Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *131 (2017), 189–207*

Horst Kant

Die Entdeckung der nuklearen Energie – Einige wissenschaftshistorische Betrachtungen*

Abstract

Die Entdeckung der Radioaktivität 1896 führte dazu, sich mit Aufbau und Eigenschaften der Atome intensiver zu befassen. Das Jahr 1932 wurde zu einem Schlüsseljahr in der Entwicklung der Kernphysik und die Frage der Umwandlung von Atomkernen rückte ins Blickfeld der Forschung. Zwar wurde von führenden Physikern die Möglichkeit der Energiegewinnung aus dem Atomkern noch verneint, doch kamen beide Möglichkeiten nuklearer Energiegewinnung Ende der 1930er Jahre schlagartig ins Blickfeld: 1937/38 wurde die Kernfusion als Quelle der Sternenergie erkannt, Ende 1938 entdeckten Hahn/Straßmann bei ihren radiochemischen Untersuchungen die Kernspaltung, deren physikalische Erklärung Meitner/Frisch kurz darauf lieferten. Die damalige politische Weltsituation führte dazu, dass beide Energiegewinnungs-Prozesse zuerst in Waffensystemen umgesetzt wurden. In der öffentlichen Diskussion stehen heute vor allem die Gefahren der Kernenergie im Vordergrund – ein Untersuchungsbereich auch für Technikfolgenabschätzung.

Seit Anfang des 20. Jahrhunderts beschäftigte man sich mit dem Aufbau der Atome und den Eigenschaften ihrer Bausteine. Die ersten Atommodelle entstanden um 1910. Das Jahr 1932 wurde zu einem Schlüsseljahr in der Entwicklung der Kernphysik und die Frage der Umwandlung von Atomkernen rückte ins Blickfeld der Forschung. Damit rückte auch die Frage nach der Nutzung der Kernenergie in den Fokus und man sah eine Chance, dass Energie in Zukunft in nahezu unbegrenzter Menge zum Nutzen der Gesellschaft zur Verfügung stehen könnte. Zwar hat Kernenergie – zumindest die Kernspaltungsenergie und zumindest in Deutschland – gegenwärtig aus verschiedenen Gründen keine gesellschaftliche Akzeptanz mehr, aber gerade deshalb erscheint es nützlich, einen Blick in die Geschichte der Entdeckung der nuklearen Energie zu werfen. Dabei macht man sich oft gar nicht mehr klar, dass die Physiker seinerzeit eigentlich gar nicht auf der Suche nach einer

* Gekürzte Fassung eines Vortrages vor der Klasse Natur- und Technikwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 11. Juni 2015.

praktisch nutzbaren Energiequelle auf der Grundlage von Atomkernumwandlungen waren.

Zunächst ein stichwortartiger Überblick zur Vorgeschichte. Sie begann 1896 mit der Entdeckung der Radioaktivität durch Antoine-Henri Becquerel in Paris – kurz nach der Entdeckung der X-Strahlen durch Wilhelm Conrad Röntgen in Würzburg – als er die Phosphoreszenz von Uransalzen näher untersuchte. Die Radioaktivität entsprach keiner bekannten erregenden Ursache und stellte deshalb „eine ganz außergewöhnliche physikalische Erscheinung" dar (Curie 1904, S. 5). Zwar stand das Interesse an der Radioaktivität anfangs etwas im Schatten der Röntgenstrahlen, aber nachdem Marie Curie 1897/98 zunächst fand, dass auch Thorium diese Strahlung aussendet und kurz darauf mit Polonium und Radium zwei bisher unbekannte Elemente entdeckte, die diese Eigenschaft ebenfalls zeigten, wuchs das Interesse daran. Der gebürtige Neuseeländer Ernest Rutherford entdeckte 1899 in Montreal, dass die radioaktive Strahlung aus unterschiedlichen Anteilen besteht und arbeitete seit 1900 insbesondere mit Frederick Soddy an einer Theorie der Radioaktivität (vgl. zur Frühgeschichte der Radioaktivität u.a. Kant 1996a, b).

Nachdem Joseph J. Thomson, der Entdecker des Elektrons, bereits 1904 einen Vorschlag für ein Atommodell gemacht hatte, in dem negative Elektronen in einer diffusen Sphäre positiver Ladung verteilt waren wie Rosinen in einem Kuchen, stellte Rutherford (nunmehr in Manchester) 1911 ein erstes brauchbares Atommodell auf, das Niels Bohr zwei Jahre später mit Hilfe quantentheoretischer Überlegungen so weiterentwickeln konnte, dass es nach dem damaligen physikalischen Verständnis auch halbwegs funktionierte. In diesem Modell gab es einen Atomkern und um ihn herum bewegten sich Elektronen auf kreisförmigen bzw. ellipsenförmigen Bahnen ähnlich den Planetenbahnen. Über eine mögliche Strukturierung des Atomkerns hatte man noch keine plausiblen Vorstellungen.

Schließlich führte Rutherford 1919 die erste künstliche Atomumwandlung herbei, indem er Stickstoffatome mit α-Teilchen beschoss und dabei beobachtete, dass der Stickstoff in Sauerstoff umgewandelt wurde, wobei ein Wasserstoffkern freigesetzt wurde; für diesen positiv geladenen Wasserstoffkern führte er 1920 den Begriff Proton ein. Führten die bisher bekannten natürlichen Kernumwandlungen durch α- und β-Zerfall zu Elementen, bei denen das Atomgewicht abnahm oder gleich blieb, so war nunmehr eine Kernumwandlung realisiert, bei der eine Zunahme des Atomgewichts auftrat (d.h. es entstand ein Element, das höher im Periodensystem stand als das Ausgangselement).[1] Für die Kernumwandlungs-Experimente wurde es

1 1925 konnte der Rutherford-Schüler Patrick S. Blackett diesen Vorgang auch mit Hilfe einer Wilson'schen Nebelkammer visualisieren und damit experimentell verifizieren.

nun notwendig, hochenergetische Elementarteilchen, insbesondere Protonen und Elektronen, zu verwenden (Rutherford hatte für seine Experimente noch natürliche α-Strahler benutzt), und so regte Rutherford die Entwicklung von elektrischen Beschleunigungsanlagen an, was dann Anfang der 1930er Jahre gelang.[2]

Wissenschaftlich ergaben sich auf dem Gebiet der Radioaktivität um das Jahr 1932 – man spricht auch vom „annus mirabilis der Kernphysik" – einschneidende Veränderungen: zahlreiche Entdeckungen (u.a. die Elementarteilchen Neutron und Positron) und technische Entwicklungen (u.a. Zyklotron) führten dazu, dass sich aus diesem Forschungsgebiet die Kernphysik heraus entwickelte, die viele neue und interessante Forschungsfragen aufwarf. Insbesondere die Entdeckung des Neutrons hatte zu einer neuen Vorstellung vom Atomkern geführt; Werner Heisenberg in Leipzig und Dmitrij Ivanenko in Moskau hatten unabhängig voneinander ein Proton-Neutron-Konzept des Atomkerns entwickelt und ebenfalls noch 1932 publiziert.

