

## 4 Entscheidung im Experiment: Gibt es die Kettenreaktion?

Binnen weniger Tage nach der Entdeckung der Spaltung wurde einer Anzahl von Wissenschaftlern klar, daß bei diesem Prozeß Neutronen freigesetzt werden könnten. Diese Erkenntnis führte zu der Überlegung, daß hier vielleicht der Keim für eine großtechnische Methode zur Freisetzung der ungeheuren Energie des Atomkerns gegeben sei. Man sprach von einer *Superbombe*.

Der springende Punkt dabei ist, daß eine Kettenreaktion von Spaltungen auftreten kann, wenn Neutronen sowohl für die Startreaktion benötigt werden als auch als Reaktionsprodukte auftreten. Die Sekundärneutronen einer Spaltung reagieren weiter, indem sie weitere Spaltungen auslösen; diese geben noch mehr Neutronen frei, die wiederum Spaltprozesse auslösen, und so fort (Abb.6). Die Nachrichtenkaskade großer Organisationen möge dies verdeutlichen. Einer ruft an und veranlaßt die Alarmierung von fünf anderen, die wiederum fünf weitere alarmieren sollen, usw., so daß die Anzahl ständig wächst und rasch sehr groß wird.

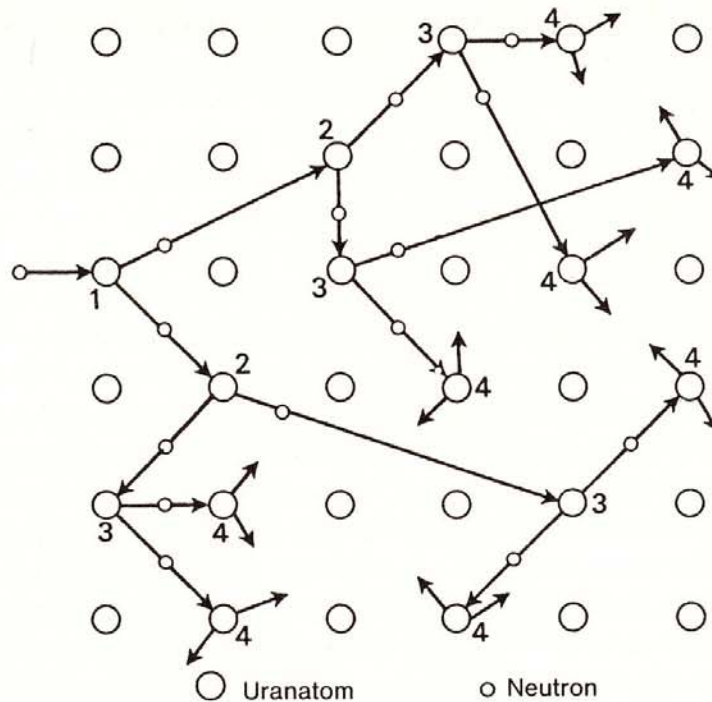
Mit dem Begriff der Kettenreaktion waren die Wissenschaftler 1939 bereits vertraut, und zwar von der Erklärung chemischer Explosionen her. Sie erkannten, daß eine entsprechende Kernexplosion, falls sie möglich ist, millionenfach stärker wäre.

Dies war eine schreckliche Aussicht, namentlich in einer Welt, die rasch auf einen Krieg zusteuerte. Der französische Kernphysiker Bertrand Goldschmidt beschreibt in seinem Buch *Das atomare Abenteuer*, wie das Klima in der Kernforschung über Nacht umschlug:

„Von einem Tag auf den anderen hörte die Kernphysik auf, lediglich eine Domäne der Grundlagenforschung zu sein, ein Reservat für den einzelnen Forscher. Im Anblick ihrer moralischen und politischen Verantwortung trat eine neue Elite, die der Kernphysiker, in das Rampenlicht der Öffentlichkeit, und spielte im Leben großer Nationen eine entscheidende Rolle.“

Bis 1938 war die Physik ein Spaß. Jetzt fühlten sich die Leute in den *Elfenbeintürmen* plötzlich als Treuhänder eines Wissens, das die Weichen der Geschichte stellen könnte. Natürlich war ihnen die ungeheure Energie, die in den Atomkernen schlummert, längst bekannt, aber sie hatten keine Vorstellung, wie man sie freisetzen könnte. Rutherford hatte, obwohl er gewöhnlich gut vorausschauen konnte, öffentlich erklärt: „Jeder, der in der Atomum-

