

7.1 GROSSVERSUCHE ZUR VORBEREITUNG DER KONSTRUKTION EINES URANBRENNERS

von

W. HEISENBERG und K. WIRTZ

Max Planck-Institut für Physik, Göttingen

7.1.1 Theoretische Grundlagen

Unter einem Uranbrenner* versteht man eine Anordnung aus Uran und Bremsmittel, in der eine steuerbare Kettenreaktion von Spaltungsprozessen an den Atomkernen des Urans abläuft. Das Bremsmittel ist dabei notwendig, um die Spaltneutronen möglichst schnell an den Resonanzlinien des ^{238}U vorbeizuführen, in denen sie sonst absorbiert würden und für die Reaktionskette verloren gingen. Es ist daher auch zweckmäßig, Uran und Bremsmittel räumlich zu trennen, damit die Neutronen erst, wenn sie thermisch geworden sind, wieder ins Uran zurückdiffundieren. In einer solchen Anordnung kann die Anzahl der Neutronen im wesentlichen durch die folgenden Prozesse verändert werden:

1. Ein Neutron kann bei höheren Energien im ^{238}U und bei beliebiger Energie im ^{235}U einen Spaltungsprozeß hervorrufen und dabei Neutronen freimachen.
2. Es kann an einer Resonanzstelle von ^{238}U eingefangen werden und den Kern ^{239}U bilden, der dann weiter durch β -Zerfall in ^{239}Np und ^{239}Pu übergeht.
3. Es kann im Bremsmittel eingefangen werden.
4. Es kann durch die Oberfläche des Brenners entweichen.

Die Kettenreaktion kann nur stattfinden, wenn die Prozesse 1 ebenso häufig oder häufiger sind als die Prozesse 2, 3, 4 zusammengenommen. Prozeß 4 spielt eine um so geringere Rolle, je größer die Substanzmenge ist, um die es sich handelt. Bei der Konstruktion eines Uranbrenners besteht also die erste Aufgabe darin, eine Anordnung zu finden, bei der die Prozesse 1 häufiger sind als 2 und 3 zusammen.

Die im folgenden beschriebenen Großversuche dienten dazu, nachzuprüfen, ob dieses Ziel bei bestimmten Anordnungen erreicht werden kann; auch kann man dabei die wichtigsten Materialkonstanten in der Kombination bestimmen, in der sie für die Konstruktion des Uranbrenners gebraucht werden.

Alle Versuche dieser Art wurden nach dem folgenden Schema aufgebaut: Die gewählte Anordnung aus Uran und Bremssubstanz befindet sich in einem großen, meist zylindrischen oder kugelförmigen Gefäß. Im Zentrum dieses Gefäßes liegt eine Neutronenquelle. Das Gefäß ist umgeben von einer Hülle aus einer geeigneten Bremssubstanz, in den meisten Fällen einfach Wasser.

* In Amerika wird hier das Wort „Uranium Pile“ verwendet, das insbesondere für die kleineren Anlagen, die noch keine merkbare Erwärmung zeigen, besser ist als Uranbrenner; trotzdem wird dieser Ausdruck im folgenden für alle Apparaturen verwendet, da er sich im Kriege eingebürgert hat.

Um die Bilanz zwischen den Prozessen 1, 2 und 3 experimentell festzulegen, genügen dann die folgenden Messungen: Man bestimmt die Anzahl der pro Zeiteinheit von der Neutronenquelle ausgehenden Neutronen, etwa dadurch, daß man das Gefäß zunächst leer läßt und die Dichteverteilung der thermischen Neutronen im Bremsmittel des Außenraums (also meistens im Wasser) mit Hilfe irgendwelcher Indikatoren ausmißt. Die Gesamtmenge der Neutronen außen sei N_0 . Dann bringt man die gewählte Anordnung von Uran und Bremsmittel in das Gefäß und bestimmt die Gesamt-Neutronenmenge innen (N_i) und außen im Bremsmittel des Mantels (N_a). Bezeichnet man den Absorptions-Koeffizienten für thermische Neutronen im äußeren Bremsmittel mit ν_0 , so ist die Anzahl der pro Zeiteinheit von der Quelle ausgesandten Neutronen offenbar $N_0 \nu_0$. Da beim Vollversuch $N_a \nu_0$ Neutronen absorbiert werden, müssen im Innern des Gefäßes $\nu_0 (N_a - N_0)$ erzeugt worden sein; der effektive Neutronenproduktions-Koeffizient $\bar{\nu}$ der Anordnungen beträgt also:

$$\bar{\nu} = \frac{N_a - N_0}{N_i} \nu_0. \quad (1)$$

Wenn $\bar{\nu} > 0$ ist, so überwiegen die Prozesse 1 über 2 und 3. Wenn jedoch $\bar{\nu} < 0$ ist, überwiegen 2 und 3.

Die Formel (1) bedarf bei der praktischen Anwendung noch gewisser Korrekturen. Erstens gehen von der Quelle ja nicht thermische, sondern energiereiche Neutronen aus. Diese energiereichen Neutronen erfahren eine gewisse Vermehrung dadurch, daß sie Spaltungen in ^{238}U -Kernen hervorrufen, die von ihnen getroffen werden. Für diese Vermehrung ist zu korrigieren. Zweitens wird der Überschuß von Neutronen im Innern in Form von schnellen Neutronen produziert. Man muß ihn also mit der Anzahl der schnellen, nicht der thermischen Neutronen im Innern vergleichen.

Um den ersten Effekt zu berücksichtigen, multipliziert man N_0 mit einem Faktor Y , der angibt, um wieviel die Anzahl der primären Neutronen durch Spaltung von ^{238}U erhöht wird. Dieser Faktor muß durch besondere Messungen oder durch Berechnungen auf Grund der Untersuchungen von STETTER und LINTNER² (vgl. auch Ziff. 7. 2) bestimmt werden. Den zweiten Effekt kann man dadurch in die Formel (1) aufnehmen, daß man N_i mit einem Faktor e^w multipliziert, wobei w die Wahrscheinlichkeit dafür bedeutet, daß ein schnelles Neutron während des Bremsvorgangs in ^{238}U eingefangen wird (Prozeß 2). Dieser Faktor ist meistens rechnerisch auf Grund der Messungen

¹ W. HEISENBERG, Die Möglichkeit technischer Energiegewinnung aus der Uranspaltung. I. Forschungsbericht 1939. Unveröffentlicht. - W. HEISENBERG, Bericht über die Möglichkeit technischer Energiegewinnung aus der Uranspaltung. II. Forschungsbericht 1940. Unveröffentlicht.

² W. HEISENBERG, Über die Möglichkeit der Energieerzeugung mit Hilfe des Isotops 238. Forschungsbericht. Unveröffentlicht. — W. BOTHE u. A. FLAMMERS-FELD, Über die Vermehrung thermischer und schneller Neutronen in Uran. Forschungsbericht 1941. Unveröffentlicht. — G. STETTER u. K. LINTNER, Schnelle Neutronen im Uran. Der Zuwachs durch den Spaltprozeß und der Abfall durch unelastische Streuung. Forschungsbericht 1941. Unveröffentlicht. — G. STETTER, Schnelle Neutronen im Uran. Forschungsbericht 1942. Unveröffentlicht.

von VOLZ, HAXEL³ und SAUERWEIN⁴ und theoretischer Überlegungen von FLÜGGE⁴ (vgl. auch Ziff. 4. 5) bestimmt worden. Die verbesserte Formel lautet schließlich:

$$\bar{\nu} = \frac{N_a - N_0 Y}{N_i} e^{-w \nu_0}. \quad (2)$$

Der in dieser Weise bestimmte Wert von $\bar{\nu}$ ist ein Maß für die Güte der Anordnung. Eine Anordnung ist offenbar um so besser, je größer $\bar{\nu}$ ist. Dabei hängt $\bar{\nu}$ natürlich auch noch von der Gesamtdichte der Anordnung ab, d. h. eine reine Erhöhung der Dichte würde eine Erhöhung von $\bar{\nu}$ ergeben, ohne daß damit grundsätzlich in der Bilanz der Prozesse 1, 2, 3 etwas gebessert worden wäre. Man wird daher am besten etwa $\bar{\nu}/\rho$ (ρ = Dichte) als geeignetes Maß für die Güte einer Anordnung betrachten. Die im folgenden beschriebenen Großversuche geben daher in ihrer historischen Reihenfolge geordnet im wesentlichen eine Reihe nach wachsenden Werten von $\bar{\nu}/\rho$ (Tab. 4, S. 157).

In USA (Smyth-Report) wird anstelle von $\bar{\nu}$ der sog. Multiplikationsfaktor k als Kriterium für die Güte der Anordnung verwendet. k gibt an, um wieviel sich im Mittel eine Neutronengeneration von der Entstehung bis zur Absorption vermehrt. $k > 1$ bedeutet vermehrungsfähige, $k < 1$ vermehrungsunfähige Substanzanordnung. Die Umrechnung von $\bar{\nu}$ auf k ist im Anhang angegeben.

Der gemessene Wert von $\bar{\nu}$ kann dann auch mit dem theoretischen Wert verglichen werden, der nach den in Ziff. 7. 3 erwähnten Methoden berechnet wurde. In diese Theorie gehen als wichtigste und experimentell relativ schwer zugängliche Konstanten die folgenden beiden Größen ein: Die Anzahl X der Neutronen, die im gewöhnlichen Uran pro eingefangenes thermisches Neutron durch Spaltung frei werden (ein Uranbrenner aus gewöhnlichem Uran ist natürlich nur möglich, wenn X größer als 1 ist. Dabei hängt X auch vom Reinheitsgrad des benutzten Urans ab, wird also durch Verunreinigungen herabgesetzt). Ferner eine Konstante, die die Resonanzabsorption in ²³⁸U mißt. Die Resonanzabsorption war als Funktion der Schichtdicke von SAUERWEIN⁴ gemessen worden; dabei waren diese Messungen in bezug auf den Gang mit der Schichtdicke genauer als hinsichtlich der Absolutwerte. Der Neutronenproduktions-Koeffizient $\bar{\nu}$ hängt aber so empfindlich von X und dem absoluten Wert der Resonanzabsorption ab, daß man für die experimentelle Bestimmung dieser Größen am besten die Messungen von $\bar{\nu}$ benutzt. Jeder Großversuch ergibt eine Beziehung zwischen X und der Resonanzabsorption. Trägt man diese

³ H. VOLZ, Über die Absorption des Urans im Resonanzgebiet. Forschungsbericht 1941. Unveröffentlicht. — H. VOLZ u. O. HAXEL, Über die Absorption von Neutronen im Uran. Forschungsbericht 1941. Unveröffentlicht.

