

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 46 (1955)
Heft: 2

Artikel: Der schweizerische Kernreaktor
Autor: Hälg, W.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060906>

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: 11.01.2026

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

tement du réglage en régime harmonique sinusoïdal (ou si l'on peut le déterminer à l'aide d'autres expériences).

Ce spectre peut être déduit de relevés wattmétriques, effectués en fonction du temps, à l'aide d'un wattmètre enregistreur conçu à cet effet, comme l'est celui de la Commission d'Etude pour le Réglage des Grands Réseaux Electriques de l'Association Suisse des Electriciens. Il se distingue essentiellement par une fréquence propre élevée (fidélité de l'enregistrement), une échelle des ordonnées suffisamment développée et une vitesse de déroulement assez grande.

L'interprétation des premières expériences effectuées avec cet appareil à Lausanne conduit, dans le domaine précité des fréquences des variations de charge, à une forme du spectre en $1/\nu^2$, ses ordonnées diminuant en proportion inverse du carré de la fréquence. Cette forme est précisément celle que laissait prévoir l'étude théorique de modèles dont le comportement aléatoire est régi par des fonctions dérivées d'un processus de Poisson.

Il faut espérer que la suite des essais de ce genre que la Commission d'Etude pour le Réglage des Grands Réseaux Electriques envisage d'effectuer sur différents réseaux, viendra enrichir

la documentation qu'il serait intéressant de posséder sur ce sujet encore peu exploré. En considérant la valeur trouvée pour l'écart quadratique moyen des variations de charge du réseau de Lausanne, le 18 décembre 1952 autour de midi, il ne faut pas oublier que sa clientèle est relativement peu industrielle et qu'il pourrait se révéler ailleurs des écarts quadratiques moyens plus élevés.

Bibliographie

- [1] Gaden, D.: Considérations sur la précision du réglage. Bull. Soc. franç. Electr. 7^e série, t. 2(1952), n° 16, avril, p. 181...197.
- [2] La régulation électro-hydraulique des turbines hydrauliques. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1950, t. 2, rapp. 315, 39 p.
- [3] Cuénod, M., A. Jacques et R. Renchon: Contribution à l'étude de la tenue de la fréquence dans un complexe électrique. Bull. Soc. belge Electr. t. 69(1953), n° 1, janvier/mars, p. 1...14.
- [4] Juillard, E.: Instrumentation; appareils spéciaux nécessités par les essais. Bull. ASE t. 43(1952), n° 13, 28 juin, p. 571...574.
- [5] Lehmann, G.: Calcul du spectre des fluctuations du courant absorbé par un réseau de distribution électrique. Bull. Soc. franç. Electr. 7^e série, t. 3(1953), n° 34, octobre, p. 593...595.
- [6] Fortet, R.: Spectre des fluctuations du courant absorbé par un réseau de distribution électrique. Communication présentée à la Société française des Electriciens le 16 mars 1954.

Adresse de l'Auteur:

D. Gaden, Ingénieur, Professeur à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne, Directeur aux Ateliers des Charmilles S. A., Genève.

Der schweizerische Kernreaktor

Vortrag, gehalten an der Diskussionstagung des SEV vom 28. Oktober 1954 in Zürich,
von W. Hül, Baden

621.039.421(494)

Das Programm der schweizerischen Arbeitsgemeinschaft für den Bau eines Kernreaktors unterscheidet sich in mancherlei Hinsicht vom Reaktorbauprogramm angelsächsischer Länder. Angereicherter Brennstoff ist heute für einen Leistungsreaktor nicht in genügender Menge erhältlich, und die Verwendung von natürlichem Uran schränkt die Wahl der Konstruktionsmaterialien äusserst ein. Wegleitungen für die Herstellung von Einzelteilen wie z. B. der Brennstoffelemente sind der Schweiz unzugänglich, besonders wenn solche Elemente in Reaktoren mit erhöhter Temperatur verwendet werden müssen. Die Unterlagen, welche von Reaktoren mit kleinem Neutronenfluss erhältlich sind, ermöglichen es, solche Reaktoren zu kopieren, sind jedoch unzureichend für den Bau eines Leistungsreaktors. Die Arbeitsgemeinschaft hat daher ein Projekt ausgearbeitet, das die fehlenden Erkenntnisse zu gewinnen erlaubt, ohne dass allzugrosse Risiken konstruktiver Art eingegangen werden müssen. Das Projekt sieht einen Reaktor mit 10 000 kW Wärmeleistung vor. Als Brennstoff dient natürliches Uran und als Moderator schweres Wasser. Der Reaktor arbeitet bei relativ niedrigen Temperaturen, wobei die Möglichkeit besteht, Brennstoffelemente unter erhöhter Temperatur dem Neutronenfluss auszusetzen.

Le programme de travail pour la construction d'une pile à réaction nucléaire, établi par l'Association des Industries Suisses de Recherches Nucléaires, diffère en plusieurs points du programme adopté par les pays anglo-saxons. On n'a actuellement pas à disposition la quantité nécessaire d'uranium enrichi pour un réacteur nucléaire de puissance. Le choix des divers matériaux de construction se trouve être très restreint du fait de l'emploi d'uranium naturel. Etant secrètes, les directives pour la construction des différentes parties (comme par exemple celle des éléments de production d'énergie) nous font totalement défaut et ceci tout particulièrement pour les éléments de réacteurs à haute température. Nous pouvons copier dans leur construction les réacteurs travaillant avec une petite densité du flux des neutrons en nous basant sur des documents en notre possession, mais ces documents sont par trop incomplets pour nous permettre de construire une pile atomique de puissance. L'Association a élaboré un projet permettant de combler les lacunes et de parfaire les connaissances nécessaires à la construction d'un réacteur sans avoir à courir de trop gros risques. Le projet prévoit la construction d'une pile à réaction nucléaire d'une puissance thermique de 10 000 kW. On emploiera comme source d'énergie de l'uranium naturel et pour le modérateur de l'eau lourde. La pile travaillera à des températures relativement basses, ce qui n'exclut pas la possibilité de soumettre certains éléments de production d'énergie à de plus hautes températures dans le flux des neutrons.

A. Einleitung

Die Voraussetzungen, von denen Physiker und Konstrukteure beim Bau eines Kernreaktors in der Schweiz auszugehen haben, sind wesentlich verschieden von denjenigen in den Vereinigten Staaten von Amerika, Kanada und England. Demzufolge wird ein schweizerischer Reaktor eine Anzahl von Merkmalen aufweisen, welche gerade mit die-

ser veränderten Ausgangslage zusammenhängen. Im folgenden seien einige dieser Merkmale sowie deren Zusammenhänge mit anderen Reaktorkonstruktionsmöglichkeiten erläutert.

B. Grösse des Reaktors

Eine der ersten Fragen, die sich unseren Reaktorkonstrukteuren stellt, ist diejenige nach der

Grösse des Reaktors. Soll ein relativ kleiner Reaktor mit einigen 100 kW Wärmeleistung oder ein grösserer mit einigen 10 000 kW gebaut werden? Für den ersten Fall liegen uns im Detail zugängliche Lösungen vor. Wir würden dadurch einen Versuchsreaktor, ähnlich der bereits in Norwegen und Schweden in Betrieb befindlichen, erhalten, mit dem wir Grundlagenforschungen auf verschiedenen Gebieten der Wissenschaft treiben könnten, aber nur schwer innert nützlicher Frist Auskünfte erhalten würden, welche wir für den Bau eines energieerzeugenden Reaktors benötigen. — Im zweiten Fall haben wir uns beim Reaktorbau weitgehend auf unsere eigenen Voruntersuchungen, soweit wir sie ohne Reaktor durchführen können, zu verlassen. Ein Reaktor mit einigen 10 000 kW Leistung wird uns dann aber in die Lage versetzen, Untersuchungen durchzuführen, welche wir für den späteren Bau eines Kernkraftwerkes benötigen. Diese Untersuchungen werden ermöglicht, weil ein solcher Reaktor einen genügend grossen Neutronenfluss aufweisen wird.

