

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 74 (1956)
Heft: 36

Artikel: Reaktoren für hohe Temperaturen
Autor: Benenati, Robert F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-62697>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 03.02.2026

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

Reaktoren für hohe Temperaturen

DK 621.039.42

Von Robert F. Benenati, Brooklyn Polytechnic Institute, New York

Aus dem Englischen übersetzt

Zusammenfassung

Dieser Aufsatz behandelt Reaktoren von der frühesten Entwicklung bis zur Gegenwart, und zwar vor allem die Typen für hohe Temperaturen. Unter ihnen eignen sich jene mit Gaskreislauf am besten. Es werden einige irreführende Behauptungen und Fehlschlüsse über diesen Reaktortyp besprochen sowie dessen Vor- und Nachteile mit denen anderer üblicher Bauweisen verglichen. Schliesslich werden Skizzen von Reaktoren mit Gaskreislauf, von Brennstoffelementen und von ganzen Anlagen diskutiert.

A. Einleitung

Wie Sie alle wissen, ist der erste Reaktor an der Universität von Chicago durch Männer gebaut worden, die von grossem Pioniergeist erfüllt waren. Dieser Reaktor ist aufgestellt worden, um die Behauptung der sich selbst erhaltenden Kettenreaktion zu beweisen. Diesen Beweis hat er erbracht. Später ist eine Gruppe von Reaktoren in Hanford gebaut worden, mit der Aufgabe, Plutonium für militärische Zwecke zu erzeugen. Da bei den Spaltprozessen Wärme entsteht, war man genötigt, diese Reaktoren zu kühlen. Als Kühlmittel verwendete man Wasser. Diese Produktionsreaktoren stehen nun bereits seit 15 Jahren erfolgreich und ohne Unfall in Betrieb.

Damals standen alle Arbeiten auf dem Gebiete der Kernforschung unter militärischer Kontrolle, und alle Anstrengungen richteten sich auf die Herstellung von Atomwaffen. Trotzdem traf sich eine bemerkenswerte Gruppe von Wissenschaftlern und Ingenieuren regelmässig, um Möglichkeiten einer Anwendung der Kernspaltung für friedliche Zwecke zu diskutieren. Aus diesen Zusammenkünften ging der Vorschlag von Dr. F. Daniels hervor, für einen Hochtemperatur-Reaktor Gas als Wärmeträger, Uranoxyd als Brennstoff und Graphit als Moderator zu verwenden. Bevor ein solcher Reaktor gebaut werden konnte, bildete sich die Atomenergie-Kommission (AEC), und in der Administration wurden gewisse Wechsel vorgenommen. Das Projekt eines Hochtemperatur-Reaktors wurde zurückgestellt und die Gruppe aufgelöst, obwohl sie damals immer noch der Ansicht war, dass ein solcher Reaktor für den vorgeschlagenen Zweck erfolgreich gebaut und betrieben werden könnte.

Die Kommission stellte mit ihren Lieferanten und den staatlichen Laboratorien ein breites Entwicklungsprogramm für verschiedene Reaktortypen auf. Alle diese Reaktoren mussten gekühlt werden, und man erwartete, dass man die

durch die Spaltprozesse anfallende Wärme einmal nutzbringend, vor allem für Energieproduktion, verwenden könne. Unglücklicherweise waren zu jener Zeit die Reaktorwissenschaftler von ihrer neuen Aufgabe derart erfüllt, dass sie von wassergekühlten, gasgekühlten, mit flüssigem Metall gekühlten Reaktoren und ähnlichen Möglichkeiten sprachen. Jedermann war bemüht, seinen Lieblingsreaktor auf seine Weise zu kühlen; aber man hörte nicht auf jene Leute, die einen Hochtemperatur-Reaktor zur Durchführung eines thermodynamisch günstigen Arbeitsprozesses vorschlugen. Man glaubte, es genüge, Dampf zu produzieren, und die Wärmekraftmaschine würde diesen dann schon in elektrische Energie umwandeln. Dass nur Sattedampf von tiefer Temperatur produziert werden konnte, wurde unbeachtet gelassen unter der falschen Annahme, dass keine guten thermischen Wirkungsgrade notwendig seien, da der Brennstoff ja billig sei. Auf diese Weise war die einzige Dampfkraftanlage, die die Wissenschaftler für ihre funkelneulene Wärmequelle brauchen konnten, von solcher Art, wie sie die Fachleute von Wärmekraftmaschinen schon vor einer Generation als überwunden betrachteten.