⁴ S. FLÜGGE, Berechnung des Bruchteils von Neutronen, der in einem Uran-Wasserstoffgemisch in der Resonanzlinie absorbiert wird. I., II., III. Forschungsbericht 1940. Unveröffentlicht. — S. FLÜGGE u. K. SAUERWEIN, Untersuchungen über den Resonanzeinfang von Neutronen beim Uran. I., II. Forschungsbericht 1942. Unveröffentlicht. — K. SAUERWEIN, Untersuchungen über den Resonanzeinfang von Neutronen beim Uran. Forschungsbericht 1941. Unveröffentlicht.

Beziehung in einem Diagramm als Kurve auf, so müssen sich die aus den verschiedenen Großversuchen gewonnenen Kurven alle in einem Punkt schneiden, aus dem der Wert von X und der Betrag der Resonanzabsorption zu bestimmen ist. Praktisch schneiden sich die Kurven wegen der Unvollkommenheit der Theorie und der Messungen nicht genau in einem Punkt. Man kann aber als Ergebnis der Messungen als besten Wert für X für das in Deutschland verwendete U-Metall etwa

$$X = 1,18 \quad (3)$$

ansehen.

Wenn man für die thermischen Neutronen den Gesamt-Absorptionsquerschnitt in gewöhnlichem Uran und den Anteil kennt, der davon auf die Spaltung in ^{235}U entfällt (vgl. Ziff. 4. 4), so kann man aus dem Verhältnis die Anzahl der Neutronen berechnen, die im Mittel bei einem Spaltungsprozeß an ^{235}U ausgesandt werden. Die Absorptionsmessungen in Uran ergeben für den effektiven Absorptionsquerschnitt pro Uranatom⁵:

$$\sigma_{\text{abs}} = 6,2 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2. \quad (4)$$

Für den Spaltungsquerschnitt haben Messungen von v. DROSTE und anderen etwa den Wert

$$\sigma_{\text{sp}} = 3,3 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 \quad (5)$$

geliefert. Daraus folgt als Neutronenzahl X_{235} pro Spaltungsprozeß in ^{235}U :

$$X_{235} = 1,18 \cdot \frac{6,2}{3,3} = 2,2. \quad (6)$$

Diese Zahl bezieht sich auf die Spaltung durch thermische Neutronen. Bei schnellen Neutronen könnte die Zahl etwas höher sein.

Wenn man Anordnungen mit $\bar{\nu} > 0$ konstruiert hat, so kann man einen energieliefernden Uranbrenner bauen, sobald man nur die Anordnung hinreichend stark vergrößert. Der Bau eines Uranbrenners ist also von diesem Augenblick an eine reine Materialfrage. Da es im Hinblick auf die Kostbarkeit der Materialien zunächst erwünscht erscheint, den Uranbrenner möglichst klein zu halten, entsteht als nächstes Problem die Frage, wie groß die Anordnung mindestens gemacht werden muß, damit sie selbständig brennt. Diese „kritische Größe“ hängt außer von $\bar{\nu}$ in erster Linie von der sogenannten effektiven Diffusionskonstante \bar{D} ab. Man kann nämlich nach BOTHE⁶ das Verhalten der Neutronen im Innern des Uranbrenners in grober Näherung durch die effektive Diffusionsgleichung beschreiben:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \bar{D} \Delta n + \bar{\nu} n. \quad (7)$$

n bedeutet dabei die Anzahl der Neutronen pro ccm; die Konstante \bar{D} oder die Länge $l = \sqrt{\frac{\bar{D}}{\nu}}$ gibt ein Maß dafür, wie schnell die Spaltungsneutronen

⁵ W. BOTHE u. A. FLAMMERSFELD, Forschungsbericht 1940, Unveröffentlicht. R. u. K. DÖPEL u. W. HEISENBERG, Bestimmung der Diffusionslänge thermischer Neutronen im Präparat. 38. Forschungsbericht 1940. Unveröffentlicht.

⁶ W. BOTHE, Forschungsbericht. Unveröffentlicht.

im Uranbrenner diffundieren können und ist physikalisch in erster Linie durch die Strecke bestimmt, die ein Spaltungsneutron zurücklegen kann, bevor es thermisch geworden ist. Der Verlauf der Neutronendichte im Innern des Brenners gestattet die Bestimmung dieser effektiven Diffusionskonstante und muß daher gemessen werden. Bei dem Versuch, die Ergebnisse solcher Messungen theoretisch darzustellen, ergab sich allerdings, daß die Diffusionsgleichung (7) die Verhältnisse nur sehr ungenau wiedergibt. Eine wesentlich bessere Darstellung erhält man nach BOPP⁷, wenn man das grundsätzlich recht komplizierte Problem in folgender Weise vereinfacht. Man teilt die Neutronen auf in zwei Sorten: in „thermische“ und in „schnelle“ Neutronen. Dann setzt man für jede dieser Neutronensorten eine Diffusionsgleichung an und bestimmt die eingehenden „Konstanten“ aus dem Experiment. In dieser (rechnerisch schon recht komplizierten) Weise kann man tatsächlich den experimentellen Dichteverlauf befriedigend darstellen und damit auch die kritische Größe ziemlich genau bestimmen.

Wenn man eine bestimmte Anordnung aus U und Bremsmittel vergrößert, so steigt das Verhältnis $Z = \frac{N_a}{N_0}$ an und geht bei der kritischen Größe gegen un-

endlich. Der Wert von Z ist daher auch ein bequemes Maß für die Güte einer Apparatur, d. h. dafür, wie weit man noch von der kritischen Größe entfernt ist. Z ist in der Tab. 4 (S. 157) für die verschiedenen Großversuche eingetragen, die in ihrer historischen Reihenfolge auch im wesentlichen eine Reihe von wachsenden Z-Werten ergeben.

Eine weitere Verbesserung des Uranbrenners kann dadurch erreicht werden, daß man den Brenner mit einer Substanz umgibt, die die Neutronen gut reflektiert, aber möglichst wenig absorbiert⁸. Bei den ersten Großversuchen wurde der Brenner fast stets mit Wasser oder Paraffin umgeben, jedoch ist natürlich eine Umgebung mit einer schwächer absorbierenden Substanz günstiger, wobei die Bremsung schneller Neutronen in diesen Substanzen auch eine wesentliche Rolle spielt. Daher wurden die letzten Uranbrenner in einen Graphitmantel eingebaut. Dieser Graphitmantel hat auch tatsächlich die Neutronenvermehrung erheblich heraufgesetzt.

Bekanntlich sind in Amerika große Uranbrenner gebaut worden, die kein schweres Wasser, sondern nur Graphit als Bremsmittel enthalten. Dazu war der in Deutschland benutzte Graphit nicht geeignet, da er nach Messungen von BOTHE und JENSEN⁹ einen zu hohen Absorptionskoeffizienten besaß. Allerdings wurde damals aus diesen Messungen geschlossen, daß auch reine Kohle ungeeignet sei. Als Mantel für den Uranbrenner aus D₂O konnte der Graphit jedoch gut verwendet werden¹⁰.

⁷ F. BOPP, Forschungsbericht. Unveröffentlicht.

⁸ F. BOPP u. E. FISCHER, Der Einfluß des Rückstreumantels auf die Neutronenausbeute des U-Brenners. Forschungsbericht 1944. Unveröffentlicht.

⁹ W. BOTHE u. P. JENSEN, Die Absorption thermischer Neutronen in Elektrographit. Forschungsbericht 1941. Z. Physik **122**, 749 [1944].

¹⁰ Im folgenden sind noch einige Arbeiten genannt, die theoretische Probleme des

7.1.2 Übersicht über die in Deutschland durchgeführten Großversuche

Die Reihenfolge der Großversuche wurde durch physikalische Gesichtspunkte und zu einem erheblichen Teil durch äußere, mit der Beschaffung des Materials zusammenhängende Umstände bestimmt. Wir geben im folgenden eine allgemeine historische Übersicht über die Versuche und beschreiben als Beispiel in Ziff. 7.1.3 einen solchen Versuch in den Einzelheiten.

Man kann etwa 4 Gruppen unterscheiden: einige Großversuche von mehr vorbereitendem Charakter; dann die Versuche des Physikalischen Instituts der Universität Leipzig (L_1 bis L_4 , DÖPEL und HEISENBERG); die Versuchsstelle Gottow des Heereswaffenamtes (G_1 bis G_3 , BERKEI, CZULIUS, DIEBNER, HARTWIG und HERRMANN) und die umfangreicheren Versuche des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Physik (B_1 bis B_8 , BOPP, FISCHER, HEISENBERG, WIRTZ), von denen die letzten im Zusammenhang mit dem Heidelberger KWI (BOTHE, JENSEN, RITTER) ausgeführt wurden.

Zu den vorbereitenden Großversuchen gehört der „ CO_2 -Versuch“ von HARTECK, JENSEN, KNAUER und SUESS¹¹ in Hamburg vom August 1940,

Uranbrenners behandeln. Die Titel einer Reihe weiterer Arbeiten sind nicht mehr verfügbar.

