

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 48 (1957)
Heft: 21

Artikel: Das erste Atomkraftwerk
Autor: Kroms, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060627>

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: 03.04.2026

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

$$\sigma = \frac{2 \cdot 4,5}{44 \cdot 6,8} = 0,03 \text{ kg/cm}^2$$

Diese Maschinenausnutzung kann für einen Einphasenmotor dieser Grösse als sehr gut bezeichnet werden, besonders wenn noch der dabei erzielte Wirkungsgrad und $\cos \varphi$ in Betracht gezogen wird. Allgemein ergeben sich hohe Ausnutzungsziffern für die achsialen Motoren.

Eine gewissenhafte Untersuchung galt den Nachschmierzeiten der Kugellager in den achsialen Motoren. Es zeigt sich, dass bei normalem 8stündigem Tagesbetrieb eine jährliche Nachschmierung mit Kugellagerfett auf Lithiumseifenbasis genügt. Die Sicherheit bei solchen Schmierintervallen ist genügend, da auch die doppelte Laufzeit ohne Nachschmierung keine nachteilige Wirkung auf die Kugellager ausübt.

8. Schlussfolgerungen

Kleinmotoren in beschriebener achsialer Bauart lassen sich sehr rationell herstellen. Es ergeben sich ganz neue Möglichkeiten für den Bau der Motoren. Für den Konstrukteur resultieren interessante und wirtschaftliche Anwendungsmöglichkeiten. Die Anwendungsmöglichkeiten sind sehr vielseitig. Reine Gleitlagermotoren lassen sich nur bei Doppelmotoren bauen. Infolge der erreichbaren hohen Ausnutzungsziffern ergeben sich kleine Motorgewichte. Mit den achsialen Motoren lassen sich Wirkungsgrade erreichen, die denjenigen der gebräuchlichen Motoren zum mindesten ebenbürtig sind.

Literatur

- [1] Schweiz. Pat. 274 350: Induktionsmotor.
[2] Schweiz. Pat. 291 013: Kommutatormaschine.

Adresse des Autors:

H. Jaun, Ingenieur, Mikro-Elektrik A.-G., Seebacherstrasse 53, Zürich 50.

Das erste Atomkraftwerk

Von A. Kroms, Boston

621.311.25(42)

1. Einleitung

Das erste Grossleistungs-Atomkraftwerk der Welt wurde im Oktober 1956 in Betrieb gesetzt. Es ist das Calder Hall-Kraftwerk (C. H.-Werk) in Cumberland, Nordengland. Obgleich in den USA und Russland bereits vor einigen Jahren elektrische Energie mittels Atomreaktorwärme erzeugt wurde, stellen diese Werke grundsätzlich nur Versuchsanlagen dar, die zur Sammlung praktischer Erfahrungen im Bau und Betrieb von Atomkraftwerken, nicht aber zur Energieversorgung errichtet wurden. Das C. H.-Werk kann dagegen aus folgenden Gründen als erstes Atomkraftwerk für die Allgemeinversorgung angesehen werden:

1. Die elektrische Leistung des C. H.-Werkes (ungefähr 100 MW) übertrifft die Leistung aller vorherigen Versuchsanlagen um das Mehrfache; es befindet sich bereits im Leistungsbereich, in welchem die Energielieferung mit wirtschaftlich tragbaren Kosten möglich ist.

2. Das C. H.-Werk ist nicht ausschliesslich für Versuchszwecke, sondern vorwiegend zur Produktion von Plutonium (Pu239) und zur Energieabgabe ins öffentliche Netz ausgelegt worden.

Die Inbetriebnahme des C. H.-Werkes ist ein wichtiger Erfolg in der Entwicklung der Energietechnik; sie deutet das Ende des Kohlenzeitalters in der Energiewirtschaft an. Der Betrieb des C. H.-Werkes muss praktisch beweisen, dass die Atomenergie im industriellen Maßstabe erfolgreich verwertet werden kann.

2. Das Atomkraftwerkprogramm von England

Der Ausbau von Atomkraftwerken wird in verschiedenen Ländern von mehreren Umständen beeinflusst. Die zwei wichtigsten Faktoren sind:

a) Die vorhandenen Energiereserven anderer örtlicher Energiequellen — Brennstoffvorräte, Wasserkraft u. a., — wie auch die Möglichkeiten ihrer technischen Ausnutzung.

b) Die Entwicklung der Atomtechnik und die Grundlage der Atomenergie-Rohstoffe, z. B. die verfügbaren Vorräte an Uran oder Thorium.

Vor etwa zweihundert Jahren wurde die industrielle Revolution durch die Entwicklung der Wärmekraftmaschinen ausgelöst. Die Kraftmaschinen verwandelten die Lebensbedingungen der Menschheit wie es keine andere technische Entwicklung vorher getan hat. Diese Revolution wurde im kohlenreichen England eingeleitet. Es ist bemerkenswert, dass gerade in England jetzt eine neue Revolution der Energietechnik beginnt, deren Auswirkungen auf die zukünftigen Lebensbedingungen vorläufig noch nicht übersehbar sind. Ein möglichst rascher Ausbau von Atomkraftwerken wird in England von der Erschöpfung der anderen örtlichen Energiequellen begünstigt. Die Kohlenlager Englands sind nach Jahrhunderten sehr intensiver Ausbeutung zusammengeschrumpft und können nicht mehr den stark ansteigenden Brennstoffbedarf der Industrie decken. Da England fast über keine anderen herkömmlichen Energiequellen (Wasserkraft, Öl) verfügt, ist seine Energiewirtschaft in zunehmendem Masse vom Ausland abhängig. Steinkohlen werden vorwiegend aus Amerika, Öl dagegen aus dem Nahen Osten (etwa 75 % des Gesamtbedarfes) importiert. Die Schwierigkeiten der Ölversorgung machen die Lage der britischen Industrie besonders unstabil.

