

8 Kernspengstoffe I: Anreicherung eines Uranisotops

Eine der ersten Maßnahmen von General Groves war der Erwerb eines großen Landstrichs in Tennessee, der für die Fabrikationsanlage ausersehen worden war. Im Auftrag des Heeres bauten dort Industriefirmen eine Gasdiffusionsanlage (*K-25*) und eine elektromagnetische Trennanlage (*Y-12*) sowie ein großes Kraftwerk einschließlich einer ganzen neuen Stadt und den Forschungslaboratorien, die später unter dem Namen *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) weltberühmt wurden.

Die beiden Anlagen wurden zehn Kilometer voneinander entfernt in getrennten Tälern gebaut, so daß ein Unfall in der einen Anlage die andere nicht beeinträchtigen würde.

Üblicherweise testet man ein neues Verfahren zunächst in verkleinertem Maßstab in einem Pilotprojekt, um erst danach eine Großanlage zu errichten. Unerwartete Schwierigkeiten können so erkannt und in der endgültigen Ausführung vermieden werden. Die von Groves zu errichtenden Anlagen waren so neuartig, daß dieses Prinzip unter normalen Bedingungen zweimal richtig gewesen wäre. Aber der vermutete Wettlauf mit den Nazis hätte dadurch verloren gehen können.

Es wurde entschieden, das Stadium der Pilotanlagen zu übergehen, zuerst für die Gasdiffusionsanlage und dann auch für die elektromagnetische Anlage. Groves hatte erklärt, er sei zu diesen Abkürzungsverfahren z. T. auch wegen seines Vertrauens in die Fähigkeit und Tatkraft von Lawrence bereit. Dennoch ließ dieser Weg Schwierigkeiten erwarten, die sich dann auch vielfältig ergaben.

Die elektromagnetische Anlage, *Y-12*, lief als erste an. Der Bau begann im Februar 1943 und im August war die erste Einheit fertiggestellt. Die erforderliche Forschung war im Labor von Lawrence in Berkeley ausgeführt worden, und die dortigen Wissenschaftler standen in enger Zusammenarbeit mit den betreffenden Firmen. Fünfzig von ihnen wurden von *Tennessee Eastman*, die für den Betrieb der Anlage zuständig war, tatsächlich ganz übernommen.

Die Anlage *Y-12* sollte aus dem natürlichen Uran, das nur etwa 0,71% des gewünschten ^{235}U -Isotops enthält, dies nach den Wünschen der Bombenkonstrukteure zu mehr als 90% anreichern. Lawrence hatte ursprünglich gehofft, dies in einem einzigen Schritt zu erreichen, aber das war für Groves viel zu optimistisch, so daß *Y-12* als ein Zweistufensystem geplant wurde. *Alpha*, die

Kernsprengstoffe I: Anreicherung eines Uranisotops



Abb. 11. Massenverhältnisse der Uranisotope bei den elektromagnetischen Trennanlagen

erste Stufe, sollte eine Anreicherung bis auf etwa 15% ergeben, *Beta*, die zweite Stufe, würde den Prozeß vervollständigen. Die etwa 20fache Konzentrationszunahme in den Alphaeinheiten der Anlage verlangte eine Abtrennung von etwa 95% des unerwünschten Isotops ^{238}U (Abb. 11), so daß für die Betastufe nur ein viel kleinerer Teil von etwa 5% des Urans zur Weiterverarbeitung zurückblieb und sie entsprechend kleiner ausgelegt werden konnten. Schließlich wurden neun Alphaeinheiten gebaut (wegen ihres Erscheinungsbildes wurden sie *Rennbahnen* genannt), deren Produkte in acht Betaeinheiten eingebracht werden konnten.

