

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 44 (1953)
Heft: 19

Artikel: Die Ausnützung der Atomenergie im Kernreaktor
Autor: Hanle, W.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059968>

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: 23.02.2026

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

tung, des Telephons, der Batterie usw. nahm für eine Montagegruppe von vier Männern zwei Wochen in Anspruch.

Für die architektonische Ausführung der Stationen wird von Fall zu Fall der Stadtarchitekt zugezogen, um die Bauweise der Stationen dem jetzigen oder beabsichtigten Baustil der anliegenden Gebäude nach Möglichkeit anzupassen. Fig. 9 zeigt einen typischen Bau einer Einheitsstation.

Literatur

- [1] Tschumi, F.: Gekapselte Hoch- und Niederspannungs-Schaltanlagen. Brown Boveri Mitt". Bd. 39 (1952), Nr. 4, April, S. 143...151.
- [2] Heinze, J.: Hochspannungs-Schrankanlagen für Innenraum- und Freiluftaufstellung. VDE Fachber". Bd. 14 (1950), S. 15...21.
- [3] Blaschke, Heinrich: Schaltschrank oder ortsfeste Zelle in Hochspannungs-Verteilanlagen. Elektrotechnik, Berlin Bd. 5 (1951), Nr. 12, Dezember, S. 558...564.
- [4] Equipements Nr. 1, 2, 3; Rev. éd. par Les Ateliers de Constructions Electriques de Delle, Chalon-sur-Saône.
- [5] Tschumi, F.: Gekapselte Schaltanlagen der Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., Baden. Bull. SEV Bd. 43 (1952), Nr. 6, 22. März, S. 205...207.
- [6] Benninger, H.: Gekapselte Schaltanlagen der Maschinenfabrik Oerlikon. Bull. SEV Bd. 43 (1952), Nr. 6, 22. März, S. 207...211.
- [7] Bosshardt, C.: Gekapselte Schaltanlagen von Sprecher & Schuh A.-G., Aarau. Bull. SEV Bd. 43 (1952), Nr. 6, 22. März, S. 211...214.
- [8] Jaekel, W.: Stahlblechgekapselte, geschottete Schalteinheiten für Hochspannungsanlagen bis 10 kV. Elektr.-Wirtsch. Bd. 51 (1952), Nr. 8, 20. April, S. 181.
- [9] Mitteilung der Calor-Emag A.-G., Ratingen bei Düsseldorf. - (1952), November.
- [10] Maring, B.: Stahlblechgekapselte Hochspannungs-Freiluftschaltanlage. Elektr.-Wirtsch. Bd. 52 (1953), Nr. 8, 20. April, S. 217...218.
- [11] Schneider, Ch.: Einiges über gekapselte Schaltanlagen. Bull. SEV Bd. 43 (1952), Nr. 6, 22. März, S. 203...204.
- [12] Dehn, A., und E. Sperling: 10-kV-Schaltzellen für

- 200 MVA mit Einfachsammlerschienen in betriebsfertig lieferbarer Ausführung. Elektrotechnik, Berlin Bd. 5 (1951), Nr. 10, Oktober, S. 438...444.
- [13] Bäuerle, E.: Der Zweileistungsschalter im Mittelspannungs-Schaltanlagenbau. Elektr.-Wirtsch. Bd. 52 (1953), Nr. 1, 5. Januar, S. 5...9.
- [14] Bubenko, J.: Über den Bau der Netzstationen. Berichte des schwedischen EWV Bd. - (1952), Nr. 23 (schwedisch).
- [15] Brunner, A.: Gekapselte Schaltanlagen in Nordamerika. Bull. SEV Bd. 43 (1952), Nr. 6, 22. März, S. 200...203.
- [16] Hunter, E. M., und J. C. Page: Standardized Load-Center Unit Substations for Low-Voltage A-C Systems. Electr. Engng., Trans. Sect. Bd. 61 (1942), Juli, S. 519...525.
- [17] Craig, D. E., E. M. Hunter und L. D. Madsen: Factory Assembled Substations. Gen. Electr. Rev. Bd. 52 (1949), Nr. 2, Februar, S. 31...36; Nr. 3, März, S. 31...33; Nr. 4, April, S. 34...40.
- [18] Morton, B., und L. L. Nonemaker: Seven Standard Substations Fit System Needs from 4 to 220 kV. Electr. Wld. Bd. 137 (1952), Nr. 14, 7. April, S. 114...117.
- [19] Ekström, A.: Der neue Generalplan des Gävle Elektrizitätswerkes. Berichte des schwedischen EWV Bd. - (1952), Nr. 23 (schwedisch).
- [20] Bubenko, J.: Der Generalplan für das Elektrizitätswerk der Stadt Gävle. Göteborg: 1952 (schwedisch).
- [21] Bubenko, J.: Die Generalplanung der städtischen Verteilnetze. Tekn. T. Bd. 83 (1953), Nr. 23, 5. April (schwedisch).
- [22] Tauchen, Hans: Mittel zur Unfallverhütung bei Arbeiten in Hochspannungsanlagen, Kabelnetzen und Prüffeldern. Elektr.-Wirtsch. Bd. 51 (1952), Nr. 21, 5. Nov., S. 588...592.
- [23] Sekretariat des VSE: Bericht über die Diskussionsversammlungen über den Betrieb von Transformatorstationen. Bull. SEV Bd. 44 (1953), Nr. 3, 7. Febr., S. 97...101.
- [24] Binkert, E.: Einführungsreferat, gehalten an der Diskussionsversammlung des VSE über den Bau von Transformatorstationen. Bull. SEV Bd. 44 (1953), Nr. 5, 7. März, S. 201...208.
- [25] Tobler, E.: Erfahrungen im Bau und Betrieb von Transformatoren- und Schaltstationen. Schweiz. techn. Z. Bd. 44 (1947), Nr. 49, 4. Dezember, S. 823...832.
- [26] Wettstein, M.: Vorausberechnung der Masse, der Form und der Anordnung der Erdelektroden bei der Erstellung von Erdungsanlagen. Bull. SEV Bd. 42 (1951), Nr. 2, 27. Januar, S. 49...63.

Adresse des Autors:

Dozent, Dipl.-Ing. habil. Janis Bubenko, Chalmers technische Hochschule, Storgaten 43, Göteborg (Schweden).

Die Ausnützung der Atomenergie im Kernreaktor

Von W. Hanle, Giessen

539.172.4 : 621.039.42

Nach Entdeckung der Kernspaltung wurden sofort von den verschiedensten Stellen Überlegungen und Versuche angestellt, ob und wie man auf Grund dieser Erscheinungen Atomenergie gewinnen könnte. Die Ereignisse des zweiten Weltkrieges haben diese Entwicklung in den USA beschleunigt. Sie haben dazu geführt, dass zunächst die militärische Anwendung der Atomenergie in der Atombombe vorangetrieben wurde. Aber die dabei gemachten Erfahrungen und gewonnenen neuen Erkenntnisse haben auch die friedliche Anwendung ausserordentlich gefördert. Diese Entwicklung ist jetzt in ein Stadium getreten, in welchem verschiedene Stellen sich ernsthaft mit dem Problem der wirtschaftlichen Ausnützung von Atomenergie beschäftigen [1, 2] ¹⁾.

