

Arne Schirmmacher

## Bohrsche Bahnen in Europa

### Bilder und Modelle zur Vermittlung des modernen Atoms

Die drei Artikel »Über den Bau der Atome und Moleküle« des Dänen Niels Bohr (1885-1962) erschienen 1913 in der altehrwürdigen britischen Zeitschrift *Philosophical Magazine*. Bohr hatte sein wissenschaftliches Hauptthema und insbesondere seine neuen Ideen zum Atombau erst in Großbritannien gefunden, wo er nach seiner Promotion bei J. J. Thomson in Cambridge auch bei Ernest Rutherford in Manchester arbeitete. Nach dem Krieg folgte der Aufstieg zum führenden dänischen Wissenschaftler, für den 1921 in Kopenhagen ein eigenes Institut für theoretische Physik errichtet wurde. Der Nobelpreis brachte ihm 1922 allgemeine Bekanntheit ein, doch schon zuvor waren aus vielen Orten Anfragen nach Vorträgen und Vorlesungen gekommen. So präsentierte Bohr seine Theorie nicht nur in Kopenhagen, sondern auch in München, Cambridge, Uppsala oder Göttingen, wo man von »Bohr-Festspielen« sprach. Aus diesem Grund ist die neue Theorie des Atoms, die auch in Deutschland weiterentwickelt wurde, ein interessantes Studienobjekt für das Zusammenspiel von Forschern aus verschiedenen Ländern und Wissenschaftskulturen. In diesem Beitrag soll es aber nicht um Bohrs eigene Wege gehen, sondern vielmehr um die Rezeption und Popularisierung seines Atommodells und speziell dessen Darstellungen und Ausstellungsmodelle im nationalen Kontext.

Sich Atome als kleine Planetensysteme vorzustellen, das hatten nicht erst Rutherford und Bohr ins Spiel gebracht. Es war eine seit der Jahrhundertwende wiederholt diskutierte Idee, insbesondere in Frankreich, Deutschland und auch in Japan. Bohr aber hat diese präzisiert und an der Empirie bestätigt: Allein durch Quantenbedingungen festgelegte Bahnen galten fortan als zulässig, und die in der Balmer-Formel zusammengefassten Spektrallinien des Wasserstoffs konnten richtig abgeleitet werden. Mit allzu realistischen Zeichnungen dieser kleinen Planetensysteme hielten sich Bohr und andere Physiker jedoch noch zurück. Arnold Sommerfeld in München zeigte, dass nicht nur Kreisbahnen eine Rolle spielen, sondern erst bei der Verwendung elliptischer Orbits die »Feinstruktur« der Spektrallinien berechnet werden konnte. Doch Bohrs Ziel war von Anfang an ambitionierter, er wollte das ganze Periodensystem der Elemente beschreiben, und mit Hilfe eines »Aufbauprinzips«, das sich zu seinem »Korrespondenzprinzip« gesellte, sollte auch für komplizierte Atome wie Kupfer, Xenon oder Radium die Anordnung der vielen Bohrschen Bahnen abgeleitet werden. Er war es dann auch, der um 1921 zur Veranschaulichung seiner Ergebnisse – und wohl auch der Attraktivität der geometrischen Formen wegen – große Tafeln anfertigen ließ, die die Bahnen für ausgewählte Atome darstellten. Dabei wurden die Größenverhältnisse der Bahnen berücksichtigt

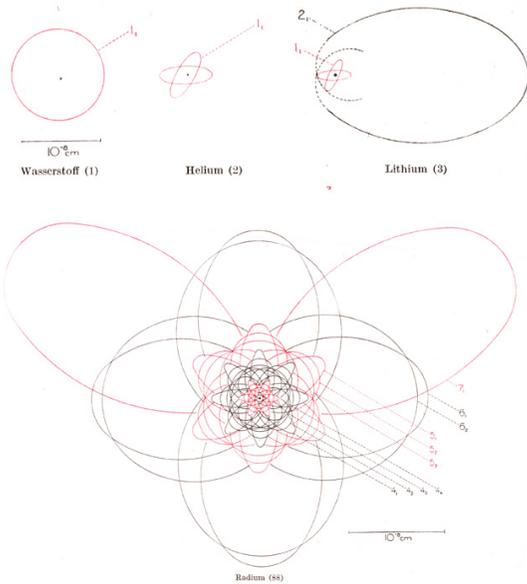


Abb. 1: Zeichnungen der Bohrschen Elektronenbahnen für verschiedene Atome, Ausschnitte aus einer Farbtafel von Niels Bohrs Mitarbeitern Hendrik Kramers und Helge Holst, 1923.

und schwarz und rot gekennzeichnet, je nach dem ob die Bahnen einer geraden oder ungeraden Quantenzahl entsprachen.