## Entscheidung im Experiment: Gibt es die Kettenreaktion?



**Abb. 6.** Darstellung einer Kernspaltungskettenreaktion. Die Reaktion wird initiiert durch das Neutron *links*, und die ersten vier Schritte der Kette sind durch Zahlen gekennzeichnet. Bei jeder Spaltung werden zwei Neutronen frei, die dann beide eine weitere Spaltung bewirken. In Wirklichkeit gehen aber viele Neutronen durch Nebenreaktionen verloren, weshalb es sehr viel weniger Kettenverzweigungen gibt

wandlung nach einer Kraftquelle sucht, redet Unsinn.“ Das geschah 1933 anlässlich der Jahrestagung der *British Association for the Advancement of Science*. Laut Heisenbergs Buch *Der Teil und das Ganze* (Piper Verlag, München 1969) hatten weder er noch Bohr ihre Stimme dagegen erhoben, als Rutherford diese Meinung in ihrer Gegenwart privat äußerte. Sie dachten in der Tat alle an Experimente wie die von Cockcroft und Walton, bei denen eine beträchtliche Menge elektrischer Energie für die Umwandlung einer winzigen Masse verbraucht wurde, und die Suche nach einem Reingewinn dabei konnte tatsächlich als Unsinn bezeichnet werden. Sie hatten die Möglichkeiten einer Neutronen-Kettenreaktion nicht vorausgesehen.

Aber schon zu jenem frühen Zeitpunkt gab es einen Mann, den ungarisch-jüdischen Naziflüchtling Leo Szilard, der weiter gedacht hatte. Er sagte, daß diese Vorstellung in ihm aufblitzte, als die Verkehrsampel von rot nach grün sprang, während er auf der Southampton Row in London entlang ging und über Rutherfords *Unsinn* nachdachte. Er begann, vom Standpunkt der Kernkraft und Atombomben aus die Konsequenzen im Detail auszuarbeiten und

## Entscheidung im Experiment: Gibt es die Kettenreaktion?

war anderen weit voraus, die Jahre später vieles davon wiederentdeckten. Dies alles ist festgehalten in einem britischen Patentantrag vom 12. Mai 1934, dessen Lektüre bezüglich dieses frühen Datums überrascht, aber er blieb ohne Einfluß auf die weitere Entwicklung, weil Szilard ihn aus Sorge vor möglichen Konsequenzen dadurch geheimhielt, daß er ihn an die Admiralität übergab. Nach den Bemerkungen, die er damals notierte, erscheint es möglich, daß er Hahn und Straßmann mit der Entdeckung der Spaltung hätte zuvorkommen können, wenn er nur die Mittel zur experimentellen Ausführung seiner Ideen gehabt hätte; sicher ist, daß er das Element Uran für lohnende Untersuchungen vorgemerkt hatte.

Die Befürchtungen, die Anfang 1939 entstanden waren, wurden für manche vorübergehend durch die Überzeugung ausgeräumt, daß die Kettenreaktion, sofern sie überhaupt gelänge, doch nicht zu einer Explosion führen würde. Die Begründung dafür kam von keinem geringeren als Bohr. Sie entstand kurz nach der Entdeckung der Spaltung gelegentlich einer Diskussion in Princeton, als Bohr triftige Gründe dafür feststellte, daß Hahn und Straßmann die Spaltung des seltenen Uranisotops  $^{235}\text{U}$  beobachtet hatten, also nicht die des vorherrschenden Isotops  $^{238}\text{U}$ . Placzek sowie der Amerikaner John A. Wheeler, die an der Diskussion teilnahmen, wetteten 1846 gegen 1 Cent darauf, daß Bohr recht habe. (1846 war das damals akzeptierte Massenverhältnis zwischen Proton und Elektron.) Der Beweis kam erst über ein Jahr später, im März 1940, als kleinste Proben von teilweise getrenntem  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  zur Verfügung standen. Bohrs Annahme wurde bestätigt, und Placzek sandte Wheeler einen Scheck über \$ 0,01.

Die Folge davon ist, daß  $^{238}\text{U}$  tatsächlich die Kettenreaktion behindert, weil es viele Neutronen einfängt, ohne daß diese dabei eine Spaltung bewirken. Diesem Effekt kann man durch Abbremsen der Neutronen-Geschwindigkeit begegnen, denn dies treibt die Anzahl der  $^{235}\text{U}$ -Spaltung nach oben. Aber mit langsamen Neutronen wird die ganze Reaktion so langsam, daß es nicht mehr zu einer Explosion kommen kann; Bohr wies darauf hin, daß die Neutronen dann viel zu viel Zeit brauchen, um von einem Uranatom zum nächsten zu gelangen. Das kann nur zu einer Verpuffung führen, die das Uran verspritzt und die Reaktion beendet.

Bohr hatte tatsächlich völlig recht mit der Annahme, daß natürlich vorkommendes Uran nicht für die Bombe taugt. Aber angenommen  $^{238}\text{U}$  könnte entfernt werden, so daß reines  $^{235}\text{U}$  zurückbleibt? Sechs Jahre später sollten die Amerikaner genau dies tun, und die Bombe herstellen. Diese Möglichkeit hatte Bohr nicht außer acht gelassen, aber 1939 schien sie wirklich nicht gegeben zu sein. Mit Ausnahme des Wasserstoffs, wo es besonders einfach ist, war noch kein Element in großer Menge in seine Isotope zerlegt worden; Die Schwierigkeiten und Kosten schienen dies zu verbieten.

