

Rudolf Herrmann

Die Tieftemperaturphysik an der Humboldt- Universität im 20. Jahrhundert

Vom Nernstschen Wärmesatz
zum Quanten-Hall-Effekt



Springer Spektrum

Die Tieftemperaturphysik an der Humboldt-Universität im 20. Jahrhundert

Kein Mensch kann lange zusehen wie ich einen Stein fallen lasse und dazu sage: Er fällt nicht. Dazu ist kein Mensch imstande. Die Verführung, die von einem Beweis ausgeht, ist zu groß. Ihr erliegen die meisten, auf die Dauer alle. Das Denken gehört zu den größten Vergnügungen der menschlichen Rasse.

Berthold Brecht, im „Leben des Galilei“

Galileo Galilei (1564–1642) war der erste Physiker. Er begründete durch sorgfältige Messungen die Physik als Experimentalwissenschaft, führte die Mathematik als Sprache der Physik ein und formulierte seine Entdeckungen als Naturgesetze in dieser Sprache, die durch die Entwicklung der Infinitesimalrechnung durch Leibniz und Newton verfeinert wurde. Seit dieser Zeit werden die fundamentalen Fragen der Physiker an die Natur durch die Klärung der grundlegenden Zusammenhänge mit Messungen und durch die Entwicklung von Theorien, die wahr sind, wenn Messungen sie bestätigen, beantwortet.



Rudolf Herrmann studierte von 1954 bis 1960 an der Berliner Humboldt-Universität Physik und promovierte 1964 an der Staatlichen Moskauer Universität. Von 1964 bis 1968 arbeitete er bei dem Nobelpreisträger Pjotr L. Kapitza im Institut für Physikalische Probleme an seiner Habilitation, die er 1968 an der Humboldt-Universität verteidigte. 1968 wurde er Dozent und 1970 zum ordentlichen Professor für Experimentelle Physik auf den Lehrstuhl für Tieftemperaturphysik an die Humboldt-Universität berufen. 1991 bis 1992 war er Gastprofessor an der Universität Paris 7, „Pierre et Marie Curie“. 1992 wurde er von der Humboldt-Universität an die Ritsumeikan Universität in Kyoto gesandt. In Kyoto war er neben der Lehrtätigkeit an der Universität wissenschaftlicher Berater im HORIBA Konzern. Nach der Rückkehr 1986 aus Japan arbeitete er bis 2012 im Institut für angewandte Photonik in Berlin Adlershof.

Rudolf Herrmann

Die Tieftemperaturphysik an der Humboldt- Universität im 20. Jahrhundert

Vom Nernstschen Wärmesatz zum
Quanten-Hall-Effekt

Mit einem Beitrag von Werner Ebeling

 Springer Spektrum

Rudolf Herrmann
Berlin, Deutschland

ISBN 978-3-662-59574-9 ISBN 978-3-662-59575-6 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59575-6>

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

Springer Spektrum

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

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

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung: Margit Maly

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Zum Andenken an meine liebe Frau Karin Herrmann, eine Physikerin, die eigentlich Literatur studieren wollte, die in der Halbleiterphysik und bei der Analyse der Treibhausgase mit ihren Halbleiterlasern erfolgreich war, dabei aber ihrer Liebe zur Literatur immer treu geblieben ist.

Geleitwort

Als mir mein ehemaliger Hochschullehrer und Autor dieses Buches von der Idee berichtete, ein Buch über die Forschungen auf dem Gebiet der Tieftemperaturphysik an der Berliner Universität und den Berliner Forschungseinrichtungen im 20. Jahrhundert zu schreiben, war ich zunächst ein wenig skeptisch. Mir war nicht so recht klar, welche Leserschaft eine derartige Publikation ansprechen könnte. Nachdem ich jedoch das fertige Manuskript des Buches in die Hand bekommen hatte, das den Schwerpunkt auf die Arbeiten an der ehemaligen Sektion Physik der Humboldt-Universität legt, habe ich es mit großem Vergnügen gelesen. Das vorliegende Buch unterscheidet sich doch deutlich von anderen Publikationen zu diesem Themenfeld. Rudolf Herrmann blickt auf eine langjährige Lehr- und Forschungstätigkeit an der Sektion Physik der Humboldt-Universität zu Berlin zurück, in der er an seinem Lehrstuhl das Arbeitsgebiet der Tieftemperatur-Festkörperphysik vertreten hat.

Die modernen Entwicklungen der Tieftemperaturphysik erläutert er zumeist anhand eigener Arbeiten.

Zunächst wird jedoch ein kompakter Überblick über die Forschung auf dem Gebiet tiefer Temperaturen in den Berliner akademischen Einrichtungen bis zum Ende des 2. Weltkriegs gegeben, um dann auf die Entdeckungen und technischen Entwicklungen in den letzten Jahrzehnten, wie z. B. den Quanten-Hall-Effekt, die Hochtemperatursupraleitung und Supraleitungssensorik, einzugehen. Insbesondere wird auch die enge Wechselwirkung der Universität mit der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR) und der später daraus hervorgegangenen Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) dargestellt, in denen die Tieftemperaturphysik auf eine lange Tradition zurückblicken kann. Auch sind nach der deutschen Wiedervereinigung mehrere Wissenschaftler und Studenten der Humboldt-Universität und auch des ehemaligen Amtes für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung der DDR (ASMW) an die PTB gegangen, um dort auf dem Gebiet der Tieftemperaturphysik zu forschen und auch leitende Aufgaben zu übernehmen. So hatte ich selbst bis zu meiner Pensionierung die Möglichkeit, gemeinsam mit meinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern zahlreiche Forschungsprojekte auf dem Gebiet der Tieftemperatursensorik an der PTB durchzuführen und den Fachbereich Kryosensorik der PTB zu leiten.