Wie das bisher Dargestellte zeigt, ging es bei den radioaktiven Forschungen der ersten Dezennien vorwiegend um die Suche nach den Bausteinen der Materie – also im wahrsten Sinne des Goetheschen Faust-Anspruches „zu erkennen, was die Welt im Innersten zusammenhält". (Goethe, Faust I, Zeile 382–383). Dabei kamen auch die energetischen Beziehungen, soweit sie für den Zusammenhalt der verschiedenen Bausteine von Bedeutung sind, in Diskussion. Man erkannte, dass bezogen auf die beteiligten Stoffmengen enorme Energiemengen umgesetzt werden, mehrere Größenordnungen über den Reaktionswärmen chemischer Reaktionen. Aber es ging zunächst nicht vordergründig um die Gewinnung von Energie aus den Atomreaktionen.

Der Begriff „Atomenergie" geht auf die verdienstvollen Gymnasiallehrer Julius Elster und Hans Geitel zurück. In einem Vortrag am 19. Januar 1899 vor dem Verein für Naturwissenschaften in Braunschweig unter dem Titel „Bemühungen, die Energiequelle der Becquerelstrahlen zu finden" schlussfolgerten sie:

> „[...] man wird vielmehr aus dem Atom des betreffenden Elementes selbst die Energiequelle ableiten müssen. Der Gedanke liegt nicht fern, dass das Atom eines radioactiven Elementes [...] unter Energieabgabe in einen stabilen Zustand übergeht." (Elster/Geitel 1899, S. 88; vgl. auch Fricke/Rudolph 1992, S. 116)

---

2 Da dieser Einführungsteil im Wesentlichen Lehrbuchwissen zusammenfasst, ist er hier nicht detailliert quellenmäßig belegt. Hingewiesen sei aber auf einen sehr lesenswerten Vortrag von 1946, der dieses Wissen aus persönlicher Sicht anregend zusammenfasst: Szilard, Leo: Creative Intelligenceand Society: The Case of Atomic Research, The Background in Fundamental Science.

Wie weitblickend diese Erkenntnis war, wird klar, wenn man bedenkt, dass sich zu dieser Zeit die Vorstellung von einer atomaren Struktur der Materie überhaupt erst durchzusetzen begann. Auch gab es erste Überlegungen zur Nutzung der Kernenergie schon relativ frühzeitig, doch wurden sie von der Mehrheit der Forschergemeinschaft nicht wirklich ernst genommen.

Der Rutherford-Schüler Frederick Soddy hielt im Jahre 1908 eine öffentliche Reihe von Experimentalvorlesungen, die unter dem Titel „Die Natur des Radiums" erschien (vgl. Soddy, 1909: The interpretation of radium; Soddy 2002: Die Natur des Radiums).

Darin deutete er abschließend in vager Form an, dass das Radium bzw. die Radioaktivität in Zukunft dazu beitragen könnte, die Urquellen der Energie zu erkennen und zu beherrschen – Radium als unerschöpfliche Energiequelle. Viele grundsätzliche Vorstellungen in diesem Buch sind durchaus richtig, auch wenn die Atommodelle noch sehr dürftig waren – Bohrs Atommodell kam erst 1913 – und man von der Struktur der Atomkerne noch keine Ahnung hatte.

Hinzuweisen ist an dieser Stelle auch auf Albert Einstein und seine 1905 formulierte Beziehung zwischen Masse und Energie im Rahmen seiner Speziellen Relativitätstheorie. Er leitete diese Beziehung für die elektromagnetische Strahlung her, schlussfolgerte aber, dass sie auch für alle anderen Formen von Energieumsätzen gelten müsse. Allerdings spielte diese Beziehung in den ersten Überlegungen zur Atomenergie noch keine Rolle. Erst in den 1920er Jahren gewann diese Beziehung in atomphysikalischen Überlegungen Relevanz (Massendefekt) und konnte erst 1932 experimentell bestätigt werden.

Die Darstellung Soddys regte den bekannten britischen utopischen Schriftsteller H. G. Wells zu seinem – zumindest im deutschen Sprachraum weniger bekannten – Roman „The World Set Free" an, der 1914 erschien (in deutsch erst 1985). Das Buch beginnt mit der Feststellung: „Die Geschichte der Menschheit ist die Geschichte der zunehmenden Beherrschung der Umwelt" (Wells 1985, S. 7). Und wenige Seiten später heißt es: „Die in Kohle und Dampf schlummernde Energie wartete lange auf ihre so naheliegende Entdeckung, bevor sie das Leben zu beeinflussen begann" (ebd. S. 18). Wells verstand Menschheitsgeschichte hier als Energiegeschichte. Im Weiteren lässt er Soddy[3] im Roman sagen:

> „Radium ist ein Element, das zerfällt und sich spaltet. [...] Und wir wissen jetzt, dass das Atom, das wir einst für fest und undurchdringlich [...] hielten, in Wirklichkeit ungeheure Energie speichert. [...]"

3 Soddy entspricht die Romanfigur *Rufus*.

Wells lässt seinen Vortragenden eine Flasche mit Uranoxyd zeigen und fährt fort:

> „Und in dieser Flasche [...] schlummert fast ebenso viel Energie, wie wir durch Verbrennung von hundertsechzig Tonnen Kohle erhalten. [...] Aber bisher weiß kein Mensch [...] wie dieses kleine Quantum Materie dazu gebracht werden kann, seine Energie rascher freizugeben. [...]“ (Ebd. S. 29f.)

Der Roman beschäftigt sich hauptsächlich mit den Konsequenzen des Zugriffs auf die neue Atomenergie, sowohl in ihrer zivilen, wie in ihrer militärischen Nutzung als Atombomben. Die entscheidende Entdeckung dafür macht in Wells' Buch ein Chemiker im Jahre 1935![4]

Francis W. Astonwar der nächste bedeutende Wissenschaftler, der die Möglichkeit einer Nutzung der Atomenergie ernst nahm. Er postulierte bereits 1919 die extrem energiereiche Fusion von Wasserstoff zu Helium. Seine Nobelpreisrede schloss er 1922 mit dem Hinweis, dass die Verschmelzung von Wasserstoffatomen die Energiequelle für die Sonne sein könnte, und bemerkte abschließend:

> „Sollten zukünftige Forscher Mittel finden, wie man die Atomenergie nutzen kann, wird die Menschheit über Energiemengen jenseits aller wissenschaftlichen Fiktion verfügen; aber man muß immer das Restrisiko in Betracht ziehen, dass die einmal freigesetzte Energie vollständig unkontrollierbar sein könnte [...].“ (Aston 1922, S. 20)

Doch die Realität sah noch gänzlich anders aus. Rutherford hatte zwar 1919, wie erwähnt, die erste Kernumwandlung nachweisen können, doch war der Prozess weit davon entfernt, Energie freizusetzen. Im Gegenteil war die freiwerdende Energie in diesem Prozess sogar kleiner als die benötigte Energie des Alphateilchens.

Und so ist es nicht verwunderlich, dass Rutherford in einem Vortrag auf der Tagung der British Association im Oktober 1933 sagte:

> „These transformations of the atom are of extraordinary interest to scientists but we cannot control atomic energy to an extent which would be of any value commercially, and I believe we are not likely ever to be able to do so. A lot of nonsense has been talked about transmutation. Our interest in the matter is purely scientific, and the experiments which are being carried out will help us to a better understanding of the structure of matter.“ (Zit. nach Eve 1939, S. 374)

---

4 Die englische Ausgabe enthält die Widmung – in der deutschen Fassung ist sie leider entfallen –: „To Frederick Soddy's ‚Interpretation of Radium'. This Story, which owes long passages to the eleventh chapter of that book, acknowledges and inscribes itself“.

