

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 46 (1955)
Heft: 2

Rubrik: Diskussionsbeiträge

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: 21.02.2026

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

mente sein, wobei ein bleibender guter Wärme Kontakt 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

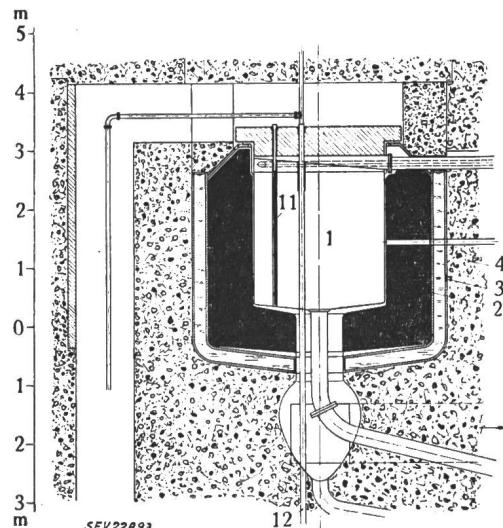


Fig. 3

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

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

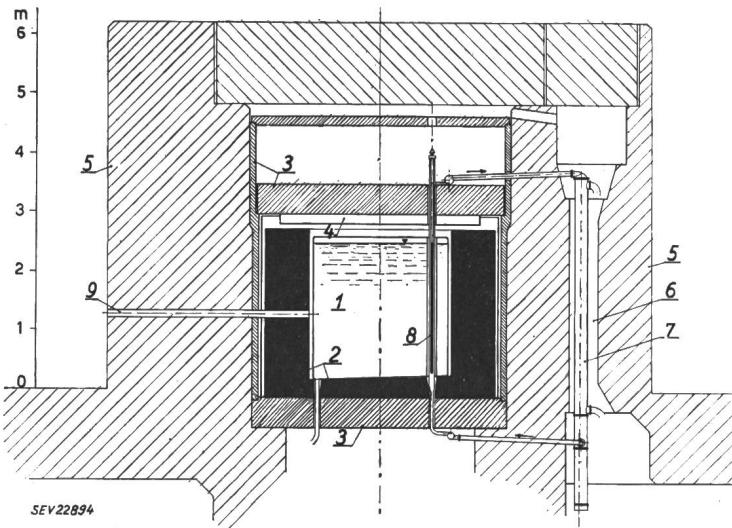


Fig. 4

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

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. Hälg, 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 grosstem 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 Verdopplung 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 Bedarfsverdopplung 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 Gesetzes 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.

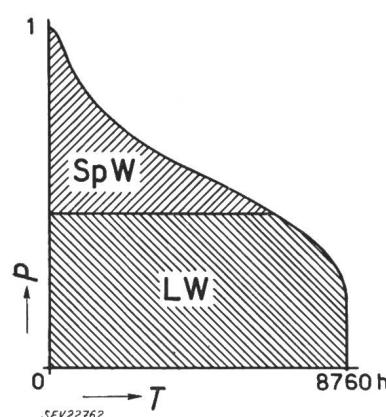


Fig. 1

Deckung des Bedarfs von 14 TWh etwa im Jahr 1960

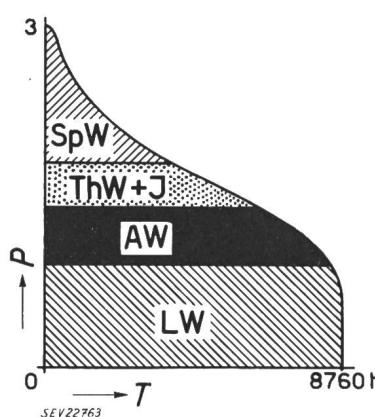


Fig. 2

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

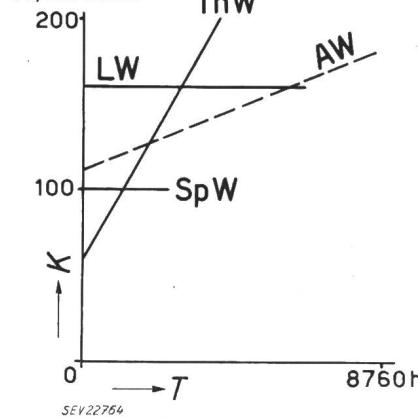


Fig. 3

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 Atomkraftwerk

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 Jahressdauerlinie 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 Wasserkräften, 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 Hilfe 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 Mandelgebietes im Bereich 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 Ausnützungsmöglichkeit der