Der eigentliche Vorgang spielte sich in *Calutrons* genannten Vorrichtungen ab, in denen Uranionen im Hochvakuum elektrische und magnetische Felder durchlaufen, die die Isotope ^{235}U und ^{238}U trennen. Die getrennten Stoffe wurden dann in besonderen Auffangstellen (Kollektoren) gesammelt und von Zeit zu Zeit entnommen.

Eine Vorstellung über Umfang und Komplexität der Anlage kann man aus dem Umstand gewinnen, daß für den Betrieb 22000 Leute benötigt wurden. Jede Alpharennbahn war 122 Fuß lang, 77 Fuß breit und 15 Fuß hoch (ca. $37 \times 23 \times 5$ m), sie enthielt nicht weniger als 96 Kammern mit den Calutrons.

Niemals zuvor war ein so großes Raumvolumen so hoch evakuiert worden; die riesigen Elektromagnete hätten fast 100000 Tonnen Kupfer verbraucht, was ein großes Opfer für andere Kriegsprojekte bedeutete. Wegen dieser Schwierigkeiten wurde Kupfer durch Silber ersetzt; 86000 Tonnen wurden vom US-Schatzamt geborgt und nach dem Krieg mit nur geringem Schwund zurückgegeben.

In gewissem Sinn war das Verfahren sehr unwirtschaftlich: Nur etwa 10% der injizierten Uranatome erreichten die Auffangstellen (Kollektoren) des Calutrons. Der Rest verteilte sich überall in den Kammern und seine Rückgewinnung verlangte die mühevollen Arbeit, sie in Einzelteile zu zerlegen und

Kernsprengstoffe I: Anreicherung eines Uranisotops

mit Säuren abzuwaschen. Dazu brauchte es große chemische Anlagen. Andere chemische Arbeitsgänge waren die Vorbereitung des Rohmaterials für die Calutrons (Urantetrachlorid) sowie die Reinigung und Präparierung der getrennten Isotope aus den Kollektoren. Die Berkeley-Physiker hatten der Chemie zunächst nur ungenügende Aufmerksamkeit geschenkt, aber durch die Entscheidung für die zweistufige Anreicherungsmethode im Y-12 kamen ihnen die Wichtigkeit und die Problematik der Chemie rasch zu Bewußtsein. Das in den Einzelteilen der Betaeinheiten verstreute Uran würde ja wertvolles, in den Alphaeinheiten bereits mühevoll teilangereichertes Uran sein. Deshalb war seine Rückgewinnung und erneute Eingabe in die Betaeinheiten unerlässlich.

Nach einer Besichtigung von Y-12 im Mai 1943 sagte Lawrence zu seinen Kollegen aus Berkeley: „Wenn Sie sich den Umfang dieses Betriebes anschauen, dann werden Sie ernüchtert sein und einsehen, daß wir dies nun durchziehen müssen, ob wir wollen oder nicht . . . Diese Rennbahnen termingerecht zum Laufen zu bringen, wird eine scheußliche Arbeit werden. Wir müssen sie vollbringen“.

Es erwies sich wirklich als eine *scheußliche Arbeit*, und es erforderte die ganze Begeisterung von Lawrence, während der düsteren Zeiten der Enttäuschungen den Fortgang der Entwicklung und die Arbeitsmoral aufrechtzuerhalten.

Als die erste Alphaeinheit Ende 1943 in Betrieb genommen wurde, fing sie schon nach wenigen Stunden an, unregelmäßig zu laufen, um dann völlig auszufallen. Die Magneten hatten Kurzschlüsse. Dies war die erste einer langen Serie von Pannen in den Bauelementen. Besonders frustrierend war dabei, daß auch wegen eigentlich geringfügiger Probleme, – in einem Falle war es eine Maus –, für die dadurch notwendigen Arbeiten eine Kammer erst geöffnet und dann wieder stundenlang abgepumpt werden mußte. Dennoch wurde mithilfe der zweiten Alphaeinheit Anfang 1944 erstes Material für experimentelle Arbeiten hergestellt und die *Würmer* wurden nach und nach beseitigt.