Zur Zeit wird der grösste Teil unserer Energie durch Verbrennung von Kohle erzeugt, also durch einen chemischen Prozess. Bei der Gewinnung von Atomenergie in Kernreaktoren (Uranbrenner, Uranmeiler, Pile) handelt es sich um einen ganz anderen Vorgang. Wir wollen den Unterschied durch eine kurze Beschreibung der Struktur der Atome erläutern.

Die Atome bestehen aus elektrisch geladenen Teilchen. Ein positiv geladener Kern, welcher praktisch die gesamte Atommasse enthält, ist von negativ geladenen Elektronen umgeben. Die chemischen Eigenschaften der Elemente sind durch die Struktur ihrer Elektronenhülle gegeben. Bei der Verbindung von Atomen, z. B. bei der Bildung von Kohlendioxyd aus Kohlenstoff und Sauerstoff, wird Energie frei. Hierauf beruht die Entwicklung von Wärme bei der Verbrennung von Kohle.

Die Kerne der verschiedenen Elemente setzen sich aus Protonen, das sind Wasserstoffkerne, und Neutronen, das sind neutrale Teilchen von nahezu der gleichen Masse wie die der Protonen, zusammen. Die meisten Elemente bestehen aus mehreren Atomarten, sog. Isotopen, deren Kerne unterschiedliche Neutronenzahlen haben. Z. B. enthält der Was-

serstoff im Wasser neben den gewöhnlichen Wasserstoffatomen einen geringen Prozentsatz Atome, die schwerer sind, weil ihre Kerne aus einem Proton und einem Neutron bestehen. Auch das schwerste in der Natur vorkommende Element, Uran, besteht aus 2 Atomsorten. Der Kern von U 238 setzt sich aus 92 Protonen und 146 Neutronen zusammen, der Kern des im normalen Uran nur zu 7% vorkommenden Isotops U 235 aus ebenfalls 92 Protonen, aber nur 143 Neutronen.

Auch bei Reaktionen von Atomkernen kann Energie frei werden. Z. B. tritt beim radioaktiven Zerfall von schweren Elementen wie Uran oder Radium «Kernenergie» in Form von Bewegungsenergie ausgeschleuderter Teilchen oder Strahlungsenergie in Erscheinung. Dabei entstehen jedoch nur minimale Energiebeträge, weil einerseits die zerfallenden Mengen sehr klein sind und andererseits der Zerfall nicht beschleunigt werden kann. Auch bei der künstlichen Umwandlung von Atomen war es zunächst nicht möglich, Kernenergie zu gewinnen.

Eine besondere Rolle spielen nun Neutronen, da sie keine Ladung besitzen und daher nicht von anderen Kernen abgestossen werden. Entscheidend für die Entwicklung der Kernphysik und die Anwendungen wurde die Umwandlung schwerer Elemente wie Uran durch Neutronen, weil hierbei Kernenergie praktisch gewonnen werden kann. Das leichte Uranisotop, U 235, wird durch Neutronen in 2 Kerne von ähnlicher Masse gespalten — z. B. in einen Krypton- und einen Bariumkern — und einige schnelle Neutronen. Die entstehenden Spaltbruchstücke sind in der Regel neutronenreiche Isotope der normalen Elemente und daher radioaktiv. Sie zerfallen unter Emission schneller Elektronen allmählich in die stabilen Isotope der Elemente. Bei der Spaltung wird zugleich eine ausserordentlich grosse Energie frei. Sie tritt hauptsächlich als Bewegungsenergie der Spaltbruchstücke und Neutronen in Erscheinung. Die bei der Spaltung des Urans entstehenden Neutronen kann man wiederum mit Urankernen reagieren lassen. Durch diese sog. Kernketten-

¹⁾ siehe Literatur am Schluss.

reaktion wurde es zum erstenmal möglich, die Kernenergie praktisch auszunutzen. Allerdings spaltet nur das seltene leichte Uranisotop 235. Mit schweren Urankernen reagieren Neutronen in anderer Weise, wodurch ein neues Element,

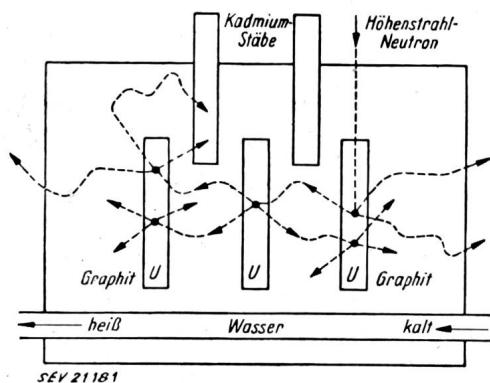


Fig. 1
Schema des Kernreaktors

Plutonium, aufgebaut wird, welches ebenfalls spaltbar ist. Die bei der Spaltung entstehenden Neutronen werden mit grosser Geschwindigkeit ausgeschleudert. Die meisten Kernreaktoren arbeiten jedoch mit langsamen Neutronen. Zu

Man kann die Dimension eines Kernreaktors nicht beliebig klein machen, da sonst die Neutronenverluste zu gross sind. Zum Teil hindert man die Neutronen dadurch am Entweichen, dass man den eigentlichen Kernreaktor mit einem «Reflektor» umgibt, einem Material, welches die Neutronen wenig absorbiert, jedoch streut, so dass ein grosser Teil von ihnen durch Diffusion in den Reaktor zurückkehrt.

Kernreaktoren können für verschiedene Zwecke benutzt werden: zur Energiegewinnung, zur Erzeugung von radioaktiven Isotopen (durch Spaltung oder durch Neutronen), zu Versuchen mit Neutronen auf den verschiedensten Gebieten [22], zur Erzeugung von neuem spaltbarem Material (Plutonium), zur Untersuchung des Verhaltens der Materie unter der Einwirkung energiereicher Strahlung [18, 25, 26] (siehe auch Fig. 6) und zum Studium der Technik der Kernreaktoren.

Zur Zeit sind mindestens 20 Reaktoren in Betrieb und ebensovielen geplant. Unbekannt ist die Zahl der für die Herstellung von Plutonium erbauten Reaktoren und vor allem die Zahl der russischen Reaktoren. Besondere Aufmerksamkeit wird neben der Herstellung von Atombomben auch dem Antrieb von Schiffen und Flugzeugen durch Atomenergie geschenkt. Kürzlich fand die Kiellegung des U-Bootes Nautilus statt, das durch Atomenergie angetrieben werden soll und beliebig lang unter Wasser bleiben kann.