Dieses Buch ist weder eine reine wissenschaftshistorische noch eine rein lehrbuchartige Darstellung der physikalischen Forschungen auf dem Gebiet der Physik tiefer Temperaturen. Es wird meist sehr detailliert auf die abgehandelten Effekte und Experimente eingegangen, wobei ein solides physikalisches Grundwissen voraussetzt wird. Anders als in einschlägigen Fachbüchern werden aber die Entdeckungen und technischen Entwicklungen der jüngsten Zeit aus einem Blickwinkel beschrieben, der durch die persönlichen Erfahrungen, Arbeiten und Erlebnisse des Autors geprägt ist. Dem Leser wird erlebbar gemacht, wie in der DDR unter den Randbedingungen eines nur eingeschränkten Zugangs zu modernen Forschungsapparaturen und internationalem Wissenschaftsaustausch durchaus mit Erfolg auf den aktuellen Gebieten gearbeitet wurde. Die Darstellung der Arbeitsweise der Experimentalphysiker an der Sektion Physik der Humboldt-Universität, die oft auf Improvisation beim Eigenbau von Apparaturen basierte, ist sicher exemplarisch für die universitären Einrichtungen der DDR in dieser Zeit und nicht auf die Tieftemperaturphysik beschränkt. Es ist aus meiner Sicht ein wesentlicher Verdienst der Generation der damaligen Hochschullehrer, der Rudolf Herrmann angehört, dass es gelungen ist, unter diesen Bedingungen moderne Experimentalphysik zu betreiben und den Studenten somit eine solide Ausbildung zu ermöglichen. Seinem Studienmatrikel des Jahrgangs 1954 hat der Autor einen eigenen Abschnitt im Buch gewidmet. Die Mehrzahl der Hochschullehrer in dieser Zeit hat mehrere Jahre in renommierten Instituten der ehemaligen Sowjetunion studiert und gearbeitet, wie auch Rudolf Herrmann und sein Kollege und Freund Werner Ebeling, der im Kap. 5 des Buches auf die Arbeiten zur Thermodynamik eingeht. So hat Rudolf Herrmann in seiner Studienzeit enge persönliche Kontakte zu Tieftemperaturphysikern des Kapitza Instituts aufbauen können. Diese Kontakte und die dort gesammelten Erfahrungen haben in der Folge natürlich auch den Forschungsthemen aber auch den Instrumentierungen der Tieftemperaturlabore an der Humboldt-Universität ihr Gepräge gegeben. Voraussetzung für die an Herrmanns Lehrstuhl Tieftemperatur-Festkörperphysik in Angriff genommene Forschung zur Elektronenstruktur von Metallen, Halbmetallen und schmallückigen Halbleitern war neben entsprechender Instrumentierung natürlich die Verfügbarkeit geeigneter Proben dieser Materialien. Hier konnte mit vergleichbar einfach zu realisierenden Apparaturen zur Kristallzüchtung eine umfangreiche Materialbasis von qualitativ hochwertigen Einkristallen, vor allem aus Wismut und Wismut-Antimon-Legierungen geschaffen werden, die international beachtete Forschungsergebnisse ermöglichten. Der Autor geht auf diese Arbeiten umfassend ein. Spätestens jedoch mit der international in den Fokus rückenden Untersuchung der Quanteneffekte in zweidimensionalen Elektronengasen (2DEG) in der Mitte der siebziger Jahre wurde es am Lehrstuhl schwierig, sich diesen neuen Themen zu widmen. Diese Forschungen wurden im Westen ja durch die industrielle Entwicklung von mikrostrukturierten Halbleiterbauelementen mit 2DEG, vor allem Silizium-MOSFETs, getrieben und entsprechende Proben waren den Forschungsgruppen dort zugänglich. In der Halbleiterindustrie der DDR gab es natürlich auch industrielle Entwicklungsarbeiten in dieser Richtung, die sehr stark am Bedarf der Elektronikindustrie ausgerichtet waren. Für die Fertigung von Proben

für grundlagenphysikalische Experimente an einer Universität gab es aus Kapazitätsgründen kaum Akzeptanz und der Aufbau einer eigenen Herstellung an der Universität war nicht realistisch. Was also tun, wenn man bei diesem aktuellen Thema mit von der Partie sein wollte? Der Ausweg war die Nutzung der sich an Korngrenzen in massiven Halbleiterkristallen ausbildenden 2DEG. Erfahrungen mit der Züchtung von Kristallen hatte man ja. Damit gelang es praktisch in einem etwas exotischen Nischenbereich an dieser aktuellen Problematik mitzuarbeiten und auch international beachtet zu publizieren. Da vom Autor die Quanteneffekte in den 2DEG, einschließlich Quanten-Hall-Effekt, vor allem mit Blick auf diese Korngrenzen in Bikristallen diskutiert werden, findet sicher auch mancher mit den Quanteneffekten in Metall-Isolator-Halbleiter- und Halbleiterheterostrukturen vertraute Leser interessante und eventuell neue Aspekte.

Ein weiteres wichtiges Ereignis der Tieftemperatur-Festkörperphysik war die Entdeckung der Hochtemperatursupraleitung Ende der achtziger Jahre durch Bednorz und Müller. Herrmann beschreibt, wie auch in der DDR die Forscher von der Euphorie um diese neue Materialklasse ergriffen wurden und sich natürlich auch Physiker und Chemiker der Humboldt-Universität dem nicht entziehen konnten. Der Zeitpunkt dieser Entdeckung fiel in die Zeit des politischen Umbruchs in der DDR, der für viele Hochschullehrer mit erheblichen persönlichen Einschnitten in der wissenschaftlichen Karriere verbunden war. Der Autor beschreibt, wie er diese Entwicklung erlebt und sich persönlich neu orientiert hat. Für jüngere Wissenschaftler der ehemaligen Sektion Physik war es zumeist Dank der soliden Ausbildung an der Universität wesentlich leichter in anderen Einrichtungen im In- und Ausland Arbeitsmöglichkeiten zu finden oder gar eigene Firmen aufzubauen. Nach einer Zeit im Ausland hat sich Rudolf Herrmann nach seiner Rückkehr modernen Kleinkühlern für die Kühlung von Kryosensoren in einer Firma im Wissenschaftszentrum in Berlin-Adlershof zugewandt. Er beschreibt diese Entwicklungen und geht dabei auf die verschiedenen Kühltechniken ein, wie sie heute in der Tieftemperaturphysik Anwendung finden.

Insgesamt bietet dieses Buch dem Leser eine zusammenfassende Darstellung der Entwicklungen der Physik und Technik tiefer Temperaturen von den Anfängen bis zur Gegenwart aus der Feder eines ehemaligen DDR Wissenschaftlers, der vor allem die Zeit der letzten 60 Jahre interessant und aus sehr persönlicher Sicht beschreibt.

Lieber Rudi, ich erinnere mich gerne an die vielen Stunden im Labor an Deinem Lehrstuhl und wünsche Deinem Buch viel Erfolg!

Berlin
den 25. Juni 2019

Thomas Schurig

Vorwort

Die Idee, die Forschungsarbeiten zur Physik tiefer Temperaturen an der Berliner Universität im 20. Jahrhundert aufzuschreiben, entstand auf der Festveranstaltung des Berliner Instituts der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt zum 100. Jubiläum der Wasserstoffverflüssigung von Walter Meißner am 13. November 2013. Bei einer Diskussion ehemaliger Wissenschaftler des III. Physikalischen Instituts und späteren Bereichs Tieftemperatur-Festkörperphysik der Humboldt-Universität während der Konferenz, stellte Dr. Winfried Kraak fest, dass ein Vortrag über die Tieftemperaturforschung an der Universität unter den Linden die Konferenz bereichert hätte. Es entstand der Gedanke, die Forschungen der Berliner Universität zu diesem Thema im 20. Jahrhundert und ihre Wechselwirkung mit der Tieftemperaturphysik der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, beziehungsweise der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, zusammenhängend darzustellen.

Nach 28 Jahren Forschungs- und Lehrtätigkeit an der Humboldt-Universität und langjährigen Forschungsarbeiten bei Pjotr Kapitza, im Institut für Physikalische Probleme, die der Tätigkeit in Berlin vorausgegangen waren, und Gastprofessuren an der Universität 7 Pierre et Marie Curie in Paris und an der Ritsumeikan-Universität in Kyoto ist mir klar geworden, dass unsere Berliner Universität an der Entwicklung der Wissenschaftsgebiete Thermodynamik und Tieftemperaturphysik einen beträchtlichen Anteil hat.

Die Tieftemperaturphysik wurde in Berlin von Walther Nernst und Walther Meißner begründet. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde die Physik tiefer Temperaturen an der Universität im III. Physikalischen Institut wieder aufgenommen. Die Thermodynamik von Planck und Nernst fand mit der Berufung von Werner Ebeling Ende der 1970er-Jahre an die Humboldt-Universität seine Fortsetzung. Mit der irreversiblen Thermodynamik konnte die Schule von Ebeling an die Atmosphäre und das theoretische Wirken von Walther Nernst anknüpfen [1].

Die Tieftemperaturphysik wurde bis zum Ende des vorigen Jahrhunderts an der Humboldt-Universität gepflegt. Heute wird sie in Berlin vom Institut der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, von der Technischen Universität und der Freien Universität repräsentiert.