Alle erwähnten Umstände haben dazu geführt, dass in England ein weitreichendes Programm für einen schnellen Ausbau von Atomkraftwerken ausgearbeitet wurde. Das erste praktische Ergebnis dieses Programms ist das C. H.-Werk, das unter der Leitung der staatlichen Atomenergie-Behörde (AEA) errichtet wurde und grosse Beachtung in Kreisen der Energiewirtschaft aller Länder erregt hat. Seit der Inbetriebnahme dieses Kraftwerkes wurde das britische Atomkraftwerkprogramm erheblich erweitert. Dabei ist zuerst der Bau meh-

rerer Atomkraftwerke zu erwähnen, die eine wesentlich höhere installierte Leistung als das C. H.-Werk haben werden.

Der Kohlenbedarf Englands wird für 1975 auf 350...375 Millionen t geschätzt. Die Kohlenproduktion soll dagegen nur etwa 200 Millionen t betragen. Der Fehlbetrag muss entweder mittels einer verstärkten Brennstoffeinfuhr, oder durch einen beschleunigten Ausbau der Atomkraftwerke gedeckt werden. Man plant bis zum Jahre 1965 ungefähr 20 Atomkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 6000 MW oder mehr zu errichten. Die weitere Entwicklung wird voraussichtlich noch rascher erfolgen. Die installierte Leistung aller britischen Kraftwerke wird im Jahre 1975 schätzungsweise etwa 60 GW¹⁾ betragen; man nimmt an, dass die Hälfte dieser Leistung, d. h. ungefähr 30 GW, in Atomkraftwerken installiert wird. Diese werden den Kohlenbedarf um 60 Millionen t/Jahr herabsetzen. Man erwartet, dass nach 1970 fast alle Grosskraftwerke mit Atomreaktoren ausgerüstet werden. Dies verlangt, dass das Zusammenwirken der Atomkraftwerke mit anderen Kraftwerken zweckmässig koordiniert wird. Wenigstens in der ersten Entwicklungsperiode werden die Atomkraftwerke zur Deckung der gleichmässigen Grundlast eingesetzt, und die veränderliche Spitzenlast wird anderen Kraftwerken überlassen werden. Es wird daher der Ausbau besonderer Pumpspeicherwerke zur Deckung der Lastspitzen erwogen. Später sollen sich die Atomkraftwerke aber auch an der Deckung der Mittel- und Spitzenlast beteiligen.

¹⁾ 1 GW (Gigawatt) = 10³ MW = 10⁶ kW.

Ein so umfangreiches Programm zur unverzüglichen Einsetzung von Atomkraftwerken in die Energieversorgung ist vorläufig in keinem anderen Lande ausgearbeitet worden. Die Durchführung dieses Programmes setzt aber eine gut koordinierte Planung, vereinheitlichte Führung und eine besonders weite finanzielle Grundlage voraus. In England ist die Elektrizitätsversorgung seit einigen Jahrzehnten verstaatlicht. Das System der öffentlichen Kraftwerke und Fernleitungsnetze wird hier von zwei Behörden — der Zentralen Elektrizitätsbehörde (Central Electricity Authority — CEA) und der Elektrizitätsbehörde Schottlands — betrieben. Zur Entwicklung der Atomkraftwerke ist eine besondere Atomenergie-Behörde (Atomic Energy Authority — AEA) gegründet worden. Die gemeinsamen Probleme der Energieversorgung im staatlichen Interesse werden von dem Brennstoff- und Energie-Ministerium (Fuel and Power Ministry) behandelt. Die erwähnten Behörden stellten im Jahre 1955 das erste Programm des Atomkraftwerkbau auf, das im «Weissbuch» des Brennstoff- und Energie-Ministeriums bekanntgegeben wurde. In diesem ursprünglichen Programm war die Errichtung von 12 Kraftwerken bis 1965 vorgesehen. Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme des C. H.-Werkes wurde dieses Programm gemäss den erwähnten Zahlen erweitert, wobei es durchaus möglich ist, dass es später noch mehr vergrössert wird. Die wichtigsten Angaben in der Bauplanung der Atomkraftwerke sind in Tabellen I und II angegeben [1, 2]²⁾.

²⁾ siehe Literatur am Schluss der Arbeit.

Plan des Atomkraftwerkbau

Tabelle I

	Nach dem ursprünglichen Plan von 1955	Nach dem erweiterten Plan von 1957
<i>Bis 1965;</i>		
Zahl der Kraftwerke	12	16...19
Installierte Leistung MW	1000...2000	6000...7500
Baukosten Millionen Pfund	350	900
Kohlensparnis Millionen t/Jahr	4...5	16...20
<i>Bis 1975;</i>		
Installierte Leistung MW		30 000
Kohlensparnis Millionen t/Jahr		60...70

Die geplanten Atomkraftwerke

Tabelle II

Bauleitung	Primäre und sekundäre Aufgabe	Standort	Elektrische Leistung MW	Inbetriebnahme	
AEA	Pu-Erzeugung und Energieversorgung	Calder Hall, A	100...150	1956—1957	
		Calder Hall, B	150	1958	
		Chapel Cross, A	150	1958	
		Chapel Cross, B	150	1959	
CEA	Energieversorgung und Pu-Erzeugung	Berkeley	250...300	1960	
		Bradwell	250...300	1960	
		Incley Point	300...400	1961	
		Somerset	300...400	1961	
		2. Stufe	(4 Werke)	je 400...500	1963
		3. Stufe	(4 Werke)	je 400...500	1965
Süd-Schottlands Elektrizitätsbehörde	Energieversorgung und Pu-Erzeugung	Hunterston	250...350	1960	

Die AEA-Werke, wie auch die ersten vier CEA-Kraftwerke, werden technisch ähnlich dem C. H.-Werk ausgerüstet werden. Jedes der erwähnten Werke wird zwei thermische gasgekühlte Reaktoren enthalten. Die Wärmeleistung der Reaktoren soll in den CEA-Werken ungefähr zweimal grösser sein als die der C. H.-Reaktoren; jeder Reaktor wird Turbogeneratorsätze mit einer installierten Leistung von 125...150 MW bedienen. Diese Werke werden natürliches oder leicht angereichertes Uran ausnützen. Die CEA-Werke sind hauptsächlich zur Energielieferung vorgesehen worden, mit Plutonium als Nebenprodukt. Ein höheres Temperaturniveau in den Reaktoren wird es ermöglichen, grössere Einheitsleistungen, höhere spezifische Leistungsabgabe des Energieträgers (MW/t Uran) und einen besseren Wärmeausnutzungsgrad als im C. H.-Werk zu erreichen.

