

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 45 (1954)  
**Heft:** 26

**Artikel:** Technische Probleme der Nutzung der Kernenergie  
**Autor:** Traupel, W.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1058853>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 25.12.2024

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

# BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

ORGANE COMMUN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS (ASE) ET  
DE L'UNION DES CENTRALES SUISSES D'ELECTRICITE (UCS)

## Technische Probleme der Nutzung der Kernenergie

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 28. Oktober 1954 in Zürich,  
von W. Traupel, Zürich

621.039.4

*Die verschiedenen Typen von Reaktoren, die sich durch ihr Arbeitsprinzip, ihren allgemeinen Aufbau und die Art der Wärmeübertragung unterscheiden, werden beschrieben und verglichen. Die Wärmekraftanlage wird zunächst eine mit niedrigen Temperaturen und Drücken arbeitende Dampfanlage sein. Sobald hohe Temperaturen beherrschbar sind, rückt auch die Gasturbine in den Bereich der Möglichkeit. Das Problem des Atomkraftwerks ist vor allem eine metallurgische und technologische Aufgabe.*

*Les différents types de réacteurs, distingués par leur principe de fonctionnement, leur structure générale et la méthode de transmission de chaleur, sont expliqués et comparés. Pour le début, l'installation thermique proprement dite sera une installation à vapeur, travaillant à des pressions et températures assez modérées. Une technique plus avancée permettra d'augmenter les températures ce qui rendrait possible l'application de la turbine à gaz. Le problème de la centrale atomique est surtout un problème de métallurgie et de technologie.*

### A. Einleitung

Gäbe es grundsätzlich einen und nur einen Weg, die Kernenergie gesteuert und regelbar freizusetzen, so wäre es auch verhältnismässig leicht, in grossen Zügen die Frage zu beantworten, welche technischen Probleme gelöst werden müssen, damit ein wirtschaftliches Atomkraftwerk Wirklichkeit werden kann. Tatsächlich sehen wir aber heute bereits eine solche Fülle von Möglichkeiten, dass auch der Fachmann nicht mit Sicherheit anzugeben vermag, welche von diesen auf weite Sicht die günstigsten Perspektiven eröffnet. Jedes dieser Verfahren besitzt nicht nur seine besonderen Vor- und Nachteile, sondern es ist auch durch besondere, ihm eigentümliche technische Probleme gekennzeichnet. Deshalb können die nachfolgenden Ausführungen den Problemkomplex auch nicht annähernd in seiner Gesamtheit umreissen. Vielmehr geben sie nur einen kleinen Ausschnitt aus dem riesigen Aufgabenbereich, der hier vor uns liegt.

### B. Die verschiedenen Typen von Atomreaktoren

Versucht man einen Überblick zu gewinnen über die verschiedenen Typen von Atomreaktoren, so kann man sie etwa nach drei Gesichtspunkten ordnen, nämlich nach der atomphysikalischen Wirkungsweise, nach der baulichen Struktur und nach der Art der Wärmeübertragung. Atomphysikalisch sind zu unterscheiden die mit thermischen Neutronen (Neutronen, deren Geschwindigkeit etwa gleich derjenigen der thermischen Bewegung ist) und die mit schnellen Neutronen arbeitenden Reaktoren, bei denen die dem Spaltprozess entspringenden, sehr rasch bewegten Neutronen ohne wesentliche Herabminderung ihrer Geschwindigkeit zur weiteren Reaktion gebracht werden. Zwischen diesen

beiden Extremfällen sind natürlich Zwischenformen möglich, mit sogenannten mittelschnellen Neutronen. Damit die Reaktion erstmals anlaufen kann, müssen von den 2...3 pro Kernspaltung freigesetzten Neutronen im Durchschnitt etwas mehr als eines von einem spaltungsfähigen Kern eingefangen werden, im Beharrungszustand ist es im Mittel gerade eines. Da aber das spaltungsfähige Uran 235 nur zu 0,7 % im natürlichen Uran enthalten ist, muss man besonders günstige Verhältnisse schaffen, wenn man erreichen will, dass die freigesetzten Neutronen mit genügend hoher Wahrscheinlichkeit gerade von einem dieser Kerne eingefangen werden. Das verlangt, dass sie durch den Moderator bis auf thermische Geschwindigkeit verlangsamt werden, da die  $U^{235}$ -Kerne die Eigenschaft haben, Neutronen mit dieser Geschwindigkeit bevorzugt einzufangen.

Gerade die Notwendigkeit eines solchen Moderators ist aber grundsätzlich unerwünscht. Als Moderatorstoffe kommen in Frage schweres Wasser ( $D_2O$ ) oder Graphit. Dieser ist ungleich billiger, aber auch wesentlich ungünstiger. Ein mit Graphit moderierter Reaktor muss grosse Gesamtabmessungen haben, denn nur dann ist der prozentuale Neutronenverlust nach aussen so klein, dass ein für die Aufrechterhaltung der Reaktion genügend grosser Anteil der Neutronen von  $U^{235}$ -Kernen eingefangen wird. Ein solcher Reaktor läuft sozusagen auf dem Notknopf, d. h. man hat nur äusserst wenig Reserve. Das schränkt die Freiheit des Konstrukteurs in der Ausbildung der Konstruktionsteile und insbesondere in der Wahl der Werkstoffe auf ein Minimum ein. Wesentlich günstiger werden die Verhältnisse, wenn  $D_2O$  als Moderator verwendet wird. Es besteht dann mehr Reserve, so dass mit kleineren Gesamtabmessungen auszukommen ist.