Meine Begeisterung für das Verhalten der Materie nahe am absoluten Nullpunkt war der Grund, die Anregung, die Forschungsarbeiten zur Physik tiefer Temperaturen der Berliner Universität im 20. Jahrhundert aufzuschreiben, zu übernehmen¹.

Die tiefste Temperatur im Universum ist die Temperatur der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung mit 2,7 K ($-270,45\text{ °C}$). Sie ist das Ergebnis der Abkühlung der Strahlung, die beim Urknall vor 13,8 Mrd. Jahren entstanden ist. Das sind 2,7 K über dem absoluten Nullpunkt, der einen Zustand ohne Wärme darstellt. Die kosmische Hintergrundstrahlung wurde 1964 von Robert Wilson und Arno Penzias entdeckt [2]. Sie erfüllt den ganzen Weltraum und bildet heute einen Schwerpunkt der astrophysikalischen Forschung².

Der menschliche Intellekt hat Geräte geschaffen, mit denen Temperaturen unter der niedrigsten Temperatur im Universum erzeugt werden, die Körper bis auf Temperaturen des Mikrokkelvinbereichs (μK) abkühlen. So erreichte Frank Pobell an der Universität Bayreuth 1997 mit der Entmagnetisierung von PtFe als Kernsubstanz $1,5\ \mu\text{K}$ [3]. Quantengase aus einfachen Atomen können noch stärker bis zu 10 nK ($0,000\ 000\ 01\ \text{K}$) abgekühlt werden [4]. Die Zahl der Teilchen eines kondensierten Quantengases ist mit einigen Hunderttausend bis einigen Millionen Atomen jedoch so gering, dass sie keinen anderen Körper abkühlen können.

Die Bemühungen um Kühlung gehören zur Kulturgeschichte der Menschheit. Sie beginnen in nördlichen Ländern mit der Abkühlung von Nahrungsmitteln durch Eis und Schnee und in südlichen Ländern durch die Verdunstung von Wasser.

Nahrungsmittelkonservierung und Raumklimatisierung waren die Triebkräfte der Entwicklung von Kühlverfahren. Erste wissenschaftlich begründete Abkühlungsverfahren entstanden im 17. Jahrhundert zusammen mit der Entwicklung der Temperaturmesstechnik.

Ein ernsthafter, technischer Durchbruch gelang mit der Erkenntnis, dass sich tiefere Temperaturen durch Verflüssigung von Gasen erreichen lassen.

Ende des 19. Jahrhunderts waren es die Physiker Karol Stanislaw Olszewski und Zygmunt Florenty von Wroblewski, die 1883 in Krakau erst die Atmosphäre und dann auch ihre Komponenten Sauerstoff und Stickstoff verflüssigten. Sauerstoff wurde bei einer Temperatur von -183 °C flüssig, Stickstoff bei $-195,8\text{ °C}$. Die Verflüssigung von Wasserstoff gelang James Dewar vom Imperial Institute in London 1895 bei $-252,8\text{ °C}$. Das letzte dann noch übriggebliebene Gas, Helium, verflüssigte 1908 der begnadete holländische Experimentator Heike Kamerlingh

¹Von Dr. Wolfgang Buck, dem damaligen Leiter des Berliner Instituts der PTB, wurden auf dieser Konferenz die Tieftemperaturarbeiten des Berliner Instituts der PTB, der Technischen Universität Berlin und der Freien Universität vorgetragen.

²Babette Dellen vom Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen stellte 2009 fest, dass der kälteste bisher entdeckte, natürliche Ort im Universum der 5000 Lichtjahre entfernte Boomerang Nebel ist. Dort soll eine Temperatur von $-272,15\text{ °C}$ herrschen. Das ist 1 K über dem absoluten Nullpunkt.

Onnes an der Universität in Leiden. Schon bei der Wasserstoffverflüssigung war er Konkurrent der beiden Polen Olszewski und Wroblewski und des Engländers Dewar. Beim Helium gelang ihm der Durchbruch.

Mit der Verflüssigung von Helium erreichte er 4,21 K. Durch Verdampfung des flüssigen Heliums wurde die Temperatur von 1 K erreicht, ein Kelvin über dem absoluten Nullpunkt. 1911 bemerkte Kamerlingh Onnes bei der Abkühlung von Quecksilber mit flüssigem Helium, dass der elektrische Widerstand des Quecksilbers sprunghaft bei 4,1 K verschwindet. Das war die Entdeckung der Supraleitung, des ersten makroskopischen Quantenzustandes.

Im wissenschaftlichen Wettlauf zum absoluten Nullpunkt war es Walther Nernst an der Berliner Friedrich-Wilhelms-Universität, der 1905 entdeckte, dass der absolute Nullpunkt nicht erreichbar ist. Nernst fand diese Gesetzmäßigkeit, die er als „seinen Wärmesatz“ bezeichnete, als geniale Schlussfolgerung aus Untersuchungen chemischer Gleichgewichte, die eher bei hohen Temperaturen ablaufen. Der Wärmesatz besagt auch, dass die spezifische Wärme bei Annäherung an den absoluten Nullpunkt gegen null geht. Dieses Naturgesetz wurde von Max Planck als III. Hauptsatz der Thermodynamik exakt gefasst, der besagt, dass die Entropie, das Maß der Unordnung in der Mikrowelt, am absoluten Nullpunkt null ist.

Um den Wärmesatz experimentell zu bestätigen, musste Nernst die spezifische Wärme bei tiefen Temperaturen messen. Er besuchte 1909 Kamerlingh Onnes in Leiden, um die Erzeugung tiefer Temperaturen kennenzulernen. Die technisch sehr aufwendigen Anlagen, die Nernst in Leiden vorfand, und die vielen Mitarbeiter, mit denen Kamerlingh Onnes Helium verflüssigte, konnte Nernst an der Berliner Universität nicht realisieren.

Er konstruierte deshalb eine kleine, einfachere Verflüssigungsanlage für Wasserstoff, mit der er hoffte, „seinen Wärmesatz“ experimentell zu bestätigen. Den Bau der Anlage realisierte er mit dem Mechaniker Alfred Höhnow und seinen Studenten. Ihnen gelang es 1911 mit dieser Anlage, flüssigen Wasserstoff zu gewinnen. Das war der Beginn der Tieftemperaturforschung an der Berliner Universität.

Mit einem Kalorimeter direkt in der Verflüssigungsanlage gelang die Bestätigung des Wärmesatzes. Die dafür notwendigen Messungen der Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärme bei tiefen Temperaturen wurden von Nernst, gemeinsam mit seinen Schülern, Fred Lindemann, Franz Simon und Walter Mendelssohn, durchgeführt. Für die Entdeckung dieses fundamentalen Naturgesetzes erhielt Walter Nernst 1921 den Nobelpreis für Chemie für das Jahr 1920.

Aber noch in seiner Studienzeit in Graz fand Walther Nernst bei der Analyse des Hall-Effektes gemeinsam mit Albert von Ettingshausen Effekte, die, wie der Hall-Effekt, von einer damals unbekanntem Kraft des Magnetfeldes erzeugt werden. Diese elektrodynamische Kraft wurde erst einige Jahre später von dem niederländischen Mathematiker Hendrik Antoon Lorentz formuliert und erhielt den Namen Lorentz-Kraft. Sie krümmt die Bahnen bewegter Ladungsträger im Magnetfeld. Eine Kraft, die heute im Großen die Funktion der Synchrotron-Beschleuniger bestimmt und im Kleinen die Quantelung von Ladungsträgern. Diese Kraft liegt den meisten in diesem Buch beschriebenen Phänomenen zugrunde.

