

Atmosphäre in Brand

Ein Los Alamos Laboratory Report von 1946 behandelt die Frage, ob eine atomare Explosion die Atmosphäre entzünden könnte.

Michael Wiescher und Karlheinz Langanke

Im Kinofilm „Oppenheimer“ von Christopher Nolan nimmt auch die Frage Raum ein, ob beim Zünden einer Atombombe die Kernspaltung so viel Energie freisetzen könnte, dass sie eine Kette von Fusionsreaktionen in der Atmosphäre auslöst. Im Film diskutiert J. Robert Oppenheimer diese Gefahr mit Albert Einstein, ohne auf physikalische Einzelheiten einzugehen. Kein Wunder: Einstein war wenig bewandert in Fragen der Kernreaktionen und den damit verbundenen quantenmechanischen Fusionsmechanismen. Auch wenn dieses Treffen so nicht stattfand, entspricht es doch der Realität, dass die Möglichkeit eines „Atmosphärenbrands“ die Mitglieder des Manhattan-Projekts beunruhigte.

Tatsächlich präsentierte Edward Teller 1942 in internen Diskussionen bei einem Treffen in Berkeley den Gedanken, dass die Explosion der Bombe die Atmosphäre schnell lokal aufheizen und die Temperatur wegen mangelnder Kühlung so stark ansteigen könnte, dass zwei ^{14}N -Atomkerne fusionieren. Als zweite Möglichkeit zog er die Fusion von ^{14}N und Wasserstoff aus dem Wasserdampf in der Atmosphäre in Betracht. Als Leiter der Theory Division in Los Alamos schätzte Hans Bethe die Wahrscheinlichkeit für solche Kettenreaktionen ab und stufte sie als „sehr gering“ ein.

Dennoch reiste Oppenheimer im Sommer 1942 mit dem Zug von Berkeley nach Chicago, um mit Arthur H. Compton zu sprechen: Der Leiter des Metallurgical Laboratory in Chicago entwickelte dort die Reaktoren, um das Isotop ^{239}Pu für die Kernwaffen zu erbrüten. Compton war auch der führende Experte zur Photonenstreuung und der damit verbundenen Frage, wie eine hoch erhitzte Atmosphäre abkühlt. Das Treffen fand in Comptons Ferienhaus am Otsego Lake in Michigan statt; danach reiste Oppenheimer umgehend zurück nach



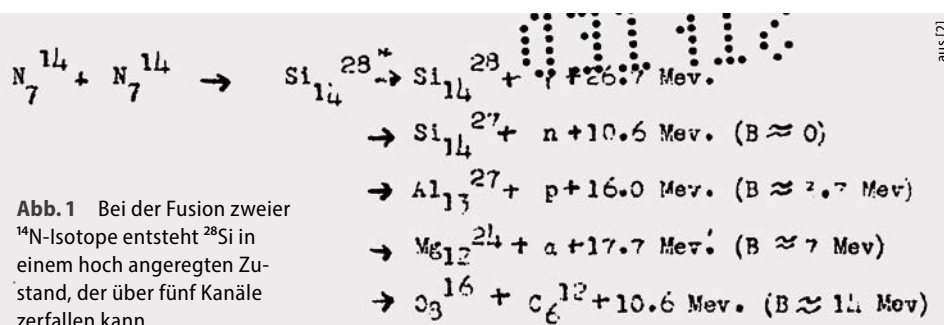
Diese Aufnahme zeigt die Explosion während des Trinity-Tests 25 Mikrosekunden nach der Zündung. Der Feuerball ist zu diesem Zeitpunkt etwa 200 Meter hoch.

Berkeley: Anscheinend war es Compton zusammen mit Bethe gelungen, Oppenheimer zu beruhigen [1].

Hans Bethe schätzte ab, dass die Temperatur während des Trinity-Tests nicht ausreichen würde, um eine Zündung der Atmosphäre zu bewirken. Allerdings lagen dieser Abschätzung keine experimentellen Daten über die relevanten Fusionsquerschnitte zugrunde, sondern lediglich theoretische Berechnungen derselben. Der Trinity-Test und die Abwürfe der Bomben auf Hiroshima und Nagasaki fanden 1945 in dem Vertrauen statt, dass keine unbekannte Resonanz den Wirkungsquerschnitt der Fusionsreaktionen vervielfachen würde.