C. Natürliches oder angereichertes Uran?

Während man in den angelsächsischen Ländern den Bau von Reaktoren mit angereicherten Brennstoffelementen sehr fördert, wodurch eine freiere Wahl der Konstruktionsmaterialien zugelassen werden kann, sind wir darauf angewiesen, natürliches Uran zu verwenden, nicht nur weil für uns auch nach sehr optimistischen Auffassungen nur eine verhältnismässig kleine Menge dieser Substanz erhältlich sein wird, sondern auch deshalb, weil wir den Betrieb des Reaktors nicht ausschliesslich von den ausländischen Lieferanten des angereicherten Brennstoffes abhängig machen wollen. Ferner erzeugt der angereicherte Reaktor seine Energie in einem relativ kleinen Volumen, weshalb sich auch bei der Wärmeabfuhr neue Probleme ergeben.

D. Moderator

Hat man sich einmal für natürliches Uran als Brennstoff entschieden, dann kann sowohl Graphit als auch schweres Wasser für den Moderator verwendet werden. In beiden Fällen ist es möglich, ein kritisches, d. h. eine Kettenreaktion unterhaltendes System aufzubauen. Der graphitmoderierte Reaktor benötigt etwa 40 t Uran und 800 t reines Graphit. Ein mit schwerem Wasser moderiertes System dagegen kommt mit rund 5 t Uran und 10 t schwerem Wasser aus.

Tabelle I gibt einen Kostenvergleich der für den Reaktorkern benötigten Materialien unter Zugrundelegung eines Uranpreises von 300 Fr./kg sowie eines D_2O -Preises von 1 Fr./g.

10 000-kW-Reaktor. Kostenvergleich für die Materialien des Reaktorkernes bei Graphit und D_2O als Moderator
Tabelle I

| Graphitreaktor | | D_2O -Reaktor | |
|----------------|------------|-----------------|------------|
| | Fr. | | Fr. |
| 40 t Uran | 12 000 000 | 5 t Uran | 1 500 000 |
| 800 t Graphit | 5 000 000 | 10 t D_2O | 10 000 000 |
| | | 60 t Graphit | 400 000 |
| Total | 17 000 000 | Total | 11 900 000 |

Die Arbeitsgemeinschaft, welcher Vertreter von Ciba, Escher Wyss A.-G., Gebr. Sulzer A.-G. und A.-G. Brown, Boveri & Cie. angehören, hat sich aus folgenden Gründen für einen Schwerwasserreaktor entschieden:

1. Die Beschaffung von 40 t Uran ist auf erhebliche Schwierigkeiten gestossen.
2. Das schwere Wasser kann ausser als Moderator auch noch als Wärmeträger dienen.
3. Die Herstellung von schwerem Wasser zu einem günstigen Preis ist in der Schweiz möglich; eine Versuchsanlage ist seit rund 1 Jahr in Betrieb. Diese liefert heute etwa 100 kg reines D_2O pro Jahr.

E. Reaktionstemperatur

Es stellt sich nun die Frage, ob der schwerwassermoderierte 10 000-kW-Reaktor seine Energie bei Temperaturen unter 100 °C oder bei erhöhter Temperatur produzieren soll. Vom Standpunkt der späteren Energieerzeugung aus ist die zweite Möglichkeit verlockend. Die Erreichung dieses Ziels ist jedoch mit einem so grossen Risiko behaftet, dass die Arbeitsgemeinschaft es vorgezogen hat, vorerst einen Reaktor zu planen, welcher bei relativ niedrigen Temperaturen arbeitet. Ein Hochtemperaturreaktor erfordert nämlich nicht nur eine druckfeste Konstruktion, wodurch recht viel Material, welches den Neutronenhaushalt des Systems stark belastet, eingeführt wird, sondern er verlangt von uns spezielle Kenntnisse beim Bau der Brennstoffelemente.

Die Uranelemente sind nämlich mit einer Hülle zu umgeben, damit die radioaktiven Spaltprodukte, welche durch die Kettenreaktion im Uran entstehen, nicht in die Moderator- oder Kühlsubstanz gelangen können. Diese Hülle muss mit dem Uran in ausgezeichnetem Wärmekontakt stehen, weil praktisch die gesamte Energie im Uran entsteht und aus diesem abgeleitet werden muss. Uranmetall ist nun aber ein recht unangenehmes Material: Es zeigt äusserst starke Anisotropie in seinem Kristallbau; es diffundiert bei höheren Temperaturen in Al, welches nach dem heutigen Stand der Technik allein als Hülle gebraucht werden kann; es ändert seine Gestalt nach Durchlaufen mehrerer Temperaturzyklen, wodurch es sich von einer anfänglich gut leitend angebrachten Hülle löst, und es zeigt äusserst gefährliche Schädigungen, verursacht durch die dauernde Einwirkung der mit grosser Geschwindigkeit im Kristallgitter aufprallenden Spaltprodukte. Solche Strahlungseffekte im Uran sind bei einem Reaktor kleiner Leistung unbedeutend, da die Auswirkungen erst nach Jahrzehnten sichtbar werden. Bei einem Leistungsreaktor hingegen machen sie sich äusserst unangenehm bemerkbar. Die Zahlen, welche angeben, wie viel Gitterschädigungen ein Uranmetall erleiden darf, bevor es zerstört wird, schwanken und sind von der Vorbehandlung des Materials abhängig. Die Arbeitsgemeinschaft hat sich deshalb gerade auf diesem Sektor intensiv betätigt, doch sind zur Überprüfung der vorgenommenen Uranbehandlungen Bestrahlungen in einem Materialprüfreaktor mit höherer Neutronendichte nötig.

Die beschriebenen Schwierigkeiten mit den Brennstoffelementen steigern sich noch beträcht-

lich, wenn ausser grossem Neutronenfluss im Reaktor auch noch die Temperatur erhöht wird. Aluminium und Aluminiumlegierungen scheiden dann als Hüllenmaterial aus, da ihre Festigkeiten mit zunehmender Temperatur abnehmen. Ausserdem ist die Resistenz dieser Materialien gegen Korrosionsangriffe in heissem Wasser recht bescheiden. Norwegische Versuche haben gezeigt, dass korrodierte Al-Hüllen bedenkliche Folgen für ein Brennstoffelement aufweisen. Das Uran reagiert mit dem eindringenden Wasser oder Wasserdampf, worauf unter Volumenvergrösserung eine Zerstörung des Brennstoffelementes stattfindet. Dadurch gelangen radioaktive Spaltprodukte in das Kühl- bzw. Moderatorsystem, verseuchen Wärmeaustauscher sowie Zirkulationspumpen und machen eine Reinigung des D_2O unumgänglich. Als Ersatz für Al lässt sich Zirkon verwenden, ein Metall, welches bis heute aber noch nicht in genügender Menge und Reinheit hergestellt wird, und dessen Eigenschaften und Bearbeitungsweise ebenfalls noch nicht restlos bekannt sind.