Die Wissenschaftler wurden ständig für Problemerkennung und Lösung in Anspruch genommen; die Frage, ob sie von den Kollegen aus der Industrie langsam verdrängt wurden, stellte sich also hier nicht wie in anderen Projekten. Außerdem wurden sie nach der Übereinkunft in Quebec 1943 durch fünfunddreißig Wissenschaftler aus Großbritannien verstärkt, die hochwillkommen geheißen und völlig in das Projekt integriert wurden, einschließlich ihrer Bewegungsfreiheit zwischen Berkeley und Oak Ridge. Oliphant übernahm sogar von Lawrence, wenn dieser nicht anwesend war, die Leitung in Berkeley.

Das Gasdiffusionsprojekt kam unterdessen nur langsam voran. Von der *Columbia University* hatte sich Dunning bereits mit der *M. W. Kellogg Com-*

Kernsprengstoffe I: Anreicherung eines Uranisotops

pany ins Benehmen gesetzt hinsichtlich der Entwicklung einer großtechnischen Ausrüstung, wie sie für eine Fabrik benötigt werden würde, und diese Firma wurde 1942 mit der Planung der Fabrik selbst beauftragt. Für diesen Zweck wurde eine Tochtergesellschaft, die *Kellex Company*, gegründet und Percival C. Keith unterstellt. Auch eine Betriebsgesellschaft für die künftige Fabrik war von Nöten, wofür die gewaltige *Union Carbide and Chemicals Corporation* einbezogen wurde. Die Anlage sollte gleichfalls gewaltig werden: Das Gebäude, das sie aufnehmen, wurde das Größte der Welt.

Die Planung war eine Sache, aber die Ausführung durch Firmen war eine andere, solange die Konstruktion der Grundelemente so unbestimmt blieb. 1943 wurde deshalb mit großem Aufwand eine Vielzahl von Erprobungsstücken, auch einige ziemlich große, gebaut. Die Bauarbeiten für die Anlage K-25 begannen nicht vor Mitte 1943, erheblich später als die für Y-12.

Das widerspenstigste Problem dabei war die Herstellung der Diffusionsmembranen bzw. Trennwände, von denen der ganze Vorgang abhängt. Die Trennwände müssen porös wie bei einem Tontopf sein, wobei die tausende von Millionen von Poren von mikroskopischer und ziemlich einheitlicher Größe sein sollen: Große Poren stellen nur Löcher dar, durch die das Uranhexafluorid ohne Unterscheidung der Isotope hindurchtritt. Außerdem muß die Wand stabil sein, um dem Druck stand zu halten, der das Gas hindurchpreßt, und die Poren dürfen nicht als Folge von Korrosionsschäden verstopfen.

Die Wissenschaftler testeten hunderte von Materialien, von denen viele für diesen Zweck eigens hergestellt wurden, um der äußerst schwierigen Kombination von Eigenschaften gerecht zu werden. Millionen Quadratmeter wurden davon benötigt, aber sogar die Herstellung von Quadratzentimetern gelang nur mit Glück und war nicht programmierbar. Im zweiten Halbjahr 1942 wurde festgestellt, daß Nickel ein akzeptables Wandmaterial ist, das auch der Korrosion durch Uranhexafluorid widersteht, aber wie konnte man es porös machen?

In Ureys Laboratorium in der *Columbia University*, das ab Mai 1943 SAM (*Substitute Alloy Materials*) hieß, quälte man sich mit den Problemen ab. Anders als die Wissenschaftler von Berkeley, die für Y-12 arbeiteten, drohte Urey und seinen Mitarbeitern die Gefahr, Hinterbänkler und von den zentralen Anliegen der Firmen, die die Anlage bauen und betreiben sollten, isoliert zu werden. Dies rührte zum Teil daher, daß es auf diesem Gebiet eine schärfere Trennlinie zwischen Forschungs- und Industrieaktivitäten gab, war außerdem aber zu einem anderen Teil rein menschlicher Natur. Lawrence strahlte bei Y-12 Hoffnung aus; Urey zeigte sich oft entmutigt. Lawrence tat alles, was für den Fortgang der Arbeiten nötig war; Urey richtete sein Augenmerk auf die Wissenschaft. Zu guter Letzt brach Urey mit Keith, dem Mann von Kellex, der sein Verbündeter hätte sein sollen.