Der projektierte schweizerische Versuchsreaktor, der mit  $D_2O$  moderiert sein wird, wird 5 t Uran benötigen, während man für einen entsprechenden mit Graphit moderierten Reaktor 40 t gebraucht hätte. Der Reaktor ist also so viel kleiner, dass er nicht teurer wird, trotz dem Preis von Fr. 1 000 000 pro Tonne, der für das  $D_2O$  in Rechnung zu setzen ist. Der technischen Ausbildung ist beim mit  $D_2O$  moderierten Reaktor etwas mehr Freiheit gegeben, weil atomphysikalisch eine grössere Marge besteht –  $D_2O$  absorbiert weniger Neutronen als Graphit – aber auch hier bestehen noch ausserordentlich einschränkende Bedingungen. Die Beschränkungen, die dem Ingenieur auferlegt sind, betreffen vor allem die Wahl der Werkstoffe. Atomphysikalisch ist die Gegenwart jedes Neutronen absorbierenden Fremdstoffes im Reaktor schädlich. Alle Stoffe absorbieren aber Neutronen in mehr oder weniger hohem Masse. Gewisse Elemente, wie z. B. Bor, absorbieren so stark, dass schon kleinste Mengen genügen, um die Reaktion zum Stillstand zu bringen. Da nun beim mit natürlichem Uran und mit thermischen Neutronen arbeitenden Reaktor die Reserve so klein ist, kommen als Konstruktionsmaterialien nur gerade diejenigen mit dem allerkleinsten Neutronenabsorptionsvermögen in Betracht. Dies sind vor allem Aluminium, Beryllium und Zirkon. Gewöhnliche Konstruktionsstähle oder Sonderlegierungen, die vielleicht aus anderen Gründen wünschbar wären, können nur in ganz geringem Umfang oder gar nicht verwendet werden. Von den drei genannten Metallen ist Aluminium das einzige, wofür eine leistungsfähige und hochentwickelte Technologie bereits besteht. Leider ist Aluminium nicht sehr warmfest, während man im Hinblick auf den thermischen Wirkungsgrad der Anlage eine möglichst hohe Temperatur anstrebt.

In dieser Hinsicht hat gerade der mit  $D_2O$  moderierte Reaktor den Nachteil, dass er nicht mit beliebig hoher Temperatur betrieben werden kann, da ja der Moderator nicht verdampfen darf. Um die Verdampfung zu vermeiden, muss man den ganzen Reaktor unter einen Druck von zum Beispiel 20...40 kg/cm<sup>2</sup> setzen; auch dann kann die frei werdende Wärme der Wärmekraftanlage nur bei einer Temperatur von etwa 200 °C dargeboten werden.

Das Druckgefäss, das den ganzen Reaktor enthält, muss aus den oben genannten Gründen aus Reinaluminium bestehen, womit klar wird, dass die Beherrschung dieser Drücke ein nicht zu übersehendes technisches Problem darstellt.

Das Bestreben ist daher verständlich, die riesige Moderatormasse, wie sie für den mit thermischen Neutronen arbeitenden Reaktor kennzeichnend ist, weitgehend zu reduzieren oder überhaupt zu vermeiden. Das führt zum Reaktor mit mittelschnellen oder schnellen Neutronen. Damit dann aber die Wahrscheinlichkeit des Einfangens der Neutronen durch spaltbare Kerne genügend gross ist, muss die naturgegebene Konzentration von 0,7 % erhöht werden. Man muss also Uran anreichern, d. h. es muss eine Isotopentrennung vorgenommen werden. Isotopentrennung in industriellem Maßstab ist eines

der Fundamentalprobleme der Atomtechnik. Schon die Herstellung des schweren Wassers ist ja nichts anderes als dies. Sie kann durch fortgesetzte Elektrolyse oder durch eine äusserst vielstufige Destillation erfolgen. Die Anreicherung des natürlichen Urans an  $U^{235}$  gelingt z. B. auf Grund der Tatsache, dass die leichteren und schwereren U-Atome im Magnetfeld etwas verschiedene Ablenkungen erfahren oder auch vermöge der wenig verschiedenen Diffusionseigenschaften der verschiedenen U-Atomarten. Immer aber sind es ganz feine Effekte, die bei der Isotopentrennung herangezogen werden müssen, was die industriellen Prozesse ausserordentlich umständlich und wenig ergiebig macht und auf dementsprechend extrem teure Produkte führt, wie wir schon am Beispiel des  $D_2O$  sahen.

