Ersuchen, »ihnen zur Ausführung der von denselben erdachten Methode zur Bestimmung der mittleren Erdichte in dem laufenden Etatjahre die Summe von M. 6000 und in dem Etatjahre 1885/86 die weitere Summe von M. 4000 gütigst bewilligen zu wollen«. Die Besonderheit ihrer »Methode« bestand in der Verwendung der gigantischen Masse von 100 000 kg Blei, die für die Dauer der Versuche vom »kgl. preuß. allgemeinen Kriegsdepartement« zur Verfügung gestellt werden würde. Von den beantragten Mitteln sollten M 1500 zum Bau einer Waage, M 200 zur Anfertigung von Gewichten und M 1300 zur Konstruktion und Installation einer »automatischen Vertauschungsrichtung« verwendet werden, wobei dies alles der Akademie als Eigentum verbleiben würde. Der größere Teil der Mittel würde für die Herstellung einer »von der normalen abweichenden Gußform« für das Blei, die erforderlichen

160 Keisch/Riemann-Reyher, *Menzel Briefe*, 2009, S. 685.

Transporte und die Errichtung eines gemauerten Fundaments sowie die Einrichtung eines passenden Beobachtungslokals »entweder in den Festungswerken von Spandau oder im hiesigen Normal-Aichungsamt« benötigt.<sup>161</sup> Der Antrag war offensichtlich sorgfältig vorbereitet. Auch wenn es nirgends explizit erwähnt wird, darf man davon ausgehen, dass Helmholtz zuvor seine politischen und wissenschaftlichen Verbindungen genutzt hatte, um die Unterstützung des Kriegsdepartements und auch der NAC für das aufwändige Projekt sicherzustellen.

Um das Vorhandensein der großen Mengen Bleis in der Geschützgießerei und deren technische Fähigkeiten zu dessen Verarbeitung nachvollziehen zu können, muss daran erinnert werden, dass die Armeen seit den 1860er Jahren mit den neuen Hinterladergeschützen mit gezogenem Rohr ausgerüstet wurden. Die dabei verwendeten, in pulvergefüllten Kartuschen sitzenden, lang geformten Geschosse – im Gegensatz zu den bisherigen »Kanonenkugeln« – wurden mit dem weicheren Blei ummantelt. Nur so konnte ihnen der vom gezogenen Rohr hervorgerufene Drall vermittelt werden, der den Flug stabilisierte (sog. »Bleiheimggranaten«). Blei wurde auch zur Herstellung der Kügelchen verwendet, mit denen die nun ebenfalls aufkommenden über dem Ziel explodierenden »Schrappnellgranaten« gefüllt waren.<sup>162</sup> Der Sieg über Frankreich wurde und wird wesentlich der Überlegenheit der neuen preußischen Geschütze zugeschrieben, die mit wachsendem Aufwand und staatlicher Kontrolle ständig weiterentwickelt wurden.<sup>163</sup> Man muss nicht die Materialschlachten des Ersten Weltkriegs als bereits in Planung befindlich sehen, um zu verstehen, dass in den nun mehrfach erweiterten Granatenfabriken die Lagerung großer Mengen Bleis für erforderlich gehalten wurde.

Als die Akademieklasse zwei Tage nach dem förmlichen Ersuchen von König und Richarz, am 18. Dezember, unter dem Vorsitz von du Bois-Reymond tagte, legte ihr Helmholtz im Anschluss an seinen Vortrag über die »Principien der Statik monocyclischer Systeme« eine Projektbeschreibung vor, die nun allerdings mit dem Titel »Eine neue Methode zur Bestimmung der Gravitationsconstante« überschrieben war und nicht, wie es der Antragstext nahegelegt hätte, »zur Bestimmung der mittleren Erddichte«.<sup>164</sup> Bei der Akademieklasse scheint dies damals wenig Beachtung gefunden zu haben, denn König und Richarz fügten gleich in den ersten Satz ihres Texts die relativierende Formulierung ein »Bestimmung der Gravitationsconstante, resp. der mittleren Erddichte«. Der aus heutiger Sicht widersprüchliche Umgang mit den beiden Konstanten sollte während des gesamten

161 »DDR. König u. Richarz, Unterstützung f. Ausfühg. d. u. Bestimmung der Erddichte.«, Wissenschaftliche Unternehmungen der phys.-math. Klasse 1884–1910. II–VII, 111. BBAW Archiv. König/Richarz, *Neue Methode*, 1884. König/Richarz, *Neue Methode, Annalen*, 1885.

162 <https://de.wikipedia.org/wiki/Bleiheimggranate> (15.6.2018);  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Zug\\_\(Waffe\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Zug_(Waffe)) (15.6.2018).

163 Ortenburg, *Geschützgießerei*, 1998, S. 78–83.

164 Der Vortrag über die »monocyclischen Systeme« ist publiziert in: Helmholtz, *Principien*, 1884.

Projekts immer wieder erkennbar werden. Die Akademieklasse stimmte dem Antrag zu, reichte ihn an das zuständige Ministerium zur Zuteilung der beantragten Mittel weiter und publizierte die Projektbeschreibung als »Mittheilung« in ihren Berichten.<sup>165</sup>

Die erhoffte Überlegenheit ihrer »neuen Methode« begründeten König und Richarz mit den Mängeln des Pendels und der Torsionswaage, die bei den »älteren Versuchen« die Genauigkeit der Ergebnisse eingeschränkt hätten. Wie Wilsing, mit dem sie offensichtlich im informellen Kontakt standen während er in den gleichen Wochen seinen Projektantrag für die Akademie vorbereitete, erklärten auch sie, dass sich bei den klassischen Pendelmessungen die durch die Nähe eines Berges verursachte Ablenkung von der Lotrichtung zwar mit großer Sicherheit bestimmen ließe, dass sich jedoch »die Masse des Berges und insbesondere die Massenverteilung in seinem Inneren« der genauen Berechnung entziehe. Dagegen habe bei allen Versuchen mit der Torsionswaage das entscheidende Problem darin bestanden, dass eine »wirkliche Ruhelage« des horizontal schwingenden »Pendels« nie genau zu bestimmen gewesen sei. Von beiden »Übelständen« seien die Verfahren mit der Balkenwaage gänzlich frei. Mit dieser Begründung für ihre geplante Verwendung einer Balkenwaage stützten sie sich auf die Berichte von Jolly und die vorläufige Veröffentlichung von Poynting. Nur sechs Tage nachdem Helmholtz das Projekt der Akademieklasse präsentiert hatte, starb Jolly in München, so dass sein sicherlich hilfreicher Rat nicht mehr eingeholt werden konnte.

Bei ihrem Verfahren, so erklärten König und Richarz, würden nicht nur die »wesentlichen Fehlerquellen« von Jollys Messung eliminiert, sondern es käme auch »die vierfache Attraction der benutzten Bleimasse« zur Geltung.<sup>166</sup> Wie dieser und auch Poynting gingen sie von der prinzipiellen Annahme aus, dass von den Methoden zur Bestimmung der mittleren Dichtigkeit der Erde nur diejenigen als zuverlässig gelten könnten, »bei welchen die Attractionswirkung nicht eines Theiles der Erde selbst, sondern eines der Gestalt und Masse nach genau bekannten Körpers zur Messung kommt«.<sup>167</sup> Nachdem Jolly darauf hingewiesen hatte, dass sich die Genauigkeit der Messung mit der Vergrößerung dieses »genau bekannten Körpers« erhöhen ließe, sahen sie die zwanzigfache Masse seiner Bleikugel vor. Auch mit der Verwendung einer Waage mit jeweils zwei im größeren Abstand übereinander aufgehängten Waagschalen folgten sie seinem Vorbild.

<sup>165</sup> Helmholtz, *Principien*, 1884. König/Richarz, *Neue Methode*, 1884. Rothleitner und Schlamminger vermuten offensichtlich zu Recht, dass hier die Bezeichnung »Gravitationskonstante« erstmals benutzt wurde. Rothleitner/Schlamminger, *Schwere Experimente*, 2015.

<sup>166</sup> König/Richarz, *Neue Methode*, 1884. König/Richarz, *Neue Methode, Annalen*, 1885. Verwiesen wird auf: Poynting, *Method*, 1878 und Jolly, *Anwendung*, 1878.

<sup>167</sup> Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 3. Im zitierten ersten Satz des Berichts wird lediglich die »mittlere Dichtigkeit der Erde«, jedoch nicht die »Gravitationskonstante« erwähnt!

Neben der Größe der Bleimasse sollte der zweite entscheidende Unterschied in deren besonderer Anordnung gegenüber der Waage bestehen. Hatte Jolly seine Bleikugel in geringem Abstand unter den unteren Waagschalen platziert, wobei ihre Gravitationswirkung auf die oberen Schalen vernachlässigbar gering geblieben war, so sollten bei ihrer Anordnung die beiden oberen Schalen möglichst nah über der oberen Fläche und die unteren im entsprechenden Abstand unter der unteren Fläche der in die Form eines Würfels gebrachten Bleimasse hängen. Dann würde die von dieser ausgehende Anziehungskraft die Gewichte auf den oberen Schalen mit messbarer Stärke nach unten und die auf den unteren platzierten nach oben ziehen. Dafür müsse der »Bleiklotz« – so die Bezeichnung des Würfels in allen Berichten – unter jeder der Aufhängungen am Waagbalken »vertical durchlocht« werden, so dass die beiden »Stangen« oder Drähte, mit denen die unteren Waagschalen mit den oberen verbunden waren, hindurchgeführt werden konnten.

Die geringen Abstände der Waagschalen von den oberen und unteren Außenflächen des Bleiklotzes würden es auch ermöglichen, »die Vertauschung der Gewichtstücke innerhalb eines geschlossenen Kastens mittels einer automatischen Vorrichtung auszuführen, wodurch Temperaturunterschiede und Luftströmungen fast völlig vermieden« werden könnten. Es stünde also »mit Gewissheit eine erheblich größere Genauigkeit« der Ergebnisse als bei Jolly zu erwarten.<sup>168</sup> So setzte ihr Konzept auch auf die Effizienz eines sehr komplexen Gesamtmechanismus, in dem die hochempfindliche Waage mit der erwähnten »automatischen Vorrichtung« zur Ausführung der für den Wägungsprozess erforderlichen Manipulationen zusammenspielen sollte. Dessen Realisierbarkeit hatten sie zuvor mit dem Mechaniker und Unternehmer Paul Stückrath (1844–1916) besprochen, der eine geeignete Konstruktion durchdacht und für die Antragstellung an die Akademie die entstehenden Kosten kalkuliert hatte.

Zwei Monate nach der Entscheidung der Akademieklasse konnten König und Richarz bereits mitteilen, dass Stückrath inzwischen mit der Herstellung der Waage begonnen hatte. Er habe auch in Aussicht gestellt, dass sie »erheblich« empfindlicher sein würde als die von Jolly verwendete.<sup>169</sup>

<sup>168</sup> König/Richarz, *Neue Methode*, 1884.

<sup>169</sup> König/Richarz, *Neue Methode, Annalen*, 1885.

### Paul Stückrath, Mechaniker in Friedenau. Aktuelle Waagentechnologie

Obwohl er als der bedeutendste Berliner Waagenkonstrukteur im 19. Jahrhundert bezeichnet wurde,<sup>170</sup> ist über die Lebensgeschichte von Paul Stückrath wenig bekannt. Im Berliner Adressbuch von 1885 findet sich der Eintrag »Stückrath, P., Mechanik, Inh. e. Werkstatt für physikal. Apparate, Spez.: Präcis. Waagen, Gewichte und Luftpumpen. Berlin SW, Johanniterstr. 8«. Dies war nicht allzu weit entfernt vom Enckeplatz mit der Neuen Sternwarte, die am damaligen Südrand des als Friedrichstadt bezeichneten Stadtteils noch vom preußischen Staatsbaumeister Karl Friedrich Schinkel (1781–1841) erbaut und seit 1835 genutzt worden war. Inzwischen hatte ihr seit 1865 amtierender Direktor Foerster dort auch die von ihm ebenfalls geleitete NAC untergebracht.

Vor der Gründung der eigenen Werkstatt hatte Stückrath in der »Telegraphen-Bauanstalt« von Siemens & Halske gearbeitet, wo der Mechaniker Johann Georg Halske (1814–1890) als Compagnon von Werner Siemens bis 1867 die industrielle Serienfertigung der sowohl mechanisch als auch elektromagnetisch höchst anspruchsvollen Apparate für die elektrische Telegrafie geleitet hatte. Danach war er auch noch Mitarbeiter bei »Reimann« gewesen – offenbar dem im Berliner Adressbuch von 1870 erwähnten »L. Reimann, Mechaniker, Fabrikant chemischer Apparate, Waagen und Gewichte, Köpenickerstr. 109a II. 8–11. 2–5.«.<sup>171</sup> Als nach der Errichtung der Institute auf dem Telegrafenberg bei Potsdam auch die neuen Gebäudekomplexe der Technischen Hochschule und der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt nicht mehr in Berlin, sondern in Charlottenburg angesiedelt wurden, folgte Stückrath diesem Trend in die nun schnell expandierenden westlichen Vororte Berlins. Möglicherweise gab das Gravitationsmessungsprojekt an Helmholtz' Universitätsinstitut den letzten Anstoß dafür, dass er 1887 eine neue »Werkstatt für physikalische Präzisions-Instrumente« in der Friedenauer Albestraße 11 einrichtete. Zu seinen Kunden zählten nicht nur wissenschaftliche Institute, sondern auch Industriebetriebe und Bankhäuser.<sup>172</sup>

Ausschlaggebend für die Wahl der neuen Adresse dürfte die günstige verkehrstechnische Lage gewesen sein. Sie war für die erforderliche enge Zusammenarbeit mit den Wissenschaftlern entscheidend, wenn diese ihre Ansprüche und Überlegungen in die Konstruktion neuartiger Instrumente umsetzen wollten. Der nach englischem Vorbild geplante Villenvorort Friedenau, dessen Name an den in Berlin so bejubelten Friedenschluss in Paris erinnern sollte, verfügte seit 1874 über eine Station an der Bahnlinie zwischen Berlin und Potsdam, während eine Pferdestraßenbahn nach Charlottenburg offenbar erst 1890 eingerichtet wurde. Dort soll-

170 Dieses Urteil beruht auf der Einschätzung von Robens/Jawaweera/Kiefer, *Balances*, 2014, S. 609.

171 In: Robens/Jawaweera/Kiefer, *Balances*, 2014, S. 608, wird eine »Werkstatt für Präzisionswaagen« von Georg Reimann erwähnt.

172 Vgl.: <http://de.wikipedia.org/wiki/Berlin-Friedenau> (3.9.2018).

te zur Jahrhundertwende schließlich auch die NAC auf dem Gelände der PTR einen Neubau beziehen. Nachdem dann 1913 auch noch die Sternwarte in den Schlosspark Babelsberg bei Potsdam umgezogen war, mussten die Gebäude am Enckeplatz einer neuen Bebauung weichen.

Stückerath hatte seinen Umzug nach Friedenau und den Aufbau der Waage in der Spandauer Zitadelle in den gleichen Monaten und Jahren zu bewältigen, in denen Helmholtz in Charlottenburg materiell und personell die Laboratorien und Werkstätten der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt einrichtete – wobei er auch Stückerath immer im Blickfeld hatte. Neben der »wissenschaftlichen Abteilung«, deren Aufgaben Helmholtz in seinem zitierten Votum umrissen hatte, gehörte zu dieser neuartigen Institution auch die mit einem »Feinmechaniklaboratorium« ausgestattete »technische Abteilung«. Sie hatte den Auftrag, neben der Präzisionsmechanik »soviel thunlich, auch andere Zweige der deutschen Technik in ihren Arbeiten zu fördern«. Wenn Stückerath zeitweilig sicherlich täglich über Charlottenburg nach Spandau zur Zitadelle fuhr, konnte er neben dem Aufbau der einzelnen Gebäude der Reichsanstalt auch den des großen Hauptgebäudes der Technischen Hochschule mit ihren neuen Instituten verfolgen. Zur gleichen Zeit entstanden in seiner Friedenauer Nachbarschaft weitere Unternehmen der Feinmechanik und Optik. Dazu zählten die seit 1886 in der Rheinstraße 45/46 aufgebaute Optische Anstalt C.P. Goerz und die 1888 in der damaligen Kaiserallee und heutigen Bundesallee 39 errichteten »Werkstätten für Präzisions-Mechanik und Optik« von Carl Bamberg (1847–1892). Im Gegensatz zu Stückeraths Werkstatt sollten sie schon bald die im Rahmen der Aufrüstungsmaßnahmen geforderten Serien- und Massenproduktionen aufnehmen.<sup>173</sup>

König und Richarz hatten mit Stückerath zweifellos einen höchst qualifizierten, aber auch viel beschäftigten Fachmann gefunden. Er war nicht nur in der Lage, die an die Waage und deren »automatische« Bedienung gestellten Anforderungen zu verstehen und dafür technisch ausführbare Lösungen zu finden. Es scheint ihm auch gelungen zu sein, die unvermeidlichen Meinungsverschiedenheiten mit den ihm gegenüber sicherlich nicht immer geduldigen akademischen Jungwissenschaftlern einerseits und den nicht weniger selbstbewussten militärischen Dienstgrößen aus der Zitadelle und der Geschützgießerei andererseits nicht zu Konflikten ausarten zu lassen, an denen das Projekt gescheitert wäre.

Einiges über Stückeraths Aktivitäten ist aus der als »Organ für Mittheilungen aus dem gesamten Gebiete der wissenschaftlichen Technik« 1881 gegründeten »Zeitschrift für Instrumentenkunde« zu erfahren, deren Herausgeber selbstbewusst und

<sup>173</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Berlin-Friedenau> (23.7.2018). Vgl. zu Bamberg und den späteren Fusionierungen zu Askania: Zaun, *Instrumente*, 2002, S. 118–127.

von ihrer Mission überzeugt erklärten, »dass selten im Gebiete der wissenschaftlichen Publicistik ein Bedürfnis so allgemein empfunden worden ist, wie dasjenige nach einem Organ, welches ausschliesslich der Wiederbelebung eines engeren fruchtbringenden Verkehrs zwischen den Vertretern der Wissenschaft und denen der mechanischen Kunst, sowie der Kritik der Instrumente und der Messungsmethoden gewidmet ist«. <sup>174</sup>

In den dort regelmäßig abgedruckten Vereinsnachrichten der im gleichen Jahr 1881 gegründeten »Deutschen Gesellschaft für Mechanik und Optik« (DGMO) wird der offensichtlich sehr aktive Stückrath immer wieder erwähnt. So führte er 1881 in einem der Treffen der Gesellschaft eine »automatische Registrirwage für graphische Darstellung abnehmenden Gewichtes« vor, die er für eine Stearinfabrik zur Erfassung des Materialverbrauchs einer brennenden Kerze entwickelt hatte. <sup>175</sup> Man erfährt, dass er sich dem Aufbau einer Bibliothek für die Gesellschaft widmete, und auch, dass er seit 1887 jährlich in den Vorstand gewählt wurde, zum Teil als erster Vorsitzender. Nachdem die Zeitschrift seit 1888 auch »unter Mitwirkung der zweiten (technischen) Abteilung der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt« herausgegeben wurde, erfuhren die Leser, dass Stückrath zusammen mit einem weiteren Vorstandsmitglied im Namen der Gesellschaft Helmholtz zu dessen 70. Geburtstag einen Farbenmischapparat überreicht hatte. <sup>176</sup>

Die Anforderungen, die das Gravitationsmessungsprojekt mit dem Bau einer Waage mit mechanisierter Bedienung stellte, entsprachen dem damaligen Stand der Technik der Präzisionswaagen. Bemühungen um die Vergrößerung und Konstanz der Empfindlichkeit des Mechanismus, wie auch der Perfektionierung des Wägeprozesses gab es an vielen Stellen und in der Zeit der internationalen technischen Ausstellungen, über die qualifizierte Fachleute ausführliche Berichte publizierten, waren die Informationen dazu den Interessierten leicht zugänglich. Für die Einbeziehung von Stückrath in die Planung und Durchführung dieses akademischen Projekts dürfte die Empfehlung durch Foerster entscheidend gewesen sein, der ihn schon Jahre früher schätzen gelernt hatte. Darauf soll hier kurz eingegangen werden.

In seiner Funktion als Direktor der NAC und zusätzlich motiviert durch die Besprechungen der »Commission Internationale du Mètre« in Paris, an denen er seit April 1872 teilnahm, hatte Foerster noch im gleichen Jahr den Hamburger Mechaniker Paul Bunge (1839–1888) mit der Konstruktion einer neuartigen Waage beauftragt gehabt. Sie sollte es ermöglichen, unbekannte, »von den Massenorma-

<sup>174</sup> »An unsere Leser«. In: Zeitschrift für Instrumentenkunde, 1 (1881), S. 1.

<sup>175</sup> Vereinsnachrichten Deutsche Gesellschaft für Mechanik und Optik, Sitzung 18. Okt. 1881, Zeitschrift für Instrumentenkunde 1 (1881), S. 374. Zwei Jahre später die genaue Beschreibung dieser Waage in: Stückrath, *Waage*, 1883, S. 95–99.

<sup>176</sup> Sitzung der Deutschen Gesellschaft für Mechanik und Optik vom 3. November 1891, Zeitschrift für Instrumentenkunde 12 (1892), S. 32.

len abweichende Massen« im Vakuum mittels »Transpositionswägungen« zu bestimmen.<sup>177</sup> Bei diesem auf Lavoisier und Gauß zurückgehenden und auch als »Gaußsche Doppelwägungen« bezeichneten Verfahren wird jede einzelne Wägung nach Vertauschung der beiden Waagschalen mit gleicher Last wiederholt, so dass sich die immer bestehenden minimalen Abstandsdifferenzen der beiden Hälften des Waagbalkens eliminierten.<sup>178</sup> Während bei den gängigen Vakuumwaagen das Vakuum nach dem Austausch der Lasten erneuert werden musste und die Wiederherstellung des ursprünglichen Zustands nur begrenzt gewährleistet war, sollte der Austausch bei der von Foerster geforderten Konstruktion innerhalb des Vakuums möglich sein, ohne dieses zu beeinträchtigen.

Bunge hatte diese höchst anspruchsvolle Aufgabe gelöst, indem er die Waage mitsamt den Waagschalen in einem abgedichteten Kessel so installierte, dass der Austausch mit einem Gestänge über einen Mechanismus von außen und ohne Veränderung des Vakuums vorgenommen werden konnte. Nachdem er 1876 ein erstes Exemplar an die NAC in Berlin ausgeliefert hatte, das in dessen neu errichtetem metronomischen Institut erprobt werden konnte, folgte 1879 ein zweites, verbessertes für das BIPM in Sèvres. Die, wie Quinn mitteilt, schwer zu bedienende Waage sollte dort zwar selten, jedoch bis 1951 benutzt und seither als Museumsstück aufbewahrt werden.<sup>179</sup> Den Auftrag zur Anfertigung eines weiteren Exemplars dieses Waagentyps zur Verwendung im metronomischen Institut der NAC erteilte Foerster dann an Stückrath. Damit stand auch in Berlin ein Mechaniker zur Verfügung, der diese anspruchsvolle Waagentechnologie so beherrschte, dass er die dort immer zahlreicher werdenden wissenschaftlichen Institute beliefern und die in der Folgezeit unverzichtbaren Wartungsarbeiten ausführen konnte. Stückrath erdachte auch gleich einige Verbesserungen und bemühte sich auf der Berliner Gewerbeausstellung im Jahr 1879 mit Konstruktionszeichnungen um entsprechende Aufträge.<sup>180</sup>

So war Stückrath mit der Konstruktion Bunes und deren praktischer Anwendung längst vertraut, als 1883/84 am Universitätsinstitut das Nachdenken über ein Projekt zur messtechnischen Ermittlung der Gravitationskonstante mit einer Waage konkretere Form annahm. Er dürfte König und Richarz von der Realisierbarkeit einer »automatischen Vertauschungsvorrichtung« überzeugt haben, mit der eine nach dem Vorbild von Jolly mit vier Waagschalen ausgestatte und mit der vorgesehenen Bleimasse arrangierte Waage bedient werden konnte. Zwar konnte

177 Jenemann/Basedow/Robens, *Makro-Vakuumwaage*, 1992, S. 22–26. Loewenherz, *Wagen im luft-abgeschlossenen Raum*, 1878, S. 227.

178 Vgl. Scheel, *Metronomie*, 1911, S. 96–101.

179 Quinn, *From Artefacts to atoms*, 2012, S. 117–120.

180 Jenemann/Basedow/Robens, *Makro-Vakuumwaage*, 1992, S. 22–26. Die Gesamtansicht der für die Kaiserliche Normal-Eichungscommission gelieferten Waage zeigt die Abbildung in einer späteren Darstellung aus dem Jahre 1899, als solche Vakuumwaagen aber bereits nicht mehr aktuell waren.

sie wegen der in großem Abstand übereinander hängenden Waagschalen nicht wie die Bunge-Waagen vollständig in einem evakuierbaren Kessel untergebracht werden, jedoch würde man diese Situation mit einem »geschlossenen Kasten« aus Zinkblech, der einige unverzichtbare kleine Öffnungen aufwies, immerhin nähern können. Dass die Empfindlichkeit der Waage nicht nur »beträchtlich größer« gemacht werden könne »als bei sonstigen Waagen« und auch jene der von Jolly verwendeten »erheblich« übertreffen werde, begründete Stückrath damit, dass sie für die gestellte Aufgabe »nur bei einer bestimmten Belastung stabiles Gleichgewicht zu haben« brauche.<sup>181</sup>

Naturgemäß bedeutete die Umsetzung des vorgesehenen Verlaufs der Wägungen in eine technische Anordnung auch die Festschreibung des zum Zeitpunkt der Antragstellung bestehenden Konstruktionsplans von Waage und Bedienungsmechanismus. Danach musste dieser sich jeder Veränderung entgegenstellen, die im Verlauf der Wägungen als erforderlich erkannt werden sollte. Zwölf Jahre später sollten Richarz und Krigar-Menzel in ihrem Abschlussbericht dann auch hervorheben, dass der Genauigkeit ihrer Wägungen durch »Mängel in der Construction der Waage« eine »Grenze gesteckt« gewesen sei – wobei sie aber auch gleich hinzufügten, dass die Waage »nach Maassgabe der zu Beginn unserer Versuche vorliegenden Erfahrungen vortrefflich gebaut« gewesen sei.<sup>182</sup>

Da Stückrath auf Veranlassung von Foerster auch immer wieder zu Arbeiten an den Waagen in Sèvres herangezogen wurde, war er über die dort bestehenden Erfahrungen und Qualitätsanforderungen gut informiert. Im Jahr 1900 sollte er eine leicht veränderte Vakuumwaage auf der Weltausstellung in Paris präsentieren, die er während der Wägungen in Spandau entwickelt und schon 1894 fertiggestellt gehabt hatte.<sup>183</sup> Er entwickelte sowohl für die PTR als auch für die Potsdamer Institute Waagen und andere Präzisionsinstrumente, wobei die anerkennende Erwähnung seines Namens in deren Berichten seinen Ruf weiter verbreitete. So beschrieb Helmerds damaliger Mitarbeiter Oskar Hecker (1864–1938) 1899 einen von Stückrath entwickelten Horizontalpendel-Apparat mit »photographischer Registrierung«, der in zwei Exemplaren an das Institut ausgeliefert worden war.<sup>184</sup> Nach Stückraths Tod 1916 übernahm sein Compagnon Lambert Lind die Werkstatt mit 20 Angestellten. Der ihm 1928 folgende Lambert Lind Jr. sollte sie bis zu seinem Tod 1957 weiterführen. Offenbar fand sich im damaligen Westberlin kein Nachfolger mehr und sie wurde 1963 geschlossen.<sup>185</sup>

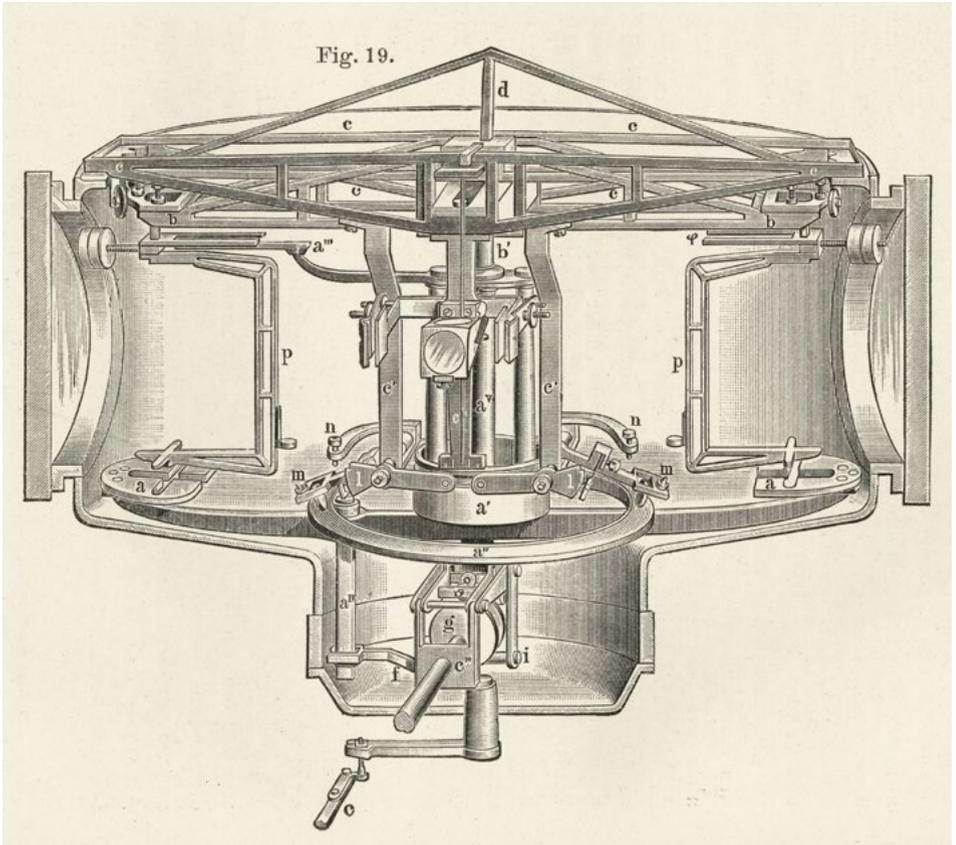
181 König/Richarz, *Neue Methode*, 1884/1885.

182 Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante*, 1898, S. 193.

183 Jenemann/Basedow/Robens, *Makro-Vakuumwaage*, 1992, S. 26.

184 Hecker, *Horizontal-Pendel-Apparate*, 1899.

185 Ebling/Weissberg, *Friedenau erzählt*, 2007, S. 150f. und 179. Robens/Jayaweera/Kiefer, *Balances*, 2014, S. 609. Über Lambert Lind ist über Google lediglich zu erfahren, dass er ein Boot im Potsdamer Yachtclub hatte und dass dieser angesehene Club bis heute einen nach ihm benannten Preis vergibt.



18 Ansicht des Vakuumkessels mit der darin untergebrachten Waage von Paul Bunge. Erkennbar ist der Anschlussmechanismus für die externe Bedienung.

### »Gravitationskonstante« oder »mittlere Erddichte«? Metronomisches Institut oder Spandauer Zitadelle?

Man darf davon ausgehen, dass die überraschende Wahl des Titels »Eine neue Methode zur Bestimmung der Gravitationskonstante« für die Projektbeschreibung, die Helmholtz der Akademieklasse vorlegte, nicht zufällig erfolgte. Das genaue Motiv kann jedoch nur vermutet werden.

Zunächst liegt nahe, dass es sich dabei um eine aus pragmatischen Gründen getroffene Maßnahme handelte. Nur einen Monat nach dem Auftritt von Helmholtz bekam die Akademieklasse von Auwers die Beschreibung des Projekts von Wilsing vorgelegt, als dessen Ziel die »Bestimmung der mittleren Dichtigkeit der Erde« genannt wurde. So steht zu vermuten, dass sich Helmholtz und Auwers mit du Bois-Reymond darauf geeinigt hatten, die beiden Texte mit unterschiedlichen Überschriften zu versehen, bevor sie ihre Befürwortungen zweier offenbar das gleiche Ziel verfolgender Projekte zur Bewilligung der beantragten Mittel an die Ministerialbürokratie weitergaben. Dafür könnte auch sprechen, dass König und Richarz die Zustimmung zum Antrag von Wilsing abwarteten, bevor sie ihre ausführlichere Projektbeschreibung unter Beibehaltung des gewählten Titels im Februar 1885 zur Veröffentlichung bei den *Annalen* einreichten. So konnten sie auch noch einen Hinweis auf den gedruckten Akademiebericht über Wilsings Projekt anhängen und ihrer Hoffnung Ausdruck geben, »dass unsere beiden auf so verschiedenen Methoden beruhenden Bestimmungen zu demselben Werth für die gesuchte Constante führen mögen« – allerdings ohne Hinweis darauf, ob damit die »mittlere Erddichte« oder die »Gravitationskonstante« gemeint war.<sup>186</sup>

Dies schließt nicht aus, dass Helmholtz besonders hervorheben wollte, dass das Newtonsche Gesetz nicht nur für den Erdball, sondern für alle Massen und insbesondere für die Planeten und Sterne gilt – wie er schon im zitierten Votum angesprochen hatte. Dafür war dann auch eindeutig die dort enthaltene Proportionalkonstante entscheidend. Ihr aus den angestrebten genauesten Wägungsergebnissen errechneter Wert musste in »absoluten« Maßeinheiten angegeben werden, wobei diese wiederum auf den gerade erst international vereinbarten Referenzstandards für Meter und Kilogramm beruhen sollten. Damit würde dieser Proportionalkonstante jedoch die neuartige Bedeutung einer wertmäßig international anerkannten »Naturkonstante« zukommen, der auch die bisher spontan benutzte und unmittelbar einleuchtende Bezeichnung »Gravitationskonstante« fest zugeordnet werden könnte. Sie müsste dann allerdings auch, ähnlich wie die materiellen Maßverkörperungen im BIPM, international gepflegt und aufgrund der fortschreitenden naturwissenschaftlich-technischen Erkenntnisse immer wieder aktualisiert werden. Auch wenn ich keinen unmittelbaren Beleg dafür gefunden habe, dass Helmholtz

<sup>186</sup> König/Richarz, *Neue Methode, Annalen*, 1885. Vgl. zum früheren und aktuellen Umgang mit diesem Gegensatz: Gonzalez, *Anachronism*, 2001.

Sinn und Möglichkeiten einer derartigen Festlegung der Proportionalkonstante im Newtonschen Gesetz damals erörtert hat, so scheint mir seine Argumentation in der zitierten Denkschrift vom Sommer 1883 dies doch nahe zu legen. Kaum bezweifelt werden kann, dass er als bewusster Vertreter der Physik im deutschen Kaiserreich bei seinen Aktivitäten die Entscheidungen des international besetzten CIPM und die Arbeiten des BIPM in Sèvres ebenso mit bedachte wie die der NAC in Berlin. Deshalb liegt es zumindest nahe, dass er Projekte wie das zur Gravitationsmessung mit dem für eine internationale Regelung zuständigen Foerster und dessen Mitarbeitern besprach und abstimmte – auch wenn dieser persönlich zur Akademie Distanz hielt.<sup>187</sup> Wenn in den Abschlussberichten, die Richarz und Krigar-Menzel dreizehn Jahre später verfassen sollten, nichts auf eine derartige Motivation hinweist, so schließt das nicht aus, dass Helmholtz sie bei der Planung ernsthaft in Betracht gezogen hatte.

Dafür könnte auch sprechen, dass zum Zeitpunkt der Antragstellung die Durchführung der Messungen in einem Raum der Normaleichungskommission ebenso in Betracht gezogen wurde wie die Spandauer Zitadelle.<sup>188</sup> Tatsächlich boten die nur wenige Jahre zuvor in Betrieb genommenen modernen Einrichtungen des als »metronomisches Institut« bezeichneten neuen Gebäudes der NAC am Berliner Enckeplatz sehr konkrete Vorteile.<sup>189</sup> Foerster hatte dafür gesorgt, dass bei dessen Bau »in großem Stile auch mehrere wesentlich vervollkommnete instrumentale und bauliche Einrichtungen für die feinsten Messungen und Wägungen, einschließlich ganz neuer Einrichtungen für Temperaturmessungen und für die Sicherung konstanter Temperaturen getroffen« wurden.<sup>190</sup>

187 Foerster geriet mit seinen Initiativen und Aktivitäten mehrmals in Konflikt mit der Akademie. Er war sich der Bedeutung seiner Unabhängigkeit von dieser Institution wohl bewusst und lehnte es ab, Mitglied zu werden. Vgl. sein Schreiben an Werner Siemens vom Januar 1883 in: Foerster, *Lebenserinnerungen*, 1911, S. 170–173.

188 1888, kurz nach der Gründung der PTR sollte August Kurz, Physikprofessor an der Augsburger königlichen Industrieschule, in einer Fußnote erklären, dass »diese Constanten-Bestimmung auch eine Aufgabe des neugegründeten physikalischen Reichsinstitutes«, also der von Helmholtz geleiteten Physikalisch Technischen Reichsanstalt, ausmachen würde, wobei er sich auf die »Mittheilung durch die Zeitungen« bezog. In einem im gleichen Jahr 1888 verfassten Bericht für die bayerischen Realschullehrer erwähnte er, dass auch er die von Poisson als »coefficient de l'attraction universelle« und von Jolly als »der Zug eines Punktes in der Entfernungseinheit« bezeichnete Konstante in Newtons Gesetz nun ebenfalls als »Gravitations-Constante« bezeichnen würde. Kurz, *Schwerkraft*, 1888, S. 30f. Kurz teilt dort mit: »Jolly fusst auf Poisson, dessen *Traité de Mécanique* T. I S. 492 er citirt; der betreffende § 255 schließt mit S. 496.«

189 1910 beschrieb Karl Scheel die »Aufgabe der Metronomie genannten Wissenschaft« damit, dass sie »irgendwelche sekundäre Etalons der Längen- und Masseneinheit, auch ältere Einheiten an die ursprünglichen Etalons mit größtmöglicher Genauigkeit anzuschließen«, die »gegenseitigen Abweichungen festzustellen« und die dabei auftretenden »Nebenerscheinungen« zu studieren habe. Scheel, *Metronomie*, 1911, S. 3.

190 Foerster, *Lebenserinnerungen*, 1911, S. 127f.

Zur Einstellung und Aufrechterhaltung der gewünschten Temperatur waren die Umfassungsmauern mit »isolierenden Luftschichten« versehen. Wände und Decken, teilweise auch die Fußböden waren mit »Hohlkörpern von Zinkblech« verkleidet, »in welche Luft eingetrieben wird, welche durch luftdicht verschliessbare Oeffnungen ins Zimmer tritt und durch entsprechende Kanäle aus diesem wieder abgeführt wird«. Dafür wurde von einer in einem Maschinenhaus stehenden »kalorischen Maschine (Patent Lehmann)« eine »kombinierte Wasserlufterheizung« betrieben.<sup>191</sup> Zur Beleuchtung der Messarbeiten war »elektrisches Licht« installiert.<sup>192</sup>

Eine wahrscheinlich noch vor der Inbetriebnahme verfasste Beschreibung aus dem Jahr 1877 zeigt, dass zur erschütterungsfreien Aufstellung der für den Abgleich der Längenmaße vorgesehenen Komparatoren tief im Boden »auf Brunnen« gelagerte besondere »Mauerwerkpfeiler« eingebaut worden waren. In gleicher Weise dürften die erst später verfügbaren neuen Präzisionsvakuumwaagen von Bunge und Stückrath aufgestellt worden sein. Als 1883/4 am Universitätsinstitut das Gravitationsmessungsprojekt geplant wurde, waren sie dort bereits seit Jahren in routinemäßigem Gebrauch.

Als König und Richarz am 23.6.1885 bei der Akademie die Bewilligung der zweiten Rate von M 4000 beantragten, teilten sie auch mit, dass die Messungen nicht im metronomischen Institut, sondern in einer Kasematte der Spandauer Zitadelle durchgeführt werden sollten.<sup>193</sup> Den Ausschlag hatte gegeben, dass damit »ein weiter Transport der großen Bleimasse« vermieden werden konnte.<sup>194</sup> So wurden die beschriebenen Vorteile des von der Universität und der Akademie aus leichter erreichbaren Gebäudes am Enckeplatz durch die Konsequenzen aus der Entscheidung für die Verwendung der gigantischen Bleimasse verdrängt. Als dann der Messungsaufbau in einem für diesen Zweck in keiner Weise vorgesehenen Raum eingerichtet werden musste, konnte zumindest auf die Erfahrungen der Eichkommission mit ihren klimatechnischen Maßnahmen zurückgegriffen werden. Während der folgenden Jahre sollten die sich in dieser Kasematte scheinbar endlos

191 Eine Kalorische Maschine oder Heißluftmaschine nach Lehmann, die 1868 von der Maschinenfabrik J. Arendt in Dessau hergestellt wurde, befindet sich in der Sammlung des Deutschen Museums. Inv.-Nr. 2343.

192 Architekten-Verein Berlin, *Berlin und seine Bauten*, Bd. 1, 1877, S. 175f. Da zu diesem Zeitpunkt die Möglichkeit der elektrischen Beleuchtung mit Glühbirnen wie auch die allgemeine Versorgung mit elektrischem Strom erst noch bevorstanden, dürfte die Beleuchtung mit Kohlebogenlampen erfolgt sein, wobei diese nur während der Messungen eingeschaltet wurden.

193 Wissenschaftliche Unternehmungen der phys.-math. Klasse 1884–1910. Archiv BBAW. II–VII, 111.

194 Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 146f. Richarz/Krigar-Menzel, *Abnahme der Schwere*, 1894, S. 560. Der Transport dürfte auf dem Wasserweg erfolgt sein. Während sowohl die Geschützgießerei als auch die nahe gelegene Zitadelle direkt am Wasser lagen, hätte der Transport zum Eichamt zum etwa 16 km entfernten Enckeplatz auf dem letzten Teil noch auf dem Landweg erfolgen müssen.



19 Sternwarte am Berliner Enckeplatz.

hinziehenden vorbereitenden Arbeiten schonungslos offenlegen, wie sehr König und Richarz, aber auch der mit Jollys Großversuch vertraute Helmholtz, die mit dem Projekt unlösbar verknüpften klimatechnischen Probleme unterschätzt hatten. Drastisch bestätigt werden sollte dagegen Helmholtz' in den Denkschriften von 1883 und 1886 begründete Feststellung, dass die Erfüllung der gestiegenen Anforderungen an Messungen und Experimente eine dauerhafte Anstellung der ausführenden Wissenschaftler unverzichtbar mache. Tatsächlich konnten die Wägungen nur zum erfolgreichen Abschluss gebracht werden, weil Krigar-Menzel beinahe ein Jahrzehnt lang ohne bezahlte Stelle weiterarbeitete – was im akademisch-bildungsbürgerlichen Berliner Milieu als durchaus zumutbar empfunden wurde. Zusammen mit Richarz hatte er darüber hinaus auch noch einen stattlichen Restbetrag aus eigener Tasche zu begleichen, da die »königlich preußische Akademie« nicht bereit war, sich für die Bereitstellung der fehlenden Mittel stark zu machen.

Andererseits erscheint es aus der historischen Distanz aber auch realistisch und weitsichtig, wenn Helmholtz zur Ausweitung der Grenzen der akademischen Forschung nicht nur auf die Unterstützung durch die kaiserliche NAC setzte, sondern auch auf die der preußischen Militäradministration. Deren oberster Befehlshaber war noch immer der preußische König, auch wenn er inzwischen den Titel des Deutschen Kaisers angenommen hatte und als solcher auch oberster Dienstherr der NAC war.<sup>195</sup> Tatsächlich sollte es dann weder die Universität noch die Akademie, sondern die Militäradministration sein, die dem Projekt über den gesamten unvorhergesehenen langen Zeitraum unter drei Kaisern und über den Tod von Helmholtz hinaus einen sicheren Rahmen bot.

### Aufbau des Messplatzes

In der Spandauer Zitadelle entschieden sich König und Richarz für einen Raum in der »Bastion Brandenburg«. Weil diese am weitesten in die Havel hineinragte erschien sie vor den durch die Eisenbahnen, Fahrstraßen und Industriebetrieben der Umgebung verursachten störenden Erschütterungen am besten geschützt. Außerdem untersagte die »Königliche Commandantur« für die Dauer der Messungen die »Abhaltung von artilleristischen Schießübungen auf dem Bastion«. Sie erwarteten auch, dass in den »massiv gewölbten und mit starker Erdaufschüttung« versehenen innersten Bereich der Bastion die »Temperaturschwankungen innerhalb eines Tages« nicht durchdringen würden.

<sup>195</sup> Offensichtlich charakterisiert es die damalige Situation, dass der Name des damaligen preußischen Kriegsministers Paul Bronsart von Schellendorff (1832–1891) als eigentlich zuständiger Vertreter der Reichsregierung in keiner der hier benutzten Quellen erwähnt wird.



20 Zitadelle Spandau (aktueller Zustand). Rechts hinten die Bastion Brandenburg, links der Juliesturm.

Wenn man aus der Kasematte heraustrat, fiel der Blick auf den mittelalterlichen, mit meterdicken Mauern errichteten und gut bewachten Juliierturm auf der gegenüberliegenden Seite der Zitadelle. Dort waren zehn Jahre zuvor jene berühmten 1200 mit Goldmünzen gefüllten Kisten aus den französischen Kontributionszahlungen eingelagert worden, die als »Reichskriegsschatz« das Kaiserreich überdauern sollten. Von den Maßnahmen zu ihrer Bewachung dürfte nun auch das Gravitationsmessungsprojekt profitiert haben.