Obwohl der Atmosphärenbrand wie abgeschätzt ausblieb, verfasste Edward Teller im Jahr darauf mit seinen Mitarbeitern Emil Konopinski und Cloyd Marvin einen geheimen „Los Alamos Laboratory Report“ dazu. Das seit 1979 öffentlich zugängliche Papier fasst die theoretischen Überlegungen zum möglichen Entzünden der Atmosphäre durch eine atomare Explosion zusammen [2].

Basis der Überlegungen ist die Annahme, dass sich das nukleare Brennen in der Atmosphäre in ein Gebiet mit frischem unverbrauchten Material nur dann fortpflanzt, wenn die bei den Kernreaktionen frei werdende Energie größer ist als der



Energieverlust durch Strahlung, für welche die Atmosphäre transparent ist. Weil die Atmosphäre größtenteils aus dem Isotop ^{14}N besteht und sich dieses im Vergleich zu ^{16}O sehr leicht aufbrechen lässt, stellt die Fusion zweier ^{14}N -Kerne eine wichtige Energiequelle dar. Bei der Fusion ordnen sich die Kernbestandteile neu an, sodass in der Regel ein leichtes und ein schweres Fragment entstehen (Abb. 1). Handelt es sich dabei um ^{24}Mg und ^4He , nimmt das Alphateilchen maximal 17,7 MeV an kinetischer Energie mit, die es durch Stöße an andere Teilchen in der Umgebung abgibt.

Mitte der 1940er-Jahre war weder der Wirkungsquerschnitt für die Fusion zweier ^{14}N -Isotope noch für das

Verschmelzen anderer mittelschwerer Kerne experimentell bekannt. Daher approximierten die Autoren dessen Energieabhängigkeit mithilfe des geometrischen Wirkungsquerschnitts von 2 barn ($= 2 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$) bei Energien oberhalb der Coulomb-Barriere (Abb. 2). Diese beträgt ungefähr 8,6 MeV; bei kleineren Energien ist die Fusion nur durch Tunneln möglich. Bereits 1928 hatte George Gamow die Tunnelwahrscheinlichkeit hergeleitet, mit welcher der geometrische Wirkungsquerschnitt multipliziert wird.

Die Alphateilchen geben ihre kinetische Energie am effizientesten bei Stößen mit ähnlich schweren Teilchen ab; bei Elektronen fällt der Energieübertrag deutlich geringer

aus. Deshalb gingen die Autoren des geheimen Berichts davon aus, dass die Kernfragmente schnell einen energetischen Gleichgewichtszustand erreichen, den die nukleare Temperatur T_n charakterisiert. Aus dieser lässt sich die deutlich niedrigere Temperatur des Elektronengases T_e berechnen. Das Elektronengas kühlt im Wesentlichen durch Bremsstrahlung und inverse Compton-Streuung ab. Dabei entsteht Strahlung, für welche die Atmosphäre transparent ist, sodass es zu einem Energieverlust kommt.

In ihrer Arbeit von 1946 schließen die Autoren, dass die Verlustrate der Energie immer größer ist als die Produktionsrate durch Kernfusion: Es kann deshalb nicht zu der kritischen Situation der Zündung der Atmosphäre kommen. Das Verhältnis der Raten von Energieverlust und -produktion, der sogenannte „Sicherheitsfaktor“, erfasst dieses Ergebnis quantitativ. Der Faktor hängt von der Temperatur ab und erreicht ein Minimum von 1,6 bei etwa $T_n = 70 \text{ MeV}$. Für $T_n = 10 \text{ MeV}$ – also knapp oberhalb der Coulomb-Barriere – beträgt er etwa 2. Zu kleineren Temperaturen hin nimmt der Sicherheitsfaktor exponentiell zu: Bei $T_n = 1 \text{ MeV}$ liegt er bereits bei etwa 1000.