Neben der Entwicklung der gasgekühlten Reaktoren werden Versuche mit flüssigkeitsgekühlten und schnellen Reaktoren durchgeführt. Diese Reaktortypen sollen die gasgekühlten Reaktoren in späteren Phasen des Atomkraftwerkbaus ersetzen. Vorläufig ist der Reaktortyp für die CEA-Werke der 2. und 3. Stufe noch nicht festgelegt worden, weil dazu noch weitere technische Versuche nötig sind. Man nimmt an, dass die Kraftwerke der zweiten Stufe flüssigkeitsgekühlte thermische Reaktoren enthalten werden, mit Wasser oder flüssigen Metallen als Kühlmittel. Diese Reaktoren sind zum Betrieb mit höheren Temperaturen geeignet und ermöglichen es, höhere spezifische Leistungen des Reaktorkerns (MW/m³) zu erreichen. Der Druckwasserreaktor stellt die geringsten technischen Probleme, doch erfordert er einen angereicherten Energieträger. Nach der Auswahl des Reaktortyps wird voraussichtlich ein besonderer Versuchsreaktor gebaut werden.

Für Kraftwerke der dritten Ausbaustufe kommen mehrere Reaktortypen in Frage: schnelle, homogene (mit Wasserlösungen oder flüssigen Metallen als Spaltflüssigkeit) oder gasgekühlte Reaktoren für hohe Temperaturen (für Kraftwerke mit Gasturbinenanlagen). Man glaubt, dass die Kraftwerke der zweiten und dritten Stufe je einen Reaktor grosser Wärmeleistung enthalten werden.

Um praktische Erfahrungen mit schnellen Reaktoren zu sammeln, wird z. Z. in Nord-Schottland (bei Dounreay) ein schneller Versuchsreaktor errichtet, der mit hoch angereichertem Uran als Energieträger und Natrium als Kühlmittel arbeiten wird. Die Wärmeleistung des Reaktors soll 60 MW betragen. In dieser Anlage sollen die Konstruktionsprobleme der schnellen Reaktoren und die praktischen Möglichkeiten des Brutvorgangs studiert werden. Das Kraftwerk wird in 1958...1959 in Betrieb gesetzt werden und es wird voraussichtlich das erste Atomkraftwerk der Welt sein, welches den benötigten Energieträger selbst erneuern kann.

Das C. H.-Werk stellt also die Prototypanlage dar, nach welcher mehrere, in nächster Zeit zu errichtende Atomkraftwerke gebaut sein werden. Nachstehend soll eine kurze Erörterung der technischen Ausrüstung und der ersten Betriebsergebnisse dieses Werkes gegeben werden [3...7].

3. Das Calder Hall-Werk

Der Bau des Calder Hall-Werkes wurde im Jahre 1953 begonnen. Da England über keine konzentrierte Atomenergieträger verfügt, wurde das Kraftwerk für den Betrieb mit natürlichem Uran projektiert. Es enthält zwei gasgekühlte Reaktoren gleicher Bauart und Leistung. Als Neutronenbremsstoff wird Graphit benützt und die entwickelte Wärme durch Umwälzung von CO₂ abgeleitet. Wenn man mit den mässigen Temperaturen des Reaktorkerns arbeitet, dann bereitet diese Reaktorenbauart keine allzu schwierigen Werkstoffprobleme. Das C. H.-Werk ist für zwei Aufgaben — Erzeugung von Plutonium und elektrischer Energie — errichtet. Es arbeitet mit gleichmässiger Leistung und liefert Energie an das naheliegende Plutoniumwerk (Windscale); der Energieüberschuss wird ins Verbundnetz der CEA abgegeben. Bei der Vorplanung wurde eine elektrische Leistung von 50 MW angenommen; sie wurde nachträglich auf 90...100 MW erhöht. Man vermutet, dass nach Sammlung praktischer Betriebserfahrungen und nach gewissen technischen Verbesserungen einzelner Kraftwerkelemente die elektrische Leistung des C. H.-Werkes («A») später bis auf 150 MW gesteigert werden wird. Die gleiche Leistung ist für die zweite Ausbaustufe des C. H.-Werkes («B») vorgesehen worden; diese Stufe soll 1958 in Betrieb genommen werden.

Ein Reaktor des «A»-Werkes ist seit Oktober 1956 in Betrieb; der zweite soll 1957 in Betrieb genommen werden. Die Reaktoren sind in 30 m hohen Schwerbauten aus dichtem Beton untergebracht (Fig. 1) mit Betonwänden, die ungefähr 2,5 m dick sind und als biologischer Schild dienen. Jeder Reaktor gibt Wärme an die vier senkrechten Wärmeaustauscher ab, die ausserhalb des Reaktor Gebäudes aufgestellt sind. Im Reaktor befinden sich rund 1000 t sehr reinen Graphits in Form von präzise bearbeiteten Blöcken. Graphit ist ein vortrefflicher Neutronenbremsstoff und ermöglicht, die Kettenreaktion im natürlichen Uran aufrechtzuerhalten, obgleich es nur 0,7 % des spaltbaren Isotops U²³⁵ enthält. Die Stäbe des Energieträgers sind in zahlreichen Kanälen der Graphitblöcke untergebracht. Die Stäbe bestehen aus natürlichem Uran und sind mit Magnesiumhüllen bedeckt. In den gasgekühlten Reaktoren muss der Wärmeübergang von den Uranstäben auf das Gas möglichst verbessert werden; dies stellt ein besonders wichtiges Problem in der Konstruktion dieser Reaktoren dar. Im C. H.-Werk wird die Kühlung der Uranstäbe mittels zwei Massnahmen begünstigt, welche die wärmeabgebende Oberfläche der Uranstäbe verbessern: a) In den Reaktoren sind viele Stäbe von kleinem Durchmesser (30 mm) gelagert; b) Die Magnesiumhüllen sind mit äusseren Kühlringen versehen, die senkrecht zur Stabachse angeordnet sind. Die Rippen sind bei den ausgewählten Werkstoffen sehr wirkungsvoll, weil Magnesium ein sehr guter Wärmeleiter, CO₂ dagegen ziemlich schwacher Wärmeabnehmer ist.