Der ausgesuchte 23 m lange und 7,5 m hohe Raum war »von Alters her« in der Höhe von »3,3 m über der Sohle« mit einem Bretterfußboden versehen. König und Richarz übernahmen ihn, obwohl sich die verbleibende Höhe von nur noch 4,2 m als nachteilig erwies. Dies nicht nur, weil dabei »die eigentliche Waage« sehr nahe der Decke aufgestellt werden musste und sich »viele Manipulationen recht un bequem« gestalteten, sondern vor allem, weil »die von Menschen oder Licht her rührende erwärmte Luft, indem sie sich unter der Decke sammelte, die Waage stärker irritierte, als es bei größerer Höhe der Decke geschehen wäre.«<sup>196</sup> Um die »durch den Witterungswechsel« verursachten Temperaturschwankungen abzuschwächen, ließen sie den eigentlichen Arbeitsbereich innerhalb des Raums mit einem »doppelten Bretterverschlag mit Sägespanfüllung« einschließen (in Abb. 21 mit 2 und 3 bezeichnet).

Die Arbeiten begannen mit dem Bau des aus zwei Teilen bestehenden Fundaments für die Lagerung des Bleiklotzes. Der untere Teil mit einer Basisfläche »von etwa der doppelten Größe der durch den Bleiklotz belasteten Fläche« wurde in 1,5 m Tiefe unter dem Erdboden aus Kalkstein und Zement gemauert. Darauf wurde ein »massives Ziegelgemäuer« mit kleinerem Querschnitt »ein halbes Meter hoch über dem Erdboden« errichtet – offenbar bis 2,8 m unter dem Bretterfußboden. Seine quadratische Oberfläche mit 2,5 m Kantenlänge bestand aus einer »sorgfältig eben und horizontal« ausgeführten Zementschicht, auf der später die Bleiquader aufgestapelt werden konnten.<sup>197</sup> Innerhalb des Ziegelgemäuers war ein Kanal ausgespart, in dem die unteren beiden Waagschalen frei hängen konnten und durch den der mechanisierte Zugriff auf die darauf befindlichen Gewichtskugeln erfolgen sollte. Er war »zur Vermeidung von Luftströmungen« durch eine Längswand geteilt und konnte durch Falltüren verschlossen werden.

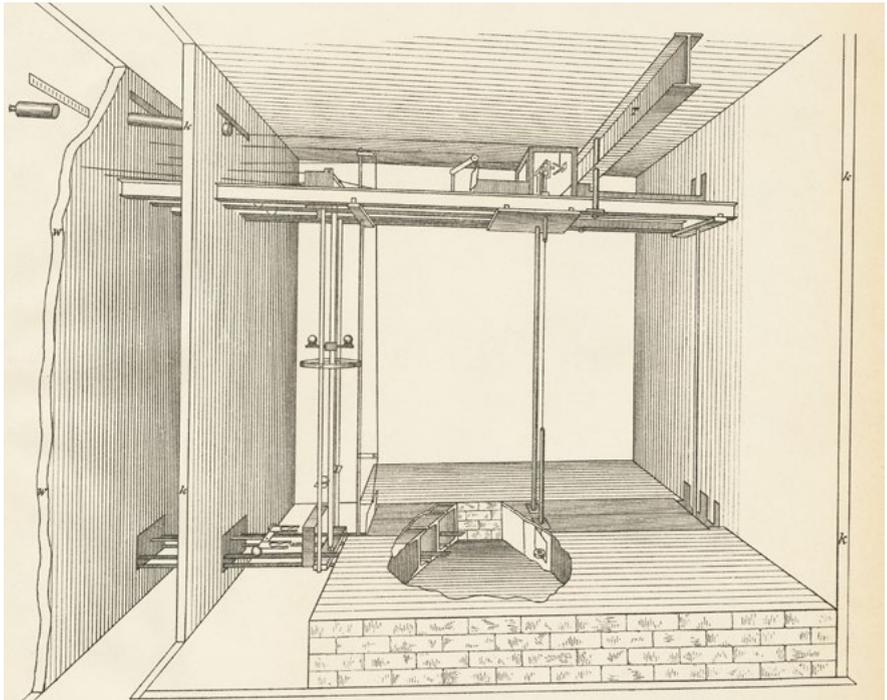
Weil wegen des enormen Gewichts des Bleis eine gewisse Absenkung des Fundaments nicht auszuschließen war, wurden die Waage und der gesamte Vertauschungsmechanismus auf einem »besonderen Gerüst« gelagert, das ohne Kontakt zum Bleiklotz und zum Fundament auf der einen Seite in den Wänden des Gewölbes und auf der anderen auf besonderen Pfeilern ruhte. Nach der Fertigstellung dieses »Gerüsts« und des Fundaments wurde die Waage mit dem oberen Schalen-

196 Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 7.

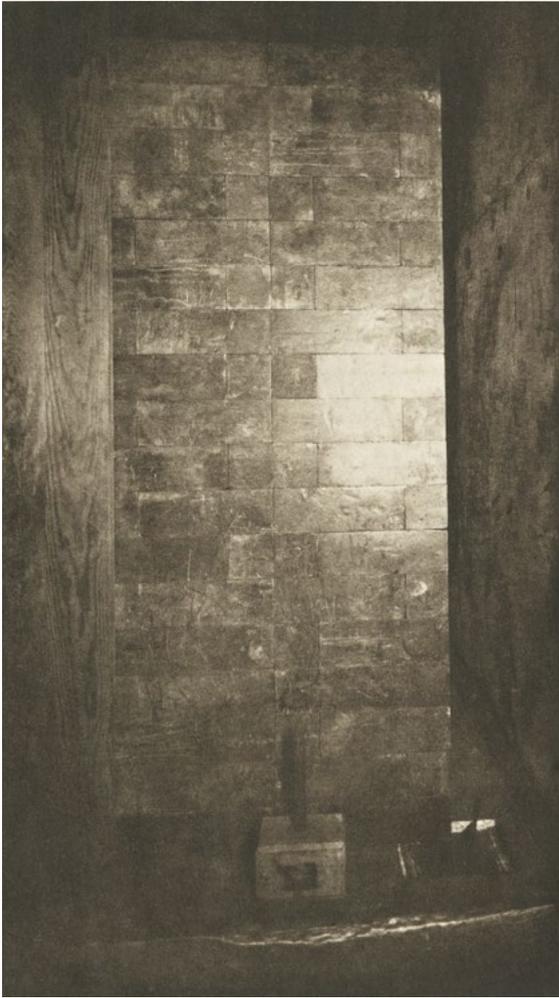
197 Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 9.



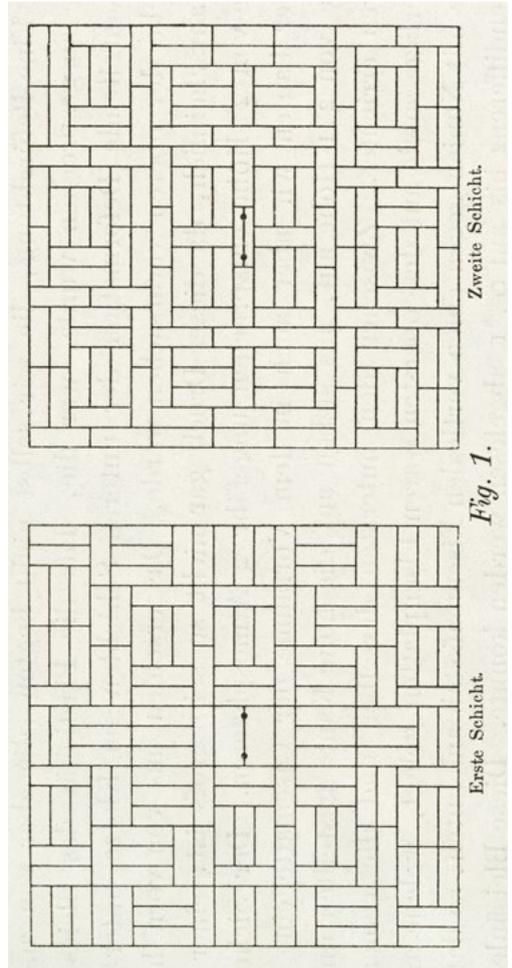
paar, dem Vertauschungsmechanismus, dem Bleiklotz und auch noch dem oberen Teil des Fundaments in einem würfelförmigen Kasten aus doppelten Zinkblechwänden mit 3 m Kantenlänge eingeschlossen (in Abb. 21 und 22 als k bezeichnet). In seinem Boden endeten die beiden Messingröhren von etwa 3 cm Durchmesser, durch welche die zu den unteren Waagschalen führenden »Verbindungsstangen«



**22** Fundament, Lagerung der Waage und Manipulationsgestänge ohne »Bleiklotz«. »Die festgehaltene Stellung zeichnet den Augenblick, in welchem ein Paar Kugeln (eine Kilogramm- und eine Hohlkugel zur Compensation des Luftauftriebs), die sich vorher oben befunden haben, auf dem Fahrstuhl von oben nach unten gefahren werden, um dort auf die Gabeln gesetzt zu werden, während das bis dahin unten befindliche Kugelpaar vorübergehend auf seitliche Halter, unten, etwas oberhalb der Fundamenthöhe, abgesetzt ist, um dann weiterhin vom Fahrstuhl abgeholt und nach oben gebracht zu werden. Da der Fahrstuhl sammt seiner prismatischen Führungsstange um deren verticale Achse drehbar ist, konnten die Kugeln auch im selben Niveau von rechts nach links vertauscht werden.«<sup>198</sup>



23 Blick auf einen Teil des »Bleiklotzes« aus aufgeschichteten Bleiquadern mit 30 cm Länge und je 10 cm Breite und Höhe.



Zweite Schicht.

Fig. 1.

Erste Schicht.

24 Die beiden abwechselnden Anordnungen bei der Schichtung der Bleiquader. Die Quader mit halber und anderthalbfacher Breite mit jeweils zwei »halbcylindrischen Aussparungen« sind in der Mitte als Punkte auf einer Linie eingezeichnet.

geschützt wurden. Diese bestanden »aus je fünf einzelnen Messingstücken, die durch Gelenke verbunden sind, welche in Folge ihrer abwechselnden Richtung insgesamt ein mehrfaches Cardanisches Gelenk« bildeten.<sup>199</sup> Um die Waage vor der Körperwärme des Beobachters zusätzlich zu schützen, erschien es später erforderlich, dessen Platz durch eine weitere doppelte Zinkblechwand (w) mit einer Tür (e) vom Arbeitsraum zu trennen (Abb. 21). Von diesem Beobachterplatz aus sollten sämtliche Manipulationen an der Waage und auch das Vertauschen der Gewichte mit einem aus »Stangen, Ketten, Schnüren etc.« bestehenden Mechanismus durchgeführt werden können.

Die Installation der Waage und des Bedienungsmechanismus in der Kasematte wurde von Stückrath und seinen Mitarbeitern ausgeführt, wobei diese auch alle anderen bautechnischen Maßnahmen kontrolliert haben dürften. So konnten die letzten Modifizierungen erst im Rahmen der endgültigen Installation im Verlauf des gesamten Messungsaufbaus fertiggestellt werden.

Die Überlassung des Bleis allein hätte König und Richarz wenig geholfen, wenn es die Geschützgießerei nicht fachmännisch unter Nutzung von extra angefertigten, zerlegbaren Eisenformen »blasenfrei« in 2800 Quaderstücke mit 10 mal 10 mal 30 cm Kantenlänge gegossen und diese mit besonders geglätteten Oberflächen versehen hätte. Diese Bleiquader konnten nicht nur einfach transportiert, sondern, wie eine im Abschlussbericht abgedruckte Fotografie belegt, auch mit nur minimalen Zwischenräumen zum annähernd homogenen Bleiklotz mit einer horizontalen Kantenlänge von 210 cm und einer Höhe von 200 cm nach einem sorgfältig geplanten Muster aufgeschichtet werden.<sup>200</sup>

Bemerkenswert ist der in England gemachte Vorschlag, anstatt des Bleiklotzes in gleicher Weise das dichtere Quecksilber zu verwenden. Er wurde im Echo auf die in der britischen Zeitschrift »Nature« abgedruckte Mitteilung über das Projekt dort veröffentlicht und von König und Richarz wenig später in der gleichen Zeitschrift zurückgewiesen. Zur Begründung führten sie an, dass eine derartige Menge Quecksilbers nicht verfügbar sei und dass der dafür erforderliche komplizierte Behälter große technische Probleme bereiten würde.<sup>201</sup> Offenbar wurde der Vorschlag dann auch nirgends aufgegriffen.

Nachdem das Fundament noch vor dem Jahresende 1885 fertiggestellt worden war, hatte die Geschützgießerei ein Jahr später, am 18. Dezember 1886, den Guss und die Bearbeitung der 2800 Bleiquader beendet und sie zum Bleiklotz auf-

199 Richarz/Krigar-Menzel, *Abnahme der Schwere*, 1894, S. 562. Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 9. Offenbar wurden diese »Stangen« später durch »Drähte« ersetzt, wie Krigar-Menzel in seinem Bericht erwähnt und wie sie, verkürzt, auch heute im Deutschen Museum zu sehen sind. Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 145.

200 Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 17.

201 König/Richarz, *Remarks*, 1885, S. 484. In Nature war über die Vorstellung des Konzepts durch König vor der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin am 19. Dezember – einen Tag nachdem Helmholtz das Projekt der Akademieklasse vorgestellt hatte – berichtet worden.

gestapelt. In dessen Mitte waren auch schon die »Stücke mit halbzyklindrischen Aussparungen« so eingefügt, dass die beiden vertikalen Kanäle entstanden, durch die später die Schutzröhren für die frei hängenden Drähte zwischen den oberen und den unteren Waagschalen hindurchgeführt werden konnten.<sup>202</sup>

Der aufgeschichtete Bleiklotz sollte dann beinahe sechs Jahre lang in der Geschützgießerei verbleiben, bevor die einzelnen Bleiquader schließlich im August und September 1892 in die Zitadelle transportiert und innerhalb der Schutzwände auf dem Fundament erneut zum Klotz aufgetürmt werden konnten. Das Auflegen jeder einzelner der 20 Schichten begann in der Mitte, wo »an Stelle der gewöhnlichen Stücke solche mit halbzyklindrischen Aussparungen« von vorn und hinten an die Schutzröhren für die Stangen zwischen den Waagschalen herangeschoben wurden. Um durchgehende Fugen zu verhindern wurden daran anschließend die Quader in zwei besonders durchdachten Anordnungen, von Schicht zu Schicht abwechselnd, ausgelegt, – wobei sich der offensichtlich von Stückrath beauftragte »Mechanikergehülfe Hermann« um »die saubere Ausführung des Aufbaues« besonders verdient gemacht habe.<sup>203</sup>

Wie erwartet, verursachte bereits der Aufbau der ersten Schichten eine Absenkung des Fundaments, die sich mit der zunehmenden Belastung weiter fortsetzte. Mit einigen Millimetern habe sie sich zwar als »recht beträchtlich« erwiesen, jedoch »nichts an den Functionen der verschiedenen Apparatheile« geändert.<sup>204</sup> Die Waage war ja auf dem erwähnten »besonderen Gerüst« installiert.

Letztlich waren für die Güte der Ablesung der angezeigten Messungsergebnisse und die Sicherheit der Manipulationen an der Waage Beleuchtung und Lichtprojektion entscheidend, wobei das Licht offenbar von mehreren Spirituslampen erzeugt wurde. Diese, wie auch die optische Einrichtung zur Beobachtung der »Schwingungen der Wages«, wurden ebenfalls von Stückrath und seinen Mitarbeitern installiert. »Um die Verschlechterung und Erwärmung der Luft durch die Verbrennungsgase der Beleuchtungslampen zu vermeiden, standen dieselben auf einer Console L an der Außenseite des Brettverschlags (1), 2–3 m hoch über dem Fußboden, und sandten ihr Licht durch ein doppeltes Glasfenster in das Innere des Arbeitsraumes. Eine derselben war ein Skioptikon, dessen Strahlenbündel auf die an der Decke des Innenraumes dicht hinter dem Beobachter befestigten Spiegel fiel; von dort wurde es theils auf solche Stellen an den Handgriffen u.s.w. des Mechanismus, welche besonders hellen Lichtes benöthigten, theils auf die dicht vor ihnen in der Zeichnung angedeutete Scala von mattem Glas geworfen.« (vgl. Abb. 21). Durch ein an seinem Platz aufgestelltes Fernrohr mit einer Faden-

202 Richarz/Krigar-Menzel, *Waage*, 1899, S. 41.

203 Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante*, 1898, S. 181.

204 Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 18.

marke konnte der Beobachter über ein totalreflektierendes Prisma und einen dicht hinter der Mittelschneide am Waagbalken fest angebrachten kleinen Spiegel dessen Auslenkung auf der Skala verfolgen. Störungen dieses Lichtwegs, die anfangs bei den Vertauschungen der Gewichte auftraten, hätten »mit der Zeit« verhindert werden können. In der Zeit einer von LED-Strahlern ausgeleuchteten Welt fällt die Vorstellung schwer, dass ein Beobachter von seinem festen Platz aus mit diesem Licht sowohl die Vertauschung der Gewichte verfolgen, als auch die auf eine Skala gespiegelte Auslenkung der Waage über das Fernrohr korrekt und sicher ablesen konnte.<sup>205</sup>

### Scheitern des ursprünglichen Plans

1897, ein Jahr nach Abschluss der Wägungen, sollte Krigar-Menzel in einem an die interessierte breitere Öffentlichkeit gerichteten Rückblick ausführen, dass die Konzeption von 1884 bei »verhältnismässig compendiöserer Form des Apparates« – gemeint war offensichtlich der Gesamtaufbau – eine wesentliche Verbesserung »der von Ph. von Jolly für diese Aufgabe benutzten Anwendung der gewöhnlichen Wage« in Aussicht gestellt habe.

Zwar habe das dabei verwendete Blei »freilich auch von jeher dem Erdkörper« angehört, es sei aber »zu diesen Versuchen von weither zusammengetragen und auf dem kleinen Raum zwischen den oberen und unteren Wageschalen zusammengedrängt, also in nächste Nähe der auf den Schalen benutzten Gewichte gebracht« worden. Trotzdem habe sich die vom »Erdkörper« ausgehende Anziehungskraft auch weiterhin als »von grösstem Einfluss« erwiesen. Die Wägungsergebnisse hätten jedoch von ihrem Einfluss bereinigt werden können, weil sich der Unterschied zwischen der mit wachsendem Abstand vom Erdmittelpunkt abnehmenden Wirkung der Erdanziehung auf die oberen und die unteren Schalen mit der verwendeten Waage tatsächlich recht genau messen ließ. Um dies zu erreichen habe man sowohl vor dem Aufbau als auch nach dem Abbruch des Bleiklotzes jeweils einen »ebenso sorgfältig ausgeführten Satz von Wägungsreihen nach demselben Plane« durchgeführt. So hob sich in der Differenz der beiden aus den Wägungsreihen ermittelten »Hauptresultate« mit und ohne Bleiklotz der Einfluss der unterschiedlichen Schwere oben und unten heraus und es blieb nur die gesuchte, vom Bleiklotz ausgehende »Attraction« übrig. Dabei rührten die sich noch in den Messungsergebnissen ergebenden Unterschiede allein »von der Anwesenheit der anziehenden Bleimasse« her.<sup>206</sup> Dieses Anfangskonzept habe dann zwar umgesetzt

205 Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 11f. u. 53f. Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 147. Die als »Skioptron« bezeichnete Projektionslampe erhielt ihr Licht offenbar von einer Spirituslampe.

206 Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 145f.

werden können, jedoch hätten sich bei den einzelnen technischen Maßnahmen, meist unerwartet, immer neue Schwierigkeiten ergeben, die kleinere und größere Modifikationen der Anfangsplanung erforderten.

Die ursprünglich geplante Abfolge der einzelnen Wägungen beschrieb Krigar-Menzel folgendermaßen: »Es soll zuerst in der Schale links oben die eine Kilogrammku­gel A liegen, die andere B soll sich auf der Schale rechts unten befinden; diese Anordnung bezeichnen wir durch I. Die zu dieser Belastung gehörige Ruhelage der Wage, welche durch Auflegen von bekannten, kleinen Reitergewichten auf die Schalen immer in enge und bequeme Grenzen gebracht werden kann, bestimmt man aus einigen Umkehrpunkten der schwingenden Wage. Dann soll die Wage arretirt werden, die Kugel A vertical nach unten, also auf die Schale links unten, und die Kugel B vertical nach oben, also auf die Schale rechts oben transportirt werden. Bei dieser Stellung, die wir durch II bezeichnen wollen, wird dann wiederum die Ruhelage der Wage bestimmt, und so an einem Tage noch mehrmals bei den abwechselnden Kugelstellungen I und II.« Als »Beobachtungsergebnis jedes einzelnen Wägungstages« wurde dann »der mittlere Werth der Differenz zwischen den zu den Stellungen I und II gehörigen Ruhelagen der Wage, ausgedrückt in Scalentheilen« notiert. »Um aus dieser Scalengröße einen Schluss auf die Differenz der bei beiden Stellungen auf die Seitenschneiden ausgeübten Zugkräfte machen zu können«, musste »zwischen­durch mehrmals die Ruhelage der Wage bei ungeänderter Stellung der Kugeln dadurch verschoben werden, dass auf einer der oberen Schalen ein kleines Zulagegewicht von passender und genau bestimmter Größe aufgesetzt wird«. Daraus ergab sich dann die »sogenannte Empfindlichkeit der Wage und somit auch der Gewichtswerth der beobachteten Scalendifferenz«.

Wie schon Jolly, so hatten auch König und Richarz die Kilogramm­gewichte als Kugeln gestaltet, da sie sich damit »der Attraction des Bleiklotzes gegenüber barocentrisch« verhielten und die Lage ihres Schwerpunkts leichter vermessen werden konnte. Auf den Waagschalen waren sie »in flachen kleinen ausgesparten Calotten« gelagert. Für ihren Austausch im Verlauf der Wägungsreihen konnte der Beobachter mittels des Bedienungsmechanismus zwei geeignet geformte Gabeln unter ihre Ränder schieben und sie von den Schalen abheben. Nachdem er sie dann »bis zur gezeichneten Stellung vor dem Raume für den Bleiklotz« gefahren hatte, konnte er dort die Vertauschung so vornehmen, wie sie »nach der ursprünglich geplanten Methode allein nothwendig war, nämlich von oben nach unten«.<sup>207</sup>

207 Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 10.

Besondere Maßnahmen erforderte dabei der unterschiedliche Auftrieb der Luft, der zwar »für zwei Kilogramme aus demselben Material bei gewöhnlichen Wägungen im gleichen Niveau unmerklich« war, sich jedoch aufgrund der unterschiedlichen Luftdichte bei den oberen und unteren Waagschalen bemerkbar machte. »Um diese beiden Dichtigkeiten zu ermitteln«, habe man »besondere Hülfswägungen« ausgeführt, wobei »geschlossene und durchbrochene Hohlkugeln mit einander verglichen« wurden. »Erstere füllen das volle Kugelvolumen aus, während letztere nur das geringe Volumen der Wandungen besitzen.«<sup>208</sup>

Für »nachträgliche Prüfungen und Bestimmungen von Messinstrumenten und Ersatzgewichten« konnten Richarz und König die »Hülfsmittel der kaiserl. Normal-Aichungs-Commission in Berlin« in Anspruch nehmen. Zur Sicherung der internationalen Anerkennung ihrer Messungsverfahren und -ergebnisse bezogen sie auch das BIPM in Sèvres in das Projekt mit ein. Dort bestimmte der damals von der NAC delegierte Max Ferdinand Thiesen (1849–1936) – auf dessen Tätigkeiten noch eingegangen wird – im Verlauf des Jahres 1887 alle für die »Aequilibrirung« ihrer Waage erforderlichen Massen und Volumen mitsamt den kleinen Zulagegewichten. So konnten die im BIPM üblichen Anforderungen an Genauigkeit und Zuverlässigkeit auch bei den Wägungen in der Spandauer Kasematte zumindest annähernd eingehalten werden. Um dies zu unterstreichen übernahmen sie auch die französischen Bezeichnungen: »Sphère dorée« und »Sphère platinée« für die ganz vergoldeten und platinieren massiven Kilogramm-Kugeln und die Hohlkugeln, »Sphère moitié dorée« und »Sphère moitié platinée« für die halb vergoldeten und halb platinieren.<sup>209</sup> Auch Richarz erwähnte in einem Brief an Helmholtz vom Oktober 1889 die Zusammenarbeit mit dem BIPM. Da sich die bisher vorgesehenen Hohlkugeln aus vergoldetem Kupfer als unbrauchbar erwiesen hätten, müssten neue aus Platin angefertigt und »in Breteuil mit der nötigen Genauigkeit von 0,01 mgr bestimmt« werden.<sup>210</sup>

Um aus den Ergebnissen der Wägungen endlich den gesuchten genauen Wert der Gravitationskonstante ermitteln zu können, musste die vom Bleiklotz ausgehende Anziehungskraft nach dem »Newtonschen Elementargesetz« auch analytisch und zahlenmäßig berechnet werden. Dafür war neben der Wägung der Gesamtmasse des Bleis und der genauen Messung der Kantenlängen des Bleiklotzes auch die Bestimmung der »relativen Lage der Kugelcentra auf den vier Schalen« erforderlich, wobei sie ein vom »Abtheilungs-Vorstand des Militär-Versuchsamtes in Spandau« zur Verfügung gestelltes Kathedometer benutzen konnten. »Die einzige Unbekannte in diesem Rechnungsausdruck bleibt die als

208 Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 146.

209 Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 147.

210 Brief von Richarz an Helmholtz, Edenich 19. Okt. 1889. BBAW Archiv NL Helmholtz 373.

Factor heraustretende Gravitationsconstante«, die, wie es Krigar-Menzel den Lesern seines Berichts erläuterte, »schliesslich aus der Gleichsetzung dieses analytischen Ausdruckes mit dem durch Wägungen gefundenen Betrage ermittelt wird«.<sup>211</sup>

Während in der Zitadelle das Fundament und »viele andere bauliche Arbeiten fertiggestellt« wurden, habe »Herr Mechaniker Stückrath eine passende Waage mit Doppelschalen konstruiert«, die der »sehr weitgehenden Anforderung genügen sollte, dass eine Gewichts-differenz zweier Kilogramme bis auf 0,01 mg genau damit ermittelt werden könne«. Der von ihm entwickelte komplizierte Bedienungsmechanismus ermöglichte es, »die Gewichtskugeln ohne Berührung mit der Hand und ohne Gegenwart des Beobachters in dem den ganzen Apparat umschliessenden, doppelwandigen Zinkkasten von den oberen Wageschalen auf die unteren und umgekehrt unter Umgehung des für den Bleiklotz ausgesparten Raumes zu transportiren, also alle diejenigen Umsetzungen, welche in der vorher auseinandergesetzten Methode vorkommen sollten, von dem durch mehrere schützende Zwischenwände abgetrennten Raume aus, in welchem der Arbeitsplatz des Beobachters auf einem Podium errichtet war, vorzunehmen.«<sup>212</sup>

Neben der Vertauschung der Kilogramm-gewichte betrafen diese Manipulationen auch das Lösen und Arretieren der Waage und das Aufsetzen und Abheben der kleinen Zulagegewichte »zum Aequilibriren«. Markierungen an den Kurbeln ermöglichten es dem Beobachter, an seinem Platz die Stellung »jedes der Theile des Mechanismus« zu erkennen. Da die Vornahme der Vertauschungen, »sei es von rechts nach links, sei es von oben nach unten«, immer »eine ziemliche Anzahl von Einzelbewegungen« erforderte, erstellten sie zur Einhaltung der korrekten Reihenfolge geeignete »Fahrpläne« – heute würde man von »Programmen« sprechen.<sup>213</sup>

Nachdem die Waage dann jedoch erst vierzehn Monate später als erwartet fertiggestellt war, wie es König in seinem Kündigungsschreiben anmerkte, konnte mit ihrer Installierung und der Einrichtung des Bedienungsmechanismus offenbar erst 1887 begonnen werden – also in den Monaten, in denen Helmholtz das Universitätsinstitut verließ und König den gerade erst angeworbenen Krigar-Menzel mit den Plänen vertraut machte. Dann habe sich auch bald gezeigt, dass der Mechanismus seinen Dienst versagte, weil die eisernen Teile der Vorrichtung »zur automatischen Vertauschung der Gewichte« rosteten und die hölzernen sich verzogen. Die dafür verantwortliche hohe Feuchtigkeit im Raum habe zwar durch die vollständige Verkleidung von dessen Innenseite mit verlöteten Blechplatten »wirksam und sauber« beseitigt werden können, die verbliebene relative Feuchtigkeit hätte sich

211 Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 147. Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 104.

212 Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 147.

213 Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 10f.

jedoch erst mit der Aufstellung von zwei Bleipfannen mit Schwefelsäure, »jede von etwa 2 qm Oberfläche«, dauerhaft zwischen 50 und 80% halten lassen.<sup>214</sup>

Trotz aller Probleme bezeichnete Krigar-Menzel in seinem Rückblick die damalige Situation als »hoffnungsfreudige Vorbereitungsperiode der Arbeit«. Sie hätten »die Unbequemlichkeiten, welche die aller Erfordernisse eines Laboratoriums: Bedienung, Beleuchtung, Reinlichkeit u.s.w. ermangelnde, einsame Station mit sich brachte, noch verhältnismässig leicht getragen«, zumal sie »durch die Aussicht auf ein baldiges, glänzendes Resultat versüsst« worden sei. Als dann endlich der »ganze Apparat beisammen« war, habe jedoch »mit dem Studium der Waage und ihrer Eigenthümlichkeiten« eine sich über Jahre hinziehende »Reihe von mitunter fruchtlosen Mühen« begonnen – wobei er selbst, auch wenn er es nicht explizit erwähnte, die Hauptlast zu tragen hatte. Während Krigar-Menzel an der Umsetzung dieses Plans seit dem »Ende des Jahres 1887« mitarbeitete und König sich noch bis zum Sommer 1889 »an der Einrichtung des Beobachtungsraumes und der Apparate« beteiligte, scheint Richarz nach seinem Wegzug an den vorbereitenden Arbeiten in der Kasematte nicht unmittelbar beteiligt gewesen zu sein.<sup>215</sup> Da er derzeit zur Beschleunigung der Messungen nichts beitragen könne, so schrieb er im erwähnten Brief an Helmholtz vom Oktober 1889, wolle er in Bonn seine Vorlesungen halten und den vorgesehenen Urlaub erst im nächsten Semester nehmen.<sup>216</sup> Nachdem sie dann ein Jahr später am 26. September 1890 mit der ersten Messreihe »ohne Bleiklotz« begonnen hatten, hätten sie trotz aller vorangegangener Maßnahmen die bis zum 21.11.1890 vorgenommenen ersten Messungen auch gleich wieder verwerfen und Veränderungen an der Waage vornehmen müssen, teilte Krigar-Menzel mit. Zur Bestimmung von Temperatur und Luftdruck an den Gewichten wurden jeweils am Beginn und am Ende jeder Wägungsreihe die Thermometer und Barometer abgelesen. Ein »Fueß'sches Normal-Heber-Barometer« war unter dem Podium des Beobachtungplatzes B an der Seite der Treppe festgeschraubt.<sup>217</sup> Die verwendeten beiden »Fueß-Pernet'schen Einschluß-Thermometer« waren in Zehntelgrade geteilt und ermöglichten mit bloßem Auge eine Schätzung von etwa 0,01°. Bei ihrer Überprüfung konnten sie nun auch auf Hilfsmittel der im Aufbau befindlichen PTR zurückgreifen, wo Johannes Pernet (1845–1902) von 1887 bis 1890

214 Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 7. Auch Jolly hatte im Aulatum solche Pfannen mit Chlorcalcium aufgestellt gehabt. Jolly, *Zweite Abhandlung*, 1881, S. 340f.

215 Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 146f.

216 Brief von Richarz an Helmholtz, Eendenich 19. Okt. 1889. BBAW Archiv NL Helmholtz 373.

217 Der für seine Messungsinstrumente berühmte Feinmechaniker Rudolf Fuess war Mitbegründer der »Deutschen Gesellschaft für Mechanik und Optik«, und betrieb seit 1891 eine Fabrik in der Dünther Straße in Steglitz.

tätig war.<sup>218</sup> Er hatte mit dem ebenfalls in Berlin ansässigen Mechaniker Rudolf Fuess (1838–1917) dieses hochempfindliche Thermometer entwickelt. Dabei gestalteten sich die damit in unmittelbarer Nähe zu den Gewichtskugeln vorgenommenen Temperaturmessungen nicht zuletzt deshalb schwierig, weil die Thermometer mit dem Licht einer Kerze abgelesen werden mussten. Zur Bestimmung der relativen Feuchtigkeit gaben sie bei der bekannten Spezialfirma Hermann und Pfister im schweizerischen Bern zwei speziell geformte Haarhygrometer in Auftrag, von denen eines mittels einer geeigneten Stange in die zu den unteren Schalen führenden Kanäle im Fundament eingeführt werden konnten.<sup>219</sup>

Mit der Zeit habe sich herausgestellt, dass die gemessenen Werte »eine sehr weitgehende Abhängigkeit von der Differenz der Temperatur bei den oberen und den unteren Wageschalen« aufwiesen. »Im Sommer war es oben wärmer, im Winter unten, die Unterschiede betrug bis an  $\pm 0,7^\circ$ . Nur wenige Tage lang, meist im Mai und November, pflegte die Störung sich in erlaubten Grenzen zu halten«. Dabei hätten bereits Differenzen von  $0,04^\circ$  zu »unbrauchbaren Werthen« geführt. Die Ursache glaubten sie in den »auf- oder absteigenden Strömungen« gefunden zu haben, die »eine wärmere Masse in kälterer Luft, oder eine kältere Masse in wärmerer Luft um sich her erzeugt«. Sinn und Größe der Abweichung der einzelnen Resultate hätten diese Erklärung bestätigt. Eine deshalb angebrachte zusätzliche Abschirmung des Beobachtungsraums durch einen zweiten »doppelwandigen Bretterschlag mit Sägespänefüllung« habe zwar bewirkt, dass der Verlauf der jährlichen Schwankungen »regulirt und in etwas engere Grenzen gebracht« war, sie habe jedoch »die störende Differenz zwischen oben und unten« nicht verhindert. Krigar-Menzel deutete die Dramatik der Situation nur an, als er und Richarz das sich damit ergebende »traurige Resultat« zur Kenntnis nehmen mussten, »dass die erdachte Methode überhaupt nicht ausführbar war«.<sup>220</sup>

### Thiesens Messungen mit der Balkenwaage in Sèvres und Berlin

Während ihrer Arbeiten in der Spandauer Zitadelle verfolgten Krigar-Menzel und Richarz die erwähnten Arbeiten von Max Thiesen am BIPM in Sèvres. Thiesen war

<sup>218</sup> Der in Bern geborene Physiker Pernet war als Assistent von Heinrich Wild (1833–1902) mit diesem von der Universität Bern 1869 an das Zentralobservatorium in St. Petersburg gegangen, war 1877–1885 am BIPM, 1885–1887 an der NAC und bis 1890 an der PTR tätig. Danach lehrte er bis zu seinem Tod an der ETH Zürich.

<sup>219</sup> Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 13f. Beschreibung des von Hermann & Pfister in Bern hergestellten Haarhygrometers in: Hempel, *Gasanalytische Methoden*, 1900, S. 247f. Die 1858 von Friedrich Hermann (1835–1906) und Hermann Studer (1834–1865) gegründete mechanische Werkstätte trägt seit 1925 den Namen »Haag-Streit«.

<sup>220</sup> Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 148.

schon seit 1876 am gerade erst eingerichteten »Metronomischen Institut« der NAC tätig gewesen bevor er sein in Königsberg begonnenes Studium 1878 an der Berliner Universität mit einer Dissertation über »die Verbreitung der Atmosphäre« abgeschlossen hatte. Sein darin mitgeteilter Dank galt nicht nur Helmholtz, der als sein akademischer Lehrer an der Universität das Promotionsverfahren durchgeführt hatte, sondern auch Foerster und dem aus der Schweiz stammenden Direktor des Physikalischen Zentralobservatoriums in St. Petersburg Heinrich Wild, der als russischer Delegierter in der Meterkommission eine ähnlich gewichtige Rolle spielte wie Foerster.<sup>221</sup> Thiesen beschäftigte sich dann intensiv mit der Physik der Waage und des Wägens. Seine Erklärung, dass Wägungen diejenigen Messungen seien, die sich, wenn man von der »astronomischen Bestimmung größerer Zeiträume« absieht, »mit der grössten relativen Genauigkeit ausführen lassen«, dürfte auch die in der NAC vertretene Einschätzung wiedergeben. Er hatte die Aktivitäten des BIPM von Anfang an verfolgt. Offensichtlich hatte Foerster ihn damit beauftragt, weil der maximal genaue Vergleich der Gewichte mit der Waage als fundamentale Aufgabe aller Eichbehörden nun auch im BIPM mit seinen neuartigen Anforderungen zur Lösung anstand. Dafür mussten die Möglichkeiten der neuesten Waagen wissenschaftlich fundiert ausgelotet werden.

1883 veröffentlichte Thiesen in der Zeitschrift für Instrumentenkunde neben einem umfassenden Bericht zum den Stand der »Theorie der Waage und der Wägung« noch einen weiteren über die Aufgaben und ersten Aktivitäten des BIPM. An der überragenden Bedeutung dieser neuartigen Institution ließ er keinen Zweifel: »Unterstützt und geleitet von einem aus Fachgelehrten der verschiedenen Länder zusammengesetzten Comité, mit einem trefflichen, gelehrten Personal besetzt [...] im Besitze geeigneter Räumlichkeiten und der vorzüglichsten von Künstlern verschiedener Länder gefertigten Instrumente, wird das Institut die ihm gestellten Aufgaben ohne Zweifel in vollkommenster Weise erfüllen und dabei weit über diese unmittelbaren praktischen Aufgaben hinaus, aber in engster untrennbarer Verknüpfung mit deren zweckdienlichster Lösung, die Methoden und Thatsachen der messenden Physik überhaupt in fruchtbringender Weise erweitern. Schon jetzt [...] liegen gewichtige Zeugnisse dafür vor, dass durch diese Arbeiten nicht nur das Maass- und Gewichts-Wesen der unmittelbar beteiligten Staaten, sondern die Metronomie überhaupt wesentlich gefördert worden ist.« Besonders hob er die Aufgabe des BIPM hervor, »auf Wunsch für Regierungen, gelehrte Gesellschaften, Gelehrte und Künstler Präzisions-Maasse und Gewichte zu vergleichen«.<sup>222</sup> Mit dieser Würdigung dürfte er auch die Sicht der Gesellschaft für Mechanik und Optik (GMO) als Herausgeber der Zeitschrift wiedergegeben haben. Obwohl ich keinen unmittelbaren Beleg dafür gefunden habe, so gehe ich doch

221 Thiesen, *Verbreitung der Atmosphäre*, 1878. Thiesen, *Theorie*, 1882/83. Thiesen, *Arbeiten*, 1883.

222 Thiesen, *Arbeiten*, 1883, S. 1.

davon aus, dass Thiesen als Experte für Waagen und wissenschaftliche Wägungen in die damals beginnende Planung des Gravitationsmessungsprojekts am Universitätsinstitut einbezogen war und dort ebenfalls auf die Bedeutung der Aktivitäten des BIPM hinwies.

Nur kurz bevor diese Planung konkreter geworden war hatte das CIPM in Sèvres nach jahrelangen Beratungen und Materialforschungen entschieden, dass von dem dort aufbewahrten »Archivkilogramm« eine größere Anzahl von Kopien hergestellt und an die interessierten Staatsregierungen verteilt werden sollten. Zur Durchführung der endgültigen Wägung dieser Kopien wurde Thiesen im Juni 1883 als deutscher Experte auf die Position des »Deuxième Adjoint« am BIPM delegiert.<sup>223</sup> Helmholtz und seine Kollegen von der Akademie dürften darin eine weitere günstige Voraussetzung für ihre Zustimmung zum Antrag von König und Richarz gesehen haben. Das Gravitationsmessungsprojekt würde im engen informellen Kontakt zu den international beobachteten Wägungen am BIPM stehen und könnte die dort gültigen Qualitätsanforderungen übernehmen. Andererseits dürften auch Foerster und Thiesen aus den dabei gewonnenen Erkenntnissen neue Einsichten für die Aktivitäten des BIPM erwartet haben. Thiesen sollte bis zum Oktober 1889 in Sèvres tätig bleiben.<sup>224</sup>

Die Rohlinge für die dreiundvierzig Standardkilogrammgewichte, die bei einer englischen Firma mit höchst genau festgelegten Anforderungen an das Legierungsmaterial in Auftrag gegeben worden waren, wurden im Juni 1884 in Sèvres angeliefert. Vor ihrer endgültigen Bearbeitung sollte Thiesen deren Dichte mit maximal möglicher Genauigkeit bestimmen. Zur Durchführung der dafür erforderlichen Wägungen verwendete er neben der bereits erwähnten, speziell für diese Aufgabe konstruierten Präzisionswaage von Bunge auch noch eine weitere, die Albin Ruprecht (1833–1913) in Wien entwickelt hatte.<sup>225</sup> Alle ermittelten Messungswerte wurden dann im neugeschaffenen Organ des BIPM »Travaux et mémoires du Bureau international des poids et mesures« der internationalen Fachwelt mitgeteilt.<sup>226</sup>

Auch wenn die antideutschen Aversionen seiner französischen Fachkollegen abgeklungen waren, so dürften ihre Nachwirkungen hier und da doch noch spürbar gewesen sein. Wie schon Foerster so scheint sich auch Thiesen dadurch motiviert gefühlt zu haben, in Sèvres die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse aus Berlin im Sinn einer weiteren »großen gemeinsamen Kulturaufgabe« besonders überzeugend zu vertreten. Dies galt auch für eine Beschlussvorlage, die Foerster im

<sup>223</sup> Quinn, *From artefacts to atoms*, 2012, S. 122.

<sup>224</sup> Comité international des poids et mesures. Procès-Verbaux des séances, deuxième série, tome 18, session de 1937, S. 11f.

<sup>225</sup> Der aus Halle/Saale gebürtige Ruprecht hatte 1848 seine Werkstatt in Wien gegründet. Robens/Jayaweera/Kiefer, *Balances*, 2014, S. 605.

<sup>226</sup> Thiesen, *Comparaison des prototypes nationaux*, 1893.

Oktober 1886 für das CIPM einbrachte. Er forderte darin, dass das Kilogramm ab sofort in den wissenschaftlichen Arbeiten des BIPM nur noch als Einheit für Masse und nicht mehr für Gewicht verwendet werden sollte.<sup>227</sup>

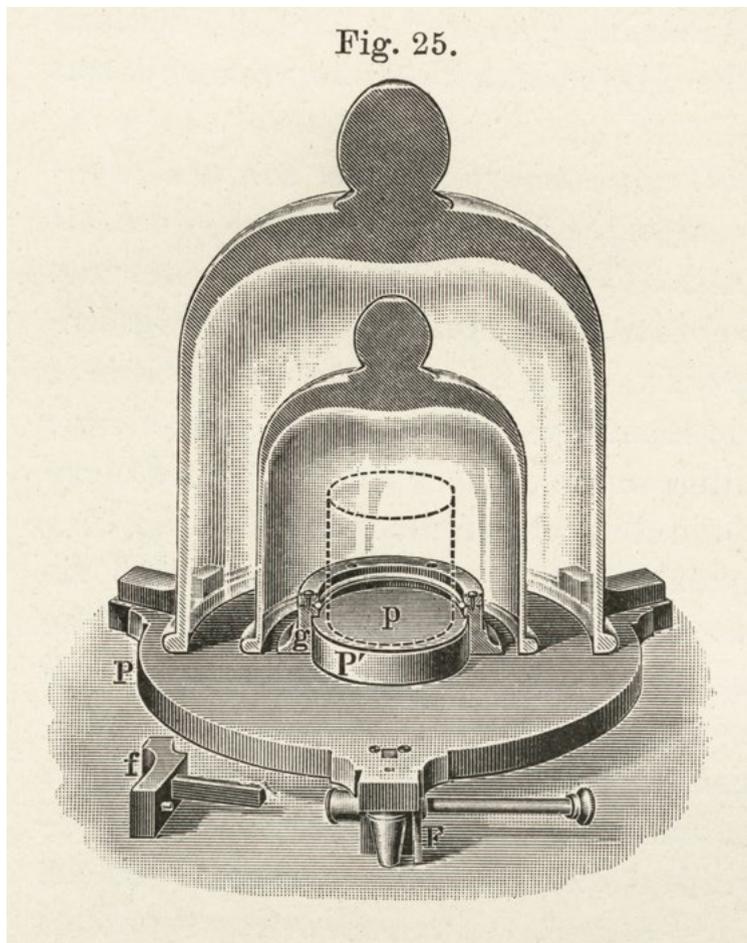
Thiesen dürfte auch die erwähnten, von Foerster bei Stückrath in Auftrag gegebenen Verbesserungsarbeiten an der Bunge-Waage veranlasst haben. Sein besonderer Beitrag bestand jedoch darin, dass er für die zukünftige Messungspraxis im Pavillon de Breteuil neben dem einzuhaltenden atmosphärischen Luftdruck auch eine Referenzgröße für die örtliche Erdbeschleunigung in Abhängigkeit von der Höhe ermittelte. Zur Berücksichtigung ihrer Abnahme bei den Wägungen in den oberen Etagen des Gebäudes errechnete er aus den Ergebnissen einer besonderen Messungsreihe einen Koeffizienten, der die Änderung der Schwere mit den Höhenunterschieden innerhalb des Pavillons ausdrückte. Das neue Treppenhaus erschien zur Durchführung der Wägungen nach dem Vorbild der Messungen von Jolly im Münchner Aulatum besonders geeignet. Thiesen installierte dort eine »gewöhnlich zu hydrostatischen Wägungen benutzte Waage«, bei der nach dessen Vorbild, und auch in Kenntnis der Konzeption von König und Richarz, an jeder Seite jeweils zwei Waagschalen im Abstand von 11,5 m untereinander angeordnet waren.<sup>228</sup>

Als »Versuchsobjekte« benutzte er Zylinder aus Platiniridium von 1 kg, »die späteren Prototype Nr. 2, 7, 31« und, um den Luftauftrieb zu eliminieren und eventuelle Fehler zu erkennen, ebensolche vergoldeten und platinieren Hohlkugeln aus Messing, wie sie dann auch in Spandau verwendet werden sollten. Aus einer längeren Messreihe ermittelte er einen Mittelwert der »Vermehrung des Gewichts unten« um  $2,842 \text{ mg} \pm 0,015 \text{ mg}$  und errechnete daraus den gesuchten Koeffizienten mit:  $\gamma = 0,000000278$  mit etwa 3% Unsicherheit. Diese erklärte sich, so Thiesen, zum Teil »durch die Lage des Pavillons de Breteuil am Abhänge eines Plateaus«. In seinem Bericht hob er dann den »bisher kaum beachteten Umstand« hervor, »dass schon sehr kleine Massen starke lokale Verschiedenheiten der gesuchten Größe herbeiführen können«, so auch die Pfeiler, auf denen er die Waage aufgestellt hatte.<sup>229</sup>

<sup>227</sup> Comité international des poids et mesures. Procès-Verbaux des séances de 1886, S. 51, Eintrag vom 15.10.1886.