Bohrs eigene Tafeln sind nicht mehr erhalten, aber nach ihnen angefertigte Abbildungen finden sich in einem populären Buch mit dem Titel »Bohrs Atomtheorie allgemeinverständlich dargestellt«, das 1922 zunächst auf Dänisch erschien.<sup>1</sup> Die Autoren waren der damals engste Mitarbeiter Bohrs, Hendrik A. Kramers, und der Bibliothekar der Kopenhagener Technischen Hochschule, Helge Holst. Die Abbildungen für den Bau von Wasserstoff, Helium, Lithium, Kohlenstoff, Neon, Natrium, Argon, Kupfer, Krypton, Xenon und schließlich Radium mit 88 kreisenden Elektronen (Abb. 1) erschienen im Juni 1923 auch in Deutschland in einem Heft der Zeitschrift *Die Naturwissenschaften*, welches komplett Bohr und seiner Theorie gewidmet war. Die Autoren gaben zu, dass die »grobe Illustration« nicht den Versuch machte, »die verschiedenen Stellungen der Bahnebenen im Raume, über die theoretisch

übrigens noch nicht viel bekannt ist, näher anzugeben, sondern die Bahnschlingen sind in der Zeichnungsebene in übersichtlicher symmetrischer Weise angeordnet.«<sup>2</sup>

Wie diese Bohrschen Bahnen international popularisiert wurden, zeigen bereits die verschiedenen Auflagen des Buches von Kramers und Holst. 1923 erschien eine englische Ausgabe (in einem dänischen Verlag) unter dem Titel »The atom and the Bohr theory of its structure. An elementary presentation«, im nächsten Jahr folgte eine identische Ausgabe für den amerikanischen Markt in New York und 1925 brachte der Springer Verlag »Das Atom und die Bohrsche Theorie seines Baues« dem deutschen Leser »gemeinverständlich dargestellt« nahe. Allen diesen Ausgaben waren die farbigen Tafeln gemeinsam, die so ausgeklappt werden konnten, dass man die Zeichnungen ständig »während des Lesens vor Augen haben kann« (Abb. 1).<sup>3</sup>

Im Jahre 1927 folgte die holländische Ausgabe, doch hier fehlten die Abbildungen! Während der Text des Bandes weitestgehend unverändert blieb, war die Bildlichkeit der Atome wieder verschwunden. Offenbar hatte sich die Sicht durchgesetzt, dass die in den Jahren 1925 und 1926 aufgestellte Quantenmechanik solche Atombilder nun ausschließe, nicht jedoch die schriftliche Darstellung der nun »alten« Quantentheorie nach Bohr. Auf Dänisch und Holländisch erschienen schließlich 1929 bzw. 1930 zweite überarbeitete Auflagen, in denen

Satz zu den  
Autoren korrekt  
so?

die neueren Entwicklungen erwähnt wurden.<sup>4</sup> Aber weder in Deutschland noch in England gab es Neuauflagen des Buches, die sich mit den Konsequenzen der Quantenmechanik für die Atombilder hätten auseinandersetzen müssen; wir können dies als ein Indiz dafür werten, dass hier andere Personen und Schriften die Deutungshoheit übernommen hatten, was sich auch auf die Bilder und Modelle vom Atom auswirkte.

### Atome für Hörer aller Fakultäten und Modelle für das Deutsche Museum

Tatsächlich waren dem populären Buch von Kramers und Holst in Deutschland bereits mehrere vorangegangen. Arnold Sommerfeld hatte im Ersten Weltkrieg statt seiner Spezialvorlesungen zur Atomphysik im Wintersemester 1916/17 eine Vorlesung zu »Atomistik und Elektronik« gehalten, und zwar »für Hörer aller Fakultäten ohne mathematische Ableitung«. Die anwesenden Kollegen aus der Chemie und Medizin drängten ihn schließlich, die Vorlesungen in einer Veröffentlichung festzuhalten, »die auch dem Nichtfachmanne das Eindringen in die neue Welt des Atominernen ermöglichen sollte«. Das Buch »Atombau und Spektrallinien« erschien 1919 und avancierte bald zur »Bibel des modernen Physikers« (Max Born), die sich »wie ein spannender Roman« las (Pieter Zeeman).<sup>5</sup> Sommerfeld hatte sich bewusst auch an eine interessierte Öffentlichkeit gewandt und vorrangig »anschauliche Elemente« der Theorie behandelt. Sommerfelds Münchner Kollege Leo Graetz hatte bereits 1918 das Buch »Die Atomtheorie in ihrer neuesten Entwicklung« veröffentlicht. Die in diesen Büchern enthaltenen Abbildungen blieben indes noch weitgehend schematisch.