Gemäss all diesen Überlegungen soll der schweizerische Reaktor derart gebaut werden, dass er seine Energie bei niedriger Temperatur erzeugt. Um aber Brennstoffelemente bei erhöhten Temperaturen, wie sie in heissen Leistungsreaktoren auftreten, zu studieren, wird es möglich sein, in den Reaktor einige Elemente so einzusetzen, dass sie bei erhöhter Temperatur und unter grosser Neutronendichte betrieben werden können.

Die Konstruktionsgruppe der Arbeitsgemeinschaft hat zwei Ausführungsmöglichkeiten für einen Reaktor bearbeitet. Tabelle II enthält die an das Projekt geknüpften Betriebsbedingungen, und in Tabelle III sind einige Betriebsdaten wiedergegeben.

Schweizerischer Kernreaktor; Betriebsbedingungen

Tabelle II

| | |
|--|---|
| Minimale Leistung Brennstoff Moderator | 10 000 kW Wärme natürliches Uran schweres Wasser ($20^\circ\text{C} > T > 50^\circ\text{C}$) |
| Kühlung | schweres Wasser ($20^\circ\text{C} > T > 70^\circ\text{C}$) |
| Neutronenfluss | $> 10^{13}$ Neutronen/s \cdot cm ² |
| Einbaumöglichkeit von Brennstoffelementen mit erhöhter Temperatur. | |

Schweizerischer Kernreaktor; Betriebsdaten

Tabelle III

| | |
|--|-----------|
| Totale Leistung | 10 000 kW |
| davon erzeugt in: | |
| Uran | 9400 kW |
| Moderator | 500 kW |
| Reflektor | 80 kW |
| Abschirmung | 20 kW |
| Uranmenge | rund 5 t |
| Mittlere spezifische Belastung des Urans: 21 W/cm ² | |
| Maximale spezifische Belastung des Urans: 53 W/cm ² | |

Die beiden Ausführungsmöglichkeiten unterscheiden sich in der Gestaltung der Kühlung der Brennstoffelemente.

F. Kühlung der Brennstoffelemente

Im ersten Projekt bilden Moderator und Elementkühlung kommunizierende Systeme. Das eintretende schwere Wasser verteilt sich derart, dass es, durch Leitrohre geführt, hauptsächlich entlang den Uramelementen strömt und diesen die Wärme entzieht. Durch Hilfskanäle wird auch eine bescheidene Zirkulation des Moderatorwassers, d. h. desjenigen Wassers, welches sich zwischen den Elementen befindet, erreicht. In einem äusseren Wärmeaustauscher gibt das schwere Wasser seine Wärme an gewöhnliches Wasser ab.

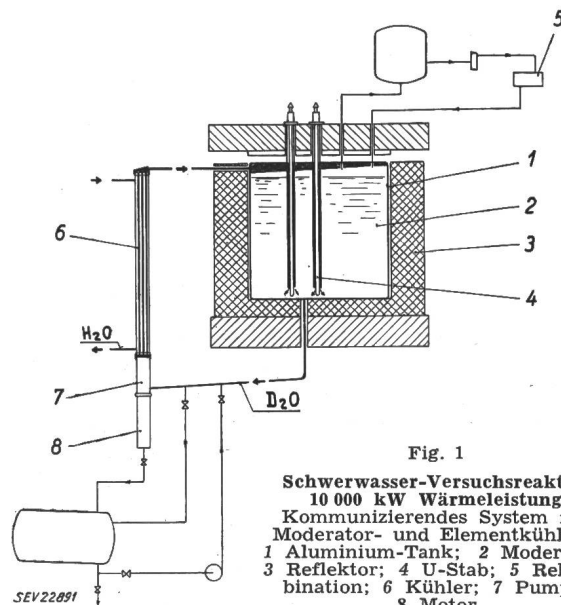


Fig. 1

Schwerwasser-Versuchsreaktor, 10 000 kW Wärmeleistung
Kommunizierendes System für Moderator- und Elementkühlung
1 Aluminium-Tank; 2 Moderator; 3 Reflektor; 4 U-Stab; 5 Rekombination; 6 Kühler; 7 Pumpe; 8 Motor

Die Vorteile dieser Bauart sind evident. Das komplizierte Zuleitungssystem mit seinen Dichtungsproblemen zu jedem Brennstoffelement fällt dahin, da eine einfache Verteilung innerhalb des Reaktortanks vorgenommen werden kann. Das innere Verteilsystem braucht gegen den Moderator

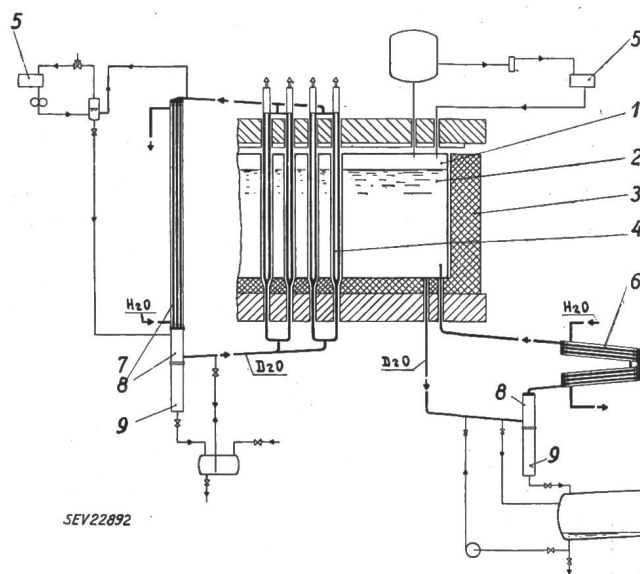


Fig. 2

Schwerwasser-Versuchsreaktor, 10 000 kW Wärmeleistung
Getrennte Kühlsysteme für Moderator und Brennstoffelemente
1 Aluminium-Tank; 2 Moderator; 3 Reflektor; 4 U-Stab; 5 Rekombination; 6 Moderator-Kühler; 7 Kühler; 8 Pumpe; 9 Motor

nicht dicht zu sein. Als Nachteil ist die Verseuchung der gesamten D₂O-Menge anzusehen, welche durch eine gebrochene Uranstabhülle verursacht wird.

Das zweite Projekt sieht getrennte Kreisläufe für Moderator und Uramelementkühlung vor. Die

zur kontinuierlichen Reinigung des D₂O und zur Rückverbrennung des infolge der intensiven Strahlung im Reaktortank aus dem Wasser gebildeten Knallgases.

In Tabelle IV sind die Einzelheiten der beiden Projekte einander gegenübergestellt.

