

Irrtum und Erkenntnis: Wenn Wiederholen neu ist**

*Martin Quack**

Entdeckungen · Kernspaltung · Nobel-Preise · Uran ·
Wissenschaftsgeschichte

*Der Firma Bayer zum
150. Jubiläum gewidmet*

Motto

Die Römer hatten die Tradition, als Ehrung für die Männer, die Rom in herausragender Weise gedient hatten, noch zu Lebzeiten Säulen auf dem Forum Romanum aufzustellen – gewissermaßen der „Römische Nobel-Preis für Politik“ – aber das geschah nicht für Cato. Als Cato dann von seinen Freunden gefragt wurde: „Warum gibt es keine Säule für Cato auf dem Forum Romanum?“, so war seine Antwort: „Ich ziehe es vor, dass man fragt ‘Warum gibt es keine Säule für Cato auf dem Forum Romanum?’, als dass man fragt, ‘Warum gibt es eine Säule für Cato auf dem Forum Romanum?’“ (zitiert nach Lit. [1])

1. Einleitung: Ein Nobel-Preis für eine irrtümliche Entdeckung

Dieser Essay könnte auch den Titel tragen „Welcher Nobel-Preis für Physik wurde für eine irrtümliche Entdeckung vergeben?“ Damit ist explizit ein Ergebnis gemeint, das sich später als falsch herausstellte. Er handelt von einem der spannendsten Ereignisse in der Wissenschaftsgeschichte, das in der Tat von Historikern gut untersucht und in zahlreichen Artikeln und Büchern dokumentiert wurde. Wenn ich allerdings diese Frage Physikern oder Chemikern stelle – das habe ich in den vergangenen Jahrzehnten sicherlich bei Hunderten getan mit der Zusatzbemerkung, „das sollte man doch eigentlich wissen“ – dann findet man nur sehr selten jemanden, der es weiß; richtige Antworten kommen vielleicht im Bereich von einem Prozent. Zwar gibt es zahlreiche Arbeiten und Bücher über kritische Diskussionen zur Nobelpreisverleihung; diese betreffen aber hauptsächlich Prioritätsfragen, gestohlene Ideen, ausgelassene Erst- und Mitentdecker und Ähnliches. Nach meiner Kenntnis wird aber nie

diese dramatische Geschichte einer „fehlerhaften Nobelpreisentdeckung“ behandelt.

Obwohl also dieser Teil der Wissenschaftsgeschichte eigentlich bestens bekannt und untersucht ist, wird er in der Wissenschaft praktisch nicht wahrgenommen. Dieser Essay soll helfen, im Jahr 2013 zum 75. Jahrestag dieses Nobel-Preises (von 1938)^[2] diese Situation etwas zu verbessern. Es geht um die Geschichte der Entdeckung der Kernspaltung, die nicht nur wegen ihrer großen Bedeutung von Interesse ist, sondern auch als Beispiel dafür, wie sich Wissenschaft entwickelt. Wir kennen ja den Standardkommentar von Gutachtern „Wiederholung ist keine Neuigkeit“ mit der anschließenden Empfehlung, die Publikation abzulehnen. Diese Denkweise täuscht sich über wesentliche Aspekte guter Wissenschaft, die durch die Geschichte der Entdeckung der Kernspaltung eindrucksvoll illustriert werden. Wissenschaftliche Arbeit hat zwei sehr unterschiedliche Komponenten, die wir als die „kreative“ und die „kritische“ bezeichnen können. Die kreative Komponente versucht sich mit neuen Ideen, unerforschten Wegen, oft durch Spekulation, manchmal auch durch Theorien geleitet. Diese Komponente verkauft sich gut mit dem Modewort der Wissenschaft „neuartig“. Genauso wichtig wie diese kreative Komponente ist aber auch die kritische Komponente. Sie stellt das „neuartige“ Ergebnis in Frage, unterwirft seine Schwächen strenger Kritik, wiederholt und überprüft die neuen Ergebnisse mit harter Arbeit in langen Untersuchungen, was dann oft zur Korrektur oder Widerlegung des Neuen führt, manchmal aber auch zu einer Entdeckung, die sich als noch viel revolutionärer herausstellt als in den kühnsten ursprünglichen Spekulationen vermutet. Genauso war der Weg bei der Entdeckung der Kernspaltung, die mit einem großen Irrtum, nämlich der scheinbaren Entdeckung neuer Elemente, begann, worauf Jahre sorgfältiger Überprüfung folgten, was schließlich in die Entdeckung der Kernspaltung mündete, viel revolutionärer als die anfänglich und fälschlich vermutete Entdeckung neuer Elemente.

Die Antwort auf die Frage zu Beginn dieses Essays ist: Es ist der Nobel-Preis für Physik, der im Jahre 1938 an Enrico Fermi für die Entdeckung der „neuen Transuranelemente“ („Ausenium“ und „Hesperium“) mit den Ordnungszahlen $Z=93$ bzw. 94 (also größer als beim Uran mit $Z=92$) vergeben wurde. Wörtlich lautet das Zitat aus der offiziellen, kurzen Nobelpreiswürdigung im Original auf Französisch:

„L'Académie royale des sciences a décidé, le 10 novembre 1938, que le Prix Nobel de physique pour l'année 1938 serait attribué à Enrico Fermi pour sa

[*] Prof. M. Quack
ETH Zürich, Laboratorium für Physikalische Chemie
Wolfgang-Pauli-Strasse 10, 8093 Zürich (Schweiz)
E-Mail: Martin@Quack.ch

[**] Nach dem Vortrag „Was wäre, wenn niemand nachgemessen hätte: Irrtum als Weg zur Erkenntnis (große und kleine Irrtümer in der Wissenschaft, je ein Nobelpreis für ein falsches Resultat und dann für seine Korrektur)“, Diskussionsforum Molekulare Wissenschaften, Collegium Helveticum, Semper Sternwarte, Freitag 19. Oktober 2012 (siehe auch die Vorlesung Chemische Reaktionskinetik, M. Quack, HS 2012, Kapitel 2.10: Zur Entdeckungsgeschichte der Kernspaltung).

découverte de nouveaux éléments radioactifs, développés par l'irradiation des neutrons, et sa découverte à ce propos des réactions de noyaux, effectuées au moyen des neutrons lents.

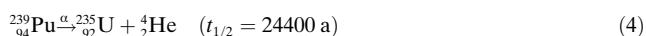
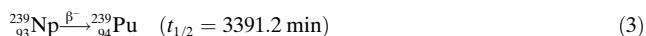
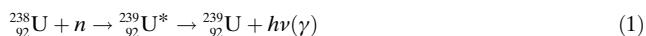
Le même jour l'Académie a décidé de ne pas distribuer le prix Nobel de chimie pour l'année 1938 et de le réservier pour l'année suivante.^{[2][*]}

Die hier auch erwähnte Nichtverleihung des Nobel-Preises für Chemie sollte sich als besonders pikant herausstellen, da es dann Chemiker waren, die zeigten, dass Fermi tatsächlich keine neuen Transuranelemente beobachtet hatte, sondern etwas ganz Anderes. Es lohnt, auch noch aus der ausführlichen Laudatio des Präsidenten (H. Pleijel) des Nobel-Komitees für Physik zu zitieren, welche gegen Ende die Entdeckung der neuen Transuranelemente hervorhebt:^[3]

„Fermi a en effet réussi à produire deux nouveaux éléments, dont les numéros d'ordre sont 93 et 94, éléments auxquels il a donné le nom d'ausénium et d'hespérium“.^{[3][**]}