Bekanntlich gibt es aber noch jenes andere Verfahren der Gewinnung konzentrierterer spaltbarer Materie, nämlich die Erzeugung von Plutonium in einem z. B. mit natürlichem Uran arbeitenden Reaktor und dessen Aussonderung auf chemischem Wege. In konsequenter Entwicklung führt dies zum Breeding-Prozess, bei dem die Erzeugung von Plutonium den Verbrauch an Uran 235 übertrifft; praktisch ist er allerdings nur mit angereichertem Brennstoff durchführbar.

Heute ist jedenfalls die Situation die folgende. Verwendet man im Reaktor das verhältnismässig billige natürliche Uran, so hat man so wenig Marge, dass höchst einschränkende Bedingungen für Gestaltung und Betrieb des Reaktors und somit indirekt auch für die anschliessende Wärmekraftanlage in Kauf genommen werden müssen. Viel mehr Freiheit gewinnt man, insbesondere auch werkstoffmässig, indem man auf angereichertem Brennstoff greift. Solche Reaktoren können mit thermischen, mittelschnellen oder schnellen Neutronen betrieben werden. Der Brennstoff ist aber gegenwärtig wohl undiskutabel teuer und steht übrigens aus militärischen Gründen gar nicht ohne weiteres zur Verfügung.

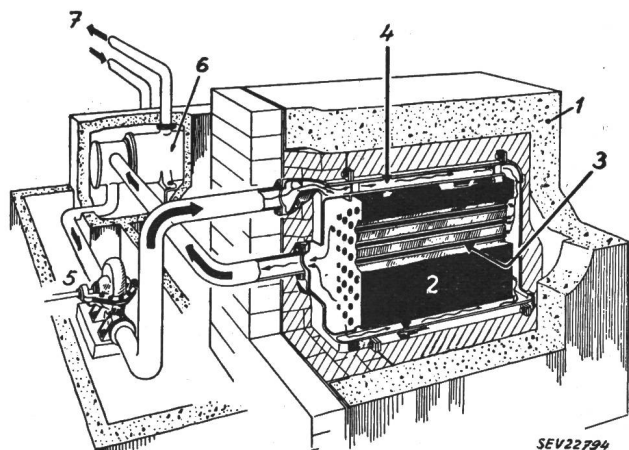


Fig. 1

Heterogener Reaktor mit Graphitblock als Moderator

1 Strahlungsschutz; 2 Moderator; 3 Uranstäbe; 4 Wärmeträger-Kanäle; 5 Umwälzpumpe; 6 Wärmeaustauscher; 7 zur Kraftanlage

Ihrer baulichen Struktur nach sind voneinander zu unterscheiden der homogene und der heterogene Reaktor. Beim Verfahren mit thermischen Neutro-

nen wird die Einfangwahrscheinlichkeit für Neutronen im  $U^{235}$  am günstigsten, wenn das Uran in einzelnen Elementen räumlich konzentriert angeordnet und von der Moderator Masse umgeben wird. So entsteht der heterogene Reaktor. Die klassische Anordnung ist das Uranstabgitter, das einen Graphitblock durchsetzt, wobei zwischen den Stäben und der Moderator Masse Ringkanäle für das Zir-

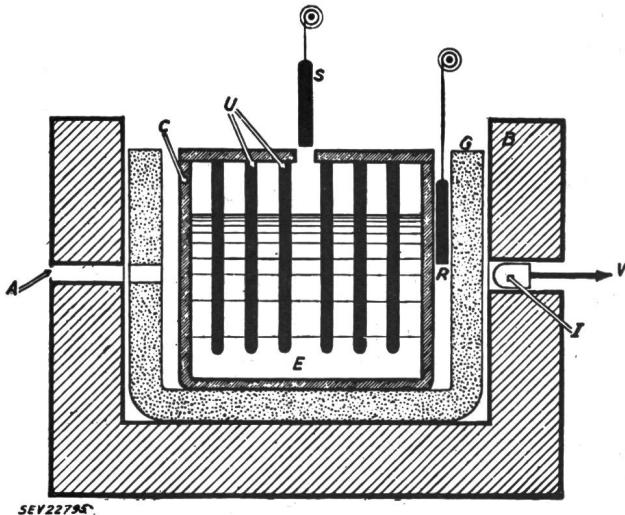


Fig. 2

Heterogener Reaktor mit schwerem Wasser als Moderator  
 A Experimentierfenster; B Strahlungsschutz; C Behälter;  
 E schweres Wasser; G Reflektor; I Messinstrument;  
 R, S Regelstäbe; U Uranstäbe; V zum Verstärker

kulieren des Wärmeträgers freibleiben (Fig. 1). An die Stelle des Graphitblocks tritt gegebenenfalls ein Behälter mit schwerem Wasser, das in diesem Falle zugleich der Wärmeträger ist (Fig. 2). Demgegenüber steht die andere Möglichkeit, Uran und Moderator gleichmässig miteinander zu mischen, sei es in Form einer Lösung von Uransalz in  $D_2O$ , sei es in Form eines Eutektikums, also einer Schmelze oder dergleichen. So entsteht der homogene Reak-