Nur langsam setzte sich die Erkenntnis in die Notwendigkeit höherer Temperaturen durch, und heute sind einige vielversprechende Entwicklungen auf diesem Gebiet im Gang. So hat z. B. eine grosse Stadtverwaltung in einem der New-England-Staaten der Atomenergiekommission vorgeschlagen, ein Kraftwerk von 15 MW mit geschlossener Gasturbine zu bauen, um die erhöhte Nachfrage nach Elektrizität zu decken. Der Kernreaktor in diesem Kraftwerk soll Stickstoff auf 700 °C aufheizen; es kommt daher nur ein Hochtemperatur-Reaktor in Frage. Vor kurzem hat die AEC dem «joint Congressional Committee on Atomic Energy» angekündigt, dass der achte Reaktortyp, dessen Entwicklung von der AEC dieses Jahr an die Hand genommen werden soll, ein gasgekühlter Hochtemperatur-Reaktor sein werde. Daraus kann man sehen, dass der Kernreaktor, den wir heute betrachten wollen, die älteste und heute wieder die neueste Konzeption für Kernkraftwerke darstellt.

B. Warum Hochtemperatur-Reaktoren?

Es liegt auf der Hand, diese Frage zu stellen. Die Antwort ist ziemlich eindeutig. Jedesmal, wenn sich ein Uran-

1) Eine erste Veröffentlichung von Vorträgen dieser Tagung findet man in SBZ 1956, Nr. 21, eine zweite in Nr. 25.

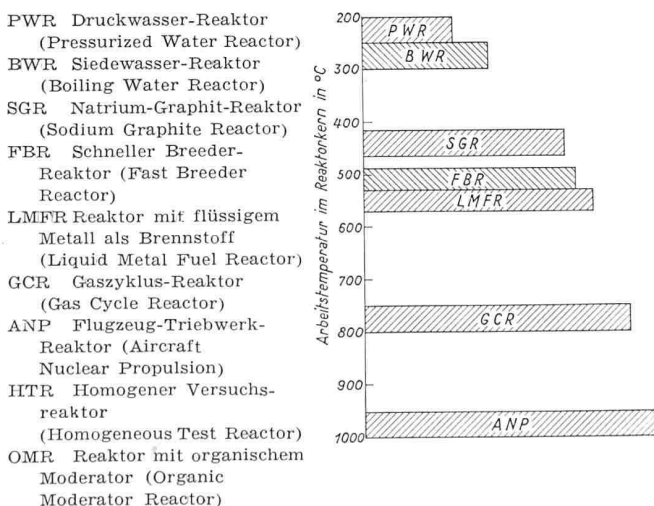


Bild 1. Vergleich der relativen Anlagewirkungsgrade verschiedener Reaktoren bei ihren Betriebstemperaturen

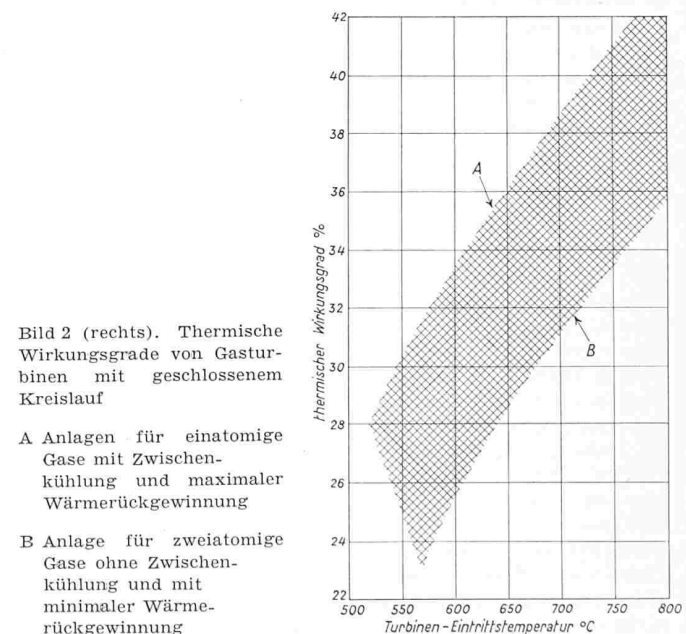


Bild 2 (rechts). Thermische Wirkungsgrade von Gasturbinen mit geschlossenem Kreislauf