2. Der Irrtum beruht auf einer korrekten Theorie in Verbindung mit einem Dreckeffekt durch eine kleine Verunreinigung

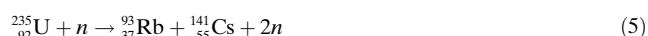
Die Idee hinter Fermis Experimenten war sehr schön und im Prinzip völlig richtig.^[4] Die im Jahr 1932 von Chadwick entdeckten^[5] ungeladenen Neutronen sollten relativ ungehindert in einen schweren Atomkern eindringen können, da sie nicht der großen Coulomb-Abstoßung mit dem hoch positiv geladenen Atomkern, der beschossen wird, unterliegen. Man könnte damit beispielsweise durch Einfangen eines Neutrons ein kurzlebiges Uranisotop herstellen, das durch zwei anschließende β -Zerfälle die Elemente mit den nächsthöheren Kernladungszahlen 93 und 94 erzeugen könnte, wie es auch tatsächlich nach heutiger Kenntnis beim Beschuss von $^{238}_{92}\text{U}$ mit Neutronen möglich ist [siehe Gl. (1)–(4) in heutiger Schreibweise].



[*] Die königliche Akademie der Wissenschaften hat am 10. November 1938 entschieden, den Nobel-Preis für Physik für das Jahr 1938 an Enrico Fermi zu verleihen für die Entdeckung neuer radioaktiver Elemente erzeugt durch Neutronenbeschuss und die in Verbindung mit diesen Arbeiten durchgeführte Entdeckung der durch langsame Neutronen ausgelösten Kernreaktionen. Am selben Tag hat die Akademie beschlossen, 1938 keinen Nobel-Preis für Chemie zu verleihen, sondern ihn für das Folgejahr aufzusparen.

[**] Fermi ist es in der Tat gelungen, zwei neue Elemente herzustellen, mit den Ordnungszahlen 93 und 94, denen er die Namen Ausenium und Hesperium gegeben hat.

Allerdings konnten so nur minimale Mengen an radioaktiven Isotopen hergestellt werden, die dann sehr indirekt mit wirklich ungenügender Beweisführung den „neuen Elementen“ zugeordnet wurden. Die radioaktiven Isotope, die Fermi und seine Mitarbeiter beobachtet hatten, beruhten in Wahrheit auf einem „Dreckeffekt“, nämlich der Spaltung des mit 0.7% in der natürlichen Isotopenmischung vorkommenden $^{235}_{92}\text{U}$ nach den Gleichungen (5) und (6) sowie weiteren, ähnlichen Kernspaltungsreaktionen.



Die radioaktiven Spaltprodukte dieser Prozesse dominierten so stark, dass trotz der geringen Häufigkeit von $^{235}_{92}\text{U}$, das man als kleine „Verunreinigung“ betrachten konnte, die von Fermi erhoffte Bildung radioaktiver Transuranisotope überdeckt wurde. Da die neuen Isotope in erster Linie durch ihre radioaktiven Zerfallsprozesse und Lebensdauern und nur sehr unvollständig durch ihre chemischen Eigenschaften charakterisiert wurden, fiel Fermis Fehlinterpretation zunächst nicht auf. Fermi hat sich anfangs sehr vorsichtig über die Entdeckung geäußert,^[4] nach einigen Jahren ging die Vorsicht jedoch verloren.^[6] Schon früh gab es auch Kritik an der Beweiskraft der Experimente. In einem der kritisch kommentierenden Artikel der Mitentdeckerin des Elements Rhenium,^[7] Ida Noddack, in der *Angewandten Chemie*^[8] wurde explizit auf die Notwendigkeit einer vollständigen chemischen Charakterisierung und die Möglichkeit der Bildung leichterer radioaktiver Spaltprodukte bei diesen Reaktionen hingewiesen, was aber von Fermi, Hahn, Meitner und anderen nicht ernst genommen wurde.^[6,9,10]

Später sollte sich die Kritik allerdings als vollkommen berechtigt herausstellen. Es wird sogar berichtet, dass Fermi anfänglich besorgt gewesen sei, dass die Ergebnisse über die neuen Transuranelemente falsch sein könnten, er wurde aber durch seine scheinbar so schönen Ergebnisse zu den neuen radioaktiven Elementen getäuscht und hat dann diese Experimente nicht mit genügender Sorgfalt weiterverfolgt und überprüft, um bessere Beweise zu sammeln.



Martin Quack studierte in Darmstadt, Grenoble und Göttingen und promovierte 1975 bei Jürgen Troe an der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 1976/1977 war er als Max-Kade-Stipendiat bei W. H. Miller an der University of California, Berkeley, und 1978 habilitierte er sich an der Universität Göttingen. 1982 wurde er C4-Professor an der Universität Bonn, und seit 1983 ist er Ordinarius für Physikalische Chemie an der ETH Zürich. Zu seinen Interessen gehören die molekulare Kinetik und Spektroskopie im Grenzbereich zur Physik, grundlegende Symmetrien, Erhaltungssätze und ihre Verletzungen.

3. Wiederholung kann neu sein

Andere Arbeitsgruppen unternahmen es, Fermis Arbeiten fortzuführen. Das geschah durchaus nicht in der Annahme, dass Fermis Experimente falsch sein könnten. Vielmehr war die Hoffnung, durch eine verbesserte Charakterisierung der Reaktionsprodukte die Ergebnisse von Fermi mit einer besseren Beweisführung zu bestätigen und zu erweitern – die klassische Art sorgfältiger Forschung, die heute oft als „repetitiv“ und „nicht neu“ disqualifiziert wird. Lise Meitner überzeugte Otto Hahn, ihre frühere mehrjährige Zusammenarbeit über radioaktive Isotope mit Untersuchungen zu diesem neuen Problem wieder aufzunehmen.^[11,12] Später kam Fritz Strassmann hinzu. Irène Curie in Paris arbeitete über diese Frage mit P. Savitch zusammen (Irène Curie ist die Tochter von Marie Curie und Ehefrau von Frédéric Joliot). Sie versuchten auf verschiedenste Weise, die neuen Elemente und Isotope in mehrjähriger Arbeit sorgfältig „kernchemisch“ zu charakterisieren (durch gemeinsame Fällungsreaktionen mit chemisch verwandten Elementen etc.), wobei nach der damaligen Anordnung des Periodensystems Uran in einer Gruppe mit Cr, Mo und W stand und das vermutete Element Nr. 93 als Eka-Re der Gruppe Mn, Tc (damals als fälschlich vermutetes Masurium) und Re zugeordnet wurde. Es gab also eine ganze Reihe von Irrtümern auch bezüglich der vermuteten chemischen Verwandtschaften.

Tabelle 1 zeigt einen Teil des damals verwendeten Periodensystems der Elemente. Element 93 wurde „Eka-Re“ und

Tabelle 1: Ausschnitt aus dem Periodensystem von 1934.

²⁰ Ca	²¹ Sc	²² Ti	²³ V	²⁴ Cr	²⁵ Mn	²⁶ Fe	
³⁸ Sr	³⁹ Y	⁴⁰ Zr	⁴¹ Nb	⁴² Mo	⁴³ Ms	⁴⁴ Ru	
⁵⁶ Ba	⁵⁷ La	⁷² Hf	⁷³ Ta	⁷⁴ W	⁷⁵ Re	⁷⁶ Os	
⁸⁸ Ra	⁸⁹ Ac	⁹⁰ Th	⁹¹ Pa	⁹² U	⁹³ Eka-Re	⁹⁴ Eka-Os	
Lanthaniden							
⁵⁷ La	⁵⁸ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	61?	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd

Element 94 „Eka-Os“ genannt, was aus der Vermutung entsprechender chemischer Verwandtschaften und Anordnungen im Periodensystem folgte. Wir wissen heute, dass eine andere Anordnung richtig ist, bei der Uran und die Transuranelemente Teil der Actinidenreihe (analog zur Lanthanidenreihe) sind (Tabelle 2).