Die leichteren Fragmente der Fusion, wie Alphateilchen oder Protonen, können mit den ^{14}N - oder ^{16}O -Isotopen in der Atmosphäre reagieren. Auch die Wirkungsquerschnitte dieser Reaktionen waren damals unbekannt; eine Ausnahme machten die Neutronen. Für die Reaktionen mit Alphateilchen und Protonen nahmen die Autoren an, dass die Energieproduktion bei $T_n = 10 \text{ MeV}$ geringer ist als für die Fusion von Stickstoff. Unterhalb der Coulomb-Barriere trifft dies jedoch nicht zu, sodass ein Verweis auf mögliche Gefahren bei der Weiterentwicklung der Bomben angebracht erschien [2]: „The energy losses to radiation always overcompensate the gains due to reactions. [...] It is impossible to reach such temperatures unless fission bombs or thermonuclear bombs are used which greatly exceeds the bombs now under consideration.“

Tatsächlich kam die Diskussion des Risikos eines Atmosphärenbrands im-

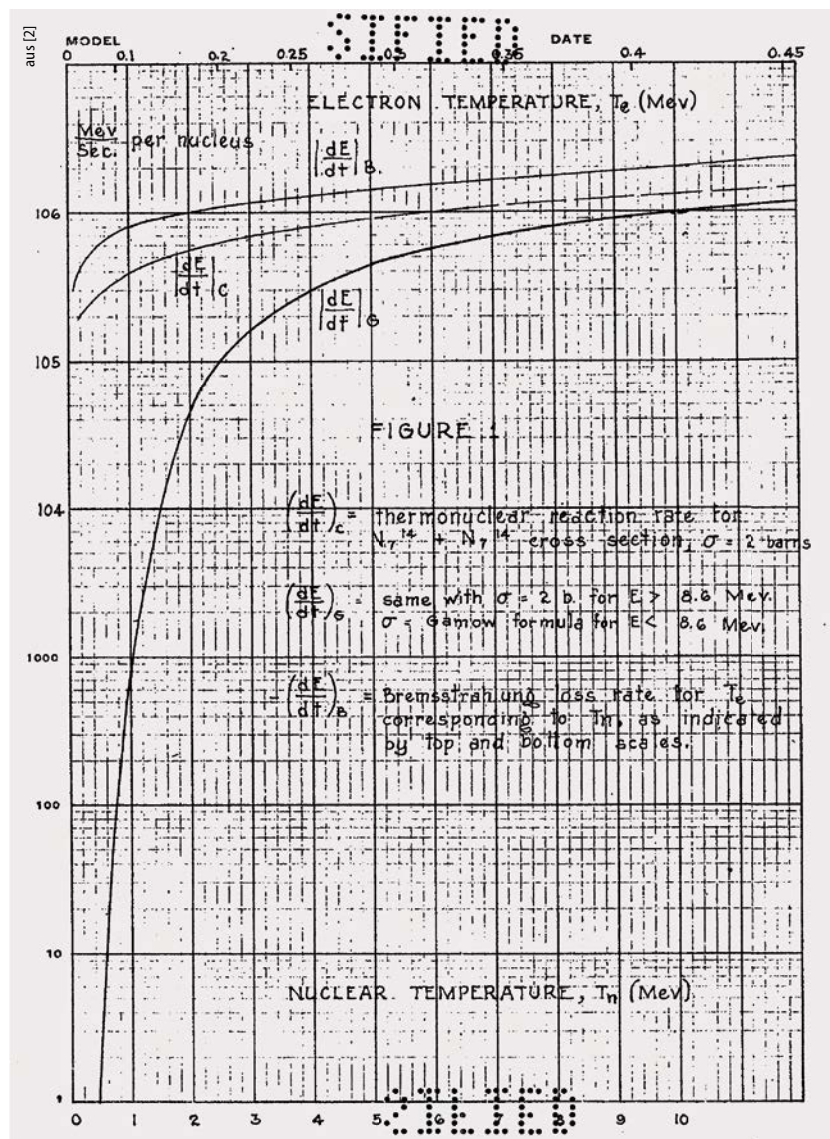


Abb. 2 Der Vergleich der freigesetzten Energie durch die Fusion zweier ^{14}N -Isotope mit dem Energieverlust in der Atmosphäre durch Bremsstrahlung zeigte, dass ein Atmosphärenbrand gemäß der vorliegenden Abschätzung sehr unwahrscheinlich war.