A Anlagen für einatomige Gase mit Zwischenkühlung und maximaler Wärmerückgewinnung

B Anlage für zweiatomige Gase ohne Zwischenkühlung und mit minimaler Wärmerückgewinnung

kern spaltet, wird eine Energie von schwach 200 MeV frei, und zwar zum grössten Teil in Form von kinetischer Energie der Spaltprodukte oder als Kernstrahlung. Diese Energie ist schliesslich als Wärme verfügbar und kann durch konventionelle Dampf- oder Gasturbinenanlagen in elektrische Energie umgewandelt werden.

Die nächste Frage lautet: «Was heisst hohe Temperaturen?» Diese Frage ist schwieriger zu beantworten, da sie vom jeweiligen Stand der Technik abhängt. Einst betrachtete man Sattdampftemperaturen bei etwa 10 atü als hoch. Heute werden schon einige überkritische Dampfanlagen gebaut, in denen man mit Dampftemperaturen bei Turbineneintritt von 600 °C und mehr arbeitet. Eine der ersten Gasturbinenanlagen, die hier in Neuenburg aufgestellt ist, arbeitete mit einer Gastemperatur von 550 °C. Heute werden Dutzende von Gasturbinen verkauft, die mit etwa 800 °C arbeiten. Hochtemperatur bedeutet nach dem heutigen Stand der Technik also 600 bis 800 °C. Unter der Annahme einer Temperaturdifferenz für den Wärmeübergang von 200 °C verlangt dies Temperaturen für die Brennstoffelemente von der Grössenordnung 800—1000 °C. Versuche auf diesem Gebiet werden gemacht an den Reaktoren SIR (natriumgekühlter intermediärer Reaktor), und ANP (Anlage der Luftwaffe), während Planungsarbeit am GCR (gasgekühlter Reaktor) im Gange ist. Bild 1 zeigt den relativen Gesamtwirkungsgrad verschiedener, in den USA entwickelter Reaktortypen in Funktion ihrer angenäherten Austrittstemperaturen, und Bild 2 veranschaulicht das Gebiet der thermischen Wirkungsgrade von Anlagen mit gasgekühlten Reaktoren (GCR in Bild 1). Man sieht hieraus, dass die Lauwarmwasser-Reaktoren (in Bild 1 links oben) nicht fähig sind, annehmbare Wirkungsgrade zu erreichen.

Eine wichtige Tatsache wurde vielfach stark unterschätzt, es ist das der Preis von Kernbrennstoff. Man glaubte, er sei unbedeutend, verglichen mit den Kosten herkömmlicher Brennstoffe, wie z. B. Kohle, und hohe, thermische Wirkungsgrade seien nicht nötig. Dieser Irrtum ergab sich aus der Tatsache, dass die Energie von 1 kg Uran (unter der Annahme vollständiger Verbrennung) gleichwertig sei derjenigen von rd. 2600 t Kohle. Dabei wird angenommen, die Ausnützung der Ueberschussneutronen genüge, um eine vollständige Umwandlung von U^{238} in Pu^{239} zu erreichen. Ausserdem wurden die sehr beträchtlichen Kosten der chemischen Wiederaufbereitung und der Fabrikation der Brennstoffelemente vernachlässigt. Diese letztgenannten Punkte können leicht dazu führen, dass die Kosten von Kernbrennstoff höher liegen, als diejenigen von herkömmlichen Brennstoffen. Wir werden später auf die Kostenfrage zurückkommen. Hier sei nur festgestellt, dass Kernbrennstoff als ein teurer Brennstoff betrachtet werden muss, und dass das Streben nach hohen Anlagewirkungsgraden über den Weg von Hochtemperaturbetrieb ganz und gar gerechtfertigt ist.