Die Beschickung und das Auswechseln der Uranstäbe erfolgt von einer Bühne aus, die sich ober-

halb des Reaktors befindet, und wo eine besondere Beschickungsmaschine angeordnet ist. Der Reaktor wird im abgestellten Zustand geladen und entladen.

Bei der Herstellung von Energieträgerelementen sind bekanntlich schwierige metallurgische Probleme zu lösen, weil diese Elemente hohen Tempe-

aufweisen. Dies bringt folgendes mit sich: a) Die Kühlrippen sind nicht so wirkungsvoll wie bei den Mg- oder Al-Hüllen; b) Als Energieträger muss angereichertes Uran verwendet werden.

Die Anfangsreaktivität der C. H.-Reaktoren soll ungefähr $r_0 = 0,045$ betragen. Die Veränderungen

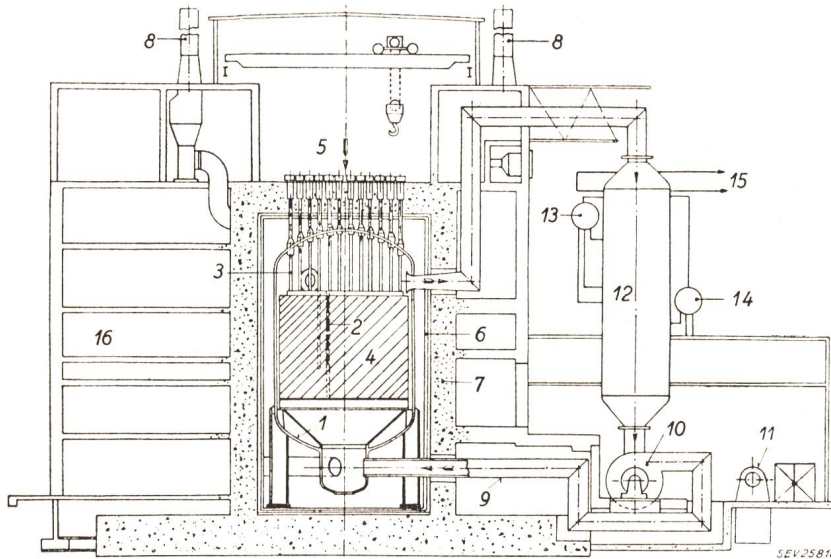


Fig. 1
Reaktoranlage des
Calder-Hall-Kraftwerkes
1 Druckbehälter des Reaktors; 2 Uranstäbe; 3 Kontrollstäbe; 4 Graphitblöcke; 5 Beschickungs- und Bedienungsbühne; 6 thermischer Schild; 7 biologischer Schild (Betonblock); 8 Ableitung der Kühlluft; 9 Gasrohre; 10 Umwälzgebläse; 11 Motor-Generator; 12 Wärmeaustauscher (Dampferzeuger); 13, 14 Dampfabscheider der HD- und ND-Verdampfer; 15 Dampfleitungen zur Turbinenanlage; 16 Schalt- und Kontrollräume

peraturen und einer intensiven Strahlung ausgesetzt sind; sie müssen bei den gegebenen Betriebsverhältnissen auch sehr korrosionsbeständig sein. Um die Korrosionsbeständigkeit der Elemente zu erhöhen und die Radioaktivität des primären Wärmeträgers (Gas, Wasser, flüssige Metalle) möglichst herabzusetzen, werden die Elemente in der Regel mit einer Hülle versehen. Man versucht hier verschiedene Werkstoffe anzuwenden, z. B. Al, Mg, Zr, Be, rostfreien Stahl u. a. Der Hüllenwerkstoff muss mehrere Forderungen erfüllen; die wichtigsten darunter sind: möglichst geringer Neutroneneinfang, hohe Korrosionsfestigkeit, gute Wärmeleitung, hoher Schmelzpunkt und gute Fertigungseigenschaften. Im C. H.-Projekt wurden zuerst Aluminiumhüllen erprobt, doch wurde später der Vorrang den Magnesiumlegierungen (Magnex G, mit 0,05% Be und 1% Al) gegeben, weil sie die Neutronen wenig einfangen und gute Fertigungseigenschaften aufweisen. Die Magnesiumhüllen können allerdings nur für die gasgekühlten Reaktoren verwendet werden, die mit mässigen Temperaturen (400...450 °C) arbeiten; sie kommen der starken Korrosionsfähigkeit wegen in den wassergekühlten Reaktoren nicht in Frage.

der Reaktivität, die nach Inbetriebnahme der Reaktoren erfolgt, sind in Fig. 2 gezeigt. Zur Regelung der Kernreaktion und Stilllegung der Reaktoren sind in Graphitkanäle Kontrollstäbe hineingebracht; es sind 60 Stäbe für Grob- und 4 Stäbe für Feinregelung bestimmt worden³⁾. Die Kontrollstäbe sind aus Bohrstaal (4% B) hergestellt; sie haben

