Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 74 (1956)
Heft: 49

Artikel: Der englische Atomenergie-Reaktor in Calder Hall
Autor: Rotherham, L.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-62755

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Der englische Atomenergie-Reaktor in Calder Hall

DK 621.039.421

Von **L. Rotherham**, Direktor für Forschung und Entwicklung bei der United Kingdom Atomic Energy Authority in Risley [1])

Um ein klares Bild über die Grundgedanken zu erhalten, nach denen der Kernenergiereaktor in Calder Hall gebaut ist, dürfte es zweckmässig sein, sich vorerst die Reaktor-Bauprogramme Englands, der Vereinigten Staaten von Amerika und Russlands zu vergegenwärtigen. Es war mir vergönnt, viele amerikanische Anlagen zu besichtigen, und im November 1955 sah ich die kleine russische Atomkraftzentrale in der Nähe von Moskau. Es ist äusserst interessant, diese Konstruktionen mit den unsrigen zu vergleichen.

Sowohl in England als auch in den USA und in Russland ging die Entwicklung der Reaktortechnik von den Bedürfnissen der militärischen Verteidigung aus. In den USA wird gegenwärtig ein Druckwasser-Reaktor in Pittsburgh gebaut; er stellt die einzige Anlage dieser Art für zivile Zwecke in USA dar und ist als eine Weiterentwicklung der Reaktoren zu betrachten, die für das Unterseeboot Nautilus gebaut wurden, sowie von andern Anlagen, die alle militärischen Zwecken dienten. Offenbar wählten die Amerikaner dieses System, um die bisherigen Erfahrungen möglichst weitgehend ausnützen zu können und so rasch zu einer erfolgreichen Lösung zu kommen. In der Tat sind hier die technologischen Probleme ähnlich wie jene, die sich beim Bau des Reaktors in Hanford stellten, der ursprünglich für die Herstellung von Plutonium bestimmt war [2]).

Ausser dem Druckwasser-Reaktor in Pittsburgh (PWR) enthält das amerikanische Reaktorbauprogramm eine grosse Zahl anderer Systeme von Versuchsreaktoren [3]). Unter ihnen sind vor allem bemerkenswert der mit Natrium gekühlte und mit Graphit moderierte Reaktor der North American Aviation (SGR), der mit schnellen Neutronen arbeitende Versuchs-Brutreaktor (FBR), der gegenwärtig in Idaho gebaut wird, und der homogene Reaktor von Oak Ridge (HTR). Das einzige Gebiet, dem die Amerikaner bis jetzt nur wenig Beachtung geschenkt haben, ist das der gasgekühlten Reaktoren. Erst vor zwei Monaten ist eine amerikanische Studiengruppe nach England gekommen, die offensichlich an gasgekühlten Systemen aufs stärkste interessiert war. Dasselbe Interesse lässt auch die Stellungnahme von *R. F. Benenati* des Brooklin Polytechnic Institute, New York, erkennen [4]).

Der heute bei den Russen für Energiegewinnung in Betrieb stehende Reaktor verwendet zur Kühlung Wasser und zum Moderieren Graphit; er schliesst sich also ganz eng an denjenigen von Hanford an. Es darf wohl angenommen werden, dass die weitern russischen Kernenergie-Reaktoren ebenfalls mit Graphit moderiert und wassergekühlt sein werden, wie es bei den amerikanischen der Fall ist. Alles, was die Russen getan haben, besteht im Uebernehmen des selben Systems und im Erhöhen von Druck und Temperatur des Kühlwassers, um die Wärme in einer für Energiegewinnung brauchbaren Form zu erhalten. Dieses System ist unökonomisch. Trotzdem soll es für Anlagen von grösseren Leistungen weiterentwickelt werden. Es dürfte aber kaum nachahmenswert sein, da die Ausnützung der Elektronen äusserst arm ist. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass es nur mit Uranium betrieben werden kann, das mit U 235 angereichert ist.

In Calder Hall sind auch wir wie die Russen von einem bestehenden Reaktortyp ausgegangen und haben Druck und Temperatur des Kühlmittels erhöht, um für Energiegewinnung ausnutzbare Wärme zu erhalten. Aber wir verwenden einen gasgekühlten Reaktor, und zwar vor allem deshalb, weil England sehr dicht bevölkert ist, und es auf den britischen Inseln nur sehr wenige derart abgelegene Orte gibt, an denen Anlagen nach dem in Hanford verwendeten System betrieben werden könnten. Als man nämlich in England die ersten Anlagen für das Verteidigungsprogramm projektierte, zeigte sich, dass es im ganzen nur einen oder zwei solcher Orte gibt. Es wäre eine unzweckmässige Begrenzung unserer Anstrengungen, Atomenergieanlagen nur an Orten mit schlechten Verbindungen zu bauen, wo die örtliche Bevölkerung nur ver-

[1]) Ins Deutsche übersetzt und auf Grund neuer Veröffentlichungen ergänzt von A. Ostertag.

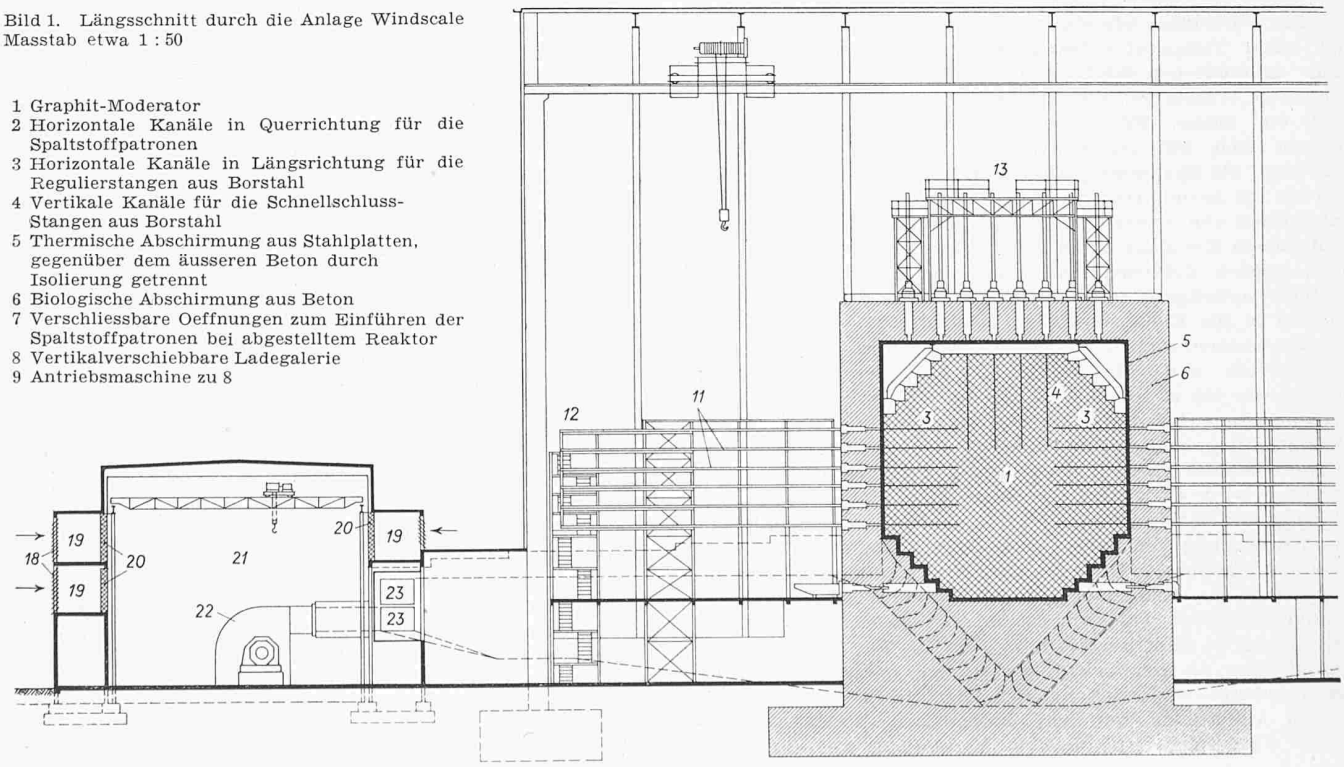
[2]) SBZ Bd. 128, Nr. 10, S. 124

[3]) Reaktor-Bauprogramm in USA s. SBZ 1956, Nr. 36, S. 533, Bild 1 und S. 535, Tabellen 1 und 2. Bei der Anlage in Pittsburgh handelt es sich um den Druckwasser-Reaktor der United States Atomic Energy Commission, der zur Zeit in Shippingport, Pa, etwa 40 km westlich von Pittsburgh aufgestellt ist. (Bilder 8, 9 und 10 des Aufsatzes von Dr. W. Dubs, S. 748)

[4]) SBZ 1956, Nr. 36, S. 533.