## Entscheidung im Experiment: Gibt es die Kettenreaktion?

Ob Bohr nun recht hatte oder nicht, 1939 bestand der Bedarf nach handfesten experimentellen Beweisen, ob eine Kern-Kettenreaktion möglich wäre oder nicht. Der Erste auf diesem Gebiet scheint Joliot in Paris gewesen zu sein. Die Vorstellung einer solchen Kettenreaktion hatte er zwar in seinem Nobel-Vortrag 1935 flüchtig gestreift, aber nicht ausgearbeitet. Nun aber, nachdem er sich von der Realität der Spaltung durch eigene Experimente selbst überzeugt hatte, begann er mit der Arbeit gemeinsam mit zwei naturalisierten Franzosen, zwei jungen Wissenschaftlern z. T. jüdischer, ausländischer Herkunft.

Einer von Ihnen, Lew Kowarski, meinte, „die erste Kernkettenreaktion zu verwirklichen wäre wie den Stein der Weisen zu finden. Das ist weit mehr als der Nobelpreis“, während der andere, Hans von Halban jr., dieses Team als „ganz von der Schaffung einer Kettenreaktion, die für die Nutzung der Kernkraft verwendet werden könne, gefangen genommen“ beschrieb.

Joliot hatte ein neues Institut am *Collège de France* errichtet. Nun hatte er die richtigen Leute und Geräte und konnte sich uneingeschränkt von der Verwaltung ab und zur Forschung hinwenden. In den nächsten Monaten arbeitete diese Gruppe täglich 12–14 Stunden im Labor.

Der erste wesentliche Schritt war die Bestätigung der Annahme, auf der die ganze Vorstellung von der Kettenreaktion beruht, nämlich daß Sekundärneutronen bei der Uranspaltung freigesetzt werden. Falls die Antwort ja sein sollte, wäre der nächste Schritt die Bestimmung ihrer Anzahl. Im Mittel wird mindestens ein Neutron pro Spaltung benötigt, damit eine Spaltung zur nächsten führt, und so fort, so daß die Kette kein Ende hätte. Tatsächlich müßten aber erheblich mehr als ein Neutron pro Spaltung freigesetzt werden, weil viele dieser Neutronen bei anderen Prozessen verloren gehen, und es muß nach all diesen Verlusten wenigstens ein Neutron übrig bleiben. Um auf die kaskadenartige Nachrichtenübermittlung zurückzugreifen: Jede Person, die die Nachricht erhält, muß einen Telephon-Anruf tätigen, der eine andere alarmiert, wenn die Kette überhaupt fortgeführt werden soll, und, wenn ein Teil der Anrufe vergeblich ist oder den Empfänger nicht aktiviert, so muß er mehr als einen Anruf tätigen.

Die Experimente waren schwieriger als man sich zunächst vorstellte. Die Aufgabe besteht ja darin, die Sekundärneutronen inmitten der Flut von Primärneutronen zu finden, die für den Beginn der Reaktion benötigt werden. Hier war Halban in der Lage, eine Methode anzuwenden, die er bei Frisch in Kopenhagen gelernt hatte, wo er für ein Jahr gewesen war. Im Prinzip besteht die Methode darin, daß man eine Neutronenquelle in die Mitte einer uranhaltigen Flüssigkeit bringt, und die Zahl der Neutronen in verschiedenen Abständen von dieser Quelle mißt (Abb. 7).

Die Zahl der Neutronen nimmt ähnlich wie Licht mit der Entfernung von der Quelle ab. Diese Zahl nimmt noch rascher ab, wenn einige Neutronen

## Entscheidung im Experiment: Gibt es die Kettenreaktion?

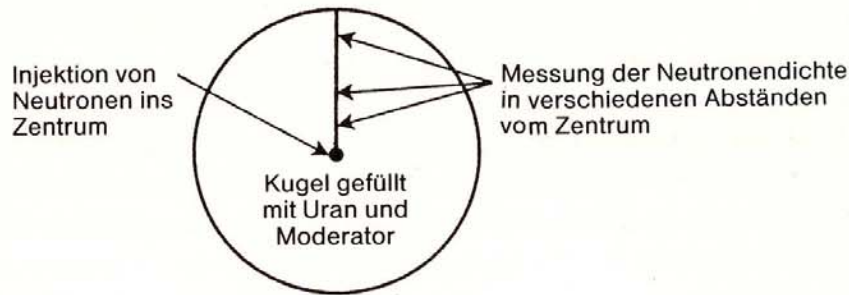


Abb. 7. Schematische Darstellung der Messung von Sekundärneutronen bei der Kernspaltung

von der Flüssigkeit absorbiert werden ähnlich wie Licht im Nebel. Mit Neutronenabsorptionsmessungen kann man deshalb bestimmen, in welchem Ausmaß Flüssigkeiten absorbieren (entsprechend der Dicke des Nebels), und das war es, was Frisch, Halban und ein Däne namens Henrik Koch in Kopenhagen gemacht hatten.