<sup>228</sup> Thiesen, *Détermination*, 1890, S. 4. Thiesen, *Bestimmung*, 1891, S. 66.

<sup>229</sup> Thiesen, *Détermination*, 1890. Thiesen, *Bestimmung*, 1891, S. 66. Wie Foerster in seinen Erinnerungen mitteilt, hatten sich die Arbeiten im BIPM »unter der Leitung des früheren norwegischen Ministers, Staatsrat Broch, und unter Mitarbeit von drei eigenartig bedeutenden jüngeren Kräften, Dr. Pernet aus der Schweiz, Dr. Thiesen aus Ostpreußen und Dr. Benoît aus Südfrankreich (die ersten beiden aus der Schule des hochbedeutenden Physikers Neumann in Königsberg und des [...] ausgezeichneten Prof. Wild, Mitgliedes der Petersburger Akademie und Leiters des gesamten meteorologischen und magnetischen Dienstes in Rußland) außerordentlich erfreulich entwickelt«, Foerster, *Lebenserinnerungen*, 1911, S. 174f. Wild stammte wie Pernet aus der Schweiz!



25 Vom BIPM eingeführte Anordnung mit zwei Glasglocken zur Aufbewahrung der nationalen Kilogrammprototypen.

1890, ein Jahr bevor in England Poynting der Royal Society seine abschließenden Ergebnisse und Erkenntnisse vortrug, wurde der Bericht über Thiesens Messungen veröffentlicht. Ein expliziter Hinweis auf die Gravitationskonstante findet sich weder dort noch sonst in einem seiner Berichte. Offensichtlich sah es das CIPM nicht als seine Aufgabe an, irgendwelche Festlegungen in Bezug auf diese Konstante zu treffen und überließ das Problem, wenn es als solches überhaupt wahrgenommen wurde, den nationalen akademischen Institutionen. Das BIPM belohnte Thiesen 1887 mit einer Bonuszahlung für seine Leistungen und Helmholtz holte ihn 1890 mit dem Titel eines Professors an die im Aufbau befindliche PTR in Berlin.<sup>230</sup>

Dort war es eine seiner ersten Aktionen, die in der Technischen Abteilung für die Waagen zuständigen Mitarbeiter Karl Scheel und Hermann Diesselhorst (1870–1969) mit einer entsprechenden Versuchsreihe zur Bestimmung der Gegebenheiten an ihrer eigenen Örtlichkeit in Charlottenburg zu beauftragen. Aus dem Jahresbericht 1894/95 erfährt man dazu, dass es »äussere Umstände« nahelegt hätten, »gerade jetzt eine Bestimmung der Änderung der Schwere mit der Höhe vorzunehmen«. Einerseits seien bisher überhaupt nur drei solcher Bestimmungen bekannt geworden, von denen nur zwei – offenbar jene von Jolly in München und Thiesen in Sèvres – »unter solchen Verhältnissen ausgeführt« worden seien, »dass ihr Resultat ein allgemeines Interesse beanspruchen« könne. Andererseits »schien es wünschenswert, solche Bestimmungen an demselben Orte aber unter verschiedenen, rein lokalen Bedingungen vorzunehmen«. Außerdem erschienen die Gegebenheiten der gerade fertiggestellten Gebäude der PTR dafür besonders geeignet.<sup>231</sup>

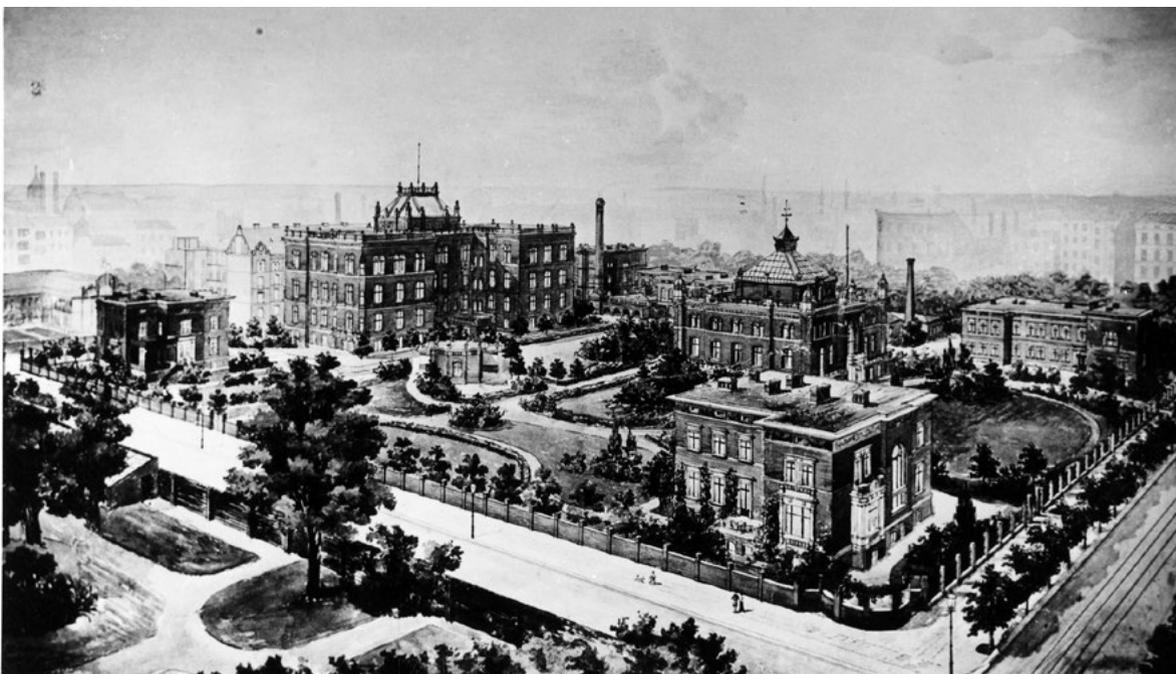
In dem als »Observatorium« bezeichneten zentralen Bau stand eine vertikale Höhe von etwa 14 m zur Verfügung, »welche sich in bequemer Weise in Unterabteilungen zerlegen ließ«. Vor allem war jedoch gerade »der zum Maschinenhause der II. Abtheilung der Reichsanstalt gehörige Schornstein von etwa 30 m Höhe im Wesentlichen fertiggestellt und konnte für die Versuche benutzt werden, so lange das äußere Baugerüst noch vorhanden war. Die Änderung der Schwere mit der Höhe konnte also annähernd an derselben Stelle der Erdoberfläche, aber unter verschiedenen rein örtlichen Umständen auf dem Grundstücke der Anstalt bestimmt werden.« Das angewandte Verfahren war dem von Thiesen in Sèvres angewendeten »im Wesentlichen gleich«. Benutzt wurde »eine Kilogrammwaage von Stückrath, deren Schwingungen direkt an der Zeigerskale mit einer festen Lupe beobachtet« werden konnten.<sup>232</sup>

Man kann davon ausgehen, dass neben der Zusammenarbeit mit Stückrath auch ein Erfahrungs- und Informationsaustausch mit Krigar-Menzel und dem zeitweilig aus Bonn angereisten Richarz stattfand, die in dieser Zeit mit dem Aufbau

<sup>230</sup> Quinn, *From artefacts to atoms*, 2012, S. 122 und 127.

<sup>231</sup> Physikalisch-Technische Reichsanstalt, *Thätigkeit*, 1895.

<sup>232</sup> Scheel/Diesselhorst, *Änderung der Schwere*, 1896. Hoffmann/Koch, *Observatorium*, 2012.



26 Physikalisch-Technische Reichsanstalt. Abbildung um 1900.

des Bleiklotzes und der erforderlichen Neuinstallation der Waage beschäftigt waren. Helmholtz, der inzwischen von seiner Wohnung im Physikgebäude der Universität in die Präsidentenvilla der PTR umgezogen war, konnte die Arbeiten am Schornstein von dort aus verfolgen. Thiesen sollte in der »Physikalischen Abteilung« der PTR als Leiter des Wärmelabors bis zu seinem Ruhestand 1910 tätig sein.<sup>233</sup>

Nachdem Thiesen im Pavillon de Breteuil für die Abnahme des Gewichts eines Kilogramms pro Meter Höhe 0,309 mg ermittelt hatte, ergaben sich für die PTR nur 0,295 mg. 1911 sollte Scheel in einem populärwissenschaftlichen Buch mitteilen, dass »das abgerundete Mittel« dieser beiden Werte »für die bei Wägungen meist in Frage kommenden kleinen Höhendifferenzen auf der ganzen Erdoberfläche als gültig angesehen« werden könne.<sup>234</sup> Entsprechende Messungen an anderen Orten waren inzwischen offenbar nicht bekannt geworden.

### Fortsetzung und Abschluss der Arbeiten in der Spandauer Zitadelle nach verändertem Konzept

In seinem an die interessierte Öffentlichkeit gerichteten Rückblick sprach Krigar-Menzel von der »Noth«, in die er und Richarz mit dem Scheitern des ursprünglichen Plans geraten seien. In dieser Situation hätten sie beschlossen, »an jedem einzelnen Wägungstage nur gewöhnliche Gauss'sche Doppelwägungen mit Vertauschungen zwischen rechts und links, also für beide Kugeln in unverändertem Niveau« vorzunehmen. Dabei habe der größte Schaden, »unter welchem die Arbeit bis zum Schluss zu leiden hatte«, darin bestanden, »dass der Vertauschungsapparat nicht für die Ausführung dieser veränderten Methode eingerichtet war und auch nicht mehr dafür passend umgearbeitet werden konnte«. Sie hätten darüber »nachsinnen« müssen, »was mit dem nun einmal fertiggestellten Apparat anzufangen sei, um ihn auf irgend eine andere Weise für den beabsichtigten Zweck nutzbar zu machen«.<sup>235</sup>

Immerhin war der von Stückrath für den vertikalen Transport der Kugelpaare vorgesehene »Fahrstuhl sammt seiner prismatischen Führungsstange um deren vertikale Achse drehbar«, so dass »die Kugeln auch im selben Niveau von rechts nach links vertauscht werden« konnten.<sup>236</sup> »Ist also die Anfangsstellung I, wie vorher, d. h. liegt A links oben, B rechts unten, so ist in der vertauschten Stellung II A nach rechts oben, B nach links unten gebracht. Aus einer solchen Wägungsreihe mit den abwechselnden Stellungen I und II findet man, wie bei allen Gauß'schen Wägungen, die Differenz der beiden verglichenen »Gewichte.«

233 Cahan, *Meister der Messung*, 1992, S. 202f. Hentschel, *Anthology*, 1996, S. 132.

234 Scheel, *Metronomie*, 1911, S. 111f.

235 Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 158.

236 Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 10f. Vgl. auch Abb. 22.

Die vertikale Vertauschung wurde nun erst am Ende des Wägungstages vorgenommen, so dass die Massen bis zum nächsten Wägungstag meist mehrere Tage Zeit hatten, ihre Temperatur an die der umgebenden Luft anzugleichen. Dabei seien trotz der mehrtägigen Pausen, besonders zu Zeiten großer Temperaturdifferenzen, »zwischen oben und unten systematische Abweichungen« festzustellen gewesen. Die dabei erkennbare »Tendenz zu kleinen Sommer-Resultaten und grossen Winter-Resultaten« erklärten sie damit, »dass die Massen noch nicht die Temperatur ihrer neuen Umgebung angenommen« hätten. Bei »richtiger Vereinigung beider Tagesresultate« hätten sich dann nach mehreren Tagen »ganz dieselben Größen« ergeben, »welche nach der ursprünglichen Methode aus je einem einzelnen Wägungstage abgeleitet werden sollten«.<sup>237</sup>

Allerdings sei bei dem neuen Verfahren auch »die Tagesarbeit« bedeutend in die Länge gezogen worden, »was aus verschiedenen Gründen für die Güte einer Wägung stets nachtheilig« sei, erklärte Krigar-Menzel.<sup>238</sup> Während bei »allen Präcisionswagen, welche für die Vergleichung von Normalgewichten nach der Methode der Gaußschen Doppelwägungen eingerichtet sind«, die Vertauschung der Belastung zwischen rechts und links im Inneren »ohne Oeffnen der Thüren, in wenigen Secunden« ausgeführt werden könnten, – er war mit den Waagen der NAC gut vertraut – hätten sich die Horizontalvertauschungen bei ihrem »lediglich für den Verticaltransport hergestellten, automatischen Mechanismus« so kompliziert gestaltet, »dass man trotz aller Uebung doch etwa 5 Minuten dazu brauchte«. Problematisch sei dabei vor allem gewesen, dass sich in dieser Zeit »in dem arretirten Wagebalken die von der vorhergehenden Wägung zurückgebliebene Durchbiegung« zum Teil zurückbildete und man »vor Beginn neuer Ablesungen noch mehrere Minuten lang die neu belastete Wage schwingen lassen« musste, bis wieder »ein annähernd stationärer Zustand erreicht« war.

Sie hätten auch darauf achten müssen, dass die Massen der Kilogrammkuugeln während der langen Pausen zwischen den beiden Wägungstagen nicht mehr als 0,01 mg verändert wurden. Wenn »durch irgend welchen Zufall (Verunreinigung, Verletzung) einmal doch eine grössere Veränderung stattgefunden« hatte, habe sich diese mit den Beobachtungsfehlern »vermischt«. Deshalb hätten sie in den Fällen, in denen sie »eine solche Massenveränderung« für wahrscheinlich hielten, »wenn etwa die Kugeln angefasst oder geputzt worden waren«, die betroffenen Wägungen »niemals zu einem Resultate combinirt«. Auch hätten sie es für »ganz unzulässig« gehalten, »die gesuchten Grössen aus jedem einzelnen Wägungstage abzuleiten, indem für die Massendifferenz  $A - B$  der einmal in Breteuil bestimmte Werth als Constante für die ganze Dauer der Arbeit verwendet wird«. Denn es sei »unmög-

237 Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 157.

238 Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 158.

lich, dass bei fortgesetztem Gebrauch die Massen bis auf einen so kleinen Betrag unveränderlich« blieben.<sup>239</sup> Zum Schutz hatten sie auch »alle Theile des Mechanismus, welche in directe Berührung mit den Kugeln kamen«, mit Rohseide überzogen.<sup>240</sup>

In einer Fußnote merkte Krigar-Menzel an, dass ihr Verfahren bei den Wägungen ohne Bleiklotz zur »Bestimmung der Abnahme der Schwere mit der Höhe« im Wesentlichen mit dem »von Herrn Thiesen in Breteuil zum gleichen Zwecke ausgeführten« übereingestimmt habe. Dagegen sei es für ihn »erstaunlich«, dass Jolly »bei vermuthlich viel grösseren Temperaturdifferenzen, als in unserem Local, zu brauchbaren Zahlen gelangt« war. »Dass er mehrere Stunden lang bis zur Beobachtung der neuen Wageeinstellung verstreichen liess, beseitigt dieses Erstaunen nicht, denn welche Wage behält so lange einen hinreichend constanten Nullpunkt, um eine so kleine Differenz messen zu können?«

Auch den Luftauftrieb hätten sie jetzt anders als in der ursprünglichen Planung berücksichtigt: »Der grösste Theil desselben wurde dadurch compensirt, dass die beiden geschlossenen Hohlkugeln, welche nahezu dasselbe Volumen wie die Vollkugeln besaßen, zu den Hauptwägungen herangezogen wurden und auf den beiden von den Kilogrammen unbesetzt gebliebenen Schalen figurirten. Der geringe Rest des Auftriebes liess sich dann aus den combinirten Resultaten zweier zusammengehöriger Wägungstage herausschaffen durch eine Correction, welche aus den Ablesungen der Thermometer und des Barometers berechnet werden konnte. Die veränderliche Luftfeuchtigkeit blieb ohne Einfluss auf diese Correction.«

Sie benötigten ein Jahr bis der neue Plan so weit durchdacht war, dass sie im August 1891 mit der endgültigen Ausarbeitung des veränderten »Systems der einzelnen Operationen« beginnen konnten. Auch dann dauerte es noch bis zum Februar 1892, bis es ihnen gelang, mit der Errichtung eines zweiten Holzverschlags im Abstand von 3–4 m vom ersten den Einfluss der anhaltenden Winterkälte abzuschirmen und die jährlichen Temperaturschwankungen zwischen +50 und +120°C zu halten. Erst jetzt entschlossen sie sich zur Aufnahme der ersten Serie ihrer endgültigen Wägungen »ohne Bleiklotz«, die sie dann bis zum Abschluss am 20. Juni 1892 fortführten.<sup>241</sup>

Nachdem, wie bereits erwähnt, im August und September 1892 der Transport der Bleiquader von der Geschützgießerei in die Zitadelle erfolgte, um dort auf dem gemauerten Fundament erneut zum Bleiklotz aufgestapelt zu werden, konnten am 11. Oktober 1892 die Wägungen »mit Bleiklotz« beginnen.

Offenbar stellten sie zu diesem Zeitpunkt zur Durchführung der inzwischen als routinemäßig ausführbar eingeschätzten Wägungen auch jenen »Gehülfen« ein,

<sup>239</sup> Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 157.

<sup>240</sup> Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 10f.

<sup>241</sup> Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 53f.

den sie »wegen Unredlichkeit in der Protokollierung der Beobachtungen« ein Jahr später wieder entließen.<sup>242</sup> Dazu erfährt man aus dem Abschlussbericht, dass deshalb die Zeit vom Frühjahr 1893 bis ins Jahr 1894 »für die Arbeit fast völlig verloren« gegangen sei und nur vier der Messungen des Gehilfen hätten beibehalten werden können.<sup>243</sup> So musste dann doch Krigar-Menzel auch die Wägungen »mit Bleiklotz« bis zum Abschluss am 7. März 1895 weitgehend alleine durchführen. Nachdem der Bleiklotz im April und Mai 1895 abgebaut und die Quader in die Geschützgießerei zurücktransportiert worden waren, begannen sie am 21. Juni 1895 eine zweite Reihe von Messungen »ohne Bleiklotz«, die sie im Februar 1896 beendeten.

Schon nach dem Abschluss der ersten Wägungen »ohne Bleiklotz« hatten Richarz und Krigar-Menzel einen Bericht über ihre »erste Reihe von Wägungen, aus denen sich die Abnahme der Schwere mit der Höhe ergibt«, verfasst. Helmholtz legte ihn der Akademieklasse in ihrer Sitzung vom 23. März 1893 vor – acht Jahre nachdem er an der gleichen Stelle den Projektantrag vertreten hatte.<sup>244</sup> Er wurde dort offenbar wohlwollend aufgenommen, denn im Juni 1893 – während in der Zitadelle der Gehilfe tätig war – beantragten sie bei der Akademie weitere 3000 Mark. Die bisher ausgezahlten 10000 Mark seien »wegen der vielen unvorhergesehenen zu beseitigenden Störungen« verbraucht, lautete die Begründung. Obwohl der Antrag von Helmholtz »überreicht und zur Annahme empfohlen« wurde, bewilligte das zuständige »Ministerium der geistlichen, Unterrichts- und Medizinal-Angelegenheiten« am 28. Oktober 1893 dann doch nur 2000 Mark.<sup>245</sup> Das Interesse an einem erfolgreichen Abschluss hatte dort offensichtlich nachgelassen.

Bei den Wägungen nach dem veränderten Plan hätte sich die »bedeutende Ortsveränderung der Gewichtskugeln während der Vertauschung« noch in anderer Weise nachteilig ausgewirkt – was auch »an die Vereitelung der ursprünglichen Methode« erinnert habe. Trotz gleicher Höhe habe auf der Drehscheibe eine andere Temperatur geherrscht als innerhalb des Waagekastens. Besonders »im Früh Sommer und Spätherbst und beim plötzlichen Eintreten andauernder Hitze oder Kälte, also zu Zeiten, wo sich auch im Inneren des geschützten Locals die Temperatur am schnellsten veränderte, mussten diese Unterschiede merklich werden. So lange der Zinkkasten zum grössten Theil von der thermisch trägen Bleimasse erfüllt war, musste die von der Aussenseite des Raumes abgewandte Vertauschungsstation zurückbleiben gegenüber der Temperatur des Waagekastens; wenn aber der Bleiklotz fehlte, so musste diese Stelle dem durch Holz und Glas geschützten In-

<sup>242</sup> Brief Richarz an Helmholtz, Pallanza 23. Feb. 1894. BBAW NL Helmholtz 373.

<sup>243</sup> Richarz/Krigar-Menzel, Bestimmung der Gravitationsconstante, 1898, S. 6. Brief Richarz an Helmholtz, Pallanza 23. Feb. 1894. BBAW NL Helmholtz 373.

<sup>244</sup> Richarz/Krigar-Menzel, *Abnahme der Schwere*, 1894.

<sup>245</sup> Richarz und Krigar-Menzel an Akademie, Randbemerkung, »Berlin im Juni 1893«. BBAW Archiv Hist. Abt. II–VII, 111.

neren des Wagekastens vorausseilen.« Ihre Vermutung, »dass die Kilogramme mit etwas veränderter Temperatur auf die Schalen zurückkehrten und die bereits oben erwähnten Luftströmungen, wenn auch in viel schwächerem Grade erzeugten«, seien durch die systematischen Abweichungen der einzelnen Messungsergebnisse vom Mittelwert bestätigt worden. Auch sei der Effekt besonders stark zur Geltung gekommen, »wenn durch Betreten des Zinkkastens mit Licht das Wärmegleichgewicht in gröberer Weise gestört war«. Dann seien erst nach etwa 5 Tagen wieder brauchbare Wägungen möglich gewesen.

Mit dem Abschluss der letzten Messungsreihe am 10. Februar 1896 beendeten Krigar-Menzel und Richarz die Wägungsarbeiten und wandten sich der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse zu.<sup>246</sup> Nachdem sie neben den Ergebnissen der einzelnen Wägungen auch immer die Temperaturen an den Kilogrammgewichten gemessen und notiert hatten, hielten sie sich »für berechtigt«, so teilte es Krigar-Menzel mit, »die gefundenen Einzelwerthe als Functionen der räumlichen und zeitlichen Temperaturdifferenzen anzusehen und aus ihnen nach der Methode der kleinsten Quadrate diejenigen beiden Endwerthe zu berechnen, welche hätten herauskommen müssen, wenn jene Temperaturdifferenzen nicht bestanden hätten. Diese Werthe sind verschieden von den gewöhnlichen arithmetischen Mitteln, da die Messungen nicht gleichmässig über alle möglichen Wärmeverhältnisse vertheilt sind. Ferner aber vermindert sich durch Berücksichtigung dieser gesetzmässigen Abhängigkeit der wahrscheinliche Fehler des Resultats in einer einwandfreien und jede Willkür ausschliessenden Weise.«<sup>247</sup>

Nachdem sich die Interpretation der umfangreichen Messergebnisse und die Rechenarbeiten für die erforderliche Ausgleichsrechnung über das Frühjahr und den Sommer hingezogen hatten, konnten Krigar-Menzel und Richarz am 31. Oktober 1896 einen handschriftlichen ersten »kurzen Überblick über die ganze Arbeit« mit dem »endgültigen Resultat« an Friedrich G. Kohlrausch (1840–1910) übergeben, der ihn am 26. Nov. 1896 der Akademieklasse vorlegte.<sup>248</sup> Während der folgenden Monate teilten sie die Ergebnisse und Erkenntnisse in mehreren

<sup>246</sup> Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 19, 41, 44, 53, 72–74.

<sup>247</sup> Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 157f. Die heute vor allem mit dem Namen von Gauß verknüpfte Methode der kleinsten Quadrate sei für diesen selbst nicht nur »von außerordentlicher praktischer Bedeutung« gewesen, sondern sie sei für ihn »mit der Zeit [...] zum entscheidenden Indiz für das Verhältnis zwischen Mathematik und Natur« geworden. »Ihre Wirksamkeit war der klarste Beweis dafür, daß Naturerscheinungen durch mathematische Methoden erklärt werden können.«, Bühler, *Gauss*, 1987, S. 136.

<sup>248</sup> Bericht Richarz u. Krigar-Menzel vom 31. Okt. 1896. Archiv BBAW. Wissenschaftliche Unternehmungen der phys.-math. Klasse 1884–1910. II–VII, 111. Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 6. Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante*, 1898. Der an der Kaiser-Wilhelm-Universität Straßburg lehrende Friedrich G. Kohlrausch, Sohn von Rudolf Kohlrausch, war Mitglied der Akademie und 1895 als Nachfolger von Helmholtz in das Präsidentenamt der PTR nach Berlin berufen worden.

Publikationen auch der interessierten Öffentlichkeit mit, die damit erfuhr, dass das Projekt vierzehn Jahre nach der Antragstellung doch noch zu einem erfolgreichen Abschluss gelangt war.<sup>249</sup>

Akademisch-förmlich korrekt zum Abschluss gebracht war das Projekt jedoch erst mit der Publikation des umfassenden systematischen Berichts mit allen Messwerten, den Details der Vorgehensweise und den von den Autoren gezogenen Schlussfolgerungen. Nachdem sie ihn am 28. Februar 1898 bei der Akademie zum Druck eingereicht hatten, erschien er am 5. September 1898 in den »Physikalischen Abhandlungen nicht zur Akademie gehöriger Gelehrter« und auch in einer separaten Ausgabe als »Anhang zu den Abhandlungen«.<sup>250</sup>

Zuvor hatte Krigar-Menzel im März 1897 mit seiner bereits mehrfach zitierten Beschreibung des Projekts für die »Naturwissenschaftliche Rundschau« noch einen besonderen Akzent gesetzt. Diese seit 1886 im schon damals traditionsreichen Verlag Vieweg in Braunschweig erscheinende Wochenzeitschrift verfolgte das Ziel, »die weitesten Kreise der Gebildeten« über die aktuellen Entwicklungen in den Naturwissenschaften zu informieren und dabei mit »allgemein verständlichen Berichten« jeden Leser »müheles« in den Stand zu setzen, »mit der sich stetig entwickelnden Naturwissenschaft in dauernder Verbindung zu bleiben«.<sup>251</sup> Als Praktiker, der die einzelnen Wägungen trotz aller Hindernisse und Unwägbarkeiten weitgehend alleine durchgeführt hatte, schilderte Krigar-Menzel dort das Geschehen während der vergangenen 13 Jahre in historischer Abfolge: wie vielversprechend der anfängliche Plan gewesen war, wie er sich nach mehrjähriger Arbeit als undurchführbar erwies, welche Konsequenzen dies hatte und wie schließlich die angestrebten Ergebnisse doch noch erzielt werden konnten. Anders als in den akademischen Veröffentlichungen, in denen der historische Ablauf nur schwer zu erkennen ist, ließ er dabei in aufschlussreichen Bemerkungen auch seine persönliche Sicht anklingen.<sup>252</sup>

## Messungsergebnisse

In ihrem großen Abschlussbericht unterteilten Krigar-Menzel und Richarz das Kapitel über ihre »Endresultate« in einen ersten Abschnitt mit der Überschrift »Nebenresultat, die Abnahme der Schwere mit der Höhe betreffend« und einen zweiten »Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde«. Im ersten stell-

249 Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898.

250 Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898.

251 »Prospect« im ersten Heft vom 2. Januar 1886.

252 Dass der von Richarz mitautorisierte Bericht von Krigar-Menzel allein verfasst wurde, geht aus dessen Hinweis »im Anschluss an zwei Original-Berichte, mitgetheilt von Letzterem« hervor. Im Text bezeichnet er Richarz als »meinen Mitarbeiter« und sich selbst als »Schreiber dieser Zeilen«, Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 145 u. 147.

ten sie dem aus den Wägungen ohne Bleiklotz »für die doppelte Abnahme der Schwere auf die Höhendifferenz der Wageschalen« ermittelten Wert  $g = 0,06454 \pm 0,00008 \text{ cm/sec}^2$  ihren berechneten Wert von  $g = 0,06976 \text{ cm/sec}^2$  gegenüber. Den Unterschied kommentierten sie mit dem Hinweis, dass auch Jolly in München, Thiesen in Sèvres, wie auch Scheel und Diesselhorst in der PTR in Berlin bei ihren »Wägungen für Niveauunterschiede von vielen Metern« ähnliche Abweichungen von den berechneten Werten gefunden hätten.<sup>253</sup> Erklären könne man sie dadurch, dass »die Voraussetzung, dass man sich außerhalb der Erde befinde«, nicht erfüllt gewesen sei. So hätten bei ihrer eigenen Messung die zwischen dem Niveau der oberen und dem der unteren Waagschalen befindlichen »Theile der Gewölbe und der Erdmassen des Bastions« durch ihre Gravitationswirkung die Differenz der Schwere »erheblich vermindern« müssen. Eine Rolle spielten dabei auch die Unterschiede in der Beschaffenheit der Erdoberfläche. »Sehr wahrscheinlich« hätten die Steinsalzlager in und um Berlin, »welche ein geringeres spezifisches Gewicht (2,15) besitzen, als sonst durchschnittlich die Gesteine haben (2,5 und mehr)« zur Nichterfüllung der theoretischen Voraussetzungen über die Beschaffenheit des Erdinnern beigetragen.<sup>254</sup>

Im zweiten Abschnitt teilten sie mit, dass sich aus dem mit dem Newtonschen Gravitationsgesetz verrechneten Ergebnis ihrer Wägungen ohne und mit Bleiklotz als Wert für die Gravitationskonstante  $G = 6,685 \pm 0,011 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{gr sec}^2$  ergeben habe.<sup>255</sup> Auch dafür gälte die Unsicherheit, »dass die der theoretischen Formel für  $g$  zu Grunde liegenden Voraussetzungen möglicherweise gerade für den Beobachtungsort ungenügend erfüllt« seien. »Um von der Gravitationskonstante auf die Masse der Erde zu kommen«, so erklärte Krigar-Menzel den Rechengang in seinem »allgemein verständlichen« Bericht, »benutzt man den theoretischen Ausdruck, welcher aussagt, dass die irdische Schwere  $g$  eine Wirkung der Massenanziehung ist. In erster Annäherung hat dieser Satz die einfache Form:  $g = G \cdot M/R^2$ , wo

253 Zu Thiesen, Scheel und Diesselhorst gaben sie die Literaturangaben: »Thiesen, Max Ferdinand: Détermination de la variation de la pesanteur avec la hauteur. Travaux et Mémoires du Bureau international des poids et mes., t. VII. 1890.« und: »K. Scheel [...]« und H. Diesselhorst. Bestimmung der Änderung der Schwere mit der Höhe auf dem Grundstücke d. Phys. Techn. - Reichsanstalt zu Charlottenburg (durch Wägungen). Wiss. Abhandl. ders. 2, 1895, S. 185. Zeitschrift für Instrumenten-Kunde, 16, 1896, S. 25. Resultat: Abnahme pro Meter und pro Kilogramm gleich 0,295 mg. Spandauer Resultat in derselben Weise ausgedrückt 0,291 mg (Theorie: 0,314 mg). Die umgebenden Mauermassen waren in Charlottenburg jedenfalls kleiner als in Spandau; dagegen befindet man sich mehr in der Mitte des auf S. 109 unserer Arbeit erwähnten Salzlagers.«, Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationskonstante*, 1898, S. 116.«

254 Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationskonstante*, 1898, S. 108f.

255 Sie benutzten das inzwischen standardisierte CGS-Maßsystem. Das auf Zentimeter, Gramm und Sekunde beruhende CGS-System war 1874 von der BAAS eingeführt worden und wurde 1889 durch das auf Meter, Kilogramm, Sekunde beruhende MKS-System abgelöst. Das dann um die elektromagnetische Basiseinheit Ampere erweiterte »MKSA-System« wurde mit den zusätzlichen Basiseinheiten Mol, Candela und Kelvin 1960 in das Système International d'Unités überführt.

M die Erdmasse und R den Erdradius bedeutet. Diese Gleichung folgt unmittelbar aus dem Newtonschen Gesetz; die angezogene Masse an der Erdoberfläche ist auf beiden Seiten der Gleichung weggehoben, die aus homogenen concentrischen Schichten bestehende Erdmasse ist im Centrum vereinigt gedacht. Dabei ist aber vernachlässigt erstens, dass die Erde abgeplattet ist, und zweitens, dass infolge der Rotation der Erde eine Centrifugalkraft der Massenanziehung entgegen wirkt. Berücksichtigt man diese Einflüsse und führt statt der weit über unser Vorstellungsvermögen hinausgehenden Erdmasse den anschaulicheren Begriff der mittleren Dichtigkeit der Erde ein, d. h. diejenige Dichtigkeit  $\Delta$ , welche überall im Erdinnern herrschen würde, wenn die gesammte Masse unseres Planeten gleichförmig vertheilt wäre, so erhält der genaue Ausdruck für die Schwerebeschleunigung  $g$  im Meeresniveau für einen Ort in der geographischen Breite  $B$  folgende Form:

$$g = \frac{4}{3} \pi \cdot R_p \cdot \Delta \cdot G \cdot \left(1 + a - \frac{3}{2} c\right) \left\{1 + \left(\frac{5}{2} c - a\right) \sin^2 B\right\}.$$

In dieser Gleichung ist  $R_p$  der Abstand der Pole vom Erdmittelpunkt, also die kleine Halbachse der Meridianellipse,  $a$  die numerische Excentricität der letzteren, also das Maass für die Abplattung, und  $c$  das Verhältnis von Centrifugalkraft zur Schwerkraft am Aequator, lauter Grössen, welche die Astronomen bereits sorgfältig bestimmt haben; [...] Es ist nur noch die Frage, welchen Werth man für die auf der linken Seite dieser Gleichung stehende Fallbeschleunigung  $g$  zu wählen hat. Die zahlreichen experimentellen Bestimmungen von  $g$  durch Messung der Länge des Secundenpendels zeigen nämlich, dass diese Grösse, reducirt auf Meereshöhe, durchaus nicht an allen Orten von gleicher geographischer Breite genau denselben Betrag besitzt, wie dies die vorstehende Formel aussagt. Dies rührt von localen Abnormitäten in der Massenvertheilung der nächsten Umgebung jedes Ortes her, auf welche jene theoretisch abgeleitete Formel keine Rücksicht nehmen kann. Es wäre daher nicht einwandfrei, einen Einzelwerth von  $g$ , etwa denjenigen am Beobachtungsort nebst der zugehörigen Breite  $B$  einzusetzen, wie dies von anderen Autoren geschehen ist. Denn dieser Localwerth kann gerade ein abnormer sein, und ist sicherlich für Spandau wegen der unter Berlin und Umgebung ruhenden Salzlager zu klein. Vielmehr muss man für  $g$  denjenigen Ausdruck einsetzen, welcher, alle sorgfältigen Pendelmessungen an den verschiedensten Orten der Erde verwerthend,  $g$  als Function der Breite  $B$  am genauesten darstellt. Dieser empirische Ausdruck ist:  $g = 978,00 \cdot \{1 + 0,005310 \sin^2 B\}$  cm/sec<sup>2</sup>. Unter Benutzung aller dieser Zahlenwerthe fanden wir für die mittlere Dichtigkeit der Erde den Werth:  $\Delta = (5,505 + 0,009) \text{ g/cm}^3$ .<sup>256</sup>

256 Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 159f.

Zum »bequemen Vergleich« führten sie in ihrem großen Bericht auch die gerade bekannt gewordenen Werte von Braun ( $\Delta = 5,5273 \pm 0,0012$ ) und Eötvös ( $\Delta = 5,53$ ) an – auf deren Messungen noch eingegangen wird. Die Messungsergebnisse von Krigar-Menzel und Richarz sollten auch noch 1984 als die genauesten bezeichnet werden, die mit der Balkenwaage überhaupt zu ermitteln seien.<sup>257</sup>

### Einige für die Technik des Waagenbaus »lehrreiche Erfahrungen«

Als weitere Erkenntnis aus dem Projekt teilte Krigar-Menzel auch einige »für die Technik des Wagebaues lehrreichen Erfahrungen« mit. Die Ausgangsbedingung für die Konstruktion ihrer Waage war gewesen, dass für die einzelnen Wägungen ausschließlich die mit dem BIPM abgeglichenen Kilogrammkgeln benutzt werden und die zu messenden Gewichtsunterschiede »ganze Milligramme« betragen sollten. Auch sollte »der wahrscheinliche Fehler eines Wägungssatzes, d. h. einer Bestimmung jener Gewichtsunterschiede,  $\pm 0,01$  mg nicht übersteigen«.

Bei der Dimensionierung hatte man sich offenbar hauptsächlich am Vorbild der von Jolly verwendeten Waage orientiert. Dazu erklärte Krigar-Menzel, dass die Empfindlichkeit zwar mit der Leichtigkeit und Länge des Waagbalkens zunehme, dass jedoch beide Eigenschaften auch dessen Durchbiegung vergrößerten, »welche beim Lösen der vorher arretirten Wage durch die Belastung der Seitenschneiden eintritt, und welche keineswegs sofort ihren definitiven Betrag erreicht, sondern wegen der unvermeidlichen elastischen Nachwirkung länger dauernde, allmähliche Formveränderungen desselben zur Folge hat«. Selbst bei der Balkenlänge ihrer Waage von nur 23,3 cm hätten »die starken Wanderungen und die Abnahme der Empfindlichkeit nach jedesmaligem Lösen« gezeigt, dass der Balken aufgrund der angestrebten Leichtigkeit »zu schwach und folglich zu biegsam gerathen« sei. Auch eine nachträglich angebrachte Versteifung hätte diesen »Uebelstand« nur vermindert und nicht beseitigt. Weil er jedoch immer in der gleichen Weise in Erscheinung trat, hätten sie die Auswirkung auf die Messungsergebnisse schließlich eliminieren können.

Zum Teil hätten diese »Nachwirkungen« auch in den durch die Last deformierten Schneiden selbst stattgefunden. Die beiden als »Endschneiden« bezeichneten Kanten der Prismen, mit denen die beiden Aufhängungen der Waagschalen auf dem Waagbalken beweglich gelagert waren, um ein senkrecht Hängen zu gewährleisten, waren zwar scharf geschliffen, stellten letztlich aber doch winzige gewölbte Flächen dar. Dasselbe galt für die »Mittelschneide«, über die der Waagbalken auf dem Ständer beweglich gelagert war. Bei seiner Neigung vollzogen alle drei Schnei-

<sup>257</sup> Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 159f. Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 111. Helmert, *Theorien II*, 1894, S. 96. Kleinevoß, *Bestimmung*, 2002, S. 13. Kleinevoß bezieht sich auf: Boer, *Gravity*, 1984.

den mit dem Auge kaum wahrnehmbare Rollbewegungen und veränderten dabei auch den Ort der Belastung des Waagbalkens. Damit im Normalfall eine ausreichend genaue Wägung gesichert war, sollte »ein Hundertmilliontel« der Belastung mit einem Kilogramm – die erwähnten  $\pm 0,01$  Milligramm – noch mit Sicherheit gemessen werden können. Deshalb musste auch »die Länge des Hebelarmes bis auf diesen Bruchtheil stets dieselbe sein« und da der Zwischenraum zwischen den Endschnitten 234 mm betrug, mussten »Änderungen des Hebelarms um etwa ein milliontel Millimeter« – also um einen Nanometer – ausgeschlossen und die nur in Vergrößerung sichtbare Rundung dieser »Endschneide« berücksichtigt werden.

Stückrath hatte die Schnitten und ihre Lagerungen aus dem mikrokristallinen Mineral Chalcedon geschliffen, denn »die grössere Härte und auch die Unzerstörbarkeit durch Nässe schienen diesem Material vor Stahl den Vorzug zu geben«. Jedoch habe sich dann gezeigt, dass »aus dem spröden Schnittenrand mikroskopisch kleine Scherben von muscheligen Bruch« heraussprangen und sich deshalb der Zustand der Waage »nach kurzer Benutzung« sehr verschlechterte. Das mehrfache Nachschleifen habe dann nicht nur die Arbeit »in störender Weise« unterbrochen, sondern auch bewirkt, dass »die Mittelschneide schliesslich zu hoch über die Seitenschnitten gehoben« wurde. Sie hätten sich deshalb entschieden, die Schnitten durch solche aus Stahl zu ersetzen – wie es Stückrath zuvor schon bei der Bunge-Waage in Sèvres gemacht hatte.

Auch dann sei die Parallelität der Schnitten »trotz mehrfachen Nachschleifens« nach einiger Zeit wieder verloren gegangen. Sie hatten diese »neue Störung« mit den immer neuen Veränderungen an dem »noch jungen und vielleicht nicht spannungsfreien Balken« erklärt. Ein damals von Carl Barus (1865–1935) aus den USA und Vincent Strouhal (1850–1922) aus Böhmen »zur Erzielung constanten Momentes« bei permanenten Magneten mitgeteiltes Verfahren hatte sie auf die Idee gebracht, dieses auf ihr eigenes Problem anzuwenden.<sup>258</sup> »Der Balken wurde deshalb 24 Stunden lang in einem Bratofen gekocht und dann noch einen Tag lang daselbst gelassen, bis er sich ganz langsam in seiner schützenden Umgebung abgekühlt hatte. Dies Verfahren hat geholfen und dürfte für ähnliche Fälle zu empfehlen sein.«<sup>259</sup>

Unerlässlich sei auch eine »möglichst vollkommene Parallelität der Schneide«, erklärte Krigar-Menzel, »weil sonst bei einem nicht ganz identischen Auflegen der Gehänge auf die Seitenschnitten der Hebelarm, an welchem die Belastung angreift, verändert wird«. Da sie aber nur »bis zu einer gewissen Annäherung« zu erreichen sei, wie »überhaupt die Geradlinigkeit wie die Liniengestalt der Schnitten nur eine

<sup>258</sup> Strouhal/Barus, *Magnete*, 1883, S. 633f.

<sup>259</sup> Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 147. Richarz/Krigar-Menzel, *Abnahme der Schwere*, 1894, S. 567.

ideale Vorstellung« sei, so müsse »die Arretirung, welche das Abheben und Aufsetzen der Schalenhänge und des Balkens besorgt, einen sehr gleichmässigen Gang besitzen«. Bei ihrer Waage hätten sie diese Forderung nur nachträglich durch »eine etwas unvollkommene Zwangsführung« erfüllen können. Ihr Versuch, »ob etwa der getrennte Gang der Schalen- und der Balkenarretirung vortheilhafter durch eine einzige starre Arretirung zu ersetzen sei, welche alle drei Schneiden möglichst gleichzeitig entlastet und belastet«, habe sich, wie vieles andere auch, als »vergebliche Mühe« erwiesen.<sup>260</sup>

Dies alles lässt erkennen, dass Stückrath auch nach dem Aufbau von Waage und Bedienungsmechanismus immer wieder hinzugezogen werden musste, um die unerwartet in Erscheinung tretenden Effekte zu beurteilen und zu ihrer Behebung technische Lösungen finden.