Schweizerischer Kernreaktor; Konstruktionsmöglichkeiten

Tabelle IV

| | Kommunizierende Kreisläufe für Moderator und U-Kühlung | Getrennte Kreisläufe für Moderator und U-Kühlung |
|--|---|--|
| Uranstäbe: | | |
| Durchmesser mm | 26 | 25,4 |
| Länge mm | 2300 | 2400 |
| Anzahl | 208 | 240 |
| Uranmenge t | 4,8 | 5,0 |
| Hüllendimensionen Ø mm | 26/30 | 25,4/29 |
| D ₂ O-Kühlspalt mm | 5 | 3,5 |
| Wasserleitrohr Ø mm | 40/43 | 36/38 |
| Luftspalt zwischen Leitrohr und Tankrohr . . . mm | — | 2,25 |
| Moderatorsystem: | | |
| Tankvolumen m ³ | 9,2 | 9,8 |
| Durchmesser des Tanks mm | 2250 | 2300 |
| Höhe des Tanks mm | 2400 | 2400 |
| Tankrohr Ø mm | — | 42,5/45 |
| D ₂ O-Menge t | 10,2 | 10,5 |
| D ₂ O-Umlaufgeschwindigkeit l/s | 130 | 45 |
| Eintrittstemperatur bei 20°C H ₂ O-Temperatur . °C | mittlere Temperatur: 40 | 26 |
| Austrittstemperatur °C | | 32 |
| Druckverlust im Kühler kg/cm ² | | 3,7 |
| Pumpleistung (motorseitig) für D ₂ O-Förderung . kW | 100 | rund 30 |
| Pumpleistung (motorseitig) für H ₂ O-Förderung . kW | 60 | rund 18 |
| U-Kühlsystem: | | 5 Wärmeaustauscher |
| D ₂ O-Menge t | im Moderatorsystem enthalten | 0,6 |
| D ₂ O-Umlaufgeschwindigkeit l/s | | 45 |
| Eintrittstemperatur bei 20°C H ₂ O-Temperatur . °C | | 40 |
| Austrittstemperatur °C | | 57 |
| Druckverlust im Kühler kg/cm ² | | 3,7 |
| Pumpleistung (motorseitig) für D ₂ O-Förderung . kW | | 5 × 30 = 150 |
| Pumpleistung (motorseitig) für H ₂ O-Förderung . kW | | 5 × 18 = 90 |
| Graphit-Reflektor: | | |
| Dicke mm | 750 | 750 |
| Innendurchmesser mm | | 2340 |
| Aussendurchmesser mm | | 3840 |
| Höhe mm | | 2500 |
| Bodenreflektor-Dicke mm | 750 | 400 |
| Volumen (total) m ³ | | 22,8 |
| Gewicht (d = 1,6) t | 38,0 | 36,5 |
| Abschirmung: | | |
| Eisen-Totalgewicht t | | 147 |
| Beton-Dicke mm | 2400 | 2400 |
| Volumen (rund) m ³ | 400 | 400 |
| Reaktorsteuerung: | 6 Schnellschlußstäbe | 6 Schnellschlußstäbe (Ø 60, Länge 1500 mm) |
| | 2 Regulierstäbe | 2 Regulierstäbe |
| | 6 vertikale Kanäle für hohe Temperaturen | 8 vertikale Kanäle für hohe Temperaturen |
| | rund 40 Mess- und Versuchskanäle | 10 Vertikal-Kanäle 21 horizontale Kanäle 1 Isotopringrohr 14 Messkanäle 20 |
| Versuchs- und Meßstellen: | | |
| Ventilations-Gebläseleistung kW | | |

Elementkühlung wird hier sogar in fünf Gruppen unterteilt, so dass bei der Havarie eines Uranstabes nur ein Fünftel des Kühlwassers verunreinigt wird. Für die Moderatorkühlung ist ein besonderer Wärmeaustauscher vorzusehen. Ein gewichtiger Nachteil ist das äusserst komplizierte Zu- und Ab-leitungssystem zu jedem einzelnen Uranstab mit all seinen Möglichkeiten für Undichtigkeiten. Beide Projekte benötigen dieselben Hilfseinrichtungen

Die Figuren 3 und 4 erklären besser als viele Worte den Aufbau der beiden Möglichkeiten.

G. Schlussbemerkungen

Die Realisierung des erwähnten Projektes verlangt die Lösung der Schwierigkeiten, wie sie vorgängig erläutert wurden. Das Hauptproblem wird die Herstellung der Hülle um die Brennstoffele-

mente sein, wobei ein bleibender guter Wärmekontakt zu erreichen ist. Die Strahlungseffekte an Baustoffen, besonders Effekte von Spaltprodukten in

hohen Temperaturen zu planen. Bis zur Erreichung dieses Ziels bedarf es aber eines nicht zu unterschätzenden Arbeitsaufwandes auf allen Gebieten

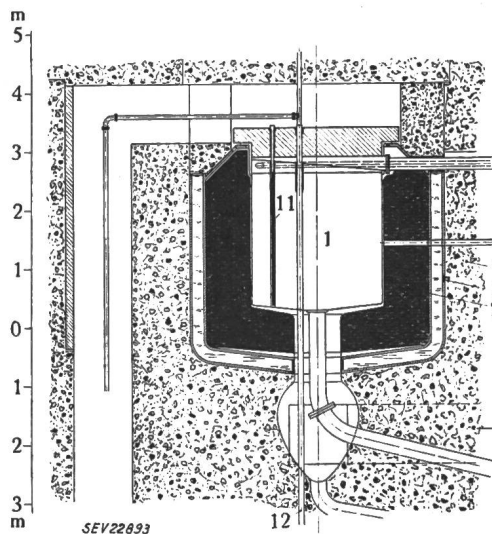


Fig. 3

Schnittbild des aktiven Teils; kommunizierende Kühlung von Moderator und Brennstoffelementen
1 Aluminiumbehälter; 2 Graphit-Reflektor; 3 Eisenpanzer; 4 Betonmantel; 11 Uranstab; 12 Versuchskanal

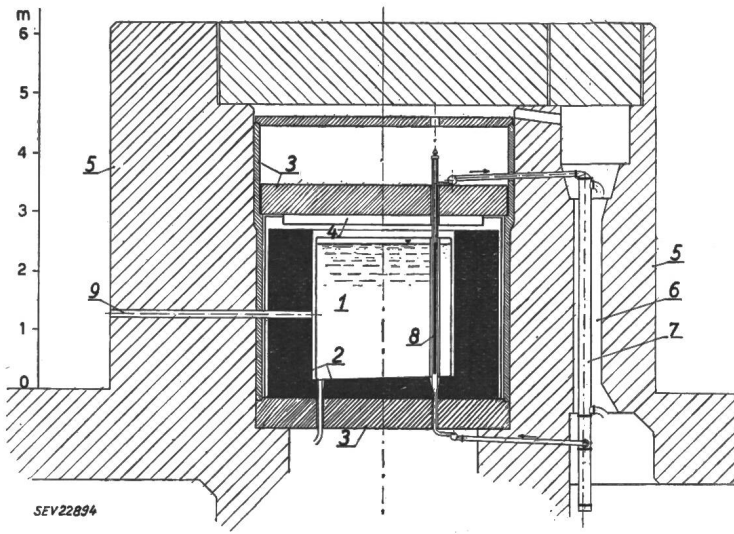


Fig. 4

Getrennte Kühlung von Moderator und Brennstoffelementen
1 D₂O; 2 Graphit-Reflektor; 3 Eisenabschirmung; 4 H₂O-Abschirmung; 5 Beton-Mantel; 6 Entlüftungskanal; 7 Uranstab-Kühlsystem; 8 Uranstab; 9 Versuchs-Kanal

Schwerwasser-Versuchsreaktor, 10 000 kW Wärmeleistung

Uran, sind ernsthaft zu studieren, und eine Stabilisierung des Uranmetalls gegen diese Art der Zerstörung muss gefunden werden, bevor ein Dauerbetrieb des Reaktors bei hoher Leistung verantwortet werden kann. Erst nachher können wir dazu übergehen, energieerzeugende Kernreaktoren mit

der angewandten Wissenschaft. Sehen wir zu, dass wir diese Arbeit geleistet haben, bevor die Energiekonsumenten die zu erwartenden Forderungen nach neuen Energiequellen stellen werden.