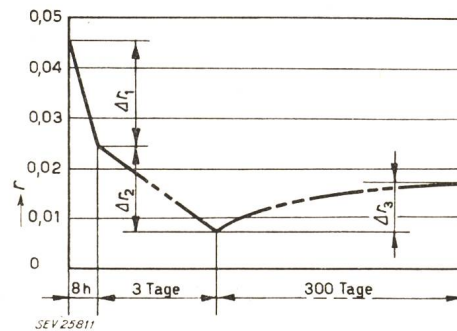


Fig. 2
Veränderung der Reaktivität r
 Δr_1 Abnahme der Reaktivität durch Temperaturerhöhung; Δr_2 Abnahme der Reaktivität durch Anreicherung der Spaltprodukte (Xe o. a.); Δr_3 Zunahme der Reaktivität durch Anreicherung des Plutoniums

Kennwerte der Hüllenwerkstoffe

Tabelle III

	Al	Mg	Be	Zr	rostfreier Stahl	Nb
Makroskopischer Einfangsquerschnitt für thermische Neutronen σ_a [cm ⁻¹]	0,0118	0,0023	0,00011	0,0076	0,227	0,061
Schmelzpunkt °C	659	650	1285	1860	1500	2415
Wärmeleitzahl (bei 125 °C). . . . kcal/m · h · °C	200	140	120	16	15	44

Einige Kennwerte der Hüllenwerkstoffe sind in Tabelle III angegeben. Daraus ist zu ersehen, dass die hitzebeständigen Werkstoffe (rostfreier Stahl, Zr) geringere Wärmeleitzahlen und einen grösseren Wirkungsquerschnitt des Neutroneneinfangs als Mg

Hüllen aus rostfreiem Stahl. Das System der Kontrollstäbe wird automatisch betätigt, und es ist imstande, die Reaktivität des Reaktorkerns um $\Delta r = 0,055$ herabzusetzen; da $r_{0, max} < 0,055$, ist hier eine

³⁾ siehe Bull. SEV Bd. 48(1957) Nr. 15, S. 672.

gewisse Sicherheit vorhanden. Der negative Temperaturkoeffizient ($\Delta r/^\circ\text{C}$) nimmt in den gasgekühlten Reaktoren mit Graphitbremsstoff ziemlich geringe Werte an und kann zur Stabilität des Reaktorbetriebs nur mässig beitragen.

Der Druckbehälter des C. H.-Reaktors von 11,3 m Durchmesser und 21 m Höhe ist aus 51 mm starken Stahlplatten hergestellt. Im oberen Deckel des Behälters sind 106 Rohre zur Beschickung der Uranstäbe und Aufnahme der Regelstäbe eingebaut. Diese Laderohre werden während des Betriebes mit besonderen Platten abgeschlossen. Da ein so grosser Behälter nicht transportiert werden kann, mussten die einzelnen Teile des Reaktorgehäuses auf der Baustelle zusammengeschweisst, nachgeglüht und geprüft werden. Wegen dieses Verfahrens musste die Wandstärke des Behälters und damit der zulässige Druck im Reaktorsystem beschränkt werden. In den neuen Projekten von Atomkraftwerken versucht man die Wandstärke der Reaktoren bis auf 75 mm zu erhöhen, um den Gasdruck entsprechend erhöhen zu können und damit die Wärmeableitungsfähigkeit des Gases zu verbessern. Auf diese Weise könnte die spezifische Leistung erheblich verbessert werden.

Das CO_2 tritt in die C. H.-Reaktoren von unten, mit 7 kg/cm^2 und 160°C , ein. Es wird im Reaktorkern auf $340\text{...}350^\circ\text{C}$ erhitzt und den vier Wärmeaustauschern zugeleitet. Das Gas wird in jedem der vier Kreisläufe mittels eines einstufigen Gebläses umgewälzt. Die Gebläse werden durch regelbare 1500-kW-Motoren, in Ward-Leonard-Schaltung, angetrieben. Die Wärmeaustauscher sind senkrechter Bauart und ausserhalb des Reaktorgebäudes aufgestellt. Die Heizfläche der Wärmeaustauscher wird aus 51-mm-Rohren gebildet; Gas und Wasser durchfliessen die Wärmeaustauscher im Gegenstrom. Um den Wärmeübergang vom Gas auf die Rohrwände zu verbessern, sind die Rohre mit Nadeln elliptischen Querschnitts versehen. Die Gesamtlänge der Rohre in jedem Wärmeaustauscher beträgt ungefähr 50 km, ihre gasberührte Heizfläche 9250 m^2 . Der Druckbehälter hat einen Aussendurchmesser von 6 m und ist 27 m hoch; das Gesamtgewicht des Wärmeaustauschers beträgt 200 t.

Es ist erwähnenswert, dass für Wärmevermittler in gasgekühlten Reaktoren vorläufig nur zwei Gase — CO_2 und Luft — angewendet werden. So ist, z. B., im ersten Atomreaktor Frankreichs bei Marcoule, Luft als Kühlmittel gewählt worden. Stickstoff ist ein schlechterer Wärmeträger und fängt die Neutronen mehr als die Luft ein. Der physikalisch beste Wärmevermittler ist Helium; es weist ausgezeichnete kernphysikalische Eigenschaften auf, weil es fast keine Neutronen einfängt. Obgleich He teuer ist, wird es voraussichtlich in gasgekühlten Reaktoren mit hohen Temperaturen als Wärmevermittler und zugleich als Arbeitsstoff von Gasturbinenanlagen dienen. Auch Wasserstoff ist ein thermisch und kernphysikalisch vorteilhaftes Kühlmittel, doch ist es explosiv und tritt bei hohen Temperaturen mit dem Uran in Verbindung.