Die Geschichte von der erfolgreichen Entwicklung der Tieftemperaturforschung von Nernst und seinen Schülern an der Friedrich-Wilhelms-Universität, die Flucht der Schüler vor der Nazi-Herrschaft und der Neuanfang der Tieftemperaturforschung an der Berliner Universität nach dem Zweiten Weltkrieg in Nernst'scher Tradition wird aus der Sicht der Studenten, die nach dem Krieg an der Universität studierten und später als Physiker an ihr arbeiteten, dargestellt. Diese Sicht bildet jedoch nur den Hintergrund für die Geschichte der Tieftemperaturphysik der Berliner Universität im 20. Jahrhundert, unterbrochen durch die beiden Weltkriege und den damit verbundenen politischen Umbrüchen.

Die Möglichkeit, bei tiefen Temperaturen, ohne thermische Störungen, die empfindlichen Phänomene der Mikrowelt zu untersuchen, brachten die ersten experimentellen Bestätigungen der Quantenphysik.

Für die Entwicklung der menschlichen Gesellschaft brachte die Herstellung tiefer Temperaturen eine effektive Lebensmittelkonservierung und die Klimatisierung von Gebäuden. Viele Menschen konnten dadurch auf engem Raum in großen Städten zusammenleben. Und mit der Klimatisierung von Gebäuden wurde es möglich, Hochhäuser zu bauen. Ohne die technische Anwendung tiefer Temperaturen zur Kühlung und Klimatisierung wäre der Bau großer Metropolen nicht möglich geworden.

Die Bedeutung der Berliner Universität für die Entwicklung der modernen Tieftemperaturphysik in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts und die Probleme der Tieftemperaturphysik in der zweiten Hälfte an der Humboldt-Universität sind die Themen dieses Buches. In beiden Perioden spielt die Politik eine dominierende Rolle. In der ersten Hälfte des Jahrhunderts die Förderung der Naturwissenschaften im Kaiserreich, dann der Niedergang durch die Weltkriege und den Faschismus. Die prosperierende Entwicklung im Westen Deutschlands in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts und die beschränkten Möglichkeiten im Osten, bedingt durch das ökonomische Missverhältnis der sich in Deutschland in dieser Zeit gegenüberstehenden Gesellschaftssysteme, wirkte sich auch auf die naturwissenschaftlichen Forschungsarbeiten aus.

Das Buch besteht aus vier Teilen. Der erste Teil, „Der Weg zum absoluten Nullpunkt“, befasst sich mit den Themen „Die Verflüssigung der Gase“, „Die Tieftemperaturphysik der Berliner Universität und der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt bis zum Zweiten Weltkrieg“ und „Oxford und Cambridge“. Im ersten Thema wird die Geschichte der Tieftemperaturphysik von den Anfängen der Kälteerzeugung, über die Bemühungen, den absoluten Nullpunkt der Temperatur zu erreichen, bis zu Methoden, diesem Nullpunkt nahe zu kommen, dargestellt. Das zweite Thema „Die Tieftemperaturphysik der Berliner Universität bis zum Zweiten Weltkrieg“ befasst sich mit den Forschungen an der Universität, die zur Bestätigung der sich herausbildenden Quantenphysik beitragen.

Als zu Beginn des Jahrhunderts der Holländer Heike Kamerlingh Onnes, der Engländer James Dewar und der Pole Karol Stanislaw Olszewski versuchten, Helium zu verflüssigen, um den absoluten Nullpunkt zu erreichen, war Walther Nernst auf der Suche nach tiefen Temperaturen, um seinen Wärmesatz experimentell zu beweisen.

Das experimentelle Herangehen von Nernst und seinen Schülern an dieses grundlegende Problem der Physik und die Leistungen von Walther Meißner bei der Erzeugung tiefer Temperaturen sowie die Entdeckung des Meißner-Ochsenfeld-Effektes stehen im Mittelpunkt des zweiten Themas. Die fundamentalen Beiträge der Friedrich-Wilhelms-Universität und der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt zur Tieftemperaturphysik und ihr Einfluss auf die Entwicklung der Quantenphysik bis zum Beginn der Nazi-Herrschaft werden dargelegt.

Zum Abschluss des ersten Teils befasst sich das dritte Thema mit dem Wirken von Franz Simon und Pjotr Leonidowitsch Kapitza, durch die die Tieftemperaturphysik der Berliner Universität in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts mitgeprägt wurde. Der eine, Kapitza, begann seine Laufbahn bei Rutherford in Cambridge, wo er mit Unterstützung von Rutherford mit dem Mond-Laboratorium ein Tieftemperaturzentrum aufbaute. Dieses Tieftemperaturzentrum rekonstruierte er nach seiner Festsetzung in Moskau durch Stalin als Institut für Physikalische Probleme, dort an der Moskwa.

Der andere, Simon, begann seine Laufbahn in Berlin bei Nernst, wurde 1933 als Jude von Hitler vertrieben, konnte seine bewundernswerte Laufbahn in Oxford mit der Schaffung eines Tieftemperaturzentrums fortsetzen.

Der zweite Teil, „Der Tradition der Berliner Universität verpflichtet“, befasst sich mit den Themen „Der Neuanfang der Physik in Berlin nach dem Zweiten Weltkrieg“, „Anknüpfung an historische Wurzeln bei Max Planck und Walter Nernst“ und „Die Tieftemperaturphysik an der Berliner Universität nach 1945“. In den beiden ersten Themen wird auf die Bemühungen eingegangen, nach dem Krieg die physikalische Forschung wiederaufzubauen und in eine neue Hochschulstruktur einzuordnen. Das dritte Thema befasst sich mit dem Neuanfang der Tieftemperaturphysik. Aufgrund der gesellschaftlichen Entwicklung im Osten Deutschlands sind die Arbeiten in dieser Zeit nicht mit den Höhepunkten der Berliner Tieftemperaturphysik in der ersten Hälfte des Jahrhunderts vergleichbar. Aufgrund der nicht sehr guten materiellen Ausrüstungen und der geringen internationalen Kontakte war die Begeisterung der Studenten und Wissenschaftler teilweise größer als die Möglichkeiten eines internationalen Vergleichs ihrer Ergebnisse.

So begann 1946 die Tieftemperaturphysik im II. Physikalischen Institut der Berliner Universität mit einer Rückbesinnung auf die Arbeiten von Simon durch Franz Xaver Eder, einem Schüler von Meißner. Simon hatte 1924 nach der Berufung von Nernst zum Präsidenten der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt die Tieftemperaturforschung an der Universität fortgesetzt. Um wieder tiefe Temperaturen zur Verfügung zu haben, begann Eder Verflüssiger zu bauen, wobei er an die von Simon entwickelte Methode anknüpfte.

Ein Anliegen des Buches ist auch zu zeigen, dass es trotz der genannten, beschränkten Bedingungen gelang, vergleichbare Forschungsergebnisse zu den Arbeiten der Universitäten im westlichen Teil von Berlin zu erzielen. Entsprechend werden im dritten Teil, „Elektronenstrukturen von Festkörpern bei tiefen Temperaturen“, unter den Themen „Metalle und Halbleiter bei tiefen Temperaturen“ und „Der Quanten-Hall-Effekt an Korngrenzen“, Ergebnisse dargestellt.

Im ersten Thema wird auf die magnetischen Oberflächenzustände, die Energiestrukturen von Festkörpern, energetische Phasenübergänge und das Festkörperplasma eingegangen.