C. Reaktoren für Gaskreislauf

Nachdem das Bedürfnis nach Hochtemperatur-Reaktoren festgestellt ist, dürfte es angezeigt sein, das Reaktor-Programm in den Vereinigten Staaten anzusehen. Es besteht aus drei Teilen, nämlich: 1. das Fünfjahresprogramm der AEC; 2. das Programm von Reaktoren, die von der Privatindustrie vorgeschlagen wurden, mit oder ohne finanzielle Hilfe der AEC, und 3. Zusätze zum Fünfjahresprogramm. Auf Tabelle 1 sind die Leistungs-Reaktortypen des AEC-Programms aufgeführt. Die ersten fünf Reaktoren weisen verhältnismässig niedere Temperaturen auf; die letzten drei sind neuere Zusätze zum AEC-Programm und stellen Versuche dar, höhere Temperaturen zu erreichen. Der «LMFR-Reaktor» verwendet geschmolzenes Wismuth als Brennstoff- und Wärmeträger und Graphit als Moderator. Der «OMR-Reaktor» verwendet Diphenyl als Moderator und Kühlmittel. Der «GCR-Reaktor» ist gasgekühlt und kann einen festen Stoff als Moderator verwenden.

Tabelle 2 zeigt das etwas waghalsige Reaktor-Programm (Erstellung von ganzen Kraftwerken) verschiedener Industrie-Gruppen in den USA. Die Reaktoren 1 bis 5 wurden anfangs 1955 als Teil des Demonstrationsprogrammes für Energieerzeugung der Industrie vorgeschlagen. Mit Ausnahme des Consolidated-Edison-Reaktors (Nr. 5), der ganz mit privaten Mitteln finanziert wird, ist für diese Reaktoren finanzielle Hilfe der Regierung vorgesehen. Die Ähnlichkeit zwischen

diesen Vorschlägen und denjenigen des ursprünglichen AEC-Programms ist ziemlich deutlich. Die Reaktoren 6 bis 11 wurden im Jahre 1956 als Teil des Demonstrationsprogrammes für kleine Reaktoren vorgeschlagen. Man sieht, dass zeitweise einige Arten des ursprünglichen Programmes wieder vertreten sind und dass eine Tendenz nach höheren Temperaturen vorhanden ist.

Wir wollen jetzt die Faktoren betrachten, die durch die Betriebstemperatur des Reaktors beeinflusst werden. Ein Kernreaktor kann als eine Einrichtung definiert werden, die eine Ansammlung von Kernteilchen, im besonderen Neutronen, im dynamischen Gleichgewicht erhält. Diese Einrichtung ist aus Materialien zusammengesetzt, die durch Brennstoff, Moderator und Aufbauteile bestimmt sind. Es kann auch noch ein Reflektor und eine Abschirmung vorhanden sein. Ein typischer Aufbau eines Reaktors kann bestehen aus einem Kern, der einen in einem Moderator passend verteilten Brennstoff enthält. Dieser Kern ist von einem Reflektor umgeben, der austretende Neutronen wieder in den Kern zurückbringt, wo sie mit Brennstoff reagieren. Das Ganze ist normalerweise von einer Abschirmung umgeben, welche die biologisch schädliche Strahlung absorbiert. Durch die Kernspaltungen, die im Reaktorinneren stattfinden, entstehen Neutronen, Wärmeenergie, Kernstrahlen und Spaltprodukte. Da unser Ziel die Energieerzeugung ist, interessiert uns hauptsächlich die anfallende Wärmeenergie, und es stellt sich das Problem, die Wärme an ein passendes Arbeitsmedium, das heisst an das Reaktorkühlmittel, bei möglichst hoher Temperatur zu übertragen.

Welche Stoffe können grundsätzlich als Reaktor-Kühlmittel gewählt werden? Zunächst kommen leichtes und schweres Wasser in Frage. Auch wurden schon vorhandene Systeme mit flüssigen Metallen und geschmolzenen Salzen vorgeschlagen, ferner organische Verbindungen und schliesslich auch mehrere Gase. In Tabelle 3 sind einige kennzeichnende Eigenschaften dieser Materialien angegeben.