Das CO_2 wird in den C. H.-Wärmeaustauschern möglichst tief abgekühlt. Dadurch kann die Ausbeute an Plutonium in den Reaktoren erhöht, der

Energieverbrauch der Umwälzgebläse dagegen herabgesetzt werden. Um dies zu ermöglichen, ist für die Maschinenanlage der Zweidruck-Dampfkreislauf gewählt worden (Fig. 3). Es wird Dampf von

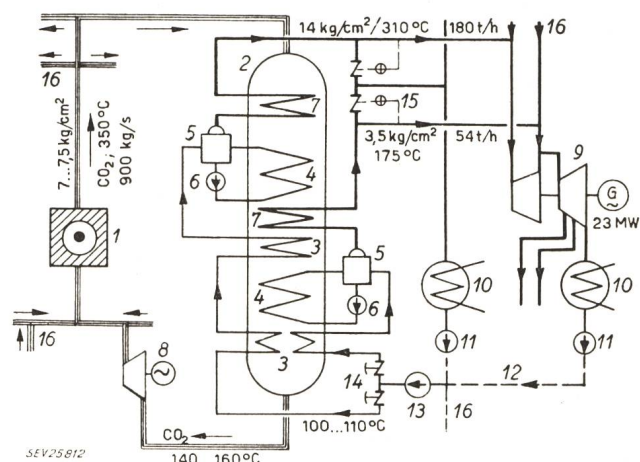


Fig. 3
Schaltung des Calder-Hall-Werkes

1 Reaktor; 2 Wärmeaustauscher; 3 Vorwärmer; 4 Verdampfer; 5 Dampfabscheider; 6 Umwälzpumpe des Verdampfers; 7 Überhitzer; 8 Umwälzgebläse des CO_2 -Gases; 9 Turboaggregat; 10 Kondensator; 11 Kondensatpumpe; 12 regenerative Wasservorwärmung (Apparatur nicht gezeigt); 13 Speisepumpe; 14 Regelventile; 15 Überstromventile; 16 Anschluss anderer Kreisläufe (4 Wärmeaustauscher und 2 Turboaggregate)

14 und von $3,5 \text{ kg/cm}^2$, im Mengenverhältnis von $\approx 3:1$ erzeugt. Der Dampf wird in besonderen Zweidruckturbinen ausgenutzt. Jeder Wärmeaustauscher enthält für die beiden Drucksysteme je einen Vorwärmer, Verdampfer und Überhitzer. Der Dampf verlässt die Wärmeaustauscher mit 310°C bzw. 175°C . Die Verdampfer sind mit Umwälzpumpen, nach dem La-Mont-System, versehen, was die Anwendung von Verdampferrohren kleinen Durchmessers ermöglicht und erlaubt, die Rohre im Wärmeaustauscher dicht anzuordnen.

Das Maschinenhaus des C. H.-Kraftwerkes befindet sich zwischen zwei Reaktorgebäuden. Es enthält vier Turbogeneratorsätze mit einer totalen installierten Leistung von $4 \times 23 = 92 \text{ MW}$. Die Zweidruckturbinen haben zwei Gehäuse und zwei Dampfentnahmestellen zur Wasservorwärmung. Im Maschinenhaus sind ausserdem zwei besondere Dampfkondensatoren aufgestellt, welche den überschüssigen Dampf niederschlagen, wenn die Turbinenlast plötzlich zurückgeht, oder wenn eine Maschinengruppe unerwartet abgestellt werden muss. Der Reaktor selbst kann seiner grossen thermischen Trägheit wegen den sehr schnellen Laständerungen nicht folgen. Da das C. H.-Werk auch Plutonium produzieren soll, ist das Temperaturniveau im Reaktor niedrig gewählt worden, was aber den thermischen Wirkungsgrad des Kraftwerkes verschlechtert. Auch der Eigenbedarf ist hoch (ungefähr 15%), besonders weil die Umwälzgebläse viel Energie verbrauchen. Dieser Verbrauch könnte durch einen höheren Gasdruck im Reaktorsystem herabgesetzt werden. Trotz der niedrigen Dampfparameter erreicht der Wärmeausnutzungsgrad des C. H.-Werkes ziemlich hohe Werte; man erwartet einen netto Wirkungsgrad von $\eta = 0,21\text{...}0,23$, weil

die Wärmeverluste in der Reaktoranlage niedriger als in den Kesselanlagen von Brennstoffkraftwerken sind.

Die wichtigsten technischen Angaben des C. H.-Werkes können aus Tabelle I der Arbeit «Das Atomkraftwerk Calder Hall, Bull. SEV Bd. 48(1957), Nr. 12, S. 580, entnommen werden.

4. Wirtschaftliche Überlegungen und Verbesserungsmöglichkeiten von Reaktoren

Die Kostenangaben des C. H.-Werkes können zur Schätzung der wirtschaftlichen Aussichten von Atomkraftwerken nicht unmittelbar verwertet werden. Sie bedürfen einer Korrektur, weil: a) Die Hauptaufgabe des C. H.-Werkes die Plutoniumproduktion ist; b) Das C. H.-Werk die erste Grossleistungs-Atomkraftanlage darstellt, bei deren Bau man sich auf keine praktischen Erfahrungen stützen konnte.

Zur Ermittlung der Ausgaben, welche die Energieversorgung tragen muss, sind folgende Fragen zu beantworten: 1. Wie hoch sind die tatsächlichen Baukosten und wie sollen sie auf die Plutoniumproduktion bzw. auf die Energieerzeugung aufgeteilt werden; 2. Wie hoch ist der wirtschaftliche Wert des Plutoniums; 3. Welche praktischen Werte der Energieausbeute sind aus der Mengeneinheit des Energieträgers (des Urans) erreichbar [8].

Trotz der Unsicherheit in der Festsetzung der Ausgaben, ergeben die Angaben des C. H.-Werkes eine gewisse Einsicht in die zu erwartenden Energiekosten von Atomkraftwerken. Da die Errichtung des ersten Kraftwerkes mit umfangreichen Forschungen verbunden war und die Entwicklung von ganz neuen Apparaten erforderte, können die tatsächlichen Baukosten nicht genau erfasst werden. Die Kosten der Entwicklungsarbeiten sollen teilweise von den nachfolgenden Kraftwerken ähnlicher Bauart übernommen werden. Man schätzt die Bauaufwendungen des C. H.-Werkes auf 15...20 Millionen Pfund; dies ergibt spezifische Baukosten von 150...200 Pfund/kW. Ungefähr die Hälfte dieser Summe wurde zum Bau von Kernreaktoren aufgewendet. Ein zusätzlicher Kostenbetrag wird von der Ladung des Energieträgers (Uran) verursacht; dasselbe gilt für die Prüfungen und technischen Verbesserungen vieler Apparate. Der erwähnten Umstände wegen liegen die Errichtungskosten des C. H.-Werkes 2,5...3mal höher als die Baukosten von gleich grossen Brennstoffkraftwerken. Die hohen Anlagekosten verlangen, dass das Kraftwerk mit voller, gleichmässiger Belastung betrieben wird, d. h. es soll sich an der Deckung der Grundlast des Verbundnetzes beteiligen; diese Betriebsart wird auch vom Standpunkt der Plutoniumproduktion bevorzugt.