Als aber der Generaldirektor des Deutschen Museums in München bei Sommerfeld Anfang 1918 anfragte, ob dieser nicht Vorschläge zur Darstellung der »neueren Theorien über die Zusammensetzung und den Aufbau der chemischen Elemente« beitragen könne, übersandte Sommerfeld bereits Anfang März zwei Skizzen für eine Darstellung des Wasserstoffatoms. Eine davon erweiterte die bislang ebenen Strukturen in das Dreidimensionale, indem zusätzlich zu der Bohrschen Kreisbahn »andere mögliche Bahnen« hinzugefügt wurden, »die in gleichen Winkeln gegen die innere Bahn geneigt sind und aus der Horizontalebene heraustreten« (Abb. 2). Der Münchner Theoretiker favorisierte diese Skizze, da ein Modell mit nur einer ebenen Bahn entsprechend der zweiten Zeichnung »im Ganzen zu flach wirken« würde.<sup>6</sup>

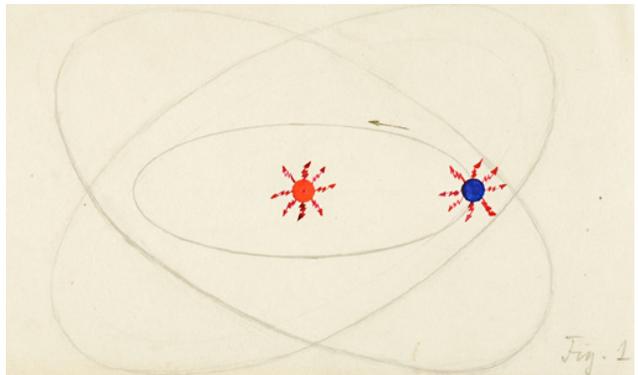


Abb. 2: Skizze des Wasserstoffatoms von Arnold Sommerfeld 1918, angefertigt für das Deutsche Museum.

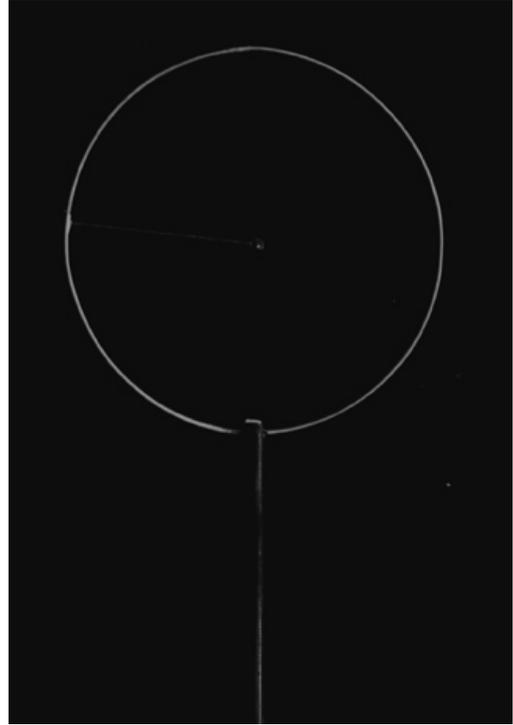
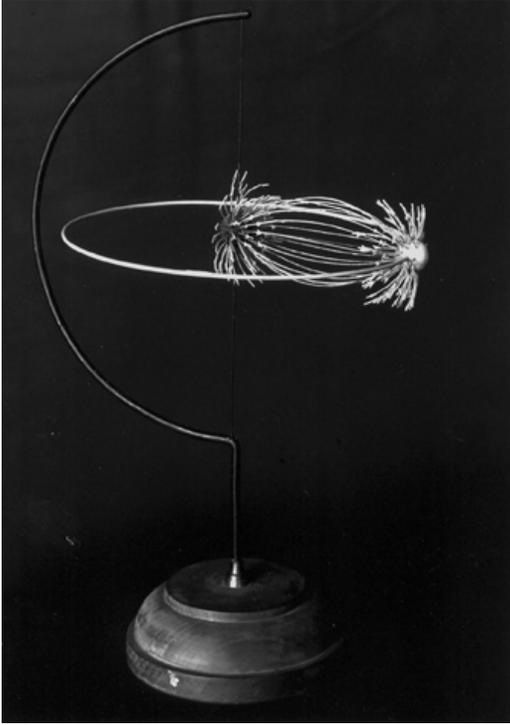