Bild 1. Längsschnitt durch die Anlage Windscale
Masstab etwa 1 : 50

1 Graphit-Moderator
2 Horizontale Kanäle in Querrichtung für die Spaltstoffpatronen
3 Horizontale Kanäle in Längsrichtung für die Regulierstangen aus Borstahl
4 Vertikale Kanäle für die Schnellschluss-Stangen aus Borstahl
5 Thermische Abschirmung aus Stahlplatten, gegenüber dem äusseren Beton durch Isolierung getrennt
6 Biologische Abschirmung aus Beton
7 Verschliessbare Oeffnungen zum Einführen der Spaltstoffpatronen bei abgestelltem Reaktor
8 Vertikalverschiebbare Ladegalerie
9 Antriebsmaschine zu 8



schwindend wenig Arbeitskräfte stellen könnte. Daher mussten andere Möglichkeiten gesucht werden. Die erste, die davon untersucht wurde, ist ein Reaktor, den wir heute als den Calder Hall-Typ bezeichnen.

Dieser Typ weist folgende Merkmale auf: Als Spaltstoff werden in Aluminiumhülsen gefasste Stäbe von natürlichem Uranium verwendet, die in vertikale Kanäle eines aus Graphitblöcken aufgebauten Moderators hineingeschoben werden. Zur Wärmeableitung dient Kohlendioxydgas, das zur Verbesserung des Wärmeübergangs unter höherem Druck steht (6 bis 7 at) [5]). Daher muss der Reaktorkern von einem Druckbehälter umgeben sein. Dieser befindet sich in einer thermischen Abschirmung aus Stahlplatten, um die eine sehr dickwandige biologische Abschirmung aus Beton aufgebaut ist. Die thermische Abschirmung wird mit Luft gekühlt. Das heisse CO_2-Gas gibt seine Wärme in Wärmeaustauschern an Wasser ab, das ebenfalls unter höherem Druck steht und dabei verdampft. Der Dampf expandiert in Dampfturbinen auf hohes Vakuum, wird dann in Kondensatoren niedergeschlagen, und das Kondensat wird wieder in die Wärmeaustauscher gespiesen.

Schon im Jahre 1946 sind in Risley erste Studien für die Verwirklichung eines derartigen Systems durchgeführt worden. Leider mussten sie aus verschiedenen Gründen wieder aufgegeben werden. Man befürchtete damals u. a., der technologischen Schwierigkeiten nicht Herr zu werden. So war man nicht sicher, ob es möglich sei, genügend lange Uranstäbe herzustellen und einen genügend grossen und genügend starken Druckbehälter zu bauen. Wir entschlossen uns daher damals, die Entwicklung in dieser Richtung nicht mehr weiter zu verfolgen, sondern die Möglichkeiten einer Vergrösserung eines Reaktors nach dem BEPO-System zu prüfen, das heisst eines mit Graphit moderierten, mit Luft gekühlten Reaktors, wie er damals schon in Harwell gebaut wurde. Dies schien uns sehr viel zweckmässiger. Zu jener Zeit hatten wir schon kleine Uranstäbe hergestellt und gelernt, das Uran gegen atmosphärische Einwirkungen durch Ueberziehen mit Aluminium wirksam zu schützen. Wir hatten auch Bezugsquellen für Graphit von der erforderlichen Reinheit ausfindig gemacht, und wir verfügten über Kenntnisse über die Reaktortechnik.

[5]) s. Bild 3, S. 536 im laufenden Jahrgang, Nr. 36.

Die ersten im Vereinigten Königreich aufgestellten Kernreaktoren sind diejenigen von Windscale. Sie dienen ausschliesslich der Herstellung von Plutonium. Das System, das bei ihnen zur Anwendung kam und bei dem die erzeugte Wärme nutzlos in die Luft abströmt, ist nicht besonders kompliziert. Daher wurden sogleich zwei Reaktoren gebaut.

Wie die USA haben auch wir verschiedene Möglichkeiten unseres Systems mit Gaskühlung weiter verfolgt. Der erste und sehr bemerkenswerte Reaktor unseres Bauprogrammes arbeitet mit schnellen Neutronen. Er wird gegenwärtig in Dounreay im Norden von Schottland gebaut. Er hat sehr bedeutende technologische Probleme gestellt. So musste ein Wärmefluss durch die Oberfläche des spaltbaren Stoffes von 1 kW/cm² beherrscht werden. Auch das Auswechseln des Spaltstoffes während Stillstandsperioden war nicht leicht zu verwirklichen. Im Zusammenhang mit den technologischen stellen sich auch metallurgische und physikalische Probleme. Tatsächlich betrachten wir den Reaktor von Dounreay lediglich als Versuchsreaktor, an dem Forschungs- und Entwicklungsarbeit für spätere Verwendung geleistet werden kann.

Derartige Vorarbeiten sind auch mit andern Systemen durchgeführt worden, vor allem mit denen, die ich früher erwähnt habe. Besonders interessant scheint uns der Natrium-Graphit-Reaktor zu sein. Ausserdem stehen ein wassergekühlter und verschiedene Arten von homogenen Reaktoren auf unserem Programm.

Ich erwähnte bereits, dass für die Herstellung von Plutonium ein gasgekühltes Reaktorsystem gewählt werden musste, weil die sehr dichte Bevölkerung des Vereinigten Königreiches eine gewisse Rücksichtnahme hinsichtlich der Sicherheit gegen schädliche Auswirkungen erforderte. Tatsächlich betrachten wir das in Calder Hall angewendete System für genügend sicher. Alle Einrichtungen sind dort so gebaut, dass sie hohen Sicherheits-Anforderungen entsprechen. Die dabei entwickelten Verfahren und Konstruktionen dürften auch für andere Anlagen in den dicht besiedelten Gebieten des westlichen Europa eher richtunggebend sein als diejenigen, die in Kanada, in USA und in Russland angewendet werden, wo weite Räume zur Verfügung stehen.

Ein weiterer Umstand, der uns veranlasste, die Entwicklung gasgekühlter Reaktoren zu fördern, ergab sich aus seiner Eignung für die Verwendung von natürlichem Uran.

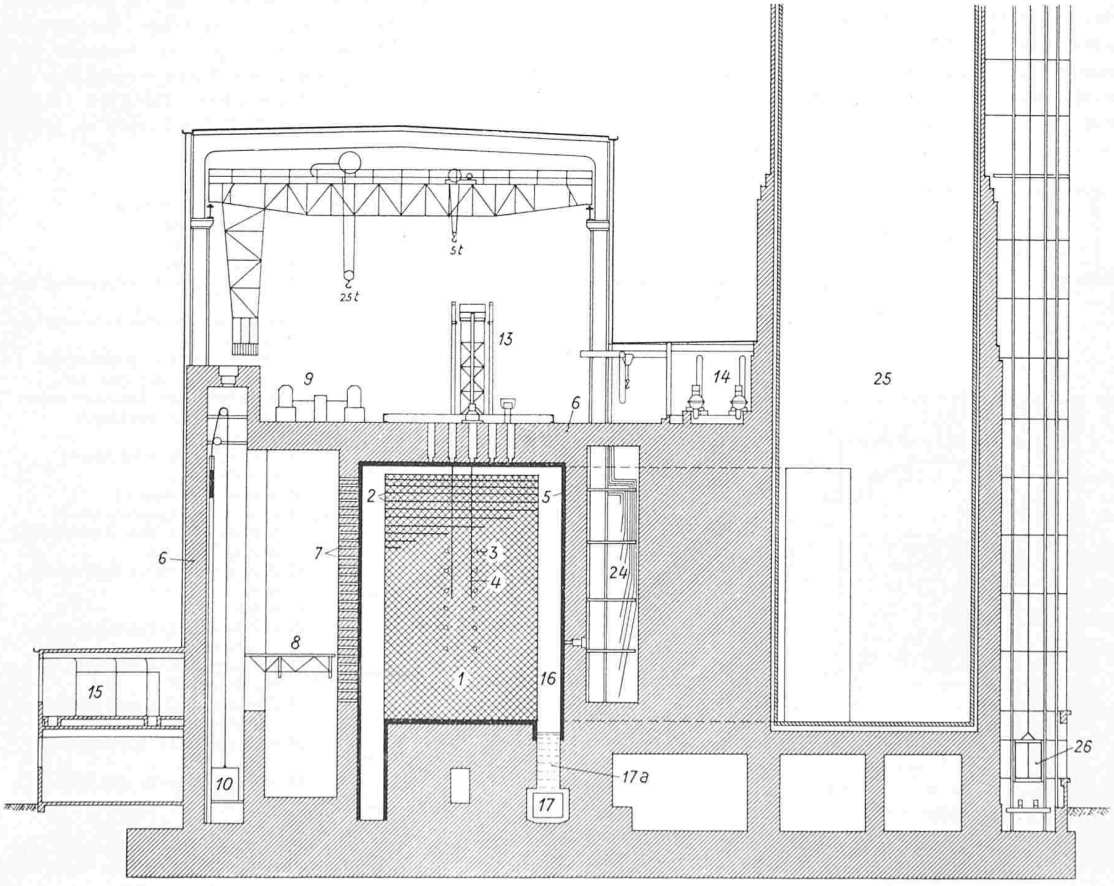


Bild 2. Querschnitt durch die Anlage Windscale, Masstab etwa 1 : 50

10 Lift für Waren und Personen
11 Führungsbahnen für die Regulierstäbe
12 Treppenhaus
13 Galerie mit Aufhängevorrichtung für die Schnellschluss-Stäbe
14 Prüfraum
15 Schaltwarte
16 Schacht, durch den die verbrauchten Spaltstoffpatronen nach 17 gelangen
17 Stollen mit Gleisfahrzeug zum Wegführen der Spaltstoffpatronen
17a Wasserfüllung
18 Kühllufteintrittöffnungen, mit Jalousien verschliessbar
19 Filterkammern
20 Filtereinsätze
21 Gebläseraum
22 Gebläse
23 Kühlluftkanal
24 Luftfassungen zur Untersuchung der austretenden Luft
25 Hochkamin
26 Lift zum Auswechseln der Filter am oberen Ende von 25