Die Pariser Gruppe füllte ihren Behälter jetzt mit einer Uranylнитratlösung und danach zum Vergleich mit einer Ammoniumnitratlösung. Eine Abnahme der Neutronen-Intensität durch Absorption trat in beiden Fällen auf. Besonders wichtig war für die Experimentatoren der Umstand, daß nach außen hin, am Behälterrand (im Abstand von ca. 20 cm von der Neutronenquelle) im Falle des Uranylнитrats sich mehr Neutronen befanden als in dem des Ammoniumnitrats. Der Überschuß mußten die Sekundär-Neutronen sein, nach denen sie suchten.

Das Team überprüfte das Experiment noch einmal und publizierte sofort. Am 8. März raste Kowarski zum Flughafen Le Bourget und sandte den Brief an die *Nature*, die eine raschere Publikation versprach als die französischen *Comptes Rendus*, und diese Zeitschrift erschien am 15. März.

Fermi, Szilard und ihre Mitarbeiter machten etwa gleichzeitig die gleiche Entdeckung in der Columbia Universität in New York, aber wegen der möglichen militärischen Bedeutung hielten sie sich auf Szilards Initiative hin mit der Publikation zurück.

Szilard war gerade dabei, sein Geheimpatent bei der britischen Admiralität zurückzuziehen, als die Neuigkeiten über die Kernspaltung verbreitet wurden, und seine alten Besorgnisse wurden zu neuem Leben erweckt. Eine seiner ersten Ideen war, Nachrichten über mögliche Kettenreaktionen von Deutschland fern zu halten, und er schlug eine freiwillige Nachrichtensperre über die Spaltung vor, um den Nazis die Forschungsergebnisse der Länder, die sie bedrohten, vorzuenthalten, - Ergebnisse, die so lange von ihnen verwendet werden konnten, wie an der üblichen wissenschaftlichen Praxis der

## Entscheidung im Experiment: Gibt es die Kettenreaktion?

freien Veröffentlichung festgehalten wurde. Bohr unterstützte diese Idee, und Blackett sicherte Szilard zu, daß man der Mithilfe der Royal Society in London vertrauen könne.

Am 2. Februar schrieb Szilard an Joliot, um ihn für das Projekt anzuwerben, aber umsonst. Die französische Reaktion war zunächst Überraschung und dann Ablehnung. Goldschmidt, der in dieser Zeit am *Collège de France* arbeitete, gab die Gründe dafür an:

„Der freie Meinungs austausch war in der Kernphysik stets gewährleistet und hatte gelegentlich sogar schon den Charakter eines Wettrennens, bei dem einige Tage mehr oder weniger den Unterschied zwischen dem Ruhm der Entdeckung und dem der weniger befriedigenden Bestätigung bedeuteten.“

Offensichtlich war die Gruppe in Paris nicht in Stimmung, die Hoffnung auf den Ruhm aufzugeben, und trotz Joliots Besorgnissen über die Fortschritte des Nazismus konnte Szilards Brief die Publikation nicht aufhalten. Zur Entschuldigung könnte angeführt werden, daß ihre Absichten mehr auf industrielle als auf militärische Anwendungen gerichtet waren.

Auch nachdem der französische Brief vom 15. März in der *Nature* erschienen war, versuchte Szilard, die Resultate der *Columbia University* zurückzuhalten. Sie waren zwar schon an die *Physical Review* abgesandt, aber der Herausgeber war gebeten worden, mit dem Publizieren bis zur Lösung der Frage nach freiwilliger Zensur zu warten. In Anbetracht der französischen Publikation wurde Szilard aber von seinen Kollegen überstimmt und ihre Zuschriften erschienen am 15. April. Sein Plan hatte zu nichts geführt. 1939 erschienen mehr als hundert Arbeiten aus der Spaltungsforschung, von aufsehenerregenden Zeitungsartikeln ganz abgesehen. Später, nachdem der Krieg ausgebrochen war, mußten Tausende von Wissenschaftler natürlich eine totale Publikationssperre akzeptieren.

Eine der Zuschriften an die *Physical Review* enthielt die Schätzung von zwei Sekundärneutronen pro Spaltung. Also ein Neutron stand für die Fortführung der Kette zur Verfügung, während das andere verloren gehen durfte; das dürfte gut genug sein. Eine noch ermutigendere Darstellung von (im Mittel) 3,5 Sekundär-Neutronen war von den Franzosen in einer weiteren Zuschrift an die *Nature* am 22. April mitgeteilt worden, aber einige Monate später ergab eine Nachrechnung, in der ein theoretischer Fehler berichtigt wurde, eine Erniedrigung auf 2,6. Der heute akzeptierte Wert beträgt 2,5. Eine ähnliche Publikation erschien zu dieser Zeit auch in Rußland.

Etwa gegen Ende April 1939 waren also die ersten Grundlagen für eine Uran-Kettenreaktion geschaffen, und sie waren in die ganze Welt hinausposaunt worden.