Kernreaktoren können in sehr verschiedenen Ausführungsformen gebaut werden. Man unterscheidet heterogene

Reaktoren, bei denen Spaltungsmaterial und Moderator — z. B. als Uran- und Graphitblöcke — getrennt verwandt werden, und homogene Reaktoren, z. B. Uran in Form eines in schwerem Wasser (als Moderator) gelösten Salzes. Als spaltbares Material kann gewöhnliches oder angereichertes Uran oder Plutonium (als Metall oder Oxyd) dienen. Als Moderator wird Graphit oder schweres Wasser verwandt. Die Geschwindigkeit der Reaktion wird meistens durch Stäbe aus Kadmium oder Bor reguliert, welche Neutronen stark absorbieren. Bei Anwachsen der Kernkettenreaktion werden sie in den Reaktor hineingestossen und bei Abnahme der Reaktionsgeschwindigkeit wieder herausgezogen. So halten sie die Reaktionsgeschwindigkeit und damit die Wärmeentwicklung auf einer bestimmten Höhe. Bei einem Kernreaktor mit Uransalzlösung kann die thermische Ausdehnung beim Anwachsen der Reaktionsgeschwindigkeit zur Selbstregelung dienen. Für die Kühlung wird Luft, Wasser, schweres Wasser oder flüssiges Metall benutzt. Am günstigsten ist Natrium wegen seines grossen Wärmeleitvermögens [4, 19].

Bei den Kernreaktoren, besonders für Energiegewinnung, treten zahlreiche interessante technische Probleme auf. Die Ausnützung der Atomenergie muss — wenigstens vorläufig noch — über die Wärme geschehen [15]. Da bekanntermassen der Nutzeffekt bei Wärmekraftmaschinen vom Unterschied zwischen der Ausgangstemperatur und Endtemperatur abhängt, muss zur Erzielung eines annehmbaren Nutzeffektes mit hohen Temperaturen gearbeitet werden. Was-

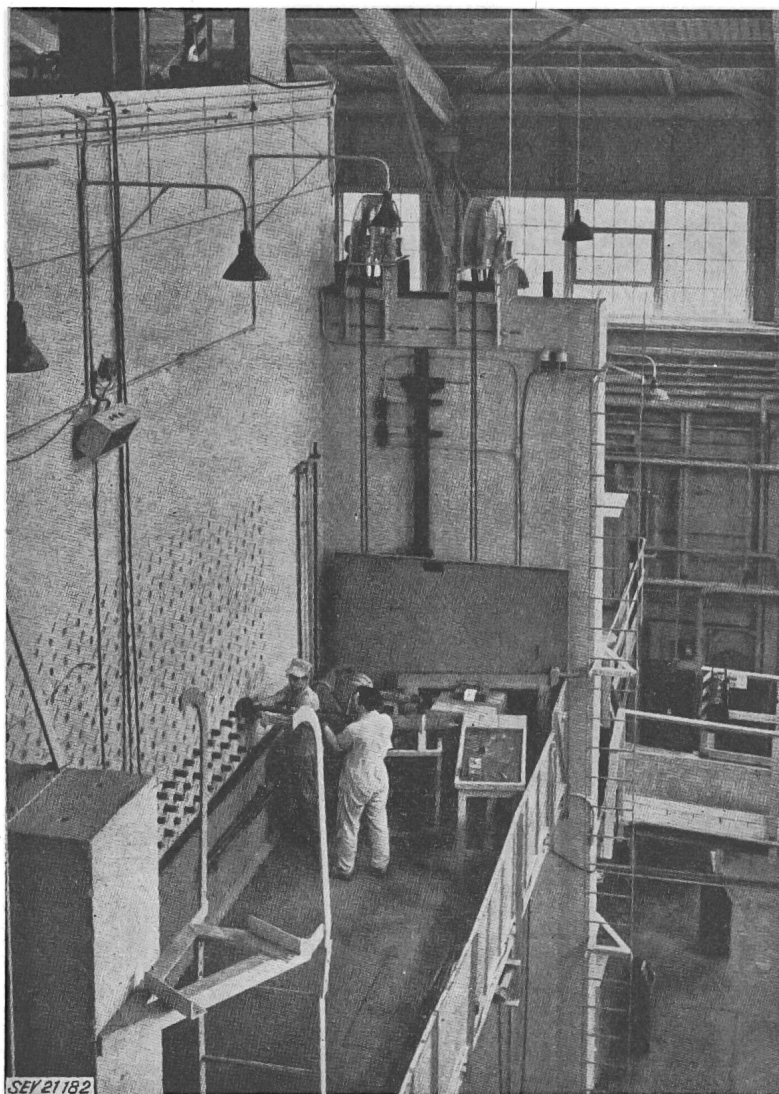


Fig. 2

Kernreaktor von Oak Ridge

Die Plattform lässt sich fahrstuhlartig bewegen. Links ist ein Teil des Reaktors zu sehen. In die zylindrischen Öffnungen werden Stäbe aus Uran und aus den zu aktivierenden Substanzen eingeführt

diesem Zwecke werden die bei der Spaltung entstehenden Neutronen in einem sog. Moderator — Graphit oder schwerem Wasser — abgebremst, ehe sie wiederum mit Urankernen reagieren. Fig. 1 zeigt das Prinzip. Einige Kernreaktoren arbeiten jedoch mit mittelschnellen oder schnellen Neutronen.

ser als Wärmeträger scheidet wegen der starken Absorption der Neutronen aus. Günstig sind flüssige Metalle. Bei der Konstruktion der Reaktoren muss auf Korrosionsbeständigkeit der benutzten Materialien bei diesen Temperaturen und unter der Einwirkung der Strahlung geachtet werden.

Reaktoren mit gewöhnlichem Uran und Graphit sind sehr umfangreich; Reaktoren mit schwerem Wasser weniger, aber dafür sind sie teurer. Reaktoren mit angereichertem Uran oder Plutonium sind viel kleiner. Die Anreicherung von Uran 235 erfolgt durch Diffusion von gasförmigen Uranverbindungen durch poröse Membranen. Plutonium muss erst aus U 238 in einem gewöhnlichen Kernreaktor hergestellt werden.

Im folgenden sollen einige bekannte Kernreaktoren beschrieben werden [24].

Der erste amerikanische Reaktor (CP 1) [6] wurde während des Krieges in Chicago zu Versuchszwecken aufgestellt. Er bestand aus gewöhnlichem Uran und Graphit als Moderator. Die Geschwindigkeit der Kettenreaktion wurde so klein gehalten, dass er insgesamt nur 200 W(!) erzeugte.