F. BOPP u. E. FISCHER, Der Einfluß des Rückstreumantels auf die Neutronenausbeute des U-Brenners. Forschungsbericht. Unveröffentlicht. — W. BOTHE, Strenge Behandlung der Diffusion in absorbierenden Mitteln. Forschungsbericht 1940. Z. Physik 118, 401, 1941; 119, 493, 1942. — K. H. HÖCKER, Berechnung der Energieerzeugung in der Uranmaschine. II. Kohle als Bremssubstanz. Forschungsbericht 1940. Unveröffentlicht. — K. H. HÖCKER, Berechnung der Energieerzeugung in der Uranmaschine. IV. Wasser als Bremssubstanz. Forschungsbericht 1940. Unveröffentlicht. — K. H. HÖCKER, Über die Anordnung von Uran und Streusubstanz in der U-Maschine. Forschungsbericht. Unveröffentlicht. — K. H. HÖCKER, Über die Abmessungen von Uran und schwerem Wasser in einer Kugelstrukturmaschine. Forschungsbericht 1943. Unveröffentlicht. — P. O. MÜLLER, Die Neutronenabsorption in Kugelschalen aus Uran. Forschungsbericht 1940. Unveröffentlicht. — P. O. MÜLLER, Berechnung der Energieerzeugung in der Uranmaschine. III. Schweres Wasser. Forschungsbericht 1940. Unveröffentlicht. — P. O. MÜLLER, Über die Temperaturabhängigkeit der Uranmaschine. Forschungsbericht 1940. Unveröffentlicht. — H. VOLZ, Über die Geschwindigkeitsverteilung der Neutronen in Gemisch von schwerem Wasser und Uran. Forschungsbericht 1941. Unveröffentlicht. — C. F. v. WEIZSÄCKER, P. O. MÜLLER u. K. H. HÖCKER, Berechnung der Energieerzeugung in der Uranmaschine. Forschungsbericht 1940. Unveröffentlicht. — C. F. v. WEIZSÄCKER, Die Energiegewinnung aus dem Uranspaltprozeß durch schnelle Neutronen. Forschungsbericht 1940. Unveröffentlicht. — C. F. v. WEIZSÄCKER, Eine Möglichkeit der Energiegewinnung aus ^{238}U . Forschungsbericht 1940. Unveröffentlicht. — C. F. v. WEIZSÄCKER, Bemerkungen zur Berechnung von Schichtenanordnungen. Forschungsbericht 1941. Unveröffentlicht. — C. F. v. WEIZSÄCKER, Über den Temperatureffekt der Schichtenmaschine. Forschungsbericht 1941. Unveröffentlicht. — C. F. v. WEIZSÄCKER, Verbesserte Theorie der Resonanzabsorption in der Maschine. Forschungsbericht 1942. Unveröffentlicht.

¹¹ P. HARTECK, H. JENSEN, FR. KNAUER u. H. SUESS, Über die Bremsung, die Diffusion und den Einfang von Neutronen in fester Kohlensäure und über ihren Einfang in Uran. Forschungsbericht 1940. Unveröffentlicht. — P. HARTECK, Versuche mit dem Kohlensäureblock; Methoden zur Anreicherung von schwerem Wasser; die experimentellen Möglichkeiten zur Trennung der Uranisotope. Forschungsbericht 1941. Unveröffentlicht.

bei dem 15 t festes Kohlensäureeis und eine relativ geringe Menge Uranoxyd (185 kg) diskontinuierlich zu einem etwa $2 \times 2 \times 2$ m großen Block zusammengebaut wurden, in dem die Diffusion, die Bremsung und der Einfang von Neutronen einer (Ra + Be)-Quelle studiert wurde. Ein Einfluß des Urans auf die Neutronenvermehrung wurde nicht beobachtet, dagegen die Bremslänge und die Diffusionslänge der Neutronen in CO_2 -Eis bestimmt. Ähnliche Messungen an einem Würfel von etwa 1 m Kante, bestehend aus 2000 Stück Paketen Natrium-Uranat ($\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7 + 6\text{H}_2\text{O}$) je 1 kg, eingepackt in Papier, das gewissermaßen zusammen mit dem Hydratwasser als Bremssubstanz diente, führte v. DROSTE¹² in Berlin (September 1940) aus. Wesentlich genauere Ergebnisse für die theoretische Auswertung lieferte ein Versuch von BOTHE und FLAMMERSFELD¹³ (BF, Mai 1941), der die Neutronenvermehrung in einem homogenen Gemisch von 4432 kg U_3O_8 und 435 kg Wasser in einem Zylinder von 992 l, der sich in einem H_2O -Streumantel befand, untersuchte und den Neutronenproduktions-Koeffizienten $\bar{\nu}/\rho$ bestimmte (vgl. Tab. 4, S. 157).

Die Leipziger Versuche¹⁴ L_1 bis L_4 (1941–42) wurden dadurch besonders wichtig, daß sie schließlich zum erstenmal positive Neutronenproduktions-Koeffizienten $\bar{\nu}/\rho$ und Vermehrungsfaktoren $Z > 1$ ergaben und damit die Möglichkeit selbständig arbeitender energieliefernder Uranbrenner bewiesen. Der erste sichere Nachweis gelang im Februar 1942; in USA (vgl. Smyth-Report) etwa um dieselbe Zeit. In USA ging von diesem Zeitpunkt ab die Entwicklung sehr rasch. Schon am 2. Dezember 1942 wurde in Chicago von FERMI und Mitarbeitern der erste selbständige Pile errichtet, in dem zum erstenmal die Kern-Kettenreaktion vor sich ging. Dies ist in Deutschland bekanntlich nie erreicht worden.

L_1 bestand aus kugelschalenförmig angeordneten Schichten von Paraffin (~ 2 cm) und Uranoxyd ($\sim 7,5$ cm). Den Kern bildete Uranoxyd. Ihn umgaben abwechselnd zwei Schichten Paraffin und zwei weitere Schichten U_3O_8 . Diese Schichtung ähnelt der gleich zu beschreibenden von B_1 und führte wie diese nicht zur Neutronenproduktion. Die einzelnen Schichten waren durch Halbkugeln aus Aluminiumblech voneinander getrennt.

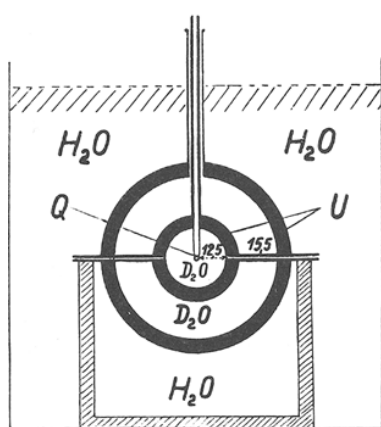
In L_2 (Abb. 45) wurden zum erstenmal 150 l schweres Wasser als Brems-substanz verwendet. Um einen D_2O -Kern von $\sim 12,5$ cm Radius lag eine Schicht von $\sim 3,5$ cm Uranoxyd, dann folgte wieder eine D_2O -Schicht von $\sim 15,5$ cm

¹² G. v. DROSTE, Bericht über einen Versuch mit 2 t Natriumuranat. Forschungsbericht 1940. Unveröffentlicht.

¹³ W. BOTHE u. A. FLAMMERSFELD, Messungen an einem Gemisch von U-Oxyd und Wasser; der Vermehrungsfaktor X und der Resonanzeinfang w . Forschungsbericht 1941. Unveröffentlicht.

¹⁴ R. u. K. DÖPEL u. W. HEISENBERG, Versuche mit einer Schichtenanordnung von Wasser und Präparat 38. Forschungsbericht 1941. Unveröffentlicht. — R. u. K. DÖPEL u. W. HEISENBERG, Versuche mit Schichtenanordnungen von D_2O u. 38. Forschungsbericht 1941. Unveröffentlicht. R. u. K. DÖPEL u. W. HEISENBERG, Die Neutronenvermehrung in einem D_2O -38-Metallschichtensystem. Forschungsbericht 1942. Unveröffentlicht. — R. u. K. DÖPEL u. W. HEISENBERG, Die Neutronenvermehrung in 38-Metall durch rasche Neutronen. Forschungsbericht 1942. Unveröffentlicht. — W. BOTHE, Bemerkungen zum Leipziger D_2O -Versuch. Forschungsbericht 1942 unveröffentlicht.

und dann eine weitere U_3O_8 -Schicht von $\sim 3,5$ cm Dicke. Die ganze Kugel befand sich ebenso wie L_1 in einem Rückstreumantel von H_2O . L_3 verwendete an Stelle von U_3O_8 U-Metallpulver der Schüttdichte 12. Die Anordnung war dieselbe wie bei L_1 , jedoch fehlte die äußere Uranschicht. Beim Versuch L_4 war sie vorhanden und bestand ebenfalls aus Uranmetallpulver. Auch bei L_2 , L_3 und L_4



$L_2 - L_4$

Abb. 45. Schema der Versuchsanordnung. Dicke der Urankugelschalen 3,5 cm. Uran und D_2O sind durch nicht eingezeichnete Wände aus Aluminiumblech getrennt. Abstandsangaben in der Figur in cm. Einzelheiten im Text.

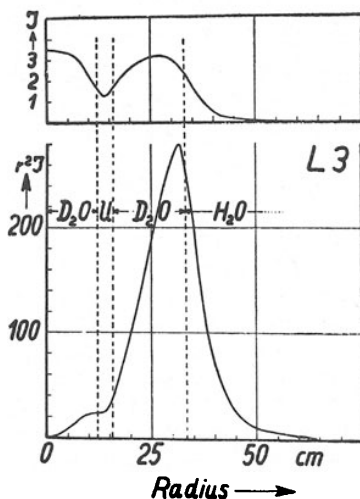


Abb. 46. Verlauf der Neutronenintensität bei L_3 im Innen- und Außenraum in Abhängigkeit vom Radius. Bis 33 cm: Innenraum; ab 33 cm: Außenraum.

waren die einzelnen Schichten durch Kugelschalen aus Aluminiumblech getrennt. Durch einen vertikal ins Innere führenden Meßschacht konnte die Neutronenquelle ins Zentrum der Kugel gebracht werden und außerdem der Verlauf der Neutronenintensität in der Schichtung verfolgt werden. Die Intensität (Abb. 46) der austretenden Neutronen wurde im umgebenden Wasserstreumantel bestimmt (vgl. die ausführliche Beschreibung derartiger Messungen im folgenden Abschnitt 7.1.3). L_4 ergab positives $\bar{\nu}/\rho$ und zum erstenmal ein Z , das deutlich > 1 war. Daten und Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 1 zusammengestellt, soweit sie noch bekannt sind.

Die Arbeitsgruppe in Gottow¹⁵ führte 3 Großversuche (G_1 bis G_3) durch. G_1 (1941) war eine Packung aus 6800 Stück Würfeln von 9,7 cm Kante aus U_3O_8 -Pulver (insgesamt ca. 25 to), die in Kästen aus Paraffin (insgesamt 4,4 to)

¹⁵ Versuchsstelle Gottow des Heereswaffenamtes (Mitarbeiter: F. BERKEI, W. BORRMANN, W. CZULIUS, K. DIEBNER, G. HARTWIG, K. H. HÜCKER, W. HERRMANN, H. POSE u. W. REXER). Bericht über einen Würfelversuch mit

Tabelle 1. Daten und Ergebnisse der Leipziger Kugelschichtversuche L_2 bis L_4 .