Die Wissenschaftler der *Columbia University* hatten die US-Regierung sogleich über ihre ersten Ergebnisse wegen deren weitreichender Tragweite

## Entscheidung im Experiment: Gibt es die Kettenreaktion?

informiert. Auf Vorschlag eines anderen Immigranten aus Ungarn, Eugen P. Wigner<sup>1</sup>, gewann dieser Vorgang am 17. März in Washington Gestalt, und zwar in Form einer Zusammenkunft von Fermi mit einer Gruppe von Wissenschaftlern von Heer und Marine. In der ganzen Welt war dies der erste Kontaktversuch mit einer Staatshierarchie in dieser Angelegenheit, wenngleich bis auf einige Ermutigungen wenig dabei herauskam, weil Fermi selbst noch nicht recht überzeugt war. Selbst damals als die Spaltung entdeckt worden war, soll er zur Idee der Atombombe *Unsinn* gesagt und der Kettenreaktion nur eine geringe Wahrscheinlichkeit zugestanden haben.

Die Franzosen hatten in diesem Stadium noch keinen Kontakt zur Regierung gesucht, wohl aber Patentanträge bezüglich der Anwendung ihrer Entdeckungen gestellt. Ihr Motiv war nicht der persönliche Vorteil, sondern Nationalstolz; sie übertrugen das Eigentum an ihren Patenten auf öffentliche wissenschaftliche Institutionen in der Absicht, Frankreich eine Hauptrolle zu sichern für den Fall, daß die Kernkraft industriell erschlossen werden sollte.

Joliot nahm auch mit Edgar Sengier Kontakt auf, dem Präsidenten der *Union Minière du Haut-Katanga*, einer belgischen Gesellschaft, die sich mit der Gewinnung von Radium aus Uranerzen von Zaire beschäftigte. Er erhielt Uran für seine Experimente und versprach ein gemeinsames Uranbombenprojekt in der Sahara.

Die Wissenschaftler in Deutschland und Großbritannien wurden erstmals durch den Artikel von Joliot, Halban und Kowarski am 22. April in der *Nature* über die Möglichkeit einer Kettenreaktion alarmiert (die *Nature* erreichte sie vor den *Physical Review* vom 15. April). Sie nahmen sofort Kontakt mit ihren Regierungen auf.

In London bat George Thomson, vom *Imperial College*, Sohn des berühmten J.J. Thomson, einige Kollegen um ihren Rat, und binnen vier Tagen waren mehrere Dienststellen der Regierung ins Bild gesetzt worden. Die Beschaffung von Uran wurde als vordringlichster Gesichtspunkt betrachtet. Das einzige größere Lager schien das der *Union Minière* zu sein, und man beschloß, sich zu bemühen, daß diese Vorräte für Großbritannien reserviert und für Deutschland gesperrt sein sollten. Man wandte sich deshalb an Sengier, der für eine Zusammenarbeit sehr zugänglich war. Er war durch Joliot bereits über die Wirkungsmöglichkeiten von Uran informiert und versprach, die Briten über alle ungewöhnlichen Bestellungen zu verständigen, aber er hatte nur die Rückstände von der Radium-Gewinnung und wenig reines Uran zur Verfügung. Auch die Holländer erschienen auf der Bühne und erhielten von Sengier acht Tonnen Uranoxid; dies blieb während der deutschen Besatzungszeit in einem Keller in Delft versteckt und stand so nach

---

<sup>1</sup> Der bis 1933 Dozent für Physik an der heutigen Technischen Universität Berlin war (d. Übers.).

## Entscheidung im Experiment: Gibt es die Kettenreaktion?

dem Krieg einem holländisch-norwegischen Kernvorhaben als Starthilfe zur Verfügung.

In Großbritannien wurde auch mit einem gemeinsamen Forschungsvorhaben verschiedener Universitäten begonnen, obwohl mehrere führende Wissenschaftler ihre Bedenken gegenüber dem ganzen Vorhaben zum Ausdruck brachten. Sir Henry Tizard, ein Berater der Luftwaffe, sprach von einer Wahrscheinlichkeit von hunderttausend zu eins gegen eine erfolgreiche militärische Anwendung, und Frederick Lindemann, der spätere Lord Cherwell sagte zu Churchill, vielleicht unter dem Eindruck von Bohrs Argumenten, daß es mit der Anwendung einige Jahre dauern würde, und hernach doch keine außergewöhnlich starken Waffensysteme geben könne.

Deutsche Wissenschaftler waren ähnlich rasch zur Stelle wie Thomson. Als die entscheidende Ausgabe der *Nature* vom 22. April erschien, erfolgten zwei voneinander unabhängige Annäherungsversuche zu Ministerien, der eine von den Physikern Georg Joos und Wilhelm Hanle von der Universität Göttingen, und der andere von den Physikochemikern Paul Harteck und Wilhelm Groth von der Universität Hamburg. Hartecks Fachinteresse stammte aus seiner Tätigkeit fünf Jahre zuvor bei Rutherford im *Cavendish*.

Joos und Hanle schrieben an das Erziehungsministerium, wo Professor Abraham Esau, trotz seines hebräischen Namens ein Nazi-Parteigänger, sofort eine Besprechung für den 29. April einberief, an der mehrere hervorragende Physiker teilnahmen. Eins der wesentlichen Ergebnisse war die Beschlagnahme des begrenzten deutschen Uranvorrats. Nachrichten von dieser Besprechung sickerten nach Großbritannien durch und lösten dort einige Beunruhigung aus.