Abb. 3 und 4: Modelle des Wasserstoffatoms, links nach Sommerfeld für das Deutsche Museum 1918, rechts nach Bragg und Hartree ca. 1923, gezeigt auf der British Empire Exhibition 1924/25 und danach im Science Museum London.

Das schließlich für das Deutsche Museum angefertigte Modell, das im Saal »Aufbau der Materie« ausgestellt wurde, erhielt indes seine dreidimensionale Struktur nicht durch zusätzliche Bahnen, sondern durch eine eindrucksvolle Kombination von räumlicher Aufhängung und der volumeneinnehmenden Darstellung der elektrischen Feldlinien (Abb. 3). Auf diese Weise hatte sich das Bohrsche Kreisschema zu einem zugleich planetaren und doch raumfüllenden Modell gewandelt.

Ein weiteres Beispiel für diese in Deutschland anzutreffende Tendenz, dem »leeren« Atom eine Räumlichkeit zurückzugeben, ist das Modell für ein Wasserstoffmolekül-Ion ( $\text{H}_2^+$ ), das zwischen 1921 und 1925 für das Deutsche Museum angefertigt wurde. Sommerfelds Doktorand Wolfgang Pauli hatte 1921 in seiner Dissertation eine vollständige mathematische Analyse der möglichen und stabilen Bahnen des positiv geladenen Wasserstoffmoleküls vorgelegt.<sup>7</sup> Da es wie das Wasserstoffatom nur ein Elektron besitzt, das sich aber um zwei Kerne bewegt, konnte das Problem mit den Methoden der Himmelsmechanik angegangen werden. Paulis aufwändige Berechnungen ergaben, dass das von Bohr, Sommerfeld oder Graetz angenommene Bild des Moleküls nicht realis-

tisch war: Die einfache Kreisbahn auf eine Mittelebene zwischen den beiden Atomkernen stellte sich als instabil heraus, ebenso wie alle anderen Bahnen, die in einer Ebene lagen. Pauli zeigte, dass es eine stabile Bahn gab, die den größten Teil eines Ellipsoids um die Kerne gleichmäßig durchlief und berechnete deren Größe. Anschaulich bekam die leere Welt der Atome hier eine (imaginäre) Hülle, wobei an den Enden Öffnungen frei blieben (Abb. 5).

Vergleicht man die deutschen Modelle mit entsprechenden Modellen aus Großbritannien (Abb. 3 und 4 bzw. Abb. 5 und 6), fällt hier bereits auf, dass sie die schematische Kombination von Atomkernen und Kreisbahnen der Elektronen weit hinter sich gelassen hatten und andere Qualitäten der atomaren Welt weit deutlicher repräsentierten: Kraftfelder und räumliche Ausdehnung.

#### Modelle für die British Empire Exhibition und das Science Museum

In Großbritannien war die Skepsis gegenüber Bohrs Modell zunächst groß, trotz der gelungenen Erklärung für die Serien der Spektrallinien. Ernest Rutherford hatte zwar Bohrs drei Abhandlungen beim *Philosophical Magazine* eingereicht, dennoch kritisierte er im Frühjahr 1914, dass es doch eine »great difficulty« in dessen Modell gäbe: »how does an electron decide what frequency it is going to vibrate?«<sup>8</sup> 1923 war er dann aber soweit von dem Modell überzeugt, dass er das Vorwort zur englischen Ausgabe des Kramers/Holst-Buches verfasste. Auch Vater und Sohn Bragg, die durch Streuung von Röntgenstrahlen an Kristallen zeigten, dass diese aus einem Atomgitter bestehen, wofür sie 1915 gemeinsam den Nobelpreis für Physik erhielten, waren lange skeptisch gegenüber dem Bohrschen Modell. So schrieb William Lawrence