Die Berichterstattung machte daraus das berühmte „Moonshine“-Zitat: so hieß es in der *Nature*, Rutherford habe gesagt, jeder, der in Atomumwandlungen eine Energiequelle sehe, rede „moonshine“ (zit. nach Szilard [Wikipedia]; auch Jenkin 2011).

Auch andere bedeutende Wissenschaftler wie Einstein oder Bohr waren dieser Meinung. Hier sei nur noch der bedeutende kroatisch-amerikanische Erfinder Nikola Tesla erwähnt, bestimmt jemand, der ungewöhnlichen Ideen aufgeschlossen gegenüberstand, dem für 1931 ebenfalls die Aussage zugeschrieben wird, dass die Idee der Atomenergie illusionär sei und dass sie sich weder zivil noch militärisch nutzen lasse (zit. nach http://www.nur-zitate.com/autor/Nikola_Tesla; auch Cheney 2005, S. 258f.).

Und Pjotr L. Kapiza war sogar noch Anfang 1940 – als die Kernenergie bereits Realität geworden war – davon überzeugt, dass eine Nutzung der Kernenergie nicht zu erwarten sei und berief sich dabei auf Rutherford. Einschränkend bemerkte er, vielleicht werde noch etwas entdeckt, aber das sei unwahrscheinlich (vgl. Kapiza 1940).

Doch ein junger Physiker, der Ungar Leo Szilard, der 1921 aus Ungarn nach Deutschland emigriert war und dieses Land nun bei Machtübernahme der Nazis in Richtung England verließ und gerade H. G. Wells’ Roman gelesen hatte, las über diese Äußerung Rutherfords in der *Times* und fand die Sache gar nicht abwegig. Szilard entwickelte daraufhin die Idee der atomaren Kettenreaktion (die Wells in seiner Fiktion noch nicht haben konnte) (vgl. Szilard 1972, S. 183) und ließ sie sich ein Jahr später sogar in einem Geheimpatent der britischen Marine patentieren. Doch welche Elemente für einen solchen Prozess geeignet sein könnten, konnte auch Szilard noch nicht angeben.

Soviel zu den Visionen oder Fiktionen der Atomenergie, die es in den ersten Dezennien des 20. Jahrhunderts durchaus gab (vgl. auch Strub 2005). Aber, wie gesagt, die meisten „ernst zu nehmenden“ Wissenschaftler glaubten eigentlich nicht daran und sie sahen auch keinen Weg, wie man das prüfen könnte. – In der Science-fiction-Literatur allerdings wurde diese Möglichkeit der Energiegewinnung durchaus weiterhin in Betracht gezogen, wenn auch meist nicht so tiefgründig wie bei Wells.[5]

Die neuesten Ergebnisse der Kernforschung regten auch einen jungen deutschen Physiker an. Carl Friedrich von Weizsäcker hatte an den damaligen physikalischen Zentren Deutschlands studiert: Berlin, Göttingen und

5 Diese Aspekte können hier nicht vertieft werden; verwiesen sei lediglich aus der deutschsprachigen Literatur beispielsweise auf Hans Dominik und seinen Roman „Der Brand der Cheopspyramide“ (1925/26).

Leipzig. Weizsäcker promovierte im Sommer 1933 mit einer kernphysikalischen Arbeit in Leipzig, wo Heisenberg seit 1927 Physikordinarius war. 1936 habilitierte er sich dort mit einer Arbeit über Kernkräfte. Anschließend ging Weizsäcker nach Berlin an das neugegründete Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik, das unter der Leitung des ebenfalls zuvor in Leipzig wirkenden niederländischen Physikers Peter Debye stand. Da sich das KWI für Physik noch im Aufbau befand und erst im Frühjahr 1937 seine Arbeit aufnahm, nutzte Weizsäcker die Gelegenheit und ging im Herbst 1936 für ein Vierteljahr an das Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie, wo er den ihm von Kopenhagener Tagungen im Bohr-Institut bekannten Max Delbrück vertreten sollte (vgl. u.a. Kant 2002). Delbrück war damals sogenannter „Haustheoretiker" bei Lise Meitner und Otto Hahn, interessierte sich aber bereits mehr für die Biochemie. – Im Herbst 1936 erschien Weizsäckers Monographie zur Kernphysik „Die Atomkerne – Grundlagen und Anwendungen ihrer Theorie", die die neuesten Erkenntnisse der letzten Jahre zu bündeln versuchte.

Delbrück schrieb in seiner Rezension dieses Buches, dass die Erforschung der Atomkerne derzeit das beliebteste Arbeitsfeld der Physiker sei und konstatierte, dass das Buch Weizsäckers „[...] die erste theoretische Darstellung des Gegenstandes" sei und „[...] in klarer, verständlicher Sprache eine knappe Zusammenfassung unserer jetzigen Kenntnisse von den Atomkernen und aller der theoretischen Gesichtspunkte, die sich bei ihrer Analyse bewährt haben [...]" gebe (Delbrück 1937, S. 388).

Bemerkenswert für unsere Betrachtungen hier ist die Abbildung auf Seite 51, denn sie zeigt die Größe der Packungsanteile E / N+Z in Abhängigkeit von der Teilchenzahl (siehe Abb. 1).[6]

Aus der Kurve folgt, dass im Gebiet der leichten Kerne Nutzenergie durch Kernverschmelzung (Kernfusion) gewonnen werden kann, im Gebiet der schweren Kerne dagegen durch Kernspaltung (in zwei mittelschwere Kerne). Doch kamen die Physiker zu dieser Zeit nicht darauf, diese Möglichkeiten ernsthaft zu prüfen, weil andere Überzeugungen dem entgegen standen, u.a. die Grundaussage, dass Kernumwandlungen nur bei solchen Elementen vollzogen werden können, die im Periodensystem der Elemente dicht beieinander liegen.[7]

---

6 Weizsäcker bezog sich in der Ordinate auf den Packungsanteil, das ist der Quotient aus Massendefekt und Nukleonenzahl. Er ist ein Maß für die relative Stabilität der Atomkerne (N = Zahl der Neutronen, Z = Zahl der Protonen; N + Z = Nukleonenzahl).