Nach dem gleichen Prinzip wurde ein Reaktor von dem USA National Laboratory in Oak Ridge (Tenn.) gebaut (Fig. 2). Dieser Reaktor erzeugt 1 MW, maximal 3,8 MW und 10^{12} Neutronen/cm² s. Er besteht aus einem Kubus aus Graphit mit 7 m Kantenlänge. Dieser ist von zahlreichen Kanälen durchzogen, die das Uran in dünnen, zylindrischen Aluminiumhül-

mental Pile) genannt, enthält 12 t Uranmetall und 21 t Uranoxyd, ist luftgekühlt, entwickelt 100 kW und erzeugt $3 \cdot 10^{12}$ Neutronen/cm² s, der andere, BEPO (British Experimental Pile) genannt, 4 MW und einen Neutronenfluss von 10^{12} Neutronen/cm² s. Er dient hauptsächlich zur Erzeugung von Radioisotopen, die in England und anderen europäischen

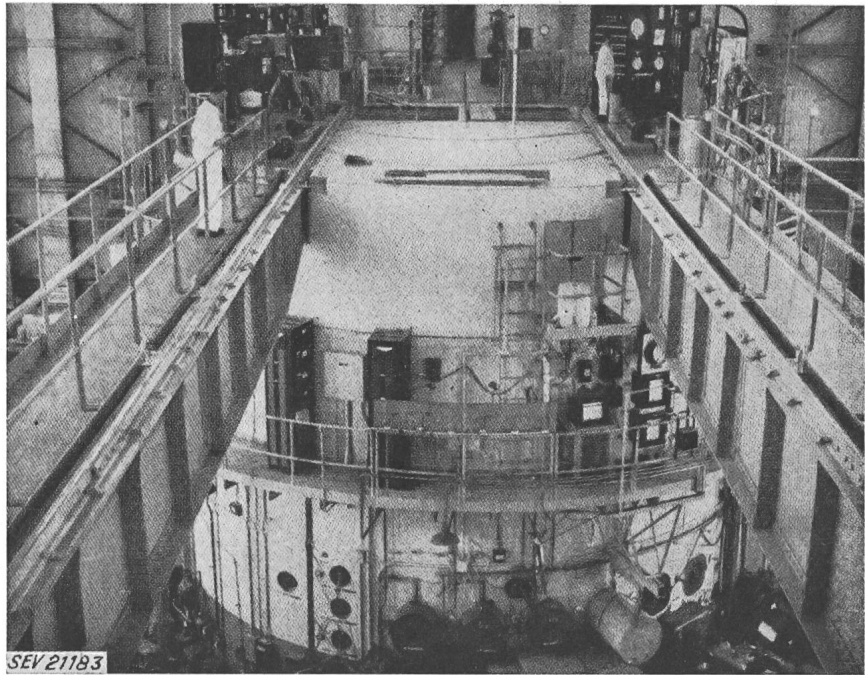


Fig. 3
Kanadischer Reaktor NRX

sen aufnehmen, sowie die Materialien, welche durch die Neutronen aktiviert werden sollen, und Messapparaturen [6]. Um den Graphitwürfel befindet sich ein Betonschutz. Die Gesamtdimensionen des Reaktors sind 14 m Länge, 11 m Breite und 10 m Höhe. Der Reaktor dient hauptsächlich zur Erzeugung von Radioisotopen.

Ein ähnlicher Reaktor im National Laboratory Upton in Brookhaven, mit einer Leistung von 28 MW und einem

Ländern zur Verteilung kommen; gleichzeitig wird die von ihm entwickelte Energie zur Heizung von Laboratorien benutzt.

In vielen neueren Reaktoren wird schweres Wasser als Moderator benutzt [7]. Ein solcher, JEEP genannt, wurde in Kjeller in Norwegen gebaut. Er enthält 2,2 t Uran in Stücken von 2,5 cm Durchmesser und 30 cm Länge und 7 t schweres Wasser in einem zylindrischen Tank von 1,9 m Höhe und 2 m Durchmesser. Ein Graphitreflektor soll möglichst viel nach aussen diffundierende Neutronen am Entweichen hindern. Kadmiumstäbe dienen zur Regulierung. Der Reaktor hat eine Leistung von 100 kW und erzeugt mehr als $3 \cdot 10^{11}$ Neutronen/cm² s.

Der LOPO (Low Power Waterboiler) und der HYPO (High Power Waterboiler) in Los Alamos in New Mexico bestehen aus einer Lösung von angereichertem Uransulfat in schwerem Wasser. Der HYPO enthält 870 g U 235 und 5340 g U 238. Er erzeugt 6 kW Energie und mehr als $3 \cdot 10^{11}$ Neutronen/cm² s. Beide dienen der Forschung.

Der NRX-Reaktor [8] des Canada's National Research Council, der ebenfalls schweres Wasser als Moderator benutzt, hat einen Neutronenfluss von $5 \cdot 10^{13}$ Neutronen/cm² s (Fig. 3).

Der Wunsch nach einem kleinen handlichen Reaktor wird durch den Raleigh-Reaktor erfüllt. Er enthält angereichertes Uransulfat mit 900 g U 235. Sein Innendurchmesser beträgt 25 cm, seine Höhe nur 26 cm. Er ist umgeben von einem Graphitreflektor, einem Bleischutz und einem Betonwürfel von etwa 60 m³.

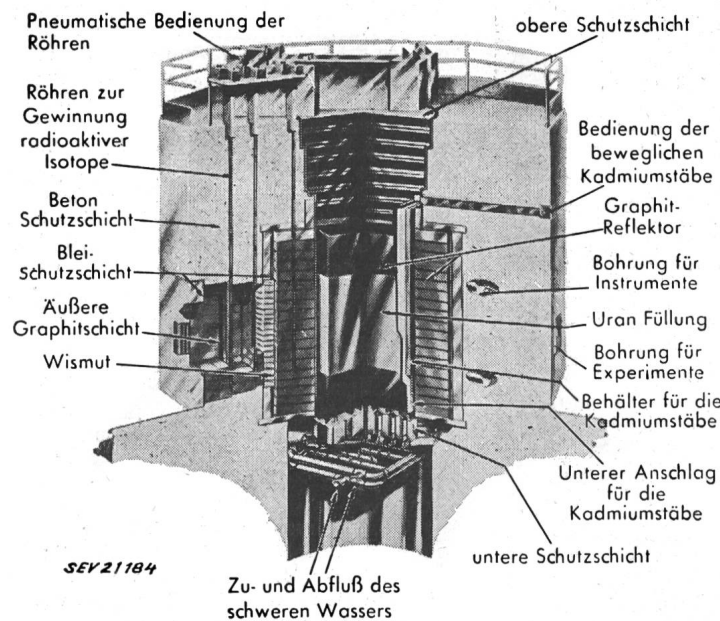


Fig. 4
Schnitt durch den «Baby-Reaktor»

Neutronenfluss von $4 \cdot 10^{12}$ Neutronen/cm² s dient hauptsächlich der Forschung.

Nach dem gleichen Prinzip arbeiten die Reaktoren für Atombombenerzeugung in Hanford (Washington). Sie sind wassergekühlt und erzeugen ungefähr 1 GW.

In England wurden in Harwell 2 Reaktoren dieses Typs aufgestellt. Der eine, GLEEP (Graphit Low Energy Experi-

Ein anderer kleiner Reaktor (Fig. 4), der «Babyreaktor», enthält angereichertes Uran und Graphit als Moderator und Reflektor und schweres Wasser als Kühlung. Er hat einen Innendurchmesser von 1,3 m und erzeugt 160 kW Energie und 10^{12} langsame Neutronen/cm² s. Er soll ohne starke Verseuchung 10 Jahre in Betrieb bleiben können. Ein anderer ähnlicher Reaktor erzeugt maximal $6 \cdot 10^{13}$ Neutronen/cm² s.