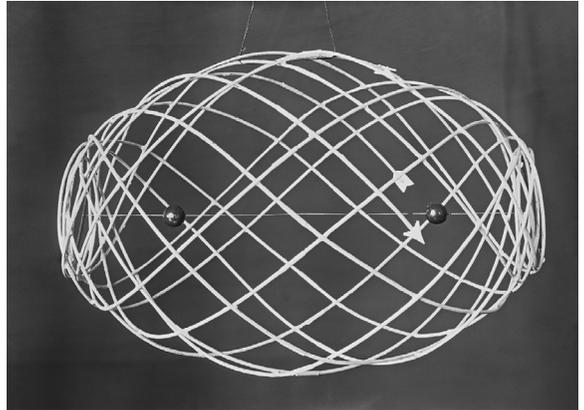


Abb. 5 und 6: H<sub>2</sub><sup>+</sup>-Molekül-Modell im Deutschen Museum, ca. 1923, und He-Atom nach Bragg und Hartree, ca. 1923.

seinem Vater William Henry im Oktober 1920 (oder 1921), dass er gerade Sommerfelds »Atombau und Spektrallinien« gelesen habe: »He is convinced of the truth of Bohr's atomic model, and pictures the atoms as planet systems. The numerical checks he gets [...] is very convincing, but do you really think these orbits have any existence? I can't believe it.«<sup>9</sup>

Zwei Jahre später jedenfalls – nach Bohrs Nobelpreis und den Bänden von Kramers/Holst bzw. Sommerfeld auf Englisch<sup>10</sup> – hatte Lawrence Bragg indes eine Reihe von Modellen anfertigen lassen, die dem neuesten Stand der Bohr-Sommerfeldschen Atomtheorie entsprachen (Abb. 4, 6 und 7). Es ist nicht bekannt, ob diese Modelle für Vorlesungen verwendet wurden, doch sollten sie bald wie die deutschen Modelle öffentlich ausgestellt werden.

Dass sich Lawrence Bragg mit dem Bohrschen Modell doch noch anfreundete, lag an einem jungen Studenten in Cambridge. Dieser stellte eine Verbindung von Braggs Forschungen mit Bohrs Modell her. Douglas R. Hartree, der wegen des Krieges sein Studium in Cambridge hatte unterbrechen müssen, brachte aus dem Kriegsdienst eine neue Methode zur einfacheren numerischen Berechnung von Geschossbahnen mit.<sup>11</sup> Bohrs Cambridger Vorträge Ende 1921 lenkten sein Interesse dann auf die neue Quantentheorie, wo Hartree mit seinen ballistischen Erfahrungen in der Lage war, die von seinem Betreuer Ralph H. Fowler erwünschte quantitative Beschreibung der Atombahnen durchzuführen. In einer im Mai 1923 eingereichten Arbeit berechnete Hartree etwa die Bahnen des Natriumatoms unter Berücksichtigung der Abschirmung der Kernladung durch die weiter innen liegenden Elektronen, wodurch die äußere Bahn zugleich diejenige ist, die dem Kern besonders nahe kommt (im Unterschied etwa zu Bohrs Zeichnungen, vgl. Abb. 1 und 7). Hartrees Kunst bestand darin, die komplizierten numerischen Berechnungen durch eine neue Parametrisierung so zu vereinfachen, dass ein kleiner Rechenschieber ausreichte. Zugleich konnte er aus der gewonnenen Größe und Form der Bahnen die Eigenschaften des Atoms unter dem Einfluss von Röntgenstreuung berechnen und sie mit Lawrence Braggs experimentellen Ergebnissen vergleichen.<sup>12</sup> Durch diese Veröffentlichung war der Physiker in Manchester auf den Studenten in Cambridge aufmerksam geworden, und schließlich berechnete Hartree die Bahndimensionen der Elemente Lithium, Natrium, Magnesium und Aluminium für entsprechende Modelle.<sup>13</sup>

Während der Sommermonate 1924 und 1925 fand im Londoner Stadtteil Wembley die British Empire Exhibition statt, eine Kolonialausstellung, die den Handel fördern sollte, auf der sich aber auch die britische Wissenschaft und Industrie präsentierten. Die Exhibition of Pure Science wurde von einem Komitee der Royal Society organisiert, dem Sir Henry Bragg angehörte. Zu den Instrumenten und Objekten der britischen Wissenschaft, die hier präsentiert wurden, gehörte neben den Apparaturen zur Entdeckung des Elektrons von J. J. Thomson oder der Wilsonschen Nebelkammer auch ein »set of models [that] represents the structure of some of the elements«, wobei darauf hingewiesen wurde, dass sich ein Teil der Modelle in der Chemischen Sektion befand.<sup>14</sup> Während die Physik im H. M. Government Pavillon ausgestellt wurde, fand