7 Anders gesagt, deren Ordnungszahlen – gleich Zahl der Protonen im Kern – sich nur um „1" unterscheiden.

12. Quantitative Fassung des Tröpfchenmodells 51

Um durch (12.7) den Verlauf der Energiefläche möglichst gut darzustellen, fordert man etwa, daß E für drei Kerne ($^{16}_{8}O$, $^{100}_{42}Mo$, $^{200}_{80}Hg$ den empirischen Wert haben solle, und außerdem, daß $\left(\frac{\partial E}{\partial (Z-N)}\right)_{Z+N}$, d. h. die beim β-Zerfall freiwerdende Energie an zwei Stellen (Mo und Hg) für die empirisch gegebene Stelle der Talsohle verschwinden solle. Es ergeben sich die Parameterwerte

$$\alpha = 2{,}886, \quad \beta = 16{,}02, \quad \gamma = 0{,}733, \quad \delta = 1{,}499, \quad r_0 = 0{,}51. \qquad (12.11)$$

Den Vergleich der aus (12.7) mit (12.11) folgenden Packungsanteile mit den beobachteten zeigt Fig. 9. In Fig. 10 ist ferner der aus dieser Formel folgende Verlauf der Talsohle eingetragen. Der mittlere Verlauf scheint befriedigend dargestellt, während natürlich die Schwankungen ohne Einführung einer Schalenvorstellung nicht wiedergegeben werden können. Für die Zerfallsenergien der α-Strahler ergeben sich Werte zwischen 1 und 4 Mill. Volt, also erheblich weniger als die beobachteten Werte

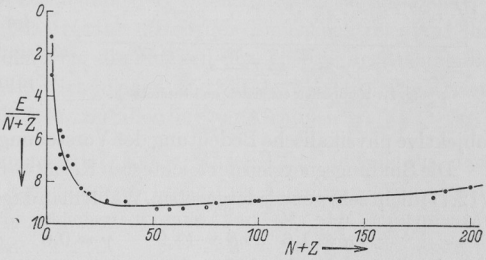

Fig. 9. Packungsanteile als Funktion der Teilchenzahl (Punkte experimentell, Kurve theoretisch).

Abb. 1: Größe der Packungsanteile in Abhängigkeit von der Teilchenzahl

Aus: Weizsäcker 1937, S. 51

Weizsäcker war seit frühester Jugend stark an Astronomie interessiert. Da die gängigen Atommodelle Parallelen zu den Planetensystemen aufwiesen, suchte er da auch nach Zusammenhängen. Und da die Kernphysik nun „in“ war, kam ihm die Überlegung, dass die Energiequelle der Sterne vielleicht eine Kernreaktion sein könnte (Aston hatte das ja bereits postuliert). Die Frage nach der Energiequelle der Sterne war damals unter Astrophysikern ebenfalls „in“.[8] Weizsäcker publizierte seine Überlegungen in der *Physikalischen Zeitschrift* und trug sie 1938 auch vor der Berliner Physikalischen Gesellschaft vor (Weizsäcker 1937, 1938).

8 Zu der Zeit hatte Weizsäcker auch gerade das Buch des bedeutenden britischen Astrophysikers Sir Arthur Eddington (1882–1944) über den *inneren Aufbau der Sterne* gelesen (1926 erschienen), und Eddington hatte eine ähnliche Vermutung ausgesprochen.

Die Astrophysiker gingen davon aus, dass die Sonne vorwiegend aus Wasserstoff und Helium besteht. Der Energieproduktionsmechanismus musste sich also vorwiegend auf die Kerne von Wasserstoff und Helium stützen. Weizsäcker schlug vor, dass die Grundreaktion die Fusion von zwei Wasserstoffprotonen – also zwei Wasserstoffkernen – sein könnte:

$$H^1 + H^1 \rightarrow D^2 + e^+ + \nu$$

Dabei entsteht zwar nur wenig Energie, aber das Deuteron setzt eine Art Kettenreaktion in Gang, denn das schwere Wasserstoffisotop kann als Neutronenquelle dienen:

$$_1D^2 + {}_1D^2 \rightarrow {}_2He^3 + {}_0n^1 + \varepsilon$$

Schlussendlich entsteht aus Wasserstoff Helium unter Freisetzung großer Energiemengen.[9] Weizsäcker gab noch verschiedene weitere mögliche Reaktionen an. Doch hat er nicht ausgerechnet, wie viel Energie dabei entsteht, und ob das Resultat mit der Energieabgabe der Sonne übereinstimmt.[10]

Ein anderer Wissenschaftler, der in diesem Zusammenhang zu nennen ist, ist Hans Bethe. Er hatte in Frankfurt am Main und bei Arnold Sommerfeld in München Physik studiert. Im Wintersemester 1932/33 war er Assistenzprofessor für theoretische Physik in Tübingen, doch verlor er diese Stelle nach der Machtergreifung durch die Nationalsozialisten, da seine Mutter jüdischer Abstammung war. 1935 bekam er eine Stelle an der Cornell-University in den USA.[11]

Auch Bethe kam eher zufällig zur Beschäftigung mit Problemen der Kernfusion. Der Ungar Edward Teller und der Russe George Gamow, der eine Schüler von Heisenberg, der andere von Bohr und Rutherford und beide ebenfalls Emigranten, organisierten in Washington eine jährliche Tagung zur theoretischen Physik, an der auch Bethe teilnahm.[12] Ziel der 4. Konferenz im März 1938 war es, möglichst viele Physiker mit den aktuellen astrophysikalischen Problemen vertraut zu machen, damit sie vielleicht etwas dazu beitragen könnten (vgl. dazu u.a. Bethe 1989, insbes. S. 13).

Zunächst hatte Bethe mit Charles Critchfield, einem Schüler von Gamow und Teller, unter Bezug auf Weizsäckers Artikel von 1937 die einfache Fu-

---

9 H_1 = Wasserstoffkern (= Proton), D = Deuteron (schwerer Wasserstoff), $_2He^3$ = Heliumisotop. e^+ = Positron, ν = Neutrino., $_0n^1$ = Neutron, ε = Energiebetrag.

10 Auf weitere Details kann hier nicht eingegangen werden.

11 Bethe erhielt dort 1937 eine Professur, wurde 1941 US-Bürger und war am Manhattan-Projekt beteiligt, u.a. als Leiter der Abteilung für theoretische Physik.

12 Zufällig waren Bethe und Teller bei der Überfahrt nach USA auf dem gleichen Schiff gewesen (vgl. Hargittai 2010, S. 103).

sionsreaktion zwischen zwei Wasserstoffkernen durchgerechnet (vgl. Bethe/ Critchfield 1938). Das Ergebnis stimmte mit dem von den Astrophysikern angegebenen Wert für die Energieproduktion der Sonne recht gut überein, doch bei größeren Sternen kam man mit dieser einfachen Reaktion nicht zurecht. Bethe rechnete sich dann systematisch durch das Periodensystem und suchte Kerne, die mit Wasserstoffkernen reagieren konnten. Schließlich wurde er beim Kohlenstoff fündig. Dabei dient der Kohlenstoff lediglich als Katalysator, indem er zuerst mit einem Wasserstoffkern zu einem Stickstoffisotop verschmilzt, das dann wieder in ein anderes Kohlenstoffisotop zerfällt, welches im nächsten Schritt wiederum mit einem Wasserstoffkern verschmilzt und so weiter. Gesamtergebnis eines solchen Kohlenstoff-Stickstoffzyklus ist schließlich die Verschmelzung von vier Wasserstoffkernen zu einem Heliumkern (α-Teilchen), dessen Masse um etwa 1% geringer ist als die Masse der vier Wasserstoffkerne (Protonen). Dieser Massendefekt wird nach der Einstein'schen Gleichung $E = mc^2$ fast vollständig in Energie umgewandelt. Man spricht bei diesem Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus heute auch vom Bethe-Weizsäcker Zyklus. Er läuft erst bei Temperaturen über 14 Millionen Kelvin ab.