	Innenkugel $R = 12,5 \text{ cm}$	1. Schicht Dicke $= 3,5 \text{ cm}$	2. Schicht Dicke $= 15,5 \text{ cm}$	3. Schicht Dicke $= 3,5 \text{ cm}$	Gesamt- volumen	Mittlere Dichte ρ	Prod.-Koeff. ν	Massenprod.- Koeff. ν/ρ	vermehrungs- faktor Z
L_2	9 kg D_2O	37 kg U_3O_8	155 kg D_2O	105 kg U_3O_8	212 l	1,5	< 0 $+ 65^*$	< 0 $+ 44^*$	~ 1
L_3	9 kg D_2O	108 kg U-Pulver	155 kg D_2O	keine	159 l	1,7	0 $+ 88^*$	0 $+ 50^*$	~ 1
L_4	9 kg D_2O	175 kg U-Pulver	155 kg D_2O	580 kg U-Pulver	212 l	3,8	$+ 90$	$+ 23,5$	1,1

gefüllt wurden. Die Wandstärke des Paraffins zwischen den Würfeln betrug 2 cm. Die ganze Anordnung war in einen zylindrischen Al-Kessel von 2,50 m Querschnitt und 2,30 m Höhe eingebaut, der wiederum in Wasser als Streumantel stand. Geeignete Schächte gestatteten das Einführen des Neutronenpräparates und der Meßindikatoren. Dieser Versuch brachte den ersten Hinweis darauf, daß Würfelanordnung günstiger als Schichtenanordnungen sein könnte. Die Neutronenproduktion war negativ (vgl. Tabelle 4).

Der Versuch G_2 (1942–43) war von ganz anderer Art. Die theoretische Auswertung der bisherigen Großversuche hatte nahegelegt, U-Metallwürfel von 5 cm Kante (2,2 kg) zu versuchen. Es wurden etwa 100 Stück dieser Würfel in etwa 220 l festes D_2O -Eis (bei $-10^\circ C$) in einer Paraffin-Kugel von 37,5 cm Radius ohne sonstiges Halterungsmaterial eingefroren; äußerer Streumantel war Paraffin. Es ergab sich eine Neutronenvermehrung, die erheblich stärker war als bei dem früheren Leipziger Versuch L_4 (vgl. Tab. 4).

G_3 (1942/43) stellt einen entsprechenden Versuch in flüssigem D_2O dar. G_{3a} bestand aus derselben Kugel vom Radius 37,5 cm, die zunächst einen Streumantel von 13,5 cm D_2O besaß, der schließlich wiederum von Paraffin umgeben war. G_{3b} enthielt dagegen in einer Al-Kugel von 51 cm Radius 240 U-Würfel von 5 cm Kante (insgesamt 540 kg U-Metall) und 525 l D_2O . Das Ganze war umgeben von Paraffin. Dieser letzte Versuch brachte eine Vermehrung $Z = 2,1$ und bewies damit die Vorzüge der Würfel. In all diesen Versuchen waren die Würfel in dichtester Kugelpackung mit 8 cm gegenseitigem Abstand aufgehängt (Ergebnisse in Tabelle 4).

Uranoxyd und Paraffin (G_1). Forschungsbericht. Unveröffentlicht; sowie 2 weitere Berichte über G_2 und G_3 . — F. BOPP, E. FISCHER, W. HEISENBERG, C. F. v. WEIZSÄCKER u. K. WIRTZ, Untersuchungen mit neuen Schichtenanordnungen aus U-Metall und Paraffin. Forschungsbericht. Unveröffentlicht. — W. HEISENBERG, Auswertung der Gottower Versuche ($G_{2,3}$). Forschungsbericht. Unveröffentlicht.

* Die Produktionskoeffizienten > 0 ergaben sich, wenn eine Korrektur derart angebracht wurde, daß das in dem Brenner befindliche Halterungsmaterial zum Außenraum gerechnet wurde.

Die systematischen Versuche im Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik in Dahlem (B_1 bis B_8)¹⁶ begannen im Dezember 1940 mit horizontalen Schichtungen von Uranoxyd und Paraffin (B_1 und B_2) in einem $\sim 1,4$ m hohen Al-Zylinder von $\sim 1,4$ m \varnothing . Geringste Neutronenabsorption ergab in Übereinstimmung mit der damaligen theoretischen Erwartung der Versuch B_1 mit 27 g/cm^2 U_3O_8 in jeder Schicht, entsprechend ~ 7 cm Schichtdicke, die mit 2,1 cm dicken Paraffinschichten abwechselten (Abb. 47). Rund 16 solcher Doppelschichten mit insgesamt rund 6800 kg U_3O_8 lagen aufeinander, zum Teil stabilisiert und geebnet durch eingelegte Al-Bleche. Die ganze Anordnung war von einem Wasserstreumantel umgeben. Durch einen axialen Schacht konnten eine Neutronenquelle von 500 mg Ra + Be-Pulver sowie Indikatoren zur Intensitätsmessung ins Innere gebracht werden.

Sobald (1941/42) größere Mengen U-Metall, zunächst in Pulverform, zur Verfügung standen, wurden damit entsprechende Versuche (B_3 bis B_8) zunächst ebenfalls mit Paraffin als Bremsmaterial ausgeführt. Die horizontalen Schichten wurden in eine Al-Kugel von 28 cm Radius (Abb. 48a und 48b) eingebaut. Wiederum konnten Sonden und Neutronenquelle durch einen Schacht ins Innere gebracht werden. Drei Variationen der Schichtdicken wurden durchgemessen, deren Daten und Neutronen-

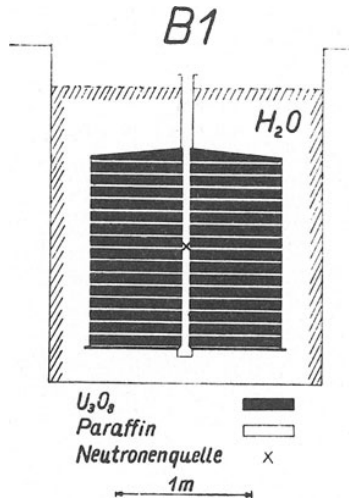


Abb. 47. Vertikalschnitt durch B_1 ; Kessel: Aluminiumblech.

¹⁶ W. HEISENBERG (unter Mitarbeit von A. DEUBNER, E. FISCHER, C. F. v. WEIZSÄCKER u. K. WIRTZ). Bericht über die ersten Versuche an der im Kaiser-Wilhelm-Institut f. Physik aufgebauten Apparatur. Forschungsbericht 1940. Unveröffentlicht. — W. HEISENBERG (unter Mitarbeit von A. DEUBNER, E. FISCHER, C. F. v. WEIZSÄCKER u. K. WIRTZ). Bericht über Versuche mit Schichtenanordnungen von Präparat 38 und Paraffin am Kaiser-Wilhelm-Institut f. Physik, Berlin-Dahlem. Forschungsbericht 1941. Unveröffentlicht. — F. BOPP, E. FISCHER, W. HEISENBERG, C. F. v. WEIZSÄCKER u. K. WIRTZ. Vorläufiger Bericht über Ergebnisse an einer Schichtenkugel aus 38-Metall und Paraffin. Forschungsbericht 1942. Unveröffentlicht. — W. HEISENBERG, Bemerkungen zu dem geplanten halotechnischen Versuch (B_6 und B_7) mit 1,5 to D_2O und 3 to 38-Metall. Forschungsbericht 1942. Unveröffentlicht. — W. HEISENBERG, F. BOPP, E. FISCHER, C. F. v. WEIZSÄCKER u. K. WIRTZ, Messungen an Schichtenanordnungen aus 38-Metall und Paraffin. Forschungsbericht 1942. Unveröffentlicht. — F. BOPP, E. FISCHER, W. HEISENBERG, K. WIRTZ, W. BOTHE, P. JENSEN, O. RITTER: Schichtenversuche mit Uranmetall in D_2O (B_6). Forschungsbericht. Unveröffentlicht. — F. BOPP, E. FISCHER, W. HEISENBERG, K. WIRTZ, Kaiser-Wilhelm-Institut Berlin; W. BOTHE, P. JENSEN, O. RITTER, Kaiser-Wilhelm-Institut Heidelberg: 3 Berichte über B_6 , B_7 . Forschungsberichte 1944 und 1945. Unveröffentlicht.

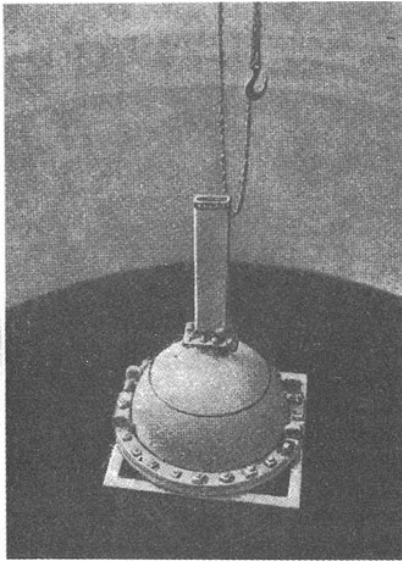


Abb. 48a. Äußere Ansicht von B_3 . Die Aluminiumkugel steht auf einem Traggerüst in einem Wasserbassin. Das Wasser des Streumantels ist nur zum Teil eingelassen. Oben auf der Kugel der Kamin zum Einführen der Neutronenquelle.

produktions-Koeffizienten in der folgenden Tabelle 2 zusammengestellt sind (vgl. auch Abb. 49 u. 50). In Übereinstimmung mit der theoretischen Erwartung ergab B_3 die geringste Neutronenabsorption. Keiner der Versuche ergab Neutronenvermehrung.