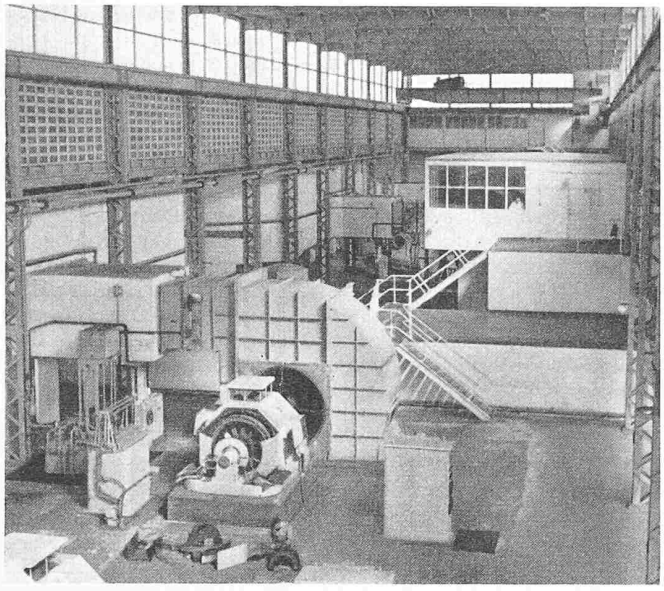


Bild 3. Maschinenhalle für die Gebläse der Anlage Windscale

Bis vor ganz kurzer Zeit verfügten wir über keine nennenswerten Mengen von angereichertem Uran, so dass wir einen Reaktortyp wählen mussten, der mit natürlichem Uran betrieben werden kann. Nachdem nun neulich die Vereinigten Staaten von Amerika die Lieferung beträchtlicher Mengen angereicherten Urans nach den Ländern der westlichen Welt unter gewissen Bedingungen freigegeben haben, ändert sich die Lage für diese Länder, indem man nun bei der Konstruktion von Atomkraftwerken von den Möglichkeiten Gebrauch machen kann, die die Verwendung von angereichertem Uran bietet. Damit kann jedes Land denjenigen Reaktortyp auswählen, der seinen Bedürfnissen am besten entspricht. Diese Bedürfnisse müssen jeweilen individuell abgeklärt werden, damit die richtige Wahl getroffen werden kann. Wir glauben, dass für den ersten Teil unseres Reaktorbauprogrammes in England der mit natürlichem Uran arbeitende Typ, wie er in Calder Hall zur Ausführung kommt, sich besonders gut eignet, was aber nicht heissen will, dass das auch für andere Länder der Fall ist.

Ich möchte an dieser Stelle darauf aufmerksam machen, dass wir in England verhältnismässig einfache Anlagen zu bauen begonnen und dass wir die nachfolgenden Schritte nur so gross gewählt haben, als wir uns zum Zeitpunkt der jeweiligen Entscheidungen genügend sicher fühlten. Wir haben es vermieden, zu grosse Schritte zu tun, und ich glaube, es ist zutreffend, wenn ich sage, dass alle Länder, die sich mit dem Bau von Atomkraftwerken befassen, weitgehend in der selben Weise vorgegangen sind: Keines versuchte irgend etwas Revolutionäres; vielmehr ging jedes von den bestehenden technologischen Kenntnissen aus und bewegte sich in kleinen Schritten vorwärts. Man muss bedenken, dass man auf diesem Gebiet nicht so vorgehen kann wie auf den uns vertrauten Gebieten der Ingenieurtechnik, wo man aus den eigenen Fehlern lernt. Man darf keinen Fehlschlag in Kauf nehmen, um zu sehen, wie nahe man dem Erfolg ist. Vielmehr muss man den Spielraum zwischen möglichem Fehlschlag und Erfolg abklären und darnach trachten, dass man stets auf der Seite des Erfolges ist. Wir werden diese vorsichtige Art des Vorgehens beibehalten, und wir hoffen gerne, die Calder Hall-Reaktoren werden uns ganz überzeugend zeigen, dass unser Vorgehen richtig war. Ich bin aber auch sicher, dass wir schon an dem Tag in der Lage sein werden, viel bessere gasgekühlte Reaktoren zu bauen, an dem diejenigen in Calder Hall in Betrieb kommen werden.

Bevor wir die Reaktoren von Calder Hall betrachten, möchte ich kurz einiges über die Anlagen zur Herstellung von Plutonium in Windscale sagen. Die Bilder 1 und 2 zeigen Schnitte durch einen dieser Reaktoren, aus denen der allgemeine Aufbau ersichtlich ist. Der Reaktor besteht aus einem Kern aus Graphit, der von einem biologischen Schutzmantel aus Beton umgeben ist. Auf der Innenseite dieses Mantels befindet sich eine thermische Abschirmung aus Stahlplatten und eine Isolierung, die den Beton der äusseren biologischen Abschirmung gegen höhere Temperaturen und gegen Strahlenwirkungen schützt. Der Graphit-Moderator besteht aus vielen Lagen von sehr genau bearbeiteten Graphitblöcken. Der ganze Graphitkörper wird durch Elemente aus Stahl in ihrer Lage festgehalten, die durch Federn belastet sind. Dadurch werden die einzelnen Graphitkörper mit einem bestimmten Druck aneinander gepresst, während sie sich zugleich frei dehnen können.

Die Spaltstoffpatronen befinden sich in horizontalen Kanälen im Moderator. Sie werden von der Vorderseite (in Bild 1 links) eingeführt, während die verbrauchten Patronen nach hinten hinausgeschoben werden. Wie aus Bild 1 ersichtlich, wird der Raum mit den Einrichtungen zum Einbringen des Spaltstoffes von der biologischen Abschirmung umgeben und ist nur durch eine verhältnismässig dünnwandige Betonwand sowie durch die thermische Abschirmung vom Reaktor getrennt. Dadurch wird das Einbringen der Stäbe wesentlich erleichtert. Es darf aber nur bei abgestelltem Reaktor vorgenommen werden, weil die Strahlung im Betrieb dort zu gross ist.

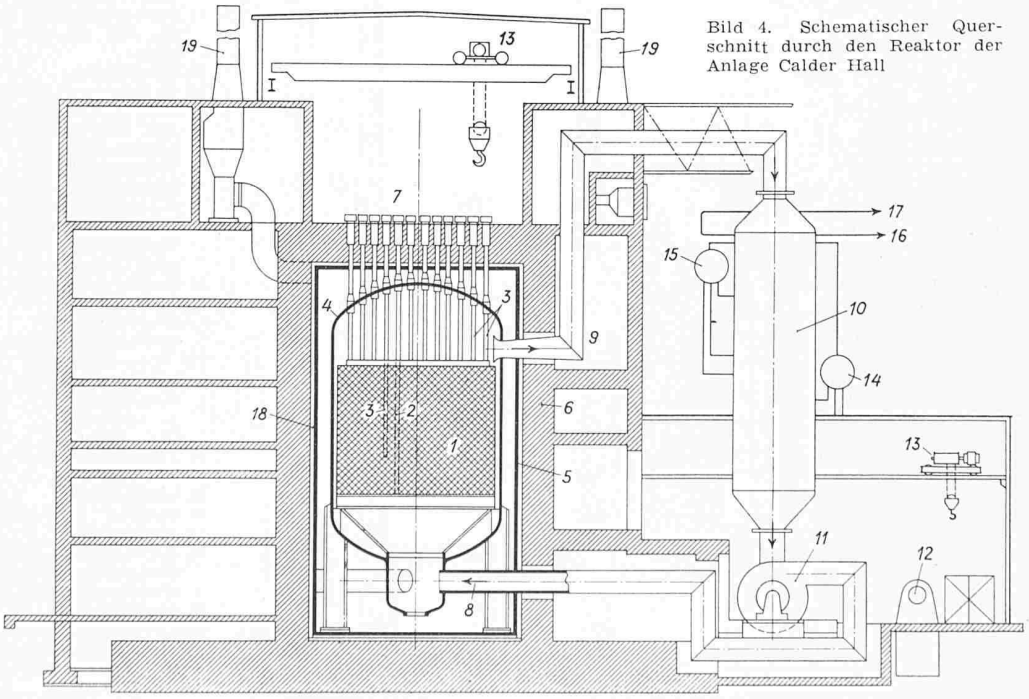


Bild 4. Schematischer Querschnitt durch den Reaktor der Anlage Calder Hall

1 Graphit-Moderator
2 Spaltstoffstäbe
3 Regulierstäbe
4 Druckgefäss
5 Thermische Abschirmung aus Eisen
6 Biologische Abschirmung aus Beton
7 Raum für die Regulereinrichtungen und das Auswechseln der Spaltstoffstäbe
8 Eintritt des gekühlten CO_2-Gases
9 Austritt des erwärmten CO_2-Gases
10 Wärmeaustauscher
11 Elektrisch angetriebenes Gebläse für die Umwälzung des CO_2-Gases
12 Motor-Generator zum Antrieb von 11
13 Kran
14 Niederdruck-Dampfsammler
15 Hochdruck-Dampfsammler
16 Niederdruck-Dampfleitung zur Turbine
17 Hochdruck-Dampfleitung zur Turbine
18 von Kühlluft durchspülter Raum
19 Hochkamine für das Abführen der Kühlluft

Die Bilder 4 bis 13 beziehen sich auf die Anlage Calder Hall

Der Spaltstoff bildet mit seiner metallischen Umhüllung Körper, die wie Patronen aussehen. Die verbrauchten Patronen, die beim Einbringen von neuen herausgeschoben werden und noch warm und stark radioaktiv sind, fallen durch den Schacht auf der Hinterseite des Reaktors in einen Trichter, der auf einem Fahrzeug aufgebaut ist. Dieses läuft auf Schienen, die in einem mit Wasser gefüllten Stollen verlegt sind und durch die Hauptabschirmung hindurch nach einem Wasserbassin führen. Die gebrauchten Patronen werden dort gekühlt und gelangen dann in die chemische Trennungsanlage. Dieser ganze Transport geht automatisch vor sich und ist ferngesteuert.