Es ist selbstverständlich, dass dem Wasser als Reaktor-Kühlmittel viel Beachtung geschenkt wurde, jedoch sind seine Eigenschaften für Hochtemperaturbetrieb nicht geeignet. Sein Dampfdruck ist zu hoch und seine kritische Temperatur zu tief; ferner ist seine chemische Aktivität gross, so dass daraus schwierige Korrosionsprobleme entstehen. Und schliesslich ist sein Absorptions-Wirkungsquerschnitt zu gross. Im Falle von schwerem Wasser werden überdies die Herstellungskosten unmöglich hoch. In den herkömmlichen Wärmekraftmaschinen wurden die Temperaturen so hoch getrieben, dass die neuesten Anlagen bei überkritischen Temperaturen laufen. Unter diesen Umständen benimmt sich das Arbeitsmittel wie ein Gas, während es viele der unangenehmen Eigenschaften des Wassers beibehält.

Medien, welche bei Raumtemperatur fest sind, wie z. B. Natrium und geschmolzene Salze, bereiten Schwierigkeiten beim Anlauf des Reaktors. Ausserdem stellen sie schwierige Korrosionsprobleme [1]. Im Falle von Natrium sind überdies ernstliche Unfallgefahren vorhanden. Solche Medien haben so viele Nachteile und, abgesehen von ihrem niedrigen Dampfdruck, keine ins Gewicht fallenden Vorteile, dass ihre Verwendung nicht empfohlen werden kann.

Die übrigen Materialien, die bei Raumtemperatur flüssig sind, können in organische Stoffe mit hohem Molekulargewicht und flüssige Metalle eingeteilt werden. Die organischen Verbindungen haben einen kleineren Dampfdruck als Wasser, aber einen höheren als die flüssigen Metalle. Ihr Hauptnachteil besteht darin, dass sie im Reaktor eventuell Strahlungsschäden erleiden. Aus einigen Arbeiten geht hervor, dass bei ihnen Polymerisation eintritt, andere weisen auf Dissoziation hin. Beide Erscheinungen sind sehr unerwünscht. Ein Versuchsreaktor, der mit Diphenyl moderiert ist, soll in einem Jahr in USA in Betrieb kommen. Dieser wird wertvolle zusätzliche Informationen zur Beurteilung eines solchen Systems liefern.

Flüssige Metalle als Kühlmittel sind im Kreislauf einer Wärmekraftmaschine nicht direkt anwendbar. Sie müssen daher ihre Energie zuerst in einem Wärmeaustauscher an ein anderes geeignetes Medium abgeben. Hieraus ergibt sich eine Herabsetzung der verfügbaren Temperatur, was eine Verminderung des Anlagewirkungsgrades zur Folge hat.

Im Gegensatz hierzu vereinigen die Gase die Vorteile einer verhältnismässig hohen chemischen Inaktivität, einer

hohen relativen Strahlungsfestigkeit, keines Phasenwechsels zwischen Raum- und Betriebstemperatur, einer relativ kleinen Volumenzunahme mit der Temperatur, einer sehr schwachen Neutronenabsorption, eine fast vernachlässigbare Aktivierung im Neutronenfluss usw. Kurzum, sie kommen in jeglicher Hinsicht für einen Reaktor in Betracht. Es weist also jede Betrachtung nach der Tatsache, dass Reaktoren mit hohen Temperaturen für Energieerzeugung ihre Wärmeenergie an Gas abgeben sollten.

D. Fehlschlüsse

In den letzten zehn Jahren sind falsche Auffassungen über Reaktoren für Gaskreislauf entstanden.

Ich möchte zuerst einige davon erwähnen und Argumente anführen, um sie zu widerlegen. Einer der ältesten Irrtümer, der sich schon in der frühesten Literatur über Reaktorplanung vorfindet, liegt in der Annahme, dass in einem Gaskreislauf übermässig hohe Energieverluste infolge Druckabfall im Reaktor verursacht werden. Wenn auch diese Annahme für Reaktoren zutreffen könnte, die mit Luft von Atmosphärendruck gekühlt werden, so ist sie dennoch nicht allgemein richtig. Bei Wahl eines geeigneten Gases und bei Betrieb mit höheren Drücken können diese Energieverluste stark herabgesetzt werden.