Die Versuche B_6 , B_7 (1944) und B_8 (1945) benutzten die Erfahrungen von L_{2-4} und $G_{2,3}$ und sollten die Verhältnisse bei Kombinationen von D_2O mit U-Metall systematisch klären. Als Bremsstoff diente also jetzt schweres Wasser, von dem rd. 1,5 t dem Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik zur Verfügung standen. Obwohl die Vorzüge der Würfel damals schon bekannt waren, wurden um der Systematik willen zunächst wiederum Schichten untersucht (B_6 und B_7). In einem zylindrischen Kessel aus „Elektron“-Metall (Magnesium mit geringen Al-Zusätzen, eine Legierung mit sehr geringer Neutronenabsorption) von 124 cm Querschnitt und

124 cm Höhe, umgeben von einem H_2O -Streumantel, wurden horizontale Schichten aus U-Metall-Platten übereinander angeordnet. Die Schichten waren durch geeignet geformte Magnesiumblechstücke distanziert. Eine U-Schicht be-

Tabelle 2. Daten der Schichtenkugeln B_3 bis B_6 .

Versuch	B_3	B_4	B_5
Zahl der U-Schichten	19	12	7
Schichtdicke: U in g/cm^2	18 (1,7)	39 (3,8)	75 (7,3)
(in Klammern: Dicke in cm)			
Paraffin in g/cm^2	1,44 (1,6)	1,44 (1,6)	1,44 (1,6)
(in Klammern: Dicke in cm)			
Gesamtmasse U in kg	551	740	864
Gesamtmasse Paraffin in kg	44	37	12,5
Mittlere Dichte	5,7	7,2	8,4
Neutronenproduktions-Koeffizient	— 209	— 213	— 344

Schüttdichte des U-Pulvers im Brenner: 10—11.

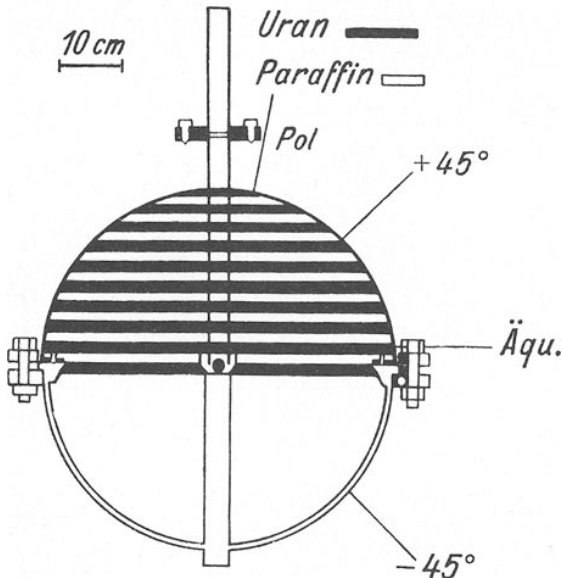


Abb. 48b. Schema des Innenaufbaus von B_3 . Schnitt durch die Schichten von Uranmetallpulver (schwarz) und Paraffin (weiß). Die Schichtung setzt sich in die untere Halbkugel fort, ist dort jedoch nicht eingezeichnet. Im Zentrum die Neutronenquelle.

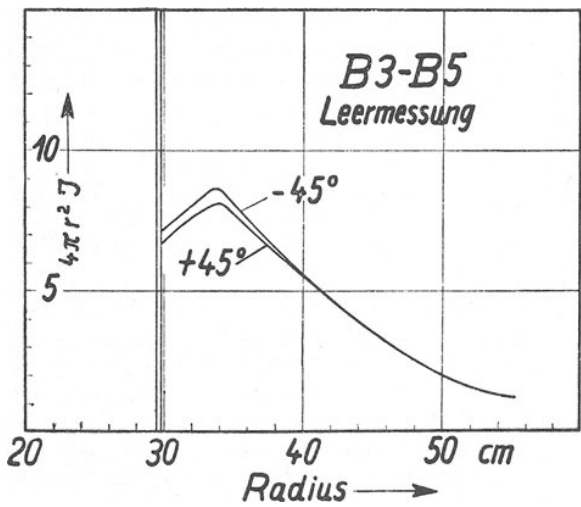


Abb. 49. Verlauf der Neutronenintensität im Außenraum (H_2O) bei leerer Anordnung (B_3 bis B_5).

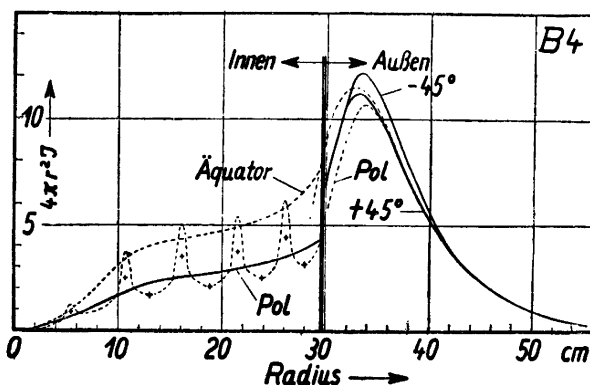


Abb. 50. Verlauf der Neutronenintensität im Innen- und Außenraum bei B_4 . In den Paraffinschichten (↓) erhöhte Intensität der thermischen Neutronen.

stand aus 9 zusammengelegten Standard-Platten von $30 \times 30 \times 1$ cm und von etwa 16 kg Gewicht und 8 Platten von $\frac{1}{4}$ dieser Größe. Die Abb. 51 zeigt eine Aufsicht auf eine Schicht solcher Platten, wie sie horizontal im Kessel lag. Der Versuch B_6 bestand aus 4 Variationen, die in der folgenden Tabelle 3 zusammengestellt sind.

Tabelle 3. Daten der Versuche B_6 und B_7

	B_{6a}	B_{6b}	B_{6c}	B_{6d}	B_7
Schichtdicke U in cm	1	1	1	2	1
Schichtdicke D_2O in cm ..	10	18	26	26	18
Anzahl der U-Schichten ..	12	7	5	5	7
Gesamtmenge U in to	2,12	1,25	0,89	1,78	1,25
Gesamtmenge D_2O in to .	$\sim 1,5$	$\sim 1,5$	$\sim 1,5$	$\sim 1,5$	$\sim 1,5$
Neutronenproduktions-					
Koeffizienten $\bar{\nu}/\rho$	+ 91	+ 145	+ 118	+ 96	+ 145
Vermehrungsfaktor Z	1,56	2,35	2,12	2,06	3,6

Es ergaben sich erwartungsgemäß positive Neutronenproduktions-Koeffizienten $\frac{\bar{\nu}}{\rho}$ und dementsprechend Vermehrungsfaktoren $Z > 1$. Die günstigste Schichtung war B_{6b} (Abb. 52), wie BOTHE und FÜNFER¹⁷ schon vorher in Modellversuchen gefunden hatten. Sie wurde in dem ebenfalls in der Tabelle angeführten Versuch B_7 wiederholt, mit dem Unterschied, daß hier zunächst ein Streumantel von Graphitkohle in einer Schicht von ~ 40 cm Dicke (insgesamt ~ 10 to Kohle) den Magnesiumkessel umgab. Die Kohle war umgeben von einem zweiten

¹⁷ W. BOTHE u. E. FÜNFER, Schichtenversuche mit Variation der U- und D_2O -Dicken. Forschungsbericht Dezember 1943. Unveröffentlicht.

Aluminiumkessel (vgl. auch Ziff. 7.1.3), der sich wiederum in H_2O befand. Die Neutronenvermehrung stieg durch diese Maßnahme auf $Z = 3,6$, was z. T. daran liegt, daß Kohle als Streusubstanz Neutronen sehr viel weniger als H_2O absorbiert⁸.

Bei diesen Schichtenversuchen war eine hinreichende Übereinstimmung mit der im Laufe der Zeit immer weiter verfeinerten Theorie (HEISENBERG,

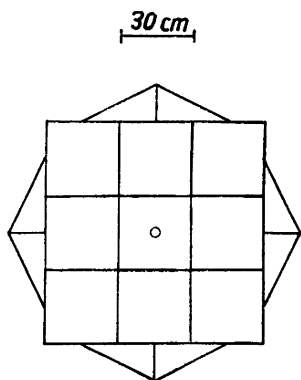


Abb. 51. Aufsicht auf eine U-Metall-Schicht von B_6 und B_7 . Die Schicht ist aus 9 Platten $30 \times 30 \times 1$ cm und 8 Stück $\frac{1}{4}$ -Platten zusammengesetzt.

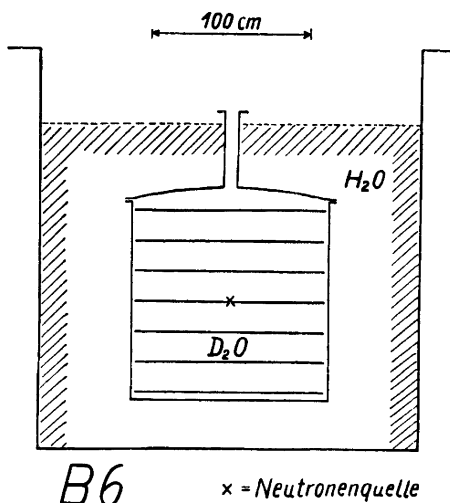


Abb. 52. Vertikalschnitt durch B_{6b} . In dem mit D_2O gefüllten Kessel liegen 1 cm dicke horizontale Schichten aus U-Metallplatten; die Schichten sind durch nicht eingezeichnete Distanzstücke aus Magnesiumblech von einander getrennt. Abstand der Schichten 18 cm.

v. WEIZSÄCKER, HÖCKER) erreicht worden. Als bester Wert für die Größe X , die Anzahl der pro eingefangenes Neutron neu entstehenden

Neutronen, ergab sich, wie schon erwähnt, $X = 1,18$. Da sich vor allem durch die Gottower Versuche herausgestellt hatte, daß Uranwürfel eine höhere Neutronenvermehrung liefern würden, wurde als nächster Versuch des Dahlemer Bunkers ein Raumgitter aus Würfeln im gleichen Magnesiumkessel mit derselben Menge D_2O und in demselben Kohlemantel geplant. Dieser Versuch (B_8), der schließlich in Haigerloch kurz vor Kriegsende durchgeführt wurde, wird im folgenden Abschnitt als Beispiel eines Großversuchs ausführlicher beschrieben.