Harteck und Groth schickten am 24. April einen Brief an das Kriegsministerium: „Wir nehmen uns die Freiheit, Ihre Aufmerksamkeit auf die neueste Entwicklung in der Kernphysik zu lenken, die es nach unserer Meinung möglich macht, einen Sprengstoff herzustellen, der um viele Größenordnungen stärker ist als konventionelle Sprengstoffe.“

Diese Botschaft durchlief den Ministerialapparat und landete schließlich bei Kurt Diebner, einem ausgebildeten Kernphysiker, der wie Esau bereit war, dem Naziregime zu Diensten zu sein. Er setzte sich selbst als Chef eines Kernforschungsamtes im Heereswaffenamt ein, obwohl ihm sein Vorgesetzter sagte: „Hör mit Deinem Atomquatsch auf.“

Es gab also zwei rivalisierende Initiativen in verschiedenen Ministerien und beide in Händen von ergeizigen Leuten, die in einem Kernprogramm die Möglichkeit für die eigene Karriere sahen. Im Sommer 1939 verdrängte Diebner Esau und verschaffte sich freie Bahn, Deutschlands Kriegsprojekt in Angriff zu nehmen. Während dieser internen Machtkämpfe erfolgten praktisch keine wissenschaftlichen oder technologischen Entwicklungsarbeiten zur Kernspaltung.



## Entscheidung im Experiment: Gibt es die Kettenreaktion?

Russische Wissenschaftler verfolgten gleichfalls die Nachrichten über die Kernspaltung, aber offenbar mit wesentlich weniger Engagement. Sie waren an der Physik der Kettenreaktion eher akademisch interessiert, und diskutierten sie als industrielle Energiequelle. Sie ließen bemerkenswerterweise aber militärische Anwendungen anscheinend außer acht, obwohl sie explosive Kettenreaktionen als theoretisches Problem untersuchten. In der Akademie der Wissenschaften gab es eine Kommission für die Untersuchung des *Uran-problems*, aber keinen ernsthaften Versuch, die Regierung einzuschalten. Es gab auch keine Zensur; Zeitungsartikel über Atomenergie erschienen ohne Einschränkung. Dieser sorglose Zustand schien so lange zu bestehen, bis die russische Kernforschung durch die deutsche Invasion 1941 plötzlich unterbrochen wurde.

Auch eine andere künftige kriegführende Macht überwachte die Lage sorgfältig – Japan. Zu jener Zeit besaß es einige hervorragende Kernphysiker. Einer von ihnen, Yoshio Nishina, hatte einige Jahre bei Bohr in Kopenhagen verbracht. Ein anderer, Ryokichi Sagane, ging nach Berkeley, um bei Lawrence etwas über das Zyklotron zu erfahren. Die Japaner waren zweifellos in der Lage, ebenso intelligent über mögliche Anwendungen der Kernenergie zu theoretisieren wie ihre Kollegen in Europa und Amerika.

Aus experimenteller Sicht schien der nächste logische Schritt, nach der Messung der Ausbeute von Sekundärneutronen bei der Spaltung, der Bau eines Pilotreaktors zu sein, in dem eine sich selbst fortpflanzende Kettenreaktion abläuft. Dies wurde eines der ersten Ziele in Großbritannien, Frankreich und den USA, und später auch in Deutschland. Die Hoffnung wurde auf langsame Neutronen gesetzt, die so viel mehr Spaltungen verursachen als schnelle, weshalb dem Uran Wasser oder Paraffinwachs zur Bremsung der Neutronen beigegeben wurde. Nicht, daß dabei unmittelbar an die Produktion der Bombe gedacht wurde, aber es schien der natürliche Weg zu sein, der auch zur Kernkraft führen konnte.

War ein Kernreaktor möglich? Oder würde sich die Kette in allen denkbaren Varianten allmählich doch nur totlaufen und zu nichts führen? Wir würden dann einer Situation begegnen ähnlich der einer Tierart, deren Anzahl schrumpft bis sie erloschen ist, während wir nach einer Bevölkerungsexplosion an Neutronen suchen.

In derartigen Fällen beruht alles auf der Anzahl und dem Schicksal der Nachkommen – im Falle des Kerns der Sekundärneutronen – von den aufeinanderfolgenden Generationen. Es ist eine Frage der Geburtenziffer im Verhältnis zur Sterblichkeit. Im April 1939 war, wie oben beschrieben, mit großer Gewißheit bekannt, daß die Geburtenziffer groß genug war, aber die Sterblichkeit, das Ausmaß des Verlustes an Neutronen, war ungewiß.