Die magnetischen Oberflächenzustände wurden 1961 von Michail Chaikin am Wismut im Kapitza-Institut in Moskau entdeckt³. Durch die Beteiligung von Physikern von der Humboldt-Universität an diesen Arbeiten konnte dieses Phänomen in Berlin weiter untersucht werden. Dabei wurde Supraleitung an der Oberfläche des Halbleiters Tellur gefunden. Ein Effekt, der heute als Phänomen topologischer Isolatoren betrachtet wird.

Auch bei der Untersuchung des Legierungssystems Wismut-Antimon konnte schon 1977 gezeigt werden, dass unter bestimmten Bedingungen die effektiven Massen in diesem Legierungssystem gegen null gehen, eine Erscheinung, die die topologischen Isolatoren charakterisiert. 2007 wurde dieses Verhalten aus heutiger Sicht von D. Hsieh et al. [5] realisiert. In der Arbeit von Hsieh et al. wird gesagt, dass es derartige Anzeichen vor ihrer Arbeit nicht gegeben hat, obwohl unsere Ergebnisse schon in den 1970er Jahren in der Zeitschrift *physica.status.solidi* veröffentlicht wurden (s. unten).

Im vierten Teil, „Neue Kühlmethode – Technische Lösungen und neue Physik“ wird mit den Themen „Tiefe Temperaturen ohne tiefsiedende Flüssigkeiten“, „Röntgen und Terahertz-Detektoren“ und „Kalte Augen, kalte Bosonen“ auf die Entwicklung der Pulsrohrkühler und der Laserkühlung, mit der die Kondensationen von Bosonen realisiert wurde, eingegangen.

Wenn auf der Tagung „Tiefemperatur – *quo vadis?*“ der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt am 5. und 6. Juni 2007 in Berlin Frank Pobell vom Helmholtz-Zentrum Dresden, der, wie eingangs schon erwähnt, mit 1,5 μK die tiefste, je erreichte Kühltemperatur erzeugt hat, feststellte, dass die Tiefemperaturphysik als physikalische Forschung abgeschlossen sei, so zeigen die Entwicklungen, über die am Ende des vierten Teils des Buches berichtet wird, dass die Tiefemperaturphysik neue Wege eingeschlagen hat.

Rudolf Herrmann

Literatur

1. Bibliographie Werner Ebeling, Zusammengestellt anlässlich seines 70. Geburtstages http://www.wissenschaftsforschung.de/JB08_Bib-Ebeling.pdf;
Feistel, R., Ebeling, W.: *Evolution of Complex Systems: Self-Organization, Entropy, and Development*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1989, S. 248;
Ebeling, W.: „Strukturbildung bei irreversiblen Prozessen“ Teubner Verlagsgesellschaft (1976);
Dieter Hoffmann: Ebeling, Werner. In: *Wer war wer in der DDR?* 5. Ausgabe, Band 1, Ch. Link Verlag, Berlin (2010)

³M. S. Khaikin, JETP 41 (1961) 1773. Chaikin erhielt 1987 die Ehrendoktorwürde der Humboldt-Universität.

2. Penzias, A.A.: “The Origin of Elements, Nobel Lecture“ und Wilson, R.W.: “The Cosmic Microwave Background Radiation”, Nobel Lecture 8.12.1978;
Penzias, A.A., Wilson, R. W.: A measurement of excess antenna temperature at 4080/Mc/s. *Astrophysical Journal Letters* 142, 419–421 (1965)
3. Pobell, F.: “Matter and Methods at Low Temperatures” (Springer 1996)
4. Cornell, E.A. Wieman, C.E.: “Nobel Lectures in Physics 2001” *Rev. Mod. Phys.*, 74, 3, 875–893 (2002)
Ketterle, W.: When atoms behave as waves: Bose-Einstein condensation and the atom laser, *Rev. Mod. Phys.* 74, 1131 (2002).
5. Hsieh, D. Qian, D. Wray, L. Xia, Y. Hor, Y.S. Cava, R.J. Hasan, M.Z.: A topological Dirac insulator in a quantum spin Hall phase, *Nature* 452, 970–974 (2008).

Danksagung

Mein Dank gilt all denen, die zur Idee für diese Niederschrift und zu ihrer Realisierung beigetragen haben. Alica Krapf und Hans-Ullrich Müller, die die Anregung von Winfried Kraak von Anfang an unterstützten. Ich bedanke mich bei Werner Ebeling, der den ersten Entwurf gelesen und mit vielen Hinweisen, auch auf die historischen Zusammenhänge, den Fortgang der Arbeit gefördert hat und mit seinem persönlichen Beitrag wesentliche Gedanken einbringen konnte. Für fachliche Diskussionen bedanke ich mich bei Thomas Schurig, der mich auch bei der Beschaffung von Literatur zu Walther Meißner unterstützte. Und bei Valerian Edelman, der die russischen Quellen erschlossen hat und mir insbesondere bei den Bildgenehmigungen durch das Kapitza-Institut für Physikalische Probleme zur Seite stand. Ich danke Ingrid Bärmann für ihre gründliche Durchsicht des Manuskripts. Mein Dank gilt Dieter Hoffmann für die Durchsicht des Manuskripts und für seine Hinweise als Historiker, sowie ich Erhard Gay, Georg Kuka und Peter Rudolph für ihr ständiges Interesse danke.

Besonderer Dank gilt Olaf Herrmann, der das Manuskript formatiert und alle Abbildungen nach den Vorgaben des Verlages berechnet hat, wozu er einen Großteil neu zeichnen musste, um die notwendige Qualität der Zeichnungen zu erreichen. Dem Springer-Verlag und insbesondere Frau Bettina Saglio und Frau Margit Maly danke ich für die gute Zusammenarbeit, sowie Herrn Aneus Ansari für die aufwendigen Korrekturen.

Inhaltsverzeichnis

Teil I Der Weg zum absoluten Nullpunkt

1	Die Erforschung der Kälte	3
1.1	Kälte, nicht nur ein Gefühl	3
1.2	Die Idee vom absoluten Nullpunkt der Temperatur	6
1.3	Die Gasverflüssigung	8
	Literatur	19
2	Die Tieftemperaturphysik der Berliner Universität und der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt bis zum Zweiten Weltkrieg.	21
2.1	Walther Nernst und sein Wärmesatz	21
2.2	Walther Meißner an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt	38
2.3	Der Meißner-Ochsenfeld-Effekt	44
	Literatur	49
3	Oxford und Cambridge	53
3.1	Sir Francis Simon (1893–1956)	53
3.2	Pjotr Leonidovitsch Kapitza	62
3.3	Suprafluidität und das Bose-Einstein-Kondensat	73
3.4	Die Kapitza-Schule	75
	Literatur	77

Teil II Der Tradition der Berliner Universität verpflichtet

4	Der Neuanfang der Physik in Berlin nach dem Zweiten Weltkrieg.	81
4.1	Physikstudium am Beispiel Matrikel 1954	81
4.2	Die Physikalischen Institute der Humboldt-Universität	83
	Literatur	87