Sehr einfach gebaut und billig ist der Swimming-Pool [9] in Oak Ridge. Er besteht aus einem grossen Wasserbassin, in das ein Gerüst mit dem spaltbaren Material gesenkt wird (Fig. 5). Das spaltbare Material besteht zu mehr als 90 % aus Uran 235. Bei einem BeO-Reflektor kommt man mit 2,4 kg Uran 235 aus. Die Dimensionen betragen $20 \times 30 \times 60$

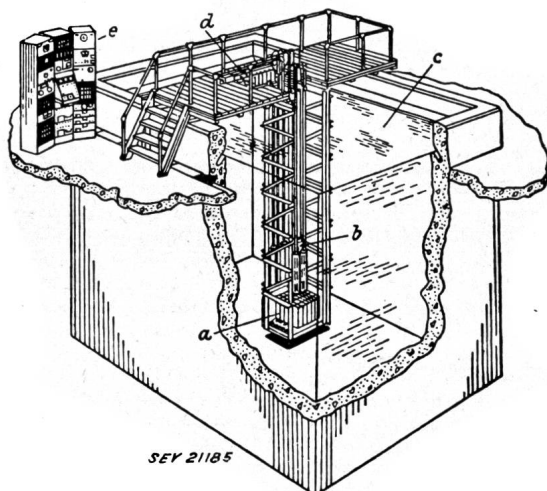


Fig. 5

«Swimming Pool»-Reaktor

a Uranbatterie; b Borkarbid-Stäbe; c Wasserkühlung; d Regelungsmechanismus; e Mess- und Steuerwarte

cm. Das Wasser dient als Moderator, zur Kühlung und zusammen mit der Betoneinfassung als Strahlenschutz. Die Leistung beträgt 100 kW. Die Kosten sind etwa 100 000 Dollar. Fig. 6 zeigt einen neuen Reaktor zur Untersuchung der Einwirkung energiereicher Strahlung auf Materie [3].

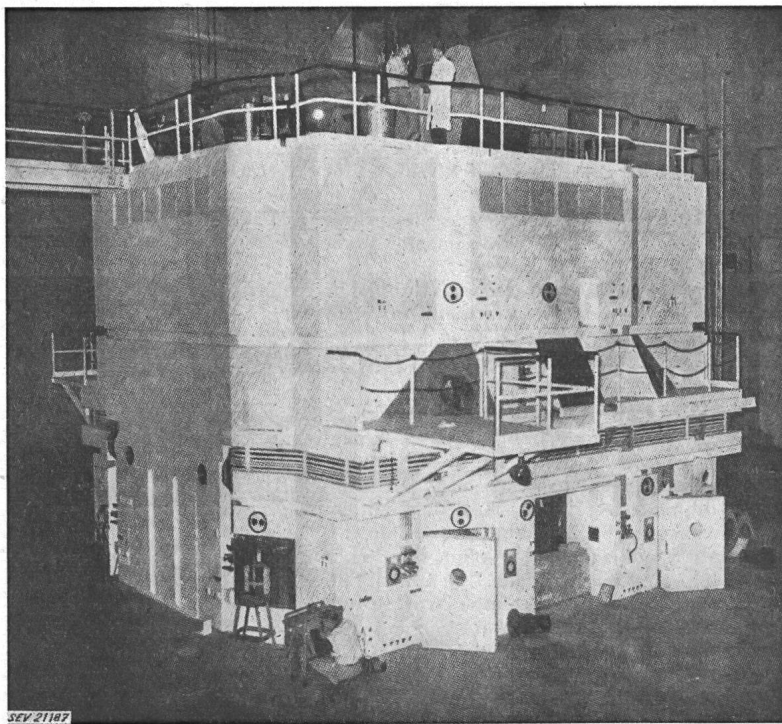
Bei allen diesen Reaktoren erfolgt die Spaltung hauptsächlich durch langsame Neutronen. In Los Alamos arbeitet ein Reaktor mit schnellen Neutronen. Er enthält Plutoniummetall und wird durch Quecksilber gekühlt.

Auch andere Länder wie Frankreich, Indien, Brasilien, Argentinien, Schweden, Belgien haben schon Kernreaktoren aufgestellt oder Pläne dazu.

Man macht sich ernste Gedanken darüber, wie der Uranvorrat der Welt am besten ausgenutzt werden kann. Bei den ersten aufgestellten Reaktoren wird allmählich der kleine Anteil des Uranisotops 235 verbraucht. Das übrigbleibende Uran 238 ist nicht spaltbar und damit offenbar ein nutzloser Abfall geworden. Der nächste Schritt ist ein Kernreaktor, der sich wenigstens zum Teil regeneriert [10]. Bei der Spaltung werden für 10 verbrauchte (langsame) Neutronen etwa 25 (schnelle) Neutronen erzeugt, wie eingangs erwähnt. Von diesen werden nur wieder 10 benötigt, um die Kettenreaktion aufrecht zu erhalten. Der grössere Teil kann ausser zur Herstellung radioaktiver Isotope zur Erzeugung von — ebenfalls spaltbarem — Plutonium aus Uran 238 dienen. Werden etwa im Mittel 8 von den 15 freien Neutronen zur Herstellung

Fig. 6

MTR, Material Testing Reactor, für Untersuchung der Einwirkung von Strahlung auf Materie



von Plutonium benutzt, so erhöht sich die Gesamtmenge spaltbaren Materials um den Faktor 5. Man kann noch einen Schritt weiter gehen [10]. Der «Breeder-Reaktor» (Fig. 7) soll mehr spaltbares Material liefern als verbraucht wird. Eine Anlage dafür steht in Arco in Idaho, der EBR (Experimental-Breeder-Reaktor). Dieser Reaktor arbeitet ohne Mo-

derator mit schnellen Neutronen. Als Konstruktionsmaterial findet fast nur Metall und spaltbares Material Verwendung. Das «Herz» des Reaktors besteht aus Uran 235; es hat die Grösse eines Fussballs, der von einem Mantel aus gewöhnlichem Uran umgeben ist. Die meisten Neutronen werden im Mantel eingefangen und machen aus Uran 238 Plutonium.

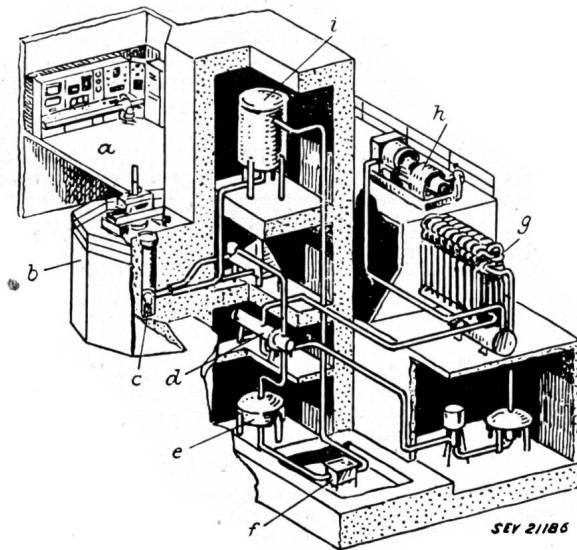


Fig. 7

«Breeder-Reaktor» mit Generator

a Messwarte; b Schutzschild; c Reaktionsraum; d Wärmeaustauscher; e Aufnahmebehälter für die Kühlflüssigkeit (K-Na-Legierung); f elektromagnetische Pumpe; g Dampferzeuger; h Turbogenerator; i Behälter für Kühlflüssigkeit

Mit diesem Reaktor wurde am 20. Dezember 1951 zum erstenmal aus Kernenergie elektrische Energie zu Beleuchtungszwecken gewonnen. Da das aus dem Reaktor fliessende Kühlmittel, eine Natrium-Kalium-Legierung, radioaktiv wird, führt man seine Wärmeenergie zuerst in einem Wärmeaustauscher einem zweiten Kühlsystem zu, welches dann seinerseits eine

Dampfmaschine betreibt, deren Wärmeenergie in einem Turbogenerator in elektrische Energie umgesetzt wird. Der Neutronenfluss beträgt $5 \cdot 10^{13}$ Neutronen/cm²s, die Temperatur des Kühlmittels am Ausgang 250 °C, die Generatorleistung 250 kW. Die Leistungsdichte hat den extrem hohen Wert von 0,6 kW/cm³.