Der nächste Punkt ist die Art der Umwandlung der durch Spaltung anfallenden Wärmeenergie eines Gaskreislauf-Reaktors in mechanische Energie. Diese Umwandlung kann auf dem Wege der Dampferzeugung vorgenommen werden, wie es von der Chicago-Studiengruppe im Jahre 1953 vorgeschlagen wurde. Da wir jedoch Gas von hoher Temperatur zur Ver-

Tabelle 1. Das Reaktor-Programm der Amerikanischen Atomenergie-Kommission (AEC) Bezeichnungen der Reaktortypen s. Legende zu Bild 1.

Programm	Reaktor-Typ	Ersteller	Leistungen		Kosten Mio \$	Fertigstellung
			Wärme MW	El.Energie MW		
Fünf-Jahres-programm	PWR	Westinghouse	264	60	85	1957
	BWR	Argonne National Laboratory	20	5	17	1956
	SGR	North American Aviation	20	—	10	1956
der A. E. C.	FBR	Argonne National Laboratory	62,5	15	40	1958
für zivile	HTR	Oak Ridge National Laboratory	65	16	44	1959
Energie-Produktion	LMFR	Brookhaven National Laboratory	5		15	1959
Zusätze zum Fünfjahres-Programm	OMR	North American Aviation.	Die Daten sind noch nicht erhältlich			1957
	GCR		Das Programm wird erst aufgestellt.			

Tabelle 2. Das Reaktor-Bauprogramm der Privatindustrie

Programm	Reaktor-Typ	Ersteller	Wärme-Leistung MW	Kosten Mio \$	Fertigstellung
Demonstrations-programm	PWR	Yankee Atomic Electric	100	24	1957
	BWR	Commonwealth Edison	180	45	1960
für Energie-produktion	SGR	Consumer's Public Power District	75	24	1959
der	FBR	Detroit Edison	100	45	1958
Industrie	PWR	Consolidated Edison	236	55	1959
	CGR	City of Holyoke Gas and Electric	15	9	1961
Demonstrations-programm für	LMFR	City of Orlando Gas and Electric	25		1960
	BWR	Elk River Rural Cooperative	22		1960
Reaktoren	HTR	Wolverine Electric Cooperative	10		—
kleiner Leistung	NaH ₂ O	Chugach Electric Ass'n., Anchorage, Alaska	10		1961
	OMR	City of Piqua Gas and Electric	12,5		1960