5	Anknüpfung an historische Wurzeln bei Max Planck und Walter Nernst	89
5.1	Fünzig Jahre Relativitätstheorie und der 100. Geburtstag von Max Planck	89
5.2	Die Schule der Thermodynamik von Planck und Nernst – und ihre Weiterführung	93
	Literatur	96
6	Die Tieftemperaturphysik nach 1945	99
6.1	Das III. Physikalische Institut der Berliner Universität	99
6.2	Die Tieftemperaturphysik nach dem Weggang von Eder	101
6.3	Nachwuchs für die Tieftemperaturphysik	102
6.4	Das III. Physikalische Institut der Berliner Universität wird zum Bereich Tieftemperatur- Festkörperphysik	108
	Literatur	112
Teil III Elektronenstrukturen von Festkörpern bei tiefen Temperaturen		
7	Metalle und Halbleiter bei tiefen Temperaturen	117
7.1	Die Landau-Quantelung	117
7.2	Die Fermi-Flächen von Wolfram, Molybdän und Niobium	121
7.3	Zyklotronresonanz und magnetische Oberflächenzustände des Halbleiters Tellur	128
7.4	Wismut und Wismut-Antimon-Legierungen	131
7.5	Das Festkörper-Plasma	142
7.6	Nernst-Effekt an Wismut und Wismut-Antimon-Legierungen	151
	Literatur	152
8	Der Quanten-Hall-Effekt	155
8.1	Die Quantelung des Hall-Widerstandes	155
8.2	Das zweidimensionale Elektronengas	159
8.3	Der Quanten-Hall-Effekt an Korngrenzen	164
8.4	Nernst-Effekt an Korngrenzen	173
	Literatur	174
9	Supraleitung	177
9.1	Grundlegende Eigenschaften der Supraleitung	177
9.2	Supraleiter 1. und 2. Art	181
9.3	Die Flussquantelung	185
9.4	Die Hochtemperatursupraleiter	193
9.5	Fortsetzung der Tieftemperaturphysik in Adlershof	197
	Literatur	197

Teil IV Neue Kühlmethoden – Technische Lösungen und neue Physik

10 Tiefe Temperaturen ohne tiefsiedende Flüssigkeiten	201
10.1 Stirling-Kühler	202
10.2 Temperaturen unter 1 K	206
10.3 Ablösung der Heliumkühlung durch Gaskältemaschinen.	210
Literatur	212
11 Röntgen- und Terahertz-Detektoren	213
11.1 Supraleitende Kantenbolometer	213
11.2 Magnetische Kalorimeter	215
11.3 Supraleitende Terahertz-Detektoren	216
Literatur	218
12 Kalte Augen, kalte Bosonen.	219
12.1 Die kalten Augen der Radioteleskope.	219
12.2 Ein erster Blick ins Universum.	221
12.3 Das Bose-Einstein-Kondensat in einer magneto-optischen Falle.	224
12.4 Die Zukunft der Physik tiefer Temperaturen	229
Literatur	230
Schlussbemerkungen	231
Anhang 1: Dekane und Sektionsdirektoren, Institute und Bereiche der Physik der Berliner Universität	237
Anhang 2: Kristallzüchtung im Weltraum – Das Projekt „Berolina“	241
Stichwortverzeichnis	249

Teil I
Der Weg zum absoluten Nullpunkt



Die Erforschung der Kälte

1

Bevor auf die Tieftemperatur der Berliner Universität eingegangen wird, soll kurz der Weg in die Kälte nachgezeichnet werden, den die Wissenschaftler gehen mussten, um dem absoluten Nullpunkt der Temperatur nahe zu kommen. Der erste ernsthafte Zugang zur künstlichen Kälte gelang mit der Verflüssigung von Gasen. Die Wissenschaftler, die sich diesem fundamentalen Problem der Beeinflussung der Natur zuwandten, gelangten trotz hartnäckigem Widerspruch vieler Kollegen zu der Erkenntnis, dass allein scharfsinnige Überlegungen zur Klärung der Zusammenhänge in der Natur nicht ausreichen. Sie müssen durch Experimente bestätigt werden. Und mit diesem Bewusstsein begann der Wettlauf zum absoluten Nullpunkt der Temperatur, der mit einer Temperatur knapp unter einem Kelvin von Heike Kamerlingh Onnes gewonnen wurde. Dazu kam eine äußerst ungewöhnliche Naturerscheinung, das Verschwinden des elektrischen Widerstandes bei tiefen Temperaturen. Das war ein makroskopischer Quanteneffekt, eine glänzende Bestätigung der für die sich zu dieser Zeit gerade erst entwickelnden Quantentheorie. Die Welt der tiefen Temperaturen überraschte gleich noch mit einem weiteren Phänomen, das flüssige Helium wollte bei Annäherung an den absoluten Nullpunkt einfach nicht fest werden.

1.1 Kälte, nicht nur ein Gefühl

Die Triebkräfte der Entwicklung von Kühlverfahren waren, wie in der Einleitung schon festgestellt, das Bemühen, Nahrungsmittel über längere Zeit frisch zu halten und Räume zu klimatisieren. So gab es schon im 17. Jahrhundert Versuche, das Klima mit Kälte zu beeinflussen. 1620 versuchte der Alchemist Cornelius Drebbel für König Jakob I. von England und Schottland an einem heißen Sommertag die Luft in der Great Hall der Westminster Abbey so stark abzukühlen, dass ein Gefühl von winterlicher Kälte aufkommen sollte [1]. Dieses Experiment geht wahrscheinlich auf Giambattista della Porta, einem neapolitanischen Arzt zurück,

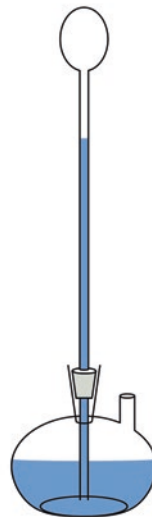
der schon 1550 angab, dass man mit Eis und Salpeter (NH_4NO_3) eine tiefere Kälte als mit Wasser und Salpeter erzeugen könne. Die Erzeugung von Kälte ging mit den Bemühungen einher, Temperatur quantitativ zu erfassen.

Zur Entwicklung erster Geräte zur Temperaturmessung kam es in der Renaissance. Galileo Galilei (1564–1642) entwickelte 1593 ein Thermoskop, mit dem Temperaturänderungen beobachtet werden konnten. In diesem Thermoskop nutzte er die Ausdehnung der Luft bei Erwärmung. In einem dünnen, teilweise mit Wasser gefülltem Rohr, an dessen oberem Ende sich ein kleines Volumen befindet, wird, durch die Ausdehnung der Luft mit Erhöhung der Temperatur in dem kleinen Volumen, die Wassersäule verschoben.

Als sich 1654 beim Vakuum-Kugelversuch von Otto von Guericke (1602–1686) in Magdeburg sowie bei Experimenten von Robert Boyle (1627–1692) in England und von Evangelista Torricelli (1608–1647) in Italien herausstellte, dass der Luftdruck von der Wetterlage und der Höhe über der Erdoberfläche abhängig ist, nutzte Galilei in einem neuen Gerät, seinem Thermometer, die Temperaturabhängigkeit der Dichte von Wasser zur Temperaturmessung. Körper mit unterschiedlichen Dichten verteilten sich in einer Wassersäule so, dass die leichteren auf dem Wasser schwammen, die schwereren nach unten sanken. Nur der Körper mit der Dichte, die der Wassertemperatur entsprach, schwebte in der Wassersäule (s. Abb. 1.1b).

Beide Geräte waren nicht sehr genau. Das änderte sich 1654 mit den Arbeiten von Ferdinando II. de' Medici (1610–1670) im Palazzo Pitti in Florenz. Er entwickelte ein Glasthermometer, in dem die Temperaturabhängigkeit der Dichte von Alkohol ausgenutzt wurde. Der Alkohol befand sich in einer Kapillare, die mit einer Skala versehen wurde. Als Fixpunkte wurde der Schmelzpunkt des Wassers,

Abb. 1.1 Das Galilei-Thermoskop (links) nutzt die Ausdehnung der Luft bei Erwärmung im Volumen oberhalb des Steigrohres. Mit dem Galilei-Thermometer (rechts) wird die Temperatur durch die Abhängigkeit der Dichte von Wasser von der Temperatur mit Messkörpern unterschiedlicher Dichte bestimmt



aber auch der Schmelzpunkt vieler anderer Stoffe des täglichen Lebens vorgeschlagen, darunter auch die Körpertemperatur des Menschen.