Im Herbst 1943 hatte man noch immer keine endgültige Lösung für das Trennwandproblem gefunden. Zu diesem Zeitpunkt wurde es Groves durch das Quebec-Abkommen möglich, die Briten zu sich zu holen, die viel Kraft in ihr eigenes Gasdiffusionsvorhaben gesteckt hatten, obwohl in Großbritannien noch keine Industrieanlage in Aussicht stand. Peierls wurde Berater bei *Kellex*, eine britische Vertretung besuchte Amerika im Winter 1943/44, und mehrere britische Wissenschaftler und Ingenieure verbrachten 1944 einige Monate beim amerikanischen Vorhaben. Die Zusammenarbeit war hier jedoch weit weniger erfolgreich als im Falle des elektromagnetischen Unternehmens. Das britische Team hatte seine eigenen konkreten Vorstellungen davon, wie eine Gasdiffusionsanlage aussehen sollte und die Amerikaner waren bereits an ihr eigenes Konzept von zig Millionen Dollar gebunden. Die Briten traten mit einer gewissen akademischen Nüchternheit an *K-25* heran, während sich die Amerikaner klar darüber waren, daß sie es dringend einsatzbereit machen mußten, komme was immer da wolle. Trotzdem empfanden es die *Kellex*-Ingenieure als wertvoll, alle Gesichtspunkte der Anlage mit einer neuen und erfahrenen Gruppe durchzugehen.

Zur zentralen Frage nach der Trennwand hatten die Briten keine Zauberformel anzubieten. Bei den Amerikanern gab es zwei Spitzenkandidaten, die *Norris-Adler-Wand*, eine Art Nickeldrahtnetz mit einer enormen Anzahl kleiner Löcher, die das Ergebnis einer 18monatigen Arbeit bei Urey war, und die *Johnson-Wand*, die erst kurz zuvor unter Keith bei *Kellex* entwickelt worden war und aus Nickelpulver bestand, das unter Druck und Hitze zu einem porösen Festkörper verfestigt (gesintert) worden war. Eine Produktionsanlage für die Norris-Adler-Wand befand sich bereits im Bau, aber diese Membranen waren noch viel zu brüchig, ließen sich viel zu schwer zusammenschweißen und waren viel zu unterschiedlich in ihrer Leistungsfähigkeit. Die Johnson-Wand war nur gut, wenn sie von Hand hergestellt wurde, es gab aber keine technischen Herstellungsmöglichkeiten.

Keith hatte das Gefühl, auf ein lahmes Pferd zu setzen, würde man die Norris-Adler-Wand weiter vorantreiben, – die er verächtlich als *Spitzengardine* bezeichnete. Urey hielt es für schwachsinnig, zu einem neuen und vergleichsweise wenig geprüften Konzept zu wechseln; falls die Norris-Adler-Wand nicht funktionieren würde, sollte auf das ganze *K-25* verzichtet werden. Urey war spannungsgeladen, entmutigt, fast resigniert, und Groves war gezwungen, die Verantwortung auf andere Schultern zu laden.