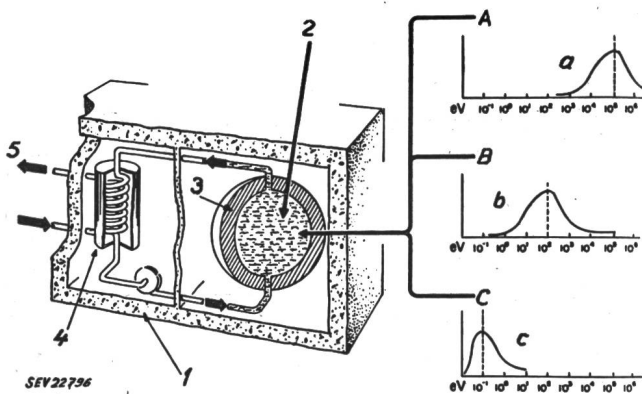


Fig. 3

Homogener Reaktor

1 Strahlungsschutz; 2 umlaufende Flüssigkeit (Brennstoff in Lösungsmittel); 3 Reflektor; 4 Wärmeaustauscher; 5 zur Kraftanlage; A grosses Atomgewicht; B mittleres Atomgewicht; C kleines Atomgewicht; a schnelle Neutronen; b Resonanz-Neutronen; c thermische Neutronen

tor (Fig. 3). An sich ist dieses gleichmässige Mischen von Brennstoff und Moderator ungünstiger, weshalb der homogene Reaktor praktisch wohl nur mit angereichertem Brennstoff betreibbar ist.

Technisch hat der homogene Reaktor wesentliche Vorteile. Man denke etwa daran, dass durch die Spaltprodukte eine allmähliche Vergiftung des Reaktors eintritt. Beim heterogenen Reaktor müssen daher die Stäbe von Zeit zu Zeit ausgewechselt werden. Die vergifteten Stäbe sind in Säure aufzulösen, dann folgt ein chemisch-technologischer Prozess, durch den schädliche Produkte entfernt und

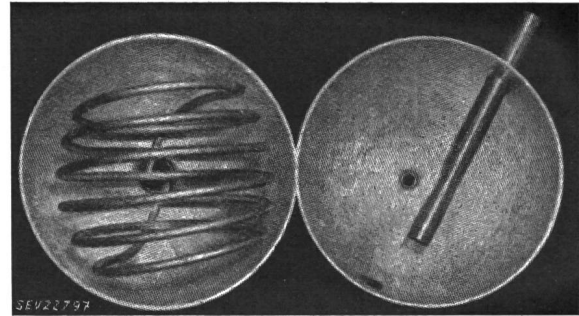


Fig. 4

Homogener Breederreaktor

das Uran schliesslich in metallischer Form wiedergewonnen wird. Daraus sind wieder neue Stäbe herzustellen. Liegt aber der Brennstoff, wie im homogenen Reaktor, in flüssiger Form vor, so vereinfacht sich dieses Verfahren offensichtlich wesentlich. Es ist dann z. B. denkbar, einem Nebenstrom stetig eine kleine Menge zu entnehmen, durch chemische Behandlung zu entgiften und wieder in den Reaktor einzuführen. Man darf nicht vergessen, dass die ganze chemische Aufbereitungsanlage wegen der Radioaktivität ferngesteuert unter hermetischem Strahlungsschutz arbeiten muss, so dass jede Vereinfachung auf dieser Seite äusserst willkommen ist.

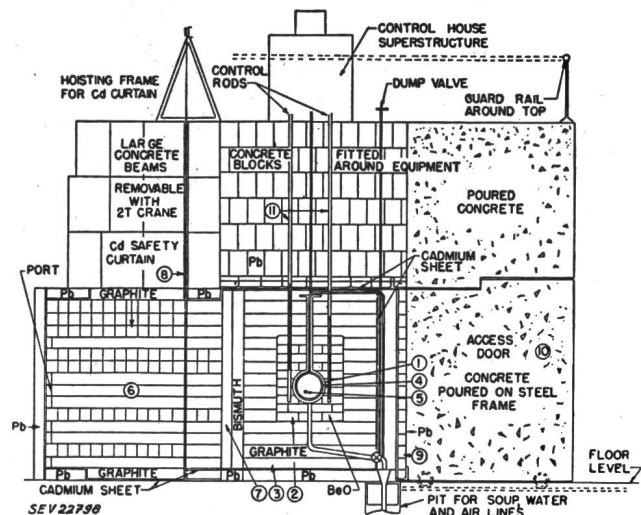


Fig. 5

Homogene Breederreaktoranlage im Schnitt

Vorteilhaft ist der homogene Reaktor auch im Hinblick auf die Wärmeübertragung, womit wir zu einem weiteren wichtigen Teilproblem kommen. Im homogenen Reaktor entsteht die Wärme mehr oder weniger gleichmässig in der ganzen flüssigen Reaktormasse und kann z. B. wie in der Fig. 3 so



an die Wärmekraftanlage abgegeben werden, dass man den Reaktorinhalt in ständige Zirkulation setzt und ihn dabei durch einen Wärmeaustauscher hindurchleitet. Eine andere Möglichkeit zeigt Fig. 4, wo eine vom Wärmeträger durchströmte Rohrschlange den Reaktorraum durchsetzt. Die Wärmeübertragung aus der Reaktormasse an die Rohrwand geschieht im Reaktor selbst oder im Wärmeaustauscher durch die Konvektionsbewegung der Flüssigkeit, also hauptsächlich durch direkten Wärmetransport und nicht so sehr durch Leitung. Auf diese Art lässt sich bei Flüssigkeiten eine Intensität der Wärmeübertragung erreichen, die praktisch jede technisch wünschbare Leistungskonzentration beherrschbar macht. Fig. 5 zeigt, wie einfach und kompakt ein solcher homogener, mit angereichertem Uran arbeitender Reaktor werden kann. Das eigentliche Reaktorgefäss hat einen Durchmesser von rund 30 cm.