Eine weitere Gruppe von horizontalen Kanälen sind im Längsschnitt (Bild 2) ersichtlich. Sie dienen zur Regelung des Reaktors. Insgesamt sind 24 Regulierstangen aus Borstahl, die sich durch Elektromotoren bewegen lassen, vorhanden; diese können vom Schaltraum aus fernbetätigt werden. 16 weitere vertikale Borstahlstangen sind für das sofortige Abstellen in Notfällen vorgesehen. Diese Stangen sind am Dachgewölbe über dem Reaktor mittels Elektromagneten aufgehängt. Sie fallen in wenigen Sekunden in den Reaktorkern hinab, wodurch die Reaktionen rasch zum Stillstand kommen.

Die Kühlluft wird durch eine Reihe von Gebläsen zugeführt, die in zwei Gebläsegebäuden (Bild 3) untergebracht sind. Davon ist in Bild 2 nur dasjenige auf der linken Seite dargestellt. Die Luft tritt aus dem Freien durch bewegliche Jalousien in Filterkammern ein; durchstreicht trockene und feuchte Filtereinsätze und gelangt dann in den Gebläseraum. Jedes Gebläse wird durch je einen Induktionsmotor von 2400 bis 3000 PS angetrieben und läuft normalerweise mit 990 U/min. Es sind Zentrifugalgebläse mit beidseitigem Eintritt verwendet worden. Der Boden des Gebläseraumes wurde aus staubsicherem Beton hergestellt, und die Wände der Luftkanäle, die ebenfalls aus Beton bestehen, erhielten einen besonderen Ueberzug, um Erosionen durch die Luftströmung zu vermeiden. Die Kühlluft wird in den Spaltstoffkanälen und nach dem Austritt aus dem Reaktor dauernd überwacht, um ein allfälliges Aufspringen von Spaltstoffpatronen sofort feststellen zu können. Sie tritt dann in das 120 m hohe Hochkamin ein, und erfährt an dessen oberem Ende nochmals eine Filtrierung, bevor sie ins Freie austritt. Da die durch den Gebrauch verunreinigten Filterelemente radioaktiv sein können, werden sie durch eine ferngesteuerte Vorrichtung ausgewechselt, in einen Bleikasten eingeschlossen und mit Hilfe eines Lifts von 7,5 t Tragkraft auf den Erdboden heruntergesenkt. Dieser Lift ist in Bild 1 rechts sichtbar.

Wir gehen nun zur Beschreibung der beiden Reaktoren von Calder Hall über. Ihr Aufbau ist aus Bild 4 ersichtlich. Der Reaktorkern ist von einem zylindrischen Druckbehälter umschlossen, der von einer thermischen Abschirmung umgeben ist. Diese besteht aus 152 mm dicken Stahlplatten. Aussen befindet sich die achteckige biologische Abschirmung aus Beton, die einige Fuss dick ist. Der Raum zwischen der thermischen und der biologischen Abschirmung wird von Kühlluft durchströmt. Die warme Luft tritt durch je zwei 67 m hohe Schornsteine ins Freie aus. Bild 5 zeigt den Reaktor Nr. 1 während der Montage. Von den vier Wärmeaustauschern sind dort zwei sichtbar.

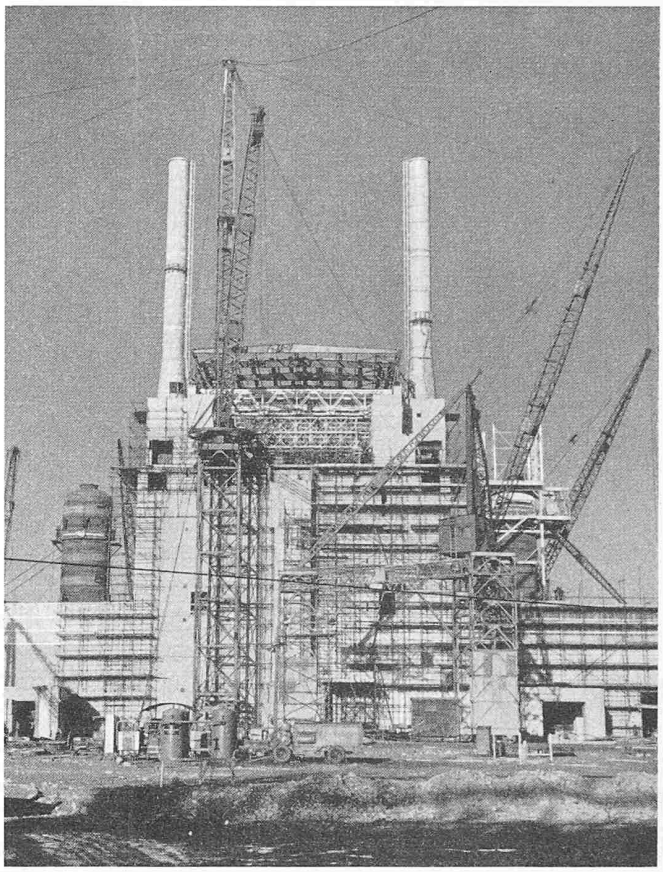
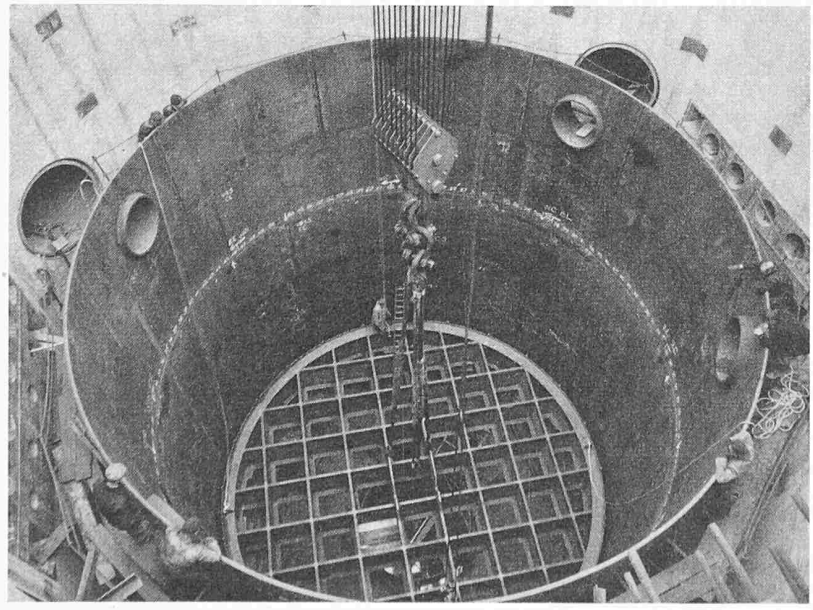


Bild 5. Reaktorgebäude während des Baues. Zu beiden Seiten ist je ein Wärmeaustauscher sichtbar

Als Spaltstoff dient natürliches Uran mit einem spezifischen Gewicht von 18,7 kg/dm³, das in Hülsen aus einer Magnesiumlegierung eingeschlossen ist. Die Spaltstoffelemente haben einen Durchmesser von 29,2 mm und sind 1020 mm lang. Die Durchmesser der Hülsen betragen innen 29,6 mm, aussen 33,0 mm. Um die wärmeabgebende Oberfläche zu vergrössern, sind aussen Kühlrippen in geringem Abstand voneinander angebracht, deren Aussendurchmesser 54 mm beträgt. Die Enden der Hülsen sind mit Pfropfen verschlos-