Andere Reaktoren werden für militärische Zwecke gebaut. Wenn es gelingt, die Kriegsgefahr zu bannen, dann wird eine Menge Plutonium, das jetzt hauptsächlich für Atombomben verwandt wird, für Reaktoren kleiner Dimensionen frei. Ein Reaktor mit Plutonium und schwerem Wasser wird vielleicht nur 1 l Inhalt haben. Allerdings kann auf dicke Schutzhüllen nicht verzichtet werden.

Die Mehrzahl der Reaktoren dient heute noch hauptsächlich der Erzeugung von Plutonium für die Herstellung von Atombomben und von radioaktiven Isotopen für wissenschaftliche und industrielle Untersuchungen. In USA werden die radioaktiven Isotope im Atomzentrum Oak Ridge hergestellt, in Europa vornehmlich im englischen Atomzentrum Harwell. Man kann jedes Element in radioaktiver Form erhalten [11]. Häufig klingt allerdings die Strahlung so schnell ab, dass man nur in nächster Nähe des Reaktors Versuche machen kann, oder umgekehrt so langsam, dass ihre Intensität zu schwach ist. Häufig benutzte Radioisotope sind: I 131, P 32, C 14, Na 24, S 35, Au 198, Ca 45, Fe 55 und 59 sowie Co 60.

Die technische Gewinnung von Atomenergie befindet sich noch im Versuchsstadium. Über die Wirtschaftlichkeit der Energieerzeugung aus Atomenergie ist schon viel gesagt worden, die Schätzungen gehen stark auseinander. Die reinen Materialkosten sind kleiner als bei der Erzeugung aus Kohle, besonders, wenn durch Breeding auch aus U 238 (und vielleicht Thorium) spaltbares Material gewonnen wird. Die Hauptkosten liegen jedoch in der Anlage und der Amortisation. Die Berechnung der Anlagekosten für ein Urankraftwerk ist recht schwierig, da es eine kostspielige komplizierte technische Ausrüstung und Sicherungen gegen γ -Strahlen und Neutronen erfordert [20, 21]. Andererseits vermindern sich die Kosten, weil im eigentlichen Urankraftwerk nebenbei Plutonium gewonnen wird, das für ein zweites Kraftwerk Verwendung finden oder für die Herstellung von Atombomben verkauft werden kann. Ausserdem fallen radioaktive Isotope dabei ab, durch deren Verkauf die Rentabilität noch erhöht wird. Grosskraftwerke auf Atomenergie-Basis können mit Kohlekraftwerken wohl konkurrenzfähig sein, besonders in Gegenden, die weder billige Kohle noch grössere Vorkommen von Erdöl noch Wasserkraften besitzen und bei denen die Transportkosten für Brennstoffmaterial hoch sind, wie z. B. grosse Gebiete in Argentinien und Brasilien [12]. In einer kürzlich erschienenen Veröffentlichung wird bei einem Erzeugungspreis von 0,5 cent/kWh eine Investition von etwas über 200 Dollar/kW gegenüber der Investition für Kohlekraftwerke in Höhe von 80 Dollar/kW berechnet [13]. Neueste eingehende Kalkulationen für verschiedene Typen von Reaktoren siehe [23].

Wenn einmal das Problem der Ausnutzung der Atomenergie und ihre Umwandlung in elektrische Energie technisch und finanziell befriedigend gelöst ist, wird vermutlich ein ständig wachsender Anteil des Energieverbrauches aus der Spaltung von Uran gedeckt werden. Der derzeitige Energieverbrauch der Welt beträgt etwa 10^{13} kWh/Jahr und verdoppelt sich etwa alle 10 Jahre. Die bisherigen Quellen, Kohle, Öl und Wasserkraft, sind nicht unerschöpflich, so dass man gezwungen ist, sich nach neuen Energiequellen umzusehen. Als solche kommen die Atomenergie und die direkte Ausnutzung der Sonnenstrahlung in Betracht.

1 t Uran enthält 7 kg U 235. Dieses liefert bei der Spaltung $1,5 \cdot 10^8$ kWh und bei 50%igem Nutzeffekt $0,75 \cdot 10^8$ kWh Energie. Bei vollständigem Breeding würde 1 kg Uran $2 \cdot 10^{10}$ kWh erzeugen. In Joachimstal wurden 1940 ungefähr 200 t Pechblende gefördert. Man darf annehmen, dass die Weltförderung an Uran heute 1000 t/Jahr beträgt und auf 10 000 t/Jahr gesteigert werden kann. Damit könnte die Atomenergie wohl den Energiebedarf der Welt oder zu mindest einen beträchtlichen Teil desselben vorläufig decken.

Die Entwicklung der Kernreaktoren in USA wird durch die American Atomic Energy Commission (AAEC) gesteuert und weitgehend finanziert [14]. Ihre Satzungen sind in der «Atomic Energy Act» von 1946 dargelegt [15]. Die Ausgaben der AAEC betrugen bislang mehrere Milliarden Dollar. Die AAEC hat Kontrakte mit zahlreichen Grossfirmen geschlossen und finanziert grosse Forschungszentren für Atomenergie, wie das Brookhaven National Laboratory in Long Island, N. Y., das Argonne National Laboratory in Chicago, das Oak Ridge Institute for Nuclear Studies und andere mehr. Mehr als 100 000 Personen, darunter eine grosse Zahl von Wissenschaftlern und Technikern sind unmittelbar an dem

Programm der AAEC beteiligt. Wenn die gegenwärtigen Produktionsanlagen vervollständigt sind, dann wird die AAEC der grösste Einzelabnehmer von elektrischer Energie in den Vereinigten Staaten — und damit wohl in der ganzen Welt — sein. Dies scheint zunächst widersinnig, erwartet man doch in den Kernreaktoren eine neue und billige Energiequelle. Man darf aber nicht übersehen, dass wir erst seit wenigen Jahren Kernreaktoren haben. Es wird wohl noch einige Zeit vergehen, bis die Atomenergiermaschinen soviel oder sogar mehr Energie liefern werden, wie die Atomindustrie selbst verbraucht.