Angenommen die festen Jahreskosten (Zinsen + Abschreibung) betragen 8 %, die Ausnutzungsstunden 7000 h/Jahr, die Energieabgabe des Energieträgers 3000 MW-Tage/t und der Preis des Urans 20 000 Pfund/t, dann stellen sich die Energiekosten des C. H.-Werkes auf ungefähr 1,0 d/kWh ($d = \text{pence}$; 1 Pfund = 240 d). Die Zusammensetzung der Energiekosten ist in Tabelle IV angegeben, wo

die Zahlenwerte auch in Rappen umgerechnet wurden [2].

Energiekosten des C. H.-Werkes Tabelle IV

Kostengruppen	Kosten		Kostenverteilung auf die einzelnen Gruppen %
	d/kWh	≈ Rp./kWh	
Kapitalkosten	0,56	2,8	53
Kosten der Uranladung . .	0,10	0,5	9
Kosten des verbrauchten Urans	0,35	1,8	33
Laufende Betriebskosten .	0,05	0,3	5
Total	1,06	5,4	100

Die Energiekosten in den besten britischen Kohlenkraftwerken, die mit an Ort und Stelle gewonnenen Kohlen arbeiten, betragen 0,6...0,7 d/kWh. Obgleich die ersten Atomkraftwerke nicht imstande sind so niedrige Energiekosten aufzuweisen, sind die Kostenunterschiede nicht zu gross. Dabei ist zu erwähnen, dass die nötige Menge der teureren importierten Kohle in England beständig zunimmt, wodurch die Energiekosten der Kohlenkraftwerke sich entsprechend erhöhen werden. Man kann mit Sicherheit erwarten, dass die Baukosten der Atomkraftwerke nach einer gewissen Periode der technischen Entwicklung so weit zurückgehen, dass diese Werke in der Lage sein werden, mit den Brennstoffkraftwerken wirtschaftlich zu konkurrieren. Von grosser Bedeutung ist hier die Ausbeute und der Preis des erzeugten Plutoniums, wie auch die Veränderungen des Brennstoffpreises der konventionellen Kraftwerke.

Um die Energiekosten zu senken, müssen bei der Entwicklung von Atomkraftwerken zwei Faktoren berücksichtigt werden: a) Die Anlagekosten müssen herabgesetzt werden, ohne dabei die energetischen Eigenschaften der Kraftwerke zu verschlechtern. b) Die Ausgaben für den Energieträger müssen vermindert werden, was durch eine bessere Ausnutzung der Spaltstoffladung, einen guten Konversionsfaktor und geringere Aufbereitungskosten zu erreichen ist.

Die spezifischen Baukosten können nicht bloss durch technische Verbesserungen, sondern auch durch die Erhöhung der Einheitsleistungen von Reaktoranlagen gesenkt werden. Nimmt man die Baukosten eines 100-MW-Atomkraftwerkes als Kostenbasis an (100 %), dann betragen die spezifischen Errichtungskosten eines 60-MW-Werkes ungefähr 120 %, diejenigen eines 150-MW-Werkes aber nur 80...85 % [9]. Die Baukosten der britischen 300-MW-Atomkraftwerke, die mit gasgekühlten Reaktoren des C. H.-Typs ausgerüstet werden, sollen in der Grössenordnung von 30...40 Millionen Pfund liegen (40 % für die Reaktoranlage, 46 % für die Dampfkraftanlage, 14 % für Entwurf und Versuche), was einen spezifischen Aufwand von 100...140 Pfund/kW ergibt. Die Ladung des Energieträgers (≈ 250 t Uran) wird weitere 5 Millionen Pfund beanspruchen, wodurch die spezifischen Kapitalaufwendungen auf 120...150 Pfund/kW ansteigen werden. Die Baukosten eines ähnlichen Brennstoffkraftwerkes sind 60...70 Pfund/kW, d. h., dass

erprobt werden. Die von der CEA projektierten und bereits in Bau befindlichen Kraftwerke der ersten Entwicklungsstufe sind technisch nicht so weit fortgeschritten. Sie sind wie das C. H.-Werk ausgelegt.

5. Schlussbetrachtungen

Die wichtigsten Aufgaben im Reaktorbau sind zurzeit: Erhöhung der Temperatur im Reaktorkern, Vergrößerung der Energieausbeute je Einheit des Energieträgers und Verbesserung des Brutfaktors, d. h. die Erweiterung der energetischen Grundlage der Atomkraftwerke. Deshalb müssen die Versuchsarbeiten auf breiter Basis fortgesetzt und die schwierigen Werkstoffprobleme gelöst werden. Das C. H.-Kraftwerk hat eine Reaktoranlage, die mit mässigen Temperaturen und billigem Energieträger arbeitet; dies erleichtert die Werkstoffprobleme und erhöht die Betriebssicherheit des ersten Atomkraftwerkes. Es stellt das erste Grossleistungs-Atomkraftwerk dar, dessen Betriebsergebnisse zur zweckmässigen Gestaltung der nachfolgenden Atomkraftwerke viel beitragen werden. Dadurch ist das weitgehende Interesse zu erklären, das in allen Ländern dem C. H.-Werk entgegengebracht wird.