Es ist eine historische Merkwürdigkeit, dass 1934 das Element „Masurium“ (Ms) zwischen Mn und Re erschien. Die Entdeckung von Masurium war von den Rhenium-Entdeckern vermutet worden, stellte sich aber als falsch heraus. Wir wissen heute, dass das Element 43 instabil ist (Technetium, Tc, siehe Tabelle 2). Die Entdeckung von Masurium wurde auch nie durch größere Substanzmengen bewiesen. Rhenium dagegen konnte in größeren Mengen rein hergestellt werden und wurde so definitiv nachgewiesen.^[7]

In Jahren sorgfältiger Untersuchungen von 1934 bis 1938 erschienen zahlreiche Arbeiten zum Thema. Das Isotop ²³⁹U wurde von Hahn und Meitner nachgewiesen. I. Curie und P. Savitch vermuteten weitere Thoriumisotope, aber Hahn und Meitner widerlegten das. Fehlerhafte Zuordnungen beruhten

Tabelle 2: Ausschnitt aus dem modernen Periodensystem der Elemente.

²⁰ Ca	²¹ Sc	²² Ti	²³ V	²⁴ Cr	²⁵ Mn	²⁶ Fe	²⁷ Co	²⁸ Ni
³⁸ Sr	³⁹ Y	⁴⁰ Zr	⁴¹ Nb	⁴² Mo	⁴³ Tc	⁴⁴ Ru	⁴⁵ Rh	⁴⁶ Pd
⁵⁶ Ba	⁵⁷ La	⁷² Hf	⁷³ Ta	⁷⁴ W	⁷⁵ Re	⁷⁶ Os	⁷⁷ Ir	⁷⁸ Pt
⁸⁸ Ra	⁸⁹ Ac	¹⁰⁴ Rf	¹⁰⁵ Db	¹⁰⁶ Sg	¹⁰⁷ Bh	¹⁰⁸ Hs	¹⁰⁹ Mt	¹¹⁰ Ds
Lanthaniden								
⁵⁷ La	⁵⁸ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb
Actiniden								
⁸⁹ Ac	⁹⁰ Th	⁹¹ Pa	⁹² U	⁹³ Np	⁹⁴ Pu	⁹⁵ Am	⁹⁶ Cm	⁹⁷ Bk

zum Teil auch auf den fehlerhaften Annahmen zur Anordnung des Periodensystems. Darauf soll hier nicht im Detail eingegangen werden. Letztlich führten alle diese Untersuchungen in Sackgassen, soweit es den Nachweis der neuen Transuranelemente betraf. Eine gute Darstellung der Schwierigkeiten findet man in den Arbeiten von Hahn, Meitner und Strassmann.^[13,14]

Im Juli 1938 musste Lise Meitner aus Deutschland fliehen, da sie durch den Rassismus der Naziregierung bedroht war. Vor der Besetzung Österreichs im Jahr 1938 war sie durch ihre österreichische Staatsbürgerschaft geschützt, die auch Personen jüdischer Konfession vor direkter Verfolgung in Deutschland bewahrte. Hahn und Strassmann setzten die experimentellen Arbeiten alleine fort, mit häufigem Briefkontakt mit Lise Meitner. Nach vielen Irrungen und Würungen kamen sie schließlich zum Schluss, dass beim Beschuss von Uran mit Neutronen Erdalkalimetalle entstehen, und nach der zunächst irrtümlichen Vermutung, dass Radium vorliege, folgerten sie sehr zögerlich, dass es sich tatsächlich um Bariumisotope handelte, da sich diese nach dem Mischen mit gewöhnlichem Barium nicht von diesem abtrennen ließen. Dieses Ergebnis war so unerwartet, dass sie sich in einer ersten Publikation nur sehr vorsichtig dazu äußerten, wörtlich: „Wir kommen zu dem Schluss: Unsere ‘Radiumisotope’ haben die Eigenschaften des Bariums; als Chemiker müssten wir eigentlich sagen, bei den neuen Körpern handelt es sich nicht um Radium, sondern um Barium, denn andere Elemente als Radium oder Barium kommen nicht in Frage“.^[15]

4. Eine explosive Entwicklung nach Zündung durch die Entdeckung

Auch der zeitliche Ablauf ist äußerst spannend. Lise Meitner war im Herbst 1938 in Kopenhagen, als Hahn und Strassmann die entscheidenden Versuche unternahmen. Fermi hielt am 12. Dezember 1938 seinen Nobelvortrag „Artificial radioactivity produced by neutron bombardement“ (unter anderem über „Ausenium und Hesperium“),^[6] dem die Würdigung durch Pleijel vorausging.^[3] (Fermi reiste übrigens nach der Preisverleihung direkt in die USA und kehrte nicht nach Italien zurück, weil er wegen seiner jüdischen Frau eine Verfolgung durch das Mussolini-Regime befürchtete.) Eine Woche später (am 19. Dezember) schrieb Otto Hahn an Lise Meitner: „... unsere Ra-Isotope verhalten sich wie Ba ... immer mehr kommen wir zu dem schrecklichen Schluss, unsere Ra-Isotope verhalten sich nicht wie Ra-Isotope, sondern

wie Ba ... Ich habe mit Strassmann verabredet, dass wir vorerst nur Dir dies sagen wollen. Vielleicht kannst Du irgendeine phantastische Erklärung vorschlagen. Wir wissen selbst, dass es eigentlich nicht in Ba zerplatzen kann.“ Lise Meitner antwortete in einem Brief am 21. Dezember, den Hahn am 23. Dezember erhielt, als er das Manuskript schon eingereicht hatte (am 22. Dezember), dass ihr das Zerplatzen schwierig scheine, aber sie könne nicht ohne Weiteres sagen, es sei unmöglich. Die Arbeit von Hahn und Strassmann erschien schon am 9. Januar 1939.^[15] In einer zweiten Arbeit, die wenig später veröffentlicht wurde (28. Januar 1939), äußerten sie sich dann schon sehr viel präziser zum Nachweis von Bariumisotopen.^[16] Eine schöne historische Zusammenfassung der Ereignisse in Berlin findet sich in Lit. [17].

Über Weihnachten hatte Lise Meitner mit ihrem Neffen Otto Frisch, der sie in Kungälv nahe Göteborg besucht hatte, eine Theorie der Kernspaltung auf der Grundlage des Bohrschen Tröpfchenmodells des Atomkerns ausgearbeitet.^[11,12,18] Die betreffende Arbeit wurde am 16. Januar 1939 bei *Nature* eingereicht (und erschien am 11. Februar). Bei seiner Rückkehr nach Kopenhagen erzählte O. Frisch Niels Bohr davon, der gerade mit dem Schiff in die USA abreiste und bemerkte: „Oh, what fools we have been, we ought to have seen that before“ (zitiert in Lit. [18]).