Auf weitere mögliche Fusionsprozesse sei hier nicht eingegangen. Die hohen Temperaturen machen deutlich, dass es völlig illusorisch war, zur damaligen Zeit an eine praktische Nutzung zu denken. Deshalb haben die Physiker die Sache auch nicht weiter verfolgt, denn die Frage der Astrophysiker war erst einmal prinzipiell gelöst.

Bethe erhielt für seine Arbeit 1967 den Nobelpreis für Physik; Weizsäcker ging leer aus, weil er die Sache im Wesentlichen nur qualitativ betrachtet hatte, und da beide unabhängig voneinander gearbeitet hatten, hatte Bethe also die vollständigere Leistung erbracht. Das sah auch Weizsäcker selbst so (vgl. dazu Schaaf 2014).

Die Entdeckungen aus dem *annus mirabilis* 1932 waren dem jungen italienischen Physiker Enrico Fermi Anstoß gewesen, seiner gerade konstituierten Forschungsgruppe in Rom eine interessante Aufgabe zu stellen. Fermi hatte schnell erkannt, dass sich das von Chadwick entdeckte Neutron wegen seiner neutralen Ladung wesentlich besser zur Herbeiführung von Atomumwandlungen eignen müsste als das bislang für solche Zwecke benutzte positiv geladene α–Teilchen. Der letzte Anstoß für seine konkreten Untersuchungen ergab sich durch die Entdeckung der künstlichen Radioaktivität Anfang 1934 durch Irène und Frédéric Joliot-Curie (vgl. dazu u.a. De Gregorio 2005). In den folgenden Jahren zeigte Fermis Gruppe, dass sich fast alle Elemente durch Beschießen mit Neutronen in radioaktive Elemente um-

wandeln lassen. Dabei lag folgende Modellvorstellung zu Grunde: wenn ein energiearmes – also „langsames“ – Neutron auf einen Atomkern trifft, kann es in diesen eingebaut werden; in dem neu entstandenen Kern wandelt es sich dann in ein Proton um, wobei ein β-Teilchen emittiert wird, und die Ordnungszahl des Elementes steigt um eine Einheit (vgl. Kant 2007).

Der beobachtete Umwandlungsmechanismus führte u.a. zu der Annahme, dass beim Beschießen des Urans, des schwersten natürlich vorkommenden Elementes – und damit des im Periodischen System der natürlichen Elemente mit der Ordnungszahl 92 an letzter Stelle stehenden – sogenannte Transurane entstehen müssten, also „künstlich hergestellte“ Elemente, die im Periodensystem auf das Uran folgen sollten.

Erste Reaktionen auf diese Fermischen Arbeiten machten u.a. darauf aufmerksam, dass es nicht ausgeschlossen sei, dass statt des Elementes 93 – wie von Fermi behauptet – das Element 91 entstanden sein könnte. Element 91 – Protactinium – war nun aber eine Domäne der Berliner Forscher Otto Hahn und Lise Meitner, denn sie waren 1918 dessen Entdecker gewesen. Also wandten sie sich Ende 1934 ebenfalls diesen Forschungen zu.

Nicht zuletzt die politischen Umstände zwangen Hahn und Meitner ab 1934 wieder zu einer engeren direkten Zusammenarbeit. Meitner überzeugte Hahn davon, eine gemeinsame Überprüfung der Fermischen Ergebnisse vorzunehmen; hinzugezogen wurde für die notwendigen chemischen Analysen Fritz Straßmann (1902–1980), Hahns Assistent seit 1929. Die Behauptung der möglichen Entstehung von Protactinium war bald widerlegt, aber die Frage blieb, was bei der Neutronenbestrahlung wirklich entsteht (vgl. Kant 2012).

Zwischen 1934 und 1938 erschienen von Hahn, Meitner und Straßmann 15 Publikationen über Fragen der künstlichen Umwandlung des Urans durch Neutronen, wobei auf der Grundlage der Fermischen Hypothese Transurane als Umwandlungsprodukte erwartet wurden. 1937 schienen die drei eine Lösung gefunden zu haben und stellten drei mögliche Umwandlungsreihen des Urans in zwei Arbeiten – einer chemisch und einer physikalisch orientierten – vor (vgl. Hahn et al. 1937; Meitner et al. 1937). Die bei der Bestrahlung des Urans – und anderer Elemente – mit Neutronen entstehenden Reaktionsprodukte musste man zunächst chemisch abtrennen, um dann auf physikalischem Wege ihre Radioaktivität zu bestimmen. Da es sich um kleinste – nahezu „unwägbare“ Mengen – handelte, waren besonders diffizile chemische Analysemethoden notwendig, die aber gerade Hahn mit seinen Mitarbeitern hervorragend beherrschte.

Bei den Kernumwandlungen entstanden auch radioaktive Produkte, die sich nur mit Barium separieren ließen und in denen deshalb Radiumisotope

vermutet wurden;[13] dieser Teil des Forschungsprogramms warf allerdings mehr Fragen auf als Antworten gefunden werden konnten. Die Zuordnungsschwierigkeiten hatten ihre Ursache nicht zuletzt darin, dass damals die sogenannte Aktinidenreihe im Periodensystem der Elemente noch nicht bekannt war und deshalb die Einordnung der letzten drei natürlichen Elemente etwas anders aussah als heute.[14]

Dass tatsächlich Barium entstanden sein könnte, wie einige Analyseergebnisse nahelegten, lag damals außerhalb jeder sinnvoll annehmbaren Vermutung. Zwar hatte die Chemikerin Ida Noddack bereits 1934 Zweifel an Fermis Transuran-Ergebnissen angemeldet und eben die Vermutung geäußert, dass es sich eventuell auch um Spaltprodukte des Urans handeln könne, doch hatte sie damals keine Möglichkeit, dies experimentell zu überprüfen. Und die Physiker schlossen aus den aufgestellten Theorien über den Kern, dass zwar Kernumwandlungen in benachbarte Elemente möglich seien, nicht aber ein „Zerplatzen" des Kernes.[15]

Bald nach der Veröffentlichung der Hahn-Meitnerschen Zerfallsreihen kam eine erstaunliche Nachricht aus Paris. Irène Joliot-Curie und ihre Mitarbeiter hatten mit einer etwas anderen Analysemethode, als sie in Berlin üblich war, ein Reaktionsprodukt gefunden, das die Berliner wohl bisher übersehen hatten; doch in der Deutung dieses Produktes ergingen sich die Pariser in „wilden Spekulationen", die Meitner theoretisch unhaltbar fand und bald verlor sie jegliches Interesse an dem von ihr „Curiosum" getauften Reaktionsprodukt. Mitte 1938 musste sie dann infolge der deutschen Annexion Österreichs Deutschland verlassen und fand in Schweden Asyl und bescheidene Arbeitsmöglichkeiten.

Im Herbst 1938 kam eine neue überraschende Veröffentlichung aus Paris über mögliche neue Reaktionsprodukte bei den Transuranuntersuchungen, und Hahn und Straßmann entschlossen sich nach anfänglichem Widerstreben, die Versuchsreihen erneut aufzunehmen. Ende Oktober 1938 schrieb Hahn an Meitner, dass sie nun diesen Pariser „Körper" tatsächlich gefunden hätten. Meitner schrieb sofort zurück, stellte Fragen und gab Hinweise. Mehrere Briefe gingen so hin und her.

---

13 Barium ist ein sogenanntes Homolog des Radiums, d.h. es steht im Periodensystem in der 2. Hauptgruppe unterhalb des Radiums.