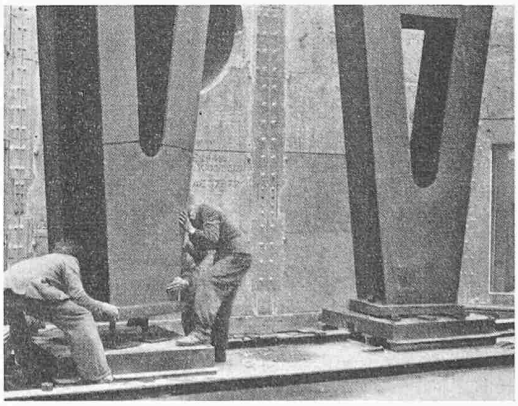


Bild 7. Montage der Tragfüsse für das Druckgefäss

Bild 6 (links). Montage des Druckgefässes, Einsetzen des verrippten Traggerüstes für den Graphitmoderator

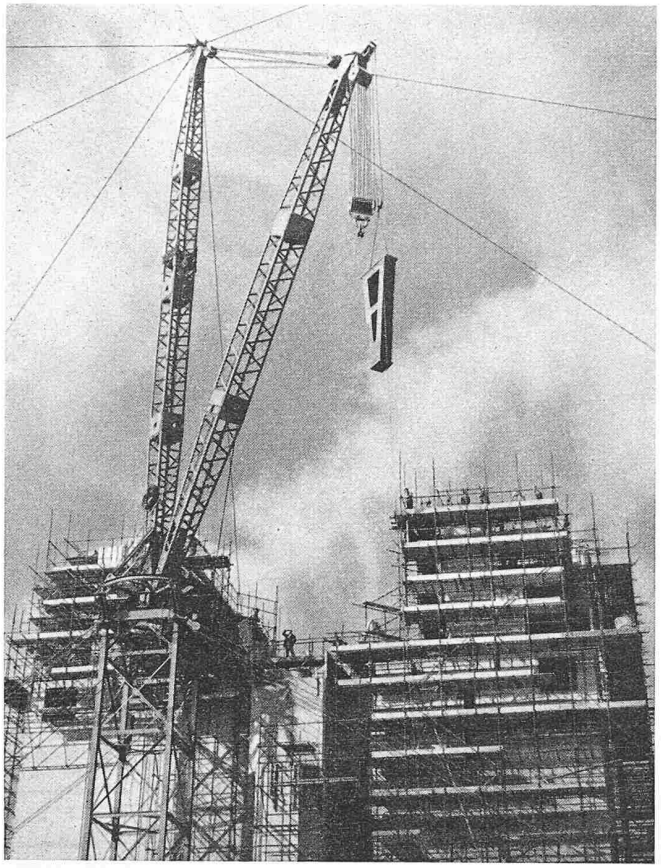


Bild 8. Reaktorgebäude im Bau; am Kran hängt ein Tragfuss für das Druckgefäss

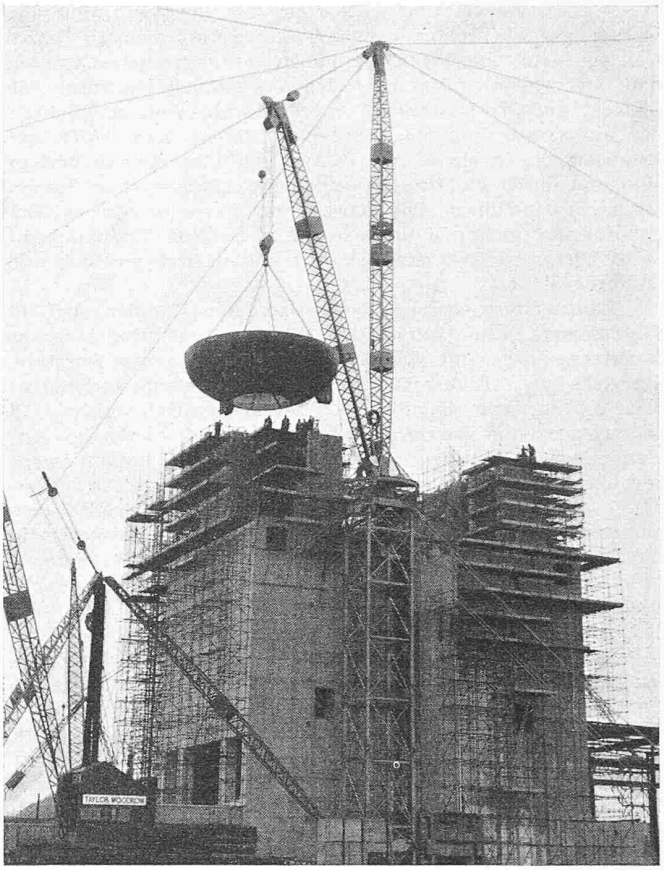


Bild 9. Reaktorgebäude im Bau; Einbringen des Unterteils des Druckgefässes

sen. Jeweilen vier Elemente werden durch Verbindungsstücke zu einem Stab vereinigt; diese Stücke halten auch die Stäbe in der richtigen Lage in den Kanälen des Moderators. Es sind insgesamt 1696 Kanäle für Spaltstoffstäbe von 101,6 mm Durchmesser vorhanden. Durch den freibleibenden Ringraum strömt das Kühlmittel.

Der Moderator aus Graphit wiegt über 1000 t. Er besteht aus bearbeiteten Blöcken, die mit vertikalen Kanälen für die Uranstäbe und die Regulierstangen versehen sind. Die vertikale Anordnung dieser Kanäle vereinfacht die Form der Graphitblöcke und die Konstruktion des Kühlmittelkreislaufs. Der Graphitmoderator ruht auf einer 102 mm dicken Grundplatte aus Stahl auf, die sich ihrerseits auf ein Gitterwerk abstützt, das aus einem Ring aus I-Trägern und einer Füllkonstruktion aus Stahl besteht, wie sie aus Bild 6 ersichtlich ist. In die Grundplatte sind Löcher gebohrt, die mit den Vertikalkanälen im Moderatorkörper übereinstimmen, und Uebergangsstücke sind zwischen diesen und den Löchern eingeschaltet, die die Unterschiede in den Wärmedehnungen auszugleichen vermögen.

Der Druckbehälter ist aus Stahlplatten von 50,8 mm Dicke durch Schweissung hergestellt. Er ist rd. 18 m hoch und hat einen Durchmesser von rd. 12 m. Seine Herstellung stellte neue und sehr bedeutende technische Probleme. Sie vollzog sich zur Hauptsache am Montageort, indem die verhältnismässig kleinen Einzelteile dort zu fünf Hauptstücken zusammengeschweisst wurden. Zur Erleichterung der Schweissarbeiten dienten umfassende Hilfseinrichtungen. Die fünf Hauptteile sind: das Bodenstück mit zylindrischem Unterteil für die vier Gaseintrittstutzen, zwei zylindrische Mittelstücke, das Traggerippe mit der Grundplatte und das Deckelgewölbe. Nach Fertigstellung dieser Teile wurden sie in den Bereich eines Krans von 100 t Tragkraft transportiert und von diesem an ihren endgültigen Ort versetzt. Dort verband man die Teile durch Stumpfschweissungen. Diese wurden laufend radiographisch geprüft und alle bedeutenderen Auffüllschweissungen ausserdem einer Untersuchung auf innere Rissbildungen unterzogen.

Eine einfache und genügend elastische Tragkonstruktion für den Druckbehälter wurde durch die Verwendung von zehn Stützen erreicht, wie sie auf den Bildern 7 und 8 zu sehen sind. Am Behälter sind entsprechende Konsolen angebracht, die die Last über die Stützen auf die Bodenplatte der thermischen Abschirmung übertragen. Dabei sind die Stützen nur lose durch Schrauben mit den Konsolen und mit der Betonplatte verbunden, und die Berührungsflächen zwischen diesen Teilen ist leicht bombiert, wie aus Bild 7 bei der Stütze rechts deutlich ersichtlich ist. Diese steht in ihrer endgültigen Lage. Wenn sich der Druckbehälter mit der eingebauten Tragkonstruktion für den Moderator im Betrieb infolge Erwärmung ausdehnt, neigen sich die Stützen leicht schräg nach aussen, wobei die Bolzen ein Gleiten der Berührungsflächen verhindern. Bild 9 zeigt die Montage des Unterteils des Druckbehälters.

Nach Beendigung der Schweissarbeiten hat man den ganzen Behälter mittels einer elektrischen Strahlungsheizung auf 550 ° C während acht Stunden spannungsfrei geglüht und zugleich für eine langsame und gleichmässige Abkühlung nach dem Glühen gesorgt. Die zum Glühen nötige elektrische Leitung erreichte im Maximum rd. 1500 kW.

Anschliessend fanden Druck- und Dichtheitsprüfungen statt. Auf ein Abpressen mit Wasser musste wegen dem grossen Gewicht der Wasserfüllung verzichtet werden, weil dieses die Tragkonstruktionen überbeansprucht hätte. Aus diesem Grund nahm man die Druckprobe mit Luft vor. Der Hauptzweck dieser Prüfung war das Feststellen des Verhaltens des Behälters hinsichtlich Deformationen und Spannungen. Dazu dienten Dehnungsmesstreifen und andere Instrumente, die ein fortwährendes Registrieren der Dehnungen während des ganzen Verlaufs der Druckproben ermöglichten.

Schliesslich fand eine Prüfung unter Vakuum (0,1 ata) statt. Die dazu verwendete Rotations-Vakuumpumpe gehört zur Ausrüstung der Anlage und wird zum Entleeren des Behälters vor dem Einfüllen des Kühlmittels sowie beim Wechseln der Füllung benötigt.