Zur technischen Durchführung der Versuche sei noch vermerkt:

Die Versuche B_1 bis B_8 des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Physik wurden abseits vom Institut in einer kleinen Baracke ausgeführt, die für diesen Zweck gebaut und eingerichtet war. Sie enthielt im wesentlichen eine im Fußboden eingelassene „Brunnengrube“, in der die Uranbrenner aufgestellt wurden und die mit Wasser als Streumantel gefüllt werden konnte. Außerdem befanden sich

darin Pumpanlagen, Laboreinrichtungen und ein Aufbewahrungsort für die Neutronenquelle. Die folgenden Versuche B_{6a-d} und B_7 wurden in einem inzwischen (1943) am Institut selbst unterirdisch neu errichteten Bunkerlaboratorium durchgeführt, das sowohl zur Sicherung gegen Luftangriffe als auch im Hinblick auf den Schutz gegen die Strahlung selbsttätiger Uranbrenner mit 2 m dicken Eisenbetonwänden umgeben war. Es enthielt ein Hauptlabor mit „Brunnengrube“, Pumpen, Laboreinrichtungen, Belüftungs- und Heizanlagen sowie einen Lageraum für die D_2O -Tanks und die D_2O -Aufbereitungsanlage. Für den Betrieb selbsttätiger Uranbrenner waren Luftabsaugeinrichtungen für radioaktive Gase, ein ferngesteuerter Präparattransport, Fernbeobachtung durch wassergefüllte Glasdoppelfenster usw. vorgesehen. Das Bunkerlaboratorium umfaßte noch eine Werkstatt und mehrere Laboratorien für die Bearbeitung von Uranmetall, die Untersuchung des D_2O usw. Auch in Gottow war ein Speziallaboratorium in einer Baracke eingerichtet worden, und ebenfalls in Haigerloch in einer Felsenhöhle.

Schon bei Beginn der Großversuche war klar, daß schweres Wasser eine äußerst günstige Bremssubstanz für Uranbrenner ist. Die rasche Bremsung der Neutronen würde kleine Anordnungen mit verhältnismäßig geringen Substanzmengen ermöglichen. Deshalb wurde von Beginn der Arbeiten ab versucht, D_2O in größeren Mengen zu beschaffen. Die einzige Stelle, die es produzierte, war damals die Firma Norsk Hydro in Rjukan in Norwegen. Bei Kriegsbeginn betrug ihre Leistung etwa 10 l im Monat, die bis 1941 zunächst auf 120 l/Monat und später bis auf über 300 l/Monat mit Hilfe verschiedener Zusatzanlagen (vgl. Ziff. 7.4 HARTECK, Isotopentrennung in technischem Maßstab) gesteigert wurde*. 1943 wurde die Anlage zuerst durch ein Sprengkommando, dann durch einen Luftangriff zerstört. Das gelieferte D_2O (D-Gehalt etwa 99%) verunreinigte sich im Laufe der Versuche mit H_2O . Deshalb wurde im Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik in Berlin-Dahlem eine elektrolytische D_2O -Aufbereitungsanlage errichtet, die in der Lage gewesen wäre, aus 1 to D_2O im Laufe von etwa 2 Monaten einige Prozent H_2O zu entfernen. Diese Anlage war bei Kriegsende kurz vor

Tabelle 4. Massenproduktions-Koeffizienten $\bar{\nu}/\rho$ und Vermehrungsfaktoren Z der Großversuche (ρ = mittlere Dichte von Uran + Bremssubstanz; $\bar{\nu}$ = Neutronenproduktions-Koeffizient in sec^{-1}). Anordnung etwa in historischer Reihenfolge

	B_1	L_1	BF	B_2	G_1	B_3	B_4	B_5	L_2	L_3
$\bar{\nu}/\rho$:	—295	—378	—770	—575	—522	—209	—217	—344	<0	<0
Z :	—	—	—	—	—	—	—	—	~1	~1

	L_4	G_2	G_{3a}	G_{3b}	B_{6a}	B_{6b}	B_{6c}	B_{6d}	B_7	B_8
$\bar{\nu}/\rho$:	+23,5	+180	+215	+182	+91	+145	+118	+96	+145	+215
Z :	1,1	1,37	1,65	2,1	1,65	2,35	2,12	2,06	3,06	6,7

* vgl. auch: K. WIRTZ, Die elektrolytische Schwerwassergewinnung in Norwegen; zusammenfassender Vortrag 1942, unveröff.

ihrer Inbetriebnahme. Schließlich sei bemerkt, daß in Dahlem eine besondere Tankanlage zur Aufbewahrung von D_2O in Gestalt von glasierten Stahlkesseln eingerichtet worden war.

Die Gesamtergebnisse der Großversuche sind in der Tabelle 4 (Seite 158) zusammengefaßt, die deutlich die historische Entwicklung der Uranarbeiten wiedergibt.

7.1.3 Der Versuch B_8 in Haigerloch¹⁸

Die früheren Versuche hatten in Übereinstimmung mit der Theorie ergeben, daß Würfel bzw. Kugeln die besten Formen des Uranmetalls im D_2O -Brenner sind. Die günstigste Dimension der Würfel sollte nach der Theorie etwa 6–7 cm Kante sein. Von den Gottower Versuchen war jedoch eine größere Anzahl Würfel von 5 cm Kante vorhanden. Es wurde deshalb im Hinblick auf die Unmöglichkeit, genügend rasch andere Würfel zu produzieren, beschlossen, weitere Würfel von 5 cm herzustellen, um die vorhandenen zu ergänzen. Um die Versuche mit den früheren, speziell mit B_6 und B_7 , vergleichen zu können, sollten sie, wie gesagt, in demselben Magnesiumzylinder mit Kohlestreumantel wie B_7 ausgeführt werden. Hierzu waren, wenn ein möglichst günstiges räumliches Würfelgitter erzielt werden sollte, rund 680 Stück Uranwürfel erforderlich, insgesamt etwa 1,5 to. Sie mußten an Al-Drähten am Deckel des Zylinders in Ketten in das D_2O hineingehängt werden. Der Deckel des Kessels mußte umkonstruiert werden, um dieses Gewicht tragen zu können. Der Kohlestreumantel sollte sich wiederum in einem äußeren Al-Kessel befinden, der vom Wasserstreumantel umgeben war. Alle diese Gesichtspunkte führten schließlich u folgendem Aufbau des Versuchs:

a) Technischer Aufbau des Versuchs B_8 . Die Abb. 53 gibt einen vertikalen Schnitt durch den Aufbau. In einem größeren, nicht näher gezeichneten Wasserbassin im Fußboden des Labors steht auf Holzrosten der äußere zylindrische Al-Kessel von 210 cm Querschnitt, 210 cm Höhe und 5 mm Wandstärke. Oben wird ein gewölbter Deckel wasserdicht aufgeschraubt, der einen aus dem Wasser herausragenden Kamin trägt, durch den Präparat und Innensonden und das D_2O eingeführt werden. Dann kommt innen die ca. 40 cm dicke Schicht aus Graphitkohle vom Gesamtgewicht von 10 to. Sie besteht aus rechteckigen Blöcken von $5 \times 10 \times 50$ cm der Dichte 1,7. Es handelt sich um eine verhältnismäßig reine Kohle, die jedoch nicht speziell für die vorliegenden Bedürfnisse hergestellt war und deshalb wohl bei weitem nicht die Reinheit besitzen haben kann, die die von den Amerikanern für die Piles hergestellte Spezialkohle besitzen dürfte. In diesem Kohlemantel eingebaut befand sich der zylindrische Magnesiumkessel von 124 cm Breite und 164 cm Höhe und 3 mm Wandstärke.

¹⁸ F. BOPP, E. FISCHER, W. HEISENBERG, K. WIRTZ, Kaiser-Wilhelm-Institut f. Physik in Berlin bzw. Hechingen, und W. BOTHE, P. JENSEN und RITTER, Kaiser-Wilhelm-Institut, Inst. f. Physik in Heidelberg, Bericht über den Versuch B_8 in Haigerloch. Forschungsbericht 1945. Unveröffentlicht.

In diesen wurde oben ein Deckeinsatz ca. 40 cm tief eingelassen, dessen Boden zum Aufhängen der „Ketten“ von U-Würfeln diente. Dieser Boden bestand aus einer 1 cm dicken Magnesiumplatte, die nach oben durch vier Eisenstangen

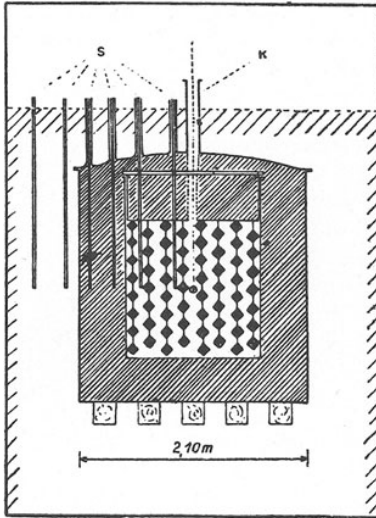


Abb. 53. Schema des Großversuchs B₈ in Haigerloch. Im Zentrum die Neutronenquelle \odot umgeben von den Uranwürfeln, die kettenförmig in schwerem Wasser hängen. Eng schraffiert der Kohlemantel, der wiederum von gewöhnlichem Wasser (weit schraffiert) umgeben ist. In der linken oberen Hälfte die Sonden S zur Bestimmung der Neutronenintensität, K = „Kamin“ zum Einfüllen des D₂O. Würfelzahl und -größe sind willkürlich gezeichnet. Ergebnisse im Text.