14 Uran wurde damals in die 6. Nebengruppe der 7. Periode eingeordnet, heute findet es sich an 3. Stelle in der Aktinidenreihe.

15 Als wie abwegig Ida Noddacks Publikation seinerzeit von den Physikern aufgenommen worden war, zeigt eine Erinnerung Emilio Segres aus der Fermi-Gruppe (Segrè 1993, S. 91). – Auch Lise Meitner sah die Überlegungen Noddacks sehr kritisch (vgl. Krafft 1981, S. 318).

Am Montag, dem 19. Dezember 1938 schrieb Hahn an Meitner die folgenden berühmten Zeilen:

> „[...] Es ist jetzt gleich 11 Uhr abends; [...] Es ist nämlich etwas bei den ‚Radium-Isotopen', was so merkwürdig ist, dass wir es vorerst nur Dir sagen. [...] immer mehr kommen wir zu dem schrecklichen Schluss: Unsere Ra-Isotope verhalten sich nicht wie Ra, sondern wie Ba. [...] Vielleicht kannst Du irgendeine phantastische Erklärung vorschlagen. Wir wissen dabei selbst, dass es [das Uran – H. K.] eigentlich nicht in Ba zerplatzen kann." (Zit. nach Krafft 1981, S. 263f.)

Das war die berühmte Entdeckung der Urankernspaltung.

Hahn war sich der Bedeutung dieser Entdeckung – wenngleich sicher noch nicht in allen ihren Konsequenzen – durchaus bewusst, ebenso der Wettbewerbssituation, in der er zumindest mit der Pariser Forschergruppe stand. So gab er noch am 23. Dezember 1938 das Manuskript des entsprechenden Artikels an die Zeitschrift *Die Naturwissenschaften* und erreichte mit seinen guten Beziehungen zum Redakteur, dass dieser Artikel bereits im ersten Heft von 1939 gedruckt wurde, das am Freitag, dem 6. Januar, erschien. Das Manuskript hatte Hahn auch an Meitner geschickt und es erreichte sie am 30. Dezember 1938.

Gemeinsam mit ihrem zu Besuch weilenden Neffen Otto Robert Frisch, der – ebenfalls Emigrant – an Bohrs Institut in Kopenhagen arbeitete, gelang Meitner dann in jenen Tagen um die Jahreswende 1938/39 unter Berücksichtigung des bereits seit mehreren Jahren bekannten Tröpfchenmodells[16] sowie der daraus drei Jahre zuvor von Bohr entwickelten Theorie über den sogenannten „Compound"-Kern die von Hahn erhoffte „phantastische Erklärung" – mit anderen Worten: die Kernspaltung war durchaus im Rahmen der bereits vorliegenden physikalischen Theorien erklärbar! Damit fand die gemeinsame Arbeit der dreißiger Jahre doch noch einen krönenden gemeinsamen Abschluss – Hahn und Straßmann lieferten die unumstößlichen chemisch-experimentellen Ergebnisse, Meitner und Frisch die physikalisch-theoretische Erklärung. Allerdings hatten sie etwas anderes gefunden, als sie ursprünglich suchten!

Die entsprechende Arbeit von Meitner und Frisch ging am 16. Januar 1939 an die englische Zeitschrift *Nature* (vgl. Meitner/Frisch 1939, S. 239f.).[17]

---

16 Zunächst von Gamow eingeführt, von anderen weiterentwickelt. Auch Weizsäckers Ausführungen in seinem Buch von 1936 beruhen darauf.

17 Frisch hatte nach seiner Rückkehr nach Kopenhagen die Kernspaltung nun auch physikalisch experimentell nachweisen können: wenn man von der Tatsache der Spaltung ausgeht

Nachdem der Aufsatz von Hahn und Straßmann erschienen war, hatte auch Weizsäcker am KWI für Physik schon bald die richtige theoretische Erklärung gefunden, ebenso wie Siegfried Flügge, seit 1937 als Nachfolger von Delbrück der neue „Haustheoretiker" am KWI für Chemie, gemeinsam mit Meitners langjährigem Assistenten Gottfried von Droste, deren entsprechender Aufsatz am 22. Januar eingereicht wurde (erschienen Anfang März), also nur eine Woche nach Meitner/Frisch.[18] Da Hahn am Institut nichts von der Entdeckung verraten hatte, um Meitner die Chance zu geben, die physikalische Erklärung zu finden und dadurch doch noch „das alte Team" bei dieser Entdeckung irgendwie zusammenzuführen, war man in Berlin durchaus – und verständlicherweise – etwas „sauer" über diese „Geheimhaltung".[19]

Niels Bohr startete Anfang Januar 1939 von Kopenhagen zu einem mehrmonatigen Forschungsaufenthalt nach Princeton/USA. Wenige Tage vor der Abreise kam Frisch aus Schweden zurück, informierte Bohr über die neuesten Erkenntnisse (vgl. Frisch 1979, S. 116; Röseberg 1985, S. 215). Am 16. Januar 1939 kam Bohr in New York an, d.h. noch bevor das besagte Heft der *Naturwissenschaften* dort eintraf. Bohr hatte zwar Frisch versprochen, nichts verlauten zu lassen, bevor die entsprechenden Veröffentlichungen erschienen, aber wie das so ist, teilte er, der sich während der ganzen Überfahrt natürlich mit dieser sensationellen Entdeckung beschäftigt hatte, bereits am Kai dem ihn empfangenden John Archibald Wheeler unter dem Siegel der Verschwiegenheit die Neuigkeit mit, und wie das mit solchen vertraulichen Mitteilungen läuft, so verbreitete sich auch diese wie ein Lauffeuer.[20] So überraschend und unerwartet die Entdeckung gewesen war, nachdem sie bekannt geworden war, war jedem auf dem Gebiet der Atomforschung Täti-

---

und die entsprechenden Berechnungen zu Grunde legt, lässt sich der erwartete freigesetzte Energiebetrag relativ leicht messen. Sein entsprechender Artikel erschien eine Woche nach dem gemeinsamen Aufsatz mit Meitner.

18 In Wien waren es Josef Schintlmeister und Werner Czulius, die im Jan/Febr. entsprechende Überlegungen anstellten und diese am 23. Februar 1939 der Wiener Akademie vorstellten (vgl. Nagel 2003, S. 24f.).

19 So vermerkte Flügge 1949 etwas süffisant: „Als wir Anfang Januar 1939 aus den Weihnachtsferien zurückkehrten, war bereits alles entschieden ..." (Flügge 1949, S. 82–84). – Laut Eintrag in seinem Taschenkalender hatte Hahn am Montag, dem 9.1.1939, mit Weizsäcker, Flügge und anderen über die Entdeckung diskutiert.

20 Die Überlieferungen sind nicht ganz eindeutig, ob Bohr bereits Wheeler informierte und eventuell am gleichen Abend auch Fermi, der ihn ebenfalls am Kai begrüßt hatte; mit Sicherheit jedoch hatte er seinem ihn begleitenden Assistenten Leon Rosenfeld, mit dem er während der Schiffspassage die Sache diskutiert hatte, nicht mitgeteilt, dass noch Stillschweigen gewahrt werden sollte, und Rosenfeld plauderte die Neuigkeit noch am gleichen Abend gegenüber Wheeler sowie im Wissenschaftlerklub in Princeton aus (vgl. Röseberg 1998, S. 219).

gen sofort nicht nur die Bedeutung dieser Entdeckung klar, sondern sie ließ sich experimentell wie theoretisch auch relativ schnell nachvollziehen.