Daniel Gabriel Fahrenheit (1686–1736), ein geschickter Gerätebauer und Thermometerentwickler, verhalf 1724 dem Quecksilberthermometer zum Durchbruch. Das erste moderne Thermometer wurde von ihm mit einer kalibrierten Skala versehen. Der Schmelzpunkt von Eis bekam den Wert 32 °F (Grad Fahrenheit), der Siedepunkt von Wasser den Wert 212 °F. Diese Temperaturskala wird noch heute in den USA angewandt. Die in Europa benutzte Celsius-Skala wurde 1742 von dem Schweden Anders Celsius (1701–1744) zwischen dem Gefrierpunkt und dem Siedepunkt von Wasser in eine Skala von 100 Teilen aufgeteilt. Dabei erhielt der Gefrierpunkt den Wert 100 und der Siedepunkt den Wert 0.

Einer der Ersten, der Kälte künstlich herstellte, war der Arzt William Cullen (1710–1790) in Glasgow. 1748 nutzte er die schon im Altertum bekannte Methode der Verdunstung, um Kühlung zu erreichen. Bei der Verdünnung der Luft über einem Gefäß mit salpetrigem Säureäthylester, das sich in einem Gefäß mit Wasser befand, bildete sich Eis. Aus der Sicht der Molekularstruktur der Gase werden durch Verringerung des Gasdruckes über einem flüssigen Gas die schnelleren Moleküle aus der Flüssigkeit entfernt, wodurch die kinetische Energie der Flüssigkeit verringert wird und sie sich abkühlt.

Als 1798 Martinus van Marum (1750–1836) zur Überprüfung des Boyle-Mariotte'schen Gesetzes Ammoniak (NH_3) komprimierte, verkleinerte sich das Volumen bei einem Druck über 5 bar nicht mehr. Das Gas wurde flüssig. Die Flüssigkeit war kälter als das eingesetzte Gas [2].

Michael Faraday (1791–1867) entdeckte 1823, dass bei der Entspannung von komprimiertem Ammoniak Kälte erzeugt werden kann. Ammoniak wird bei $-33,34\text{ °C}$ flüssig. 1834 verflüssigte Adrien-Jean-Pierre Thilorier (1790–1844) in Paris durch Entspannung Kohlendioxid. Bei Verdampfung wird der Flüssigkeit weitere Energie entzogen, wodurch sich eine feste Phase, das Trockeneis, bildet. Mit einer Mischung von Trockeneis und Äther erreichte Thilorier eine Temperatur von -110 °C [3].

Zu Beginn des 18. Jahrhunderts vergrößerten sich die amerikanischen Städte schnell und es wurde immer schwieriger, die Lebensmittelversorgung der Bevölkerung zu sichern. Das führte zu einem starken Anwachsen des Handels mit Natureis, besonders in Nordamerika. Faraday und auch Thilorier erkannten, dass die von ihnen entwickelten Kühlmethoden den Natureishandel ersetzen und die Lebensmittelkonservierung vereinfachen können.

Das wichtigste Motiv, künstlich Kälte zu erzeugen, war die Notwendigkeit, die Bevölkerung von Großstädten mit frischen Lebensmitteln durch die Kühlung von Fleisch und Getränken, insbesondere von Bier, zu versorgen. 1859 ging in Marseille eine Eismaschine des Franzosen Ferdinand Carré (1824–1900) in Betrieb, die mit dem von Faraday gefundenen Ammoniak-Kühlverfahren arbeitete. Für den Lebensmitteltransport entstanden Kühlanlagen, mit denen in Eisenbahnwagons und in Überseeschiffen Lebensmittel auch aus und in entlegene Gebiete transportiert werden konnten.

Einer den ersten Wissenschaftler, die sich experimentell mit der Kälte auseinandersetzten, war im 17. Jahrhundert der Engländer Robert Boyle (1627–1691). Er erklärte sowohl die Kondensation von Wasserdampf der Luft auf kalten Gegenständen als auch die Ausdehnung von Wasser beim Übergang zum Eis.

Boyle vertrat, wie auch schon Galileo Galilei und später Sir Francis Bacon (1561–1626), die Meinung, dass Zusammenhänge in der Natur durch Experimente geklärt werden müssen. Eine Position, die zu dieser Zeit auf hartnäckigen Widerstand traf. Ungeachtet dessen, bestimmte die Haltung Galileis, Bacons und Boyles zum Experiment das weitere Herangehen der Großen der Tieftemperaturphysik, wie James Dewar (1842–1923), Kamerlingh Onnes (1853–1926) und Pjotr Kapitza (1894–1974).

Auch waren Boyle und Bacon der Meinung, dass Kälte ein Mangel an Bewegung sein müsse. Eine Meinung, die erst durch Albert Einstein mit der Erklärung der Brown'schen Bewegung exakt bewiesen wurde¹.

1.2 Die Idee vom absoluten Nullpunkt der Temperatur

Die Idee vom absoluten Nullpunkt ist so alt wie die Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e. V., die im Jahr 1700 auf Anregung von Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) vom brandenburgischen Kurfürsten Friedrich III. (1657–1713) gegründet wurde. In den 90er Jahren des 17. Jahrhunderts untersuchte Guillaume Amontons² den Einfluss der Temperatur auf die Ausdehnung von Luft, indem er mit einer Anordnung, die einem heutigen Gasthermometer entspricht, die Abnahme des Luftdrucks bei der Verringerung der Temperatur im Bereich unter 100 °C bestimmte und heraus fand, dass der Druck linear mit der Temperatur abnimmt. Mit der Erfahrung, dass der Druck nicht negativ werden kann, vermutete er, dass es eine Temperatur geben muss, unter die Luft oder jede andere Substanz nicht abgekühlt werden kann. Diese Temperatur berechnete er zu -240 °C. Hundert Jahre später formulierte Gay-Lussac (1778–1850) diese Abhängigkeit als Gesetz, nachdem er nachgewiesen hatte, dass der Druck eines Gases am Schmelzpunkt von Wasser um $1/273$ pro Grad Celsius abnimmt [4]. 1848 wurde durch William Thomson, dem späteren Lord Kelvin (1824–1907), mit der Boyle-Mariotte'schen Zustandsgleichung idealer Gase, $pV = N k_B T$, die Temperatur von $-273,15$ °C als absoluter Nullpunkt festgelegt (s. Abb. 1.2).

Für Amontons war der absolute Nullpunkt ein Zustand vollkommener Ruhe, in der alle Bewegung aufgehört hat. Das entspricht der klassischen Physik, für die am absoluten Nullpunkt keine thermische Bewegung vorhanden ist. Bei der

¹Die unregelmäßige Bewegung der Moleküle in Gasen und Flüssigkeiten wurde 1827 von Robert Brown entdeckt. Die Intensität dieser Bewegung ist temperaturabhängig. Die Erklärung der Brown'schen Bewegung lieferte Einstein 1905.

²Guillaume Amontons (1663–1705), französischer Physiker und Stadthalter von Lille.