Als Kühlmedium dient Kohlendioxyd (CO_2). Das Gas tritt unten in den Druckbehälter ein, durchströmt die vertikalen Kühlkanäle im Moderator, gelangt dann in den oberen Teil des Druckbehälters und von dort durch vier Leitungen, deren Anschluss-Stutzen auf Bild 6 deutlich zu erkennen sind, zu den

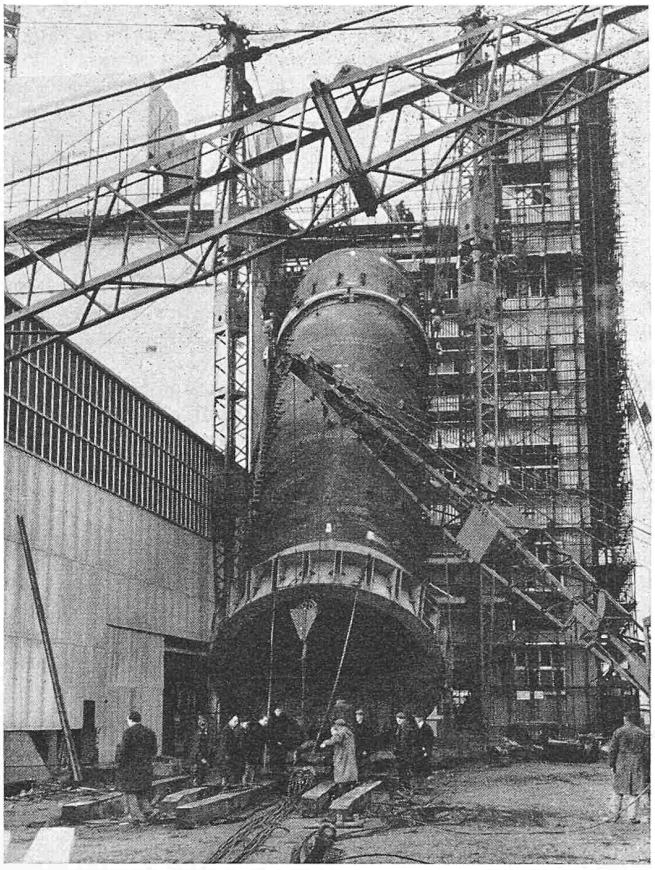


Bild 10. Montage eines Wärmeaustauschers

vier Wärmeaustauschern, die in den Ecken des Reaktorgebäudes aufgestellt sind. Das CO_2 durchströmt diese von oben nach unten, wird dann von je einem einstufigen Zentrifugalgebläse angesaugt und wieder in den untern Teil des Druckbehälters zurückgefördert.

Um Wärmespannungen in den Gasleitungen zwischen Druckbehälter und Wärmeaustauscher zu vermeiden, sind elastische Expansionsstücke eingebaut und federnde Rohrträger verwendet worden, die eine konstante Stützkraft ergeben. Die Gasleitungen bestehen aus Stahlrohren von 1372 mm Durchmesser. In jede Leitung für heisses und für kaltes Gas ist je ein motorisierter Keilschieber eingebaut. Die Eckstücke der Leitungen sind mit Ablenkblechen versehen.

Die Laufräder der Gebläse sind fliegend angeordnet. Diese Bauweise bietet zwei wesentliche Vorteile; erstens benötigt man nur *eine* Stopfbüchse und zweitens lassen sich die Teile, die einer Bedienung bedürfen, vor allem die Stopfbüchsen und die Lager, leicht so anordnen, dass sie ohne Gefahr einer unzulässigen Bestrahlung zugänglich sind. Die Stopfbüchsen sind nach der bekannten Konstruktion mit metallischen Dichtungsflächen gebaut.

Zur Anpassung der Wärmeübertragung durch das zirkulierende Gas an die jeweilige Belastung bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Man verändert entweder den Druckpegel oder die umgewälzte Gasmenge. In Calder Hall entschloss man sich für das zweite Verfahren und zwar durch Verändern der Drehzahl der Gebläse. Zu diesem Zweck wählte man für den Antrieb Gleichstrom-Motoren, von denen jeder etwa 2000 PS leistet, und die über Umformergruppen nach der Ward Leonard-Schaltung arbeiten. Die Drehzahl kann kontinuierlich im Bereich von 100 % bis hinab auf 10 % verstellt werden.

Von der umgewälzten Gasströmung werden nach den Gebläsen etwa 2 % abgezweigt, filtriert und nachher dem Kreislauf wieder zugeführt. Auf diese Weise soll eine Anreicherung des Gases mit Unreinigkeiten, vor allem mit Graphitstaub und Eisenoxyd vermieden werden. Der Wassergehalt des CO_2-Gases wird dauernd überwacht und durch Aluminium-Trocknungselemente unter der zulässigen Grenze gehalten. Eine weitere fortwährende Prüfung erlaubt das sofortige Feststellen von Rissbildungen an Spaltstoffstäben.

Die Einrichtungen zum Einbringen und Ausbauen der Spaltstoffstäbe und zum Betätigen der Regulier- und Schnellschlussvorrichtungen befinden sich im Raum über dem Reaktor. Den Zugang zu den Spaltstoffkanälen im Moderator vermitteln Lade-Rohrstücke, die vom Deckelgewölbe des Druckgefässes vertikal nach oben durch die Betonabschirmung hindurch zum Bedienungsboden hinaufreichen. Jedes Laderohrstück bedient 16 Spaltstoffkanäle. Zum Auswechseln von Spaltstoffelementen müssen der Reaktor ausser Betrieb gesetzt und die CO_2-Füllung bis auf Atmosphärendruck entleert werden. Dann entfernt man den Deckel des Laderohres, das die Spaltstoffelemente zugänglich macht, die man auswechseln will, und setzt an dessen Stelle mit Hilfe des in Bild 4 eingezeichneten Laufkrans ein Führungsstück ein; dieses ist so ausgebildet, dass es mit jedem der 16 Spaltstoffkanäle verbunden werden kann. Eine Abschliessung am Führungsstück verhindert den Austritt von CO_2. Nun fährt man eine Entlademaschine über das Führungsstück, verbindet sie mit diesem, öffnet die Abschliessungen an der Maschine und am Führungsstück, senkt mit einer Winde den Greifer der Entlademaschine durch das Führungsstück bis zum gewünschten Spaltstoffelement hinunter, windet dieses hinauf und bringt es in die Stapelkammer, die mit der Maschine wegnehmbar verbunden ist. Nachdem alle Spaltstoffelemente auf diese Weise ausgebaut worden sind, werden die Abschliessungen geschlossen und die Entlademaschine weggefahren, worauf eine Lademaschine an ihre Stelle tritt. Diese wird nun angeschlossen, die Abschliessungen werden geöffnet und die neuen Spaltstoffelemente mit einer Winde eingesetzt.

Jeder Reaktor ist mit zwei Lade- und zwei Entlademaschinen versehen. Die Spaltstoffkammern der letztgenannten sind mit wirksamen Abschirmungen umgeben, da die gebrauchten Stäbe stark radioaktiv sind. Sie können 16 Elemente aufnehmen, was für vier Kanäle ausreicht. Die Winde wird elektrisch angetrieben; die Hub- und Senkgeschwindigkeit kann im Bereich von 0 bis 0,9 m/s kontinuierlich verstellt werden. Die gebrauchten Spaltstoffelemente werden zunächst mit den Stapelkammern der Entladungsmaschinen in einen Schacht abgelassen, der bis auf Erdbodenhöhe hinabreicht. Dort befindet sich ein fahrbarer, dickwandiger gusseiserner Behälter, der mit Wasser gefüllt ist und die Stapelkammern nach einem