Literatur

- [1] *Britain Expands Nuclear Power Program.* Nucleonics Bd. 15(1957), Nr. 2, S. R 7.
Cost of Huge British Program Yet to Be Clearly Fixed. Nucleonics Bd. 15(1957), Nr. 4, S. 21.
- [2] *Calder Hall Report.* Nucleonics Bd. 14(1956), Nr. 12, S. S1...S13.
- [3] *Mechanical Engineering Features of the Calder Hall Nuclear Power Station.* 5. Weltkraftkonferenz Wien 1956. Vorabdruck für Konferenzteilnehmer, Abteilung J, Bericht 239 J/16. 21 S.
- [4] *Proceedings of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy,* hold in Geneva, 8...20 August 1955. Bd. 3: Power Reactors, S. 322...329. New York: United Nations 1955.
- [5] *Calder Hall — World's First Large Atomic Power Plant Begins Operation.* Power Engng. Bd. —(1956), Nr. 11, S. 76...78.
- [6] *Calder Hall — Britain's Hope for New Era.* Electr. Wld. Bd. 146(1956), Nr. 16, S. 122...123.
- [7] *Sykes, J. H. M.: Calder Hall: Birth of New Technology.* Electr. Wld. Bd. 146(1956), Nr. 19, S. 18, 26.
- [8] *Start-up of World's First Power Reactor.* Business Week Bd. —(1956), 27. Okt., S. 126...132.
- [9] *Southwood, J. R. M.: Der gasgekühlte Reaktor als Quelle elektrischer Energie.* ÖZE Bd. 10(1957), Nr. 4, S. 103...110.
- [10] *Comparison of the Industrial Designs.* Nuclear Engng. Bd. 2(1957), Nr. 10, S. 5...9.
- [11] *South of Scotland Nuclear Station.* Nuclear Engng. Bd. 2 (1957), Nr. 11, S. 51...59.
- [12] *Berkeley Nuclear Power Station.* Nuclear Engng. Bd. 2 (1957), Nr. 12, S. 96...102.

Adresse des Autors:
A. Kroms, 12 Brainerd Rd., Boston 34, Mass., USA.

Miscellanea

Richtigstellung zur Mitteilung über die Jahresversammlung des SWV

In der auf S. 900 erschienenen Mitteilung über die Jahresversammlung des befreundeten SWV ist leider ein sinnstörender Fehler stehen geblieben. Die Aare wurde bekanntlich von Aarberg in den Bielersee geleitet und nicht von Aarwangen, das ca. 20 km unterhalb Solothurn liegt. Ferner sei ergänzend erwähnt, dass zur Einhaltung gewisser Grenzen der Seestände des Murten-, Neuenburger- und Bielersees der Broye- und der Zihlkanal verbreitert werden müssen, was einen grossen Teil der Gesamtaufwendungen verursacht.

Wirtschaftliche Mitteilungen

**Unverbindliche mittlere Marktpreise
je am 20. eines Monats**

Metalle

		September	Vormonat	Vorjahr
Kupfer (Wire bars) ¹⁾ .	sFr./100 kg	241.—	261.—	375.—
Banka/Billiton-Zinn ²⁾ .	sFr./100 kg	909.—	910.—	977./968.—
Blei ¹⁾	sFr./100 kg	113.—	116.—	146.—
Zink ¹⁾	sFr./100 kg	91.—	93.—	123.—
Stabeisen, Formeisen ³⁾	sFr./100 kg	67.50	67.50	65.50
5-mm-Bleche ³⁾	sFr./100 kg	73.—	73.—	69.—

- ¹⁾ Preise franko Waggon Basel, verzollt, bei Mindestmengen von 50 t.
- ²⁾ Preise franko Waggon Basel, verzollt, bei Mindestmengen von 5 t.
- ³⁾ Preise franko Grenze, verzollt, bei Mindestmengen von 20 t.

Flüssige Brenn- und Treibstoffe

		September	Vormonat	Vorjahr
Reinbenzin/Bleibenzen ¹⁾	sFr./100 kg	40.—	40.—	41.—
Diesöl für strassenmotorische Zwecke . . .	sFr./100 kg	40.10	40.10	37.30 ²⁾
Heizöl Spezial ²⁾	sFr./100 kg	21.10	21.10	18.10
Heizöl leicht ²⁾	sFr./100 kg	20.30	20.30	17.80
Industrie-Heizöl mittel (III) ²⁾	sFr./100 kg	16.55	16.55	14.35
Industrie-Heizöl schwer (V) ²⁾	sFr./100 kg	15.35	15.35	13.15

- ¹⁾ Konsumenten-Zisternenpreis franko Schweizergrenze, verzollt, inkl. WUST, bei Bezug in einzelnen Bahnkesselwagen von ca. 15 t.
- ²⁾ Konsumenten-Zisternenpreise (Industrie), franko Schweizergrenze Buchs, St. Margrethen, Basel, Genf, verzollt, exkl. WUST, bei Bezug in einzelnen Bahnkesselwagen von ca. 15 t. Für Bezug in Chiasso, Pino und Iselle reduzieren sich die angegebenen Preise um sFr. 1.—/100 kg.

Kohlen

		September	Vormonat	Vorjahr
Ruhr-Brechkok I/II .	sFr./t	149.—	149.—	133.—
Belgische Industrie-Fettkohle				
Nuss II	sFr./t	135.50	135.50	115.—
Nuss III	sFr./t	135.50	135.50	112.50
Nuss IV	sFr./t	135.50	135.50	109.—
Saar-Feinkohle	sFr./t	102.50	102.50	89.50
Französischer Koks, Loire	sFr./t	155.50	155.50	139.50
Französischer Koks, Nord	sFr./t	149.—	149.—	129.50
Polnische Flammkohle				
Nuss I/II	sFr./t	136.—	136.—	117.50
Nuss III	sFr./t	133.50	133.50	115.—
Nuss IV	sFr./t	133.50	133.50	115.—

Sämtliche Preise verstehen sich franko Waggon St. Margrethen, verzollt, bei Lieferung von Einzelwagen an die Industrie, bei Mindestmengen von 15 t.