Schon am 13. Januar 1939 führte Otto Frisch ein Experiment zum direkten Nachweis hochenergetischer Bruchstücke bei der Kernspaltung durch (diese Arbeit wurde am 16. Januar 1939 bei *Nature* eingereicht, wobei erstmals der Begriff „fission“ verwendet wurde). Niels Bohr beschäftigte sich noch während seiner Reise mit der Theorie der Kernspaltung, und er gab in einer schon am 7. Februar 1939 bei *Physical Review* eingereichten Arbeit die im Wesentlichen richtige Erklärung, dass die Reaktion von Neutronen mit $^{235}_{92}\text{U}$ verantwortlich für die beobachteten Spaltprodukte ist, da der unter Neutronenbeschuss gebildete $^{236}_{92}\text{U}^*$ -Atomkern eine wesentlich höhere Anregungsenergie enthält als der Kern $^{239}_{92}\text{U}^*$. Der Grund ist, dass $^{235}_{92}\text{U}$, ein „Gerade-ungerade“-Kern mit einer ungeraden Zahl an Neutronen (und Nukleonen), sehr viel instabiler ist als der „Gerade-gerade“-Kern $^{238}_{92}\text{U}$. Damit enthält $^{236}_{92}\text{U}^*$ viel mehr Energie, um die im Prinzip sehr hohe Coulomb-Barriere für die Spaltung in zwei hoch geladene Komponenten zu überwinden.^[19] 26 Jahre nach seinen bahnbrechenden Arbeiten von 1913 zur Struktur der Elektronenhülle des Atoms auf der Grundlage der „alten Quantentheorie“, deren 100. Jahrestag wir 2013 feiern,^[20-23] und nach Jahren des Nachdenkens über die Struktur des Atomkerns war Niels Bohr die Person mit der tiefsten Einsicht hierzu.

Fermi wurde von Bohr schon bei seiner Ankunft in den USA (im Hafen von New York) gesprächsweise informiert und reagierte, indem er der im Druck befindlichen Nobelpreisrede eine Fußnote hinzufügte, die auf die Entdeckung der Kernspaltung durch Hahn und Strassmann hinwies: „The discovery by Hahn and Strassmann of barium among the disintegration products of bombarded uranium, as a consequence of a process in which uranium splits into two approximately equal parts makes it necessary to reexamine all the problems of the transuranic elements, as many of them might be found to be products of a splitting of uranium“. In

einer Fußnote zu seiner Nobelpreisrede widerrief Fermi also im Wesentlichen das Ergebnis, das zum Nobel-Preis geführt hatte.

Schon Anfang 1939 begann man sich weltweit mit der Kernspaltung zu beschäftigen. Es wurde sehr schnell erkannt, dass die Erzeugung von zwei oder mehr Neutronen bei der Kernspaltung [nach Gl. (5) und (6)] die Möglichkeit einer verzweigten Kettenreaktion eröffnete, wie sie aus der chemischen Reaktionskinetik bekannt war.^[24-26] S. Flügge publizierte schon im Juni 1939 eine Arbeit mit dem Titel „Kann der Energieinhalt der Atomkerne technisch nutzbar gemacht werden?“.^[27] Nach Ausbruch des zweiten Weltkriegs im September 1939 wurden die meisten Untersuchungen zur Kernspaltung geheim gehalten. Unter Leitung von E. Fermi wurde in Chicago schon 1942 (erste Kettenreaktion am 2. Dezember) der erste Kernreaktor erfolgreich betrieben, und bekanntlich folgte 1945 der erste Einsatz von Atombomben. Für einen Zugang zur Geschichte des Manhattan Projects siehe Lit. [28]. Persönliche, philosophische und politische Aspekte dieser Entwicklung haben ihren Niederschlag nicht nur in vielen Geschichtsbüchern, sondern auch im Theaterstück „Copenhagen“ von Michael Frayn gefunden.^[29] Die Entdeckung der Kernspaltung wurde Teil der Menschheitsgeschichte. Die Entdeckung, die mit einem großen Irrtum begonnen hatte, wurde zu „einem der beiden größten bekannten Menschheitsrisiken“.^[30]

5. Irrtum und Erkenntnis: eine zusammenfassende Beurteilung

In der Beurteilung der Geschichte der Entdeckung der Kernspaltung zeigt sich zunächst, wie Fermis Irrtum durch eine prinzipiell korrekte Theorie gefördert wurde. Was er aus seiner Theorie erwartete, existiert wirklich für $^{238}_{92}\text{U}$, aber es wurde vollständig überdeckt durch den unerwarteten Effekt der Kernspaltung bei der „kleinen Verunreinigung“ $^{235}_{92}\text{U}$ (mit nur 0.7% Häufigkeit). Fermis Fehler ist einer der häufigsten Fehler in den Naturwissenschaften (die Überinterpretation von Daten). Seine experimentellen Daten reichten als Beweis für das Auftreten von Transuranelementen unter den beobachteten Produkten keineswegs aus. Das war leicht zu sehen und wurde auch sofort bemerkt,^[8] aber Fermi, Hahn, Meitner, Strassmann, Curie, Savitch und andere waren blind für dieses Problem. Sie verwarfene die Kritik mit der typischen Arroganz der Experten.^[9,31]

Dennoch war allen Beteiligten klar, dass genauere Untersuchungen wünschenswert waren, und diese wurden auch unternommen, als Wiederholung und Erweiterung von Fermis Experimenten, nicht um ihn zu widerlegen oder gar mit dem Ziel der Entdeckung der Kernspaltung. Erst als die Experimente nach zahlreichen, sorgfältigen Studien zeigten, dass Barium unter den Produkten sein musste, wurden Hahn und Strassmann durch die Evidenz zu dem Schluss gezwungen, dass Uran unter Neutronenbeschuss in so große Bruchstücke zerfällt; sie haben diese Schlussfolgerung zunächst mit der größten Zurückhaltung formuliert. Die Wiederholung der früheren Experimente hatte ein ganz neues, revolutionäres Ergebnis gebracht. Diese Korrektur von Fermis falschen

„Nobel-Preis“-Ergebnissen hat Otto Hahn ebenfalls den Nobel-Preis eingebracht.^[9,10] Auch Fermis ursprüngliche Idee zur Erzeugung von Transuranelementen aus $^{238}_{92}\text{U}$ wurde in sorgfältigen Experimenten weiterverfolgt und führte zur Entdeckung der Elemente Neptunium und Plutonium nach dem Mechanismus in den Gleichungen (1)–(4), was einen weiteren Nobel-Preis – 1951 für McMillan and Seaborg – zur Folge hatte.

Die Geschichte der Entdeckung der Kernspaltung ist eines von vielen Beispielen dafür, dass die sorgfältige Wiederholung mit Bestätigung, Erweiterung oder Zurückweisung der früheren Ergebnisse zum Kern guter Wissenschaft gehört. Ein anderer Aspekt des mühevollen Weges zur Entdeckung der Kernspaltung ist die Blindheit der Experten gegenüber der Möglichkeit einer völlig neuen Kernreaktion, des Zerbrechens eines angeregten Atomkerns in zwei große Bruchstücke. Allerdings gab es gute Gründe, eine solche Spaltung in große Fragmente auszuschließen. Die „Coulomb-Barriere“ ist proportional zum Produkt $Z_1 Z_2$ der Kernladungszahlen Z_1 und Z_2 der beiden Bruchstücke und damit bei gegebenem $Z = Z_1 + Z_2$ umso größer, je ähnlicher Z_1 und Z_2 sind. Auch der damals schon bekannte Tunneleffekt,^[32] der den α -Zerfall der Kerne erklärt,^[33,34] muss für Fragmente großer Masse sehr viel kleiner sein, was die Geschwindigkeit solcher Fragmentierungen gegenüber denen der bekannten und auch hier zeitweise vermuteten α -Zerfälle stark reduzieren sollte.