### Neue Messungen mit der Torsionswaage in England, Böhmen und Ungarn

Schon bevor Krigar-Menzel und Richarz erkannten, dass ihr ursprünglicher Plan nicht realisierbar war, hatte Poynting im englischen Birmingham seine Wägungen abgeschlossen gehabt. Trotz der Mühen, die sie ihn gekostet hatten, gelangte auch er wenige Jahre später zu der Einsicht, dass seine Planung nicht optimal gewesen war. Er bekannte, dass mit der inzwischen von seinem Kollegen Charles Vernon Boys neu entwickelten Torsionswaage »inherently« genauere Ergebnisse zu erzielen seien. Mit Blick auf die geringe Größe von dessen Instrument erklärte er, dass seine Entscheidung für eine sehr große Waage falsch gewesen sei und dass, würde er jetzt eine neue konstruieren lassen, sie so klein wie möglich sein müsse.<sup>261</sup> Seine Arbeiten wurden trotzdem nicht als Fehlschlag gewertet und 1894, während Krigar-Menzel in der Spandauer Kasematte seine Wägungen »mit Bleiklotz« tätigte, zeichnete die Universität Cambridge Poynting für die dabei erzielten Ergebnisse, Erkenntnisse und Einsichten mit ihrem Adams Prize aus.<sup>262</sup>

Der von Poynting so neidlos gewürdigte Boys, der am Ende der 1880er Jahre der Torsionsdrehwaage nach dem Vorbild von Cavendish neue Geltung verschaffte, war damals Mitarbeiter am erwähnten Institut von Frederick Guthrie an der

260 Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 147.

261 Vgl. zu Poynting: A. E. Woodruff: [http://www.encyclopedia.com/topic/John\\_Henry\\_Poynting.aspx](http://www.encyclopedia.com/topic/John_Henry_Poynting.aspx) (20.8.2018).

262 Poynting, *Mean Density of the Earth*, 1894. »Der Adams-Preis (engl. *Adams Prize*) wird jährlich von der Universität Cambridge und dem St. John's College der Universität Cambridge für herausragende mathematische Leistungen an einen oder mehrere junge (normalerweise im Alter unter 40 Jahre), in Großbritannien lebende (UK based) Mathematiker verliehen. Früher war der Preis eine Auszeichnung für Mathematiker und theoretische Physiker der Universität Cambridge, die dafür einen Essay einreichten (*Adams Prize Essay*). Der Adams-Preis wurde 1848 im Gedenken an den Anteil von John Couch Adams an der Entdeckung des Neptuns gestiftet.«, <https://de.wikipedia.org/wiki/Adams-Preis> (21.8.2018).

Royal School of Mines. Noch während sich Poynting mit seiner riesigen Balkenwaage abmühte, stellte Boys in einem Kellergewölbe unter der in South Kensington zwischen den Hochschulen und den Museen verlaufenden Privatstraße mit einer neuartigen Torsionswaage erste Versuche an. Da die vom unvermeidlichen Straßen- und Bahnverkehr verursachten Erschütterungen auch dort störten, führte er seine Messungen in Oxford in einer geeigneten Räumlichkeit des Clarendon Laboratory bis zum erfolgreichen Ende fort und machte damit auch diese traditionsreiche Universität zum Ort der aktuell gewordenen Gravitationsmessungen.<sup>263</sup>

Boys hatte nicht die klassische Universitätsausbildung durchlaufen, sondern an der Royal School of Mines in London – die gerade erst in ein neues Gebäude in der Exhibition Road in South-Kensington umgezogen war – ein Studium des Bergbaus und der Mineralogie absolviert. Sein Interesse an der Physik war dort von dem mit dem Aufbau des neuen Instituts beschäftigten Guthrie geweckt worden. Als Boys nach Beendigung seines Studiums eine Tätigkeit in einem Bergbauunternehmen aufgenommen hatte, holte ihn Guthrie an sein Institut zurück. Auf der Stelle eines »demonstrators« widmete sich Boys der Entwicklung neuer Messungsinstrumente und erregte mit der Konstruktion eines mathematischen Integrierinstruments auch gleich Aufmerksamkeit.<sup>264</sup> Größeres Interesse fand jedoch seine Entwicklung eines als »radiomicrometer« bezeichneten hochempfindlichen Instruments für die Messung extrem schwacher Wärmestrahlung. Er hoffte, damit nicht nur die Wärmestrahlung einer mehr als einer Meile entfernten Kerze messen zu können, sondern sogar die mit einem Teleskop fokussierte Wärme von einzelnen Bereichen der Mondscheibe.

Das Herzstück seiner Konstruktion bildete ein auf Torsion beanspruchter Aufhängungsfaden, bei dem sich die Proportionalität zwischen Rückstellkraft und Drehwinkel dauerhaft als besonders genau erwiesen hatte. Nach Versuchen mit Fäden aus Seide, verschiedenen Metallen und auch aus Glas hatte er entdeckt, dass die in nicht kristalliner Form erkaltende Schmelze aus Siliziummineralien zu einem extrem dünnen Faden mit beinahe idealen Eigenschaften ausgezogen werden konnte. Dieser erwies sich als äußerst elastisch und stärker als ein Stahlfaden derselben Dicke – wobei ein solcher damals gar nicht hätte hergestellt werden können. Dabei beeindruckte Boys seine Fachkollegen vor allem mit seiner eigenwilligen Methode zum Ausziehen des Fadens. Er klebte die Schmelze an den Pfeil für eine spezielle Armbrust, der beim Abschuss einen so dünnen Faden auszog, dass er selbst mit dem Mikroskop kaum erkennbar war.<sup>265</sup> Auf der Suche nach be-

<sup>263</sup> Rayleigh, *Boys*, 1944, S. 778.

<sup>264</sup> Boys, *Integrating-machine*, 1881. Im Londoner Science Museum werden neben dem »Integrator« (Inv.-Nr. 1885–1887) auch zwei Torsionswaagen (Inv.-Nr. 1891–1899 und 1931–1942) und ein Pfeil zum Ausziehen des Quarzfadens (1931–251/2) von Boys aufbewahrt.

<sup>265</sup> Rayleigh, *Boys*, 1944, S. 773.

sonders anspruchsvollen Anwendungen für die herausragenden Torsionseigenschaften stieß er auf den klassischen Versuch von Cavendish. Mitgespielt haben könnte dabei auch der Umstand, dass der erwähnte, für den Aufbau des Labors in Cambridge so wichtige siebte Lord Cavendish auch bei der Neuorganisation der Royal School of Mines eine zentrale Rolle gespielt hatte.

Boys war nicht der erste, der den damals schon historischen Versuch Cavendishs mit einer neuen Version der Torsionswaage aufgriff. Schon 1837 war er von dem Physikprofessor an der Bergakademie im sächsischen Freiberg, Ferdinand Reich (1799–1882) und 1842 von dem englischen Astronomen Francis Baily (1774–1844) wiederholt worden. Bereits erwähnt wurden die von der Académie des Sciences unterstützten Messungen, die von den französischen Physikern Jean-Baptiste Baille und Marie Alfred Cornu seit 1873, zeitgleich mit den Wägungen von Jolly und Poynting, mit einer weiterentwickelten Torsionswaage in einem Keller der Ecole Polytechnique in Paris durchgeführt wurden. Auch wenn sie, wie bereits zitiert, für die Proportionalkonstante in Newtons Gesetz keine spezielle Bezeichnung einführten, so benannten sie deren wertmäßige Bestimmung doch klar als Problem von großer Bedeutung für die Astronomen und auch für die Physiker, »surtout au point de vue des mesures absolues«. Auch bei ihnen zogen sich die vorbereitenden Einschätzungen der störenden Einflüsse und deren Reduzierung hin, bevor sie darüber 1878 mehrere kurze Berichte publizierten. Als prominentes Mitglied der Académie des Sciences wurde Cornu 1881 zur Mitarbeit im CIPM delegiert, wo er dann auch mit Foerster und Thiesen zusammenarbeitete.<sup>266</sup>

Aus der Sicht von Boys hatten Baille und Cornu den eigentlich weiterführenden Weg mit ihrer Entscheidung zur Verkleinerung der Apparatur gewiesen. Dies war keineswegs trivial, denn die Relationen zwischen den Ausmaßen des Waagbalkens, den verwendeten Massen, vor allem jedoch der Rückstellkraft des Fadens für die Aufhängung, mussten so dimensioniert werden, dass das Einschwingen beobacht- und messbar blieb. Eine deutliche Verkleinerung der Anordnung von Cavendish war deshalb bisher kaum möglich erschienen. Nun setzte Boys darauf, dass sein extrem dünner Quarzfaden die Lösung für das entscheidende Problem bot, das in der auf einen extrem schwachen und trotzdem zum Drehwinkel exakt proportionalen Rückstellkraft des Aufhängefadens bestand. Sie bestimmte auch die Einschwingzeit des Waagbalkens, die bei Cavendish länger als 7 Minuten gedauert hatte. Boys wählte für die Dimensionierung seiner Apparatur 3 Minuten und reduzierte sie für ein kleines Demonstrationsmodell auf 80 Sekunden.<sup>267</sup> Dafür verkürzte er den bei Cavendish 180 cm (6 feet) langen Waagbalken auf lediglich 2 cm (0,9 inch), und realisierte ihn mit einem Spiegel, der das Licht der inzwischen verfügbaren elektrischen Lampe auf eine etwa 7 m (23 feet) entfernte Skala reflektierte.

<sup>266</sup> Reich, *Neue Versuche*, 1852, S. 383f. Siehe auch: Cornu/Baille, *Détermination*, 1873. Cornu/Baille, *Etude*, 1878. Cornu/Baille, *Mesure*, 1878. Cornu/Baille, *Influence*, 1878.

<sup>267</sup> Rayleigh, *Boys*, 1944, S. 776f.

Nachdem Boys mit seiner 1889 fertiggestellten, bisher kleinsten Torsionswaage nicht zufrieden war, publizierte er die Mitteilung, dass er schon Anfang 1890 auf bessere Ergebnisse hoffe.<sup>268</sup> Sein im Mai 1894 bei der Royal Society eingereichter umfassender Bericht wurde im Oktober veröffentlicht.<sup>269</sup> Ein halbes Jahrhundert später sollte in einem Nachruf der Royal Society erklärt werden, dass weder seine Methode noch sein Ergebnis inzwischen wesentlich verbessert hätten werden können.<sup>270</sup>

Auch die Kaiserliche Akademie der Wissenschaften in Wien und die Ungarische Akademie der Wissenschaften (Magyar Tudományos Akadémia) in Budapest veröffentlichten jetzt Berichte über Projekte zur Gravitationsmessung, die zur gleichen Zeit wie das Berlin-Spandauer Projekt geplant und durchgeführt worden waren. Das eine, auf das sich dann auch Krigar-Menzel und Richarz in ihrem Abschlussbericht bezogen, war von dem im hessischen Neustadt bei Marburg geborenen, dem Jesuitenorden angehörenden Astronomen, von ihnen als »Pater« titulierten Carl Braun (1831–1907) unternommen worden. Dieser hatte nach einem Studium an der Gregorianischen Universität in Rom und in Paris seit 1878 das Erzbischöfliche Haynald-Observatorium im ungarischen Kalocsa geleitet und sich seit 1884 im böhmischen Jesuitenkloster Mariaschein als Privatgelehrter betätigt.<sup>271</sup> »In den Jahren 1888 bis 1896 habe ich eine sehr mühevollen Arbeit ausgeführt, um die Gravitationskonstante, und damit die mittlere Dichte der Erde, welche bis in die letzte Zeit kaum als auf 1 Proc. genau bekannt angesehen werden konnten, mit einer grösseren Genauigkeit, wo möglich bis auf 1 pro Mille, sicher zu bestimmen,« teilte er in seinem abschließenden umfassenden Bericht mit, den er am 11. Juni 1896 der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Klasse der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien vorlegte – vier Monate bevor Krigar-Menzel und Richarz ihren ersten kurzen Abschlussbericht der Berliner Akademie präsentierten. Sein Bericht wurde im Folgejahr publiziert und konnte von ihnen während der Abfassung ihres ausführlichen Berichts auch noch studiert werden.

Über seine Motivation teilte Braun mit, dass er diese Arbeit hauptsächlich unternommen habe, weil ihn seine Schwerhörigkeit hinderte, seine »Thätigkeit als Physik-Lehrer fortzusetzen, oder in anderer Weise eine gedeihliche Wirksamkeit zu entfalten«, und weil er »ein lebhaftes Verlangen hegte«, seine »letzten Jahre in einer für die Wissenschaft nützlichen Weise auszufüllen«. Die besondere Thematik habe er gewählt, weil er »für feine Messungen durch vieljährige Übung einiges Geschick erlangt zu haben glaubte« und weil er »auch einige für dieselbe vor-

268 Boys, *Cavendish Experiment*, 1889.

269 Boys, *Newtonian Constant*, 1895.

270 Rayleigh, *Boys*, 1944, S. 778.

271 Mariaschein ist heute mit dem tschechischen Namen Bohosudov Teil der Stadt Krupka an der tschechisch-deutschen Grenze.

theilhafte Gedanken gefasst hatte«, die er »gern realisiren wollte«. Während er auf die Berichte von Jolly, Poynting und Boys bereits explizit Bezug nehmen konnte, standen die Ergebnisse aus dem Berlin-Spandauer Projekt noch aus.<sup>272</sup>

Schon nach seinen ersten um 1886 angestellten Überlegungen und Vorstudien und noch ohne Kenntnis der gleichzeitig stattfindenden Versuche von Boys in England hatte er sich für die Torsionswaage und gegen die von ihm als »Hebelwaage« bezeichnete Balkenwaage entschieden, weil die Versuche damit »grössere Schwierigkeiten bieten, viel kostspieliger sind und doch nur eine weit geringere Genauigkeit in Aussicht stellen«. Er habe aber auch »Methoden verfolgt, welche in mancher Hinsicht von den seither befolgten abweichen«. So installierte er sein Instrument im Vakuum, weil es ihm damit möglich wurde, »die Versuche im Zimmer auszuführen, und doch die fatalen, durch Luftströmungen bewirkten Störungen weit vollständiger zu vermeiden, als es nach der seitherigen Methode in tiefen Kellern oder Schächten möglich war«. Als weitere Besonderheit führte er an, dass er »außer der üblichen ›Deflexionsmethode‹ auch eine ›Oscillationsmethode‹ zur Ausführung brachte, welche darauf beruht, dass durch die Anziehung von Massen gegen den Arm der Drehwaage die Schwingungsdauer geändert wird«. Diese Methode sei jedoch nur dann vorteilhaft, »wenn die Dauer T einer ganzen Schwingung mindestens 15 Minuten beträgt«. Deshalb hätte sie »mit den seither verwendeten Apparaten, bei denen T nur etwa 5 bis 8 Minuten betrug, nicht mit Erfolg« ausgeführt werden können. Bei seinem Apparat betrage T »genau 1292 sec.« (das sind 21 min. 32 sec.), was sich dann auch bewährt habe.<sup>273</sup>

Nachdem ihm für die ersten Vorarbeiten die erforderlichen »möglichst dünnen Suspensionsdrähte« von L. Hüttlinger in Schwabach bei Nürnberg<sup>274</sup> in vorzüglicher Qualität geliefert worden seien – »drei Rollen gratis! aus Liebe zur Wissenschaft«, wie er in Klammer hinzufügte – habe er deren Tragfähigkeit bestimmt und Vorberechnungen durchgeführt. Da sich »durchwegs günstige Aussichten« gezeigt hätten, habe er Ende 1887 mit der Ausführung seines Plans begonnen. Dass er selbst darauf gekommen sei, den »empfindlichsten Theil des Apparats in Vacuum aufzustellen« und diese Idee nicht von Boys »entlehnt« habe, könne er mit dem Datum der Bestellrechnung für die »Glocke mit Glasteller« belegen, teilte er mit.<sup>275</sup>

<sup>272</sup> Braun, *Drehwaage*, 1896. Braun, *Gravitations-Constante*, 1897.

<sup>273</sup> Braun, *Gravitations-Constante*, 1897, S. 273.

<sup>274</sup> »Die Firma Hüttlinger betrieb seit 1778 in Roth eine Fabrikation von leonischen [aus Drahtgeflechtem bestehende] Waren und Eisendrähten. Gründer war der Schwabacher Johann Leonhard Hüttlinger (1752–1822). Diese Firma wurde 1852 in das Gebäude an der Rathausgasse in Schwabach verlegt. Im Jahre 1981 ging die Firma ›Joh. Leonh. Hüttlinger, Draht- und Federnfabrik‹ von Fritz Hüttlinger auf den letzten Besitzer Hans Leo Hüttlinger über. Nach dem wirtschaftlichen Niedergang der Firma in den 1990er Jahren standen die Gebäude der Fabrikation lange leer. Durch Initiative privater Investoren wurde 2007 der Gebäudekomplex umfassend renoviert und als Einkaufs-, Wohn- und Gastronomiezentrum wiedereröffnet.«, [https://de.wikipedia.org/wiki/Das\\_Hüttlinger](https://de.wikipedia.org/wiki/Das_Hüttlinger) (21.8.2018).

<sup>275</sup> Er bezog sich auf Boys, *Cavendish Experiment*, 1889, S. 159.

Zu den bekanntgewordenen Messungen mit der Balkenwaage oder anderen Instrumenten, bei denen »die Gravitationseffecte in directem Vergleich mit der Schwere bestimmt werden sollen«, erklärte er, dass davon nach seinen ausführlichen Genauigkeitsbetrachtungen »für die Bestimmung der Gravitationsconstante nichts erspriessliches zu hoffen« sei. »Was in dieser Hinsicht von Prof. Poynting geleistet wurde«, sei »so bewundernswerth, dass man kaum hoffen kann in dieser Richtung noch erheblich weiter zu kommen. Und dennoch sind die von ihm erzielten Resultate weit entfernt, eine grosse Genauigkeit aufzuweisen.«<sup>276</sup> Dasselbe gälte für die von Jolly ausgeführten »feinen Wägungen« und auch »für die sehr interessanten Arbeiten von Wilsing«.<sup>277</sup> Entsprechend gering dürften auch seine Erwartungen an die noch ausstehenden Ergebnisse aus der Spandauer Zitadelle gewesen sein.

Braun dürfte damals nicht allein gestanden haben, wenn er abschließend urtheilt: »Nach allen diesen Rechnungen und nach den von anderen Physikern, namentlich von Prof. C. V. Boys geleisteten vortrefflichen Arbeiten<sup>278</sup> könnte man nun denken, dass die hier gestellte Aufgabe richtig und genau gelöst und diese Sache erledigt sei. Das scheint nun aber in aller Strenge doch nicht der Fall zu sein. [...] zunächst sind die Gründe, welche für die Richtigkeit des Gravitationsgesetzes sprechen, weit entfernt, eine absolute Genauigkeit desselben zu beweisen, und andererseits gibt es auch gute Gründe, welche einen Zweifel rechtfertigen, und zwar sowohl hinsichtlich der Factoren  $M$  und  $m$ , als des Factors  $1/r^2$ .<sup>279</sup> Es ist nämlich nicht unwahrscheinlich, dass für infra-mikroskopische Distanzen die Anziehung stärker sei, als es der Formel entspricht. Denn mit dieser Annahme würde eine Aussicht eröffnet, dass auch die Molecularkräfte auf die Gravitation zurückgeführt werden könnten, so dass die etwas unnatürlich scheinende Nothwendigkeit, mehrere heterogene Anziehungskräfte annehmen zu müssen, entfiel; – und zweitens nachdem die einzige einigermassen haltbare mechanische Erklärung der Gravitation diese auf Stösse der Ätheratome zurückführen muss, scheint es ganz unausweichlich, dass für enorm grosse Massen die Attraction kleiner sein müsse, als die Formel angibt.« Seine Schlussfolgerung lautete dann auch: »Ob man in dieser Frage jemals zu einem sicheren Aufschluss gelangen werde, scheint sehr zweifelhaft.«<sup>280</sup>

Eine andere, sich ebenfalls über Jahre erstreckende Kette von Versuchen fand im Königreich Ungarn statt, das sich als Teil der Donaumonarchie eine weitreichende Eigenständigkeit erkämpft hatte, die auch den Wissenschaftsbetrieb einbezog. Dort beschäftigte sich der im damaligen Pest – seit 1873 Teil von Buda-

<sup>276</sup> Hier verwies er auf: Poynting, *Determination*, 1892.

<sup>277</sup> Braun, *Gravitations-Constante / Akademie der Wissenschaften*, 1897, S. 187 und 257.

<sup>278</sup> Er bezieht sich auf Boys, *Newtonian Constant of Gravitation / Royal Society*, 1895.

<sup>279</sup> Mit  $M$  und  $m$  bezeichnete Braun die beiden sich anziehenden Massen, zwischen deren Schwerpunkten der Abstand  $r$  besteht.

<sup>280</sup> Braun, *Gravitations-Constante / Akademie der Wissenschaften*, 1897, S. 257.

pest – als Sohn eines Ministers in der revolutionären Regierung des Lajos Kossuth (1802–1894) geborene Loránd Eötvös (1848–1919) seit 1886 mit Messungen der Gravitationskraft. Eötvös hatte eine außerordentlich breite Bildung erfahren, in Heidelberg und Königsberg auch bei Kirchhoff und Helmholtz studiert, und war bereits mit 23 Jahren Professor für theoretische Physik an der Universität von Budapest geworden, die heute nach ihm benannt ist. Nachdem er seine Erkenntnisse »von Zeit zu Zeit« der ungarischen Akademie mitgeteilt hatte, reichte er im Juli 1896 – einen Monat nach dem Abschlussbericht von Braun bei der Wiener Akademie und drei Monate vor jenem von Krigar-Menzel und Richarz an die in Berlin – einen zusammenfassenden Artikel in deutscher Sprache über die Ergebnisse seiner »nun seit acht Jahren über Gravitation und Erdmagnetismus angestellten ausgedehnten Untersuchungen« bei den *Annalen der Physik und Chemie* in Berlin ein, um sie »weiteren Kreisen zugänglich zu machen«. Darauf bezogen sich dann auch Krigar-Menzel und Richarz in ihrem Abschlussbericht, nachdem sie die vorausgegangenen Berichte in ungarischer Sprache kaum wahrgenommen gehabt haben dürften.<sup>281</sup>

Eötvös teilte seinen deutschsprachigen Lesern mit, dass in der Budapester Universität »Beobachtungen über Gravitation« seit 1888 »fast alltäglich« geworden seien und dass er seine Hörer in den Vorlesungen »mit der gegenseitigen Anziehung der Massen« bekannt mache.<sup>282</sup> Er betonte auch, dass seine hochgenauen und komplexen Messapparate in der von Direktor Ferdinand Süss (1848–1921) geleiteten »staatlichen mechanischen Lehrwerkstätte in Budapest« entwickelt und angefertigt worden seien. Der in Marburg geborene Süss war dort als Mechaniker an der Universität tätig gewesen, bevor er 1876 vom ungarischen Kultusminister zur Einrichtung einer Werkstatt für Instrumentenbau an die neugegründete Universität von Kolozsvár – deutscher Name Klausenburg, rumänischer Cluj-Napoca – berufen worden war und seit 1884 die Budapester Werkstatt leitete. Heute gilt er als Begründer der Mechanikerausbildung und der feinmechanischen Industrie in Ungarn.<sup>283</sup>

Eötvös war durch den Bericht von Jolly und die neueren Pendelmessungen zur Beschäftigung mit dieser Thematik angeregt worden, hatte sich dann für die von ihm als »Coulombsche Waage« bezeichnete Torsionswaage entschieden und sie ebenfalls in der ihm als geeignet erscheinenden Weise modifiziert. Nach dem Erscheinen des Berichts von Boys stellte er einige Versuche mit Quarzfäden an, blieb

<sup>281</sup> Eötvös, *Untersuchungen*, 1896.

<sup>282</sup> Eötvös, *Untersuchungen*, 1896, S. 368 und 385. In der ständigen Physik-Ausstellung des Deutschen Museums ist eine von der Firma Süss-Nandor in Budapest serienmäßig gefertigte Waage des Eötvös-Typs aus dem Jahr 1933 zu sehen. (Inv.-Nr. 65450). Mitteilung von J. G. Hagmann 4.5.2016.

<sup>283</sup> S. Jeszenszky: Süss, Nándor (Ferdinand), Feinmechaniker, Optiker und Unternehmer. [http://www.biographien.ac.at/oeb1/oeb1\\_S\\_42/Suess\\_Nandor\\_1848\\_1921.xml](http://www.biographien.ac.at/oeb1/oeb1_S_42/Suess_Nandor_1848_1921.xml) (11.7.2018).

jedoch, da diese in seinem transportablen Apparat zu leicht brachen, bei Fäden aus Platin. Dabei streckte er die 100 bis 150 cm langen Fäden mit einem Durchmesser von nur 1/25 mm »schon Monate« vor der Messung durch angehängte Gewichte.

Im Unterschied zu König, Richarz und Krigar-Menzel, aber auch zu Poynting und Boys, die sich längst anderen Fragen widmeten, verfolgte Eötvös, der in den Jahren 1894/95 für einige Monate ein Ministeramt übernahm,<sup>284</sup> die Fragen der Gravitation und die sich daraus ergebenden weitreichenden Konsequenzen auch weiterhin. Er habe in »jahrzehntelangen Versuchen« die Präzisionsbestimmung der Identität von »träger« und »schwerer« Masse zu »einer Art wissenschaftlicher Lebensweise« erhoben, urteilt Albrecht Fölsing (geb. 1940) in seiner umfassenden Biografie Albert Einsteins. Die konsequente Interpretation dieses Gegensatzes als Identität sollte für Einstein zwei Jahrzehnte später den Weg zu seiner allgemeinen Relativitätstheorie eröffnen.<sup>285</sup>

### Beurteilung der anderen Messungsprojekte durch Krigar-Menzel und Richarz

König und Richarz hatten sich bei der Planung ihres Projekts vor allem auf die Erkenntnisse von Jolly bezogen und Poyntings ersten Bericht lediglich zur Kenntnis genommen.<sup>286</sup> Nachdem dessen zweiter detaillierter Abschlussbericht dann 1892 auch gleich in deutscher Übersetzung erschienen war, hatte er Krigar-Menzel und Richarz bei ihren gerade beginnenden Wägearbeiten eine zweite fundierte Orientierung geboten – nicht zuletzt bei der Entscheidung für ihre neue Vorgehensweise. In ihrem Abschlussbericht kommentierten sie die beiden Vorgängerprojekte: Während sich bei Jollys Versuchsanordnung »besonders an den 21 m langen Drähten der Einfluss auch geringer Luftströmungen sehr stark geltend« gemacht »und stets eine erhebliche Temperaturdifferenz zwischen dem Orte der oberen und der unteren Wageschalen« geherrscht habe, sei Poyntings Anordnung »von solchen störenden Einflüssen bei den weit kleineren Dimensionen seines Apparates fast ganz frei« gewesen. Als »Apparat« bezeichneten sie offensichtlich dessen gesamten Messungsaufbau, bei dem die Manipulationen der Gewichte auf den Waagschalen auf gleichbleibendem Höhenniveau erfolgten. Da jedoch »die zu messende Gravitationswirkung« bei Jolly »etwa das 60-fache von derjenigen Poynting's« betragen habe, seien »die Bestimmungen Jolly's und die ersten Poynting's vom Jahre 1878 ungefähr von gleicher Sicherheit«. Dagegen sei das von Poynting bei seinen 1891

284 Vgl. <http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Eotvos.html> (11.7.2018).

285 Im Abschlussbericht wird zitiert: Eötvös, *Untersuchungen*, 1896, S. 354. Mit Kommentar: »Vorläufiges Resultat  $G = 6,65 \cdot 10^{-8}$  (woraus in derselben Weise wie S. 111 unserer Arbeit  $\Delta = 5.53$ ).« Fölsing, *Einstein*, 1995, S. 345.

286 Dass sie ihn zur Kenntnis genommen hatten, geht aus ihrem im Februar 1885 eingereichten Artikel für die *Annalen* hervor. König/Richarz, *Neue Methode*, *Annalen*, 1885.

durchgeführten Messungen angewandte Verfahren mit der großen Waage »erheblich sicherer« gewesen.<sup>287</sup>

Sie widersprachen jedoch entschieden Poyntings Feststellung, dass mit einer »gewöhnlichen Waage« die Genauigkeit der Torsionswaage »ganz unerreichbar« sei. Poynting hatte 1892 nach Abschluss seiner Messungen erklärt, dass er zum Zeitpunkt der Beantragung seiner Waage bei der Royal Society noch nicht gewusst habe, dass die von den Luftströmungen verursachten Fehler mit der Größe des Messapparats zunehmen. Er habe es sogar als »sehr vorteilhaft« angesehen, die Waage besonders groß zu machen, »da man dann Reiter von einem Gewicht benutzen konnte, welches hinreichend groß war, um genau messbar zu sein.«<sup>288</sup> Krigar-Menzel und Richarz teilten diese Einsicht nicht und bezogen sich dabei auch auf die inzwischen erschienenen Berichte von Boys und Braun: »Die Berechnung des wahrscheinlichen Fehlers lediglich aus der Übereinstimmung der Messungen der speciellen Größe (Ablenkung, Änderung der Schwingungsdauer), welche die Gravitationswirkung angibt, scheint uns bei Braun (wie auch bei Boys) für das Resultat nicht maßgebend zu sein. Bei allen früheren Gravitationsmessungen«, – offensichtlich denen von Jolly und Poynting, aber auch von Thiesen, Scheel und Diesselhorst – »unsere eingeschlossen, lassen sich alle anderen Größen, Massen und Längen weit sicherer angeben als die eine, durch welche die Attraction gemessen wird, so daß es berechtigt ist, den wahrscheinlichen Fehler der letzteren Größe direct auf das Endresultat zu übertragen. Bei Braun (und bei Boys) handelt es sich jedoch um kleine Massen, die in kleinem Abstände auf einander gravitiren, deren Wirkung aber in Folge günstiger Anordnung sehr sicher meßbar ist. Hier kommt die Unsicherheit der Massen- und Längenbestimmungen sehr wohl in Betracht; ja – kleine Asymmetrien oder Inhomogenitäten können die Sicherheit des Resultates ganz erheblich gefährden.«<sup>289</sup>

Trotzdem wollten sie die »von Anderen aufgeworfene Frage, ob Drehwaage oder gewöhnliche Wage – das principiell analoge Wilsing'sche Pendel einbegriffen – das bei Gravitationsmessungen überlegene Instrument sei«, nicht abschließend erörtern. Diese Frage lasse sich »durch die bloße Angabe bez. Schätzung des wahrscheinlichen Fehlers bei Braun und Boys«, vor allem jedoch wegen »der großen

<sup>287</sup> Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 3f. und S. 115. Dort Literaturliste zu Poynting: »22. J. H. Poynting. Andere Art der Anwendung der gew. Wage. Proc. Roy. Soc. London, vol. 28, 1878, p. 2. Phil. Trans. vol. 182, 1891, A. p. 565. Physikal. Revue, Stuttgart, 1, 1892, S. 456, 561, 700. Naturw. Rundschau 1893, S. 625. Endgültiges Resultat von Poynting:  $\Delta = 5,4934$ .«

<sup>288</sup> Als »Reiter« werden Zusatzgewichte von minimalem Gewicht aus gebogenem Draht bezeichnet, die zur Feinjustierung an beliebigen Stellen auf den Waagbalken aufgesteckt werden können.

<sup>289</sup> Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 109–113. Dort wird zu Eötvös mitgeteilt: »Eötvös, Drehwaage. Wied. Ann. 59. 1896, S. 354. Vorläufiges Resultat  $G = 6,65 \cdot 10^{-8}$  (woraus in derselben Weise wie S. 111 unserer Arbeit  $\Delta = 5,53$ ).«

Vervollkommnungsfähigkeit der gewöhnlichen Waage« derzeit nicht entscheiden.<sup>290</sup> Im Rückblick aus dem begonnenen 21. Jahrhundert erscheint diese Einschätzung durchaus berechtigt, hatte man doch inzwischen bei neuen Projekten sowohl auf das Prinzip der Drehwaage als auch auf das der Balkenwaage zurückgegriffen.

### Vorschlag für ein weiterführendes Projekt

Bereits in ihrem ersten an die Akademie eingereichten »kurzen Überblick« vom Oktober 1896 teilten Krigar-Menzel und Richarz mit, dass sie mit den Ergebnissen ihres Projekts nicht wirklich zufrieden waren und dass sie deshalb »eine Wiederholung der Versuche für wertvoll« hielten. Da sie nun »ganz genau« angeben könnten, »welche Umstände der Sicherheit unseren Wägungen eine Grenze setzten« und so die Fehlerquellen nun vermeiden könnten, sei »eine erheblich größere Sicherheit der Wägungen mit Bestimmtheit zu erwarten«. Zwar sei die Übereinstimmung ihrer Messungsergebnisse »der mittleren Erddichte« mit denen von Boys und Poynting »weit größer« als die bisher bestehende, jedoch sei ihre Sicherheit »noch lange nicht diejenige, welche von Fundamental-Constanten verlangt und z.B. beim Ohm oder dem mechanischen Wärmeäquivalent erreicht wird«. Sie hätten deshalb auch die Geschützigießerei gebeten, die Bleiquader vorerst noch nicht einzuschmelzen, was diese bis zum Mai 1897 auch zugesagt habe. Allerdings könnten sie nicht beurteilen, ob eine derartige Wiederholung »nicht vielleicht in den Rahmen der Aufgaben anderer wissenschaftlicher Staatsinstitute hineinpassen« würde. Eine handschriftliche Randbemerkung eines der Leser in der Akademie »P. T. Reichsanstalt fürs Erste reicht!«, die sich offenbar auf die erwähnten Messungen in der PTR von Thiesen, Scheel und Diesselhorst bezog, lässt ahnen, dass dieser Vorschlag dort wenig Resonanz hervorrief.<sup>291</sup>

Da sie nicht unbedingt mit einer Zustimmung rechneten, baten sie die Akademie auch gleich um eine Entscheidung über die Frage, was aus den Apparaten, »Utensilien und Materialien«, die Eigentum der Akademie seien, nun werden sollte. Auch würde sich das so aufwändig eingerichtete »Beobachtungslocal« für »manche andere Präcisions-Messungen« sehr gut eignen und ohne den Ver-tauschungsmechanismus könne auch die »eigentliche Waage« im Laboratorium »als Präcisionswaage« Verwendung finden.<sup>292</sup>

<sup>290</sup> Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 113.

<sup>291</sup> Bericht Richarz u. Krigar-Menzel vom 31. Okt. 1896. Archiv BBAW. Wissenschaftliche Unternehmungen der phys.-math. Klasse 1884–1910. II–VII, 111.

<sup>292</sup> Bericht Richarz u. Krigar-Menzel vom 31. Okt. 1896. Archiv BBAW. Wissenschaftliche Unternehmungen der phys.-math. Klasse 1884–1910. II–VII, 111.

In der bereits ausführlich zitierten persönlich gehaltenen Darstellung des Projektverlaufs erklärte Krigar-Menzel, dass der wahrscheinliche Fehler der ermittelten Erddichte, der mit  $\pm 0,009$  und damit »0,16 Proc. des ganzen Werthes« betrage, zwar »durchaus den gestellten Erwartungen« entspreche, dass sich diese Genauigkeit »bei Vermeidung der oben aus einander gesetzten Uebelstände des Apparates wohl noch beträchtlich vermehren lassen würde«. Jedoch war die abschlägige Entscheidung zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vom März 1897 offensichtlich bereits gefallen, denn er teilte auch sein Bedauern mit, »dass keine Aussicht vorhanden ist, die Versuche mit Benutzung der noch vorhandenen, brauchbaren Mittel, namentlich des sorgfältig in Formen gegossenen Bleies, wiederholt zu sehen.«<sup>293</sup>

Nachdem ihr Vorschlag zu einer Fortführung des Projekts bei der Akademie auf Ablehnung gestoßen war, appellierten sie in ihrem großen Abschlussbericht an die gesamte wissenschaftliche Öffentlichkeit. Dort beendeten sie den Abschnitt über die »Abnahme der Schwere mit der Höhe« mit der Empfehlung, dass man »den alleinigen Einfluss der abnormen Erdschichten isoliren« könnte, »wenn man den ersten der störenden Einflüsse dadurch vermeiden würde, dass man die Versuche in einem auf flachem Felde gelegenen, entweder sehr leicht, oder in regelmäßiger, berechenbarer Form gebauten Beobachtungslocale anstellte. Es würde von Interesse sein, den alsdann beobachteten Werth zu vergleichen mit demjenigen, der sich aus den durch geologische Forschung ermittelten localen Anomalien der Massenvertheilung ergeben würde.«<sup>294</sup>

293 Richarz/Krigar-Menzel, *Gravitationsconstante und mittlere Dichtigkeit der Erde*, 1897, S. 160.

294 Richarz/Krigar-Menzel, *Bestimmung der Gravitationsconstante*, 1898, S. 110.

## Ein wenig spektakuläres wissenschaftliches Projekt – eine wenig spektakuläre wissenschaftliche Karriere

### Militarisierung der aufstrebenden Industriegesellschaft

Dass das Interesse an der messtechnischen Auseinandersetzung mit der Gravitation nach der Veröffentlichung der erwähnten Abschlussberichte abklang, spricht dafür, dass man die von der damaligen Technologie gesetzten Grenzen als ausgelotet betrachtete. Wie sich zeigte, kamen die Physiker in ihrer Beschäftigung mit den neuen und weitreichenden Fragen, die in ihrer Disziplin nun in schneller Abfolge aufgeworfen wurden, auch mit der erreichten Genauigkeit des Werts der Gravitationskonstante und der mittleren Erddichte gut zurecht.<sup>295</sup> Die tiefgreifende Neugestaltung des Weltbilds der Physik, die im folgenden Jahrhundert zur vollen Entfaltung kommen sollte, hatte bereits begonnen. Als nicht weniger weitreichend sollten sich auch die Veränderungen in Gesellschaft und Politik erweisen, die sich in den gleichen Jahren vollzogen. Auch sie berührten die hier betrachteten Messungsprojekte und die individuellen Situationen der Protagonisten.

Während auf der globalen Bühne die Expansion der Großmächte in Asien und Afrika zu anhaltenden Spannungen und Kriegen um Kolonialbesitz und Einflusssphären führte, war das deutsche Kaiserreich in jene Epoche eingetreten, die im Rückblick als die »wilhelminische« bezeichnet wird und die immer stärker durch die Planung, Propagierung und Realisierung einer umfassenden Aufrüstung bestimmt wurde. Zwangsläufig veränderte sich damit auch die Situation in der »Militärstadt Spandau« mit ihrer Zitadelle, den Kasernen und ihren nun schnell wachsenden Waffenfabriken.<sup>296</sup> Schon seit 1890 plante das Kriegsministerium eine »beispiellos anspruchsvolle« neue Heeresvorlage, um »endlich die ›deutsche Wehrkraft‹ voll auszuschöpfen«, wie es der Historiker Wehler ausdrückte. Seit 1892 richtete der neue Chef des Großen Generalstabs Alfred von Schlieffen (1833–1913) die Planung auf einen Zweifrontenkrieg gegen Frankreich und Russland aus, der mit gigantischen Vernichtungsschlachten entschieden werden müsse und deshalb eine entsprechende Heeresaufrüstung erfordere – wozu dann auch das Blei aus der Zitadelle benötigt werden sollte.

Wenige Jahre nachdem Schlieffens Richtlinie akzeptiert worden war, ergänzte sie der ebenfalls neue Staatssekretär im Reichsmarineamt Alfred von Tirpitz (1849–1930) durch seine Definition der an der Zahl und Mächtigkeit der Kanonen zu

<sup>295</sup> Die Liste der damaligen Kollegen Krigar-Menzels, die mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurden, ist eindrucksvoll. Dazu gehörten Planck (1918), Max Born (1882–1970, 1954), Max Laue (1879–1960, 1913 geädelt, 1921), Erwin Schrödinger (1887–1961, 1933), Einstein (1921), James Franck (1882–1964, 1925), Gustav Hertz (1887–1975, 1925). Die Gravitationsmessung spielte bei keinem von ihnen eine Rolle.

<sup>296</sup> Vgl.: Petersen, *Industriebauten*, 1998. Pohl, *Industrialisierung in Spandau*, 1998.

messenden »Flottenmacht als politischem Machtfaktor« gegen das zum zusätzlich drohenden Feind erklärte England. Als modern und zukunftsweisend gilt heute, dass sich seine entschlossenen Maßnahmen nicht auf die militärisch-technologischen Aspekte und die Überzeugungsarbeit gegenüber dem Kaiser und der militärischen Führung beschränkten, sondern dass er die breite Öffentlichkeit mit einer überaus erfolgreichen Flottenagitation aufwühlte, um, wie er erklärte, »Schwung in die Erörterung nationalpolitischer Fragen« zu bringen. Bezeichnenderweise erreichte er damit besonders das Bildungsbürgertum mit seinen Schulen, Universitäten und Akademien.<sup>297</sup> Dass diese Veränderungen auch an dem alten Moltke nicht spurlos vorbeigingen, dessen Unterstützung zwei Jahrzehnte zuvor für die großen wissenschaftspolitischen Projekte so entscheidend gewesen war, bedauerte Foerster in seinen um 1910 verfassten Erinnerungen. Dessen »ursprünglich weltumfassender und hoheitsvoller Intellekt« habe »infolge der heroischen Genialität seiner strategischen Leistungen und Erfolge schließlich nur noch einen eng militärischen Horizont« gehabt.<sup>298</sup>

Auch wenn das Gravitationsmessungsprojekt in der Spandauer Kasematte von diesen Veränderungen nicht unmittelbar betroffen war, so bildeten sie doch den Hintergrund für dessen Situation. Während sich die nationale und internationale wissenschaftliche Szene kaum noch daran erinnerte, sahen sich in der Zitadelle und auch in der expandierenden Geschützgießerei die unterschiedlichsten Militäranghörigen täglich damit konfrontiert.<sup>299</sup> Sie dürften die anhaltenden Ansprüche der zivilen Eindringlinge zunehmend als lästig empfunden haben, während die Autorität des ehemaligen Kronprinzen und kurzzeitigen Kaisers Friedrich III., der in ihren Augen die Bedeutung des Projekts vor allem garantiert hatte, immer stärker in eine verklarte Vergangenheit rückte. Aber auch an anderen Stellen dürften jene Stimmen lauter geworden sein, die auf einen Abschluss des Projekts drängten oder es ganz in Frage stellten.

### Ungewissheiten und Brüche in der Karriere Krigar-Menzels

Weder die sich ankündigenden Veränderungen des wissenschaftlichen Weltbilds noch die wachsende Militarisierung auf der Basis neuester industrieller Produktionstechnologien vereinfachten die Situation des für das Gravitationsmessungsprojekt verantwortlichen und unmittelbar ansprechbaren Wissenschaftlers Krigar-Menzel. Anders als seine Fachkollegen im Universitätsinstitut und auch in der PTR sah er sich mit dem neuen Geist bei Militär und Rüstungsindustrie ständig unmittelbar konfrontiert. In seiner zwiespältigen Situation zwischen Kunst, Musik

<sup>297</sup> Wehler, *Gesellschaftsgeschichte*, 1995, S. 1110f. und 1130f.

<sup>298</sup> Foerster, *Lebenserinnerungen*, 1911, S. 116.

<sup>299</sup> Zur Expansion der Geschützgießerei seit 1890 vgl. Ortenburg, *Geschützgießerei*, 1998, S. 88–90.

und akademischer Physik spiegeln sich aber auch noch ganz andere Gegensätze, die während dieser Jahre in der wilhelminischen Berliner Gesellschaft aufbrachen.

Als König und Richarz den damals gerade zum Doktor Promovierten überredet hatten, sich als »dritter Mitarbeiter« an ihrem Projekt nicht nur zu beteiligen, sondern schon bald auch die Hauptverantwortung zu übernehmen, musste ihm das als vielversprechende Perspektive erscheinen.<sup>300</sup> Obwohl Helmholtz damals bereits aus dem Universitätsinstitut ausgeschieden war, blieb das Projekt auch weiterhin mit seinem Namen und seiner Autorität verknüpft und so hatte Krigar-Menzel seine akademische Zukunft zuversichtlich auf die so vielversprechend erscheinende Tätigkeit in der Spandauer Kasematte festgelegt. Seine Rolle hatte an Bedeutung gewonnen als Richarz wenig später nach Bonn gegangen war und sich König nach einem weiteren Jahr ganz aus dem Projekt zurückgezogen hatte. Allerdings war das im entfernten Spandau betriebene Projekt nun auch nicht mehr im Physikinstitut der Universität verankert.

Der noch 1887 zum Nachfolger von Helmholtz als Institutsdirektor berufene August Kundt dürfte neben seinen eigenen wissenschaftlichen Interessengebieten und zahlreichen Verpflichtungen bei einer ständig wachsenden Studentenzahl wenig geneigt gewesen sein, sich auch noch mit den Problemen in Spandau zu beschäftigen. Offenbar ließ die Gravitationsproblematik aber auch ihn nicht ganz kalt. Weil er »gerne nach neuen Effekten« gesucht habe, sollte ihn Planck in seinem Rückblick aus dem Jahr 1946 als »eine Faradaysche Natur« charakterisieren. So habe er auch die Frage geprüft, »ob das Gewicht eines Kristalls verschieden ist, je nachdem seine Hauptachse vertikal oder horizontal liegt«. Wie es ein weiteres halbes Jahrhundert später der Physikhistoriker Stefan L. Wolff (geb. 1952) sicherlich zutreffend ausdrückte, habe er »nach einer Anisotropie bei der Gravitationswirkung an kristallinen Körpern« gesucht. »Natürlich«, so Planck, seien diese Messungen »sehr diskret behandelt« worden, so dass »nur die Nächststehenden« davon erfahren hätten. Während Planck diesem Kreis offensichtlich angehört hatte, ist offen, ob dies auch für Krigar-Menzel zutraf.<sup>301</sup>

Planck hob den Gegensatz zwischen den beiden Direktoren des Physikinstituts hervor. Gegenüber dem »bedächtigen, jede ihm vorgelegte Frage mit sachlicher Gründlichkeit prüfenden und neben der einen Seite einer Sache stets auch die entgegengesetzte gewissenhaft würdigenden« Helmholtz charakterisierte er Kundt als »feurig, temperamentvoll, sprühend von Witz und Verstand«.<sup>302</sup> Damals längst bekannt und anerkannt waren Kundts Forschungsarbeiten zur Akustik. So hatte er auch seinen Assistenten August Raps (1865–1920) nach dessen Physikstudium in

300 Schreiben König an Akademie 19.11.1889. Archiv BBAW. Wissenschaftliche Unternehmungen der phys.-math. Klasse 1884–1910. II–VII, 111.