mer wieder auf, zum Beispiel bei den ersten Tests der Wasserstoffbombe [3]. Hierbei kam wegen der höheren Temperaturen auch die Fusion von Sauerstoff ($^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$) ins Spiel. Ein möglicher „Ozeanbrand“ stand vor den ersten Unterwassertests aufgrund höherer Teilchendichten und größerem Wasserstoffgehalt zur Debatte. Aus heutiger Sicht vernachlässigen die Befürchtungen alle anderen negativen Folgen der Tests, zum Beispiel den radioaktiven Niederschlag („Fallout“).

Um die relevanten Wirkungsquerschnitte experimentell zu bestimmen, erhielt das Oak Ridge National Laboratory Anfang der 1950er-Jahre einen Teilchenbeschleuniger, der es ermöglichte, die Fusionsreaktionen $^{14}\text{N} + ^{14}\text{N}$, $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ und andere Reaktionen mittelschwerer Kerne zu untersuchen [4]. Aus Sicherheitsgründen erfuhren die Forschenden offiziell nicht den Zweck der Daten. Die Messungen der relevanten Fusionswirkungsquerschnitte zeigten, dass diese deutlich kleiner ausfallen, als in der Arbeit von 1946 mithilfe des geometrischen Wirkungsquerschnitts und der Tunnelwahrscheinlichkeit abgeschätzt. Außerdem stellt sich in der Atmosphäre eine geringere Temperatur als angenommen ein: Bei einigen zehn Millionen Grad liegen die Teilchenenergien der Fusionspartner deutlich unterhalb der Coulomb-Barriere, was die Durchlässigkeit mittels Tunneln sehr stark reduziert.

Die Situation ähnelt derjenigen in den Spätphasen des hydrostatischen Brennens massereicher Sterne. Tatsächlich hat dieses Gebiet der Nuklearen Astrophysik in einer Art Dual-Use wichtige Impulse aus dem Manhattan-Projekt erhalten, obwohl sich das explosive Szenario nach der Detonation einer Atombombe auch vom hydrostatischen stellaren Brennen unterscheidet. Die Erfahrungen aus der Simulation von Kernreaktionen, die während einer Bombenexplosion eine Rolle spielen, führten zur Entwicklung neuer Ideen in der Nuklearen Astrophysik. Dazu gehören die Vorhersage neuer Reaktionssequenzen, insbesondere von Fusionsreaktionen und neutroneninduzierten Reaktionen, sowie die Untersuchung von Prozessen der schwachen Wechselwirkung, um die

Sternentwicklung und explosive Phänomene wie Supernova-Explosionen zu erklären [5].

Zu beachten ist dabei, dass es in der umgekehrten Richtung schon zuvor einen „Dual-Use“ gegeben hatte. Denn viele Protagonisten der Bombenentwicklung, insbesondere im Manhattan-Projekt, hatten sich in den 1930er-Jahren mit der Frage beschäftigt, wie Sterne über ausreichend Energie verfügen, um für sehr lange Zeit hell zu leuchten und in einem Gleichgewichtszustand zu verbleiben.