Die Frage ist die: Nimmt die Anzahl der Neutronen von einer Generation zur nächsten zu oder ab? Es ist deshalb angebracht, das Verhältnis der

## Entscheidung im Experiment: Gibt es die Kettenreaktion?

Anzahl aufeinanderfolgender Generationen zu betrachten. Dies nennt man den Neutronenmultiplikationsfaktor, der gewöhnlich mit  $k$  bezeichnet wird. Wenn sich beispielsweise die Anzahl von Generation zu Generation verdoppelt, dann gilt  $k=2$ , aber wenn die Zunahme 5% beträgt, so gilt  $k=1,05$ . Jede derartige Zunahme ist als Zinseszins bekannt und kann, falls unkontrolliert, zur Explosion führen, während eine Abnahme, mit  $k$  kleiner als eins, ein allmähliches zu Endegehen impliziert.

Die potentiellen Kernreaktorstruktureure von 1939 fingen also an, die  $k$ -Werte der von ihnen beabsichtigten Substanzen zu messen in der Hoffnung,  $k$ -Werte größer als eins zu erreichen. Die Experimente betrafen Untersuchungen über das Schicksal von Neutronen, die entweder in die Substanzmasse selbst oder aber in einzelne Konstruktionsteile eindringen.

Dann ist noch eine weitere Überlegung erforderlich, für die ein Freudenfeuer eine Parallele darstellt. Ein offenes Feuer muß eine bestimmte Größe erreicht haben, ehe es selbständig brennen kann; wenn es zu klein ist, wird zuviel Wärme abgestrahlt und geht an die Umgebung verloren anstatt die Verbrennung aufrechtzuerhalten. In ähnlicher Weise muß ein Kernreaktor bis zu einer bestimmten Mindestgröße aufgebaut werden, die man die *kritische Größe* nennt, um zu große Neutronen-Verluste an die Umgebung zu vermeiden. Unterhalb der kritischen Größe arbeitet er nicht; oberhalb kann er sozusagen aufflammen. Die kritische Größe kennzeichnet die Menge, bei der sich der Reaktorinhalt im Gleichgewicht befindet, wo also der Gesamtverlust an Neutronen (unrentable Absorption plus Schwund) genau gleich der Zusatzproduktion ist. Die gleiche Vorstellung gilt für die Atombombe.

Es müssen also zwei Bedingungen erfüllt sein, bevor Selbsterhaltung einer Kettenreaktion erzielt werden kann:

- der  $k$ -Wert muß größer als eins sein;
- die kritische Größe muß erreicht sein.

Falls der  $k$ -Wert kleiner als eins ist, läuft sich die Kette tot. Eine Vergrößerung der Reaktormasse nutzt dann gar nichts; es existiert dann keine kritische Größe. Falls der  $k$ -Wert aber größer als eins ist, gibt es stets eine Stelle, an der der Reaktor *kritisch* wird, wenn man seine Größe stetig erhöht. (Dem technisch vorgebildeten Leser soll hier klargestellt sein, daß  $k$  den Neutronen-Multiplikationsfaktor für die unendlich große Anlage bedeutet, also  $k=k_{\infty}$ .)

Francis Perrin, der sich Joliot's Gruppe angeschlossen hatte, wird gelegentlich das Verdienst zugeschrieben, er sei im Frühjahr 1939 der erste gewesen, der den wichtigen Begriff der kritischen Größe eingeführt habe, aber in Wahrheit hinkte er Szilard um fünf Jahre hinterher, der ihn in seinem geheimen britischen Patent von 1934 einbezogen hatte. Sicherlich war Joliot unabhängig darauf gekommen und wandte ihn dann auf solche Anordnungen an, die die Franzosen untersuchten. Er veranschlagte, daß einige vierzig Tonnen

## Entscheidung im Experiment: Gibt es die Kettenreaktion?

Uran erforderlich sein würden, ehe diese Anlagen kritisch werden, so daß sie ziemlich groß werden würden. Obwohl dieser Wert auf mageren Informationen beruhte, war er doch von richtiger Größenordnung; dreieinhalb Jahre später enthielt der erste Kernreaktor etwa 50 Tonnen Uran.

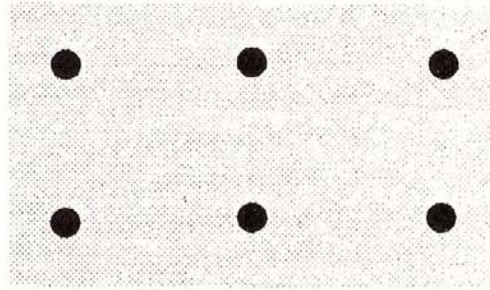
Die Anlagen, wie sie in jenen ersten Tagen untersucht wurden, waren im allgemeinen noch recht plump. Fermi und Szilard begannen einfach damit, Uranverbindungen in Wasser aufzulösen. Die Franzosen füllten Kupferkugeln mit feuchtem Uranoxid und versenkten diese in Wasserbehälter. Thomson und sein Mitarbeiter Philip Moon machten ähnliche Experimente und versuchten es auch allein mit Uranoxidkugeln, also ohne Wasser, mit der Idee, auch Kettenreaktionen mit schnellen Neutronen auszulösen. Das Uranmetall wäre dem Uranoxid vorzuziehen gewesen, aber zu jener Zeit war dies eine chemische Seltenheit, die nur in sehr geringen Mengen existierte; Mark Oliphant von der *Birmingham University* begann die Möglichkeiten für eine Herstellung in größerem Umfang zu untersuchen.