Und so blieb Bohr nichts weiter übrig, als am Rande der diesmal bereits Ende Januar stattfindenden Washingtoner Konferenz zur Theoretischen Physik, auf der es eigentlich um Tieftemperaturphysik ging, darüber offiziell zu berichten.[21] Damit aber blieb die Aufmerksamkeit für die Meitner-Frisch-Veröffentlichung wenige Wochen später gering und insbesondere der Anteil Lise Meitners an diesen Arbeiten wurde demzufolge auch in der wissenschaftlichen Welt zunächst unterschätzt.

Bohr arbeitete in den folgenden Wochen gemeinsam mit Wheeler die Theorie der Kernspaltung weiter aus und ihr grundlegender Artikel erschien am 1. September 1939 in *Physical Review* – ein Datum, das bekanntlich zugleich von grundlegender politisch-historischer Bedeutung ist – Ausbruch des Zweiten Weltkrieges.

Die weltpolitische Situation führte seit dem Frühjahr 1939 dazu, dass die Physiker in aller Welt nicht nur begeistert über die neuen Erkenntnisse waren und fasziniert die Möglichkeit einer fast unbegrenzten Energiegewinnung verfolgten. Sie erkannten auch, dass freigesetzte Atomenergie die Möglichkeit einer unheimlichen Zerstörung in sich barg und damit für eine neue Art von Bombe geeignet war. In dieser neuen Art sahen Wissenschaftler wie Militärs allerdings lediglich eine „übliche“ Bombe mit „nur“ wesentlich größerer Zerstörungskraft – dass es sich dabei um einen absolut neuen Waffentyp handeln sollte, der auch ein neues militärpolitisches Denken erforderlich machen würde, wurde den allermeisten erst nach dem ersten schrecklichen Einsatz über Japan bewusst (vgl. hierzu u.a. Kant 1985).

Otto Hahn erhielt im Herbst 1945 den Chemie-Nobelpreis für 1944 zugesprochen „für seine Entdeckung der Spaltung schwerer Kerne“; überreicht wurde er ihm zur Nobelfeier im Dezember 1946, da er 1945 im britischen Farm Hall mit anderen deutschen Atomforschern als geheimer Kriegsgefangener inhaftiert war. Meitner und Frisch einerseits und Straßmann andererseits gingen leer aus.[22] Doch 1966 erhielten dann Hahn, Meitner und Straß-

---

21 Interessanterweise wird auf der entsprechenden Gedenktafel in der George Washington University zwar auf Bohr's Ausführungen hingewiesen, jedoch werden die Namen Hahn, Straßmann und Meitner darauf nicht erwähnt (vgl. https://physics.columbian.gwu.edu/1939-fifth-washington-conference-theoretical-physics-low-temperature-physics-and-superconductivity).

22 Aber auch Fermi, der 1938 den Nobelpreis für die Forschungen bekommen hatte, die dieser Entdeckung vorausgingen, war ja eigentlich „nur“ der Leiter einer Gruppe gewesen – eines der berühmt-berüchtigten Probleme der Nobelpreis-Zuerkennungen. Außer Frage steht dabei, dass auch Meitner den Nobelpreis verdient hätte – bereits in den 1920er und

mann gemeinsam den inzwischen von der US-Atomenergiekommission gestifteten Enrico-Fermi-Preis für ihre Entdeckung und Deutung der Kernspaltung zuerkannt.

Hahn war sehr unglücklich, als er 1945 vom Atombombeneinsatz erfuhr und hat sich nach dem Kriege aktiv für eine friedliche Nutzung der Kernenergie eingesetzt (ohne allerdings auch hier entsprechende Gefahren zu erkennen);[23] Meitner und Straßmann äußerten sich ebenfalls in diesem Sinne.

Fazit: An der Erforschung der Grundlagen der Kernspaltung wie der Kernfusion hatten in Berlin tätige Wissenschaftler einen hohen Anteil. Dabei waren die Ausgangsfragestellungen bei beiden Prozessen zunächst nicht auf Energiegewinnung im engeren Sinne ausgerichtet, mögliche Folgen demzufolge auch nicht bedacht.

Und hier schließt sich ein Bogen zu einem der Hauptarbeitsgebiete von *Gerhard Banse* –Technikfolgenabschätzung. Max von Laue wird der auf 1941 datierte Satz zugeschrieben: „[...] eine Erfindung, die man nicht machen will, macht man auch nicht." (zit. nach Hoffmann 1993, S. 169). Wohlweislich sprach Laue hier von Erfindung und nicht Entdeckung. Bezüglich der Grundlagenforschung stellt sich die Frage der Folgenabschätzung wesentlich komplizierter und komplexer dar als für angewandte Forschung und für technische Entwicklungen (im vorliegenden Falle also bezüglich der friedlichen *Nutzung* der Atomenergie im Kern- wie auch im Fusionsreaktor oder eben für militärische Zwecke). Doch gerade mit Blick auf das Jahr 1945 stellt Meyer-Abich andererseits unmissverständlich fest:

> „Die Atombombe war ein direktes Resultat der Grundlagenforschung. Also gibt es keine Grundlagenforschung im Sinn eines verantwortungsfreien Raums, sondern wer zur Entdeckung der Kernspaltung beigetragen hat, ist mitverantwortlich für die Toten von Hiroshima und Nagasaki. Otto Hahn und die anderen Beteiligten haben das gewusst und haben unter der Last dieser Verantwortung gelitten." (Meyer-Abich 1988, S. 25f.)

1930er Jahren ist sie mehrfach – zum Teil gemeinsam mit Hahn – vorgeschlagen worden. Ein „offizieller" Hintergrund dieser Nichtzuerkennung liegt in Formalien der Nobelpreisvergabe begründet, inoffiziell spielten einige Querelen in der damaligen schwedischen Wissenschaftspolitik eine Rolle, in die auch Manne Siegbahn involviert war, der Lise Meitner einerseits Zuflucht an seinem Stockholmer Institut gewährt hatte, andererseits aber Forschungsrichtungen präferierte, die nicht mit denen Meitners in Übereinstimmung waren (vgl. hierzu u.a. Kant 2001).

23 Über Hahns Eintreten für die friedliche Nutzung der Atomenergie (vgl. u.a. Kant 2012).