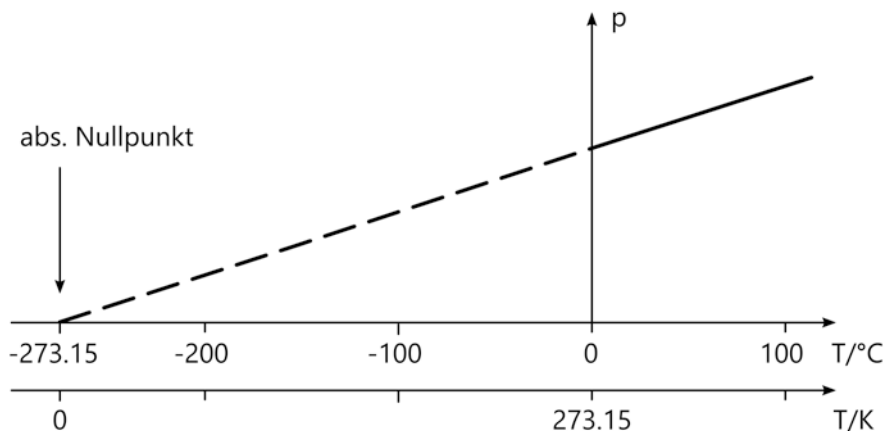


Abb. 1.2 Abhängigkeit des Luftdrucks p von der Temperatur T (in $^{\circ}\text{C}$ bzw. K) im Temperaturbereich $100\text{--}0\text{ }^{\circ}\text{C}$, bzw. über der Kelvin-Skala ($373,15\text{--}273,15\text{ K}$)

Erniedrigung der Temperatur T auf 0 K geht auch die thermische Energie nach $E = k_{\text{B}}T$ gegen null³.

Am Ende des 18. Jahrhunderts formulierte Antoine Laurent Lavoisier (1743–1794) den Gedanken von tiefen Temperaturen mit dem Satz: „Würde die Erde in sehr kalten Zonen, etwa die des Jupiters oder Saturns, gebracht werden, dann würde sich das Wasser unserer Flüsse und Meere in feste Gebirge verwandeln. Die Luft (oder wenigstens einige ihrer Bestandteile) würden aufhören, ein unsichtbares Gas zu sein und flüssig werden“ [2]. Diese Vision motivierte die Physiker durch Verflüssigung weiterer Gase, immer tiefere Temperaturen zu erreichen.

Nachdem es Faraday gelungen war, Chlorgas bei $T_{\text{s}} = -34,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu verflüssigen, fand er heraus, dass die meisten Gase durch Kompression und anschließende Entspannung flüssig werden. Das gelingt jedoch nur solange die Ausgangstemperatur des komprimierten Gases bei der Entspannung unter einer kritischen Temperatur liegt. Für Gase, die sich bei Zimmertemperatur abkühlen lassen, liegt diese kritische Temperatur T_{K} über der Zimmertemperatur.

³Auf dem Weg zum absoluten Nullpunkt wird die Temperatur heute anschaulich auch durch die Geschwindigkeit der Teilchen ausgedrückt [5].

Für die mittlere Geschwindigkeit von Teilchen gilt $\bar{v} = \sqrt{\frac{8k_{\text{B}}T}{\pi m}} \bar{v}$, d. h. $v \sim T^{1/2}$. Die Charakterisierung der Temperatur durch die Teilchengeschwindigkeit erfolgt bei sehr tiefen Temperaturen, die mit Atomen, die der Bose-Einstein-Kondensation unterliegen, erreicht werden (s. Teil IV). Ein verdampfendes Alkaliatom hat dann bei Zimmertemperatur $T = 293\text{ K}$ größenordnungsmäßig eine Geschwindigkeit von 300 m/s . Die Atome des Rubidiums haben bei Zimmertemperatur eine Geschwindigkeit von $v = 15,47 T^{1/2} = 264\text{ m/s}$, bei 4 K – 10 m/s , bei 1 mK – 50 cm/s , bei $1\text{ }\mu\text{K}$ – 1 cm/s und bei 1 nK – $5\text{ }\mu\text{m/s}$. ($k_{\text{B}} = 1,38 \times 10^{-23}\text{ J/K}$, Boltzmann-Konstante; m Molekülmasse).

1.3 Die Gasverflüssigung

1.3.1 Cailletet und Pictet

So war die Vision von Lavoisier, die Atmosphäre zu verflüssigen, gegen Ende des 19. Jahrhunderts zu einer ernsthaften Herausforderung geworden.

Der Franzose Louis Paul Cailletet (1832–1913) kühlte auf 300 bar komprimierten Sauerstoff vor der Entspannung mit flüssigem Schwefeldioxid auf $-75,4\text{ °C}$ ab und konnte durch eine plötzliche Druckverminderung die Bildung von kleinen Tröpfchen aus Sauerstoff beobachten. Dieses Ergebnis wurde am 7. Dezember 1877 als Entdeckung von Cailletet vom Sekretär der Pariser Akademie registriert [6]. Das Gleiche gelang ihm noch im Dezember 1877 kurz vor Weihnachten mit Stickstoff, der stark komprimiert und mit flüssigem Äthylen bis auf -105 °C abkühlt wurde. Cailletet beobachtete bei der Druckminderung Tröpfchen und ein lebhaftes Wallen der halb flüssigen, halb gasförmigen Masse.

Die Vorkühlung der komprimierten Gase war notwendig, um die kritischen Temperaturen von Sauerstoff -118 °C und Stickstoff -147 °C zu unterschreiten, denn oberhalb dieser Temperatur kühlt sich das Gas bei Entspannung nicht ab, sondern erwärmt sich. Mit diesen Experimenten konnte Cailletet zeigen, dass die Vision Lavoisiers von der Verflüssigung der Atmosphäre realisierbar ist.

Zur gleichen Zeit beobachtete Raoul-Pierre Pictet (1846–1929) in Genf den Beginn der Kondensation von Luft mit einer völlig anderen Methode, der sogenannten Kaskaden-Methode, bei der Gase, mit abnehmender Siedetemperatur, nacheinander verflüssigt werden. Pictets Telegramm über diesen Erfolg erreichte die Pariser Akademie am 22. Dezember 1877 [7]. Die Ergebnisse beider Wissenschaftler wurden am 24. Dezember 1877, am Weihnachtsabend in der Akademiesitzung bekanntgegeben.

1.3.2 Olszewski und Wroblewski

Sechs Jahre später, 1883, gelang es den polnischen Physikern Karol Stanislaw Olszewski und Zygmunt Florenty von Wroblewski in Krakau durch Dampfdruckerniedrigung, Äthylen auf -152 °C abzukühlen (Abb. 1.3).

Da diese Temperatur unter der kritischen Temperatur der Luft von -140 °C liegt, konnten sie erstmals flüssige Luft als klare wasserähnliche Flüssigkeit gewinnen [8]. Danach verflüssigten sie auf diese Weise auch die Gase Sauerstoff und Stickstoff getrennt. Dabei beträgt die mittlere Geschwindigkeit der Stickstoffmoleküle bei $77,3\text{ K}$ mit 242 m/s nur noch die Hälfte ihrer Geschwindigkeit bei Zimmertemperatur.

Es waren zwar nur geringe Mengen dieser tiefsiedenden Flüssigkeiten, aber genug, um die Forschungen mit flüssigen Stickstoff bis $T_s = 77,3\text{ K}$ ($-195,8\text{ °C}$) und flüssigen Sauerstoff bis auf $T_s = 90,1\text{ K}$ (-183 °C), einen bis dahin unzugänglichen Temperaturbereich, auszudehnen.