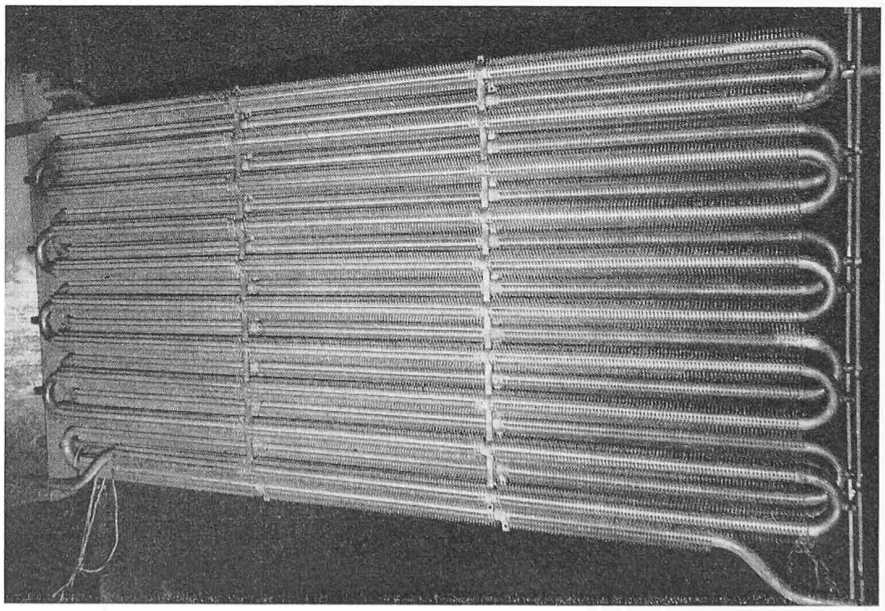


Bild 11. Heizelement mit elliptischen Rippen auf der gasberührten Seite

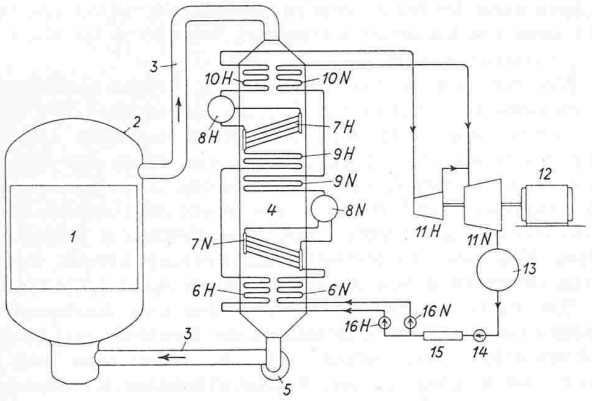


Bild 12. Prinzipschema des Dampfkreislaufes

1 Reaktorkern
2 Druckbehälter, mit CO_2 unter 7 ata gefüllt
3 CO_2-Gasleitung
4 Wärmeaustauscher
5 Gebläse
6N Niederdruck-Speisewasser-Vorwärmer
6H Hochdruck-Speisewasser-Vorwärmer, erste Stufe
7N Niederdruck-Verdampfer
7H Hochdruck-Verdampfer
8N Niederdruck-Ausdampftrommel
8H Hochdruck-Ausdampftrommel
9N Niederdruck-Ueberhitzer, erste Stufe
9H Hochdruck-Speisewasser-Vorwärmer, zweite Stufe
10N Niederdruck-Ueberhitzer, zweite Stufe
10H Hochdruck-Ueberhitzer
11H Hochdruck-Turbine
11N Niederdruck-Turbine
12 Drehstromgenerator
13 Kondensator
14 Kondensatpumpe
15 Entlüftungsanlage
16N Niederdruck-Speisepumpe
16H Hochdruck-Speisepumpe

Wasserbassin bringt, wo sie sich abkühlen. Darauf gelangen sie in die Aufbereitungsanlage, wo die Spaltprodukte und das durch die Bestrahlung von U^{238} entstandene Plutonium ausgeschieden werden und wieder natürliches Uran an deren Stelle tritt.

Die Regulier- und Schnellschlussstangen bestehen aus Rohren aus rostfreiem Stahl, die mit Borstahlfüllungen versehen und an der Decke des Reaktors aufgehängt sind.

Die gesamte Kohlendioxydfüllung ist beträchtlich. Sie beträgt mehr als 20 t. Sie wird von acht normalen Transportbehältern geliefert, die mit Trockeneis gefüllt sind. Die vom CO_2 durchströmten Teile der Anlage müssen bei einer ersten Füllung zuerst von Luft entleert werden, und ein mehrmaliges Durchspülen mit CO_2 ist nötig, um genügende Reinheit zu erhalten.

Bild 10 zeigt die Montage eines der vier Wärmeaustauscher. Jeder dieser Apparate besteht aus neun vorfabrizierten Teilen, die am Montageort zusammengebaut wurden. Sie haben einen Durchmesser von rd. 5,5 m, eine Höhe von rd. 21,4 m und eine Wandstärke des Stahlmantels von 28,5 mm. Die Wärmeübertragungsfläche wird durch Stahlrohre von 2″ äusserem Durchmesser gebildet, während die gasberührte Seite der Rohre durch elliptische Stahlflügel vergrössert ist, wie sie auf Bild 11 ersichtlich sind.

Besondere Aufmerksamkeit wurde einer möglichst hohen Sicherheit gegen Undichtheiten vom Wasser- bzw. Dampfteil nach dem CO_2-Teil geschenkt. So hat man die Zahl der Rohrverbindungen innerhalb des Wärmeaustauschers auf ein Minimum verringert. Die Enden der einzelnen Röhrenelemente durchdringen die Behälterwandungen der Austauscher, so dass der Dampf im Falle einer Undichtheit in die Atmosphäre ausströmt. Die Rohre sind an den Durchdringungsstellen mit Stopfbüchsen versehen.

Eine der massgebenden Kenngrössen für die Konstruktion eines mit Graphit moderierten, gasgekühlten Reaktors ist die Gastemperatur beim Austritt aus dem Reaktorkern. Diese Temperatur wird nach oben begrenzt durch die Festigkeit der Baustoffe und der Spaltstoffelemente, den Grad der chemischen Verträglichkeit zwischen Moderator und Kühlmittel sowie von der Grösse und der Konstruktion des Druckbehälters. Erst wenn diese Temperatur festgelegt ist, können die technischen und thermodynamischen Probleme der Energieerzeugung in Betracht gezogen werden. Sie beträgt 370° C.

Bei der Anlage Calder Hall wurde ein Verfahren mit zwei verschiedenen Dampfdrücken angewendet, wie aus dem Schema Bild 12 ersichtlich ist. Diese Lösung mag auf den ersten Blick als eine unnötige Komplikation erscheinen. Eingehende Vergleichsstudien haben aber gezeigt, dass bei ihr der thermische Wirkungsgrad günstiger und die Anlagekosten niedriger ausfallen als bei einem Verfahren mit nur einem Dampfdruck. Es konnte festgestellt werden, dass unter Anrechnung des Wertes des erzeugten Plutoniums die Gestehungskosten der abgegebenen elektrischen Energie sich auf 0,6 d/kWh (rd. 3 Rp./kWh) stellen wird.

Für die Wahl des Verfahrens mit zwei Dampfdrücken waren u. a. folgende Ueberlegungen massgebend: Um den Energieverbrauch der Kühlmittelgebläse zu senken, soll die Temperaturdifferenz des Kühlmittels zwischen dem Eintritt und dem Austritt aus dem Reaktor möglichst gross sein. Die Austrittstemperatur ist durch die Technologie des Reaktors wie oben angegeben begrenzt. Die Eintrittstemperatur hängt von den Temperaturen des Kreisprozesses ab, den das Arbeitsmittel durchläuft. Nun zeigt sich, dass diese Temperatur bei einem Verfahren mit zwei Dampf-Drücken tiefer ausfällt als bei einem solchen mit nur einem. Aber auch hier ist die Temperatur nach unten begrenzt. Je tiefer man sie ansetzt, desto niedriger ist der thermische Wirkungsgrad, mit dem der entsprechende Teil der verfügbaren Reaktorwärme ausgenützt wird. Ein weiteres Verfahren, die umzuwälzende spezifische Kühlmittelmenge zu verringern, besteht im Hinzufügen einer dritten Druckstufe im Dampfkreislauf, bei dem aber die Ueberhitzer mit einer zusätzlichen Brennstoffeuerung beheizt werden müssten. Es ergäbe sich so auch die Möglichkeit einer weiteren Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades. Man hat in Calder Hall vorläufig von der Verwirklichung eines solchen Verfahrens im Hinblick auf die zusätzlichen Komplikationen abgesehen.

Wie aus dem Schema Bild 12 ersichtlich, besteht jede der beiden Druckstufen aus einer Speisepumpe, einem Speisewasservorwärmer, einem Verdampfer, einer liegenden Ausdampftrommel, die ausserhalb des Wärmeaustauschers angebracht ist, und einem Ueberhitzer. Beide Vorwärmer und beide Ueberhitzer liegen je parallel nebeneinander im Gasstrom, da sie mit je gleichen Temperaturen arbeiten, dagegen sind die Verdampfer gasstromseitig hintereinander geschaltet. Besondere, elektrisch angetriebene Umwälzpumpen halten in den Verdampferelementen eine intensive Strömung aufrecht; die umgewälzte Wassermenge entspricht etwa dem Vierfachen der erzeugten Dampfmenge. Die Ausdampftrommeln haben einen Durchmesser von 1219 mm (48″) und eine Länge von 5486 mm (216″). Die wasser- bzw. dampfbespülte Oberfläche beträgt pro Austauscher rd. 2800 m².

Als Dampfturbinen wurden vier normale Zweigehäuse-Reaktionsturbinen mit doppelendigem Niederdruckteil und Oberflächenkondensatoren aufgestellt, die im Mittel mit einem Vakuum von 0,064 ata (entsprechend 37° C) arbeiten. Das Kondensat durchläuft eine Entlüftungsanlage und wird dann wieder in den betreffenden Wärmeaustauscher gespiesen. Das Kühlwasser tritt mit etwa 21° C in die Kondensatoren ein und verlässt sie bei Vollast mit etwa 30° C. Es gelangt in einen Kühlturm, der mit natürlichem Luftzug arbeitet, wird dort zerstäubt, gibt seine Wärme an die Luft ab und sammelt sich unten in einem Kaltwasserbehälter. Von dort fliesst es einem Saugtrog zu, von welchem vier elektrisch angetriebene Kühlwasserpumpen das Wasser absaugen. Insgesamt sind zwei Kühltürme vorhanden; sie sind 87 m hoch; der obere Rand hat einen Durchmesser von 66 m. Jeder Turm vermag rd. 14 000 m³/h Wasser um 10° C abzukühlen.