301 Planck, *Persönliche Erinnerungen*, 1948/1973, S. 8. Vgl. auch Wolff, *Kundt*, 1992, S. 443.

302 Planck, *Persönliche Erinnerungen*, 1948/1973, S. 8.

Bonn und Berlin 1889 mit einer Arbeit über die Klangerzeugung von Pfeifen und die »objektive Darstellung der Schallintensität« promoviert.<sup>303</sup> Er ermöglichte es dann auch, dass Krigar-Menzel am Universitätsinstitut seine Untersuchungen zur Klangerzeugung mit schwingenden Saiten wieder aufgreifen konnte. In Zusammenarbeit mit Raps wandte dieser nun dessen fotografisches Verfahren zur Aufzeichnung akustischer Schwingungen auf die gezupfte Saite an. Ihren abschließenden Bericht legte Kundt am 8. Juni 1893 der Akademieklasse vor; eine ausführliche Fassung wurde in den *Annalen* veröffentlicht.<sup>304</sup>

Schon 1875 hatte die philosophische Fakultät Kirchhoff aus Heidelberg berufen gehabt, um in der Reichshauptstadt auch der theoretischen Physik als sich noch emanzipierender Teildisziplin zum Durchbruch zu verhelfen. Nach Kirchhoffs Tod im Frühjahr 1889 berief sie den noch jungen Max Planck »als dessen Nachfolger zur Vertretung der theoretischen Physik«, zuerst als Extraordinarius und 1892 als Ordinarius.<sup>305</sup> Während Helmholtz inzwischen an der Universität kaum noch in Erscheinung trat, meldete sich Krigar-Menzel am 24. November 1893 mit der Zustimmung von Planck und Kundt zur Habilitation an. Den Institutsdirektoren lag offenbar einiges daran, dass zur Abdeckung der wachsenden Lehranforderungen bald ein zusätzlicher Privatdozent zur Verfügung stehen würde, denn sie forderten keine besondere Habilitationsschrift. Helmholtz und der Fakultät dürfte aber auch daran gelegen haben, dass seine Autorität gegenüber den Spandauer Militärs auf diese Weise mehr Gewicht erhielt. So wurde Krigar-Menzel nach seiner Probevorlesung zum Thema »Ueber das Verhaeltniss der theoretischen zur experimentellen Physik« am 3. Februar 1894 die Lehrbefugnis erteilt.<sup>306</sup> Planck und Kundt wählten dieses Thema aus seiner eingereichten Themenliste aus und stellten nicht nur den Vorschlag »Reine und temperierte Stimmung vom wissenschaftlichen und vom musikalischen Standpunkte aus« zurück, sondern auch den dritten »Über die neueren Bestimmungen der Gravitationsconstante«, bei dem die Erkenntnisse noch ausstanden.<sup>307</sup>

1894 war auch das Jahr, das Planck später als das »schwarze Jahr [...] der deutschen Physik« bezeichnen sollte. Bedeutete schon der Tod von Heinrich Hertz am 1. Januar einen tiefen Einschnitt, so sollte das Ableben von Kundt am 21. Mai und von Helmholtz am 8. September die Situation der deutschen und insbesondere der

303 Raps, *Schallintensität*, 1889. (Dissertation. Krigar-Menzel hatte bei der öffentlichen Verteidigung die Rolle des ersten Opponenten übernommen.) Zu beachten ist, dass es sich bei dem von Raps verwendeten »Koenigschen Phonautograph« um ein Gerät handelt, das von dem in Paris lebenden Rudolph Koenig (1832–1901) entwickelt wurde, der nicht mit dem hier ansonsten relevanteren Arthur König verwechselt werden darf! Raps, *Luftschwingungen*, 1893, (Habil.schr.).

304 Raps/Krigar-Menzel, *Saitenschwingungen*, 1891. Krigar-Menzel/Raps, *Bewegung gezupfter Saiten*, 1893.

305 Planck, *Persönliche Erinnerungen*, 1948/1973, S. 6.

306 Der Text ist offenbar nicht erhalten.

307 Archiv der HU Berlin, Phil Fak 1220, Blätter 39–49.

Berliner Wissenschaftslandschaft noch stärker verändern.<sup>308</sup> Es war zudem das Jahr, in dem der Minister die Fakultät beauftragte, ein Verfahren gegen den Privatdozenten an Kundts Institut, Leo Arons (1860–1919) wegen Mitgliedschaft und Aktivitäten in der Sozialdemokratischen Partei einzuleiten – wobei sich die Fakultät erfolgreich widersetzte.<sup>309</sup>

Von diesen markanten Ereignissen scheint die zwiespältige persönliche Situation Krigar-Menzels nur wenig berührt worden zu sein. Während er seine wissenschaftlichen Arbeiten auch weiterhin ohne Bezahlung leistete, verfügte er nun als Privatdozent über eine akademisch legitimierte Position an der Fakultät, konnte Vorlesungen halten und dafür immerhin Höergelder beziehen. Vor allem stärkte der neue akademische Grad sein Ansehen beim wilhelminischen Bildungsbürgertum, zumal auch weiterhin etwas vom Glanz des Übervaters Helmholtz auf ihn fiel. Trotzdem blieb er letztlich auf die Unterstützung durch seinen nicht weniger prominenten Onkel Menzel angewiesen. Seine Arbeiten am scheinbar endlosen Projekt in der Zitadelle schleppten sich von einem Jahr ins nächste. Nachdem dann auch nur ein Teil der zusätzlich beantragten Finanzmittel genehmigt wurde, dürfte sich seine Begeisterung für das Projekt, wenn sie überhaupt jemals bestanden haben sollte, doch ziemlich abgekühlt haben. So stellte die Wiederaufnahme seiner musikalisch-physikalischen Untersuchungen im Universitätsinstitut mit dem Rückhalt bei Kundt für ihn wenigstens eine neue Anerkennung der Bedeutung seines ursprünglichen wissenschaftlichen Arbeitsgebiets dar.

Kaum zur Verbesserung der persönlichen Situation des nunmehrigen Privatdozenten dürfte auch die bereits erwähnte Episode mit dem erwähnten »Gehülfen« beigetragen haben, wegen dessen »minderwertiger« Messungen ein ganzes Jahr verloren gegangen war. Darauf bezog sich auch Richarz, als er im Februar 1894 in einem Brief an Helmholtz die »sehr betrübliche Nachricht« aus Spandau mitteilte, dass Krigar-Menzel und er den »Assistenten«, den sie vor einem Jahr »angenommen« hatten, »wegen Unredlichkeit in der Protokollierung der Beobachtungen« hätten entlassen müssen. Er glaube auch nicht, dass sie es »nach dieser Erfahrung« mit einem neuen Assistenten versuchen sollten und rechne damit, deshalb »definitiv Bonn verlassen und nach Berlin übersiedeln zu müssen.«<sup>310</sup> Tatsächlich sollte er dann im Jahr darauf jedoch die erwähnte Professur in Greifswald antreten.

308 Cahan, *Meister der Messung*, 1992, S. 191.

309 Wolff, *Arons*, 2003, S. 338f.

310 Brief Richarz an Helmholtz, Pallanza, 23. Feb. 1894. BBAW NL Helmholtz 373.

### Einblicke in das »kümmerliche Leben« des Privatdozenten Krigar-Menzel

Diesen sicherlich ebenfalls unbezahlten Assistenten oder »Gehülfen«, über den nichts genaueres bekannt ist und bei dem es sich wahrscheinlich um einen Physikstudenten handelte, meinte offensichtlich auch Onkel Menzel als er sich in einem Brief an seinen Neffen vom 2. Juni 1894 auf dessen »neuerliche Aeußerungen über die Begebnisse in Spandau« bezog. Er schrieb dort vom bereits zurückliegenden »Treiben jenes R. – während er Rich. in Italien – Dich in den Armen der Liebe musikeifrig wußte« und mokierte sich über die »wie es doch scheint, lange Entbehrlichkeit« seines Neffen in Spandau, um dann empört festzustellen: »Und von dessen seinen Streichen weiß also weder Helmholtz noch wie es jetzt scheint sonst jemand?! Solch Verschweigen ähnelt sich schon mit Vertuschen oder gar Hehlerei!«<sup>311</sup>

Während sich 1893/94 Richarz offenbar längere Zeit in Italien aufhielt und Krigar-Menzel am Universitätsinstitut mit seinen akustischen Messungen und der Vorbereitung auf seine Habilitation beschäftigt war, hatte der Gehilfe offenbar nicht nur nachlässig gemessen, sondern mit seinen »Streichen« in der Spandauer Kasematte das ganze Projekt in Verruf gebracht. Der Brief zeigt aber auch, dass Helmholtz nach wie vor als zuständige Autorität hinter dem Projekt wahrgenommen wurde. Er hatte sich im Vorjahr auf der Rückfahrt von einer Reise in die USA eine Verletzung zugezogen, sich dann einigermaßen erholt und auch wieder seine Vorlesung gehalten, bis ihn, nur zwei Wochen nachdem Menzel diesen Brief verfasst hatte, ein Schlaganfall zum Abbruch aller Aktivitäten zwang. Einem weiteren sollte er dann am 8. September erliegen.<sup>312</sup>

Menzels angehängte vielsagende Andeutung wirft aber auch ein Schlaglicht auf die persönliche Situation von Krigar-Menzel am Beginn der 1890er Jahre. 1892 hatte er im Haus des Künstlers und gefragten Porträtisten Ludwig Knaus<sup>313</sup> beim Musizieren die norwegische Sängerin Jacoba Elling (1864 – nach 1943, auch Jakoba geschrieben) kennengelernt, die 1889 nach Berlin gekommen war, um ihr Gesangstudium abzuschließen. Nachdem er sie im Frühjahr 1893, offenbar entgegen dem Willen seiner Mutter, geheiratet hatte, sprach diese nicht mehr mit ihm und machte am 4.6.1893 in einem Brief an Jacoba den in ihren Kreisen gepflegten Ehrenkodex drastisch klar: »Glauben Sie wirklich, daß Adolf Menzel seiner sogenannten Schwiegertochter gestatten würde, durch Gesangstunden dem kümmerlichen Leben etwas aufzuhelfen. Oder wünschen Sie, daß der herrliche Onkel mit seinem durch unerhörten Fleiß verdienten Vermögen auch Ihren Hausstand sichert [...]«. <sup>314</sup> Dass diese Art von »kümmerlichem Leben« als fester Bestandteil

311 Keisch/Riemann-Reyher, *Menzel Briefe*, 2009, S. 1098.

312 Cahon, *Meister der Messung*, 1992, S. 191.

313 Von Knaus, der zusammen mit Menzel auch auf Anton von Werners Gemälde der Hofgesellschaft (vgl. Abbildung 12) dargestellt wird, stammt auch eines der bekanntesten Porträts von Helmholtz.

314 Zit. in: Keisch/Riemann-Reyher, *Menzel Briefe*, 2009, S. 1340.

einer Karriere im preußisch-akademischen Bildungskanon galt, aber auch, dass sich im kulturellen Leben Berlins bereits Rebellion dagegen ausbreitete, lässt die anschließende Erklärung der Mutter mit einer Spitze gegen die damals in Berlin aktuellen intellektuellen Impulse aus Norwegen erkennen: »Wir haben ein unüberwindliches Mißtrauen gegen die modernen Damen der Jetztzeit, welche ohne Heimath, ohne Angehörige, aus irgend einem künstlerischen Grunde, in der Welt, in der Gesellschaft herum fliegen; unser ernstes, nur der Pflicht zugewandtes Wesen hat kein Verständniss für solches Frauenleben, Ibsens radikale Freiheitsheldinnen, wie eine Hilde Wangel usw. erfüllen uns mit Grauen und Ekel«. Gemeint war die Heldin im Theaterstück »Baumeister Solneß« von Henrik Ibsen (1828–1906), die den Baumeister zur Errichtung eines »Luftschlosses« gedrängt und damit ins Verderben getrieben hatte. Die Uraufführung hatte am 19. Januar 1893 im nur eine Spreebrücke vom Physikinstitut entfernten damaligen Lessingtheater stattgefunden und beschäftigte seither das durch das wilhelminische Gymnasium geprägte Berliner Bildungsbürgertum.<sup>315</sup> Neben Ibsen sorgten damals auch andere norwegische Persönlichkeiten aus der Generation von Krigar-Menzel im etablierten Kulturleben in Berlin für Aufregung. Nur zwei Monate vor dieser denkwürdigen Aufführung hatte im November 1892 die vom Berliner Kunstverein organisierte erste Ausstellung des expressionistischen Malers Edvard Munch (1863–1944) einen Skandal bewirkt und war aufgrund der Intervention des Direktors der Hochschule für die bildenden Künste, Anton von Werner, geschlossen worden. Bezeichnenderweise machten jedoch gerade diese Ereignisse sowohl Ibsen als auch Munch in Berlin und Deutschland erst richtig bekannt.<sup>316</sup>

Dies sind nur einige Stichworte zu dem in Berlin neuentstandenen gesellschaftlichen Milieu, in das Emilie Krigar ihren Sohn bereits abgleiten sah.<sup>317</sup> Die Furcht scheint jedoch unbegründet gewesen zu sein, denn als ein Jahr später, am 27.12.1894 die Tochter Anna-Ottilie Krigar-Menzel (1894–1981), seit 1921 Jacobi, geboren wurde, übernahmen nicht nur Menzel, sondern auch Joseph Joachim und sogar Johannes Brahms die Patenschaften. Dagegen fand sich dafür ein Kollege aus der Physik ebenso wenig wie ein Verwandter aus Norwegen. Ob Menzel die grundsätzliche Abneigung seiner Schwester gegenüber der Schwiegertochter jemals ge-

315 Am Lessingtheater, das erst 1888 nicht weit vom physikalischen Universitätsinstitut auf der anderen Seite der Spree eröffnet worden war, fanden auch weitere Uraufführungen u. a. von Stücken von Henrik Ibsen (1828–1906), August Strindberg (1849–1912), Arno Holz (1863–1929), Arthur Schnitzler (1862–1931), Gerhard Hauptmann (1862–1946), Carl Zuckmayer (1896–1977) oder Friedrich Wolf (1888–1953) statt.

316 Vgl.: Heller, *Fall Munch*, 1993.

317 Theodor Fontane, der Emilie Krigar gut kannte und ihre Sicht auf die kulturellen Konflikte in Berlin nicht teilte, schrieb Tochter Martha im Brief vom 25.1.1894, dass er »von dem jungen Paar [...] den angenehmsten Eindruck gehabt« habe und auch: »Auf die Elling aber schwör ich vorläufig.« Fontane, *Briefe Bd. 4*, 1982, S 323.

teilt hatte, ist unklar. Immerhin schloss er einen Brief an seinen Adoptivsohn vom 26. Juli 1895 im freundlichen Tonfall: »Mit besten Grüßen an Dich, Weib u. Kind Dein O. Adolph.«<sup>318</sup>

Die Situation des Vaters sollte sich mit bemerkenswert historischer Konsequenz in der Biografie der Tochter widerspiegeln, die sich noch im Alter daran erinnerte, dass ihr Patenonkel Brahms bei einem seiner letzten Besuche in Berlin auf dem Klavier vorgespielt hatte. Schon während ihrer Schulzeit hatte der Vater ihren Namen auf »Annot« verkürzt, um sie von den vielen anderen »Annas« zu unterscheiden. Sie wurde unter diesem Künstlernamen nicht nur als Malerin, sondern auch als engagierte Pazifistin bekannt. Dass sie 1916, wegen einer offenbar selbst verfassten und verteilten Denkschrift eine 30tägige Haft verbüßte, dürfte sie für ihr weiteres Leben geprägt haben.<sup>319</sup> Ihre pazifistischen Aktivitäten setzte sie während des Zweiten Weltkriegs in den USA und auch noch im Kalten Krieg fort, als sie mit dem Cellisten Pablo Casals (1876–1973) von Puerto Rico aus gegen die atomare Aufrüstung mobilisierte. Seit 1921 war sie mit dem Maler Rudolf Jacobi (1889–1972) verheiratet und betrieb mit ihm in Berlin eine Malschule, die sie 1933 aufgaben, als sie ihre jüdischen Schüler ausschließen sollten.<sup>320</sup> Nach Jahren in den USA und auf Puerto Rico sollten beide ihren Lebensabend in München verbringen.<sup>321</sup> Ob sie dort noch die Waage im Deutschen Museum sah, die das Leben ihres Vaters so sehr bestimmt hatte, ist nicht bekannt. Eine damalige Freundin erinnerte sich später, dass Annot viel vom Temperament ihrer Mutter geerbt habe, während sie über den »zarten kleinen Vater« lediglich mitteilen konnte, dass er »Güte und Wärme« ausgestrahlt habe.<sup>322</sup>

### Ein Professor zwischen wissenschaftlicher und beruflicher Heimat

Der Ruf auf eine Physikprofessur an einer Universität, den Krigar-Menzel als Reaktion auf den erfolgreichen Abschluss des noch von dem berühmten Helmholtz geförderten Gravitationsmessungsprojekts zweifellos erhofft hatte, blieb aus. Er sollte die Position eines Privatdozenten an der Berliner Universität bis zu seinem

318 Keisch/Riemann-Reyher, *Menzel Briefe*, 2009, S. 323.

319 1916 ein Monat »Schutzhaft« in Moabit wegen Verteilung einer pazifistischen Denkschrift, danach in Oslo tätig. 1920 Rückkehr nach Berlin, Freundschaft mit Annette Kolb und Carl von Ossietzky, Mitbegründerin der »Liga für Menschenrechte« und der »Frauenliga für Frieden und Freiheit«, Beyer/Savoy/Tegethoff, *Künstler-Lexikon*, 2013, S. 68f.

320 Die Malschule »Annot« befand sich ursprünglich in der Eislebener Straße 15. Im Adressbuch 1930 wird dann Lützowplatz 23 genannt.

321 Marta Marx Kolmer, *Besuch bei Annot*. Zeitungsausschnitt aus »Aufbau«, Freitag, 19. Mai 1978, S. 4, Annot-Nachlass, in: Archiv der Akademie der Künste, Berlin. »Annot Jacobi« in: Beyer/Savoy/Tegethoff, *Künstler-Lexikon*, 2013, S. 68f.

322 »Erinnerung an Alt-Berlin« in Annot-Nachlass 1. Fotos von Krigar-Menzel, Dahlem 1927, in Annot-Nachlass Nr. 10, S. 6f. Archiv der Akademie der Künste, Berlin.

Tod beibehalten und dort, alternativ mit seinen berühmteren Kollegen, noch bis zum Wintersemester 1922/23 den mehrsemestrigen Kurs über theoretische Physik lesen.<sup>323</sup> Zwar durfte er sich aufgrund eines offenbar als Reaktion auf den erfolgreichen Abschluss des Gravitationsmessungsprojekts erteilten »Patents« des Ministeriums seit 1899 als »Professor« bezeichnen, von einer bezahlten Anstellung war jedoch nicht die Rede.<sup>324</sup> Auch für eine Stelle in der PTR scheinen ihn weder Helmholtz noch Kohlrausch in Betracht gezogen zu haben. Einiges spricht dafür, dass er sogar noch auf eine Professorenstelle an einer Universität hoffte, nachdem er aufgrund der Empfehlung des preußischen »Ministers der geistlichen, Unterrichts- und Medicinalangelegenheiten« 1903 die offenbar als wenig attraktiv geltende Stelle eines »etatmäßigen Professors« für theoretische Physik an der »Königlichen technischen Hochschule zu Berlin« in Charlottenburg hatte übernehmen können.

Dass er zu Beginn des Ersten Weltkriegs die »Erklärung der Hochschullehrer des Deutschen Reiches« vom 23. Oktober 1914, die den Krieg zum »Verteidigungskampf deutscher Kultur erklärte«, als Privatdozent an der philosophischen Fakultät der Universität unterzeichnete und nicht als Professor an der Technischen Hochschule, lässt erkennen, wo er seine eigentliche akademische Heimat sah.<sup>325</sup> Nachdem er noch während des Kriegs von Seiten der preußischen Staatsadministration mit dem Titel eines Geheimen Regierungsrats eine weitere Aufwertung erfahren hatte, bedankte sich der inzwischen 62jährige 1923 in einem Brief an den Dekan der Philosophischen Fakultät dafür, dass er »nun auch ohne Verpflichtung des Lesens im Lehrkörper der mir durch meinen ganzen Lebensgang ans Herz gewachsenen Berliner Universität verbleiben« durfte.<sup>326</sup> Die Stelle an der Technischen Hochschule in Charlottenburg sollte er bis 1927/28 innehaben.

Max Planck hat in einem 1946 verfassten Erinnerungstext nicht nur die engere Bekanntschaft mit Helmholtz als »eine der wertvollsten Bereicherungen« seines Lebens bezeichnet, wobei ihn ein »anerkennendes oder gar lobendes Wort aus seinem Munde« mehr beglückt hätte »als jeder äußere Erfolg«. Er hat auch das Misstrauen erwähnt, das ihm als Vertreter der theoretischen Physik von vielen Fachkollegen entgegengebracht worden sei. So habe ihm der Ordinarius für Physik an der Technischen Hochschule Carl Adolf Paalzow – der 1873 noch als Lehrer an der Artillerie- und Ingenieurschule zusammen mit Helmholtz die von Karl-Heinrich Schellbach initiierte Denkschrift zur Gründung eines »Museums für exakte

<sup>323</sup> Vgl. die entsprechenden Vorlesungsverzeichnisse der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin und der Technischen Hochschule Berlin.

<sup>324</sup> Der »Minister der geistlichen, Unterrichts- und Medizinal-Angelegenheiten« teilte am 31. Juli 1899 mit: »Dem Privatdozenten Dr. Otto Krigar-Menzel habe ich in Anerkennung seiner wissenschaftlichen Leistungen durch Patent vom heutigen Tage das Prädikat »Professor« beigelegt.« Archiv HU Phil Fak 137, Bl. 120.

<sup>325</sup> [https://de.wikisource.org/wiki/Erklärung\\_der\\_Hochschullehrer\\_des\\_Deutschen\\_Reiches](https://de.wikisource.org/wiki/Erklärung_der_Hochschullehrer_des_Deutschen_Reiches) (21.8.2018).

<sup>326</sup> Handschr. Brief 10. Juli 1923. Krigar-Menzel an Spranger. HU Archiv Phil Fak 1440, 21/22.

Wissenschaften mitunterzeichnet hatte – immer das Gefühl vermittelt, dass er ihn »eigentlich für ziemlich überflüssig hielt« und auch »die Herren Assistenten« am von Kundt geleiteten physikalischen Institut seien ihm »mit einer gewissen betonten Zurückhaltung« begegnet. Er sei damals »weit und breit der einzige Theoretiker, gewissermaßen ein Physiker sui generis« gewesen, sollte der 88jährige Planck die in den 1890er Jahren in Berlin bestehende Situation charakterisieren.<sup>327</sup> Krigar-Menzel, den Planck in seinen verschiedenen Rückblicken offenbar nirgends für erwähnenswert erachtete, dürfte diese »betonte Zurückhaltung« in ähnlicher Weise zu spüren bekommen haben.

Krigar-Menzel scheint auch mit seiner Professur an der Technischen Hochschule nicht besonders glücklich geworden sein. Dass sowohl seine Berufung als auch seine ersten Vorlesungen auf massive Kritik stießen, lässt ein Schreiben erkennen, das der sich um eine an der Industriepraxis orientierte Ingenieurausbildung bemühende Professor für Maschinenbau Alois Riedler (1850–1936) im Sommer 1904 an das Kultusministerium richtete. Auch als Gegner von Reuleaux, der die Bedeutung der mathematisierten Theorie des Maschinenbaus betonte, beschwerte sich Riedler, dass man in diesem Ministerium den spezifischen Anforderungen der Ingenieurausbildung nicht gerecht würde und wettete: »Unsere Hochschule ist doch kein Tummelplatz für Wissenschaftsgebiete, die ausschließlich an die Universitäten gehören und bei uns so wenig Zuhörer finden können wie Ingenieursvorlesungen unter Theologen.«<sup>328</sup> Tatsächlich dürften sich Krigar-Menzels praktisch-technische Erfahrungen neben dem Umgang mit den von Helmholtz für die Messungen zur Tonempfindung entwickelten Instrumenten auf die Zusammenarbeit mit dem Mechaniker Stückrath und der Spandauer Geschützgießerei im Rahmen des Gravitationsmessungsprojekts beschränkt haben. Die aufstrebende Industrie scheint ihm fremd geblieben, vielleicht sogar bedrohlich erschienen zu sein. So konnte er den Ansprüchen Riedlers kaum gerecht werden – wahrscheinlich wollte er es auch nicht.

Der gebürtige Österreicher Riedler, der bereits an mehreren Technischen Hochschulen in Österreich und Deutschland tätig gewesen war, hatte nach seiner Berufung an die Charlottenburger Hochschule erstmals in Deutschland ein Maschinenlaboratorium eingerichtet und auch den Unterricht im Konstruieren und tech-

<sup>327</sup> Planck, *Persönliche Erinnerungen*, 1946/1973, S. 6 und 9.

<sup>328</sup> Zit. in: Kändler, *Anpassung*, 2009, S. 137, S. 228f. »Das Physikalische Institut der TH Berlin wurde 1903 unter der Leitung von Heinrich Rubens eingerichtet, der den Lehrstuhl für Physik in der Abteilung Chemie und Hüttenkunde innehatte. Ihm folgte 1906 Ferdinand Kurlbaum, Ordinarius für experimentelle Physik, der das Institut bis zu seinem Tod im Jahre 1927 leitete.«, Cassidy, *Das Physikalische Institut der TH Berlin*, 1979, S. 373. Cassidy bezieht sich dabei auf Informationen des Archivs der TU Berlin. Hinweis auf Krigar-Menzels Titel eines »Geheimen Regierungsrats« in: Lammel, *Menzel*, 1993, S. 246. und in der Dissertation von Neményi, *Schubspannungen*, ohne Datum, wohl 1921 oder 1922, der als »Korreferent Geheimrat Prof. Dr. Krigar-Menzel« anführt.

nischen Zeichnen entschlossen gefördert. Seine Anstrengungen waren mit viel Anerkennung und 1898 sogar mit einem Sitz im preußischen Herrenhaus gewürdigt worden. Auch dass Wilhelm II. 1899 die Gleichstellung der Technischen Hochschulen mit den Universitäten verkündet und ihnen das Promotionsrecht verliehen hatte, schrieb man mit einigem Recht den anhaltenden Bemühungen Riedlers zu, der im gleichen Jahr auch zum Rektor gewählt wurde.

Dagegen scheint Krigar-Menzels Vermittlung der mathematisch-physikalischen Grundlagen auf der Basis der Helmholtzschen Vorlesungen an jene Generationen von Ingenieurstudenten, deren Biografien schon bald durch den Ersten Weltkrieg bestimmt werden sollten, dann auch wenig spektakulär verlaufen zu sein. Der Blick in die damaligen Vorlesungsverzeichnisse zeigt, dass sich die Thematik seiner Vorlesungen vom Studienjahr 1906/7, als er über die Theorien »der Elektrizität und des Magnetismus«, »der Wärme«, »des Lichtes« und »der Wärmeleitung und der Strahlung« las, zu den im Jahr 1924 gehaltenen über die Theorien »der elektrischen und magnetischen Erscheinungen«, »des Lichtes«, »der Wärme« und »der Wärmeleitung und der Strahlung« nicht groß geändert hatte. Auch dürfte sie sich von seiner an der Universität gehaltenen kaum unterschieden haben. Bei den zunehmend auf die immer stärker propagierten Rüstungstechnologien orientierten Studenten dürften die gleichzeitigen Vorlesungen über »Ballistik« und über »ausgewählte Kapitel aus der technischen Physik« des von der benachbarten Militärtechnischen Akademie an die Technische Hochschule gekommenen Carl Cranz (1858–1945) als attraktiver gegolten haben.<sup>329</sup> Cranz hielt mit dem schon 1904 vom Optischen Laboratorium der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt an die Hochschule gekommenen Ferdinand Kurlbaum (1857–1927) auch die Einführungs- und Übungsveranstaltungen im Fach Physik ab.<sup>330</sup>

Dagegen dürfte Krigar-Menzel dabei gewesen sein als Planck im Wintersemester 1905/06 im berühmten physikalischen Kolloquium über die von Einstein gerade entwickelte spezielle Relativitätstheorie referierte. Mit den neuen bahnbrechenden Theorien, die begannen, das physikalische Weltbild umzuwälzen, dürfte er jedoch an der Technischen Hochschule noch weniger Resonanz gefunden haben als mit der von Helmholtz geprägten und heute als »klassisch« bezeichneten Lehre. Welche Haltung er zu Einstein einnahm, dessen »annus mirabilis« damals gerade zu Ende ging, ist ebenso unklar wie das Verhältnis, das sich später in dessen

<sup>329</sup> 1907 war die Vereinigte Artillerie- und Ingenieurschule in der 1903 neu gegründeten Militärtechnischen Akademie aufgegangen, die ebenfalls in den 1877 bezogenen neuen Gebäuden in der Charlottenburger Hardenbergstraße Ecke Fasanenstraße in unmittelbarer Nähe zur technischen Hochschule untergebracht war.

<sup>330</sup> Königliche Technische Hochschule zu Berlin. Programm für das Studienjahr 1906–1907, S. 60. Technische Hochschule zu Berlin. Vorlesungsverzeichnis für das Studienjahr 1924–1925, S. 28.

Berliner Jahren zwischen beiden ergab.<sup>331</sup> In der reichhaltigen Literatur über Einstein findet er offenbar keinerlei Erwähnung, obwohl dieser an der Fakultät der Universität als »lesendes Mitglied der Akademie der Wissenschaft« über Jahre sein ebenfalls musikliebender Kollege war.<sup>332</sup> Davon, dass Krigar-Menzel damals auch weiterhin im privaten Kreis musizierte, zeugen sowohl die Nachricht über ein Konzert, in dem er seine Frau am Klavier begleitete oder auch sein Nachruf auf den Cellisten des Joachim-Quartetts, Robert Hausmann (1852–1909), den er 1909 in der Musikhochschule hielt, wobei er nicht nur an die »große Zeit« der zurückliegenden Jahrzehnte erinnerte, sondern auch die eigene enge Verbundenheit mit dem Hochschulorchester hervorhob.<sup>333</sup>

Wenn sich der Physiker Wilhelm Westphal (1882–1978) später daran erinnern sollte, dass Planck bei seinen musikalischen Abenden mit dem international renommierten Joachim ebenso zusammen gespielt habe, wie mit dem als Physiker zwar prominenten, als Geiger jedoch dilettierenden Einstein, so schließt dies keineswegs aus, dass auch der als Musiker sicherlich besser qualifizierte Krigar-Menzel ab und zu eingeladen war.<sup>334</sup> Wie er selbst erklärte, hatte Westphal »dem Berliner physikalischen Leben ohne Unterbrechung« während fünfzig Jahren angehört und war Krigar-Menzels zeitweiliger Kollege gewesen. Dabei hatte er nicht nur dem Physikalischen Institut der Berliner Universität zuerst als Assistent und nach dem Ersten Weltkrieg als Professor angehört, sondern er war von 1922 bis 1924 auch als Referent im inzwischen republikanischen preußischen Kultusministerium tätig gewesen.

Als 1928, nach einer »durchgreifenden Reform der Technischen Hochschulen« und der stärkeren Einbeziehung der Physik in die Ingenieurausbildung, Gustav Hertz (1887–1975), Nobelpreisträger von 1925, als Direktor eines neuen »großen, modernen, personell und materiell vorbildlich ausgestatteten« physikalischen Instituts berufen wurde, war Krigar-Menzel bereits ausgeschieden. Dabei war Westphal mit einer Professur die Leitung des Anfängerpraktikums übertragen worden, mit dem er sich viel Anerkennung erwerben sollte.<sup>335</sup> Obwohl er Krigar-Menzel ständig im Blickfeld gehabt hatte, wusste er 1955 über den 1929 Verstorbenen

331 Über Einsteins »annus mirabilis« urteilte Carl Friedrich von Weizsäcker: »1905 eine Explosion von Genie. Vier Publikationen über verschiedene Themen, deren jede, wie man heute sagt, nobelpreiswürdig ist: die spezielle Relativitätstheorie, die Lichtquantenhypothese, die Bestätigung des molekularen Aufbaus der Materie durch die »brownsche Bewegung«, die quantentheoretische Erklärung der spezifischen Wärme fester Körper.«, Weizsäcker, *Große Physiker*, 1999, S. 256.

332 Friedrich-Wilhelms-Universität, *Vorlesungen*, 1921, S. 40 und 77. Auch in der edierten Korrespondenz von Einstein findet er keinerlei Erwähnung.

333 Krigar-Menzel: Gedenkrede Robert Hausmann. Gedruckte lose Blätter. Staatsbibliothek Berlin »4« Mus. Dh 276.

334 Westphal, *Berliner Physik*, 1960, S. 803f.

335 [https://de.wikipedia.org/wiki/Wilhelm\\_Westphal\\_\(Physiker\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Westphal_(Physiker)) (21.8.2018).

lediglich zu berichten, dass er der »erste Professor für Theoretische Physik« an der Berliner Technischen Hochschule gewesen sei, dass er 1898 mit Franz Richarz »die wohl heute noch genaueste Messung der Gravitationskonstante in der Kasematte der Spandauer Zitadelle« durchgeführt habe und dass 1926 Richard Becker (1887–1955), erneut von der Berliner Universität, als sein Nachfolger auf dem Lehrstuhl für Theoretische Physik berufen worden war.<sup>336</sup> Tatsächlich war Krigar-Menzel in seiner Zeit als Hochschullehrer weder durch Publikationen noch durch die Betreuung von Doktoranden in Erscheinung getreten.<sup>337</sup>

Dass er sich, nachdem er 1914 bei Kriegsbeginn mit seinen Kollegen am Institut von Planck die Erklärung der Hochschullehrer unterzeichnet hatte, dann doch der pazifistischen Einstellung seiner Tochter annäherte und dabei auch die Isolation von seinen oft berühmteren Fachkollegen in Kauf nahm, erscheint nicht ausgeschlossen. Konkrete Hinweise darauf habe ich allerdings nicht gefunden. Aus den wenigen Unterlagen im Nachlass seiner engagierten Tochter Annot geht immerhin hervor, dass ihr Verhältnis in seinen letzten Jahren herzlich gewesen war. Nachdem schon seine Familie nicht ganz unvermögend gewesen sein dürfte, hatte er nach dem Tod seines Onkels und Stiefvaters 1905 aus dem Verkauf der geerbten Bilder insbesondere an die Berliner Nationalgalerie als »autoritärer Testamentsvollstrecker« sein Vermögen beträchtlich vermehren können.<sup>338</sup> Der damalige Leiter der Nationalgalerie Hugo von Tschudi (1851–1911) hatte noch im Todesjahr des auch vom Kaiser besonders geschätzten Künstlers Menzel zum Ankauf von dessen Nachlass eine Sonderzuwendung in Höhe von 1,5 Mio. Mark erhalten und eine Gedächtnisausstellung veranstaltet. Ohne durch weitere wissenschaftliche Leistungen hervorzutreten, scheint Krigar-Menzel als Hausbesitzer zuerst in der Lindenallee 34 im vornehmen Westend von Charlottenburg und dann in der Peter-Lennéstraße 14 und der daran angrenzenden Podbielskiallee 55 im aufstrebenden Wissenschaftsvorort Dahlem sein letztes Jahrzehnt als angesehener Geheimrat und Professor mit einem gewissen Wohlstand genossen zu haben.<sup>339</sup>

<sup>336</sup> Westphal, *TU Berlin*, 1955. Cassidy, *Das physikalische Institut der TH Berlin*, 1979, S. 374.

<sup>337</sup> Lediglich 1921 oder 1922 wurde er an der TH vom Referenten Georg Hamel (1877–1952) als Koreferent im Promotionsverfahren von Paul Neményi (1895–1952) herangezogen, der eine bereits in Ungarn verfasste Arbeit »Über die Berechnung der Schubspannungen im gebogenen Balken« als Dissertation eingereicht hatte. Ein Datum wird dort nicht angegeben.

<sup>338</sup> So die Formulierung der Herausgeber von Menzels Briefen. Keisch/Riemann-Reyher, *Menzel Briefe*, 2009, S. 49. Für zahlreiche Hinweise zu Adolph Menzel danke ich Claudia Czok von der Adolph Menzel Gesellschaft Berlin e. V.

<sup>339</sup> Berliner Adressbücher 1912, 1919, 1927. Jacoba Krigar-Menzel, geb. Elling, wird dort noch im Adressbuch von 1943 als Hausbesitzerin angeführt.

## Denkmäler für Helmholtz

Das Berliner bildungsbürgerlich-akademische Milieu, von dem sich trotz aller Brüche auch Krigar-Menzel nicht absetzen wollte, zelebrierte im Dezember 1894 in der damaligen Singakademie – dem heutigen Maxim-Gorki-Theater – mit der Trauerfeier zum Tod von Helmholtz ein Ereignis, das nicht nur das Ende einer wissenschaftlichen Ära markiert, sondern auch geradezu modellhaft für den Abschluss einer abgelaufenen Periode des gesellschaftlichen Lebens in der preußisch-deutschen Hauptstadt steht. In Anwesenheit des nunmehrigen Kaisers Wilhelm II. und der Kaiserin Auguste Viktoria (1858–1921) spielten dort Planck an der Orgel und Joachim mit der Geige das Abendlied von Schumann.<sup>340</sup> Der junge Kaiser, dessen Mutter Victoria sich inzwischen als »Kaiserin Friedrich« ansprechen ließ und vom Berliner Hof in ein neu errichtetes Schloss in Kronberg im Taunus zurückgezogen hatte,<sup>341</sup> initiierte unter dem Eindruck der Trauerfeier die Schaffung jenes »Standbildes von Helmholtz«, das, nachdem es 1899 im Geist der wilhelminischen Ära enthüllt worden war, alle Brüche des neuen Jahrhunderts überdauern sollte und noch immer das Bild des Eingangs zur Universität bestimmt. Wie Anna von Helmholtz ihrer Schwester Ida Freifrau von Schmidt-Zabiérow (1832–1911) nach der Trauerfeier für ihren Mann mitteilte, habe der Kaiser damals gegenüber Delbrück erklärt: »Ich gebe den Platz und zehn Tausend Mark.«<sup>342</sup> Die Herstellung wurde dann von einem internationalen Komitee vorangetrieben, dem auch zahlreiche ehemalige Fachkollegen des Geehrten angehörten.

Eine Unternehmung ganz anderer Art, die ebenfalls dem Andenken an Helmholtz gewidmet war, und an der sich neben Krigar-Menzel und Richarz auch König beteiligten, galt der Publikation von Helmholtz' letzten Vorlesungen zur theoretischen Physik. Helmholtz selbst hatte schon im Sommer 1892 der »Anregung aus seinem Schülerkreise« zugestimmt gehabt und auch noch den ersten, von König gemeinsam mit dem mit Planck befreundeten und seit 1886 als Ordinarius für Mathematik an der TH Hannover wirkenden Carl Runge (1856–1927) herausgegebenen Band »über die Elektromagnetische Theorie des Lichts« durchgesehen.<sup>343</sup> Diesem, 1897 als Band V der Reihe erschienenen, folgten 1898 und 1902 die beiden von Krigar-Menzel allein herausgegebenen Bände I »Dynamik diskreter Massenpunkte« und II »Dynamik kontinuierlich verbreiteter Massen«. Ebenfalls 1898 erschien der wieder von König und Runge herausgegebene Band III »Die mathematischen Prinzipien der Akustik«. Richarz beteiligte sich mit dem 1903 erscheinenden Band VI zur »Theorie der Wärme«. Im Vorwort des schließlich 1907 als Letztem erscheinenden Band IV »Elektrodynamik und Theorie des Magnetis-

340 Rechenberg, *Helmholtz*, 1994, S. 299.

341 Es wird heute als mondänes »Schlosshotel« genutzt.

342 Brief an Ida vom 16.12.1894 in: Siemens-Helmholtz, *Lebensbild in Briefen*, 1929, Bd. 2, S. 98.

343 König/Runge, *Theorie des Lichts*, 1897, Vorrede. Oberbeck, *Besprechung*, 1897.

mus« bezeichneten Krigar-Menzel und der achtzehn Jahre jüngere Max Laue als Herausgeber die Edition insgesamt als »ein bleibendes Denkmal der Lehrertätigkeit von Helmholtz an der Berliner Universität« und speziell den zuletzt erschienenen bereits inhaltlich relativierend, als »eine klassische Darstellung der Anschauungen über die Theorie der Elektrizität vor zwei Dezennien«. <sup>344</sup> Laue war nach seiner Doktorarbeit Assistent an Plancks Institut für theoretische Physik gewesen, hatte sich gerade habilitiert und beschäftigte sich bereits mit Einsteins spezieller Relativitätstheorie. Wie schon erwähnt, hatte auch Herausgeber Wachsmuth auf Wunsch von Helmholtz in die 1896 erscheinende Neuauflage der »Lehre von den Tonempfindungen« keine »Ergebnisse neuerer Forschung« aufgenommen und dies begründet: »Werke, die so tief, wie das vorliegende, in die Geschichte der Wissenschaft eingeschnitten und nach den verschiedensten Seiten hin epochemachend gewirkt haben, tragen in sich das Recht, als hehre historische Denkmale in ihrer ursprünglichen Form bewahrt zu werden.« <sup>345</sup>

Im Gegensatz dazu fiel es damals und fällt es auch heute noch schwer, im detaillierten Abschlussbericht zu den Gravitationsmessungen in der Spandauer Kasematte die Merkmale eines weiteren Denkmals für Helmholtz zu entdecken. Waren schon die dabei gewonnenen Erkenntnisse wenig spektakulär erschienen und das wissenschaftliche Echo darauf gering geblieben, so hatte der Abschluss für Krigar-Menzel und Richarz noch weitere Mühen gebracht. Nachdem die Akademie weder auf den erwähnten Vorschlag zur Neuaufnahme der Wägungen noch auf den zur weiteren Nutzung der so sorgfältig gegen Umwelteinflüsse geschützten Kasematte als Raum für zukünftige Messungsprojekte eingegangen war, hatte es Krigar-Menzel übernommen, wie eine mit Bleistift geschriebenen Aktennotiz der Akademie vom 20. Juli 1898 festhielt, »den auferlegten Verkauf der nicht aufzubewahrenden Utensilien bewerkstelligen« zu wollen. Doch damit nicht genug. Aus seinem Schreiben vom 31. Oktober 1898 erfährt man, dass sich aus dem Projekt ein Defizit von insgesamt 1535,39 Mark ergeben habe, das er und Richarz aus »eigenen Mitteln« gedeckt hätten. <sup>346</sup> Offenbar bestand von Seiten der Akademie auch an der Waage kein vorrangiges Interesse und so konnte sie Richarz an sein Greifswalder und dann auch an das Marburger Institut übernehmen. <sup>347</sup>

<sup>344</sup> Krigar-Menzel, *Dynamik diskreter Massenpunkte*, 1898; ders., *Dynamik kontinuierlich verbreiteter Massen*, 1902; König/Runge, *Akustik*, 1898; Richarz, *Wärme*, 1903. Einleitung von König und Runge.

<sup>345</sup> Wachsmuth, *Vorwort*, 1896.

<sup>346</sup> Archiv BBAW. Wissenschaftliche Unternehmungen der phys.-math. Klasse 1884–1910. II–VII, 111.

<sup>347</sup> Am 24. Jan. 1899 bat Richarz die Akademie um Überlassung des Balkens der Waage, die sich jetzt in der Akademiesammlung befand. Er wolle in seinem Greifswalder Institut untersuchen, ob die »vermutungsweise« im Abschlussbericht mitgeteilte Erklärung der Temperaturabhängigkeit und der »thermischen Krümmung des Balkens« richtig sei. Schreiben Richarz an Akademie, 24. Jan. 1899, BBAW Archiv II–XIV, 9. Offenbar übernahm er dann die gesamte Waage.