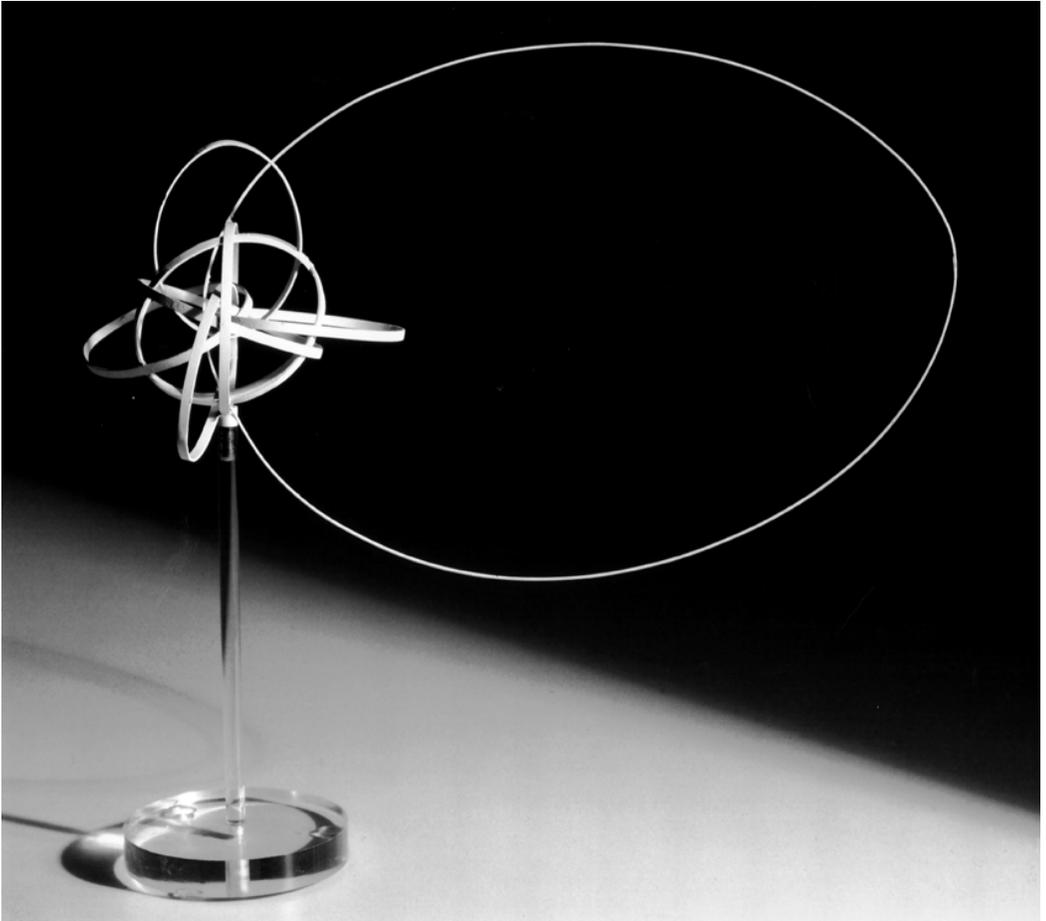


Abb. 7: Atommodell des Natrium nach Bragg/Hartree, ca. 1923.

die Chemie in der Chemical Hall des Palace of Industry ihren angemessenen Platz.<sup>15</sup> Nach Beendigung der Ausstellung, die mehrere Millionen Besucher angelockt hatte, kamen die Modelle an das Science Museum. Lawrence Bragg erklärte dem Museum, dass sich allerdings die Ansichten über die Struktur des Atoms sehr schnell veränderten, so erwartete er, dass diese Modelle in wenigen Jahren veraltet seien. Wenn das Museum dennoch weiterhin Interesse an Modellen habe, könne man neue anfertigen, »when the present ones become too much out of date«.<sup>16</sup>

Eine solche Anpassung an die Sichtweise der Quantenmechanik wurde indes nicht im Londoner Science Museum vorgenommen, sondern im Deutschen Museum in München. Zwiebelschalenartig ineinander liegende Schichten von Zonen hoher Aufenthaltswahrscheinlichkeit für Elektronen gaben dem Atom die traditionelle Kugelform zurück.<sup>17</sup> Mit dem Zweiten Weltkrieg wurden

schließlich auch die Modelle nach Sommerfeld bzw. Pauli zerstört, die Bohrsche Bahnen zeigten.