Hätte man aber den Spaltungsprozess – wie damals^[38,39] und heute^[40,41] in der Theorie der chemischen Reaktionsdynamik üblich – unter statistischen Gesichtspunkten betrachtet,^[35–37] dann wäre die Spaltung eines Atomkerns in große Bruchstücke als sehr viel wahrscheinlicher erschienen. Diese interdisziplinäre Übertragung von Ideen von der physikalisch-

ischen Chemie zur Physik funktionierte in dieser frühen Phase der Entdeckung der Kernspaltung noch nicht, später, bei der Betrachtung der Kettenreaktionen in der Kernspaltung erfolgte dieser Transfer von Ideen aus der chemischen Kinetik auf die Kernphysik sehr effizient.^[24–27]

Wenn wir nun zur Bedeutung der „kreativen“ und der „kritischen“ Komponente in der wissenschaftlichen Arbeit zurückkehren, so kann man dafür auch als Forscherpersönlichkeiten den Enthusiasten und den Skeptiker nennen. Für gute Wissenschaft ist die Kombination der beiden Eigenschaften notwendig, denn Begeisterung ohne Skepsis führt zu Unsinn, Skepsis ohne Begeisterung führt zu ... nichts. Im Idealfall findet man beide Eigenschaften in einer Person vereint. Häufiger jedoch neigt ein Wissenschaftler mehr zu einem oder zur anderen Forscherpersönlichkeit. Dann führt die Wechselwirkung von vielen Personen mit unterschiedlichen Eigenschaften und Schwerpunkten durch Diskussion und Publikation in der „Wissenschaftsrepublik“ zum Erfolg. Die Geschichte der Entdeckung der Kernspaltung ist ein herausragendes Beispiel gerade auch hierfür.

Zum Abschluss dieser Überlegungen sei eine moderne Version des Periodensystems der Elemente (nach IUPAC 2012, Tabelle 3) mit den vielen heute bekannten Transuranelementen gezeigt. Auch wenn Fermis Experimente zu einem Irrtum führten, wurden seine ursprünglichen Ideen später korrekt weiterverfolgt (siehe den Überblick in Lit. [42]). Etwa 20% der Elemente, die bis heute entdeckt und benannt wurden, sind Transuranelemente. Hier findet man die Namen von Fermi (Fm), Bohr (Bh) oder Meitner (Mt) ebenso wie die Namen der Orte, an denen viele der neuen Elemente entdeckt wurden (Berkeley in Berkelium, Bk, Dubna in Dubinium, Db, und Darmstadt in Darmstadtium, Ds).

Tabelle 3: Periodensystem vom Juni 2012 (nach IUPAC).

1	1 H hydrogen [1.007; 1.009]	2	2 He helium 4.003
3 Li lithium [6.938; 6.997]	4 Be beryllium 9.012		
11 Na sodium 22.99	12 Mg magnesium 24.31		
19 K potassium 39.10	20 Ca calcium 40.08	21 Sc scandium 44.96	3 Ti titanium 47.87
37 Rb rubidium 65.47	38 Sr strontium 67.62	39 Y yttrium 88.91	40 Zr zirconium 91.22
55 Cs caesium 132.9	56 Ba barium 137.3	57–71 lanthanoids 137.3	72 Hf hafnium 178.5
87 Fr francium 223.0	88 Ra radium 226.0	89–103 actinoids 223.0	104 Rf rutherfordium 261.0
			105 Db dubnium 264.0
			106 Sg seaborgium 266.0
			107 Bh bohrium 265.0
			108 Hs hassium 269.0
			109 Mt meitnerium 268.0
			110 Ds darmstadtium 281.0
			111 Rg roentgenium 283.0
			112 Cn copernicium 285.0
			114 Fl flerovium 289.0
			116 Lv livermorium 293.0
			117 Cs curium 296.0
			118 Bk berkelium 299.0
			119 Cf californium 253.0
			120 Es einsteinium 257.0
			121 Fm fermium 257.0
			122 Md mendelevium 256.0
			123 No nobelium 253.0
			124 Lr lawrencium 257.0

6. Wissenschaftler bei der Arbeit: Fermi, die Wissenschaftler und die Bürokraten

Man mag sich fragen, ob Fermi nicht der Nobel-Preis für das irrtümliche Resultat hätte aberkannt werden sollen. Es besteht aber trotz dieses schwerwiegenden Irrtums kaum ein Zweifel, dass Fermi als einer der größten Physiker des 20. Jahrhunderts den Nobel-Preis verdient hat, wenn auch nicht für die falsche Entdeckung von „Ausenium und Hesperium“. Als seine vielleicht größte nobelpreiswürdige Leistung kann man seine Theorie des β -Zerfalls nennen, ebenfalls aus dem Jahr 1934.^[43] Diese Arbeit ist eine Perle der Wissenschaft, von einem Italiener in ausgezeichnetem Deutsch verfasst. Sie führte zur Entdeckung der schwachen Wechselwirkung und der Fermi-Kopplungskonstante, die dort schon recht gut abgeschätzt wurde, und hat für die heutige Hochenergiephysik Bedeutung,^[44–46] und sogar für die Stereochemie chiraler Moleküle.^[47]

Fermi war auch, gemeinsam mit Leó Szilárd, später ein ganz entscheidender Motor beim Bau des ersten Kernreaktors,^[48] wobei neben seinen wissenschaftlichen Qualitäten auch seine organisatorischen und politischen Fähigkeiten wichtig waren. In diesem Zusammenhang soll eine Anekdote erzählt werden, die ich von Per-Olov Löwdin (also „fast aus erster Hand“) 1973 gehört habe^[49] und die vielleicht wahr ist.

In dem großen Projekt zur Nutzung der Kernreaktionen zur Energiegewinnung und zum Bau von Kernwaffen während des zweiten Weltkriegs war Enrico Fermi (Abbildung 1) ein wesentliches Bindeglied zwischen den Wissenschaftlern und Technikern einerseits und der Bürokratie der US-Regierung andererseits, d. h. zwischen recht verschiedenen Kul-

turen. Dabei stellten die Bürokraten fest, dass einige Wissenschaftler nicht zu den normalen Arbeitszeiten erschienen. Fermis Antwort: Die Wissenschaftler kommen eben zu Zeiten, zu denen sie gut und kreativ arbeiten können, manche früh, andere spät, letztere arbeiten aber dann auch bis spät nachts. Die Bürokraten lösten das Problem durch die Einführung von Stechuhren. Daraufhin stellte man fest, dass besonders die Theoretiker nicht auf ihre täglichen 8 (oder 9, 10?) Stunden Arbeitszeit kamen. Fermis Kommentar: Theoretiker können oft besser zu Hause arbeiten, wo sie mehr Ruhe für kreatives Arbeiten haben. Auch dieses Problem wurde bürokratisch einwandfrei gelöst, indem man den Theoretikern kleine, tragbare Stechuhren für zu Hause mitgab. Danach gab es keine weiteren Fragen, doch nun stellte Fermi selbst eine Frage: Er wache wie andere Theoretiker, die er kenne, nachts öfter auf, arbeite für einige Stunden und lege sich dann wieder schlafen. Ob er in diesen Stunden auch die häusliche Stechuhren bedienen dürfe? Antwort: Ja, da er in diesen Nachtstunden doch arbeite.