Tabelle 3. Physikalische Eigenschaften von Kühlmedien

	Schmelzpunkt °C	Siedepunkt °C	Temp. °C	Dichte g/cm ³	Spezifische Wärme cal/g	Wärme- leitfähigkeit cal/cm °C	σ_a 10 ⁻²⁴ cm ² pro Atomkern	Aktivierung
Wasserstoff (1 ata)	—	Gas	100	6,6 · 10 ⁻⁵	3,43	5,33 · 10 ⁻⁴	0,33	keine
Helium (1 ata)	—	Gas	0	1,8 · 10 ⁻⁴	1,25	3,3 · 10 ⁻⁴	~ 0	keine
Luft (1 ata)	—	Gas	100	9,5 · 10 ⁻⁴	0,240	7,57 · 10 ⁻⁵	1,5	N ¹⁶ 7,3 s; 6-MeV γ A ⁴¹ 1,8 h; 1,4-MeV γ
Kohlendioxyd (1 ata)	—	Gas	100	1,5 · 10 ⁻³	0,218	5,0 · 10 ⁻⁵	0,003	N ¹⁶ (wie oben)
			300	9,5 · 10 ⁻⁴	0,231	9,0 · 10 ⁻⁵		
Wasser	0	100 (1 ata)	100	0,958	1,01	1,70 · 10 ⁻³	0,22	N ¹⁶ (wie oben)
		250 (40 ata)	250	0,794	1,10	1,96 · 10 ⁻³		
Lithium	179	1317	200	0,507	1,0	0,09	0,033	Li ⁸ 0,83 s; Bremsstrahlung von 13-MeV β
			600	0,474	1,0		für Li ⁷	
Natrium	98	883	100	0,928	0,331	0,206	0,50	Na ²⁴ 15 h; 1,38-MeV γ , 2,75 MeV γ
Natrium-Kalium-Legierung (22% Na, 78% K)	—11	784	400	0,854	0,306	0,170		Na ²⁴ (wie oben)
			100	0,775	0,223	0,0583	1,7	K ⁴² 124 h; 1,5-MeV γ
			400	0,703	0,210	0,0636		
Blei-Wismuth-Eutektikum (44,5 % Pb, 55,5 % Bi)	125	1670	200	10,46	0,035	0,023	0,1	Bi ²¹⁰ 5 d; Zerfall zu giftigem Po ²¹⁰
			600	9,91	~ 0,035	~ 0,035		
Blei-Magnesium-Eutektikum (97,5 % Pb, 2,5 % Mg)	250	~1700	300	~ 10	~ 0,035	~ 0,03	0,16	Mg ²⁷ 10 min; 0,84-MeV γ , 1,0-MeV γ
Natriumhydroxyd	323	—	350	1,79	0,554	5,2 · 10 ⁻³		Na ²⁴ (wie oben)
			550	1,67	0,434	2,8 · 10 ⁻³	0,28	N ¹⁶ (wie oben)

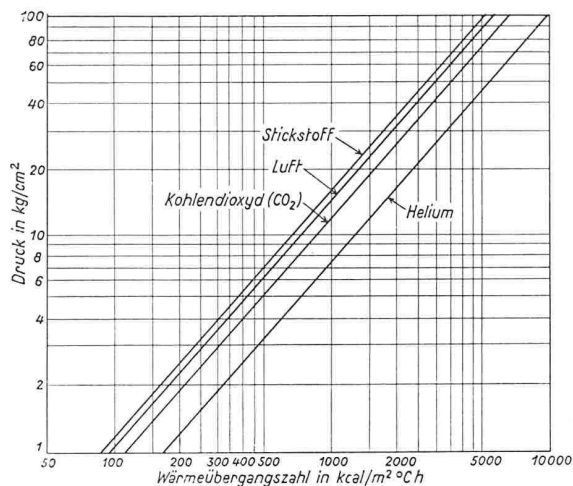


Bild 3. Wärmeübergangszahlen verschiedener Gase, die für Gasturbinen und Reaktorbetrieb in Frage kommen, in Abhängigkeit des Gasdruckes, berechnet für konstanten spezifischen Druckverlust von 2 % in einem Rohr von 1" Durchmesser und 2,5 m Länge bei 538 °C

fügung haben, ist es unzweckmässig, dessen Energie durch Erzeugen von Dampf von tieferer Temperatur abzuwerten, es sei denn, wir seien durch die Neuheit der Wärmequelle so geblendet, dass wir nur die Wärmequelle betrachten und nicht das Ziel der Erzeugung elektrischer Energie. Zweifellos könnte Dampf von hoher Temperatur erzeugt werden, z. B., indem man einen Reaktor als Dampfüberhitzer verwenden würde. Diese Anwendung könnte theoretisch auf dem Gebiete der überkritischen Dampfkraftanlagen erfolgen, um hohe Dampftemperaturen zu erreichen. Aber eine mit überkritischen Drücken arbeitende Dampfturbinenanlage stellt in praktischer Hinsicht eine Gasturbinenanlage dar, mit dem Nachteil, dass man an sehr hohe Drücke gebunden ist, um die gewünschten Temperaturen zu erreichen. Daher liegt es nahe, eine Gasturbine in Betracht zu ziehen. Man ist dabei in der Prozessführung freier. Und vor allem ist man nicht mehr von den hohen Drücken abhängig.