Schwieriger wird das Problem der Wärmeübertragung beim heterogenen Reaktor. Dort entsteht die Wärme zu etwa 97% im Uranstab, muss also zunächst durch reine Wärmeleitung an die Staboberfläche gelangen. Nun ist zu beachten, dass der Stab nicht unmittelbar mit dem Wärmeträger in Berührung steht; er ist vielmehr in eine Umhüllung eingeschlossen (Fig. 6), deren Aufgabe es ist, die Vergiftung des Moderators durch Spaltprodukte zu vermeiden. Dass dies hier möglich ist, ist ein Vor-

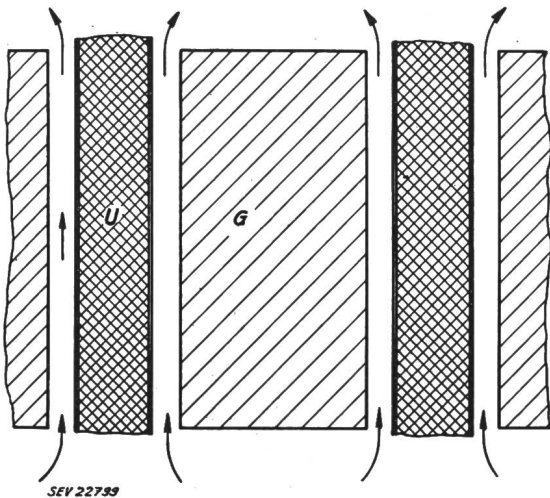


Fig. 6  
Uranstabumhüllung  
U Uranstäbe; G Graphit

teil der heterogenen Bauform. Wärmeübertragungstechnisch ist dies aber ein Nachteil, denn die Wärme muss jetzt durch die Hülle hindurch an den Wärmeträger geleitet werden. Dadurch entsteht das Problem des Kontaktwärmüberganges vom Stab an die Hülle, ein noch sehr wenig erforschter Typus von Wärmeübertragungsproblemen. Es sei bemerkt, dass die scheinbar primitive Aufgabe der Umhüllung der Uranstäbe technologisch sehr grosse Schwierigkeiten gemacht hat. Meist werden die Stäbe immer noch lose in die Hüllen hineingesteckt. Sattes Aufziehen der Hüllen oder auch Verfahren wie Plattieren scheinen sehr schwierig zu sein, und es sind uns darüber keine Einzelheiten

bekannt geworden. Hier besteht also jedenfalls eine gewisse Wärmeübertragungstechnische Schwierigkeit, die sich in einer Beschränkung der erzielbaren Leistungskonzentration auswirkt.

Auch abgesehen von dieser Einzelheit bringt schon die Wärmeleitung im Uranstab selbst bedeutende Temperaturdifferenzen mit sich, die zu hohen Wärmespannungen führen. Das hängt damit zusammen, dass die Wärme durch die verhältnismässig kleine Staboberfläche übertragen werden muss, was zu einem steilen Temperaturgradienten an der Wand führt. Auch hier stösst man an eine Grenze an, die eine beliebige Steigerung der Leistungskonzentration verbietet.

Der Wärmeübergang von der Hülle an den Wärmeträger spielt nicht die Rolle eines begrenzenden Faktors, sobald der Wärmeträger eine Flüssigkeit ist. So wird man beim mit  $D_2O$  moderierten Reaktor das  $D_2O$  auch zugleich als Wärmeträger verwenden. Ähnlich wie beim mit Graphit moderierten Reaktor Fig. 1 wird man auch hier das  $D_2O$  in Ringkanälen den Stäben entlang führen, wobei die nötige Strömungsgeschwindigkeit durch eine Umwälzpumpe erzwungen wird. Ein anderes Verfahren würde darin bestehen, das  $D_2O$  in den Ringräumen, die die Uranstäbe umgeben, zu verdampfen und in einem Kondensator, der die Rolle des Wärmeaustauschers spielen würde, wieder niederzuschlagen. Dabei könnte die Umwälzpumpe weggelassen werden. Bei Verdampfung ist der Wärmeübergang ebenfalls äusserst intensiv. Alles dies setzt aber voraus, dass man sich mit mässigen Höchsttemperaturen (Grössenordnung  $200^\circ C$ ) begnügt. Mit zunehmender Temperatur steigt ja der Druck sehr rasch an, unter dem das ganze System gehalten werden muss, und man erreicht daher bald die Grenze, die einem solchen Druckgefäss zugemutet werden darf. Der Prozess der Wärmekraftmaschine, deren Wärmespende der Reaktor ist, kann daher nur ein Niederdruck-Sattdampfprozess sein, nicht aber ein Heissdampfprozess, vom Gasturbinenprozess gar nicht zu reden.