Nach einigen Wochen klopfte Fermi wieder bei den Bürokraten an: Er habe noch eine Frage, die ihn zwar nur persönlich betreffe, aber auf die er dennoch gerne eine Antwort hätte: Seine besten Ideen habe er oft im Traum; ob er die häusliche Stechuhren auch vor dem Schlafengehen betätigen dürfe? Jetzt endlich wurde er verstanden, und das Projekt der genauen Arbeitszeiterfassung wurde aufgegeben. Vielleicht ist die Geschichte wahr, aber jedenfalls sollte sie sehr gut zum Genie Fermi passen: „Se non è vero è ben trovato“.

Nachdem die Kernwaffen schon als eines der beiden größten bekannten Menschheitsrisiken identifiziert sind (das andere ist der durch Treibhausgase ausgelöste Klimawan-



Abbildung 1. Fermi (links) und seine Freunde Nello Carrara und Franco Rasetti bei der Arbeit (von Mario Agio, siehe R. V. Caffarelli, *Enrico Fermi, Immagini et Documenti*, Edizioni Plus, Università di Pisa, 2002).

del^[30]), kann hier das grenzenlose Wachstum der Bürokratie als weiteres großes Risiko benannt werden, sicher für die Forschung,^[50] vielleicht sogar für die Menschheit.

7. Andere Beispiele von Irrtum und Erkenntnis in der Wissenschaft

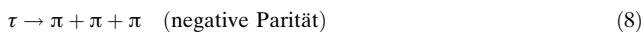
Die Kernspaltung ist ein Beispiel für den mühevollen Weg über Irrtümer zur Erkenntnis. Die Leser können andere Beispiele aus ihrem eigenen Erfahrungsschatz suchen. Hier seien noch einige angeführt, sehr kurz und ohne Details.

Ein herausragendes Beispiel ist der Übergang vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild in der Astronomie, der gelegentlich mit einer geschichtlich nicht ganz gerechtfertigten Zuordnung als kopernikanische Wende bezeichnet wird. Tatsächlich ist es wohlbekannt – obwohl auch in diesem Fall das Wissen nicht sehr verbreitet ist –, dass es schon in der frühen griechischen Astronomie eine Debatte gab zwischen Astronomen wie Aristarch, der schon ungefähr 260 v. Chr. ein heliozentrisches Weltbild vorschlug, und anderen, die das vorher wie nachher häufiger akzeptierte geozentrische Weltbild vertraten. Mit der genauen Bestimmung des Erdradius durch Eratosthenes um 240 v. Chr., der Beziehungen zwischen dem Erdradius, den Entfernungen zum Mond und zur Sonne und zu den Mond- und Sonnenradien hatte die frühe griechische Astronomie zur Zeit von Hipparch ca. 150 v. Chr. schon eine recht gute Geometrie des Sonnensystems erhalten. Durch aus heutiger Sicht völlig korrekte Vorgehensweisen hatten sie im Wesentlichen richtige Größen bestimmt, wenn auch nur in recht grober Näherung, eingeschränkt durch die Beobachtungsgenauigkeit des unbewaffneten Auges. Auch die mathematische Theorie der Ellipse war durch die Arbeiten von Apollonius um 200 v. Chr. schon bekannt, sodass die richtige Beschreibung der Planetenbahnen im heliozentrischen System möglich gewesen wäre (sie wurde aber nicht durchgeführt). Vielmehr entschied sich Hipparch damals, seine sehr umfangreichen astronomischen Beobachtungen im Rahmen des geozentrischen Systems darzustellen, wie es später in der ptolemäischen Astronomie verwendet wurde (im „Almagest“ nach 100 n. Chr. niedergelegt). Dieser Irrweg wurde also etwa 1700 Jahre weiterverfolgt, bis Kopernikus um ca. 1530 das heliozentrische Modell des Aristarch neu formulierte. Es war keine „Wiederentdeckung“, da Kopernikus vom Weltbild des Aristarch wusste. Doch haben zunächst die besten Astronomen das heliozentrische System nicht akzeptiert. So verwarf Tycho Brahe es wegen seiner offensichtlichen Schwächen. Noch von 1583 bis zu seinem Tod 1601 hat Brahe seine umfangreichen und gegenüber früher wesentlich verbesserten astronomischen Beobachtungen im Rahmen eines geozentrischen („Tychonischen“) Modells beschrieben, einer modifizierten Version der ptolemäischen Astronomie. Tycho Brahes Buch war nach 1603 allgemein erhältlich. Solche geozentrischen Systeme waren noch während des gesamten 17. Jahrhunderts populär. Die entscheidende Entdeckung wurde schließlich von Johannes Kepler um 1600 gemacht, der die sehr genauen Daten von Brahe und auch Beobachtungen von Galileo mit einem heliozentrischen Modell und Ellipsenbahnen der Planeten

beschreiben konnte. Diese Entdeckung hat den Weg für die Newtonsche Himmelsmechanik bereitet. Im Vergleich mit der vierjährigen Verzögerung durch Irrtum bei der Entdeckung der Kernspaltung ist die Verzögerung von 1700 Jahren auf einem Irrweg der Astronomie allerdings recht extrem.

Aus der physikalischen Chemie gibt es ebenfalls ein schönes Beispiel: den Weg zum Verständnis des Mechanismus unimolekularer Reaktionen. Hier führte die scheinbare Druckunabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit in der Gasphase zunächst zur irrtümlichen „Strahlungstheorie chemischer Reaktionen“, die ab 1910 etwa zehn Jahre lang dominierte. Man dachte, dass die Absorption thermischer Schwarzkörperstrahlung nach dem Planckschen Strahlungsgesetz die Bildung reaktiver Moleküle mit ausreichender Anregungsenergie ermöglichte. Das konnte die scheinbare Druckunabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit zwangslässig erklären, bis Lindemann im Jahr 1922 in einer kurzen Diskussionsbemerkung einen Mechanismus mit Stoßanregung der Moleküle vorschlug, der einerseits die Druckunabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit bei genügend hohen Drücken erklärte und andererseits eine Druckabhängigkeit bei genügend niedrigen Drücken vorhersagte. Diese Vorhersage wurde sehr bald experimentell bestätigt, und seither wird der „Lindemann-Mechanismus“ zur Beschreibung unimolekularer Reaktionen verwendet. Die Strahlungstheorie wurde verworfen und vergessen, bis sie viel später für Reaktionen bei sehr niedrigen Drücken wieder aufgenommen wurde (siehe Lit. [51] für diesen Teil der Geschichte).

Ein Irrtum, der recht schnell zu einer überraschenden Entdeckung führte, war das Theta-Tau(Θ - τ)-Rätsel in der Teilchenphysik Anfang der 1950er Jahre. Damals wurden zwei Elementarteilchen mit scheinbar verschiedener Parität, aber sonst genau gleichen Eigenschaften postuliert, die in Produkte verschiedener Parität zerfielen (zwei bzw. drei Pionen; Gl. (7) und (8)).