Adresse des Autors:

Dr. W. Hülgl, A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).

Diskussionsbeiträge

Über die niederländischen Pläne für den Bau von Versuchsreaktoren

Obwohl heute die schweizerischen Reaktorpläne diskutiert werden, möchte ich Ihnen kurz Bericht erstatten über die niederländischen.

Teilweise sind diese Pläne, die in enger Zusammenarbeit mit Norwegen aufgestellt werden, ziemlich gleich Ihren Ideen, weshalb ich nur erwähnen möchte, dass bei uns ein heterogener Reaktor, moderiert mit schwerem Wasser, mit getrennter Schwerwasserkühlung, vorgesehen ist. Der Brennstoff ist metallisches Uran. Weil wir an Energiereaktoren interessiert sind, werden wir versuchen, das Kühlwasser bis 230 °C zu erhitzen. Es wird deshalb nötig sein, den ganzen Reaktor in ein Druckgefäß einzubauen.

Abgesehen von dieser Durchentwicklung des norwegisch-niederländischen Reaktors in Kjeller bei Oslo, entwickeln wir aus folgenden Gründen einen homogenen Flüssigkeits-Brennstoff-Reaktor mit einer Uranoxyd-Suspension in schwerem Wasser:

Erstens braucht man in einem derartigen Reaktor keine Brennstoffelemente; dies ist wichtig, weil die Herstellung von Brennstoffelementen mit grosser Lebensdauer, guten wärmetechnischen und Korrosions-Eigenschaften, sowie einfacher Konstruktion noch nicht befriedigend gelöst ist.

Zweitens ist die Lebensdauer des metallischen Urans noch sehr beschränkt. Man muss deswegen öfters das Metall reinigen und wieder herstellen. Diese beiden Probleme bestehen nicht, wenn man eine Uranoxyd-Suspension anwendet; überdies ist dabei eine kontinuierliche Reinigung möglich.

Drittens kann man einen homogenen Flüssigkeits-Reaktor ohne inneren Wärmeaustausch bauen, also ohne die dazu notwendigen Konstruktionsteile. Nicht nur ist dadurch eine einfache Konstruktion möglich, sondern es ist auch ein hoher Konversionsfaktor (Produktion von verhältnismässig

viel Plutonium bei der Spaltung von Uran) gewährleistet. Schliesslich ist es möglich, einem derartigen Reaktor sehr viel Energie zu entnehmen, und zwar bis etwa 25 MW/m³ Reaktorinhalt.

Natürlich sind viele physikalische, chemische und technologische Fragen noch nicht gelöst; ausserdem brauchen wir schwach angereichertes Uran, damit ein derartiger Reaktor auch bei 250 °C kritisch arbeitet. Immerhin glauben wir, die Entwicklung so weit durchgeführt zu haben, dass wir daran gehen müssen, einen solchen Reaktor zu bauen.

Es hat mich gefreut, dass Sie mir die Möglichkeit geboten haben, von den niederländischen Plänen zu berichten. Es ist wichtig, dass wir in Europa einander gut informieren, nicht nur über unsere Kenntnisse von Reaktoren, sondern auch über unsere Baupläne. Man sollte nicht zu viele gleichartige Reaktoren bauen; denn es ist von grösstem Interesse, so viele verschiedene Typen von Reaktoren zu bauen als möglich ist, damit man gemeinsam die beste Lösung für einen wirtschaftlich arbeitenden Energiereaktor findet.

Hoffentlich wird die neugegründete European Atomic Energy Society hier eine nützliche Rolle spielen können.

Dr. J. J. Went, Arnhem

Eingliederung der aus Kernenergie erzeugten Elektrizität in die schweizerische Elektrizitätswirtschaft

Wie kann man sich heute die Eingliederung der aus Kernenergie erzeugten Elektrizität in die schweizerische Elektrizitätswirtschaft vorstellen?

Man hat von der Erwartung auszugehen, dass bis zum Jahr 1960 der Bedarf an elektrischer Energie rund 14 TWh¹⁾

¹⁾ 1 TWh (Terawattstunde) = 10¹² Wh = 10⁹ kWh (1 Milliarde kWh).

betragen wird und dass dieser Bedarf dannzumal aus den bestehenden und zurzeit im Bau befindlichen Wasserkraftwerken gedeckt werden kann. Nach heutiger Auffassung beträgt die Verfügbarkeit wirtschaftlich ausbaubarer Wasserkräfte in der Schweiz rund 28 TWh. In welcher Zeit wird sich der Bedarf vom Jahre 1960 an verdoppelt haben und damit den Vollausbau unserer Wasserkräfte erfordern?

Wenn wir annehmen, dass das Gesetz der Verdoppelung des Bedarfs innert 10 Jahren auch weiterhin Geltung haben werde, so würden schon 1970 unsere voll ausgebauten Wasserkräfte nur gerade noch ausreichen, um den Bedarf zu decken, und es wäre von dann an die schweizerische Elektrizitätswirtschaft gezwungen, den weiter zunehmenden Bedarf aus anderen Energiequellen zu decken.

So unwahrscheinlich uns das Gesetz der Bedarfsverdoppelung in 10 Jahren auch erscheinen mag, wenn man bedenkt, dass dabei der Bedarf in 20 Jahren auf das Vierfache, in 30 Jahren auf das Achtfache und in 40 Jahren auf das Sechzehnfache steigt, so ergibt die Statistik doch, dass in der abgelaufenen Zeit dieses Gesetz auch in der Schweiz seine Geltung erwiesen hat. Die Zunahme des Inlandbedarfs der Schweiz (ohne Berücksichtigung der Energieabgabe an Elektrokessel und Speicherpumpen) folgt in den Jahren seit 1930/31, nach den Statistiken des Eidgenössischen Amtes für Elektrizitätswirtschaft ausgewertet, mit relativ kleinen Abweichungen, bedingt durch Konjunktur und Krise, die Aufeinanderfolge nasser und trockener Jahre, ziemlich genau diesem Gesetz.

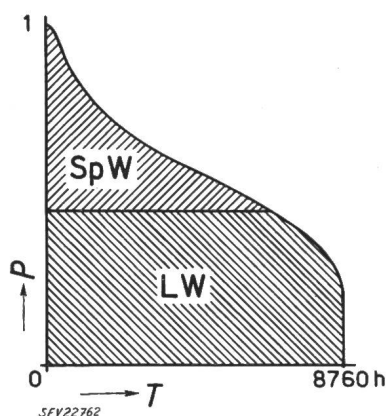


Fig. 1

Deckung des Bedarfs von 14 TWh etwa im Jahr 1960

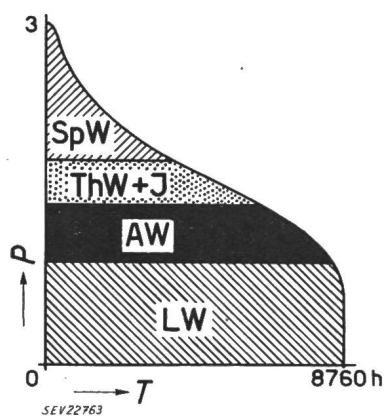


Fig. 2

Deckung eines Bedarfs von rund 42 TWh nach Vollausbau der Wasserkräfte mit rund 28 TWh