Will man zu höheren Temperaturen übergehen, um den thermischen Wirkungsgrad der Anlage zu steigern, so muss man die Temperatur-Druckzuordnung, wie sie beim Wasser und somit auch beim schweren Wasser gegeben ist, vermeiden.  $D_2O$  wird dann als Moderator unbrauchbar, und man muss auf Graphit zurückgreifen, wenn es überhaupt ein heterogener, mit thermischen Neutronen arbeitender Reaktor sein soll. Beim homogenen Schnellreaktor muss dann die uranhaltige Schmelze an die Stelle der wässrigen Uransalzlösung treten. Einen geeigneten Wärmeträger zu finden für einen mit hoher Temperatur arbeitenden Reaktor ist kein ganz einfaches Problem. Man denkt zunächst an Gase. Der Wärmeübergang ist bei Gasen aber so viel schlechter als bei den Flüssigkeiten, dass in diesem Falle die Wärmeübertragung der leistungsbegrenzende Faktor wird. Zwar liesse sich durch Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit des Gases der Wärmeübergang fast beliebig erhöhen, doch nimmt hierbei die zur Umwälzung des Wärmeträgers notwendige Leistung rasch unwirtschaftliche

Werte an. Zur Erreichung einer genügenden Leistungsdichte wird es auch hier wieder nötig, das ganze System unter Druck zu setzen, denn die Wärmeübergangszahl steigt fast proportional mit dem Druck. Man vermeidet auch hier das Druckproblem nicht, wenn auch die unmittelbare Kopplung von Temperatur und Druck nicht mehr besteht.

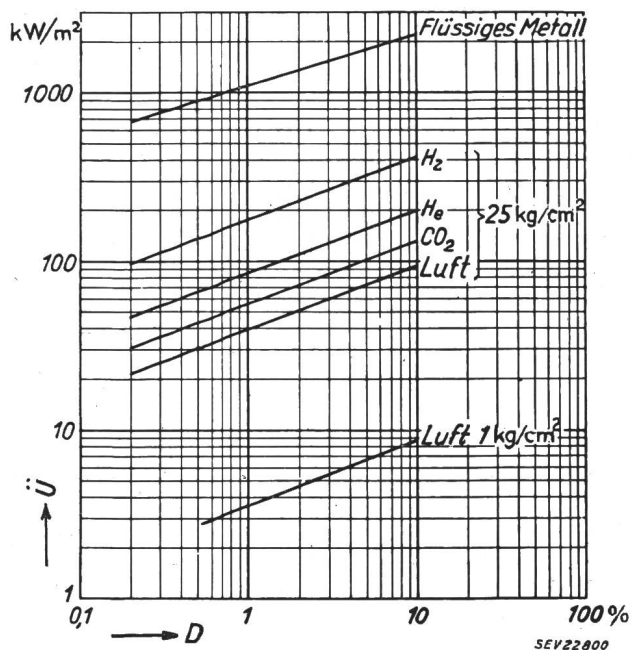


Fig. 7  
Wärmeübertragungseigenschaften  $\dot{U}$  verschiedener Wärmeträger in Funktion der Dissipation  $D$

Fig. 7 stellt diese Verhältnisse etwas genauer dar. Als Abszisse ist die Dissipation aufgetragen, worunter man die für die Umwälzung des Wärmeträgers benötigte Leistung in Prozent der Wärmeleistung des Reaktors versteht. Die Ordinate ist die Wärmestromdichte an der Oberfläche des Urastabes. Sie sollte mindestens die Grössenordnung  $100 \text{ kW/m}^2$  haben, damit überhaupt eine im Verhältnis zur Grösse des Reaktors annehmbare Leistungsausbeute entsteht. Luft bei atmosphärischem Druck ist vollständig ungenügend. Erst bei einem Druck von etwa  $25 \text{ kg/cm}^2$  ist die geforderte Grössenordnung erreichbar. Am günstigsten wäre Wasserstoff, der aber aus atomphysikalischen Gründen ausscheidet. Von den tatsächlich in Frage kommenden Gasen ist Helium das beste, um so mehr als es zugleich noch chemisch inert ist und nicht radioaktiv wird. Leider ist es in Europa nicht in der nötigen Menge erhältlich, so dass man sich bei uns mit dem nächst schlechteren, dem Kohlendioxyd, begnügen müsste.