Wegen der verschiedenen Parität auf der Produktseite und wegen des damals allgemein akzeptierten Paritätserhaltungssatzes sollten Θ und τ verschiedene Teilchen sein, die aber nur durch ihre Parität unterschieden werden konnten. Alle Versuche, die beiden Teilchen auf andere Weise zu unterscheiden, misslangen. Daraufhin schlügten Lee und Yang 1956 vor, dass die Parität eventuell bei der für den Zerfallsprozess verantwortlichen schwachen Wechselwirkung nicht erhalten bleibt, sodass Θ und τ dasselbe Teilchen sind (heute als K^+ -Meson bezeichnet), das in zwei Konkurrenzreaktionen in Produkte verschiedener Parität zerfällt. Diese Vermutung zur Paritätsverletzung wurde sehr schnell (1957) durch mehrere unabhängige Experimente bestätigt. Seitdem ist die Paritätsverletzung in der elektroschwachen Wechselwirkung ein zentraler Bestandteil des „Standardmodells der Teilchenphysik“.^[44-47] Ein weiteres Rätsel mit Bezug zur elektroschwachen Wechselwirkung betraf die Messung der Sonnen-Neutrinos (ν_e). Diese wurden quantitativ in Experimenten

von R. Davis mithilfe von Reaktion (9) nachgewiesen, wobei er weniger Neutrinos fand, als durch die Modelle der Kernreaktionen vorhergesagt wurden, die in der Sonne Neutrinos erzeugen.



Da die Experimente schwierig sind (man erhält mit einem „Detektor“ von etwa 600 Tonnen C_2Cl_4 weniger als ein ${}^{37}\text{Ar}$ -Atom pro Tag, das dann durch seinen radioaktiven Zerfall in Umkehrung von Reaktion (9) nachgewiesen wird), vermutete man Fehler im Experiment. Wiederholung und Verbesserung der Experimente über viele Jahre hinweg bestätigten aber den zu niedrigen Neutrino-Fluss – es fehlten Sonnen-Neutrinos. Aus neuen Ergebnissen wissen wir heute, dass die Neutrino-Oszillationen die normalen Elektron-Neutrinos ν_e in andere Neutrinos umwandeln, die nicht mit Reaktion (9) beobachtet werden, also dann „fehlen“. Die beiden Geschichten aus der Hochenergiephysik findet man in Lehrbüchern,^[52] wobei das letzte Kapitel zu den Neutrinos noch nicht abgeschlossen ist, sodass man hier schon von unserer Gegenwartsgeschichte sprechen kann. Die Paritätsverletzung in der elektroschwachen Wechselwirkung hat auch Konsequenzen in der Chemie. Bei Rechnungen zur Paritätsverletzung in chiralen Molekülen, die einen kleinen „paritätsverletzenden“ Energieunterschied $\Delta_{\text{pv}}E$ zwischen den Enantiomeren chiraler Moleküle vorhersagten, wurden während etwa 15 Jahren nach den ersten Rechnungen von Hegström, Rein und Sandars von 1980 ungenügende theoretische Verfahren verwendet. Als wir die Theorie in den 1990er Jahren genauer untersuchten, waren uns die Schwächen der früheren Arbeiten klar. Trotzdem hat es uns überrascht, dass unsere verbesserte Theorie Werte für H_2O_2 und andere „typische“ Moleküle für solche Rechnungen ergaben, die bis zu zwei Größenordnungen größer waren als in den früheren Rechnungen. Nachdem wir unsere drastisch höheren Werte 1995 ermittelt hatten, wurden sie bald durch zahlreiche unabhängige Rechnungen bestätigt. Diese Geschichte findet man in Lit. [47, 51, 53, 54]. Diese viel größeren berechneten Effekte der Paritätsverletzung in chiralen Molekülen sind wichtig für mögliche Experimente. Allerdings ist auch dieses Kapitel noch nicht abgeschlossen, da der experimentelle Nachweis dieser weiterhin als sehr klein vorhergesagten Energiedifferenzen ($\Delta_{\text{pv}}E \approx 100 \text{ a eV}$ oder $10^{-11} \text{ J mol}^{-1}$) noch aussteht.^[47, 51, 53, 54]

Als letztes Beispiel sei der Bericht über langlebige Kernspinisomere von Wasser in der kondensierten Phase, also „ortho“- und „para“- H_2O , scheinbar analog zum lange bekannten ortho- und para- H_2 , erwähnt.^[55] Diese 2002 publizierte Beobachtung konnte von anderen Gruppen trotz erheblicher Anstrengungen nicht reproduziert werden.^[56, 57] Natürlich könnte eine solche Nichtreproduzierbarkeit in den neuen Experimenten an experimenteller Ungeschicklichkeit, unsauberen Arbeiten, etwa auch Umwandlung durch Spuren katalytischer Verunreinigung liegen. Die Entdeckung einer schnellen Umwandlung zwischen ortho- und para- H_2O unter Bedingungen mit Bildung von $(\text{H}_2\text{O})_n$ -Clustern in Molekülstrahlen, bei denen Wandeffekte und ähnliche denkbare „Dreckeffekte“ ausgeschlossen sind, klärt jedoch die Angelegenheit.^[58, 59] Die behauptete Beobachtung von langlebigen

H_2O -Kernspinisomeren in der kondensierten Phase ist sicher falsch.

Man könnte viele weitere Beispiele für Irrtum und später folgende Erkenntnis in den Naturwissenschaften anführen. Wir wollen hier aber mit einer Aussage zur Kernspaltung schließen, die außerhalb des Bereichs der reinen Wissenschaft liegt. Es sollte offensichtlich sein, dass die riesigen Vorräte an Kernwaffen – eine Konsequenz der Entdeckung der Kernspaltung –, die von den Atommächten der Welt angelegt und dauernd unterhalten werden, ein gigantisches Risiko für die Menschheit bedeuten. Obwohl seit Jahrzehnten keine Kernwaffen mehr in Kriegen eingesetzt wurden, kann man doch leicht vorhersagen, dass die riesigen Kernwaffenarsenale früher oder später zu einer Katastrophe führen müssen. Die Aufrechterhaltung dieser Kernwaffenarsenale ist eine fehlerhafte und extrem gefährliche Politik, die früher oder später tödliche Folgen für die Welt haben wird. Deshalb schließe ich diesen Essay mit einer Variation von Catos Ceterum Censeo: „Kernwaffen müssen vernichtet werden“.

In einem kurzen Essay kann die umfangreiche Literatur über die Geschichte der Kernspaltung nicht vollständig zitiert werden, aber es sei auf zwei Übersichten^[60, 61] verwiesen, die einen Zugang zu dieser Literatur verschaffen können. Abbildung 1 ist ein Geschenk von Mario Agio (Zürich und Florenz). Das Periodensystem der IUPAC 2012 wird mit Genehmigung der International Union of Pure and Applied Chemistry abgedruckt (siehe auch Lit. [62]). Ruth Schüpbach danke ich für ihre Hilfe bei der Erstellung des Manuskripts aus meinen handgeschriebenen Notizen. Unsere Arbeiten werden von der ETH Zürich, dem SNF und dem ERC unterstützt.

Eingegangen am 16. April 2013
Online veröffentlicht am 13. August 2013

- [1] R. Marquardt, M. Quack, *Z. Phys. D* **1996**, *36*, 229–237.
- [2] *Les Prix Nobel en 1938*, Imprimerie Royale, P. A. Norstedt und Söner, Stockholm, **1938**, S. 6.
- [3] H. Pleijel in *Les Prix Nobel en 1938*, Imprimerie Royale, P. A. Norstedt und Söner, Stockholm, **1938**, S. 19–23.
- [4] E. Fermi, *Nature* **1934**, *133*, 898–899.
- [5] J. Chadwick, *Proc. R. Soc. London Ser. A* **1932**, *136*, 692–708.
- [6] „Artificial radioactivity produced by neutron bombardment, Nobel Lecture 12 Dec 1938“: E. Fermi in *Les Prix Nobel en 1938*, Imprimerie Royale, P. A. Norstedt und Söner, Stockholm, **1938**, S. 414–421.
- [7] W. Noddack, I. Tacke, O. Berg, *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Phys.-Math. Kl.* **1925**, 400–409. Ida Tacke heiratete Walter Noddack, daher der neue Name Ida Noddack in Lit. [8] und [31].
- [8] I. Noddack, *Angew. Chem.* **1934**, *47*, 653–655.
- [9] „From the natural transmutations of uranium to its artificial fission (Nobel Lecture 13 Dec. 1946)“: O. Hahn, *Les Prix Nobel en 1945*, P. A. Norstedt und Söner, Stockholm, **1946**, S. 51–66.
- [10] O. Hahn, *Helv. Chim. Acta* **1953**, *36*, 608–619.
- [11] L. Meitner, *Adv. Sci.* **1963**, *19*, 363–365, Nachdruck aus dem IAEA Bulletin.
- [12] L. Meitner, *Naturwiss. Rundsch.* **1963**, *16*, 167–169.
- [13] O. Hahn, L. Meitner, F. Strassmann, *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* **1937**, *70*, 1374–1392.
- [14] L. Meitner, F. Strassmann, O. Hahn, *Z. Phys.* **1938**, *109*, 538–552.