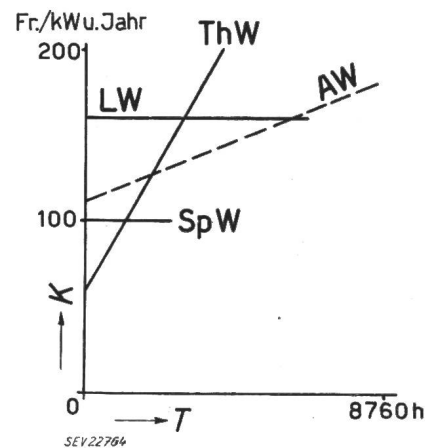


Fig. 3

Kostenlinien der Energie aus verschiedenen Kraftwerken

T Benützungsdauer der Leistung; P Leistung; K Fr./kW und Jahr; LW Laufwerke; SpW Speicherwerke; ThW thermische Werke (Kohle oder Öl); J Energieimport; AW Atomkraftwerke

Die Nordostschweizerischen Kraftwerke A.-G. (NOK), 1914 gegründet, hatten im ersten Betriebsjahr einen Umsatz von ca. 100 GWh²⁾; heute nach 40 Jahren beträgt er über 2400 GWh; er ist also nicht nur auf das Sechzehnfache, sondern auf das Vierundzwanzigfache gestiegen.

Trotzdem fällt es schwer, heute daran zu glauben, dass schon 1970 unsere Wasserkräfte gerade noch ausreichen werden, um den Bedarf zu decken. Aber wenn auch bei langsamerer Bedarfszunahme dieser für die schweizerische Elektrizitätswirtschaft einen Wendepunkt darstellende Moment sich um ein Jahrzehnt verschieben sollte, so ist es verständlich, dass man sich schon heute eine Vorstellung darüber zu machen sucht, wie die Elektrizitätswirtschaft sich nachher gestalten werde.

Betrachten wir uns den Bedarf des Jahres 1960 in der vereinfachten Form der Jahresdauerlinie der Leistung (Fig. 1), so wird die mittlere Horizontale etwa den Bereich, welcher als Grundlast von den Laufwerken (LW) gedeckt wird, vom Bereich, der von den Speicherwerken (SpW) gedeckt wird, abgrenzen. Stellen wir uns den Zeitpunkt vor, in welchem der Bedarf auf das Dreifache, der Ausbau der Wasserkräfte auf das Doppelte (Vollausbau) gestiegen ist (Fig. 2), so verbleibt zwischen der durch die Laufwerke ge-

deckten Grundlast und der durch die Speicherwerke gedeckten Spitze eine freie Fläche, welche denjenigen Teil des Bedarfes darstellt, der nicht aus Wasserkraften, sondern aus anderen Energiequellen gedeckt werden muss.

Diese Situation ist zwar für die schweizerische Elektrizitätswirtschaft nicht neu. Im letzten Winter bestand infolge ungünstiger Wasserverhältnisse ein ähnliches Manko, das aber, ohne dass der Verbraucher etwas davon zu spüren bekam, durch thermische Energieerzeugung im Inland und durch Energieimport gedeckt werden konnte. Wenn aber dieses Manko ein im Verhältnis zum Bedarf immer grösseres Ausmass annimmt, darf und kann man sich auf diese Aushilfe allein nicht mehr verlassen, und es geht nun die Hoffnung dahin, dass bis zu diesem Zeitpunkt aus Kernenergie gewonnene Elektrizität wenigstens teilweise die Lücke auszufüllen vermöge.

Es liegt in der Natur der Sache, dass die aus Atomkraftwerken erzeugte Energie unmittelbar über der aus den Laufkraftwerken gedeckten Grundlast mit möglichst hoher Gebrauchsdauer eingesetzt, während der obere Teil des Mangelgebietes im Bereiche niedrigerer Gebrauchsdauer wie bisher aus thermischen Werken im Inland und durch Import gedeckt wird, insbesondere der mit den wechselnden Wasserverhältnissen variable Teil. Diese Aufgabenteilung ergibt sich auch aus der Kostenstruktur der verschiedenen Energiekategorien (Fig. 3).

Energie aus zu Nachkriegspreisen erstellten Laufkraftwerken mit 6000...7000stündiger Ausnutzungsmöglichkeit der

ausgebauten Leistung kostet rund 160 Fr./kW und Jahr, Energie aus Speicherkraftwerken mit ca. 2500stündiger Ausnutzungsmöglichkeit (wovon rund $\frac{2}{3}$ im Winter, $\frac{1}{3}$ im Sommer) etwa 100 Fr./kW und Jahr.

Die Kostenlinie thermischer Energie ist dargestellt durch eine ansteigende Gerade, ausgehend von den festen Kosten mit rund 60 Fr./kW und Jahr und steigend entsprechend den Brennstoffkosten von rund 3...4 Rp./kWh je nach Brennstoffpreisen.

Was das Atomkraftwerk betrifft, so haben wir heute gehört, dass die beweglichen Kosten, d. h. die Kosten des Atombrennstoffes, etwa auf den 4. bis 5. Teil derjenigen eines mit Kohle oder Öl betriebenen thermischen Kraftwerkes zu veranschlagen sein werden. Dagegen sind sicher entsprechend den höheren Anlagekosten die festen Kosten grösser als beim gewöhnlichen thermischen Kraftwerk. Die Kostenlinie des Atomkraftwerkes ist also dargestellt durch eine flacher verlaufende, aber von einem höher liegenden Anfangspunkt ausgehende Gerade.

Damit im Bereich von etwa 6000 h, mit welchem ein Atomkraftwerk im Rahmen der schweizerischen Elektrizitätswirtschaft einmal eingesetzt werden kann, die Energie nicht teurer wird als aus Wasserkraft gewonnene Energie, dürfen dessen feste Kosten nicht höher liegen als rund 100...120 Fr./kW und Jahr. Wenn wir den Jahreskostenansatz eines Atomkraft-

²⁾ 1 GWh (Gigawattstunde) = 10^9 Wh = 10^6 kWh (1 Million kWh).

werkes vorsichtigerweise etwas höher annehmen, als bei einem gewöhnlichen thermischen Kraftwerk, so gelangt man zu einem zulässigen Ansatz für die Erstellungskosten von 800...1000 Fr./kW, also verhältnismässig wenig mehr als für ein gewöhnliches thermisches Kraftwerk (modernes grosses Dampfkraftwerk rund 600 Fr./kW).

Man erkennt hieraus, dass es in erster Linie die Erstellungskosten sind, welche für die Konkurrenzfähigkeit des Atomkraftwerkes ausschlaggebend sind. Die Erstellungskosten sind aber weitgehend von der zweckmässigen Lösung der thermischen Probleme abhängig. Darum interessiert sich die schweizerische Elektrizitätswirtschaft an der Entwicklungsarbeit des Versuchsreaktors und ist gewillt, aktiv daran mitzuwirken.