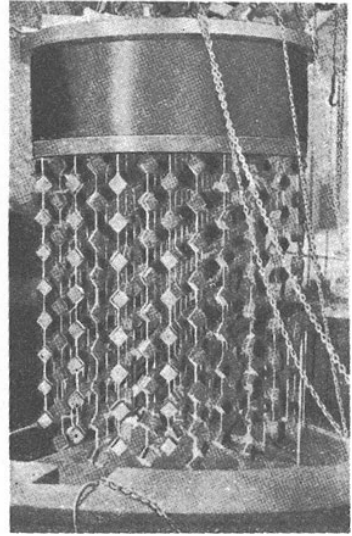


Abb. 54. Raumgitter der U-Würfel in B₈. Würfel dimensionen $5 \times 5 \times 5$ cm; Abstand nächster Nachbarn 14 cm. Die Würfel sind an 78 Ketten am Boden des auf dem Bild sichtbaren Deckeinsatzes über der Kesselanlage aufgehängt, 40 Ketten mit 9 Würfeln, 38 Ketten mit 8 Würfeln. (Dies sind weder die günstigsten Würfel dimensionen noch die günstigsten Abstände für maximales $\bar{\nu}$; vgl. Text.)

zusätzlich mit einem eisernen Tragerrüst verbunden war, das quer über dem Einsatz lag. Durch den Boden des Einsatzes wurde im Innern des Kessels ein Raum von 124 cm Höhe begrenzt, in den das schwere Wasser eingefüllt wurde, und in den die Würfelketten hineinhangen. In diesen Ketten — insgesamt 78 Stück — waren die U-Würfel durch Al-Draht verbunden, der durch eine Bohrung im Deckelboden hindurchgeführt und dort befestigt wurde. In den Deckeinsatz selbst wurde ebenfalls Kohle eingefüllt und dadurch der Kohlestreumantel in den verlängerten Magnesiumkessel hinein fortgesetzt. Axial ist ein Meßkanal eingebaut, der gestattet, die Neutronenquelle in das Zentrum des Brenners zu bringen. Der komplizierte Deckeinsatz, der notwendig war, um die Uranketten aufhängen zu können, die Kohleschicht darauf zu bringen und

zugleich das D_2O sicher einzufüllen, erforderte eine ziemlich große Materialmenge, nämlich insgesamt 32 kg Magnesiummetall und 75 kg Eisen im Traggerüst. Das Eisen war von der Uran- D_2O -Mischung mehr als 40 cm entfernt, störte die Vermehrung also nicht mehr allzu sehr, mußte aber bei der Auswertung der Messungen berücksichtigt werden. Durch den Kamin sollten später auch die Cd-Schieber eingeführt werden, die dann, wenn die kritische Größe erreicht werden kann, zweckmäßig zur Stabilisierung der Anlage verwendet werden.

Der Zusammenbau erfolgte derart, daß zuerst in den großen Al-Kessel (1) die Bodenschicht Kohle kam, darauf der Magnesiumkessel (3) zentrisch aufgestellt und dann die seitliche Kohlefüllung bis zu seinem oberen Rand geführt wurde. Dann wurde dieser Teil der Apparatur abgedeckt und darüber an einem Kran der Deckeinsatz aufgehängt und an seinem Boden die vorbereiteten U-Metall-Würfelketten befestigt. Abb. 54 zeigt die am Einsatz fertig aufgehängten Ketten, die eine räumlich dichteste Kugelpackung der Würfel ergeben, kurz ehe sie vom Kran in den Kessel eingelassen wurden.

Nach dem Einlassen wurde der Deckeinsatz mit Kohle gefüllt und der Rest der äußeren Kohleschicht vollendet. Nach Aufbringen des äußeren Kesseldeckels wurde das mit Antikorrosionsmitteln versehene Wasser des Streumantels eingelassen, und erst wenn sich die Apparatur als wasserdicht erwies, wurde durch den Kamin und den zentralen Kanal der Schichtung das D_2O in das Innere gepumpt. Dabei wurde die Zunahme der Neutronenintensität I durch Silberindikatoren verfolgt. Die Neigung der Kurve $1/I$, aufgetragen gegen die Menge des eingefüllten D_2O , läßt sofort erkennen, bei welcher Füllung die Intensität ∞ , d. h. selbständige Reaktion des Brenners, voraussichtlich überschritten würde. Bei dem vorliegenden Versuch B_8 wurde dieser Labilitätspunkt nicht erreicht.

b) Messung der Neutronenintensität. Wie in Ziff. 7. 1. 1 erläutert, verlangt die Auswertung des Uranbrenners die Angabe des Integrals N_0 der Gesamtneutronenzahl im Außenraum, die von der Quelle bei leerer Anlage geliefert wird, d. h. bei nicht eingefülltem Uranmetall und D_2O ; ferner dasselbe Integral N_a bei zusammengebautem Brenner und das Integral N_i der Neutronenzahl über den ganzen Innenraum, d. h. die Füllung Uranwürfel + D_2O . $N_a : N_0$ ergibt den Vermehrungsfaktor Z . Ursprünglich wurden die Neutronenintensitäten von Punkt zu Punkt durch Dysprosiumindikatoren (~ 300 mg Dysprosiumoxyd auf einer Al-Unterlage) ausgemessen, der Intensitätsverlauf in Kurven aufgetragen und diese Kurven entsprechend der Symmetrie der Anordnung über den ganzen Raum integriert. Später war das Ziel, durch geeignete Form des Indikators einen Teil der Integration gleich bei der Messung vorzunehmen. Dieser Weg wurde zuerst von BOTHE und FÜNFER¹⁷ beschritten. Für zylindrische Brenner führte dies zu folgendem Verfahren: Dysprosiumoxyd wurde in verd. HNO_3 bis zur Sättigung aufgelöst. (Etwa 10 g Dy_2O_3 in 100 ccm.) Diese Lösung wurde in Glasröhren gefüllt, die parallel zur Zylinderachse, also senkrecht, in den äußeren und Innenraum der Anordnung eingeführt wurden (vgl. Abb. 53). Entsprechend dem Aufbau des Versuchs B_8 gab es folgende Integrationsräume: im äußeren Wasser den Wassermantelraum und das über dem gewölbten Al-Deckel stehende Wasser, den Wasserdockelraum; entsprechend den Kohlemantel und den Kohledeckel; außerdem den Innenraum. Jeder

Raum wurde einzeln ausgemessen. Im Wassermantelraum z. B. reichten die vertikalen Flüssigkeitssonden von der Wasseroberfläche bis zum „Äquator“ des Brenners, d. h. in die Höhe, in der innen die Neutronenquelle hing. Die Dysprosiumlösung wurde bis zur Sättigung aktiviert. Dann wurde die Sonde entleert, die Lösung umgeschüttelt und in einem Glaszählrohr von etwa 0,2 mm Wandstärke mit Flüssigkeitsmantel (Konstruktion BOTHE und FÜNFER) gemessen. Derartige Sonden wurden in jeden einzelnen Raum in verschiedenen Abständen R von der Zylinderachse eingebracht. Sie ergaben in jedem Raum einen bereits in Richtung der Zylinderachse integrierten Intensitätsverlauf in Abhängigkeit von R , der dann nur noch über $2\pi R$ integriert zu werden brauchte, um die Gesamtintensität der oberen Hälfte der Anordnung zu liefern. Die Beiträge der einzelnen Räume wurden mit gewissen Korrekturen versehen und mit den jeweiligen Produktionskoeffizienten multipliziert. Ihre Summe ergibt das Gesamtintegral. Für den Innenraum wurde entsprechend verfahren. Für jeden Integrationsraum mußten demnach beim Aufbau des Brenners Indikatorenkanäle vorgesehen werden. Sie bestanden für die Innenräume Kohle und D_2O aus dünnen, wasserdicht eingeführten Al-Röhren, in die die Glassonden gesteckt wurden. Von BOPP wurde außerdem eine weitere Vereinfachung der Integration dadurch erzielt, daß durch geeignete Wahl der Sondenorte in Abhängigkeit von R und der Sondenquerschnitte für einen zusammenhängenden Integrationsraum alle Sonden vor der Messung zusammengemischt werden konnten und mit Hilfe einer einzigen Messung sofort das Integral über die Neutronenzahl dieses Raumes erhalten wurde; hierbei wurde das bekannte Gaußsche Verfahren zur Integration ausgenutzt, bei dem man das Integral durch die mit geeigneten Gewichten versehenen Funktionswerte an einigen ausgezeichneten Punkten ausdrückt. Alle Intensitäten wurden auf eine Eichstrahlenquelle reduziert.

c) Ergebnisse der Messungen. Es ergaben sich folgende Werte in willkürlichen Einheiten. $N_0 = 16,9$; $N_a = 113,4$ und $N_i = 846$. Der Quotient $N_a : N_0$ liefert den Vermehrungsfaktor von B_8 :

$$Z = 6,7.$$

Der Neutronenproduktions-Koeffizient ergibt sich nach Ziff. 7. 1. 1 aus folgender Beziehung:

$$\bar{\nu} = \frac{N_a - N_0 Y}{N_i} \cdot e^{-w} \cdot \nu_{H_2O} = \frac{9,65}{846} \cdot 0,96 \cdot 3920 = 430 \text{ sec}^{-1}.$$

Daraus folgt der Massenproduktions-Koeffizient von B_8 (vgl. auch Ziff. 7. 1. 2, Tab. 4):

$$\frac{\bar{\nu}}{\varrho} = 215.$$

7. 1. 4 Folgerungen für den energieliefernden Uranbrenner

Die Übersicht über die im Vorhergehenden beschriebenen Großversuche zeigt, daß man durch Vergrößerung der beschriebenen Apparaturen — bei dem letzten Haigerlocher Versuch würde eine relativ geringe Vergrößerung genügen — den kritischen Punkt erreichen und damit zu einem energieliefernden Brenner kommen kann. Es entstand daher die Frage, welche Vorgänge eintreten, wenn man den kritischen Punkt erreicht und wie man dafür sorgen kann, daß man den Ablauf der Kettenreaktion stets in der Gewalt behält. Das, was beim Überschreiten des kritischen Punktes geschieht, kann man qualitativ am einfachsten aus der Diffusionsgleichung (7) ablesen mit dem Vorbehalt, daß diese Gleichung (7) die tatsächlichen Verhältnisse nur recht ungenau darstellt. Die Beschreibung der genaueren und zum Teil schon recht komplizierten Theorie würde den Rahmen dieses Berichtes überschreiten. Wenn man annimmt, daß die Gleichung (7) im Innern des Brenners gilt, und daß die Eigenschaften des Bremsmittels im Außenraum dafür sorgen, daß am Rande der Anordnung (die zur Vereinfachung als kugelförmig angenommen wird) eine Grenzbedingung von der Form

$$\frac{d}{dr}(nr) = -\frac{\gamma}{l}(nr) \quad (\gamma = \text{const})$$

gilt — was auch nur eine grobe Annäherung ist —, so erhält man die folgenden Typen von Lösungen: Wenn der Radius R der Anordnung kleiner ist als die

kritische Größe R_k : $\left(\text{ctg} \frac{R_k}{l} = -\gamma\right)$, so ist eine Neutronenquelle von der

Stärke Q im Zentrum umgeben von der Neutronendichte im Brenner:

$$n(r) = \frac{Q}{4\pi Dn} \left(\cos \frac{r}{l} + \alpha \sin \frac{r}{l} \right); \quad \alpha = \frac{\sin \frac{R}{l} - \gamma \cos \frac{R}{l}}{\cos \frac{R}{l} + \gamma \sin \frac{R}{l}}.$$