- [15] O. Hahn, F. Strassmann, *Naturwissenschaften* **1939**, 27, 11–15.
- [16] O. Hahn, F. Strassmann, *Naturwissenschaften* **1939**, 27, 89–95.
- [17] W. Seelmann-Eggebert, *Chimia* **1979**, 33, 275–282.
- [18] O. R. Frisch, J. A. Wheeler, *Phys. Today* **1967**, 20, 43–52.
- [19] N. Bohr, *Phys. Rev.* **1939**, 55, 418–419.
- [20] N. Bohr, *Philos. Mag.* **1913**, 26, 1–25.
- [21] N. Bohr, *Philos. Mag.* **1913**, 26, 476–502.
- [22] N. Bohr, *Philos. Mag.* **1913**, 26, 857–875.
- [23] „Molecular Quantum Mechanics and Molecular Spectra, Molecular Symmetry, and Interaction of Matter with Radiation“: F. Merkt, M. Quack in *Handbook of High-Resolution Spectroscopy, Vol. 1* (Hrsg.: M. Quack, F. Merkt), Wiley, Chichester, **2011**, S. 1–55.
- [24] M. Bodenstein, *Z. Elektrochem.* **1916**, 22, 202–206.
- [25] C. N. Hinshelwood, H. W. Thompson, *Proc. R. Soc. London Ser. A* **1928**, 118, 170–183.
- [26] N. Semenoff, *Z. Phys.* **1928**, 48, 571–582.
- [27] S. Flügge, *Naturwissenschaften* **1939**, 27, 402–410.
- [28] C. Reed, *History Phys. Newslett.* **2012**, 12, 3–4.
- [29] M. Frayn, *Copenhagen*, Anchor books, New York, **1999**.
- [30] M. Quack, *Bunsen-Magazin* **2011**, 13, 138–143.
- [31] I. Noddack, *Naturwissenschaften* **1939**, 27, 212–213 (mit einem Kommentar des Herausgebers).
- [32] F. Hund, *Z. Phys.* **1927**, 43, 805–826.
- [33] G. Gamow, *Z. Phys.* **1928**, 51, 204–212.
- [34] R. W. Gurney, E. U. Condon, *Phys. Rev.* **1929**, 33, 127–140.
- [35] N. Bohr, J. A. Wheeler, *Phys. Rev.* **1939**, 56, 426–450.
- [36] J. M. Blatt, V. F. Weisskopf, *Theoretical Nuclear Physics*, Wiley, New York, **1952**.
- [37] V. Weisskopf, *Phys. Rev.* **1937**, 52, 295–303.
- [38] H. Eyring, *J. Chem. Phys.* **1935**, 3, 107–115.
- [39] E. Wigner, *Trans. Faraday Soc.* **1938**, 34, 29–41.
- [40] M. Quack, J. Troe, *Ber. Bunsen-Ges. Phys. Chem.* **1974**, 78, 240–252.
- [41] „Statistical Adiabatic Channel Model“: M. Quack, J. Troe in *Encyclopedia of Computational Chemistry, Vol. 4* (Hrsg.: P. von R. Schleyer, N. Allinger, T. Clark, J. Gasteiger, P. A. Kollman, H. F. Schaefer III, P. R. Schreiner), Wiley, New York, **1998**, S. 2708–2726.
- [42] G. Herrmann, *Angew. Chem.* **1988**, 100, 1471–1491; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1988**, 27, 1417–1436.
- [43] E. Fermi, *Z. Phys.* **1934**, 88, 161–177.
- [44] S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.* **1967**, 19, 1264–1266.
- [45] „Weak and electromagnetic interactions“: A. Salam in *Elementary Particle Theory: Relativistic Groups and Analyticity* (Hrsg.: N. Svartholm), Almkvist & Wiksell, Stockholm, **1968**, S. 367–377.
- [46] S. L. Glashow, *Nuclear Phys.* **1961**, 22, 579–588.
- [47] „Fundamental Symmetries and Symmetry Violations from High-Resolution Spectroscopy“: M. Quack in *Handbook of High-Resolution Spectroscopy, Vol. 1* (Hrsg.: M. Quack, F. Merkt), Wiley, Chichester, **2011**, S. 659–722.
- [48] E. Fermi, *Am. J. Phys.* **1952**, 20, 536–558.
- [49] „Time and Time Reversal Symmetry in Quantum Chemical Kinetics“: M. Quack in *Fundamental World of Quantum Chemistry. A Tribute to the Memory of Per-Olov Löwdin, Vol. 3* (Hrsg.: E. J. Brändas, E. S. Kryachko), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, **2004**, S. 423–474.
- [50] M. Quack, *Bunsen-Magazin* **2012**, 14, 181–189.
- [51] M. Quack, *Faraday Discuss.* **2011**, 150, 533–565.
- [52] C. Amsler, *Kern- und Teilchenphysik*, vdf Hochschulverlag Zürich, **2007**.
- [53] M. Quack, *Angew. Chem.* **2002**, 114, 4812–4825; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2002**, 41, 4618–4630.
- [54] M. Quack, J. Stohner, M. Willeke, *Annu. Rev. Phys. Chem.* **2008**, 59, 741–769.
- [55] V. I. Tikhonov, A. A. Volkov, *Science* **2002**, 296, 2363–2363.
- [56] S. Albert, B. H. Meier, M. Quack, G. Seyfang, A. Trabesinger, *Chimia* **2006**, 60, 476.
- [57] S. L. Veber, E. G. Bagryanskaya, P. L. Chapovsky, *J. Exp. Theor. Phys.* **2006**, 102, 76–83.
- [58] C. Manca Tanner, M. Quack, D. Schmidiger, *Faraday Discuss.* **2011**, 150, 118–122.
- [59] C. Manca Tanner, M. Quack, D. Schmidiger, *J. Phys. Chem. A* **2013**, DOI: 10.1021/jp400958f.
- [60] E. Amaldi, *Phys. Rep.* **1984**, 111, 1–332.
- [61] G. Herrmann, *Angew. Chem.* **1990**, 102, 469–496; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1990**, 29, 481–508.
- [62] E. R. Cohen, T. Cvitas, J. G. Frey, B. Holmström, K. Kuchitsu, R. Marquardt, I. Mills, F. Pavese, M. Quack, J. Stohner, H. L. Strauss, M. Takami, A. J. Thor, *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry*, 3. Aufl., 3. korrigierter Druck, IUPAC und Royal Society of Chemistry, RSC Publishing, Cambridge, **2011**.