A. Engler, Baden (AG).

«Brennstoff»-Reserven für die Gewinnung von Kernenergie

Ich möchte mir gestatten, zur Frage der Energie-Reserven auf lange Sicht noch einige Worte vom Standpunkt des Geochemikers hinzuzufügen. Dabei will ich voraussetzen, dass das Problem des «breeding», das schon heute prinzipiell gelöst ist, in nicht zu ferner Zukunft technisch zur Anwendung kommen wird. Sie hatten dem eindrucksvollen Vergleich des Energievorrats, der in 1 g Kohle und in 1 g Uran stecken, entnommen: etwa 8 kcal/g Kohle gegenüber $1,74 \cdot 10^7$ kcal/g Uran. Nun ist es bekannt, dass von allen schweren Elementen, also auch von Uran, nur ein sehr geringer Bruchteil (in der Grössenordnung von vielleicht 10^{-10} oder noch weniger) in angereicherten Erzen von einem Gehalt von mehr als 10^{-3} g Element/g Gestein vorhanden ist. Weit aus der grösste Teil der Uranvorräte unserer Erdkruste steckt in feinsten Verteilung in den Gesteinen, meist in den sauren Erguss-Gesteinen wie z. B. Graniten. Ihr Durchschnittsgehalt an Uran beträgt etwa $4 \dots 5 \cdot 10^{-6}$ g Uran/g. Der prinzipiell verwendbare Energiegehalt von 1 g Granit mit nur $5 \cdot 10^{-6}$ g Uran ist damit 11mal grösser als der reiner Kohle. Prinzipiell bedeutet das, dass, selbst wenn 90 % der aus dem Uran gewonnenen Energie für die Aufarbeitung des Urans verwendet würde, ein solcher Granit energetisch etwa gleichwertig wäre wie die gleiche Menge Kohle oder Erdöl. Hinzu kommt, dass die Granite noch etwa 3mal so viel Thorium enthalten als Uran, und auch Thorium auf dem Umweg über das U^{233} , das sich aus ihm in einem Breeding-Reaktor herstellen lässt, dem Uran energetisch etwa gleichwertig ist. Hierbei ist noch ein Umstand zu beachten; die äusserst disperse Verteilung von U und Th in den Graniten ist nach den Untersuchungen von Coppens, Mme Hée und Picciotto nicht chemischer, sondern mineralogischer Natur; etwa 80 % des in einem sauren Eruptivgestein steckenden Urans und Thoriums ist teils zwischen den Korngrenzen und teils in den Zirkonen, Titaniten und anderen Schwermineralanteilen enthalten und lässt sich verhältnismässig leicht durch rein physikalische Methoden, wie Trennung in Schwere-Flüssigkeiten, Flotation usw., isolieren. Die in den Graniten enthaltenen Zirkone enthalten häufig einige Prozent Uran. Es ist nicht ausgeschlossen, dass die Uranerze, die mehr als 10^{-3} g Uran/g enthalten, in nicht zu ferner Zukunft verbraucht sein werden; überdies spielen für ihre Verfügbarkeit für Zwecke der Energiegewinnung politische Umstände eine Rolle, die ausserhalb unserer Kontrolle liegen. Daher scheint es mir gerechtfertigt, schon heute in unseren Laboratorien an die Möglichkeit der Verwendung der unermesslichen Energievorräte zu denken, die in Form von Uran und Thorium in unseren Gesteinen, wie z. B. in den Graniten, liegen. Wenn die Frage gestellt wird, ob sich eine technologische Entwicklung der Energieausbeutung des Urans überhaupt lohnt, so sollten diese Perspektiven, die freilich heute noch in ferner Zukunft liegen, nicht ausser acht gelassen werden.

F. G. Houtermans, Bern

Konzentration von «schwerem Wasser» durch Elektrolyse

Das normale Wasser enthält in einem Gewichtsverhältnis von ungefähr 1 : 6000 «schweres Wasser». Diese sehr geringe Konzentration kann durch die Elektrolyse wässriger Lösungen erhöht werden, da sich das schwere Wasser rund 5...10mal langsamer zersetzt als das normale Wasser.

Das freiwerdende Wasserstoff-Deuterium-Gasgemisch enthält in einem gewissen Verhältnis (genannt Trennfaktor) weniger Deuterium als der Elektrolyt, so dass die Deuterium-Konzen-

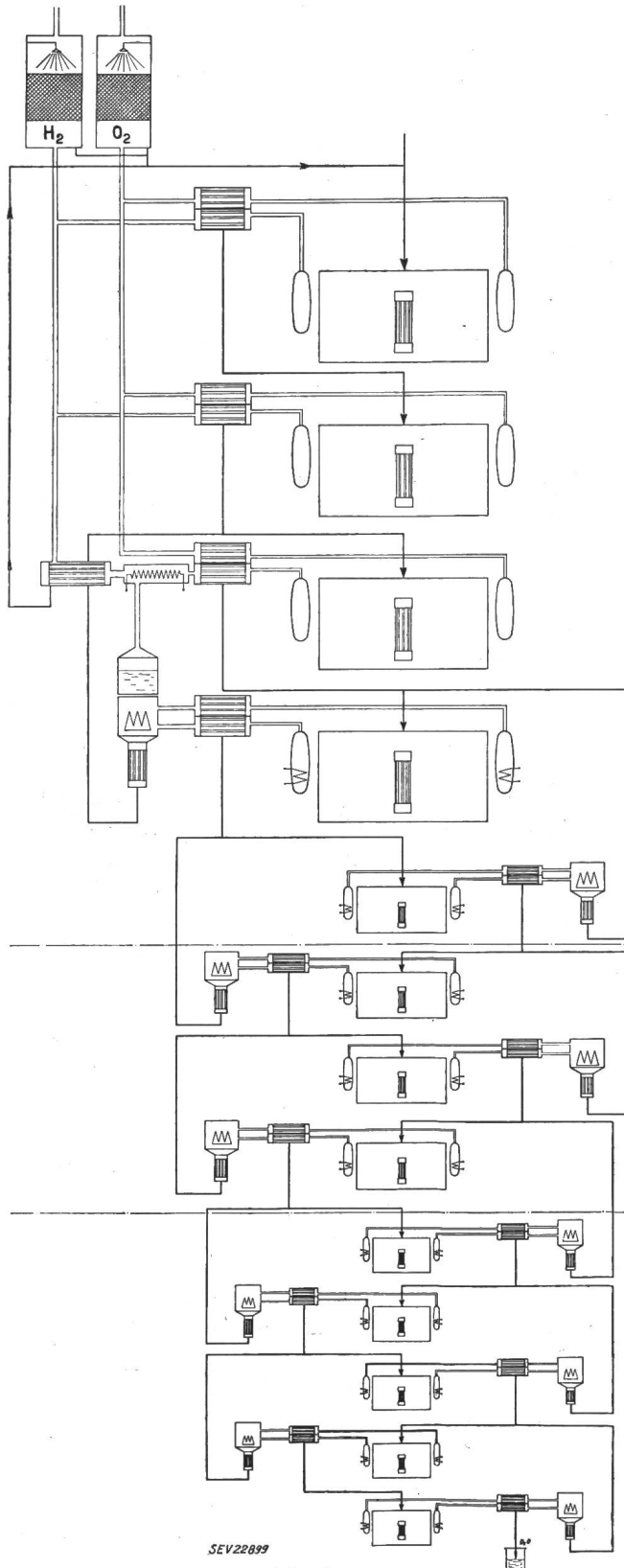


Fig. 1
Konzentrationsanlage zur Schwerwasser-Gewinnung
durch Elektrolyse
(schematisch)

- | | | | |
|--|--------------|--|------------------|
| | Heizung; | | Kühler; |
| | Verbrennung; | | Gasleitung; |
| | | | Destillatleitung |

tration im Elektrolyten zunimmt. Dem angereicherten Elektrolyten kann normales und schweres Wasser entzogen werden, indem die in den heissen Gasen mitgeführten Dämpfe kondensiert werden. Das Kondensat wird der nächstfolgenden Elektrolyseurstufe zugeführt, in welcher durch erneute Elektrolyse die Konzentration an schwerem Wasser wiederum zunimmt. Wird das geschilderte Verfahren über 10...14 Stufen — wie in Fig. 1 schematisch dargestellt — angewandt, kann die für die Kernreaktoren benötigte Konzentration von 99,9 % Deuterium erreicht werden.