So lange als möglich versuchte Groves, mit beiden Trennwänden weiterzukommen, – was übrigens beiden führenden Köpfen mißfiel, – aber Anfang 1944 mußte eine Entscheidung getroffen werden. Bei einer entscheidenden Sitzung mit allen Parteien einschließlich der Briten schlugen die *Kellex*-Ingenieure den Abbau aller Maschinen für die Herstellung der Norris-Adler-Wände und die Einstellung einiger tausend Arbeiter für die Herstellung der

Kernsprengstoffe I: Anreicherung eines Uranisotops

Johnson-Trennwände durch Handarbeit vor. Die Briten waren skeptisch und einer von ihnen sagte, daß dann so etwas wie ein Wunder notwendig wäre, aber Groves akzeptierte das *Kellex*-Projekt, und der Erfolg rechtfertigte diesen mutigen Entschluß. Als einen Trostpreis für die Briten könnte man den Umstand betrachten, daß ein großer Teil des benötigten Nickelpulvers, das von bester Qualität sein mußte, von einer Fabrik in Wales geliefert wurde.

Die Trennwandentwicklung hatte den Einsatz von buchstäblich Hunderten von Wissenschaftlern und Ingenieuren gekostet. Bis zur Lösung des Problems war die Diffusionsanlage *K-25* eingefroren gewesen. Gegen Ende 1944 war die Lieferung von Trennelementen schließlich in einem beachtlichen Maße möglich und danach nahmen die *K-25* Einheiten in dem Maße den Betrieb auf, in dem diese Elemente angeliefert wurden. Am 20. Januar 1945 wurden die ersten Einheiten mit Uranhexafluorid beschickt.

Nach den Trennwänden verursachte die Pumpenauslegung die nächsten schwierigen Entwicklungsaufgaben. Sie müssen den raschen Umlauf des korrosionsfreudigen Uranhexafluorids zuverlässig bewirken und absolut dicht gegenüber Luftfeuchtigkeit sein, nur gab es kein Schmiermittel, das gegenüber dem Hexafluorid beständig und als Dichtungsmaterial verwendbar war. Eine neuartige und befriedigende Ausführung zeichnete sich im Frühjahr 1943 ab.

Nachdem sowohl *K-25* als auch *Y-12* dem Zeitplan nachhinkten, tauchte die Idee auf, sie hintereinander zu schalten. Sie waren ja als Alternativen vorgesehen, wobei jede für sich in der Lage war, den gesamten Anreicherungsprozeß durchzuführen; falls die eine ausfiel, könnte die andere doch erfolgreich sein. Der neue Vorschlag bestand darin, die Gasdiffusionsanlage *K-25* für eine erste, begrenzte Urananreicherung zu verwenden und das Produkt dann in die elektromagnetische Anlage *Y-12* für die endgültige Anreicherung einzugeben. Jede Anlage würde dann optimal eingesetzt sein, *K-25* für die großen Mengen, von denen man ausgehen mußte, und *Y-12* für die kleineren Mengen des vorangereicherten Materials. Außerdem konnte jetzt die Endstufe von *K-25* fallengelassen werden, so daß nur eine kleinere Anlagenkapazität errichtet werden mußte.

Im Jahr 1943 war die Kombination von *K-25* mit *Y-12* eine echte Hoffnung, bis dann durch den anhaltend langsamen Fortschritt Anfang 1944 der Mut erneut sank. Jetzt öffnete sich aber ein anderer Ausweg. Abelson hatte seine Arbeiten über die Flüssig-Thermodiffusion fortgesetzt, die beim *Manhattan-Projekt* in Vergessenheit geraten waren. Bei dieser Methode wird flüssiges Uranhexafluorid durch ein senkrechtes Rohr mit ringförmigem Querschnitt gepreßt, wobei das Doppelrohr von außen mit Wasserdampf beheizt und von innen mit Wasser gekühlt wird. Ebenso wie bei der Gasthermodiffusion konzentriert sich das leichtere Isotop an der warmen Wand, an der es aufsteigt, und das schwerere Isotop an der kalten Wand, an der es absinkt.