ausgebauten Leistung kostet rund 160 Fr./kW und Jahr, Energie aus Speicherwerkern mit ca. 2500stündiger Ausnützungsmöglichkeit (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 Kraftwerk 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 Entwicklungarbeit 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 Geochimikers 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. Weitauß der grösste Teil der Uranvorräte unserer Erdkruste steckt in feinstter Verteilung in den Gesteinen, meist in den sauren Eroß-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 $5 \cdot 10^{-6}$ 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 U₂₃₃, das sich aus ihm in einem Breeding-Reaktor herstellen lässt, dem Uran energetisch etwa gleichwertig ist. Hiebei 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 Schwer-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-Gasmisch enthält in einem gewissen Verhältnis (genannt Trennfaktor) weniger Deuterium als der Elektrolyt, so dass die Deuterium-Konzen-

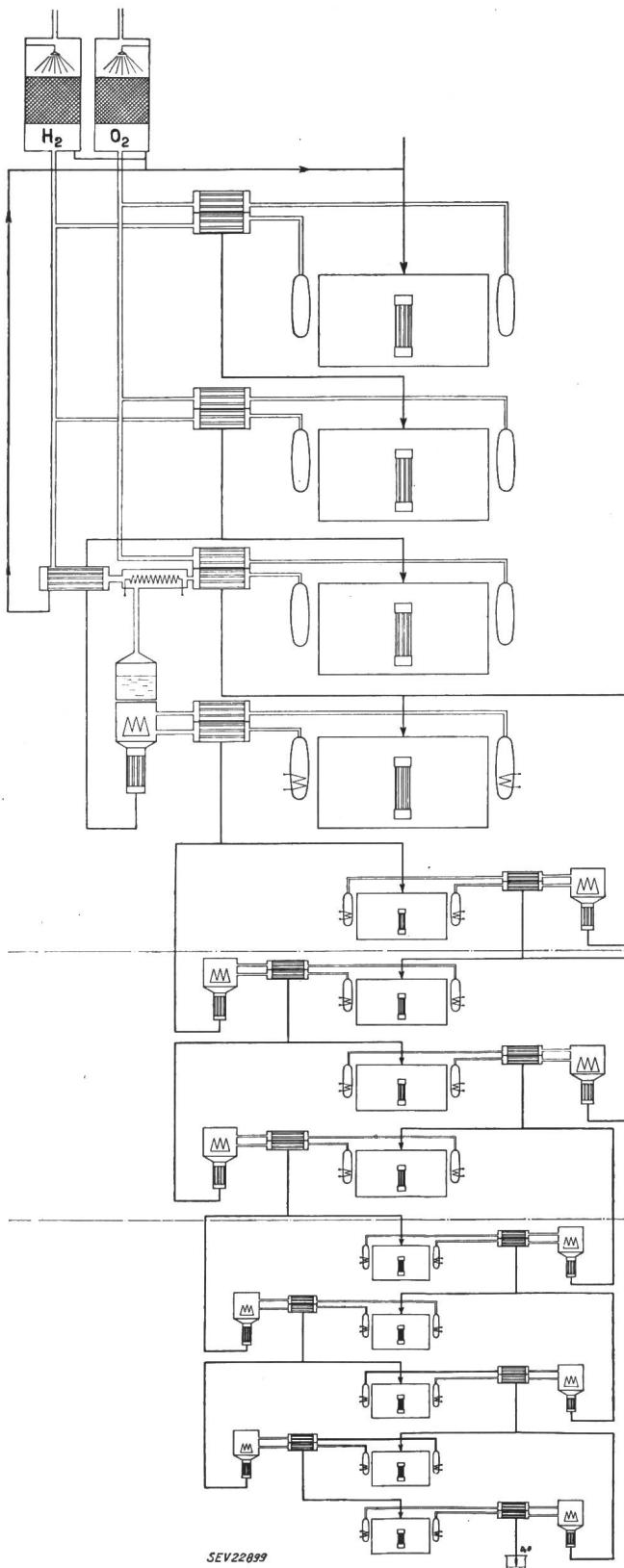


Fig. 1
Konzentrationsanlage zur Schwerwasser-Gewinnung
durch Elektrolyse
(schematisch)