Neben der Zusammenarbeit mit der AAEC interessiert sich die amerikanische Grossindustrie auch schon für eigene Reaktoren. Eingehend wird dabei die Frage diskutiert, ob Einzeck- [16] oder Vielzeck-Reaktoren [17] gebaut werden sollen. Der Gesichtspunkt dabei ist der, dass die Rentabilität für die Industrie viel eher gesichert ist, wenn sie das bei der Energiegewinnung abfallende Plutonium an den Staat verkaufen kann, der dafür einen Preis garantieren soll.

Man soll einerseits nicht zu optimistisch hinsichtlich der Schnelligkeit der Entwicklung, andererseits jedoch auch nicht zu ängstlich wegen der Rentabilität sein [13]. Verbesserungen und Überraschungen sind durchaus möglich. Auch nach der Entdeckung der Uranspaltung hat man anfangs geglaubt, dass zwar die Energiegewinnung prinzipiell auf diesem Wege möglich, jedoch die richtige Wahl und Anordnung von spaltbarem Material, Moderator und Reflektor sehr kritisch sei. Später stellte sich heraus, dass viel mehr Varianten möglich sind, als zunächst zu ahnen war, und die Erfolge haben die kühnsten Erwartungen übertroffen.

Literatur

- [1] Hörler, A.: Kurzbericht über den Vortrag: «Die thermische Ausnutzung der Energie des Atomkernes», gehalten am 21. November 1951 im Zürcher Ingenieur- und Architektenverein, von J. Lalive d'Epinay. Schweiz. Bauztg. Bd. 69(1951), Nr. 52, 29. Dezember, S. 744.
- [2] Lalive d'Epinay, J.: Über die thermische Ausnutzung der Energie des Atomkernes. Schweiz. Bauztg. Bd. 70(1952), Nr. 7, 16. Februar, S. 91...97.
- [3] Doan, R. L.: Organization and Staffing of the Materials Testing Reactor Project. Nucleonics Bd. 11(1953), Nr. 3, März, S. 10...13.
- [4] Trocki, Thomas: Engineering Aspects of Liquid Metals for Heat Transfer. Nucleonics Bd. 10(1952), Nr. 1, Januar, S. 28...32.
- [5] Walker, J., und H. J. Grout: Utilization of Waste Heat from the British Experimental Pile. Nucleonics Bd. 10(1952), Nr. 3, März, S. 58...60.
- [6] Red.: How to Load a Reactor. Nucleonics Bd. 10(1952), Nr. 2, Februar, S. 24...25.
- [7] Isbin, H. S.: Nuclear Reactor Catalog. Bd. 10(1952), Nr. 3, März, S. 10...16.
- [8] McCorkle, W. H.: Heavy Water in Nuclear Reactors. Nucleonics Bd. 11(1953), Nr. 5, Mai, S. 21...25.
- [9] Gilbert, F. W.: Canadian Facilities for Isotope Production and Bombardment. Nucleonics Bd. 10(1952), Nr. 1, Januar, S. 6...8.
- [10] Breazeale, William M.: The «Swimming Pool» — A Low Cost Research Reactor. Nucleonics Bd. 10(1952), Nr. 11, November, S. 56...60.
- [11] Zinn, W. H.: Basic Problems in Central-Station Nuclear Power. Nucleonics Bd. 10(1952), Nr. 9, September, S. 8...14.
- [12] Hanle, Wilhelm: Künstliche Radioaktivität, kernphysikalische Grundlagen und Anwendungen. 2. erw. Aufl.; Stuttgart: Piscator 1952.
- [13] Everett, Richard W.: Market for «Package» Nuclear Power. Nucleonics Bd. 11(1953), Nr. 4, April, S. 32...33.
- [14] Gary, Howard C.: Foreign Market for «Package» Nuclear Power. Nucleonics Bd. 11(1953), Nr. 5, Mai, S. 14...15.
- [15] Cohen, Karl: The Key to Atomic Power. Nucleonics Bd. 11(1953), Nr. 5, Mai, S. 10...13.
- [16] Kelley, Wilbur E.: How an AEC Operations Office Does Business. Nucleonics Bd. 10(1952), Nr. 9, September, S. 52...53.
- [17] Boskey, Bennet: The Atomic Energy Act and the Power Question. Nucleonics Bd. 10(1952), Nr. 10, Okt., S. 10...13.
- [18] Ruebhausen, Oscar M.: Changes in the Atomic Energy Act. Nucleonics Bd. 11(1953), Nr. 5, Mai, S. 16...17.
- [19] Weil, George L.: Power-Only-Reactors. The Direct Approach to Economic Nuclear Power. Nucleonics Bd. 11(1953), Nr. 4, April, S. 12...15; 60.
- [20] Hochwalt, Carroll A., und Philip N. Powers: Dual-Purpose Reactors: First Step in Industrial Nuclear Power Development. Nucleonics Bd. 11(1953), Nr. 2, Februar, S. 10...13.
- [21] Evans, George E.: Materials for Reactors. Nucleonics Bd. 11(1953), Nr. 6, Juni, S. 18...26.
- [22] Woodruff, O. J., W. J. McShane und W. J. Purcell: Coolants for Reactors. Nucleonics Bd. 11(1953), Nr. 6, Juni, S. 27...34.

- [20] *Harrer, J. M.*: Reactor Operation. Nucleonics Bd. 11(1953), Nr. 6, Juni, S. 35...40.
 [21] *Smith, James M.*: Radiation Safety for a Reactor. Nucleonics Bd. 11(1953), Nr. 6, Juni, S. 41...45.
 [22] *Fox, Marvin*: Use of a Reactor for Research. Nucleonics Bd. 11(1953), Nr. 6, Juni, S. 46...48.
 [23] *Red.*: Nuclear Power Feasibility Studies. Nucleonics Bd. 11(1953), Nr. 6, Juni, S. 49...50.
 [24] *Isbin, H. S.*: Supplement to Nuclear Reactor Catalog. Nucleonics Bd. 11(1953), Nr. 6, Juni, S. 65...69.

- [25] *Red.*: Ceramic Materials for Reactors. Nucleonics Bd. 11(1953), Nr. 7, Juli, S. 20...26.
 [26] *Miller, E. C.*: Zirconium: A Structural Material for Nuclear Reactors. Nucleonics Bd. 11(1953), Nr. 7, Juli, S. 27...31.

Adresse des Autors:

Prof Dr. W. Hanle, Direktor des Physikalischen Institutes der Justus-Liebig-Hochschule, Giessen (Deutschland).

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Demonstrationen der Abteilung für industrielle Forschung des Institutes für technische Physik der ETH (AFIF)

061.6 : 53 (494)

Anlässlich der Generalversammlung der Gesellschaft zur Förderung der Forschung an der Eidgenössischen Technischen Hochschule vom 3. Juli 1953 wurde den Teilnehmern Gelegenheit geboten, die unter der Leitung von Prof. E. Baumann stehenden Laboratorien der Abteilung für industrielle Forschung des Institutes für technische Physik der ETH (AFIF) zu besichtigen.

Nach einer kurzen Orientierung von Prof. Baumann, in welcher er auf die Mannigfaltigkeit der Arbeiten an der AFIF hinwies, wurden die Teilnehmer in kleinen Gruppen nach einem mustergültig organisierten Plan durch die verschiedenen Laboratorien geführt.