Kernsprengstoffe I: Anreicherung eines Uranisotops

Die US-Marine, die an Kernkraft für U-Boote interessiert war, unterstützte die Arbeit von Abelson, der 1941 vom *National Bureau of Standards* in Washington zum *Naval Research Laboratory* in Anacostia umzog, nicht zuletzt wegen der Versorgung mit Dampf zum Erhitzen seiner Rohre. Im Januar 1944 wurde mit dem Bau einer Anlage für hundert Säulen im *Philadelphia Navy Yard* begonnen und Abelson hoffte, Mitte Juli mit der Produktion von angereichertem Material in begrenztem Rahmen beginnen zu können.

Mit dem *Manhattan-Projekt* bestanden wenig Beziehungen, denn die Navy gehörte nicht zu dessen Geheimnisträgern. Dennoch gelangten im April 1944 Nachrichten über die Arbeit von Abelson auf Umwegen zu Groves. Sein Team studierte diese Methode schnell, und am 27. Juni wurde ein Vertrag mit der Firma *H. K. Ferguson Company* über den Bau einer Flüssigthermodiffusionsanlage binnen neunzig Tagen in Oak Ridge unterzeichnet. Wegen der Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit entschied sich die Firma, einundzwanzig exakte Kopien der Anlage im *Navy Yard* zu errichten. Dies wurde *S-50*. Mehr oder weniger im Rahmen der Frist von neunzig Tagen war diese Anlage im Oktober soweit einsatzfähig, daß kleine Proben von schwach angereichertem Uran für *Y-12* entnommen werden konnten. Die Gesamtanlage war im folgenden März in Betrieb.

Die Anlage *S-50* erhöhte den Anteil an ^{235}U von 0,71% nur auf 0,86%, was wie eine recht belanglose Zunahme aussehen mag. Dennoch bedeutete diese Verbesserung gegenüber dem natürlichen Uran für die Anlagen *Y-12* bzw. *K-25* als zweitem Schritt eine Verbesserung der Produktionsleistung um 21%. Und das war für die Kalkulation der für die Bombe benötigten Kilogramm an ^{235}U von wesentlicher Bedeutung.

Groves hatte nun drei Eisen im Feuer, alle relativ unfertig und unsicher, aber alle in stetem Fortschritt. Im Jahr 1945 ergab sich die Frage, wie man sie optimal kombinieren sollte.

Zunächst wurden die Produkte von *S-50* direkt in *Y-12* eingegeben. Als *K-25* dann am 12. März bewies, daß es 1,1%ig angereichertes Material produzieren kann, wurde es zwischengeschaltet, so daß das Material von *S-50* über *K-25* in die Alpha-Rennbahn von *Y-12* und dann in die Beta-Rennbahnen gelangte. Ein weiterer Meilenstein wurde am 10. Juni erreicht, als *K-25* 7%iges Material produzierte; dieser Anreicherungsgrad war für die unmittelbare Eingabe in die Betaeinheiten von *Y-12* ausreichend, so daß die Alphaeinheiten vermieden werden konnten. Der letzte Schritt, nämlich die ganze Anreicherung in *K-25* vorzunehmen und *S-50* und *Y-12* völlig zu umgehen, konnte nicht getan werden, weil die letzten Stufen von *K-25* nicht mehr gebaut wurden, als *K-25* und *Y-12* hintereinandergeschaltet wurden; *K-25* konnte nur noch eine Anreicherung von etwa 20% erzielen. Aber nach dem Krieg wurde das ganze Verfahren in einer Diffusionsanlage ausgeführt; dies

Kernsprengstoffe I: Anreicherung eines Uranisotops

ist einfacher und billiger, als eine elektromagnetische Anlage für die letzten Schritte einzuschalten.

Als sie schließlich liefen, war es für die Anlagen in Oak Ridge nur noch eine Frage von Wochen, aus einigen zig Tonnen natürlichem Uran 60 kg ^{235}U für die Hiroshima-Bombe zu gewinnen.