Zur Unterstützung der Elektrolyse wird in einigen Stufen

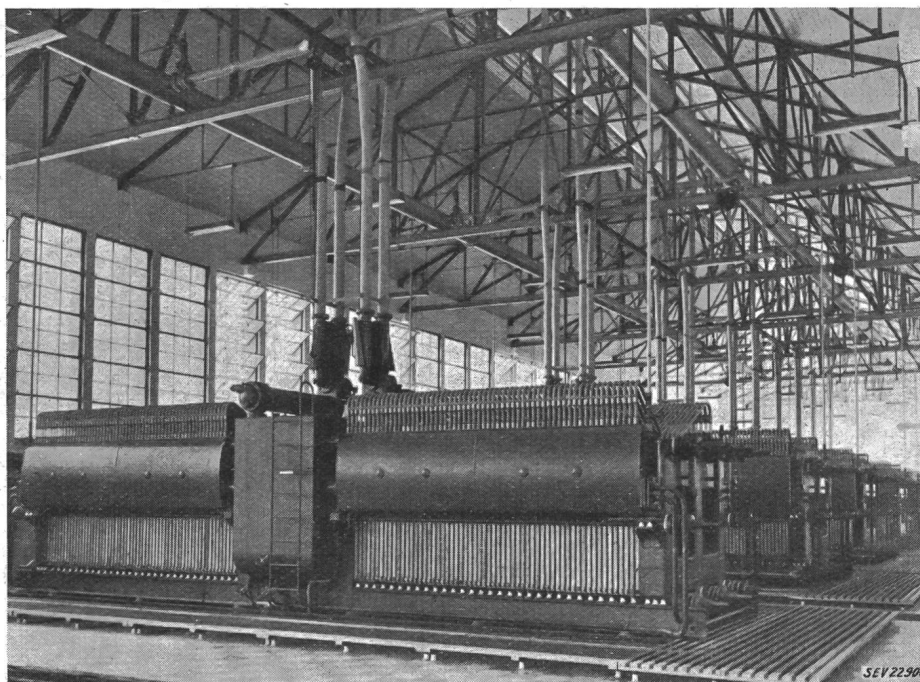


Fig. 2
Elektrolyseur-Anlage mit
6 Elektrolyseuren für je
400 m³/h Wasserstoff

eine katalytische Rückgewinnung des im Wasserstoffgas befindlichen Deuteriums vorgesehen. Der zusätzliche Energieaufwand für die Konzentration beträgt bei der in Fig. 1 gezeigten Anordnung mit nur einer Katalysenstufe rund 8 kWh/g schweres Wasser. (Werden mehrere Katalysenstufen vorgesehen, so lässt sich der Energieverbrauch auf 2...4 kWh/g schweres Wasser senken. — Der Verfasser.)

Bei grossen Elektrolyseanlagen, die Wasserstoff für Synthesezwecke erzeugen, kann das schwere Wasser hoher Konzentration als Nebenprodukt auf diesem Wege gewonnen werden. Dieses Verfahren ist heute die wirtschaftlichste Methode zur Konzentration des schweren Wassers.

Die Maschinenfabrik Oerlikon (MFO), die sich mit dem Bau von Grosselektrolyseuren befasst, hat seit einiger Zeit das Studium dieses Verfahrens aufgenommen und gedenkt in Verbindung mit den Firmen, an welche solche Grosselektrolyseure geliefert wurden, Konzentrationsanlagen zu

erstellen. Fig. 2 zeigt MFO-Grosselektrolyseure in einem Werk für Ammoniaksynthese.

Zur Orientierung über die bei der Elektrolyse anfallenden Mengen schweren Wassers sei erwähnt, dass heute pro MW installierter Nutzgasleistung rund 10 g schweres Wasser pro Stunde, oder bei einer mittleren Jahresbetriebszeit von 5000 h 50 kg pro Jahr gewonnen werden können. Die in der Schweiz zur Zeit installierte, für diesen Zweck nutzbare Leistung ist von der Grössenordnung 50...60 MW. Nach Überwindung der bei jedem Verfahren unumgänglichen Anfangsschwierigkeiten dürfte die jährliche Ausbeute 2,5...3 t betragen.

Die MFO hat sich namentlich auch deshalb mit diesem Problem befasst, weil der Reaktor mit natürlichem Uran für die Schweiz die grössten Zukunftsaussichten hat, da wir keine Anlagen zur Anreicherung von U²³⁵ besitzen.

B. Storsand, Zürich

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Registrierendes Messgerät zur Aufnahme der Hysteresiskurve

621.317.444.087.6 : 621.3.017.32
[Nach R. I. Berge und C. A. Guderjahn: Recording Fluxmeter, Electronics Bd. 27(1954), Nr. 7, S. 147...149]

Mit der im folgenden beschriebenen Einrichtung lässt sich die Hysteresiskurve von magnetischen Materialien sehr einfach aufnehmen. Ein zweiachsiges Schreibgerät zeichnet die Hysteresiskurve direkt auf dem Diagrammpapier auf. Fig. 1 zeigt das Prinzipschema der Apparatur. Das zu mes-

sende und damit der im magnetischen Material herrschenden Feldstärke. Diese Spannung steuert die X-Richtung des Schreibgerätes.

Bei Änderung des Stromes in der Primärwicklung wird in der Sekundärwicklung eine Spannung U_1 induziert, von der ein Teil am Galvanometer liegt. Wegen der grossen Empfindlichkeit der Apparatur genügen für die Sekundärwicklung wenige Windungen. Auf den Spiegel des Galvanometers fällt ein Lichtstrahl, der im Ruhezustand gleichmässig auf zwei Photozellen reflektiert wird. Beide Photozellen

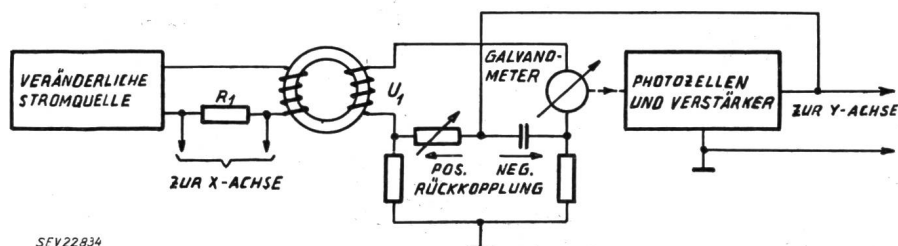


Fig. 1
Prinzipschema des selbstschreibenden Messgerätes zur Aufnahme der Hysteresiskurve

sende magnetische Material hat Ringform. Der Ring trägt zwei Wicklungen. Durch die eine Wicklung fliesst ein veränderlicher Gleichstrom. Die Spannung am Widerstand R_1 ist proportional dem durch die Wicklung fließenden Strom

bilden mit einem an sie angeschlossenen Verstärker eine Brücke, die sich im Ruhezustand im Gleichgewicht befindet. Die Verdrehung des Galvanometerspiegels hat eine ungleichmässige Beleuchtung der beiden Photozellen zur Folge, wo-