Keinesfalls sind aber Gase ideale Wärmeträger, weshalb man Ausschau hielt nach Flüssigkeiten, die bei hoher Temperatur selbst unter atmosphärischem Druck nicht verdampfen. Als solche kommen in Frage flüssige Metalle und Legierungen von solchen. Aus Fig. 7 geht hervor, dass damit Wärmestromdichten erreichbar sind, die weit über allem liegen, was man mit Gasen erhoffen kann. Wie schon erwähnt, ist bei flüssigem Wärmeträger der

Wärmeübergang nicht mehr der leistungsbegrenzende Faktor. Diese Entwicklungsrichtung wird tatsächlich in Amerika intensiv verfolgt, und es scheint, dass Natrium die günstigsten Aussichten bietet. Einer der beiden U-Boot-Reaktoren arbeitet in der Tat mit mittelschnellen Neutronen und verwendet Natrium als Kühlmittel. Überhaupt hat man zur Zeit den Eindruck, dass sich für Leistungsreaktoren zwei Wärmeträger als bevorzugt herausheben, nämlich Wasser (gewöhnliches oder schweres) — wobei auf hohe Temperaturen verzichtet wird —, oder Natrium.

### C. Die Wärmekraftanlage

Schliesslich müssen wir noch einen kurzen Blick werfen auf die Wärmekraftanlage, welche die vom Reaktor entwickelte Wärme in mechanische und damit schliesslich in elektrische Energie umsetzt. Sie wird eine Dampfturbinenanlage sein. Wenn die Reaktortechnik einst beliebige Temperaturen zulassen wird, rückt auch die Gasturbine in den Bereich der Möglichkeit. Vorerst ist es aber ein Charakteristikum der Atomkraftanlage, dass die Wärme bei Temperaturen zur Verfügung steht, die tiefer sind, als in der modernen Dampfkraftwerktechnik sonst üblich ist. Im Falle des mit  $\text{D}_2\text{O}$  moderierten Reaktors muss ja selbst auf den Niederdruck-Sattdampfprozess zurückgegriffen werden. Die Aufgabe der reinen Sattdampf-Grossturbinen ist für den Turbinenbauer zwar nicht grundsätzlich neuartig, bringt aber doch eine Verschärfung der Probleme, die im Nassdampfteil normaler Turbinen bestehen. Die lange Zeit etwas vernachlässigte Erforschung der Vorgänge bei der Entspannung feuchten Dampfes in der Schaufelung erhält dadurch einen neuen Auftrieb.

Bei der Atomkraftanlage ist übrigens der thermische Wirkungsgrad nicht in gleichem Masse ausschlaggebend, wie beim gewöhnlichen Wärmekraftwerk, denn wenn es erst einmal eine wirtschaftliche Basis erreicht hat, so wird es sich ja gerade durch ausserordentlich niedrige Brennstoffkosten auszeichnen. Betragen aber die Brennstoffkosten nur einen Bruchteil derjenigen eines normalen Wärmekraftwerkes, so ist deren Verminderung durch Wirkungsgradsteigerung unwesentlich. Vielmehr muss die Planung des Werkes darauf ausgerichtet werden, den gesamten technischen und damit auch den kapitalmässigen Aufwand zu einem Minimum werden zu lassen; und eine Wirkungsgradsteigerung ist nur soweit sinnvoll, als sie diesem Ziele dient. Wenn wir zurückgreifen müssen auf Drücke und Temperaturen, die in der Dampftechnik vor Jahrzehnten üblich waren, so werden wir trotzdem nicht auf die sehr schlechten Wirkungsgrade der damaligen Anlagen zurückfallen, denn der seither gemachte Fortschritt ist ja keineswegs ausschliesslich auf die Steigerung der Temperaturen und Drücke zurückzuführen.

Man kann sich fragen, welche Vorteile die Gasturbine im Zusammenhang mit der Atomkraftanlage verspricht. Als Prozess kommt dabei nur der geschlossene Kreislauf in Frage, und zwar mit Helium als Arbeitsmittel. Dieses wird nicht radioaktiv und

kann daher unmittelbar durch den Reaktor geschickt werden (Fig. 8). Es ist also zugleich das Kühlmittel des Reaktors und das Arbeitsmittel der Wärmekraftmaschine. Der Wärmeaustauscher fällt weg, was natürlich eine bedeutende Vereinfachung darstellt und auch Raumbedarf und Gewicht vermindert. Andererseits stellt der Reaktor selbst dann

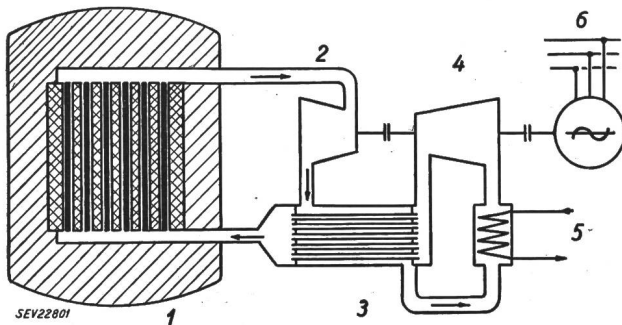


Fig. 8

Schema einer Atom-Gasturbokraftanlage mit geschlossenem Helium-Kreislauf

- 1 Reaktor; 2 Turbine; 3 Rekuperator; 4 Verdichter;  
5 Kühler; 6 Generator

besonders schwierige Probleme, da die Wärmeübertragungstechnisch ungünstige Gaskühlung zugleich mit einer Uranoberflächentemperatur von mindestens etwa 700 °C beherrscht werden muss. Auch müsste man mit Sicherheit vermeiden können, dass auch nur Spuren von Fremdstoffen in den Heliumkreislauf gelangen, weil damit die ganze Maschinenanlage verseucht würde.