Elektronenoptik

Aus dem Gebiete der Elektronenoptik wurden einige grundlegende Versuche gezeigt. So wurden die Grundgesetze der elektronenoptischen Abbildung mit magnetischen Linsen auf einer elektronenoptischen Bank und die analogen Versuche mit Licht auf einer optischen Bank vorgeführt. Die Elektronenemission der Kristallstruktur eines Wolframbolzens konnte durch elektronenoptisch vergrösserte Abbildung der Wolframoberfläche auf einem Leuchtschirm studiert werden. Wie sich durch eine sog. Ionenfalle die Beschädigung einer Kathode durch Ionenbombardement verhindern lässt, wurde durch Vergleich gebrauchter Kathoden aus verschiedenen Konstruktionen des Grossprojektor-Bildstrahlrohres eindrucklich sichtbar.

Kunststoffe und Elektrete

Dielektrische Verlustmessungen an einigen Phenolharzen zeigen, dass es möglich ist, durch Wahl geeigneter physikalischer und chemischer Vorbedingungen diesen Stoffen eine gewisse kristalline Struktur aufzuzwängen. Es stellt sich die Frage, ob sich nicht Substanzen finden lassen, bei denen die durch ein äusseres Feld gerichteten Dipole auch nach Abschalten des Feldes orientiert bleiben, analog zu der permanenten Polarisation des Magneten. Es wäre unter Umständen möglich, das äussere Feld solcher «Elektrete» dazu zu benutzen, um ein Kondensatormikrophon ohne äussere Polarisationsspannung zu betreiben, was an verschiedenen Beispielen gezeigt wurde.

Ultraschall

An der AFIF wurden Ferrite untersucht zur Verwendung für Ultraschallgeber. Gewisse Nickelzinkferrite haben magnetisch ähnliche Eigenschaften wie Nickel und eignen sich daher als Ultraschallgeber. Der Vorteil gegenüber Nickel liegt im bessern Wirkungsgrad der Ferritschwinger, da die Wirbelstromverluste wegfallen. Es lassen sich elektroakustische Wirkungsgrade bis 80 % erreichen.

Es wurden zwei Anwendungsbeispiele demonstriert. Erstens wurde eine Flüssigkeit im Durchlaufverfahren mit Ultraschall behandelt, wodurch sich bei der gezeigten Flüssigkeit eine Polymerisation erreichen liess. Zweitens wurde die Verwendung von Ultraschall zum Bohren von beliebig geformten Löchern in harten Materialien vorgeführt.

Ölchemie

Durch die Untersuchungen des Eidophoröles im Zusammenhang mit der Fernsehgrossprojektion gelangte die AFIF zu wertvollen Erkenntnissen über die Herstellung und Eigenschaften hochmolekularer Flüssigkeiten. Diese Kenntnisse werden nun auch auf andern Gebieten angewendet, wovon eines die Herstellung synthetischer Uhrenöle ist. Auch hier

ist ein kleiner Dampfdruck erwünscht, damit die ausserordentlich kleinen Ölmengen mit ihrer relativ grossen Oberfläche nicht zu rasch verdampfen. Daneben müssen die Uhrenöle noch verschiedene andere Eigenschaften aufweisen, wovon wohl die wichtigsten die sog. Breitlauftendenz und Schmierfähigkeit (Oilness) sind. Beide Eigenschaften können durch richtige Wahl der Basissubstanz und abgestimmte Zusätze weitgehend beeinflusst werden. Auch auf dem Gebiet der Isolieröle sind Untersuchungen im Gang. An einer abgeänderten Pirelli-Apparatur wird zur Zeit das Gasverhalten von Modellschubstangen abgeklärt, um grundsätzlich die Probleme bei Kabelölen zu erforschen.

Elektronenvervielfacher

Photozellen mit Sekundärelektronenvervielfachern werden im Hinblick auf ihre Anwendungen in der Fernsehtechnik an der AFIF seit längerer Zeit hergestellt und weiter entwickelt. In letzter Zeit sind die Anwendungen derartiger Röhren immer vielseitiger geworden, indem sich heute auch die Kernphysik, die Spektroskopie und die Astronomie dafür interessieren.

Es konnten verschiedene dieser Photomultiplier gezeigt werden, zum Beispiel:

1. Ein 17stufiger Sekundärelektronenvervielfacher mit Li-Sb-Photokathode in Kugelform, Dynoden aus Cu-Be-Legierung, mit einer maximalen Verstärkung von 10^6 , zur Anwendung in Scintillationszählern.
2. Ein 12stufiger Sekundärelektronenvervielfacher mit Cs-Sb-Photokathode, mit einer maximalen Verstärkung von 10^6 , zur Verwendung in Leuchtpunktastern.

Von diesen Typen wurde bereits eine grössere Anzahl hergestellt und verkauft. Andere Typen sind heute ebenfalls fertig entwickelt und konnten vorgeführt werden, zum Beispiel ein Sekundärelektronenvervielfacher mit Frontkathode.

Weitere Typen befinden sich noch in der Entwicklung, so der vorgeführte Vervielfacher mit Kathode grosser Oberfläche und Jalousie-Vervielfacher.

Amalgam-Metallurgie

Die Rohstoffe für seltene Metalle sind so komplex, dass ihre Aufarbeitung ein Verfahren mit besten Trennmöglichkeiten verlangt. Die besonderen Eigenschaften des Quecksilbers zeigen, dass die Amalgam-Metallurgie hier mit bestem Erfolg verwendet werden könnte. Bei diesem Verfahren werden die Metalle physikalisch oder elektrochemisch in Quecksilber gelöst, das Quecksilber dann thermisch entfernt oder die gelösten Metalle elektrolytisch gewonnen.

Lichtelektrische Halbleiter

Unter lichtelektrischen Halbleitern versteht man Substanzen, die bei Belichtung ihre elektrische Leitfähigkeit ändern; altbekannt und technisch viel verwendet ist Selen. In den letzten Jahren ist Bleisulfid durch seine speziell günstigen Eigenschaften im Gebiet des Infrarot bekannt geworden. (Empfindlich für Licht mit einer Wellenlänge von $3\text{--}4\text{ }\mu\text{m}$.) Verschiedene Typen wurden an der AFIF hergestellt. Durch Wahl geeigneter Filter lassen sich Temperaturstrahlen mit Temperaturen von ca. $500\text{ }^\circ\text{C}$ ohne Störung durch Tageslicht feststellen, was mit einem Experiment vorgeführt wurde.

Uhrenreinigung System AFIF

Aus dem Gebiet der Oberflächenchemie und -physik wurde ein Problem behandelt, das die Uhrenreinigung betrifft. Mittels Ultraschall werden grob disperse Schmutzteile von der Oberfläche gelöst und mittels einer kontinuierlichen Lösungsmittelreinigung entfernt. Anschliessend werden die behandelten Oberflächen nach einem an der AFIF entwickelten Verfahren mit einem Schutzfilm gegen das Breitlaufen des Schmieröles versehen.