### Ein vorsichtiger Vorschlag von Max Planck

Dass die so unspektakulär ermittelten und mitgeteilten Erkenntnisse aus dem Berlin-Spandauer Gravitationsmessungsprojekt auch ohne weiteres Aufheben als gewichtiger Baustein des in Änderung begriffenen physikalischen Weltbilds angesehen wurden, belegt nicht zuletzt die Arbeit von Max Planck. Dieser veröffentlichte ein knappes Jahr nach Erscheinen des ausführlichen Abschlussberichts von Krigar-Menzel und Richarz den letzten Teilbericht über seine während der vorangegangenen Jahre entwickelten Theorie der »irreversiblen Strahlungsprobleme« mit einem Vorschlag zur Einführung eines Systems »natürlicher Maßeinheiten« – wobei er zumindest indirekt auch an den erwähnten, von Helmholtz 1883/84 angedeuteten Gedankengang einer »absoluten Messung der Gravitation« anknüpfte. Vermutlich hatte Planck schon mit Helmholtz über die Bedeutung der Messungen in Spandau gesprochen. Mit Sicherheit hatte er sie jedoch nicht nur aus der Distanz verfolgt, sondern auch mit Krigar-Menzel und Richarz darüber gesprochen – wobei er sich dann in seinem großen Aufsatz über die »irreversiblen Strahlungsprobleme« und die »natürlichen Maßeinheiten« auf ihren Abschlussbericht bezog.<sup>348</sup>

Planck war unmittelbar nach seiner Übersiedlung nach Berlin Mitglied der Physikalischen Gesellschaft geworden, wobei der förmliche Vorschlag zur Aufnahme von König gestellt worden war. Bei der Sitzung am 22. März 1889 hatte Helmholtz den Vorsitz und neben König waren auch Krigar-Menzel und der aus Bonn angereiste Richarz anwesend. So war Planck mit den Protagonisten des Gravitationsmessungsprojekts seit seinem Dienstantritt in Berlin bekannt.<sup>349</sup> Ob er den Messaufbau in der Spandauer Zitadelle allerdings jemals besichtigte, ist offen. Ich habe keine Hinweise gefunden, die darauf hindeuten.

Während Krigar-Menzel 1897 die eingangs zitierte, auch heute noch gültige Definition der Gravitationskonstante formulierte, auf deren Basis er die Wägungen durchgeführt und ausgewertet hatte, galten die Überlegungen Plancks vor allem der besonderen Qualität dieser Konstanten und den immanenten Grenzen der bestehenden Maßsysteme, ohne die weder die Notierung noch die Verbreitung eines messtechnisch ermittelten Zahlenwerts möglich war.

»Alle bisher in Gebrauch genommenen physikalischen Maasssysteme«, so erklärte er, »auch das sogenannte absolute C.G.S.-System, verdanken ihren Ursprung insofern dem Zusammentreffen zufälliger Umstände, als die Wahl der jedem System zu Grunde liegenden Einheiten nicht nach allgemeinen, nothwendig für alle Orte und Zeiten bedeutungsvollen Gesichtspunkten, sondern wesentlich mit Rücksicht auf die speciellen Bedürfnisse unserer irdischen Cultur getroffen ist«.

<sup>348</sup> Planck, *Strahlungsprobleme*, 1899, S. 480.

<sup>349</sup> Vgl. das Faksimile des Protokolls der Aufnahmesitzung in: Hoffmann, *Planck in seinem Wirken*, 2010, S. 5.

Es war die Charakterisierung einer Situation, die auch für alle hier betrachteten messungstechnischen Ermittlungen der mittleren Erddichte und der Gravitationskonstante zutrif und den beteiligten Persönlichkeiten unmittelbar eingeleuchtet haben dürfte. »Dem gegenüber dürfte es nicht ohne Interesse sein zu bemerken«, so leitete Planck vorsichtig seinen daraus abgeleiteten neuartigen Vorschlag ein, »dass mit Zuhilfenahme der beiden in dem Ausdruck (41) der Strahlungsentropie auftretenden Constanten  $a$  und  $b$ « – er hatte sie in seiner vorangehenden Abhandlung hergeleitet – »die Möglichkeit gegeben ist, Einheiten für Länge, Masse, Zeit und Temperatur aufzustellen, welche unabhängig von speciellen 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.«

Da diese beiden Konstanten – bei der einen handelte es sich um das später nach ihm benannten »Wirkungsquantum« – nicht ausreichten, um die vier genannten Maßeinheiten tatsächlich festlegen zu können, schlug er vor, nicht nur die »Lichtfortpflanzungsgeschwindigkeit« im Vacuum, sondern auch die »Gravitationskonstante« hinzuzunehmen. »Diese Grössen«, so Plancks Begründung, »behalten ihre natürliche Bedeutung so lange bei, als die Gesetze der Gravitation, der Lichtfortpflanzung im Vacuum und die beiden Hauptsätze der Wärmetheorie in Gültigkeit bleiben, sie müssen also, von den verschiedensten Intelligenzen nach den verschiedensten Methoden gemessen, sich immer wieder als die nämlichen ergeben.«<sup>350</sup>

Als er diese Vorstellung 1908 in einem Vortrag vor Studenten der Universität Leiden noch zuspitzte, hatte er wohl auch das damals viel gelesene Buch »The War of the Worlds« im Sinn, in dem der britische Schriftsteller H. G. Wells (1866–1946) die aktuellen Fragen des Kolonialismus auf andere Planeten ausgeweitet hatte: »Jene Konstanten aber sind derart, daß auch Marsbewohner und überhaupt alle in unserer Natur vorhandenen Intelligenzen notwendig einmal auf sie stoßen müssen, – wenn sie nicht schon darauf gestoßen sind.«<sup>351</sup>

Zu Plancks Überzeugung, dass auch die Gravitationskonstante den genannten Anforderungen entsprechen würde, dürfte auch das Miterleben der aufwändigen Messungen beigetragen haben, die sein Lehrer Jolly in München aufgenommen, für deren Weiterführung sich dann der verehrte Helmholtz mit seinem gesamten wissenschaftlichen Gewicht eingesetzt hatte und die seine Kollegen Krigar-Menzel und Richarz zu einem vorläufigen Ende gebracht hatten.

Plancks Feststellung, dass die qualitative Bedeutung der vier Konstanten weder von der zukünftigen Entwicklung der Messungstechnik noch von der politischen

<sup>350</sup> Planck, *Strahlungsprobleme*, 1899, S. 479–480. Kleinevoß, *Bestimmung*, 2002, S. 1.

<sup>351</sup> Planck, *Einheit des physikalischen Weltbildes*, 1908/1973, S. 30f. und 43. Das Buch von Wells war 1898 erschienen, (deutsch »Der Krieg der Welten«, 1901) und hatte die Vorstellung von den Marsmenschen popularisiert.

Einführung neuer Maßsysteme verändert werden würde, implizierte, dass ihre quantitativen Werte auch weiterhin mit den verschiedensten »irdischen« Maßnahmen messtechnisch immer genauer ermittelt werden sollten. Auch in Zukunft würde man Längen in Metern und Massen in Kilogramm oder auch neu festgelegten Einheiten angeben. Dagegen unterschied er die Qualität dieser Konstanten deutlich von jener der »Fundamental-Constanten«, zu denen Krigar-Menzel und Richarz noch ein Jahr zuvor auch die »mittlere Erddichte«, das Ohm und das Wärmeäquivalent gezählt hatten.

Aus der Sicht des langjährigen Mitarbeiters an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Heinz Lübbig (geb. 1932), »begegneten sich an dem Wendepunkt von der klassischen Physik zu ihrer Frühmoderne die Grundlagenphysik und die physikalische Messtechnik erstmalig und unmittelbar«. Daraus habe sich das »Konzept der modernen Metrologie« entwickelt. »Es interpretiert die Objektivität physikalischen Messens dadurch, dass es den universalen Charakter der theoretischen Bedeutung von Fundamentalkonstanten mit dem Optimum ihrer verfügbaren experimentell ermittelten Zahlenwerte definitorisch verknüpft.«<sup>352</sup>

Dass Plancks zweifellos überall wahrgenommener Vorschlag damals auf Zurückhaltung stieß, zeigt der den Stand der Wissenschaft zum Zeitpunkt der Jahrhundertwende bilanzierende Artikel »Gravitation« in der von den deutschen Wissenschaftsakademien gemeinsam herausgegebenen »Encyclopädie der mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen«, den der damalige Assistent an der Straßburger Universität, Jonathan Zenneck (1871–1959) im August 1901 abgeschlossen hatte. Dieser Artikel zitierte den damals aktuellen Abschlussbericht des Berlin-Spandauer Projekts und teilte die dort ermittelten Werte mit. Dagegen ging er auf die von Planck vorgeschlagene Verwendung der Gravitationskonstante nicht ein und beschränkte sich auf die Erklärung, dass die »sogenannte Gravitationskonstante«  $G$  in Newtons »Fundamentalgesetz der Gravitation«, wie er die nun übliche Formel zur Berechnung des Werts der wirkenden Kraft bezeichnete, »eine universelle, d. h. nur vom Maassystem abhängige Konstante« bedeute.<sup>353</sup> Noch immer wurde die mittlere Dichte der Erde als die anschauliche und eigentlich wichtige Größe verstanden, während in der Gravitationskonstante die abstrakte, für die Anwendung der mathematisch-formelmäßigen Darstellung des Gravitationsgesetzes jedoch unverzichtbare Konstante gesehen wurde. Auch im unmittelbar vorangehenden, von dem praxisorientierten Runge verfassten Artikel über »Maass und Messen« fand der Vorschlag seines Freundes Planck keine Beachtung.<sup>354</sup>

<sup>352</sup> Lübbig, *Plancks natürliche Maßeinheiten*, 2010, S. 187.

<sup>353</sup> Zenneck, *Gravitation*, 1901, S. 26f.

<sup>354</sup> Runge, *Maass und Messen*, 1903.



27 Max Planck (1858–1947).

Dass man sich auch in England gegenüber einer besonderen Bewertung der Gravitationskonstante zurückhielt, ließ Poynting im erwähnten Vortrag vor der Royal Institution vom Februar 1900 erkennen.

»Professor Boys has almost indignantly disclaimed that he was engaged on any such purely local experiment as the determination of the mean density of the earth. He was working for the Universe, seeking the value of G, information which would be as useful on the Mars or Jupiter or out in stellar systems as here on the earth.« Mit einiger Skepsis fuhr er fort: »But perhaps we may this evening consent to be more parochial in our ideas, and express the results in terms of the mean density of the earth.«<sup>355</sup>

Zwei Jahrzehnte später, 1929, sollte Planck mit Blick auf die noch immer bestehenden Widerstände gegen die »neue Physik« dann sehr entschieden fordern, dass deren »Weltbild in fortschreitendem Maße von allen anthropomorphen Elementen gesäubert werden« müsse. Es sei »gänzlich ausgeschlossen«, dass dort »Begriffe« aufgenommen würden, »die irgendwie mit der Kunst menschlicher Meßtechnik zusammenhängen«.<sup>356</sup> Plancks Gedankengang blieb als ständige Herausforderung an die Naturwissenschaften bestehen – auch noch nachdem er seit den 1950er Jahren mit der breiteren Verwendung der »Planck-Einheiten« seine heutige Bedeutung erlangt hatte.<sup>357</sup> Ein Jahrhundert nach Plancks erstem Vorschlag sollte der Physiker Harald Lesch (geb. 1960) in seiner populärwissenschaftlichen Fernsehendung die Gravitationskonstante, die Lichtgeschwindigkeit und das Plancksche Wirkungsquantum als »kosmisches Alphabet« bezeichnen, das dieser damals entdeckt habe.<sup>358</sup>

355 Poynting, *Recent Studies in Gravitation*, 1900, S. 633.

356 Planck, *Das Weltbild der neuen Physik*, Leipzig 1929, S. 223. Zit. in: Huebener/Lübbing, *Reichsanstalt*, 2011, S. 117.

357 »Nach der »Wiederentdeckung« der Planckschen Vorschläge für ein solches Maßsystem wurde dann ab 1957 der Name »Planck-Einheiten« gebräuchlich.«, <https://de.wikipedia.org/wiki/Planck-Einheiten#Definitionen> (21.8.2018).

358 Lesch, *Planck-Welt*, 2016, abrufbar unter <https://www.br.de/mediathek/video/alpha-centauri-was-ist-die-planck-welt-av:5b0b1ea3f6530017739210> (6.9.2018).

## »Früher oder später kommt alles ins Museum«<sup>359</sup>

### Die Waage wird Museumsobjekt

Der in diesem Buch geschilderte historische Pfad, auf dem die Waage nach ihrer Nutzung für die Wägungen in der Spandauer Zitadelle an ihren heutigen Platz im Münchner Deutschen Museum gelangte, ist mit der Entstehung dieser Institution unmittelbar verknüpft. Auch wenn die Gründung des bis heute international anerkannten und vielfach als Vorbild geltenden Museums ursprünglich auf der Initiative eines Einzelnen beruhte, so wurde ihre leitende Idee, ähnlich wie schon bei der PTR, dann von einem Kreis Gleichgesinnter und schließlich auch von der Administration des Kaiserreichs aufgegriffen und zum alle Umbrüche des zwanzigsten Jahrhunderts überdauernden Erfolg geführt.

Fünf Jahre nach Erscheinen des Abschlussberichts zum Berlin-Spandauer Messungsprojekt hatte der Münchner Ingenieur und Unternehmer Oskar von Miller (1855–1934) im Sommer 1903 an zahlreiche Industrielle und Professoren der Naturwissenschaften eine Einladung zur Beteiligung an einem neuen Verein verschickt, dessen Ziel es sein sollte, in seiner Heimatstadt ein »Deutsches Museum der Meisterwerke der Naturwissenschaften und der Technik« zu gründen und aufzubauen.<sup>360</sup> Mit einer derartigen Manifestation spezifisch bayerisch-deutschen nationalen Selbstbewusstseins sollte weit entfernt von der preußischen Hauptstadt ein Gegenstück zum Science-Museum im Londoner Stadtteil Kensington und zum Pariser Conservatoire des Arts et Métiers geschaffen werden. Als ehemaliger Direktor der von Emil Rathenau (1838–1915) in Berlin gegründeten und geleiteten Deutschen Edison-Gesellschaft und späteren AEG war Miller mit den Verhältnissen im wilhelminischen Berlin gut vertraut. Er kannte die Stadt nicht nur als Zentrum der aufstrebenden elektrotechnischen Industrie, sondern auch als Ort zahlreicher zur internationalen Bedeutung gelangter wissenschaftlicher Institutionen. So wandte er sich auch gleich an Persönlichkeiten in der Reichshauptstadt und dabei insbesondere an seinen ehemaligen Münchner Klassenkameraden Max Planck. Dieser und auch die preußische Akademie der Wissenschaften verbreiteten in der Folge die Mitteilungen des Münchner Gründerkreises mitsamt den Anforderungen zur Unterstützung des Museumsprojekts.<sup>361</sup>

Seit der Berliner Gymnasialprofessor Schellbach und seine Mitstreiter die Errichtung von »Museen für Kultur und Verbreitung der exakten Wissenschaft« gefordert hatten, waren drei Jahrzehnte vergangen. Inzwischen waren nicht nur einige der maßgeblichen Entdeckungen und Erfindungen erfolgt, die das neue Jahrhundert bestimmen sollten. Auch wenn die Präzisionsmechanik noch immer die ent-

<sup>359</sup> Erkenntnis eines ehemaligen Fachkollegen, der nicht genannt werden will.

<sup>360</sup> Füßl, *Miller*, 2005, S. 264f.

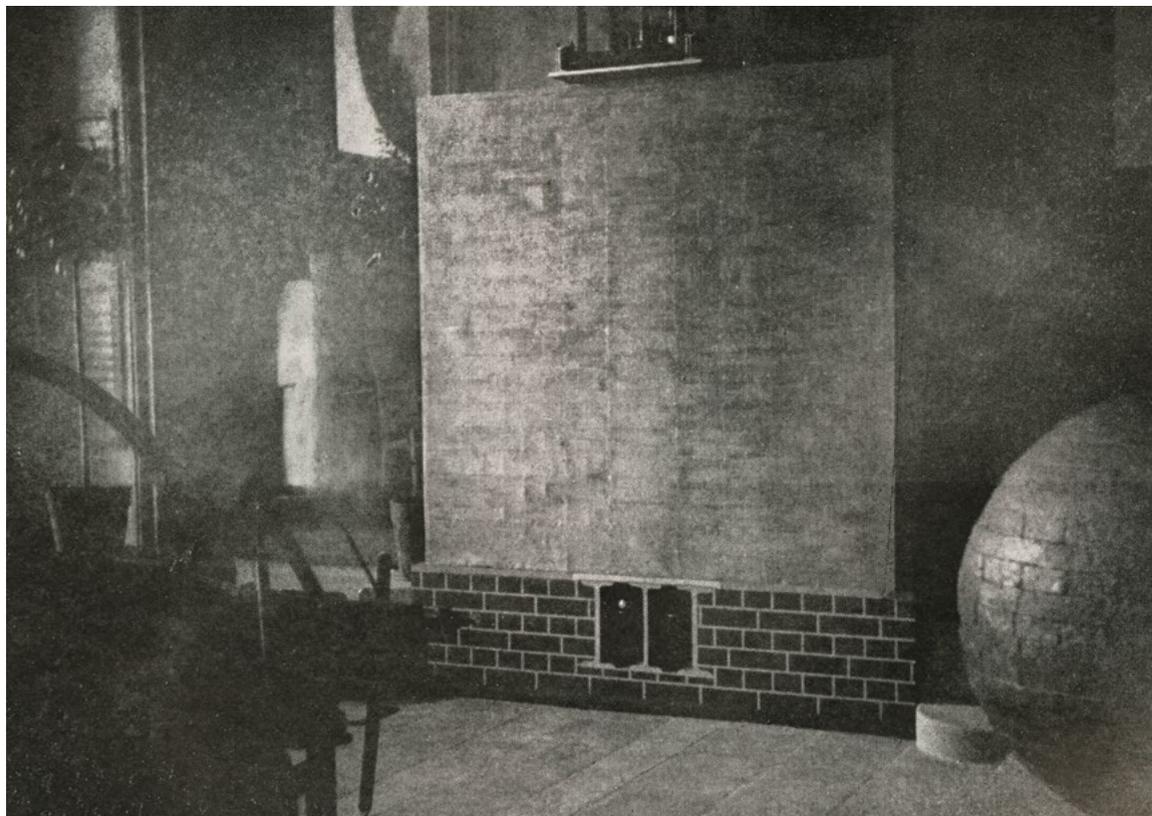
<sup>361</sup> Vervielfältigte Schreiben und Verwaltungsberichte. BBAW Archiv II–XIV, 9, Deutsches Museum.

scheidende Rolle spielte, so zeichneten sich doch auch schon die ersten Möglichkeiten der Elektronik ab. Die schnell expandierende Industrie, die in Schellbachs Denkschrift noch kritisiert worden war, weil sie die Mechaniker absorbierte, hatte längst eigene Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen eingerichtet und weitete sie noch immer aus. Vor diesem Hintergrund hatte Alfred Nobel (1833–1896) ein Jahr vor seinem Tod einen Preis gestiftet, der den Entdeckungen, die jeweils »im vergangenen Jahr der Menschheit den größten Nutzen erbracht haben«, eine neuartige internationale Anerkennung sicherte – wobei von Anfang an ein stattlicher Teil an die deutschen Wissenschaftler fiel. So musste Millers Museum diese Anerkennung nicht mehr zuerkennen und konnte sich der Aufgabe stellen, die entsprechenden Artefakte durch Forschung im breiten Spektrum der naturwissenschaftlichen und technischen »Meisterwerke« zu verorten, sie in der fortschreitenden Gegenwart zu präsentieren und den Besuchern zu vermitteln und sie für die Zukunft zu bewahren.

Millers Initiative fand viel Anklang und nachdem die Gründung des vorgeschlagenen Museumsvereins schon nach einigen Wochen erfolgt war, übertrug die Königliche Bayerische Akademie der Wissenschaften diesem auch gleich ihre Sammlung.<sup>362</sup> Aufgrund dieses Akts rückhaltloser Wertschätzung von königlich-akademischer Seite verfügte die Sammlung des geplanten Museums von Anfang an über einen bedeutenden Grundstock. Programmatisch für das Museumskonzept ergab sich dabei die Verknüpfung zahlreicher Objekte mit den Namen und Leistungen international anerkannter Wissenschaftler, die in Bayern gewirkt hatten – darunter auch Steinheil, der mit seinen hochpräzise gefertigten Instrumenten und Normalen zur Schaffung des internationalen Maßsystems wesentlich beigetragen hatte. Wie schon in Paris und London, so erinnern seither auch in München nicht mehr allein die in den Bibliotheken gesammelten und präsentierten wissenschaftlichen Publikationen an die Verdienste dieser wissenschaftlichen Autoritäten, sondern auch die mit deren Namen etikettierten Objekte im Museum.

Auch gewichtige Vertreter der bayerischen Universitäten schlossen sich dem Vorgehen der Akademie an. So Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923), der 1895 mit der Entdeckung der schon bald nach ihm benannten Strahlen internationales Aufsehen erregt und dafür 1901 den ersten Nobelpreis für Physik erhalten hatte. Als Direktor des Physikalischen Instituts der Münchner Ludwig-Maximilians-Universität unterstützte auch er Millers Aufruf und übergab am 27.6.1905 mit anderen nicht mehr benutzten Instrumenten und Objekten aus der Institutssammlung die vom Mechaniker Stollnreuther für Jollys Gravitationsmessungen angefertigte Waage (Inv.-Nr. 2729,2) mitsamt einigen der damals als zu wiegender Last benutzten 5 kg-Kugeln (Inv.-Nr. 2730) sowie der großen Bleikugel (Inv.-Nr. 2729,1) als

<sup>362</sup> Dazu Website des Deutschen Museums: <http://www.deutsches-museum.de/ausstellungen/naturwissenschaft/akademiesammlung/> (22.8.2018).



**28** Ausstellungsenemble im vorläufigen Gebäude des Deutschen Museums in der Münchner Maximilianstraße. Foto von 1910. Die in Originalgröße nachgebildete Vorderseite des Spandauer »Bleiklotzes« verdeutlicht den Größenunterschied zu Jollys Bleikugel vorne rechts.

Stiftung für die im Aufbau befindliche Museumssammlung. Millers Aufruf sollte auch weiterhin – letztlich bis heute – Gehör und Zustimmung finden.

1910 gelangte auch die von Stückrath für die Messungen in Spandau konstruierte Waage (Inv.-Nr. 25082) in die Sammlung. Dem war offenbar ein von der Münchner Polyphos Electricitätsgesellschaft vermitteltes Arrangement mit Richarz in Marburg vorausgegangen, nach dem die Waage Teil eines großen Ausstellungsensembles werden sollte.<sup>363</sup> Es sollte neben dem Spandauer Projekt auch das von Jolly demonstrieren und die Unterschiede zwischen beiden Versuchsanordnungen verdeutlichen. Richarz ließ dafür in seiner Marburger Institutswerkstatt eine große Stellwand anfertigen, auf der die Waage mit den vier Waagschalen über der Nachbildung eines Schnitts durch den Bleiklotz in realer Größe angeordnet war, wodurch das Prinzip der damaligen Wägungen nachvollziehbar wurde. Den fertiggestellten Aufbau präsentierte er am 9. Februar 1910 im Anschluss an einen wissenschaftlichen Vortrag vor der »Gesellschaft zur Beförderung der gesammten Naturwissenschaften zu Marburg« und teilte mit, dass das Deutsche Museum beabsichtige, ihn »neben der dort bereits vorhandenen Apparatur Jolly's zur Aufstellung zu bringen«. Die auf Kosten der Berliner Akademie hergestellte Waage sei von dieser »für das Deutsche Museum bereitwilligst zur Verfügung gestellt« worden.

Als Richarz am 30. November 1910 derselben Gesellschaft erneut berichtete, konnte er auch eine Fotografie »der nunmehr im Deutschen Museum zu München aufgestellten Versuchsanordnung« zeigen, die »im Vestibül des provisorischen Gebäudes, Maximilianstrasse 126« vom Marburger Institutsmechaniker Paul Görs montiert und auch fotografiert worden war.<sup>364</sup> Es handelte sich um das Gebäude des damaligen »Alten Nationalmuseums« – und heutigen Staatlichen Museums für Völkerkunde – in dem Kaiser Wilhelm II. am 12. November 1906 die erste Ausstellung des neuen Museums eröffnet hatte, bevor er am folgenden Tag den Grundstein für das heutige Gebäude des Deutschen Museums auf der Isarinsel legte.<sup>365</sup> Nachdem damit Millers Museumsprojekt von »allerhöchster« Stelle zur nationalen Aufgabe des Reichs erklärt worden war, konnten die gesammelten Museumsobjekte als Bausteine zu deren Lösung verstanden werden.

Die Versendung des Marburger Aufbaus nach München hatte sich verzögert, weil sich dessen Holzunterlage »infolge der bekannten starken Feuchtigkeit des Instituts« verzogen hatte und durch eine »nicht zu schwere und vom Einfluss der Feuchtigkeit unabhängige Unterlage« aus Magnaliumblech ersetzt werden musste. Dazu merkte Richarz in einer erst »bei der Korrektur« des publizierten Berichts eingefügten Fußnote an, dass in den Etat 1911 »endlich ein Neubau eingestellt worden« sei – wobei möglicherweise die Gefährdung des Beitrags zur nationalen

<sup>363</sup> Mitteilung von Manfred Spachholz vom Deutschen Museum am 15. und 21.10.2015.

<sup>364</sup> Richarz, *Versuchsanordnung*, 1910.

<sup>365</sup> Füßl, *Gründung*, 2003, S. 64.

Als Einheit der Kraft 1 kg gilt das Gewicht des Ur-Kilogrammes am Meeresspiegel unter 45° Breite (Lage von Paris, wo das Ur-Kilogramm aufbewahrt ist).

Ist  $g$ ,  $r$  und  $k$  bekannt, so läßt sich die Masse der Erde berechnen. Sie beträgt  $5,985 \cdot 10^{24}$  kg-Masse.

6. Bestimmung der Gravitationskonstante.

*Cavendish* benutzte eine Drehwaage (Bild 137).

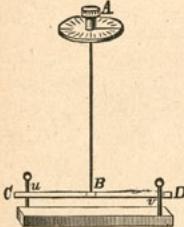


Bild 137. Einfachste Drehwaage.

Diese bestand aus einer langen Stange CD, die an den Enden Bleikugeln trug und die an einem sehr feinen Faden AB aufgehängt war. Näherte er nun der einen der Bleikugeln vorsichtig eine andere, so trat eine sehr geringe Annäherung ein. Aus der Verdrillung des Aufhängefadens ließ sich die Anziehung der Bleikugeln berechnen.

*Richarz* bestimmte (1896) die Gravitationskonstante in den Kasematten von Spandau, indem er, wie Bild 138 zeigt, eine Waage mit vier Waagschalen benutzte,

zwei oberen und zwei unteren, zwischen denen ein 100 t schwerer Bleiklotz eingebaut werden konnte. Legte er in die Schalen A und D je ein kg-Stück, so zeigte die Waage nach A hin ein Übergewicht an, da das kg in A von dem Bleiklotz nach unten, das kg in D nach oben angezogen wurde.

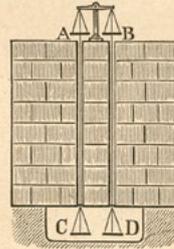


Bild 138. Versuch von Richarz.

13. Impuls. Stoß.

1. Wirkt zwischen zwei frei beweglichen Massen, z. B. zwischen dem Schwimmer und dem



Bild 139. Impuls.

Kahn in Bild 139 die gleiche Kraft  $P$  eine gleich lange Zeit  $t$ , so erfahren beide Massen  $m_1$  und  $m_2$  die Beschleunigungen  $b_1$  und  $b_2$  und erreichen am Ende der Zeit  $t$  die Geschwindigkeiten  $v_1$  und  $v_2$ .

$$\begin{aligned} \text{Es ist } P \cdot t &= m_1 \cdot b_1 \cdot t = m_1 \cdot v_1 \\ P \cdot t &= m_2 \cdot b_2 \cdot t = m_2 \cdot v_2. \end{aligned}$$

$P \cdot t$  heißt der Impuls,  $m \cdot v$  die Bewegungsgröße. Daher

**| Verbrauchter Impuls = Erzeugte Bewegungsgröße.**

Der Satz  $m_1 \cdot v_1 = m_2 \cdot v_2$  gilt immer, wenn zwei Massen nach einer Beschleunigung durch eine innere Kraft sich trennen. Man sagt auch

29 Beschreibung der Messungen in der Spandauer Zitadelle im Lehrbuch von Kleiber, Karsten und Alt, *Physik für Ingenieurschulen*, 1943, S. 80.

Aufgabe im Münchner Museum noch einen letzten Anstoß gegeben hatte.<sup>366</sup> Tatsächlich wird die Errichtung des neuen Physikgebäudes der Marburger Universität während der folgenden Jahre vor allem dem anhaltenden Drängen von Richarz zugeschrieben. Die Aufstellung des Nachbaus der in der Spandauer Zitadelle verwendeten Messungsanordnung in München fand dann in den ersten Septembertagen 1910 statt und wurde von Richarz mitsamt der Waage und einem Exemplar des mit Widmung versehenen Abschlussberichts am 12. September förmlich übergeben. Seither wird Richarz als Stifter der Waage benannt.<sup>367</sup> Ob auch Krigar-Menzel damals oder irgendwann später nach München kam ist offen. Die inzwischen seit länger als einem Jahrhundert anhaltende Karriere der Waage als Museumsobjekt hatte begonnen.

### Ein nachempfundenes Modell im Museum der Spandauer Zitadelle

Bei der weiteren Verfolgung des genannten historischen Pfads entdeckt man, dass das schnelle Wachsen der Sammlung für das zukünftige Deutsche Museum offensichtlich auch von dem damals in München an der städtischen Handelsschule tätigen Reallehrer Johann Kleiber (1865–1941) verfolgt wurde, der sich gerade als Autor von Physiklehrbüchern für »realistische Mittelschulen« (1900) und für »humanistische Gymnasien« (1901) einen Namen machte. Zusammen mit dem Oberlehrer am Technikum in Bremen, Bernhard Karsten (1858–1909), und einigen weiteren Kollegen hatte er ein entsprechendes Kompendium einer erstmals 1902 erscheinenden Ausgabe für »Technische Lehranstalten sowie zum Selbststudium« bearbeitet, das offenbar eine besondere Lücke schloss und noch bis in die 1950er Jahre in zahlreichen von ihm selbst und dann auch von anderen überarbeiteten Neuauflagen wiederaufgelegt werden sollte. Nachdem Kleiber den Abschnitt über das Gravitationsgesetz in den ersten Auflagen lediglich mit dem Hinweis auf die Messung von Cavendish und einer Prinzipskizze von dessen Drehwaage verdeutlicht gehabt hatte,<sup>368</sup> findet sich in den stärker auf nationale Errungenschaften achtenden Auflagen ab 1914 ein zusätzlicher Abschnitt über die Messung mit der Balkenwaage. Mit einer dem Demonstrationsaufbau im Deutschen Museum nachempfundenen Prinzipskizze illustriert, wird dort mitgeteilt, dass eine derartige Wägung von Richarz »in den Kasematten von Spandau« durchgeführt worden sei.

<sup>366</sup> Richarz, *Versuchsordnung*, 1910.

<sup>367</sup> Mitteilung von Manfred Spachtholz vom Deutschen Museum am 15. und 21.10.2015. Im Verwaltungsbericht des Deutschen Museums 1911–1912, S. 6 wird der »Apparat zur Bestimmung der mittleren Erddichte von F. Richarz und O. Krigar-Menzel« angeführt. In der Rubrik »Stifter bzw. Herkunft« findet sich dazu »F. Richarz, Marburg und K. Preuß. Akademie der Wissenschaften, Berlin«. Ein entsprechender Schriftwechsel zwischen Richarz, der Akademie und dem Deutschen Museum ist offenbar nicht erhalten. Richarz, *Versuchsordnung*, 1910.

<sup>368</sup> Hier zitiert nach: Kleiber/Karsten, *Lehrbuch*, 1910, S. 97.

Dass Krigar-Menzel in dem Buch nicht erwähnt wird, legt den Schluss nahe, dass Kleiber sich über die knappen Eintragungen im Bestandsverzeichnis des Deutschen Museums hinaus nicht weiter sachkundig gemacht hat. Auch die vom »Oberstudienrat an der Ingenieurschule der Hauptstadt der Bewegung« Heinrich Alt nun zusätzlich noch als Lehrbuch »für Ingenieurschulen« überarbeitete und offenbar umfangreichste 26. Auflage, die im Kriegsjahr 1943 erschien, enthielt die Abschnitte über beide Messungen.<sup>369</sup> Als dann jedoch das Buch für die weiteren in den Nachkriegsjahren erscheinenden Auflagen beinahe um die Hälfte gekürzt wurde, entfiel auch die Mitteilung über die Spandauer Messung wieder und man beschränkte sich auf die Messung von Cavendish.

Der verfolgte Pfad führt dann wieder zurück nach Spandau in die Zitadelle. Dort hatte nach dem Ende des Ersten Weltkriegs, der Novemberrevolution und der Umsetzung der Bestimmungen von Versailles – die auch die Rückführung der Goldschatzkisten aus dem Juliesturm nach Paris umfasste – die »Schwarze Reichswehr« 1920 ihr Hauptquartier eingerichtet gehabt, bevor ihr nach der offiziellen Reichswehr die Wehrmacht gefolgt war. Sie betrieb dort von 1935 an bis zum Ende des Zweiten Weltkriegs ein »Heeres-Gasschutz-Laboratorium« zur Erprobung von Gasmasken und nutzte dafür auch einige der gasdicht verschließbaren Räume in der Bastion Brandenburg. Nachdem die Zitadelle am 2. Mai 1945 von einer Einheit des Volkssturms an die Rote Armee übergeben worden war und im Juli 1945 bei der Aufteilung Groß-Berlins in vier Besatzungszonen – Spandau war 1920 in Groß-Berlin eingemeindet worden – von der britischen Militärverwaltung übernommen wurde, stand sie auf der Liste der Militäranlagen, die aufgrund der in Potsdam beschlossenen »völligen Abrüstung und Entmilitarisierung Deutschlands« unbrauchbar zu machen waren, bevor sie aus »der Gewalt der Alliierten« an deutsche Stellen zurückgegeben würden.<sup>370</sup>

Einer mir einleuchtenden Überlieferung zufolge, deren genaue historische Erforschung jedoch aussteht, verzichtete der britische Kommandant auf entsprechende Maßnahmen, nachdem der neue Oberbürgermeister Ernst Reuter (1889–1953) vor dem Hintergrund des sich abzeichnenden Kalten Kriegs und der Berlinblockade zugesagt hatte, dass dort eine Schule eingerichtet werden würde.<sup>371</sup> So erhielt die Zitadelle, als sie im Oktober 1948 den neuen deutschen Behörden übergeben wurde, erstmals den Status einer zivilen Einrichtung – einen Monat nach der berühmten Rede, in der Reuter die »Völker der Welt« aufgefordert hatte, »auf diese

<sup>369</sup> Kleiber/Karsten/Alt, *Physik für Ingenieurschulen*, 1943, S. 80.

<sup>370</sup> Formulierung aus dem Potsdamer Abkommen vom 2.8.1945, zit. nach: Amtsblatt des Kontrollrats in Deutschland, Ergänzungsblatt Nr. 1, S. 13–20. In: documentArchiv.de [Hrsg.], [www.documentArchiv.de/in/1945/potsdamer-abkommen.html](http://www.documentArchiv.de/in/1945/potsdamer-abkommen.html) (20.11.2016).

<sup>371</sup> Mitteilung von Manfred Kranz im Telefongespräch am 9.10.2015. Formulierung aus dem Potsdamer Abkommen vom 2.8.1945 zit. nach: Amtsblatt des Kontrollrats in Deutschland, Ergänzungsblatt Nr. 1, S. 13–20. In: documentArchiv.de [Hrsg.], [www.documentArchiv.de/in/1945/potsdamer-abkommen.html](http://www.documentArchiv.de/in/1945/potsdamer-abkommen.html) (20.11.2016).

Stadt« zu schauen, und einen Monat bevor die neugegründete »Freie Universität Berlin« im amerikanischen Sektor ihren Lehrbetrieb aufnahm.<sup>372</sup> Es war eine fundamentale Weichenstellung in ihrer Geschichte, die dann 1949/50 mit der Einrichtung einer Berufsschule für das Baugewerbe in demonstrativer Weise manifestiert wurde.

Die Bedeutung des zivilen Charakters der Schule war den Beteiligten bewusst und sie unterstrichen dies zusätzlich und programmatisch 1960 mit der Wahl des gerade verstorbenen Architekten Otto Bartning (1883–1959) zum Namens-Patron. Bartnings Ruf beruhte sowohl auf seinen zahlreichen Kirchenbauten als auch auf seinen Aktivitäten als ehemaliger Direktor der Bauhochschule in Weimar und als Vizepräsident des Deutschen Werkbundes. In Berlin war er vor allem in den vorangegangenen Jahren als Organisator der Internationalen Bauausstellung »Interbau« und der Errichtung des neuen »Hansaviertels« bekannt geworden.<sup>373</sup> Nun unterstrich die Schule mit der Namenswahl auch ihre Orientierung an den Zielen des während der Jahre des Nationalsozialismus verfeimten Bauhauses und an einer Neubelebung dieser Ziele im Hinblick auf den Wiederaufbau der in Trümmern liegenden Stadt Berlin.

Der langjährige Leiter dieser Schule, Manfred Kranz hatte in den unmittelbaren Nachkriegsjahren das Gymnasium besucht. Da es noch kaum Schulbücher gab, empfand er es als Glücksfall, dass ihm ein Exemplar eines Physiklehrbuchs aus den Kriegsjahren in die Hände fiel – und damit wird hinter den dramatischen politischen Geschehnissen der verfolgte Pfad wieder sichtbar. Da es sich dabei um »den Kleiber«, also das erwähnte Lehrbuch von Karsten und Kleiber handelte, war Kranz, als er Jahre später das Amt des Schulleiters in der Zitadelle antrat, auch die dort beschriebene Spandauer Gravitationsmessung als offensichtlich bedeutendes wissenschaftshistorisches Ereignis gewärtig. Er musste aber auch feststellen, dass es kaum möglich war, darüber näheres zu erfahren. Dies änderte sich erst als 1974 der engagierte Physiklehrer Siegmund Ewert an die Schule kam und sich zum Zweck der Erforschung dieser historischen Messung zur Anfertigung eines Modells des Messungsaufbaus begeistern ließ.<sup>374</sup> Ewert beschränkte sich dann auch nicht einfach auf eine dreidimensionale Nachbildung der Prinzipskizze im Physikbuch, die lediglich den Waagbalken, die Waagschalen und die Durchführung durch den Bleiklotz zeigte, sondern er entschied sich nach intensivem Studium des in der – inzwischen nicht mehr preußischen – Staatsbibliothek archivierten Exemplars des

<sup>372</sup> Im Juni 1948 war es zum Bruch der alliierten Verwaltung von Berlin gekommen. Der sowjetische Delegierte hatte die Alliierte Kommandantur verlassen, nach der Währungsreform in den deutschen Westzonen war die D-Mark auch in den Berliner Westsektoren eingeführt worden und es begannen Blockade und Luftbrücke. Vgl. zur Abfolge der Ereignisse in Berlin im Jahr 1948: Zöbl, *Reuter*, 2009, S. 261–270.

<sup>373</sup> Otto-Bartning-Oberschule, *Festschrift*, 1979, S. 8.

<sup>374</sup> Persönliche Mitteilung von Ewert vom 20.10.2015.



30 a, b Das Modell in der Ausstellung des Stadtgeschichtlichen Museums Spandau in der Zitadelle. Fotos von 2018.

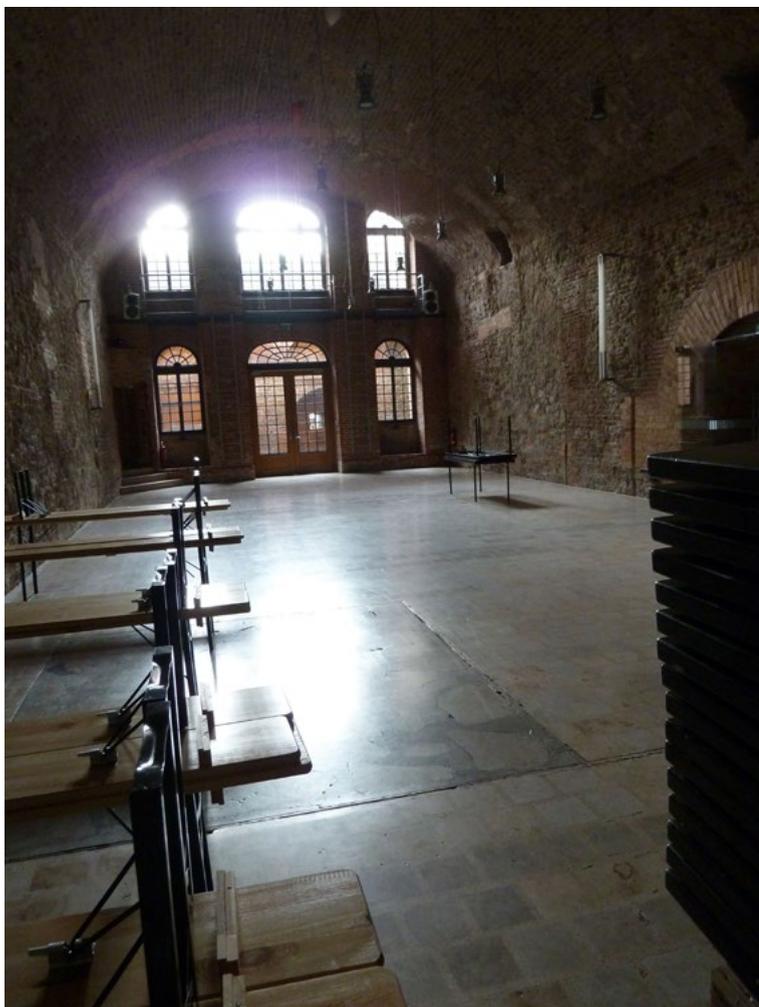
Abschlussberichts zum Nachbau des gesamten komplexen Messungsaufbaus mit- samt einer diesen bedienenden Person – die er, didaktisch einfühlsam an die dama- ligen Temperaturprobleme erinnernd, in eine warme Jacke einkleidete.

Nachdem die von Kleiber nur knapp vermittelte Botschaft vom damals bereits achtzig Jahre zurückliegenden Messungsprojekt in der Zitadelle auf diese Weise im wahrsten Sinn des Wortes greifbar aufgefrischt worden war, illustrierte sie von nun an mit lokalem Bezug die Lehre von der Gravitation für die Schüler, Lehrer und andere Interessierte. Als die Schule 1987 in einem neuen Domizil in der nicht allzu weit entfernten Nonnendammallee mit anderen Schulen neu organisiert und – nicht weniger programmatisch – nach Georg Wenzeslaus von Knobelsdorff (1699–1753), Maler und Architekt Friedrichs des Großen (1712–1786),<sup>375</sup> benannt wurde, verblieb das Modell in der Zitadelle und wandelte sich dabei vom Lehrmittel zum erst einmal im Depot gelagerten Museumsobjekt. Einige Jahre später erhielt es bei der Einrichtung einer neuen, die Geschichte der Zitadelle beleuchtenden Museumsausstellung neben historischen Gewehren, Helmen, Kanonen und einer Gasmaske seinen heutigen Platz in einer Vitrine des »Stadtgeschichtlichen Museums«.<sup>376</sup>

Es ist nicht die einzige Erinnerung an das damalige Gravitationsmessungsproj- ekt, die heute in der Zitadelle zu finden ist. In der im Krieg beschädigten Bastion Brandenburg hatte das offensichtlich sehr solide gemauerte Fundament für den Bleiklotz im ehemaligen Messungsraum innerhalb des jetzt als »italienische Höfe« bezeichneten Gebäudekomplexes die mehrfach vorgenommenen Veränderungen am Boden zumindest in Resten überstanden. So konnten die an dem Messungs- projekt Interessierten auch dafür sorgen, dass dessen Platz im Rahmen der letzten Restaurierung Anfang der 1990er Jahre kenntlich gemacht wurde. Seither werden die neugierigen Gäste von Hochzeiten und anderen Festlichkeiten, die den restau- rierten Raum angemietet haben, durch eine im Steinboden eingelassene Platte an das historisch-wissenschaftliche Ereignis erinnert. Bei ihnen, wie auch bei denen, die sich nach den Hintergründen des Modells erkundigen, stellt sich dann meist eine ähnlich sprachlose Situation ein, wie ich sie mit der Waage im Deutschen Museum erlebt habe – und mit diesem Buch zu ändern hoffe.

<sup>375</sup> Der 200. Todestag Friedrichs des Großen wurde in diesen Jahren in beiden Teilen Berlins in gera- dezu rivalisierender Weise gewürdigt.

<sup>376</sup> Foto von Ewert und dem Modell in: Otto-Bartning-Oberschule: *Festschrift*, 1979, S. 30. Wie der damalige Leiter der Bartningschule Manfred Kranz in einem Telefongespräch am 9.10.2015 mitteilte, hatte er Anfang der 1960er Jahre seinen jüngeren Kollegen Siegmund Ewert aufgefordert, dieses Mo- dell anzufertigen, da ihm die Messung von Krigar-Menzel und Richarz aus dem Lehrbuch von Kleiber und Karsten bekannt war. Ewert arbeitete nach den Angaben des Abschlussberichts, den er in der damaligen Westberliner Staatsbibliothek fand. Vgl. Theissen, *Geschichte der Zitadelle*, 2010, S. 4–11.



31 Der ehemalige Messungsraum in der Zitadelle mit der Markierung des Fundaments im Fußboden. Der erwähnte Bretterfußboden dürfte auf dem Niveau zwischen der oberen und der unteren Fensterreihe eingezogen gewesen sein. Foto von 2018.