↗ Heizung; ── Kühler;
Ⓜ Verbrennung; — Gasleitung;
— Destillatleitung

SEV22899

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 Elektrolyseurstupe 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

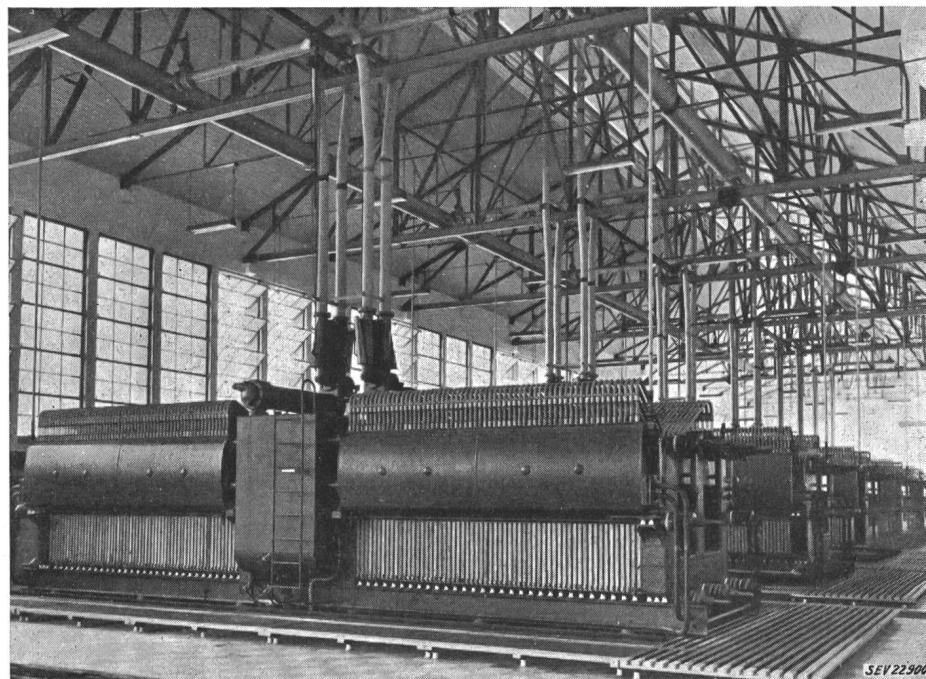


Fig. 2
Elektrolyseur-Anlage mit
6 Elektrolyseuren für je
400 m³/h Wasserstoff

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 Gröszenordnung 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 zweiachsiales Schreibgerät zeichnet die Hysteresiskurve direkt auf dem Diagrammpapier auf. Fig. 1 zeigt das Prinzipschema der Apparatur. Das zu mes-

sen 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

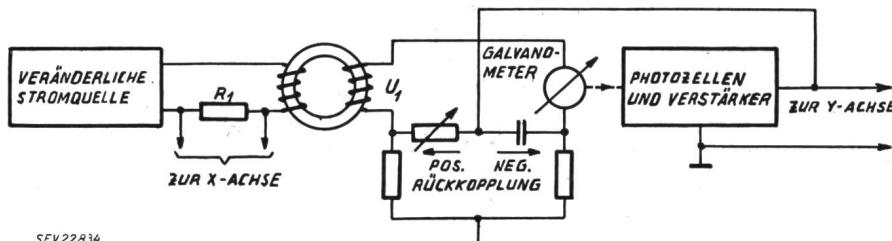


Fig. 1
Prinzipschema des selbstschreibenden Messgerätes zur Aufnahme der Hysteresiskurve

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-