Der Vermehrungsfaktor Z wird dann:

$$Z = \frac{1 + \gamma \frac{R}{l}}{\cos \frac{R}{l} + \gamma \sin \frac{R}{l}}.$$

Ist jedoch der Radius R größer als der kritische Wert, so wächst schließlich die Dichte zeitlich über alle Grenzen, und zwar nach der Formel:

$$n(r) \sim e^{\beta t} \frac{\sin r/l'}{r}, \quad \text{wobei } \text{ctg} \frac{R}{l'} = -\gamma \text{ und } \beta = \frac{\bar{D}}{l'^2} - \frac{\bar{D}}{l^2}.$$

Der für das exponentielle Anwachsen charakteristische Koeffizient β hängt dabei von der Differenz zwischen dem tatsächlichen Radius und dem kritischen Radius in der Form ab:

$$\beta \approx \frac{2}{v} \frac{(R - R_k)}{R_k}.$$

Das „Anlaufen“ der Neutronendichte geschieht also um so langsamer, je weniger die tatsächliche Größe die kritische Größe überschreitet. Außerdem wird, wie aus amerikanischen Arbeiten hervorgeht, die Anlaufzeit noch dadurch erheblich erhöht, daß zum Teil die beim Spaltungsprozeß freiwerdenden Neutronen die Atomkerne nicht sofort, sondern mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung verlassen. Obwohl die Anzahl dieser zeitlich verzögerten Neutronen sehr gering ist, verglichen mit der Anzahl der im Mittel bei der Spaltung entstehenden Neutronen, kann wegen der empfindlichen Abhängigkeit des $\bar{\nu}$ von X der Einfluß dieses Effekts auf die Anlaufzeit sehr groß sein.

Das exponentielle Anwachsen der Neutronendichte findet praktisch dadurch ein Ende, daß mit diesem Anwachsen eine Erwärmung der Apparatur Hand in Hand geht. Diese Erwärmung kann in zweierlei Weise zur Stabilisierung des Brenners bei einer bestimmten Temperatur führen: Zunächst bewirkt die Erwärmung des Urans eine Verbreiterung der Resonanzlinien durch Dopplereffekt und damit eine Erhöhung der Resonanzabsorption. Die Temperaturerhöhung und damit die verstärkte Resonanzabsorption wird so lange fortgeschritten, bis die tatsächliche Größe des Brenners mit der kritischen Größe bei der betreffenden Temperatur übereinstimmt. Der Brenner wird sich also von selbst auf einer bestimmten Temperatur stabilisieren, wobei diese Temperatur durch die Größe des Brenners gegeben ist. Eine weitere Stabilisierung wird man zweckmäßig nach einem Vorschlag von JOLIOT dadurch erreichen können, daß man Cadmiumschieber in die Apparatur bringt, die die thermischen Neutronen und insbesondere auch die Neutronen etwas höherer Temperaturen stark absorbieren. Bei einer Temperaturerhöhung der in das Uran eindringenden thermischen Neutronen wird das Häufigkeitsverhältnis der im Cadmium absorbierten Neutronen, verglichen mit den im Uran absorbierten Neutronen, zugunsten der ersteren verschoben. Dies führt zu einer Verminderung der Spaltungsprozesse und damit zur Stabilisierung. Bei dieser Form der Stabilisierung nutzt man die Erwärmung des schweren Wassers aus, die allerdings zunächst sehr viel geringer ist als die Erwärmung des Urans. (Der Hauptteil der Spaltungsenergie wird im Uran in Wärme umgesetzt, während nur der kleinere Teil der Energie, der auf die Neutronen entfällt, zur Erwärmung des schweren Wassers verwendet wird.) Erst durch Wärmeleitung vom Uran her wird ein größerer Teil der bei der Spaltung erzeugten Wärme nachträglich auch ins D_2O übergeführt. Die Temperatur der thermischen Neutronen wird sich nach der Temperatur des schweren Wassers, nicht nach der des Urans richten.

Wie groß die Cadmiumschieber sein müssen, um eine zuverlässige Stabilisierung der Anlage zu geben, bedarf im einzelnen Fall noch einer näheren Untersuchung. Rein technisch sind die Cadmiumschieber schon deswegen besonders zweckmäßig, weil man durch Heraus- oder Hineinschieben des Cadmiums die kritische Größe und damit die Temperatur, auf der sich der Brenner stabilisiert, willkürlich einstellen kann.

Wendet man die allgemeinen Überlegungen auf die speziellen numerischen Verhältnisse des Haigerlocher Brenners (B_0) an, so erhält man etwa folgendes Bild: Nach den Messungen ist die Diffusionslänge l der inneren Anordnung aus U-Würfeln und D_2O etwa 35 cm. Der Kohlemantel sorgt dafür, daß — wie aus

dem gemessenen Werte $Z = 6,7$ hervorgeht — $\gamma = 0,824$ ist. (Dabei wird die Haigerlocher Anordnung als Kugel vom Radius 71 cm betrachtet.) Der kritische Punkt ($Z \rightarrow \infty$) würde also erreicht worden sein bei $\operatorname{ctg} \frac{R}{35} = -0,824$, d. h.

$R \approx 80$ cm, was einer Vergrößerung des Volumens um nicht ganz die Hälfte entspricht. Praktisch war allerdings nicht die direkte Vergrößerung geplant, da mehr D_2O nicht zur Verfügung stand, sondern es sollten auch in den Kohlemantel U-Stücke gebracht werden, was wahrscheinlich auch zur Erreichung des kritischen Punktes genügt hätte.

Hinsichtlich der Energieerzeugung des Uranbrenners muß noch folgender Punkt beachtet werden: Die Temperatur, auf die sich der Brenner einstellt, hängt, wie gesagt, von der kritischen Größe, also etwa von der Stellung des Cadmiumschiebers ab. Diese Temperatur wird von dem Brenner eingehalten, unabhängig davon, wieviel Energie dem Brenner entzogen wird. Die Frage der Energielieferung hängt also allein davon ab, wieviel Energie aus dem Brenner etwa durch Wärmeleitung, Konvektion usw. abgeführt werden kann. Wenn viel Energie entzogen wird, so sinkt die Temperatur im Innern um einen ganz geringen Betrag. Damit sinkt die kritische Größe, was zu einer so starken Steigerung der Neutronenproduktion und der Spaltungsprozesse führt, daß die entzogene Energie sofort nachgeliefert wird. Bei der Frage der technischen Verwendung des Uranbrenners zur Energieerzeugung, etwa für Dampfmaschinen und dgl., müssen also zunächst Fragen des Wärmeübergangs^{18a}, dann auch reine Materialprobleme wie Korrosionsschutz des Urans u. ä. behandelt werden. Die Darstellung dieser Probleme würde aber den Rahmen dieses Berichtes überschreiten.

ANHANG

Daten für die in Deutschland verwendeten Substanzen

1. Einfangsquerschnitte der Bremsmaterialien für thermische Neutronen.

Substanz:	H	D	He	Be	C	O
$\sigma \cdot 10^{24} \text{ cm}^2$:	0,24	0,0015	0	fast 0	0,006 ₄	0,002

2. Einfangsquerschnitte der Haltermaterialien für thermische Neutronen

Substanz:	Al	Mg	Fe
$\sigma \cdot 10^{24} \text{ cm}^2$:	0,42	0,31	1,6

3. Wirkungsquerschnitte des Urans, $\sigma \cdot 10^{24} \text{ cm}^2$ für thermische Neutronen

- a) Absorption 0,1 bis 0,2
- b) Spaltung 3,3
- c) unbekannte Absorption 2,8

totaler Absorptionsquerschnitt 6,2

^{18a} W. Fritz u. E. Justi, Bericht über die Leistung der Uranmaschine. Forschungsbericht 1942. Unveröffentlicht.

FOLGERUNGEN FÜR DEN ENERGIELIEFERNDEN URANBRENNER 165

4. Zusammenstellung der Werte von ν

Substanz	ν in sec^{-1}
Uranmetall	69 000
U-Pulver	46 600
U_3O_8 -Pulver	13 100
Paraffin	4 570
H_2O	3 920
Kohle	143
D_2O	24

5. Umrechnung vom Produktions-Koeffizienten $\bar{\nu}$ auf den Multiplikationsfaktor k des Smyth-Reports. Es ist

$$k = \frac{\nu_i + \bar{\nu}}{\nu_i},$$

wobei ν_i = mittlerer Absorptionskoeffizient für thermische Neutronen im Brenner. Es ist $k > 1$ für $\bar{\nu} > 0$; $k < 1$ für $\bar{\nu} < 0$. Daraus wurden die Multiplikationsfaktoren einiger Versuche bestimmt:

Versuch	B_1	L_4	G_2	B_{6b}	B_7	B_8
$\bar{\nu} (\text{sec}^{-1})$	— 950	90	360	266	266	430
k	0,92	1,01	1,09	1,08	1,08	1,11

7.2 DER BEITRAG DER SCHNELLEN NEUTRONEN ZUR NEUTRONENVERMEHRUNG IM URAN

VON

O. HAXEL,

Max Planck-Institut für Physik, Göttingen

7.2.1 Einleitung

In einem „Uranbrenner“, der Deuterium oder andere leichtatomige Substanzen zur Abbremsung der Neutronen enthält, wird die Kern-Kettenreaktion überwiegend von der Spaltung des ^{235}U durch thermische Neutronen getragen. Die Spaltung des ^{235}U durch schnelle Neutronen spielt keine Rolle, da der Spaltquerschnitt für schnelle Neutronen mehrere hundertmal kleiner ist als der für thermische Neutronen. Dagegen bringt die Spaltung des 139mal häufigeren Isotops ^{238}U einen Beitrag, der insbesondere dann ins Gewicht fällt, wenn der Brenner aus Schichten aufgebaut ist, die so dick sind, daß die darin entstehenden schnellen Neutronen eine merkliche Wahrscheinlichkeit haben, auf Uranatome zu treffen, bevor sie in die Bremssubstanz austreten. Da man den Brenner aus einem anderen Grunde, nämlich zur Verringerung des Neutronenverlustes durch Resonanzabsorption sowieso aus Schichten aufbauen muß, wird man den hierbei