Alle drei Gruppen dieses Arbeitsgebietes merkten im Laufe ihrer Arbeiten unabhängig voneinander, daß es an Stelle einer gleichmäßigen Verteilung des Urans im Moderator besser wäre, die beiden Komponenten zu trennen. Fermi versuchte es mit dem Aufhängen von etwa 50 Kanistern mit Uranoxid in einem Wasserbad, während die Franzosen umgekehrt Paraffinwachsklumpen in Uranoxid in regelmäßigen Abständen verteilten. Eine derartige Anordnung nennt man ein *Gitter* (Abb.8). Das war eine bedeutsame Erfindung, die heute in fast allen Reaktoren benutzt wird, aber es ist nicht bekannt, wer sie zuerst hatte.

Der Hauptgrund für die Verwendung der Gitter ist die große Empfindlichkeit von Neutronen gegenüber unproduktiven Einfangprozessen durch das Uran selbst, sofern sie nur teilweise, also noch nicht vollständig abgebremst sind. In den 1939er Experimenten war es deshalb wünschenswert, daß ein vom Uran produziertes Neutron möglichst lange durch den Moderator läuft und dabei vollständig abgebremst wird, bevor es einem anderen Uranatom begegnet. In Fermis Gitteranordnung beispielsweise wird ein Neutron aus einem Urankanister vollständig abgebremst bevor es den nächsten Kanister erreicht.

Den verschiedenen Gruppen begann auch klar zu werden, daß Wasser oder Paraffinwachs ein schlechter Moderator sein könnte, denn die Wasserstoffatome, die sie enthalten, sind zwar ideale Neutronenbremsen, aber sie verursachen auch empfindliche Neutronenverluste durch Absorption. Hierauf hatte Plaçzek hingewiesen, als er Fermi und Szilard im Juni 1939 besuchte. Szilard dachte an Graphit als eine mögliche Alternative und schlug einen Abänderungsplan vor, aber Fermi war für den Sommer über fortgegangen und war ohnehin mehr an Höhenstrahlung interessiert. Szilard fehlten die Mittel, seinen Weg allein einzuschlagen, und als Folge davon ergab sich

## Entscheidung im Experiment: Gibt es die Kettenreaktion?



**Abb. 8.** Gitterartige Anordnung von Brennelementen (*schwarze Punkte*) im Moderator (*graue Fläche*). Zunächst wurden Brocken des Brennmaterials in den Moderator eingebettet. Heute werden die Brennelemente als Stäbe in den Moderator eingeführt. Die grundsätzliche Idee besteht darin, daß die Neutronen nach ihrem Austritt aus einem Brennelement total abgebremst worden sind, bevor sie auf das nächste Brennelement treffen

eine Unterbrechung von etwa neun Monaten, während der niemand in den USA versuchte, eine Kettenreaktion in Gang zu bringen.

Plaček brachte seinen Gesichtspunkt auch bei den Franzosen vor, aber sowohl die Briten als auch die Franzosen fuhren fort, mit ihren Uranoxid/Wasser- bzw. Uranoxid/Paraffinwachsenordnungen zu arbeiten. Im August erzielten die Franzosen mithilfe einer fünfzig Zentimeter dicken feuchten Uranoxidkugel im Wasserbad einen bedeutsamen Erfolg. Mit der von ihnen verwendeten Methode brachten sie eine Neutronenquelle in die Mitte der Kugel und bestimmten die Neutronenzahlen im Wasserbad. Aus ihren Ergebnissen konnten sie den Beweis für eine Kettenreaktion erbringen. Die Ketten waren kurz, starben rasch ab und waren weit entfernt von einer verwertbaren Energieproduktion, aber es waren eben dennoch Ketten. Dies war das letzte Vorkriegsexperiment der Franzosen, und ihr Bericht wurde gleichermaßen von den Briten und Amerikanern als auch von den Deutschen eingesehen; danach hielten sie ihre Arbeit geheim.

Eine andere bedeutende Arbeit über die Spaltung erschien in jenem August, und zwar von Bohr und Wheeler. Darin werden die Gedanken näher ausgeführt, die Bohr zu der Annahme veranlaßt hatten, daß es eher das Uranisotop  $^{235}\text{U}$  als  $^{238}\text{U}$  ist, das die Spaltung durch langsame Neutronen erfährt. Die Theorie dieser Arbeit versetzte sie in die Lage vorherzusagen, welche anderen Spezies (Kernarten) durch langsame Neutronen gespalten werden könnten, und zwar einschließlich solcher Spezies, die noch gar nicht entdeckt worden waren. Zu ihnen gehörte das Hauptisotop vom Plutonium,  $^{239}\text{Pu}$ . Die Arbeit war deshalb richtungweisend für eine der wesentlichen Entwicklungen im kommenden Krieg, die Plutoniumbombe, und im freien Schrifttum stand sie jedermann zur Verfügung.