Literatur

Aston, Francis W. (1966): Mass spectra and sotopes. Nobel lecture 1922. In: Nobel Lectures Chemistry 1922–1941. Amsterdam

Atomnoj Proekt SSSR, Bd.1, Teil I. Izd. Nauka, Moskva 1998, S. 93–94

Bethe, Hans A. (1989): Energy on Earth and in the Stars. In: Salam, Abdus; Bethe, Hans A.; Dirac, Paul; Heisenberg, Werner; Wigner, Eugene; Klein, Oscar; Lifshitz, Eugen: From a life of physics, S. 1–18

Bethe, Hans A.; Critchfield, Charles L. (1938): The Formation of Deuterons by Proton Combination. Physical Review 54 (1938) 4, S. 248–254

Cheney, Margaret (2005): Nikola Tesla – Erfinder, Magier, Prophet. Aachen

Curie, Mme. M. (1904): Untersuchungen über die radioaktiven Substanzen. Braunschweig

De Gregorio, Alberto (2005): Neutron physics in the early 1930s. Historical Studies in the Physical and Biological Sciences 35 (2005) 2, S. 293–340

Delbrück, Max (1937): C. F. von Weizsäcker. Die Atomkerne. Physikalische Zeitschrift 38 (1937)

Elster, Julius; Geitel, Hans (1899): Weitere Versuche an Bequerelstrahlen. Annalen der Physik N. F. 69 (1899) 1, S. 83–90 (der ganzen Folge 305. Bd. [Teil 9/1899])

Eve, Arthur S. (1939): Rutherford – Being the life and letters of the Rt. Hon. Lord Rutherford, O.M. Cambridge

Flügge, Siegfried (1949): Zur Entdeckung der Uranspaltung vor zehn Jahren. Zeitschrift für Naturforschung 4a (1949), S. 82–84

Fricke, Rudolph (1992): J. Elster & H. Geitel. Braunschweig

Frisch, Otto Robert (1979): What little I remember. Cambridge

Goethe, Johann Wolfgang: Faust I, Zeile 382–383

Hahn, Otto; Meitner, Lise; Straßmann, Fritz (1937): Über die Transurane und ihr chemisches Verhalten. Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft 70 (1937) S. 1374–1391

Hargittai, Istvan (2010): Judging Edward Teller. New York

Hoffmann, Klaus (1993): Schuld und Verantwortung: Otto Hahn. Konflikte eines Wissenschaftlers. Berlin u.a.O.

Jenkin, John G. (2011): Atomic Energy is „Moonshine“: What did Rutherford Really Mean? Physics in Perspective 13 (2011) 2, S. 128–145

Kant, Horst (1985): J. Robert Oppenheimer. (= Biographien hervorragender Naturwissenschaftler, Techniker und Mediziner, Bd.83). Leipzig

Kant, Horst (1996a): Betrachtungen zur Frühgeschichte der Kernphysik – Vor hundert Jahren wurde die Radioaktivität entdeckt. Physikalische Blätter 52 (1996) 3, S. 233–236

Kant, Horst (1996b): Rutherford und die ersten Dezennien der Erforschung der Radioaktivität. Physik in der Schule 34 (1996)10, S. 366–371

Kant, Horst (2001): „... der Menschheit den größten Nutzen geleistet ...“!? 100 Jahre Nobelpreis, eine kritische Würdigung aus historischer Perspektive. In: Physikalische Blätter 57 (2001) 11, S. 75–79

Kant, Horst (2002): Vom KWI für Chemie zum KWI für Radioaktivität: Die Abteilung(en) Hahn/Meitner am Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie. In: Dahlemer Archivgespräche Heft 8, Berlin 2002, S. 57–92

Kant, Horst (2007): Von den falschen Transuranen zur Kernspaltung – die Atomphysiker Enrico Fermi und Lise Meitner. In: Italien und Europa. Der italienische Beitrag zur europäischen Kultur. Hrsg. von Meier, Franziska; Italien-Zentrum der Universität Innsbruck. Innsbruck, S. 171–186

Kant, Horst (2012a): Die radioaktive Forschung am Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie von den Anfängen bis zum deutschen Uranprojekt. In: Kant, Horst; Reinhardt, Carsten (Hg.): 100 Jahre Kaiser-Wilhelm-/Max-Planck-Institut für Chemie (Otto Hahn-Institut). Facetten seiner Geschichte. (= Veröffentlichungen aus dem Archiv der Max-Planck-Gesellschaft, Bd. 22). Berlin, S. 53–98

Kant, Horst (2012b): Otto Hahn und die Erklärungen von Mainau (1955) und Göttingen (1957). In: Vom atomaren Patt zu einer von Atomwaffen freien Welt. Zum Gedenken an Klaus Fuchs (Abhandlungen der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 32; hrsg. von Flach, Günter; Fuchs-Kittowski, Klaus). Berlin, S. 183–197

Kapiza; Pjotr L. (1940): Interview für die Kinderzeitschrift „Detskaja Literatura“ 1940, Nr. 4, S. 18–23

Krafft, Fritz (1981): Im Schatten der Sensation. Leben und Wirken von Fritz Straßmann. Weinheim u.a.O.

Meitner, Lise; Hahn, Otto; Straßmann, Fritz (1937): Über die Umwandlungsreihen des Urans, die durch Neutronenbestrahlung erzeugt werden. Zeitschrift für Physik 106, 3/4, S. 249–270

Meitner, Lise; Frisch, Otto Robert (1939): Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction. Nature 143 (1939, Febr 11) 3615, S. 239–240

Meyer-Abich, Klaus Michael (1988): Die Idee der Universität im öffentlichen Interesse. In: Eigen, Manfred; Gadamer, Hans-Georg; Habermas, Jürgen; Lepenies, Wolf; Lübbe, Hermann; Meyer-Abich, Klaus Michael (Hg.): Die Idee der Universität: Versuch einer Standortbestimmung. Berlin u.a.O., S. 23–39

Nagel, Günter (20003): Atomversuche in Deutschland. Zella-Mehlis

Röseberg, Ulrich (1985): Niels Bohr. Leben und Werk eines Atomphysikers. Berlin

Schaaf, Michael (2014): Weizsäcker, Bethe und der Nobelpreis. In: Hentschel, Klaus; Hoffmann, Dieter (Hg.) Carl Friedrich Weizsäcker: Physik – Philosophie – Friedensforschung. Stuttgart, S. 145–156

Segrè, Emilio (1993): A Mind always in Motion. The Autobiography of Emilio Segrè. Berkeley u.a.O.

Soddy, Frederick (1909): The interpretation of radium. New York

Soddy, Frederick (2002): Die Natur des Radiums. In: Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Bd. 289. Frankfurt/M.

Strub, Erik (2005): Soddy, Wells und die Atombombe. Physik Journal 4 (2005) 7, S. 47–51

Leo Szilard. Wikipedia-Artikel, Version dtsch. und engl. (retrieved 6.10.2016), aus: The Times, Sept. 12, 1933

Szilard, Leo (1972): Creative Intelligence and Society: The Case of Atomic Research. The Background in Fundamental Science. In: Ders.: The Collected works Vol. 1, Scientific Papers; The MIT Press 1972, S. 178–189

Weizsäcker, Carl Friedrich (1937): Die Atomkerne – Grundlagen und Anwendungen ihrer Theorie. (= Physik und Chemie und ihre Anwendungen in Einzeldarstellungen Bd. 11). Leipzig

Weizsäcker, Carl Friedrich (1937, 1938): Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne. In: Physikalische Zeitschrift 38 (1937) 6 S. 176–191 und 39 (1938) 16, S. 633–646

Wells, Herbert G. (1985): Befreite Welt. Wien u.a.O.

Wheeler, John A. (1998): Geons, Black Holes & Quantum Foam. A Life in Physics. New York u.a.O., Kapitel 1

http://www.nur-zitate.com/autor/Nikola_Tesla (retrieved 6.10.2016) – Sinngemäß in: Tesla, 75, Predicts New Power Source. New York Times vom 5. Juli 1931