Die britischen Modelle waren nach der Wiedereröffnung des Museums ab Februar 1946 wieder zu sehen, und bei allem Fortschritt des Wissens um das Atom hatten sie nichts von ihrer Suggestivitätskraft verloren. So schrieb Lawrence Bragg Ende 1946 an den Direktor des Science Museum, Herman Shaw, dass er sich freue, dass die Modelle photographiert würden (das Museum wollte die Photos den Besuchern zum Kauf anbieten), natürlich seien sie eigentlich nur noch von historischem Interesse und müssten durch quantenmechanische Modelle ersetzt werden. Doch werde der moderne mathematische Physiker ihnen Bedeutung zumessen, und Bragg verriet dem Museumsdirektor: »I even found Bohr himself gazing at them in a fascinated way, when he visited us last summer.«<sup>18</sup>

Diese Faszination für die Modelle übertrug sich auch auf Bereiche außerhalb der Physik. Großbritannien plante für das Jahr 1951 ein Festival of Britain, und eine der Firmen, die die Ausstellung gestaltete, Warnett Kennedy and Associates, beabsichtigte, die Modelle als Grundlage von Industriedesign zu verwenden. Bragg, der hierzu seine Zustimmung geben musste, war an den Resultaten sehr interessiert.<sup>19</sup> Doch sollten nicht die Bohrschen Bahnen das Festival schmücken, sondern die Muster, die sich aus der Kristallographie ergaben, jenem Gebiet also, in dem die Briten führend waren. Lawrence Bragg war Mitglied einer Festival Pattern Group, die eher im Verborgenen wirkte, um die wissenschaftliche Reputation ihrer Mitglieder nicht zu gefährden. Die Muster der atomaren Welt zierten nun Teppiche, Krawatten, Teetassen – und auch Lady Bragg, die auf dem internationalen Kristallographenkongress 1951 in Stockholm ein Kleid trug, dessen Spitzenstoff die Kristallstruktur von Beryll wiedergab.<sup>20</sup>

## Epilog

Den dreidimensionalen Modellen, die in Deutschland und England in der Zeit nach der Akzeptanz von Bohrs Atommodell und vor dem neuen Paradigmenwechsel der Quantenmechanik angefertigt wurden, kommt unbestreitbar ein großer Einfluss auf das öffentliche Bild des Atoms im 20. Jahrhundert zu. Sie haben sich in die Ikonographie der Wissenschaft eingeschrieben, dominieren bis heute die Vorstellungswelt vieler und widersetzen sich standhaft der überfälligen Revision durch die etablierten Ergebnisse der Quantentheorie. Umso wichtiger erscheint der Hinweis auf die Kontingenz des Entstehens dieser Bildlichkeit. Stand in Deutschland das Zeitfenster dafür etwa von 1917 bis 1925 offen, fand sich in Großbritannien erst nach 1922 die Akzeptanz für entsprechende Modelle. Ein Blick nach Frankreich indes zeigt, dass offensichtlich eine schleppende Rezeption des Bohr-Modells zusammen mit einer späten Etablierung von Vermittlungsinstitutionen wie dem erst 1937 eröffneten Palais de la Découverte dazu führte, dass entsprechende Modelle in Frankreich nicht anzutreffen sind.<sup>21</sup> Die Konzeption des planetaren Atoms war freilich auch hier

bekannt, war es doch der französische Physiker Jean Perrin, der 1901 als erster auf dieses Modell hingewiesen hat, und zwar in der populärwissenschaftlichen *Revue scientifique*.<sup>22</sup>

DR. ARNE SCHIRRMACHER war langjährig als Wissenschaftshistoriker am Deutschen Museums tätig und forscht derzeit am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin. Nach Studium der Physik, Biologie und Philosophie promovierte er in mathematischer Physik. Forschungsschwerpunkte sind derzeit die Geschichte der Quantentheorie und atomarer Repräsentationen sowie die vergleichende Geschichte der Wissenschaftsvermittlung in Europa im 20. Jahrhundert. Zuletzt erschienen »Looking into (the) matter. Scientific artefacts and atomistic iconography«, in: *Illuminating Instruments*, Peter Morris/Klaus Stauber (Hg.), Washington 2009, und *Nach der Popularisierung. Zur Relation von Wissenschaft und Öffentlichkeit im 20. Jahrhundert*. *Geschichte und Gesellschaft* Jg. 34, 2008, S. 73-95.