Im Nachhinein stellten erst die zahlreichen Tests, insbesondere die Detonation der 50-MT-Wasserstoffbombe AN602 auf Nowaja Semlja 1961, experimentell sicher, dass die Befürchtungen eines Atmosphären- oder Ozeanbrands unbegründet waren. Denn einige Kernreaktionen blieben bei den Betrachtungen Mitte der 1940er-Jahre unberücksichtigt. Dazu gehört die Reaktion $^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + p$, die aufgrund der enormen Menge freigesetzter Neutronen mit atmosphärischem Stickstoff stattfindet. Sie führte Anfang der 1960er-Jahre zum „Radiokarbon-Bombenpeak“ in der Atmosphäre [6] und zeigt sich heute noch im Isotopenverhältnis $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ in organischem Material, weil das radioaktive Isotop ^{14}C für tausende Jahre in den biologischen Kreislauf eingebettet bleibt [7]. Als langwährendes

Zeichen warnt es uns heute vor der menschlichen Hybris beim Umgang mit Waffen – so wie es Oppenheimer nach dem Einsatz von Kernwaffen in Hiroshima und Nagasaki tat [8].

- [1] D. Huisman und H. Huisman, Arthur Holly Compton's and J. Robert Oppenheimer's meeting at Otsego Lake State Park on July 1942, Michigan History Magazine (2010)
- [2] E. J. Konopinski, C. Marvin und E. Teller, Ignition of the Atmosphere with Nuclear Bombs, Los Alamos National Laboratory, LA-602, April 1946
- [3] P. S. Buck, The American Weekly, March 8 (1959): <https://bit.ly/3R4Pg4A>; H. C. Dudley, Bull. Atomic Scientists 31 (9), 21 (1975)
- [4] L. D. Wyly und A. Zucker, Phys. Rev. 89, 524 (1953); H. L. Reynolds, D. W. Scott und A. Zucker, PNAS 39, 975 (1953)
- [5] F. Hoyle, MNRS 106, 343 (1946); F. Hoyle, ApJS 1, 121 (1954)
- [6] W. Kutschera, Radiocarbon 64 (6), 1295 (2022)
- [7] T. Naegler und I. Levin, J. Geophys. Res. 111 (D10), D12311 (2006)
- [8] K. Bird und M. J. Sherwin, American Prometheus, Knopf, New York 2005

Die Autoren

Prof. Dr. Michael Wiescher, Department of Physics, 225 Nieuwland Science Hall, University of Notre Dame, Notre Dame, IN 46556, USA und **Prof. Dr. Karlheinz Langanke**, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Planckstr. 1, 64291 Darmstadt und Institut für Kernphysik, TU Darmstadt, Schlossgartenstr. 9, 64289 Darmstadt

Kurzgefasst

Unter Wasser schreiben

Mit einer ausgeklügelten Technik ist es einem Team der U Mainz, der TU Darmstadt und der Universität in Wuhan (China) gelungen, mit Tinte unter Wasser zu schreiben. Dazu gaben die Forschenden die Tintenpartikel direkt in ein Wasserbad und nutzten als „Stift“ eine 20 bis 50 μm Harzkugel. Wenn sich diese im Wasser bewegt, senkt sie lokal den pH-Wert; entlang dieser Spur ordnen sich die Tintenpartikel an, sodass eine feine sichtbare Linie entsteht. Eine mögliche Anwendung ist die dreidimensionale Strukturierung von Flüssigkeiten: Dazu müssten Laserpinzetten mehrere Kugeln gleichzeitig durch das Wasser bewegen.

N. Möller et al., Small 2023, 2303741 (2023)



Komplexe Proteine entschlüsseln

Wenn Proteine mit Molekülen in Zellen wechselwirken, kommt es auf die komplexe, räumliche Struktur der Proteine an. Um zum Beispiel Arzneimittel gezielt zu entwickeln, ist es daher entscheidend, diese Struktur genau zu kennen. Forschende der U Konstanz haben dazu nun hochauflösende Kernspinresonanzspektroskopie und aufwändige Computersimulationen der Molekulardynamik kombiniert. Damit gelang es, die Faltung von Ubiquitin-Dimeren zu entschlüsseln. Die Forschenden konnten die hohe strukturelle Variabilität dieses Multidomänen-Proteins nachweisen, indem sie mehrere mögliche Verbindungen – K6, K29 und K33 – der beiden Ubiquitin-Moleküle sichtbar machten.

T. Schneider et al., Structure 31, 1 (2023)

images reprinted from T. Schneider et al., Structure 31, 1 (2023) with permission from Elsevier