### Wege zum »heute«: So viele Messungen wie möglich. Maße nicht nur für »irdische Kulturen«. International verwaltete Gravitationskonstante. Museen für Messungsergebnisse und Artefakte

Könnte man das Projekt von Cavendish noch als Liebhaberei eines eigenwilligen englischen Adligen des 18. Jahrhunderts ansehen und war Helmholtz noch durch das preußische Bildungsideal vor der Reichsgründung geprägt, so gewann während der letzten beiden Jahrzehnte des 19. Jahrhunderts in allen hochindustrialisierten Ländern jenes industriekapitalistische Denken an Boden, das für die Bedeutung naturwissenschaftlicher Forschung nur noch die Umsetzbarkeit ihrer Ergebnisse in großtechnologische Verfahren und neuartige Industrieprodukte gelten ließ. Gleichzeitig förderte das nationalistische politische Klima jener Zeit, die Überzeugung, dass die in schneller Abfolge bekanntwerdenden wissenschaftlich-technischen Erfolge für die Entwicklung neuer und überlegener Waffen genutzt werden sollten. Mit ihnen könnte man die konkurrierenden Mächte nicht nur auf den Märkten, sondern auch auf den Schlachtfeldern herausfordern. Auch vor diesem aktuell gebliebenen Hintergrund stellt sich die Frage nach dem Platz, dem die aufwändigen Projekte zur messtechnischen Präzisierung der Gravitationskonstante mit ihren wenig spektakulären und zumindest bisher technisch nicht nutzbaren Ergebnissen zugeordnet werden können.

Zu Recht werden sie in den Lehrbüchern bis heute zuerst mit dem Namen Cavendish verknüpft, während die Besonderheiten der Berlin-Spandauer Messung nur jenen Spezialisten bekannt sind, die auf die Beachtung des Gesamtspektrums der bisherigen Messungen Wert legen. In den historischen Darstellungen der dominierenden Rolle der Physik als Wissenschaft des 20. Jahrhunderts, in denen die Entdeckungen von Hertz, Röntgen, Marie Curie (1867–1934), Ernest Rutherford (1871–1937), Planck, Einstein und vielen anderen keineswegs zu Unrecht das Bild bestimmen, findet sich kaum ein Hinweis auf die Berlin-Spandauer Messung. Sie galt offensichtlich nicht als Ereignis, das einen nennenswerten Einfluss auf die weitere Entwicklung der Wissenschaften hatte, so dass eine Berücksichtigung nicht erforderlich schien. Auch in dem 1987 erschienenen, von den prominenten Wissenschaftlern Stephen W. Hawking (1942–2018) und Werner Israel (geb. 1931) herausgegebene Buch, in dem ausgewählte Experten den wissenschaftlichen Umgang mit der Gravitation während der vergangenen 300 Jahre bilanzierten, hat sie keine Erwähnung gefunden.<sup>377</sup> Damit blieb diesem Projekt nicht nur das Urteil erspart, nutzlos gewesen zu sein, sondern auch der höchst ambivalente nationalistisch geprägte Kult, als weiterer Beweis für die Überlegenheit deutscher Wissenschaft gefeiert zu werden – während das für die Messungen in Spandau so sorgfältig aufbereitete Blei als Teil der Granaten des Ersten Weltkriegs eine nationale Bedeu-

<sup>377</sup> Hawking/Israel, *Three hundred years*, 1987.

tung ganz anderer Art erlangte und wahrscheinlich auch heute noch den Boden in Flandern und Nordfrankreich verseucht.

Als Poynting 1892 im ausführlichen Abschlussbericht zu seinen Versuchen und Messungen einräumte, mit der sehr großen Waage einen falschen Weg verfolgt zu haben, hatte er daraus einen Schluss gezogen, der auf den ersten Blick als platt apologetisch erscheinen könnte, der sich bei näherer Betrachtung jedoch als zeitlose Einsicht in das Wesen von Großversuchen zu den grundlegenden Axiomen der Physik erweist: »Zugleich ist es nur billig«, so hatte er festgestellt, »den Nutzen des großen Apparates zu erwähnen, da durch ihn einige Fehler so vergrößert worden sind, bis man sie beobachten konnte, und da sie so aufgesucht und beseitigt wurden. Hätte man gleich mit einem kleinen Apparat gearbeitet, so würden sie wahrscheinlich gar nicht entdeckt worden sein und sie wären deshalb in dem Endresultat erschienen.« Dem Argument, dass es zwecklos sei, die Liste der grundsätzlich aufwändigen Projekte zur Gravitationsmessung noch um ein weiteres zu vermehren, hatte er – auch in Erwartung der zu diesem Zeitpunkt noch ausstehenden Ergebnisse aus Spandau – entgegengehalten, dass es »bei einer Konstanten wie die der Gravitation, bei der sich die Resultate kaum noch um einen bestimmten Wert zu gruppieren beginnen und wo wir in Wirklichkeit kaum sicher sind, dass sie selbst konstant bleibt«, wichtig sei, »so viel Bestimmungen als möglich, und zwar nach verschiedenen Methoden und mit verschiedenen Instrumenten ausgeführt, zu besitzen, bis alle Fehlerquellen aufgefunden sind und die Resultate übereinstimmen«. <sup>378</sup>

Als er dann einige Jahre später, im ersten Februar des zwanzigsten Jahrhunderts, der Royal Institution eine umfassende Zusammenstellung der bisherigen Gravitationsmessungsprojekte vorlegte und darin auch jenes von König, Richarz und Krigar-Menzel würdigte, war seine Bilanz so nüchtern wie zuversichtlich: »We at least know something in knowing what qualities gravitation does not possess, and when the time shall come for explanation all these laborious and, at first sight, useless experiments will take their place in the foundation on which that explanation will be built.« Im Gegensatz zu Krigar-Menzel konnte sich Poynting als hoch angesehener Professor und Mitglied der Royal Society eine derartig abgeklärte Einschätzung erlauben. <sup>379</sup>

Es waren Schlussfolgerungen von bemerkenswert aktueller Bedeutung, nicht zuletzt weil wir wissen, dass sich der erforderliche Aufwand für entsprechende Messungen seither nicht mehr verringert hat. Auch mit den heutigen mess- und rechen-technischen Möglichkeiten kalkuliert man eine mögliche Projektdauer von zehn Jahren ebenso ein wie eine neue Bestätigung der Unmöglichkeit einer deutlichen Steigerung der Genauigkeit. Dabei konnten und können die Ergebnisse dieser

<sup>378</sup> Poynting, *Bestimmung*, 1892, S. 595f.

<sup>379</sup> Poynting, *Recent Studies in Gravitation*, 1900, S. 644.

grundsätzlich mit größter Sorgfalt durchgeführten Messungsprojekte, die auch immer mit dem Prestige der sie tragenden nationalen Institutionen behaftet sind, nicht einfach als falsch oder überholt verworfen werden. Zumindest im Prinzip folgten die ausgewiesenen Experten Ying Tian Chen und Alan Hugh Cook (1922–2004) auch noch 1993 der Argumentation von Poynting, als sie mit ihrer systematischen Beschreibung der »principal experiments that have been done in recent years« das Ziel verfolgten, »placing them in the historical context of earlier work and indicating possible future developments« – wobei sie dem Berlin-Spandauer Projekt den angemessenen Platz einräumten.<sup>380</sup>

Nachdem die Welt im Verlauf des 20. Jahrhunderts durch Naturwissenschaften und Industrietechnik, vor allem jedoch durch die mit ihrer Hilfe geschaffenen immer neuen Waffen und den mit diesen wiederum geführten Kriegen tiefgreifend verändert worden war, sinnierten Chen und Cook über die Gravitationskonstante G: »Although G was the first physical constant to be introduced and measured in the history of science, it is still the least well known.« Sie unterstrichen die aktuelle Bedeutung einer genaueren Kenntnis ihres Werts: »An accurate knowledge of G is not only important from the point of view of theoretical physics, but also significant for practical purposes, particularly when finding the density and density distributions of the interiors of the Earth, Moon, planets and stars.«<sup>381</sup> Allgemeiner drückten es einige deutsche Fachkollegen von der PTB (»Physikalisch Technische Bundesanstalt«), der Nachfolgeorganisation der PTR, aus, als sie 1988 erklärten, dass mit dem Wissen der Astronomen und Physiker »über den Aufbau und das Zusammenspiel der Massenverteilung im Kosmos« und der Entwicklung neuer »Theorien über die Gravitation« auch das Interesse an einer genauen Kenntnis von G wachse.<sup>382</sup>

Weitere Jahrzehnte später, 2015, bezeichneten es nachdenkliche Fachexperten als »bedrückend langsam«, dass sich »die Genauigkeit, mit der wir G kennen« seit Cavendishs Messung »gerade mal um eine Größenordnung pro Jahrhundert« verbessert hat. Die Frage nach der »Motivation dafür, die Gravitationskonstante immer genauer kennen zu wollen«, beantworteten sie damit, dass es für einen Metrologen »in erster Linie natürlich eine enorme Herausforderung einer präzisen Messung von G an sich« sei. G sei »schließlich eine Fundamentalkonstante und sollte daher so genau wie möglich bekannt sein«. Auch könnten Schwierigkeiten bei der Messung noch immer darauf hindeuten, »dass die Gravitation ungenügend verstanden ist«.<sup>383</sup> Die nur scheinbar naive Neugier, deren Bedeutung anerkannte Entdecker zu jeder Zeit betont haben, spielt in den Naturwissenschaften offen-

<sup>380</sup> Chen/Cook, *Gravitational experiments*, 1993, S. xii und 202.

<sup>381</sup> Chen/Cook, *Gravitational experiments*, 1993, S. 196.

<sup>382</sup> So Boer/Haars/Michaelis, *Experimente*, 1988, S. 3. Die Autoren hatten an der Physikalisch Technischen Bundesanstalt, gerade mit einem neuen Messungsprojekt begonnen.

<sup>383</sup> Nolting/Schnurr/Schlamminger/Kündig, *Gravitationskonstante*, 1999. Rothleitner/Schlamminger, *Schwere Experimente*, 2015.

sichtlich nach wie vor eine entscheidende Rolle und auch die zitierte, von Helmholtz 1883 ins Feld geführte »alte Regel«, nach der »jede ernste wissenschaftliche Arbeit ihre praktische Anwendung schließlich da bringt, wo man es vorher am wenigsten vermuthet hätte«, hat ihre Aktualität nicht eingebüßt.

Max Planck hatte die Gravitationskonstante schon an der Wende zum 20. Jahrhundert zu den »Naturkonstanten« gezählt, deren besonderer und »universeller Charakter« auf ihrer Unabhängig »von der Bezugnahme auf irgendeine spezielle Substanz oder irgendeinen speziellen Körper« beruhe. Als er in den gleichen Monaten, in denen Poynting an die Grenzen der damaligen Kenntnisse erinnert hatte, auf die Möglichkeit verwies, auf Basis dieser Naturkonstanten »Einheiten für Länge, Zeit, Masse, Temperatur aufzustellen, welche ihre Bedeutung für alle Zeiten und für alle, auch für außerirdische und außermenschliche Kulturen notwendig behalten müssen«, betonte auch Planck, dass diese Einsicht als Konsequenz aus der historischen Entwicklung der Physik verstanden werden müsse. Unter dem Eindruck der großen Veränderungen, die sich im Weltbild der Physik in den drei Jahrzehnten seit seiner Studentenzzeit bei den Lehrern Jolly an der Münchner und Helmholtz an der Berliner Universität aufgrund neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse vollzogen hatten, erschien ihm die Feststellung besonders wichtig, dass »alle unsere Erfahrungen an Empfindungen unserer Sinne anknüpfen« und dass deshalb »in allen physikalischen Definitionen das physiologische Element maßgebend« sei. Als er diesen Gedanken 1908 in einem Vortrag vor Studenten der Universität Leiden reflektierte, endete er mit der Feststellung, dass die ganze Physik »ursprünglich in gewissem Sinn einen anthropologischen Charakter« in sich trage.<sup>384</sup>

Zweifellos stand Planck dabei auch der Werdegang seines verehrten Lehrers Helmholtz vom Mediziner und Physiologen zum Physiker vor Augen. In der hier erzählten Geschichte erinnert sein Gedanke aber ebenso daran, dass dessen Assistent König, unter Helmholtz' Anleitung, den umgekehrten Weg von der Physik zur Physiologie finden konnte. Ebenso fand Krigar-Menzel seinen Weg vom traditionellen Interesse an der sinnlich erfahrbaren Musik zur Gravitationsphysik über die von Helmholtz gelehrt physikalische Analyse. Auch an all dieses erinnerte Planck vielleicht, wenn er den Leidener Studenten vor Augen hielt, dass »die physikalischen Definitionen« des Tons und der Farbe »heute keineswegs mehr der unmittelbaren Wahrnehmung durch die entsprechenden Sinne entnommen«, sondern »durch die Schwingungszahl bzw. Wellenlänge definiert« würden. Seine Betrachtung »kurz zusammenfassend« erklärte er: »Die Signatur der ganzen bisherigen Entwicklung der theoretischen Physik ist eine Vereinheitlichung ihres Systems, welche erzielt ist durch eine gewisse Emanzipierung von den anthropomorphen Elementen, speziell den spezifischen Sinnesempfindungen.«

384 Planck, *Einheit des physikalischen Weltbildes*, 1908/1973, S. 30f. und 43.

Aktuell geblieben ist seine anschließende Überlegung: »Bedenkt man nun andererseits, daß doch die Empfindungen anerkanntermaßen den Ausgangspunkt aller physikalischen Forschung bilden, so muß diese bewußte Abkehr von den Grundvoraussetzungen immerhin erstaunlich, ja paradox erscheinen. Und dennoch liegt kaum eine Tatsache in der Geschichte der Physik so klar zutage wie diese. Fürwahr, es müssen unschätzbare Vorteile sein, welche einer solchen prinzipiellen Selbstentäußerung wert sind!«<sup>385</sup> Nicht zuletzt bestätigt die historische Entwicklung des Umgangs mit dem Gravitationsgesetz diese Feststellung, hatte sie doch von den sinnlich wahrnehmbaren Proportionalitäten zwischen Kraft, Massen und deren jeweiligen Abständen zueinander, zur äußerst abstrakten Gravitationskonstante geführt. Andererseits gilt ein Jahrhundert nach diesen Ausführungen Plancks noch immer, dass auch die kompliziertesten Messungsgeräte und Waagen die Ergebnisse letztlich so anzeigen müssen, dass sie mit den menschlichen Sinnen »korrekt« wahrgenommen werden können.

Nicht nur während der Jahrzehnte, in denen die von Planck überschaut Entwicklung der Wissenschaft Physik stattfand, war der Weg zur Schaffung, Verbreitung und Verwaltung einheitlicher Maße und Gewichte mit Hilfe der Tätigkeit und der Entscheidungen international respektierter Institutionen beinahe kontinuierlich weiterverfolgt worden. Den sich immer erneut dramatisch verändernden irdischen Gegebenheiten so gut wie möglich entsprechend war er dabei schrittweise ausgeweitet worden. Dabei hatte man auch schon bald die von Planck angemahnten »außerirdischen« Gesichtspunkte in einer Weise einbezogen, die den unterschiedlichsten Interessenten neben vielem anderem auch einen praktikablen Umgang mit einem international anerkannten Wert für die Gravitationskonstante ermöglichten.

Entscheidende Stationen waren dabei die Errichtung des als Dachverband der wissenschaftlichen Gesellschaften und Akademien mit Sitz in Paris gegründeten »International Council for Science« im Jahr 1931 und das von diesem 1966 eingerichtete, ebenfalls in Paris angesiedelte besondere »Committee on Data for Science and Technology« (CODATA), das seither die Verbreitung der Qualität, Zuverlässigkeit und Zugänglichkeit bestimmter, als wichtig erkannter Daten aus allen Bereichen der Wissenschaft und Technologie sicher stellt. Nachdem diesem 1986 auch die Betreuung und Verwaltung der Gravitationskonstante übertragen wurde, gibt es seither alle vier Jahre unter Berücksichtigung der jeweils neuesten Erkenntnisse einen aktuellen Wert bekannt. Dabei verwendet es die 1960 von der seit 1875 periodisch einberufenen Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) festgelegten Maßeinheiten Meter, Kilogramm, Sekunde (MKS) des Systeme International d'Unités.<sup>386</sup>

<sup>385</sup> Planck, *Einheit des physikalischen Weltbildes*, 1908/1973, S. 31.

<sup>386</sup> Schroeder-Gudehus, *Challenge*, 1973. Greenaway, *International Council of Scientific Unions*, 1996, S. 163–165.

2010 teilte die »CODATA Task Group on Fundamental Constants« für  $G$  den Wert  $6,673\ 84(80) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2$  mit. Der 1898 von Richarz und Krüger-Menzel publizierte und im damals üblichen Zentimeter-Gramm-Sekunde-System mitgeteilte Wert war  $G = 6,685 + 0,011 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g sec}^2$  (entspricht  $G = 6,685 \pm 0,011 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2$ ) gewesen – der Unterschied ist erst in der zweiten Stelle hinter dem Komma erkennbar. Außerdem entschloss sich CODATA 2010 auch zur Ausweitung des Unsicherheitsbereichs und zur Herabstufung der Genauigkeit gegenüber dem vier Jahre zuvor festgelegten Wert.<sup>387</sup> Zuletzt ersetzte CODATA diese Werte durch jenen, der aus den bis zum 31. Dezember 2018 verfügbaren Daten ermittelt worden war und teilte als neu empfohlenen Wert der Gravitationskonstante mit:  $G = 6,674\ 30 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ .<sup>388</sup>

Gleichzeitig scheinen die Wissenschaftler in einer Zeit, in der sie die Erde mittels Messungen von Satelliten aus jederzeit vollständig und zentimetergenau im Blickfeld haben, wobei sie auch deren Schwerefeld vermessen, bei der Gravitationskonstante auf weitere genau deklarierte Stellen hinter dem Komma noch immer kaum angewiesen zu sein.<sup>389</sup> Angesichts dieser anscheinend so wenig gesicherten Situation stellten von Anfang an und stellen noch immer die in neuen Projekten zur Messung der Gravitationskonstante engagierten Physiker in ihren Veröffentlichung den aktuell ermittelten Messungsergebnissen die historischen in Tabellen und Schaubildern entgegen – wobei dann auch die in Spandau ermittelten ihren Platz fanden und finden.<sup>390</sup> Offensichtlich sehen sie sich nicht nur durch die neuesten, sondern auch weiterhin durch die in der Vergangenheit messtechnisch ermittelten Werte zur neuen Interpretation herausgefordert. »Kein Experiment, das Abweichungen vom derzeit gültigen Literaturwert aufweist, ist deshalb a priori als »schlechter« zu bewerten als ein Experiment, das keinerlei Abweichungen zeigt«, erklärte Harald Walesch zur Bedeutung eines Messungsunternehmens an der Universität Wuppertal 1994. Vielmehr gälte es, »die Suche nach eventuell verborgenen systematischen Fehlern zu intensivieren, die Vor- und Nachteile der verschiedensten Meßmethoden miteinander zu vergleichen, um so der »Wahrheit« ein Stück näher zu kommen.«<sup>391</sup>

387 [http://de.wikipedia.org/wiki/Committee\\_on\\_Data\\_for\\_Science\\_and\\_Technology](http://de.wikipedia.org/wiki/Committee_on_Data_for_Science_and_Technology) (22.8.2018); <http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/CCValue?bgj>ShowFirst=Browse> (22.8.2018). Vgl. auch: [http://www.deutschlandfunk.de/gravitationskonstante-die-schwere-der-schwerkraft.740.de.html?dram:article\\_id=298111](http://www.deutschlandfunk.de/gravitationskonstante-die-schwere-der-schwerkraft.740.de.html?dram:article_id=298111) (22.8.2018).

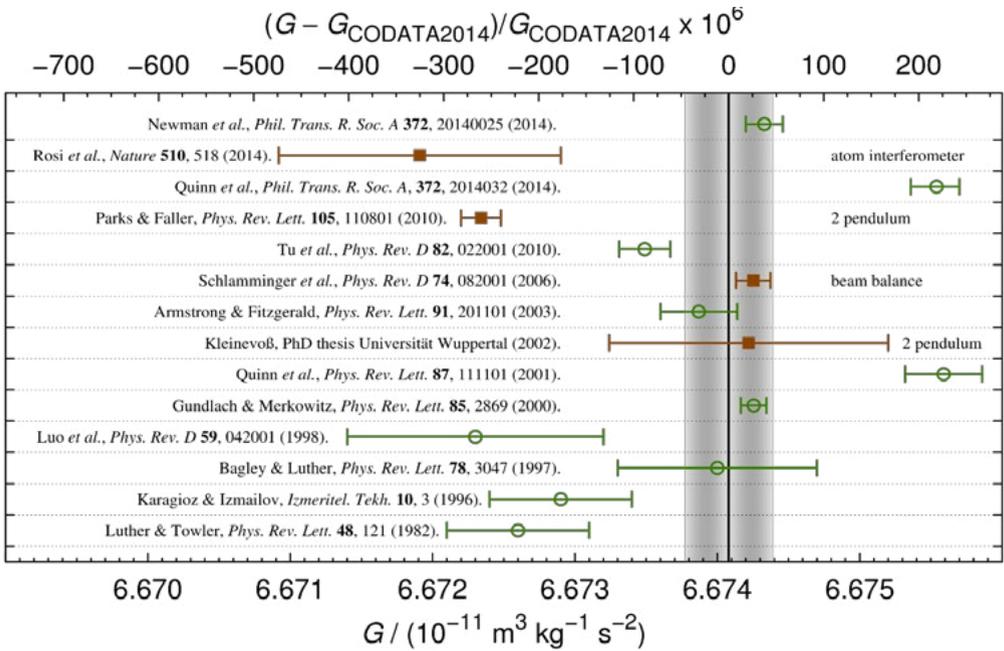
388 <http://www.physics.nist.gov/cuu/Constants/bibliography.html> (22.8.2018); <http://www.physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?bg> (22.8.2018).

389 So die Auskunft von Christoph Förste von der Sektion »Globales Geomonitoring und Schwerefeld« vom Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ, Helmholtz-Zentrum auf dem Potsdamer Telegrafenberg im Gespräch am 23.11.2015.

390 Eine umfassende Zusammenstellung findet sich in: Boer/Haars/Michaelis, *Experimente*, 1988.

391 Walesch, *Test des Newtonschen Gravitationsgesetzes*, 1995, S. 13.

Auch wenn dadurch die Auseinandersetzung mit den meisten historischen Messungen schnell abgetan erscheinen mag, so drängt sich dem ehemaligen Museumskurator doch die Vorstellung eines Museums der sorgfältig konservierten Messungsergebnisse auf. Im täglich weiter fortschreitenden »heute« werden sie ebenso immer erneut aktuell wahrgenommen wie die erhaltenen historischen Instrumente im traditionellen Museum der materiellen Artefakte – darunter die Waage von Paul Stückrath im Münchner Deutschen Museum und das Modell von Sigmund Ewert im Stadthistorischen Museum in der Spandauer Zitadelle.



32 Seit 1982 gemessene Werte der Gravitationskonstante mit Angaben der Unsicherheit, geordnet nach dem Datum der zwischen 1982 und 2014 veröffentlichten Berichte, bezogen auf den CODATA-Wert von 2014. Die kreisförmigen Markierungen stehen für die Verwendung von Waagen nach dem Torsionsprinzip. (Zusammengestellt von Stephan Schlamming)

## Danksagung

Ohne die Unterstützung von Andrea Theissen und Felix Jäger vom Stadthistorischen Museum Spandau in der dortigen Zitadelle wäre dieses Buch nicht möglich gewesen. Ihnen gilt mein Dank ebenso, wie den Mitarbeitern der Archive der Akademie der Künste in Berlin, der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften und der Humboldt-Universität zu Berlin. Mein besonderer Dank gilt Manfred Kranz und Siegmund Ewert, Christoph Förste und auch Stephan Schlamminger. Für ihre wertvollen Ratschläge bedanke ich mich auch bei Michael Eckert, Oskar Blumtritt, Dieter Hoffmann und Claudia Czok. Bedanken möchte ich mich auch bei Helmuth Trischler, der die Publikation in der Reihe des Deutschen Museums ermöglicht hat, für das sorgfältige Lektorat im dortigen Forschungsinstitut, sowie bei den zahlreichen Stellen, welche ihre Erlaubnis zur Wiedergabe der Bilder erteilten.

## Anhang

### Archivalien

- Archiv der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften:
- Wissenschaftliche Unternehmungen der phys.-math. Klasse 1884–1910;
  - NL Helmholtz;
  - Hist. Abt. II-VII;
  - Archiv II-XIV;
  - NL Thiesen.
- Universitätsarchiv der Humboldt-Universität zu Berlin:
- Phil Fak 1220.
- Archiv der Akademie der Künste, Berlin:
- Nachlass Annot.
- Archiv des Deutschen Museums, München

### Literatur

- [o. Verf.]: Philipp von Jolly. Nachruf. In: *Meteorologische Zeitschrift*, Juli 1885, S. 276f.
- Achenbach, Heinrich von; Falk, Adalbert (Hrsg.): Bericht über die Wissenschaftlichen Apparate auf der Londoner internationalen Ausstellung im Jahre 1876. Braunschweig 1881.
- Alder, Ken: A revolution to measure. The political economy of the metric system in France. In: Wise, Norton (Hrsg.): *The values of precision*. Princeton 1994, S. 39–71.
- Architekten-Verein Berlin (Hrsg.): *Berlin und seine Bauten*. 2 Bde. Berlin 1877.
- Architekten-Verein Berlin (Hrsg.): *Berlin und seine Bauten*. 2. Ausg. 3 Bde. Berlin 1896.

Baily, Francis: Experiments with the Torsion Rod for Determining the Mean Density of the Earth. In: *Memoirs of the Royal Astronomical Society* 14 (1843), S. 1–120.

Beyer, Andreas; Savoy, Bénédicte; Tegethoff, Wolf (Hrsg.): *Allgemeines Künstler-Lexikon*, Bd. 77. Berlin 2013.

Boer, Hermann de: Gravity and Relativity. Precision Measurement and Fundamental Constants II. National Bureau of Standards (U.S.), Special Publication 617 (1984).

–; Haars, Holger; Michaelis, Winfried: Experimente zur Bestimmung der Newtonschen Gravitationskonstante – eine Übersicht – und das PTB-Experiment. In: *PTB-Mitteilungen* 98, 1 (1988), S. 3–18.

Böhm, Gottfried: Philipp von Jolly. Ein Lebens- und Charakterbild. München 1886.

Boetticher, Karl Heinrich von: Vorlage von Boetticher an Bundesrath Nr. 50, Session von 1886, 7. April 1886 mit »Beilage zur Begründung der Vorschläge zur Errichtung einer »physikalisch-technischen Reichsanstalt« für die experimentelle Förderung der exakten Naturforschung und der Präzisionstechnik.« (S. 1–49). Angefügt mit eigener Paginierung (1–36): Denkschrift, betreffend die Begründung eines Instituts für die experimentelle Förderung der exakten Naturforschung und der Präzisionstechnik. (Physikalisch-mechanisches Institut.) Vom 16. Juni 1883, mit Beilagen I–III. Aktenstück Nr. 50. In: *Drucksachen zu den Verhandlungen des Bundesraths des Deutschen Reichs*, 1886, Bd. 1. Berlin 1886.

Bollé, Michael: Vom Marstall Unter den Linden zum Neubau in Charlottenburg. Zur Planungsgeschichte des Hauptgebäudes der Universität der Künste Berlin, 1875–1902. *Schriften aus dem Archiv der Universität der Künste Berlin*, Bd. 5. Berlin 2002.

- Boys, Charles Vernon: An integrating-machine. In: *Philosophical Magazine* 11 (1881), S. 342–348.
- On the Cavendish Experiment. In: *Nature* 1889, S. 155–159.
- On the Newtonian Constant of Gravitation. In: *Nature* 1894, S. 330.
- On the Newtonian Constant of Gravitation. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. A* 186 (1895), S. 1–72.
- Braun, Carl: Die Gravitations-Constante, Masse und mittlere Dichte der Erde. Nach einer neuen experimentellen Bestimmung. In: *Denkschriften der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Classe*. Wien 64 (1897), S. 187–258c + drei Tafeln. Vorgelegt in der Sitzung am 11. Juni 1896.
- Die Gravitations-Constante, die Masse und mittlere Dichte der Erde nach einer neuen experimentellen Bestimmung. In: *Naturwissenschaftliche Rundschau. Wöchentliche Berichte über die Fortschritte auf dem Gesamtgebiet der Naturwissenschaften XII* (29. Mai 1897), Nr. 22, S. 273–277.
- Drehwage im Vacuum. In: *Denkschriften der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Classe* 64 (1896). Auch in: *Naturwissenschaftliche Rundschau* 1897, S. 273.
- Buchheim, Gisela: Die Gründungsgeschichte der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt von 1872 bis 1887. Teil 1. Die Bestrebungen zur Gründung eines mechanischen Institutes unter der Oberhoheit des preußischen Staates: (1872–1884). In: *Dresdener Beiträge zur Geschichte der Technikwissenschaften* 3. Dresden 1981.
- Die Gründungsgeschichte der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt von 1872 bis 1887. Teil 2. Die Bestrebungen zur Gründung der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt: (1884–1887). In: *Dresdener Beiträge zur Geschichte der Technikwissenschaften* 4. Dresden 1982.
- Die Denkschrift vom 30.7.1872 von K.-H. Schellbach. Ein Nachtrag zur Vorgeschichte der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. In: *NTM. Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaften, Technik und Medizin* 23 (1986), S. 99–101.
- Bühler, Walter K.: Gauss. Eine biographische Studie. Berlin u. a. 1987.
- Cahan, David: The Institutional Revolution in German Physics, 1865–1914. In: *Historical Studies in the Physical Sciences* 15 (1985), H. 2, S. 1–65.
- An Institute for an Empire. The Physikalisch-Technische Reichsanstalt 1871–1918. New York 1989.
- Meister der Messung. Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt im Deutschen Kaiserreich. Weinheim u. a. 1992.
- The »Imperial Chancellor of the Sciences«: Helmholtz between Science and Politics. In: *Social Research* 73 (2006), S. 1093–1128.
- Cassidy, David: Gustav Hertz, Hans Geiger und das Physikalische Institut der TH Berlin 1933 bis 1945. In: Rürup, Reinhard (Hrsg.): *Wissenschaft und Gesellschaft. Beiträge zur Geschichte der Technischen Universität Berlin 1879–1979*. Berlin, Heidelberg, New York 1979, Bd. I, S. 373–387.
- Cavendish, Henry: Experiments to determine the Density of the Earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 88 (1798), S. 469–526.

- Chen, Yingtian; Cook, Alan H.: Gravitational experiments in the laboratory. Cambridge, UK 1993.
- Cohen, I. Bernhard: Newtons Gravitationsgesetz – aus Formeln wird eine Idee. In: Ehlers, Jürgen: Gravitation. Raum-Zeit-Struktur und Wechselwirkung. Verständliche Forschung. Heidelberg 1987, S. 12–23.
- Cook, Alan H.: Experiments on gravitation. In: Hawking, Stephen W.; Israel, Werner (Hrsg.): Three hundred years of gravitation. Cambridge, UK 1987, S. 50–79.
- Cornu, Marie Alfred; Baille, Jean-Baptiste: Détermination nouvelle de la constante de l'attraction et de la densité moyenne de la Terre. In: Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences 76 (1873), S. 954–958.
- Etude de la résistance de l'air dans la balance de torsion. In: Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences 86 (1878), S. 571–574.
- Sur la mesure de la densité moyenne de la Terre. In: Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences 86 (1878), S. 699–702.
- Influence des termes proportionnels au carré des écarts, dans le mouvement oscillatoire de la balance de torsion. In: Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences 86 (1878), S. 1001–1004.
- Denkschrift, betreffend die Begründung eines Instituts für die experimentelle Förderung der exakten Naturforschung und der Präzisionstechnik. (Physikalisch-mechanisches Institut.) Vom 16. Juni 1883, mit Beilagen I–III. In: Aktenstück Nr. 50 in Drucksachen zu den Verhandlungen des Bundesraths des Deutschen Reichs, 1886, Bd. 1. Berlin 1886.
- Dieterle, Regina: Die Tochter: Das Leben der Martha Fontane. München 2006.
- Ebling, Hermann; Weissberg, Evelyn (Hrsg.): Friedenau erzählt: Geschichten aus einem Berliner Vorort – 1871 bis 1914. Berlin 2007.
- Einstein, Albert: Die Feldgleichungen der Gravitation. In: Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 25. November 1915, S. 844–847.
- Eötvös, Roland von: Untersuchungen über Gravitation und Erdmagnetismus. In: Annalen der Physik und Chemie. Neue Folge 59 (1896), S. 354–400.
- Falconer, Isobel: A purely local experiment – Poynting and the mean density of the Earth. In: Measurement Science and Technology 10 (1999), S. 525–530.
- Cambridge and Building the Cavendish Laboratory. In: Flood, Raymond; McCartney, Mark; Whitaker, Andrew (Hrsg.): James Clerk Maxwell. Perspectives on His Life and Work. Oxford 2014, S. 67–98.
- Fischer, Ernst P.: Der Physiker. Max Planck und das Zerfallen der Welt. München 2007.
- Fölsing, Albrecht: Albert Einstein. Eine Biographie. Frankfurt/M. 1995.
- Heinrich Hertz. Eine Biographie. Hamburg 1997.
- Foerster, Friedrich W.: Erlebte Weltgeschichte 1869–1953. Nürnberg 1953.
- Foerster, Wilhelm: Lebenserinnerungen und Lebenshoffnungen: 1832 bis 1910. Berlin 1911.
- Fontane, Theodor: Briefe, Bd. 4, 1890–1898. München 1982.
- Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin. Verzeichnis der Vorlesungen, Wintersemester 1921/22. Berlin 1921.

- Füßl, Wilhelm: Gründung und Aufbau 1903–1925. In: Füßl, Wilhelm; Trischler Helmuth (Hrsg.): Geschichte des Deutschen Museums. Akteure, Artefakte, Ausstellungen. München u. a. 2003.
- Oskar von Miller 1855–1934. Eine Biographie. München 2005.
- Gillies, G. T.: Some background on the measurement of the Newtonian gravitational constant. In: *Measurement Science and Technology* 10 (1999), S. 421–425.
- Gonzalez, Antonio Moreno: »Weighing« the Earth: A Newtonian Test and the Origin of an Anachronism. In: *Science and Education* 10 (2001), S. 515–543.
- Greenaway, Frank: *Science International: A History of the International Council of Scientific Unions*. Cambridge, UK 1996.
- Hashagen, Ulf; Blumtritt, Oskar; Trischler, Helmuth (Hrsg.): *Circa 1903. Artefakte in der Gründungszeit des Deutschen Museums*. München 2003.
- Hawking, Stephen W.; Israel, Werner (Hrsg.): *Three hundred years of gravitation*. Cambridge, UK 1987.
- Hecker, Oskar: Untersuchung von Horizontal-Pendel-Apparaten. In: *Zeitschrift für Instrumentenkunde* 19 (1899), S. 261–269.
- Heller, Reinhold: Anton von Werner, der Fall Munch und die Moderne im Berlin der 1890er Jahre. In: Bartmann, Dominik (Hrsg.): *Anton von Werner: Geschichte in Bildern*. München 1993, S. 101–109.
- Helmert, Friedrich Robert: *Die Mathematischen und Physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie*. II. Teil: *Die Physikalischen Theorien, mit Untersuchungen über die mathematische Erdgestalt auf Grund der Beobachtungen*. Leipzig 1884. Faks. Neudruck Frankfurt/M. 1962.
- Helmholtz, Hermann von: *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. Braunschweig 1863 [2. Aufl. 1865, 3. umgearbeitete 1870, 4. umgearbeitete 1877, 5. hrsg. von Richard Wachsmuth 1896, diese reproduziert 1913 und 1968]. Nachdruck Frankfurt/M. 1981.
- *Handbuch der physiologischen Optik*. 1. Lieferung, Leipzig 1856, S. 1–192. 2. Lieferung, Leipzig 1860, S. 193–432. 3. Lieferung, Leipzig 1866, S. 433–874.
- *Handbuch der physiologischen Optik*. Leipzig 1867. *Allgemeine Encyclopädie der Physik*. Bearbeitet von P. W. Brix, hrsg. v. Gustav Karsten. Bd. 9.
- *Handbuch der physiologischen Optik*. 2., umgearbeitete Auflage, herausgegeben von Arthur König. Hamburg 1896.
- Ueber die Berathungen des Pariser Congresses betreffend die elektrischen Maasseinheiten. In: *Elektrotechnische Zeitschrift* 2 (1881), S. 482–489.
- Ueber galvanische Polarisation des Quecksilbers und darauf bezügliche neue Versuche des Hrn. Arthur König. In: *Monatsbericht der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin* 1881 (1882), S. 945–958.
- Ueber absolute Maasssysteme für electriche und magnetische Grössen. In: *Annalen der Physik und Chemie* 253 (1882), S. 42–54.
- Bestimmung magnetischer Momente durch die Waage. In: *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin* (1883), S. 405–408.

- Principien der Statik monocyclischer Systeme. In: Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Berlin 1884, S. 159–177, 311–318 und S. 755–759. Auch in: Journal für die reine und angewandte Mathematik. Bd. 97 (1884), S. 111–140 und 317–336.
- Votum des Herrn Geheimen Regierungsrathes, Prof. Dr. von Helmholtz (Juni 1883). Ueber die Aufgaben der wissenschaftlichen Abtheilung des in Aussicht genommenen Physikalisch-Mechanischen Instituts. In: Beilage III. der »Denkschrift, betreffend die Begründung eines Instituts für die experimentelle Förderung der exakten Naturforschung und der Präzisionstechnik. (Physikalisch-mechanisches Institut.) Vom 16. Juni 1883.«, S. 33–36. Die gesamte Denkschrift von 1883 ist als gesonderte Beilage (mit eigener Paginierung) Teil der »Vorlage von Boetticher an Bundesrath Nr. 50, Session von 1886, 7. April 1886« mit der »Beilage zur Begründung der Vorschläge zur Errichtung einer »physikalisch-technischen Reichsanstalt« für die experimentelle Förderung der exakten Naturforschung und der Präzisionstechnik.« Aktenstück Nr. 50, Drucksachen zu den Verhandlungen des Bundesraths des Deutschen Reichs, 1886, Bd. 1. Berlin 1886.
- Aufgaben der ersten (wissenschaftlichen) Abtheilung der physikalisch-technischen Reichsanstalt. (Ausgearbeitet von Dr. von Helmholtz.) In: Vorlage von Boetticher an Bundesrath Nr. 50, Session von 1886, 7. April 1886. Beilage zur Begründung der Vorschläge zur Errichtung einer »physikalisch-technischen Reichsanstalt« für die experimentelle Förderung der exakten Naturforschung und der Präzisionstechnik. S. 6–9. Aktenstück Nr. 50, Drucksachen zu den Verhandlungen des Bundesraths des Deutschen Reichs, 1886, Bd. 1. Berlin 1886.
- Zählen und Messen – erkenntnistheoretisch betrachtet«. In: Philosophische Aufsätze, E. Zeller zu seinem fünfzigjährigen Doktorjubiläum gewidmet. Leipzig 1887, S. 17–52. Abgedruckt und kommentiert in: Hörz, Herbert; Wollgast, Siegfried (Hrsg.): Hermann von Helmholtz: Philosophische Vorträge und Aufsätze. Berlin 1971, S. 301–335.
- Hempel, Walther: Gasanalytische Methoden. 3. Aufl., Braunschweig 1900.
- Hentschel, Klaus: Physics and National Socialism. Anthology of Primary Sources. Basel, Berlin u. a. 1996.
- Heusler, Friedrich, unter Mitwirkung von Franz Richarz u. a.: Über die ferromagnetischen Eigenschaften von Legierungen unmagnetischer Metalle. Marburg 1904.
- Hoffmann, Dieter: Max Planck in seinem Wirken für die Physikalische Gesellschaft und die Annalen der Physik. In: Hoffmann, Dieter (Hrsg.): Max Planck und die moderne Physik. Heidelberg u. a. 2010, S. 1–34.
- (Hrsg.): Gustav Magnus und sein Haus. Stuttgart 1995.
- ; Koch, Hans: Ein Schmuckkästchen für die Physik. Das »Observatorium« der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR), eine Pionierleistung der Wissenschaftsarchitektur, war Vorbild für moderne Forschungsbauten. In: Physik-Journal 11 (2012), Nr. 11, S. 49–51.
- Huebener, Rudolf; Lübbing, Heinz: Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt. Ihre Bedeutung beim Aufbau der modernen Physik. Wiesbaden 2011.
- Jenemann, Hans, R.; Basedow, Arno M.; Robens, Erich: Die Entwicklung der Makro-Vakuumwaage (PTB-Bericht TWD–38). Braunschweig 1992.

- Das Kilogramm der Archive vom 4. Messidor des Jahres 7: Konform mit dem Gesetz vom 18. Germinal des Jahres 3. In: Hoffmann, Dieter; Witthöft, Harald (Hrsg.): Genauigkeit und Präzision in der Geschichte der Wissenschaften und des Alltags. Braunschweig 1996, S. 183–213.
- Joffe, Abram Fjodorowitsch: Begegnungen mit Physikern. Leipzig 1967.
- Jolly, Philipp von: Die Anwendung der Wage auf Probleme der Gravitation. In: Annalen der Physik und Chemie 5 (1878), S. 112–134.
- Die Anwendung der Wage auf Probleme der Gravitation. Zweite Abhandlung. In: Annalen der Physik und Chemie 14 (1881), S. 331–355.
- Kändler, Wolfgang C.: Anpassung und Abgrenzung. Zur Sozialgeschichte der Lehrstuhlinhaber der Technischen Hochschule Berlin-Charlottenburg und ihrer Vorgängerakademien, 1851 bis 1945. Stuttgart 2009.
- Kant, Horst: Gustav Magnus und seine Berliner Physiker-Schule. In: Hoffmann, Dieter (Hrsg.): Gustav Magnus und sein Haus. Stuttgart 1995, S. 33–53.
- Keisch, Claude; Riemann-Reyher Marie Ursula (Hrsg.): Adolph von Menzel: Briefe. Berlin 2009.
- Kim, Dong-Won: Leadership and Creativity. A History of the Cavendish Laboratory, 1871–1919. Dordrecht u. a. 2002.
- Kleiber, Johann; Karsten, Bernhard: Lehrbuch der Physik. Zum besonderen Gebrauche für Technische Lehranstalten sowie zum Selbststudium. 5. Aufl., München 1910.
- Kleiber, Johann und Bernhard Karsten, neu bearbeitet von Heinrich Alt: Lehrbuch der Physik für Ingenieurschulen, technische Schulen sowie zum Selbstunterricht. 26. Auflage, Berlin, München 1943.
- Kleinevoß, Ulf: Bestimmung der Newtonschen Gravitationskonstante G. Dissertation Universität Wuppertal 2002.
- Koch Torres Assis, André; Reich, Karin; Wiederkehr, Karl Heinrich: On the Electromagnetic and Electrostatic Units of Current and the Meaning of the Absolute System of Units – For the 200th Anniversary of Wilhelm Webers Birth. In: Sudhoffs Archiv 88 (2004), H. 1, S. 10–31.
- Kocka, Jürgen u. a. (Hrsg.): Die Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin im Kaiserreich. Berlin 1999.
- König, Arthur: Ueber die Beziehungen zwischen der galvanischen Polarisation und der Oberflächenspannung des Quecksilbers. In: Annalen der Physik und Chemie 16 (1882), S. 1–38.
- Das Leukoskop und einige mit demselben gemachte Beobachtungen. In: Annalen der Physik 13 (1882), S. 990–1008.
- Das Leukoskop und seine Theorie. In: Zeitschrift für Instrumentenkunde 3 (1883), S. 20–26.
- Das Ophthalmometer. In: Zeitschrift für Instrumentenkunde 3 (1883), S. 153–158.
- Zur Kenntniss dichromatischer Farbsysteme. In: Annalen der Physik und Chemie 22 (1884), S. 567–578 (offenbar Habilitationsschrift).
- ; Dieterici, Conrad: Über die Empfindlichkeit des normalen Auges für Wellenlängenunterschiede des Lichts. In: Annalen der Physik und Chemie 22 (1884), S. 579–589.
- ; Richarz, Franz: Eine neue Methode zur Bestimmung der Gravitationskonstante. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. III, LIII, 18. December 1884, S. 1203–1205.