## D. Schlussfolgerungen

Wie aus dieser kurzen und fragmentarischen Übersicht hervorgeht, ist die Schaffung eines wirtschaftlichen Atomkraftwerkes eine ausserordentlich vielschichtige Aufgabe. Es bedarf dabei der Zusammenarbeit der Fachleute aus den verschiedensten Gebieten der Technik. Vielleicht ist der technologisch-werkstofftechnische Sektor der allerwichtigste. — Man beachte, dass hier Erscheinungen auftreten, welche die bisherige Werkstofftechnik gar nicht kannte, z. B. Korrosion durch Neutronenbestrahlung. — In der Schweiz ist bis jetzt auf physikalischem Gebiet durch verschiedene Hochschulen und auf technischem Gebiet durch die industrielle Studiengruppe wertvolle Vorarbeit geleistet worden. Die Periode der Vorstudien ist jetzt aber vorbei. Es ist hohe Zeit, dass sich eine Elite von Fachleuten mit ganzem Einsatz der Entwicklung des Atomkraftwerkes — d. h. praktisch zunächst der Schaffung des ersten Atomreaktors — widmet. Konnte man noch vor wenigen Jahren daran zweifeln, ob das Atomkraftwerk je kommen werde, so ist heute ein Zweifel hierüber kaum mehr möglich. Es hätte daher tragische Folgen, wenn die Schweiz in dieser Entwicklung abseits stände. Zwar wird es noch Jahrzehnte dauern, bis die Elektrizitätserzeugung durch Kernenergie eine hervorragende wirtschaftliche Bedeutung erlangt haben wird, doch ist es unsere Pflicht, auf weite Sicht vorzusorgen.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. W. Traupel, Vorstand des Institutes für thermische Turbomaschinen an der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich 1.

## Probleme der Regelung im Atomkraftwerk

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 28. Oktober 1954 in Zürich,

von P. Profos, Winterthur

621.311.25 : 621.039.4

Nach einleitender allgemeiner Umschreibung der Grundaufgaben der Regelung eines Kraftwerkes schlechthin werden zunächst die regeldynamischen Eigenschaften eines Reaktors an sich dargelegt und die grundsätzlichen Möglichkeiten zur Beeinflussung der Pile-Leistung aufgezeigt. An einem Beispiel werden anschliessend Aufbau und Wirkungsweise einer Reaktor-Regelung dargestellt und deren Verknüpfung mit Sicherheitsorganen angedeutet.

Da für die Praxis das Verhalten des Atomkraftwerkes als Ganzes wesentlich ist, wird weiter untersucht, wie die Regelung der Pile mit der Gesamtregelung des Kraftwerkes verknüpft werden kann. Ausgehend von den vom Dampfkraftwerk her bekannten Regelungsverfahren werden die entsprechenden Möglichkeiten für das Atomkraftwerk entwickelt und gezeigt, dass die Gesamtregelung der Art und dem Verhalten des Reaktors angepasst werden kann. Die hierbei massgebenden Reaktoreigenschaften, die sogenannte Speicherfähigkeit und Manövrierfähigkeit, werden erläutert und mit den vom Dampfkraftwerk her bekannten Werten dieser Grössen verglichen. Dieser Vergleich gestattet, das mutmassliche Regelverhalten des Atomkraftwerkes abzuschätzen.

### A. Umschreibung der Regelaufgabe

Bei jedem Kraftwerk besteht bekanntlich die Grundaufgabe der Regelung darin, die Energieerzeugung dauernd der geforderten Leistung anzupassen. Dabei sollen die wichtigsten Betriebsgrössen des Arbeitsprozesses, wie Druck und Tempera-

Après description générale de la fonction du réglage dans les centrales électriques, l'article expose les propriétés d'un réacteur atomique au point de vue de son réglage et montre les facteurs permettant d'influencer la puissance fournie par la pile atomique. A l'aide d'un exemple concret sont montrés la conception et le fonctionnement du réglage d'un réacteur et sa liaison avec les organes de sécurité.

Comme dans la pratique le comportement de la centrale atomique dans son ensemble importante avant tout, on traite en outre la question de la liaison entre le réglage de la pile et le réglage de la centrale. En partant des procédés de réglage bien connus appliqués dans les centrales à vapeur, l'article expose les possibilités données par la centrale atomique et montre l'adaptation du réglage au type de réacteur. Les facteurs importants tels que la capacité d'accumulation et la facilité de réglage du réacteur sont décrits et comparés avec les grandeurs connues du réglage des centrales à vapeur. Cette comparaison permet d'entrevoir le comportement du réglage d'une centrale atomique.

tur, innerhalb eines vorgegebenen und dem Normalbetrieb zugemessenen Bereiches gehalten werden, dies sowohl mit Rücksicht auf den Wirkungsgrad, als auch aus betriebstechnischen Gründen. Unter normalen Bedingungen sollten also hierbei die für die Betriebssicherheit der Anlage massge-