Bild 13 gibt eine Gesamtübersicht der in Montage befindlichen Anlage. Man erkennt im Mittelgrund die beiden Reaktorgebäude, zwischen ihnen das Turbinenhaus, rechts die beiden Kühltürme für die Rückkühlung des Kühlwassers der Kondensatoren, während im Vordergrund Teile der chemischen Fabrik für das Regenerieren der Spaltstoffstäbe sichtbar sind.

Das Turbinenhaus enthält vier Maschinensätze, die insgesamt 23 000 kW bei 11 000 V leisten. Die erzeugte Energie speist das Netz der British Electricity Authority. Bei Ausfall einer Gruppe oder bei völliger Stillsetzung der Energieerzeugung können die Reaktoren mit voller Last betrieben werden. Dabei wird der in den Wärmeaustauschern erzeugte Dampf in Hilfskondensatoren niedergeschlagen.

Eine zweite Kenngrösse ist das Volumen des Druckbehälters. Wie beim Bau thermischer Kraftwerke ist man auch

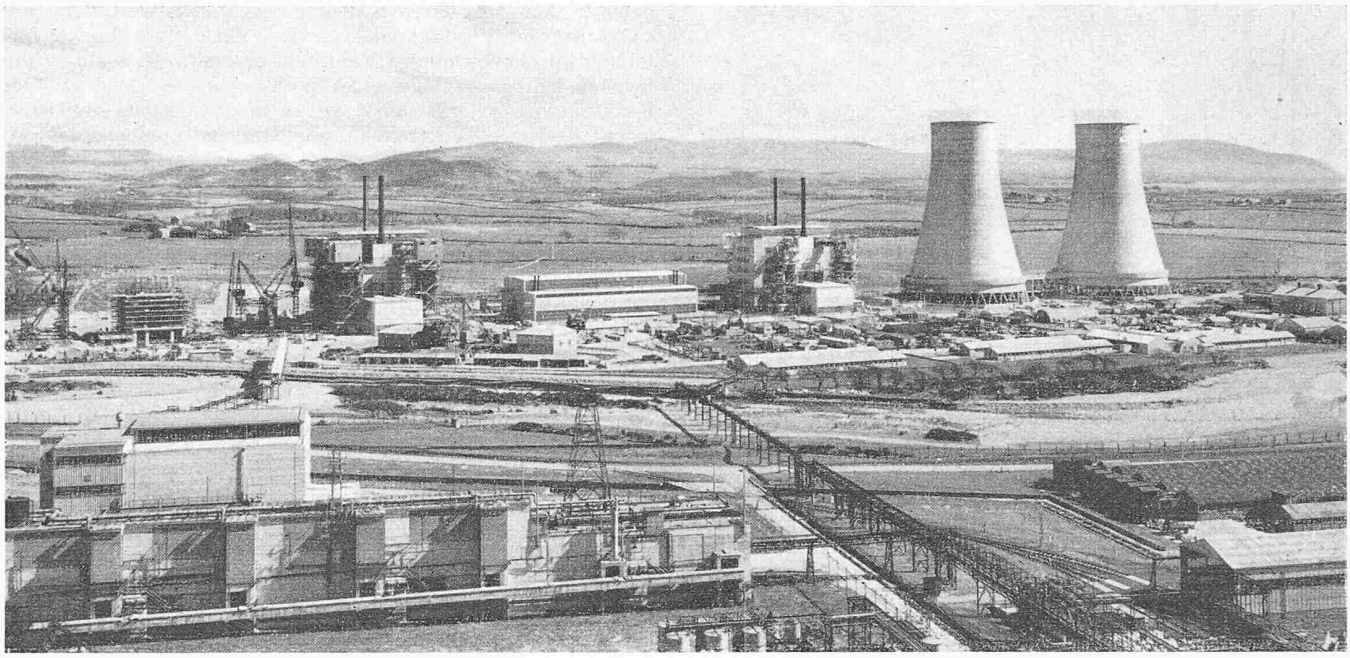


Bild 13. Gesamtübersicht der Anlage Calder Hall während des Baues. Im Mittelgrund die beiden Reaktorgebäude, dazwischen die Kraftzentrale, rechts davon die beiden Kühltürme für das Rückkühlen des Kühlwassers für die Turbinenkondensatoren, im Vordergrund Teile der chemischen Fabrik für die Regenerierung der Spaltstoffstäbe

hier an möglichst grossen Leistungen interessiert, weil sich dadurch niedrigere Gestehungskosten der erzeugten elektrischen Energie ergeben. Grössere Reaktorleistungen verlangen aber ein grösseres Volumen des Druckbehälters. Mit dem Durchmesser wächst bei einem gegebenen Arbeitsdruck des Kühlmittels auch die Wandstärke. Diese lässt sich aber mit Rücksicht auf die Sicherheit der Schweissnähte nicht beliebig vergrössern. Auch das dadurch sich erhöhende Gewicht stellt bedeutende Probleme im Hinblick auf die Unterstützung, insbesondere auf das Ueberleiten der sehr grossen Lasten von der Behälterwandung auf die Stützen. Man könnte wohl den Gasdruck erniedrigen, müsste dann aber die Antriebsleistung der Gebläse wesentlich erhöhen, was den Wirkungsgrad beeinträchtigen würde.

Auf Grund von Erfahrungen erachtete man bei der Anlage Calder Hall Wandstärken von über 2″ (50,8 mm) als nicht mehr zulässig, wenn die Blechteile an Ort und Stelle mit genügender Sicherheit zusammengeschweisst werden müssen. Hieraus ergab sich die zulässige Grösse des Druckbehälters. Man hätte allerdings einen kugelförmigen Behälter noch grösser bauen können; ja, der Durchmesser liesse sich so fast verdoppeln. Den dadurch erzielten Vorteilen wären aber Nachteile gegenüber gestanden. So wäre die Abstützung des Graphit-Moderators sehr schwierig gewesen, und die Ausführung der biologischen Abschirmung aus Beton hätte bei gleicher Wärmeleistung erheblich mehr gekostet.

Eine dritte Kenngrösse ergibt sich aus den Eigenschaften des Kühlmittels. Dieses muss sich bei allen vorkommenden Temperaturen mit den Baustoffen vertragen, aus denen die einzelnen Teile des Kreislaufs hergestellt sind. In extremen Fällen muss dies auch mit dem Spaltstoff der Fall sein. Geringe Neutronen-Absorption und moderierende Eigenschaften sind zu berücksichtigen. Wichtig ist auch die chemische Stabilität und die leichte Erhältlichkeit. Dazu kommen noch anderweitige Forderungen. Meist muss man sich mit einem Kompromiss begnügen.

Obwohl Helium und Wasserstoff sehr vorteilhafte Eigenschaften aufweisen, wählte man in Calder Hall Kohlendioxyd als das am besten geeignete Kühlmittel. Es ist billig, überall leicht erhältlich, sein Wirkungsquerschnitt für Neutroneneinfang ist völlig befriedigend, es ist unter den in Calder Hall herrschenden Arbeitsbedingungen chemisch genügend stabil, und es reagiert nicht in irgendwie nennenswertem Masse mit dem Graphit des Moderators.

Die beschriebenen Reaktoren, die gegenwärtig gebaut werden, haben den Vorteil, dass sie grundsätzlich sicher sind und elektrische Energie in grossen Mengen und zu Kosten erzeugen können, die sich mit denen von modernen Kraftwerken der bisherigen Bauart vergleichen lassen, sofern ein Markt für Plutonium vorhanden ist. Sie verwenden, wie erwähnt, natürliches Uran als Spaltstoff, Graphit als Moderator und sind gasgekühlt. Sie stellen die erste Etappe des Britischen Programmes für die Erzeugung elektrischer Energie in industriellem Masstab dar.

Kernenergie-Reserven

DK 621.039:622.7

Von Prof. Dr. **F. G. Houtermans**, Bern

Das Problem der Energie-Reserven der Menschheit lässt einen Ausweg sehen, und das ist die Energie der Atomkerne. Wie Prof. *Rossel* ausgeführt hatte, stellt die Abweichung des Atomgewichts der Isotope der Elemente von der Massenzahl, der sogenannte Massendefekt, vermöge der Einsteinschen Beziehung

$$\Delta E = c^2 \Delta M$$

ein Mass für die Bindungsenergie der Kerne dar. Für die Beurteilung der Stabilität eines Isotops ist jedoch noch eine andere Grösse massgebend, nämlich der sogenannte Packungsanteil

$$p = \frac{A - M}{A}$$

wo M die Massenzahl und A das Atomgewicht, bezogen auf $O^{16}/_{16}$ bedeuten. Ist p positiv, so ist das entsprechende Element instabiler, ist es negativ, so ist es stabiler als Sauerstoff. In Bild 1 ist die Kurve des Packungsanteils als Funktion der Ordnungszahl für die Hauptisotope der Elemente gegeben. Aus ihr geht hervor, dass ein Minimum bei Eisen auftritt. Der Kern des Fe^{56} ist also die stabilste Form der Materie. Elemente unterhalb des Eisens können durch Aufbau-Reaktionen ihrer Kerne, sogenannte Fusionsprozesse, solche