- ; Franz Richarz: Eine neue Methode zur Bestimmung der Gravitationsconstante. (Aus den Sitzungsber. der kgl. preuss. Acad. d. Wiss. zu Berlin, Sitzung vom 18. Dec. 1884, mit einigen Erweiterungen abgedruckt). In: *Annalen der Physik und Chemie* 24 (1885), S. 664–668.
- ; Franz Richarz: Remarks on our Method of Determining the Mean Density of the Earth. In: *Nature*, 31.804 (1885), S. 484.
- ; Franz Richarz: A new method of determining the constant of gravitation. In: *Philosophical Magazine Series* 19, 5. Serie (1885), S. 148–150.
- Vorrede. In: Helmholtz, Hermann von; herausgegeben von Arthur König: *Handbuch der physiologischen Optik*. 2., umgearbeitete Auflage. Hamburg 1896, S. XI.
- ; Runge, Carl (Hrsg.): Hermann von Helmholtz: Vorlesungen über die Elektromagnetische Theorie des Lichts. (Vorlesungen über theoretische Physik, Bd. V). Hamburg, Leipzig 1897.
- ; Runge, Carl (Hrsg.): Hermann von Helmholtz: Vorlesungen über die Die mathematischen Prinzipien der Akustik. (Vorlesungen über theoretische Physik, Bd. III). Hamburg, Leipzig 1898.
- König, Wolfgang: *Der Gelehrte und der Manager. Franz Reuleaux (1829–1905) und Alois Riedler (1850–1936) in Technik, Wissenschaft und Gesellschaft*. Stuttgart 2014.
- Koenigsberger, Leo: Hermann von Helmholtz. 3 Bde. Braunschweig 1902; Nachdruck Hildesheim 2003.
- Krigar-Menzel, Otto: Über die Bewegung gestrichener Saiten. Berlin, Univ., Phil. Diss., 1888.
- Hermann von Helmholtz: Vorlesungen über die Dynamik kontinuierlich verbreiteter Massen (Vorlesungen über theoretische Physik, Bd. II). Hamburg, Leipzig 1902.
- Bei der Gedenkfeier für Robert Hausmann in der Königlichen Akademischen Hochschule für Musik am 7. März 1909 gesprochen von Prof. Dr. O. Krigar-Menzel. 1909. (Offenbar von der Hochschule für Musik verbreitetes Druckblatt in der Staatsbibliothek Berlin).
- (Hrsg.): Hermann von Helmholtz: Vorlesungen über die Dynamik diskreter Massenpunkte (Vorlesungen über theoretische Physik, Bd. I). Hamburg, Leipzig 1898.
- ; Laue, Max (Hrsg.): Hermann von Helmholtz: Vorlesungen über die Elektrodynamik und Theorie des Magnetismus. (Vorlesungen über theoretische Physik, Bd. IV). Hamburg, Leipzig 1902.
- ; Raps, August: Über Saitenschwingungen. Sitzungsber. d. Kgl. Akad. d. Wiss. zu Berlin vom 25. Juni 1891. Auch in: *Annalen der Physik und Chemie* 44 (1891), S. 623–641.
- ; Raps, August: Die Bewegung gezupfter Saiten. Vorgelegt von Kundt am 8. Juni 1893. Sitzungsber. d. Kgl. Akad. d. Wiss. zu Berlin 1893, S. 509–518. Auch in: *Annalen der Physik und Chemie* 50 (1893), S. 444–455.
- Kuczera, Josef: *Heinrich Hertz. Entdecker der Radiowellen*. Berlin 1987.
- Kurz, August: Die Schwerkraft der Erde, insbesondere Jollys Messungen zu München und einiges aus Kirchhoffs »Mechanik«. In: *Blätter für das Bayerische Realschulwesen* 8 (1888), S. 30–38.
- Über Messungen der irdischen Schwerkraft. Eine kritische Abhandlung. In: Exner, Franz (Hrsg.): *Repertorium der Physik* 24 (1888), S. 202–208.

- Lammel, Gisold: Adolph Menzel und seine Kreise. Dresden, Basel 1993.
- Laplace, Pierre-Simon: *Traité de mécanique céleste*. 5 Bde, Paris 1798–1825.
- Leuthold, Dieter (Hrsg.): Ein Bremer rettet den Kaiser. Die Flucht des Prinzen Wilhelm im Jahre 1848 aus Berlin, nach den Erinnerungen von August Oelrichs. Bremen 1998.
- Livingston, Dorothy M.: *The master of light: a biography of Albert A. Michelson*. New York 1973.
- Lodge, Oliver: *Obituary Notices*. In: Poynting, John Henry: *Collected Scientific Papers by John Henry Poynting, Sc.D., F.R.S., Mason Professor in the University of Birmingham. Formerly Fellow of Trinity College, Cambridge*. Cambridge, UK 1920.
- Loewenherz, Leopold: *Wagen im luftabgeschlossenen Raum*. In: Hofmann, August Wilhelm von: *Bericht über die Wissenschaftlichen Apparate auf der Londoner Internationalen Ausstellung im Jahre 1876*. Braunschweig 1878, S. 223–232.
- Lübbing, Heinz: *Max Plancks natürliche Maßeinheiten und das konstitutive Junktim von Maß und Messen*. In: Hoffmann, Dieter (Hrsg.): *Max Planck und die moderne Physik*. Heidelberg u. a. 2010, S. 185–207.
- Manegold, Karl-Heinz; Alois Riedler. In: Treue, Wilhelm; König, Wolfgang (Hrsg.): *Techniker*. Berlin 1990, S. 293–307.
- McCormmach, Russell; Jungnickel, Christa: *Cavendish: The experimental life*. Cranbury 1999.
- *Weighting the world: The reverend John Michell of Thornhill*. Dordrecht u. a. 2012.
- Mendel, Hermann; Reissmann, August: *Musikalisches Konversationslexikon*, Bd. VI. Berlin 1876.
- Meya, Jörg; Sibum, Heinz Otto: *Das fünfte Element. Wirkungen und Deutungen der Elektrizität*. Reinbek 1987.
- Meyer-Stoll, Cornelia: *Die Maß- und Gewichtsreformen in Deutschland im 19. Jahrhundert unter besonderer Berücksichtigung der Rolle Carl August Steinheils und der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Abhandlungen der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Philosophisch-Historische Klasse, Neue Folge Heft 136*. München 2010.
- Michelson, Albert A.: *Experimental determination of the velocity of light*. Washington 1882.
- *On the Velocity of Light*. In: *Nature* 24 (1881), S. 460–461.
- Mundt, Barbara: *Museumsalltag vom Kaiserreich bis zur Demokratie: Chronik des Berliner Kunstgewerbemuseums*. Köln, Weimar, Wien 2018.
- Neményi, Paul: *Über die Berechnung der Schubspannungen im gebogenen Balken*. Diss. TH Berlin-Charlottenburg. Referent Prof. G. Hamel. Korreferent Geheimrat Prof. Dr. Krigar-Menzel. *Maschinenschr. Exemplar in Staatsbibliothek Berlin [ohne Datum, 1922?]*.
- Nolting, Frithjof: *Determination of the Gravitational Constant by Means of a Beam Balance. Design, Construction and First Results*. Diss. Math-nat. Universität Zürich 1998.
- Nolting, Frithjof; Schnurr, Jürgen; Schlamminger, Stephan; Kündig, Walter: *Die Gravitationskonstante – eine Herausforderung an die Meßtechnik*. In: *Physikalische Blätter* 55 (1999), 4, S. 51–53.
- Oberbeck, Anton: *Besprechung von: H. von Helmholtz: Vorlesungen über theoretische Physik. Bd. V: Vorlesungen über die elektromagnetische Theorie des Lichtes*, herausgegeben von Arthur König und Carl Runge. In: *Naturwissenschaftliche Rundschau* 42 (1897), S. 539.
- Ottner-Torkar, Gisela: *Philipp von Jolly und das Geheimnis der Bleikugel*. In: *Deutsches Museum München (Hrsg.): Wissenschaftliches Jahrbuch 1990*. München 1991, S. 72–81.

- Ortenburg, Georg: Geschützgießerei und Artilleriewerkstatt. In: Theissen, Andrea; Wirtgen, Arnold (Hrsg.): *Militärstadt Spandau. Zentrum der preussischen Waffenproduktion 1722 bis 1918*. Berlin 1998, S. 76–92.
- Otto-Bartning-Oberschule Spandau (Hrsg.): *Otto-Bartning-Oberschule VIII*, 01, 23. Mai 1949 – 23. Mai 1979. Festschrift aus Anlaß des 30jährigen Bestehens der Otto-Bartning-Oberschule in der Zitadelle in Spandau/Berlin. Spandau 1979.
- Petersen, Peter: Militärfiskalische Industriebauten der Spandauer Heereswerkstätten – heute. In: Theissen, Andrea; Wirtgen, Arnold (Hrsg.): *Militärstadt Spandau. Zentrum der preussischen Waffenproduktion 1722 bis 1918*. Berlin 1998, S. 171–182.
- Physikalisch-Technische Reichsanstalt: Die Thätigkeit der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in der Zeit vom 1. März 1894 bis 1. April 1895. In: *Zeitschrift für Instrumentenkunde* 15 (1895), S. 283–300 und 324–341.
- Planck, Max: *Über den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie*. Diss. Universität München 1879.
- Über irreversible Strahlungsprobleme. Fünfte Mittheilung (Schluß). In: *Sitzungsberichte der preußischen Akademie der Wissenschaften* 1899, S. 440–480.
- Vorträge und Erinnerungen. Darmstadt 1973. Reprografischer Nachdruck der 5. Auflage, Stuttgart 1949, 9. unveränderte Auflage, Darmstadt 1965.
- Persönliche Erinnerungen aus alten Zeiten. In: *Die Naturwissenschaften*, H. 8 vom 30.10.1948. In: Ebd., S. 1–14.
- Die Einheit des physikalischen Weltbildes (Vortrag gehalten am 9. Dezember 1908 in der naturwissenschaftlichen Fakultät des Studentenkörpers an der Universität Leiden). In: Ebd., S. 28–51.
- Vom Relativen zum Absoluten. (Gastvorlesung gehalten in der Universität München, am 1. Dezember 1924.). In: Ebd., S. 169–182.
- Sinn und Grenzen der exakten Wissenschaft (Vortrag gehalten zuerst im November 1941 im Goethe-Saal des Harnack-Hauses der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften zu Berlin). In: Ebd., S. 363–380.
- Vorträge, Reden, Erinnerungen. Herausgegeben von Hans Roos und Armin Hermann. Berlin u. a. 2001.
- Pohl, Joachim: Soziale Begleiterscheinungen der Industrialisierung in Spandau – Auswirkungen der staatlichen Militärpolitik. In: Theissen, Andrea; Wirtgen, Arnold (Hrsg.): *Militärstadt Spandau. Zentrum der preußischen Waffenproduktion 1722 bis 1918*. Berlin 1998, S. 143–170.
- Poisson, Siméon Denis: *Traité de mécanique*. Bd. 1, 2. Auflage, Paris 1833.
- Poynting, John Henry: On a Method of using the Balance with great delicacy, and on its employment to determine the Mean Density of the Earth. In: *Proceedings of the Royal Society, London A* 28, 2, (1879), S. 2–35. Received June 21, 1878; In: *Collected Papers*, 1920, S. 7–42.
- On a Determination of the Mean Density of the Earth and the Gravitation Constant by means of the Common Balance. In: *Phil. Trans. A* 182, (1892), S. 565–656. Received May 13. Read June 4 1891. In: *Collected Papers*, 1920, S. 43–136.

- Ueber die Bestimmung der mittleren Dichte der Erde und der Gravitationskonstante mittels der gewöhnlichen Waage. In: *Physikalische Revue* (1892), S. 456–468, 561–569, 700–719.
  - The Mean Density of the Earth: essay to which the Adams Prize was adjudged in 1893. London 1894.
  - Collected Scientific Papers by John Henry Poynting, Sc.D., F.R.S., Mason Professor in the University of Birmingham. Formerly Fellow of Trinity College, Cambridge. Cambridge, UK 1920.
  - Recent Studies in Gravitation. Address: Royal Institution of Great Britain, February 23, 1900. In: *Royal Institution Proceedings* 16 (1900), 02, S. 278–294. In: *Collected Papers*, 1920, S. 629–644.
- Quinn, Terry J.: The beam balance as an instrument for very precise weighing. In: *Measurement Science and Technology* 3 (1992), S. 141–159.
- From artefacts to atoms: the BIPM and the search for ultimate measurement standards. Oxford 2012.
- Ramsauer, Carl: Grundversuche der Physik in historischer Darstellung. Erster Band. Von den Fallgesetzen bis zu den elektrischen Wellen. Berlin 1953.
- Raps, August: Zur objectiven Darstellung der Schallintensität. In: *Annalen der Physik und Chemie*. 36 (1889), S. 273–306 (Dissertation).
- Über Luftschwingungen. In: *Annalen der Physik und Chemie* 50 (1893), S. 193–220 (Habilitationsschrift).
  - ; Krigar-Menzel, Otto: Über Saitenschwingungen. In: *Annalen der Physik und Chemie* 44 (1891), S. 623–41.
- Rayleigh, B. (Robert John Strutt, 4th Baron Rayleigh): Charles Vernon Boys, 1855–1944. In: *Obituary Notices of fellows of the Royal Society* 4 (1944), Nr. 13, S. 771–788.
- Rechenberg, Helmut: Hermann von Helmholtz. Bilder seines Lebens und Wirkens. Weinheim 1994.
- Reich, Ferdinand: Neue Versuche mit der Drehwaage. In: *Abhandlungen der mathematisch-physischen Classe der königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig*. (1852), Bd. 1, S. 383–430.
- Richarz, Franz: Die Bildung von Ozon, Wasserstoffsuperoxyd und Ueberschwefelsäure bei der Electrolyse verdünnter Schwefelsäure. Phil. Diss. Berlin 1884. Berlin 1884.
- Gravitationskonstante und mittlere Dichtigkeit der Erde, bestimmt durch Wägungen. (Sitzungsbericht der königl. preuss. Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 26. Nov. 1896) In: *Annalen der Physik und Chemie*. Neue Folge 66 (1898), Nr. 10, S. 177–193. (Eingegangen 22. October 1897).
  - Gravitationskonstante und mittlere Dichtigkeit der Erde, bestimmt durch Wägungen. (Im Anschluss an zwei Original-Berichte, mitgetheilt von Letzterem.) In: *Naturwissenschaftliche Rundschau*. Wöchentliche Berichte über die Fortschritte auf dem Gesamtgebiete der Naturwissenschaften XII, Nr. 12 (20. März 1897), S. 145–147 und Nr. 13 (27. März) S. 157–160.
  - Waage zur Bestimmung der mittleren Dichtigkeit der Erde. In: *Zeitschrift für Instrumentenkunde* 19 (1899), S. 40–56.

- Die Theorie des Gesetzes von Dulong und Petit. I. u. II. Abhandl. In: Zeitschrift für anorganische Chemie 58 (1908), S. 356–374 und 146–160.
- Versuchsordnung von ihm und O. Krigar-Menzel für das Deutsche Museum. Zusammen mit: Verhältnis der spezifischen Wärmen bei reinem Sauerstoff und Vermeidung einer merkwürdigen dabei auftretenden Fehlerquelle. In: Schriften der Gesellschaft zur Beförderung der gesammten Naturwissenschaften zu Marburg 8 (1910), S. 110–112.
- Auffindung, Beschreibung und vorläufige physikalische Untersuchung des Meteoriten von Treysa. Schriften der Gesellschaft zur Beförderung der gesammten Naturwissenschaften zu Marburg 14, H. 2. Marburg 1918.
- (Hrsg.): Hermann von Helmholtz: Vorlesungen über die Theorie der Wärme. (Vorlesungen über theoretische Physik, Bd. VI). Hamburg, Leipzig 1903.
- ; Krigar-Menzel, Otto: Die Abnahme der Schwere mit der Höhe, bestimmt durch Wägung. (Vorläufige Mittheilung.) (Aus den Sitzungsberichten der Königl. preuss. Akademie der Wissenschaften zu Berlin vom 23. März 1893; mitgetheilt von den Hrn. Verf.) In: Annalen der Physik und Chemie 51 (1894), S. 559–583.
- ; Krigar-Menzel, Otto: Bestimmung der Gravitationsconstante und der mittleren Dichtigkeit der Erde durch Wägungen. Aus dem Anhang zu den Abhandlungen der Königl. Preuss. Akademie der Wissenschaften zu Berlin vom Jahre 1898. Vorgelegt in der Sitzung der phys.-math. Classe am 16. December 1897 [Sitzungsberichte St. III. S. 1121]. Zum Druck eingereicht am 28. Februar, ausgegeben am 5. September 1898.«
- Richter, M.: Arthur König zum Gedächtnis. In: Die Farbe 5 (1956), Nr. 1/2, S. 1–6.
- Riegger, Matthias: Helmholtz Musicus. Die Objektivierung der Musik im 19. Jahrhundert durch Helmholtz' Lehre von den Tonempfindungen. Darmstadt 2006.
- Robens, Erich; Jayaweera, Shanath Amarasiri, A.; Kiefer, Susanne: Balances. Instruments, Manufacturers, History. Berlin u.a. 2014.
- Roche, John J.: The Mathematics of Measurement: A Critical History. Berlin u.a. 1998.
- Rothleitner, Christian; Schlamminger, Stephan: Schwere Experimente. Bis heute bringt die präzise Messung der Gravitationskonstanten Experimentatoren an ihre Grenzen. In: Physik-Journal 14 (2015), Nr. 11, S. 37–42.
- Ruff, Peter W.: Emil du Bois-Reymond. Leipzig 1981.
- Runge, Carl: Maass und Messen. Abgeschlossen Januar 1902. In: Encyclopädie der mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen. Herausgegeben im Auftrage der Akademien der Wissenschaften zu Göttingen, Leipzig, München und Wien sowie unter Mitwirkung zahlreicher Fachgenossen. Leipzig 1903–1921. Bd. V Physik, redigiert von Arnold Sommerfeld. Teil 1, S. 4–24.
- Rürup, Reinhard (Hrsg.): Wissenschaft und Gesellschaft. Beiträge zur Geschichte der Technischen Universität Berlin 1879–1979. Zwei Bde. Berlin u.a. 1979.
- Sabbata, Venzo de: The gravitational constant – generalized gravitational theories and experiments. Dordrecht 2004.
- Saltzer, Walter: Richard Wachsmuth (1868–1941). In: Bethge, Klaus; Freudenberg, Claudia (Hrsg.): 100 Jahre Physik an der Goethe-Universität in Frankfurt am Main 1914–2014. Frankfurt/M. 2014, S. 36–51.
- Scheel, Karl: Die Ausdehnung des Wassers mit der Temperatur. Diss. phil. Universität Berlin, 1890. (verteidigt am. 11. Okt.).

- Grundlagen der Praktischen Metronomie. Braunschweig 1911.
- ; Diesselhorst; H.: Bestimmung der Änderung der Schwere mit der Höhe auf dem Grundstücke d. Phys.-Techn. Reichsanstalt zu Charlottenburg (durch Wägungen). In: Wissenschaftliche Abhandlungen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt 2 (1895), S. 185.
- ; Diesselhorst; H.: Bestimmung der Änderung der Schwere mit der Höhe auf dem Grundstücke d. Phys.-Techn. Reichsanstalt zu Charlottenburg. In: Zeitschrift für Instrumentenkunde 16 (1896), S. 25–27.
- Schlamminger, Stephan: Determination of the gravitational constant using a beam balance. Diss. math.-nat. Univ. Zürich 2002.
- Schroeder-Gudehus, Brigitte: Challenge to Transnational Loyalties: International Scientific Organizations after the First World War. In: Science Studies 3 (1973), Nr. 2, S. 93–118.
- Die Akademie auf internationalem Parkett. Die Programmatik der internationalen Zusammenarbeit wissenschaftlicher Akademien und ihr Scheitern im Ersten Weltkrieg«. In: Kocka, Jürgen (Hrsg.): Die Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin im Kaiserreich. Berlin 1999, S. 175–195.
- Schulze, Franz A.: Franz Richarz. Nekrolog. In: Physikalische Zeitschrift 22 (1921), S. 33–36.
- Zur Geschichte des Physikalischen Instituts. In: Festschrift »Die Philipps-Universität zu Marburg 1527–1927«, Marburg 1927, S. 756–772.
- Schumacher, Achim: Systematische Untersuchungen zur Messung der Newtonschen Gravitationskonstanten mit einem Pendelresonator. Dissertation Universität Wuppertal, 1999.
- Siemens-Helmholtz, Ellen von (Hrsg.): Anna von Helmholtz. Ein Lebensbild in Briefen. 2 Bde. Berlin 1929.
- Strouhal, Vincent; Barus, Carl: Ueber den Einfluss des Anlassens auf die Haltbarkeit der Magnete. In: Annalen der Physik und Chemie 256 (1883), S. 621–662.
- Stückrath, P.: Waage zur graphischen Aufzeichnung veränderlichen Gewichts. In: Zeitschrift für Instrumentenkunde 3 (1883), S. 95–99.
- Swenson, Loyd S. Jr.: The ethereal Aether. A history of the Michelson-Morley-Miller Aether-Drift Experiments, 1880–1930. Austin, London 1972.
- Theissen, Andrea; Wirtgen, Arnold (Hrsg.): Militärstadt Spandau. Zentrum der preussischen Waffenproduktion 1722 bis 1918. Berlin 1998.
- Die Geschichte der Zitadelle Spandau. In: GSE Ingenieurgesellschaft (Hrsg.): Die Zitadelle Spandau – Konstruktion und Bauwerk. Hamburg 2010, S. 4–11.
- Thiesen, Max Ferdinand: Über die Verbreitung der Atmosphäre. Diss. Friedrich Wilhelm Universität Berlin, 1878. (Verteidigung 2. März 1878).
- Zur Theorie der Waage und Wägung. In: Zeitschrift für Instrumentenkunde 2 (1882), S. 358–365 und 3 (1883), S. 81–89.
- Die Arbeiten des internationalen Instituts für Maass und Gewicht. In: Zeitschrift für Instrumentenkunde 3 (1883), S. 1–8 und 41–46.
- Etudes sur la balance. In: Travaux et mémoires du Bureau international des poids et mesures 5 (1886).

- Détermination de la variation de la pesanteur avec la hauteur. In: Travaux et mémoires du Bureau international des poids et mesures 7 (1890).
  - Bestimmung der Änderung der Schwere mit der Höhe. In: Zeitschrift für Instrumentenkunde 11 (1891), S. 66f.
  - Kilogrammes prototypes: comparaison des prototypes nationaux entre eux; description des défauts des kilogrammes. In: Travaux et mémoires du Bureau international des poids et mesures 8 (1893).
  - Kilogrammes prototypes: comparaison des prototypes nationaux avec le prototype international; compensations et discussions sur les résultats; recherche sur la constance des poids; détermination du volume des prototypes des kilogrammes. In: Travaux et mémoires du Bureau international des poids et mesures 9 (1898).
- Trimble Virginia; Williams, Thomas R.; Bracher, Katherine; Jarrell, Richard; Marché, Jordan D.; Ragep, F. Jamil (Hrsg.): *Biographical Encyclopedia of Astronomers*. New York u. a. 2014.
- Ullmann, Dieter: *Helmholtz-Koenig-Waetzmann und die Natur der Kombinationstöne*. In: *Centaurus* 29 (1986), S. 40–52.
- Ohm-Seebeck-Helmholtz und das Klangfarbenproblem. In: *NTM. Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaften, Technik und Medizin* 25 (1988), S. 65–68.
- Voit, C. von: Philipp Johann Gustav von Jolly. In: *Sitzungsberichte der Bayerischen Akademie der Wissenschaften / Mathematisch-physikalische Klasse* 15 (1885), S. 119–136.
- Wachsmuth, Richard: *Vorwort zur fünften Auflage von: Helmholtz, Hermann: Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. 5. Aufl. herausgegeben von Richard Wachsmuth. Braunschweig 1896.
- Das Physikalische Institut. In: *Festschrift der XXVI. Versammlung des Deutschen Vereins für öffentliche Gesundheitspflege*, Rostock 1901, S. 318–320.
- Walesch, Harald: *Test des Newtonschen Gravitationsgesetzes und die präzise Bestimmung von G*. Diss., Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal, Mai 1995.
- Wehler, Hans-Ulrich: *Deutsche Gesellschaftsgeschichte*, Bd. 3. *Von der ›Deutschen Doppelrevolution‹ bis zum Beginn des ›Ersten Weltkrieges‹ 1849–1914*. München 1995.
- Wehry, Katrin: *Kaiser Friedrich III. (1831–1888) als Protektor der Königlichen Museen. Skizze einer neuen Kulturpolitik*. Berlin 2013.
- Weizsäcker, Carl Friedrich von: *Große Physiker. Von Aristoteles bis Werner Heisenberg*. München 1999. Wiesbaden 2004.
- Westphal, Wilhelm: *Aus der großen Zeit der Berliner Physik*. In: *Leussink, Hans; Neumann, Edward; Kotowski, Georg (Hrsg.): Studium Berolinense: Aufsätze und Beiträge zu Problemen der Wissenschaft und zur Geschichte der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin*. Berlin 1960, S. 791–815.
- Das Physikalische Institut der TU Berlin. In: *Physikalische Blätter* 11 (1955), S. 554–558.
- Wiederkehr, K. H.: *Wilhelm Weber. Leben und Wirken*. In: *Über die Einführung absoluter elektrischer Maße*. Wilhelm Weber und Rudolf Kohlrausch. Braunschweig 1968, S. 5–13.
- Wilhelmy, Petra: *Der Berliner Salon im 19. Jahrhundert*. Berlin 1989.

Wilsing, Johannes: Ueber den Einfluss von Luftdruck und Wärme auf die Pendelbewegung. Diss. phil. Friedrich Wilhelm Universität Berlin, öffentlich verteidigt 20. Sept. 1880.

- Über die Anwendung des Pendels zur Bestimmung der mittleren Dichtigkeit der Erde. (Vorgelegt von Hrn. Auwers). Sitzungsberichte der Kgl. Preuß. Akad. d. Wiss. z. Berlin, Sitzung vom 15. Januar 1885, Ausgabe 22. Januar 1885, S. 13–15.
- Mittheilung über die Resultate von Pendelbeobachtungen zur Bestimmung der mittleren Dichtigkeit der Erde. (Vorgelegt von Hrn. Auwers am 31. März). In: Sitzungsberichte der Kgl. Preuß. Akad. d. Wiss. z. Berlin, 1887, S. 327–334. Ausgegeben am 28. April.

Wolff, Stefan L.: August Kundt (1839–1894). Die Karriere eines Experimentalphysikers. In: *Physis* 29 (1992), H. 2, S. 403–446.

- Gustav Magnus – ein Chemiker prägt die Berliner Physik. In: Hoffmann, Dieter (Hrsg.): *Gustav Magnus und sein Haus*. Stuttgart 1995, S. 11–32.
  - Leo Arons – Physiker und Sozialist. In: *Centaurus* 41 (1999), S. 183–212.
  - Die Quecksilberdampf Lampe von Leo Arons. In: Hashagen, Ulf; Blumtritt, Oskar; Trischler, Helmuth (Hrsg.): *Circa 1903*. Wissenschaftliche und technische Artefakte in der Gründungszeit des Deutschen Museums. München 2003, S. 329–348.
- Zaun, Jörg: *Instrumente für die Wissenschaft: Innovationen in der Berliner Feinmechanik und Optik 1871–1914*. Berlin 2002.

Zenneck, Jonathan: *Gravitation*. Abgeschlossen August 1901. In: *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen*. Herausgegeben im Auftrage der Akademien der Wissenschaften zu Göttingen, Leipzig, München und Wien sowie unter Mitwirkung zahlreicher Fachgenossen. Leipzig 1903–1921. Bd. V Physik, redigiert von Arnold Sommerfeld, Teil 1, S. 25–67.

Zöbl, Dorothea: Ernst Reuter und sein schwieriges Verhältnis zu den Alliierten 1946–1948. In: Reif, Heinz; Feichtinger, Moritz (Hrsg.): *Ernst Reuter. Kommunalpolitiker und Gesellschaftsreformer 1921–1953*. Bonn 2009, S. 253–273.

## Personenregister

**A** Adams, John Couch (1819–1892) 136  
 Airy, George Biddell (1801–1892) 76  
 Albert von Sachsen-Coburg und Gotha (1819–1861) 55  
 Arons, Leo (1860–1919) 151  
 Auguste Viktoria, Deutsche Kaiserin (1858–1921) 160  
 Auwers, Arthur von (1838–1915) 78, 10

**B** Baeyer, Johann Jacob (1794–1885) 44, 71  
 Baille, Jean-Baptiste (1841–1918) 25, 138  
 Bailly, Francis (1774–1844) 138  
 Bamberg, Carl (1847–1892) 97  
 Bartning, Otto (1883–1959) 174  
 Barus, Carl (1865–1935) 135  
 Becker, Richard (1887–1955) 159  
 Bell, Alexander Graham (1847–1922) 75  
 Benda, Robert von (1816–1899) 68  
 Benoît, J. R. 124  
 Bertram, Heinrich Walter (1826–1904) 60  
 Bessel, Friedrich Wilhelm (1784–1846) 44  
 Bismarck, Otto von (1815–1898) 48, 56, 73  
 Boetticher, Karl Heinrich von (1833–1907) 64  
 Bois-Reymond, Emil du (1818–1896) 50–51, 53–55, 60, 70, 93, 102  
 Bonaparte, Mathilde Lætitia Wilhelmine (1820–1904) 47

- Boys, Charles Vernon (1855–1944) 25,  
136–145, 166
- Brahms, Johannes (1833–1897) 70, 153–154
- Braun, Carl (1831–1907) 134, 139, 142, 144
- Broch, Ole Jacob (1818–1889) 124
- Bronsart von Schellendorff, Paul (1832–  
1891) 108
- Bunge, Paul (1839–1888) 98–101, 121–122
- C**
- Cahan, David (geb. 1947) 66
- Carlini, Francesco (1783–1862) 76
- Casals, Pablo (1876–1973) 154
- Cavendish, Henry (1731–1810) 22–24, 57,  
136, 138, 172–173, 180
- Cavendish, William (1808–1891) 57, 138, 178
- Chen, Yingtian T. 180
- Clausius, Rudolf (1822–1888) 86
- Cohen, I. Bernard (1914–2003) 21
- Cook, Alan Hugh (1922–2004) 180
- Cornu, Marie Alfred (1841–1902) 25, 138
- Coulomb, Charles Augustin de (1736–  
1806) 22, 142
- Cranz, Carl (1858–1945) 157
- Curie, Marie Skłodowska (1867–1934) 178
- Curtius, Ernst (1814–1896) 68
- D**
- Dahlmann, Friedrich (1785–1860) 32
- Delambre, Jean-Baptiste Joseph (1749–  
1822) 73
- Delbrück, Rudolph (1817–1903) 73
- Diesselhorst, Hermann (1870–1969) 124, 132,  
144–145
- Dieterici, Conrad (1858–1929) 83
- Dilthey, Wilhelm (1833–1911) 88
- E**
- Edison, Thomas Alva (1847–1931) 167
- Einstein, Albert (1879–1955) 16, 143,  
157–158, 161, 178
- Elling, Jacoba (1865 bis nach 1943) 152
- Eötvös, Loránd (1848–1919) 134, 142
- Ewert, Siegmund 174, 184
- F**
- Falconer, Isobel 79
- Faraday, Michael (1791–1867) 55–56, 149
- Foerster, Wilhelm (1832–1921) 18, 42–44, 47,  
61–62, 64, 68, 73, 96, 98–100, 103, 121, 148
- Fölsing, Albrecht (geb. 1940) 143
- Fontane, Martha (1860–1917) 90
- Fontane, Theodor (1819–1898) 90
- Forckenbeck, Max von (1821–1892) 68
- Friedrich II., König von Preußen (1712–  
1786) 176
- Friedrich III., Deutscher Kaiser (1831–  
1888) 18, 56, 61, 64, 69–70, 86, 148
- Friedrich Wilhelm III., König von Preußen  
(1770–1840) 30
- Fuess, Rudolf (1838–1917) 119
- G**
- Gagern, Heinrich von (1799–1880) 67
- Gauß, Carl Friedrich (1777–1855) 27, 99,  
126–127
- Görs, Paul 172
- Guthrie, Frederick (1833–1886) 58, 136–137
- H**
- Haensch, Herrmann (1832–1896) 75
- Hagen, Gotthilf (1797–1884) 88
- Halske, Johann Georg (1814–1890) 96
- Hamel, Georg (1877–1954) 161
- Hanstein, Johannes von (1822–1880) 88
- Hauptmann, Gerhart (1862–1945) 155
- Hausmann, Robert (1852–1909) 158
- Hawking, Stephen W. (1942–2018) 178
- Hecker, Oskar (1864–1938) 100
- Helmert, Robert (1843–1917) 41, 100
- Helmholtz, Anna von (1834–1899) 67, 68,  
160
- Helmholtz, Hermann von (1821–1894) 16–17,  
19, 25, 28, 30, 33, 36, 42, 48, 49, 50–60,  
62, 64, 66–68, 70–75, 78, 82–88, 92–93,  
98, 102–103, 106, 116–121, 126, 129, 142,  
149–152, 154–155, 157, 160–163, 178, 181
- Helmholtz, Richard von (1852–1934) 68
- Helmholtz, Robert von (1862–1889) 87
- Henry, Joseph (1797–1878) 46
- Hermann, Friedrich 119
- Hertz, Gustav (1887–1975) 147, 158
- Hertz, Heinrich (1857–1894) 41, 74, 76, 150,  
178
- Hettner, Georg (1854–1814) 86
- Holz, Arno (1863–1929) 153
- Humboldt, Alexander von (1769–1859) 49,  
70
- Humboldt, Wilhelm von (1767–1835) 30
- Hüttlinger, Johann Leonhard (1752–  
1822) 140
- Hutton, James (1726–1797) 76
- Hyde, Edward (1609–1674) 58
- I**
- Ibsen, Henrik (1828–1906) 153
- Israel, Werner (geb. 1931) 178

- Jacobi, Rudolf (1889–1972) 154  
 Joachim, Joseph (1831–1907) 70, 88, 90, 153, 158, 160  
 Jolly, Philipp von (1809–1884) 19, 24–25, 30, 32–42, 44, 50, 52, 55, 58, 75–76, 78, 80–83, 94–95, 99–100, 114–115, 122, 124, 132, 140–144, 163, 168–170, 181  
 Joule, James Prescott (1818–1889) 55
- K**  
 Karsten, Bernhard (1858–1909) 172  
 Kayser, Max (1853–1888) 64  
 Kekulé, August (1829–1896) 86  
 Kirchhoff, Gustav Robert (1824–1887) 42, 50, 53, 142, 150  
 Kleiber, Johann (1865–1941) 172, 176  
 Knaus, Ludwig (1829–1910) 152  
 Knobelsdorff, Georg Wenzeslaus von (1699–1753) 176  
 Kohlrausch, Friedrich G. (1840–1910) 130, 155  
 Kohlrausch, Rudolf (1809–1858) 130  
 Kolb, Annette (1870–1967) 154  
 König, Arthur (1856–1901) 15, 25, 68, 74, 78–79, 82–86, 92, 94, 97, 99, 102, 104, 106, 108, 112–118, 121–122, 143, 149, 160, 179, 181  
 Kortum, Hermann (1836–1904) 86  
 Kossuth, Lajos (1802–1894) 142  
 Kranz, Manfred 174  
 Krigar, Emilie (1842–1921) 90, 153  
 Krigar, Hermann (1819–1880) 14, 90  
 Krigar, Johann Friedrich (1774–1852) 14  
 Krigar-Menzel, Anna-Otilie, gen. Annot, (1894–1981) 153, 159  
 Krigar-Menzel, Otto (1861–1929) 10, 14–15, 19, 26, 29, 40, 68, 79, 86–88, 90–92, 100, 103, 106, 114–115, 117–119, 124, 126–136, 139, 142–164, 172, 179, 181  
 Kummer, Ernst Eduard (1810–1893) 86  
 Kundt, August (1839–1894) 86, 149–151, 156  
 Kurlbaum, Ferdinand (1857–1927) 157
- L**  
 Lagrange, Joseph-Louis de (1736–1813) 42  
 Laplace, Pierre-Simon (1749–1827) 42  
 Lasaulx, Arnold de (1839–1886) 86  
 Laue, Max (1879–1960) 161  
 Lavoisier, Antoine Laurent de (1743–1794) 99  
 Lenbach, Franz von (1836–1904) 48, 68  
 Lesch, Harald (geb. 1960) 166  
 Leydig, Franz von (1821–1908) 86  
 Liebherr, Josef (1767–1840) 38  
 Lind, Lambert 100  
 Lipschitz, Rudolf (1832–1903) 86  
 Lissajous, Jules Antoine (1822–1880) 52  
 Lübbig, Heinz (geb. 1932) 164  
 Ludwig I. (1786–1868) 32  
 Ludwig II. (1845–1886) 52  
 Lummer, Otto (1860–1925) 88  
 Magnus, Heinrich Gustav (1802–1870) 30, 53, 66  
 Maskelyne, Nevil (1732–1811) 76  
 Maximilian II., König von Bayern (1811–1864) 30, 32, 52,  
 Maxwell, James-Clerk (1831–1879) 27, 53, 55, 57–58, 79, 80  
 Méchain, Pierre (1744–1804) 73  
 Mendelssohn-Bartholdy, Felix (1809–1847) 90  
 Meyer-Stoll, Cornelia 44  
 Menzel, Adolph von (1815–1905) 14, 68, 70, 88, 90, 92, 151–154, 159  
 Michell, John (1724–1793) 22  
 Michelson, Albert Abraham (1852–1931) 75–76  
 Miller, Oskar von (1855–1934) 167–68, 170  
 Mohl, Robert von (1799–1875) 67  
 Moltke, Helmuth von (1800–1891) 62, 65, 148  
 Morley, Edward Williams (1838–1923) 76  
 Müller, Johannes (1801–1858) 50, 55  
 Munch, Edvard (1863–1944) 153
- N**  
 Napoleon III., Kaiser der Franzosen (1808–1873) 45, 47  
 Neményi, Paul (1895–1952) 156  
 Neumann, Franz Ernst (1798–1895) 122  
 Newton, Isaac (1643–1727) 21–22, 26, 55, 67, 103, 116, 133, 138, 164  
 Nobel, Alfred (1833–1896) 168  
 Nolting, Frithjof (geb. 1968) 24
- O**  
 Oertling, Ludwig (1818–1891) 80  
 Ohm, Georg Simon (1789–1854) 31, 145  
 Ossietzky, Carl von (1889–1938) 154
- P**  
 Paalzow, Carl Adolf (1823–1908) 60, 155  
 Pernet, Johannes (1845–1902) 118  
 Planck, Max (1858–1947) 16, 18, 26, 29, 36, 41, 55, 149–150, 155–157, 160–167, 178, 181–182

- Poisson, Siméon Denis (1781–1840) 40  
 Poynting, Henry (1852–1914) 25, 79–82, 94,  
 124, 136, 140–141, 143–145, 166, 179–181
- Quinn, Terry** (geb. 1938) 18, 99
- Ranke, Leopold von** (1795–1886) 32  
 Raps, August (1865–1920) 149–150  
 Rathenau, Emil (1838–1915) 167  
 Regnault, Henri Victor (1810–1878) 37  
 Reich, Ferdinand (1799–1882) 138  
 Reichenbach, Georg (1771–1826) 38  
 Reimann, L. 96  
 Repsold, Johann Adolf (1838–1919) 79  
 Reuleaux, Franz (1829–1905) 64, 156  
 Reuter, Ernst (1889–1953) 173  
 Richarz, Franz (1860–1920) 10, 15, 25, 29,  
 40, 68, 74, 78–79, 82, 84, 86, 89, 92, 94, 97,  
 99–100, 102–104, 106, 108, 112, 115–116,  
 118–119, 121–122, 124, 126, 129–131, 134,  
 136, 139, 142–145, 149, 151–152, 159–164,  
 170, 172, 179  
 Richarz, Franz R. (1812–1887) 86  
 Richter, Manfred (1905–1990) 83  
 Riedler, Alois (1850–1936) 156–157  
 Röntgen, Wilhelm Conrad (1845–1923) 168,  
 178  
 Rubens, Heinrich (1865–1922) 156  
 Runge, Carl (1856–1927) 160, 164  
 Ruprecht, Albin (1833–1913) 121  
 Rutherford, Ernest (1871–1937) 178
- Scheel, Karl** (1866–1936) 27, 124, 132,  
 144–145  
 Schellbach, Karl-Heinrich (1805–1892) 59–  
 61, 155, 167–168  
 Schelling, Friedrich Wilhelm von (1775–  
 1854) 32  
 Schinkel, Karl Friedrich (1781–1841) 96  
 Schleinitz, Maria von (1842–1912) 68  
 Schlieffen, Alfred von (1833–1913) 147  
 Schmidt, Franz (1825–1888) 75  
 Schmidt-Zabierow, Ida von (1832–1911) 160  
 Schnitzler, Arthur (1862–1931) 153  
 Schumann, Robert (1810–1856) 86, 90, 160  
 Siemens, Arnold von (1853–1918) 66  
 Siemens, Werner von (1816–1892) 64–66,  
 70, 96  
 Spieker, Paul Emanuel (1826–1921) 54, 61  
 Steinheil, Carl August von (1801–1870) 31  
 Stollnreuther, Carl (1816–1892) 35, 38, 168
- Strindberg, August (1849–1912) 153  
 Strouhal, Vincent (1850–1922) 135  
 Stückrath, Paul (1844–1916) 9, 95–100, 104,  
 112, 117, 124, 126, 135–136, 156, 170, 184  
 Studer, Hermann 119  
 Süss, Ferdinand (1848–1921) 142
- Thiesen, Max Ferdinand** (1849–1936) 116,  
 119–122, 124, 126, 128, 132, 144–145  
 Thomson, William, seit 1866 Lord Kelvin  
 (1824–1907) 53, 55, 57  
 Tirpitz, Alfred von (1849–1930) 147  
 Tranchot, Jean Joseph (1752–1815) 73  
 Tschudi, Hugo von (1851–1911) 159
- Utzschneider, Josef** (1763–1840) 38
- Victoria, Prinzessin des Vereinigten König-**  
**reichs von Großbritannien und Irland**  
 (1840–1901) 56, 60, 160  
 Victoria, Königin des Vereinigten Königreichs  
 von Großbritannien und Irland (1819–  
 1901) 55  
 Virchow, Rudolf von (1821–1902) 68
- Wachsmuth, Richard** (1868–1941) 88, 161  
 Wagner, Cosima (1837–1930) 68  
 Wagner, Richard (1813–1883) 68  
 Walesch, Harald 183  
 Wangerin, Albert (1844–1933) 86  
 Weber, Wilhelm (1804–1891) 27, 74  
 Wegener, Alfred (1880–1930) 87  
 Wehler, Hans-Ulrich (1931–2014) 54, 56–58  
 Wells, Herbert George (1866–1946) 163  
 Werner, Anton von (1843–1915) 68–70, 90,  
 153  
 Westphal, Wilhelm (1882–1978) 158  
 Wild, Heinrich (1833–1902) 120  
 Wilhelm I., Deutscher Kaiser (1797–1888) 55,  
 61, 68, 74, 86  
 Wilhelm II., Deutscher Kaiser (1859–1941) 18,  
 86, 157, 160, 170  
 Wilsing, Johannes (1856–1943) 76–79, 84,  
 94, 102, 141  
 Wolf, Friedrich (1888–1953) 153  
 Wolff, Stefan (geb. 1952) 149
- Zeller, Eduard** (1814–1908) 67  
 Zenneck, Jonathan (1871–1959) 164  
 Zuckmayer, Carl (1896–1977) 153

## Abbildungsverzeichnis

Alle Bilder mit Kennzeichnung DMA:  
Deutsches Museum München, Archiv,  
Bildnummer.

Alle DMA-Bilder mit dem Zusatz BN oder CD  
stammen, so nichts anderes angegeben ist,  
aus dem Fotoatelier des Deutschen Museums.

**Abb. 1a** DMA, BN 59867, DMA, BN 59867,  
Foto T. Rebenyi

**Abb. 2** DMA, BN 44665

**Abb. 3** DMA, PT\_01661\_01-01

**Abb. 4** DMA, BN 55558

**Abb. 5** DMA, BN 33587

**Abb. 6** DMA, PT\_00958\_01

**Abb. 7** DMA, PT\_01439\_11-01

**Abb. 8** DMA, PT\_11313\_01

**Abb. 9** <http://architekturmuseum.ub.tu-berlin.de/P/126002.php>

**Abb. 10** DMA, PT\_02569\_01

**Abb. 11** DMA, PT\_03466\_03-01

**Abb. 12** © bpk / Nationalgalerie SMB /  
Klaus Göken

**Abb. 13** Potsdam-Institut für Klimafolgenfor-  
schung e.V., PIK/Kartschall  
Die Erlaubnis zum Abdruck wurde erteilt

**Abb. 14** Staatsbibliothek Berlin, SBB-  
0001BAC700000000

**Abb. 15** Kunstbibliothek/Staatliche Museen  
Berlin, a 00192.tif

**Abb. 16** Bildarchiv Foto Marburg, Fotograf  
unbekannt. Aufnahme-Nr. 426.272

**Abb. 17** DMA, PT\_10171\_GF

**Abb. 18** DMA, CD\_75605

**Abb. 19** Architekturmuseum der TU Berlin,  
Inv. Nr. F 0061

**Abb. 20** Luftaufnahme2015.jpg, Archiv  
Stadtgeschichtliches Museum Spandau,  
airdolly

**Abb. 21** DMA, CD\_75608

**Abb. 22** DMA, CD\_75609

**Abb. 23** DMA, CD\_75610

**Abb. 24** DMA, CD\_75607

**Abb. 25** DMA, CD\_75606

**Abb. 26** Dank an Siemens Historical  
Institute

**Abb. 27** DMA, PT\_02885\_04 GF

**Abb. 28** DMA, CD\_75604

**Abb. 29** DMA, CD\_75603

**Abb. 30 a, b** H. Petzold, beide Abb.

**Abb. 31** H. Petzold

**Abb. 32** Grafik von S. Schlamminger, mit  
freundlicher Genehmigung