#### Anmerkungen

- 1 Hendrik A. Kramers/Helge Holst: Bohrs atomteori almenfattelig fremstillet. Kopenhagen 1922, <sup>2</sup>1929. Zu den Tafeln vgl. Helge Kragh: *The theory of the periodic system*. In: Anthony P. French, P. J. Kennedy (Hg.): *Niels Bohr: A centenary volume*. Cambridge/MA. 1985, S. 50-67.
- 2 Hendrik A. Kramers: Das Korrespondenzprinzip und der Schalenbau des Atoms, *Naturwissenschaften* Jg. 11, 1923, S. 550-559, auf. S. 556. auf. ???
- 3 Hendrik A. Kramers, Helge Holst: *Das Atom und die Bohrsche Theorie seines Baues*. Berlin 1925, S. 171.
- 4 Hendrik A. Kramers, Helge Holst: *De bouw der Atomen*. Amsterdam 1927, <sup>2</sup>1930.
- 5 Arnold Sommerfeld: *Atombau und Spektrallinien*. Braunschweig 1919; Ders.: *Wissenschaftlicher Briefwechsel*, hg. von Michael Eckert und Karl Märker, Bd. 2. Berlin 2004, S. 72 und 118.
- 6 Arnold Sommerfeld an Oskar von Miller, 5. März 1918, Deutsches Museum, Verwaltungsarchiv, Chemie 1271.
- 7 Wolfgang Pauli: Über das Modell des Wasserstoffmoleküls. In: *Annalen der Physik* Jg. 68, 1922, S. 177-240.
- 8 Rutherford an Bohr, 20. März 1914. In: *Nils Bohr: Collected Works*, Bd. 3, Amsterdam 1976.
- 9 Zu dem Brief von W. L. Bragg an W. H. Bragg ist in den *Bragg Papers* das Datum 18. Okt. 1920 (?) angegeben (Royal Institution London, W. H. Bragg 28A/10). In John Jenkin: *William and Lawrence Bragg, father and son. The most extraordinary collaboration in science*, Oxford 2008, S. 412, wird er auf den 17. Okt. 1921 datiert. Okt. 1920 (?) ???
- 10 Arnold Sommerfeld: *Atomic structure and spectral lines*. London 1923.
- 11 Douglas R. Hartree: *Ballistic calculations*. In: *Nature* Jg. 106, 1920, S. 152-154. Vgl.: Charlotte Froese Fischer: *Douglas Rayner Hartree: His life in science and computing*. New Jersey 2004.
- 12 Douglas R. Hartree: *On some approximate numerical applications of Bohr's theory of spectra*. In: *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* Jg. 21, 1923, S. 625-64, S. 625-64 = 625-664? 81

- bezieht sich auf W. L. Bragg, R. W. James, C. H. Bosanquet: The intensity of reflexion of X-rays by rock-salt. In: *Philosophical Magazine* Jg. 41, 1921, S. 309-227.
- S. 309-227??
- 13 W. L. Bragg an den Direktor des Science Museum, 4. Mai 1926, Science Museum, Paper Technical Files of Inv. 1926-371/377 (im Folgenden SM).
  - 14 Handbook to the exhibition of pure science. Arranged by the Royal Society. London 1924, S. 158.
  - 15 Vgl. Donald R. Knight, Alan D. Sabey: The lion roars at Wembley. British empire exhibition 60th anniversary, 1924-1925. London 1984.
  - 16 W. L. Bragg an Director Science Museum, 4. Mai 1926, SM.
  - 17 Vgl. den Beitrag von Michael Eckert in diesem Band.
  - 18 W. L. Bragg an H. Shaw, 13. Dez. 1946, SM.
  - 19 H. Shaw an W. L. Bragg, 14. Feb. 1947, und Bragg an Shaw, 15. Feb. 1947, SM.
  - 20 Lesley Jackson: From atoms to patterns: Crystal structure designs from the 1951 festival of Britain. London 2008, S. 27.
  - 21 Charlotte Bigg: The reception of Bohr's atom in France, 1913-1925. Unveröffentlichtes Manuskript, 1996.
  - 22 Jean Perrin: Les hypothèses moléculaires. In: *Revue Scientifique* Jg. 15, 1901, S. 449-461.