Die Gasturbine ist eine Hochtemperatur-Maschine; durch Anwendung geeigneter Wärmeübergangsvorrichtungen könnte Luft als Arbeitsmittel verwendet werden und man erhielte eine Anlage mit einem annehmbaren Wirkungsgrad. Eine solche Anordnung weist einen gewissen Temperaturabfall zwischen dem Reaktorgas und der Luft als Arbeitsmedium in der Gasturbine auf. Naturgemäss besteht der nächste Gedanke darin, die Luft des Turbinenkreislaufes direkt durch den Reaktor zu schicken. Jedoch ist eine solche Anordnung, wie wir später sehen werden, in ihrer Anwendung eindeutig begrenzt. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, ein Gasturbinensystem anzuwenden, bei dem die Kreislauf- und die Reaktorbedingungen miteinander verträglich sind. Es besteht nur eine kleine Auswahl von Systemen, die diesen Bedingungen entsprechen.

Eine hierfür geeignete Wärmekraftmaschine ist die Gasturbine mit geschlossenem Kreislauf, die in der Schweiz erfunden und entwickelt worden ist. Während alle bis heute gebauten geschlossenen Gasturbinen Luft als Arbeitsgas und eine Wärmequelle mit fossilen Brennstoffen verwenden, so stellt sich hier die Aufgabe, ein Gas zu finden, das auch den Bedingungen eines Reaktors genügt, mit dem also eine nukleare Wärmequelle in einem thermodynamischen Kreislauf ausgenutzt werden kann. Geschlossene Gasturbinenanlagen, die nach diesen Prinzipien studiert wurden [2], zeigen Höchstwirkungsgrade bis zu 40 %. Wenn nicht, und bevor nicht andere Kernenergie-Systeme, die für «tiefe Reaktor-Kühlleistung» geplant sind, gleiche Höchstwirkungsgrade zeigen, ist es überflüssig, das Argument des hohen Energieverlustes wegen Druckverlust im Reaktor weiter zu verfolgen.

Ein anderer Fehlschluss, der seit langem gemacht wird, besteht in der Annahme, man könne einen Reaktor nicht mit Gas kühlen, da die Wärmeübergangszahlen an strömendem Gas sehr niedrig seien und man daher sehr grosse Wärmeübertragungsflächen im Reaktorkern benötige. Hier bringt wieder die richtige Wahl des Gases und die Anwendung hö-

herer Drücke ganz gewaltige Verbesserungen. Bild 3 lässt erkennen, welche Wärmeübergangszahlen bei Luft, Stickstoff, Kohlendioxid und Helium erreichbar sind. Das Diagramm zeigt auch die Verbesserung der Wärmeübergangszahlen durch Betrieb bei höheren Drücken. Man muss sich vor Verallgemeinerungen hüten. Aber man darf doch auf Grund von Untersuchungen an verschiedenen gasgekühlten Reaktoren feststellen, dass deren Konstruktion und Grösse in keiner Weise durch die Wärmeübertragungsfähigkeit des Reaktor-Kerns beeinflusst wird. Das bedeutet, dass die Wärmeabgabe durch die Eigenschaften des Kühlmittels und durch die Massnahmen zur Wärmeübertragung bestimmt sind, während die Grösse des Reaktorkerns durch kernphysikalische Erwägungen festgelegt ist. So scheint es, dass auch dieser Einwand unangebracht ist.

Das letzte Argument gegen den Gaskreislauf-Reaktor ist in einem Bericht der Genfer Konferenz [3] betitelt «Survey of Fuel Cycles and Reactor Types» zu finden, wo folgendes geschrieben steht:

«Die Wahl zwischen gasförmigen und flüssigen Kühlmitteln hängt von der spezifischen Leistung pro Tonne Uran und vom Verhältnis zum Thermischen Wirkungsgrad ab. Als Beispiel sei der Brookhaven-Reaktor angeführt, der bei ungefähr 30 000 kW mit etwa 100 t natürlichem Uran arbeitet, was eine spezifische Leistung von 300 kW pro t ergibt. Mit einer Druckwasserkühlung könnte dieser Wert vielleicht um das Zehnfache erhöht werden. Obschon also die Gaskühlung schliesslich einen besseren thermischen Wirkungsgrad ergibt, kann doch ihre spezifische Leistung kaum mit der einer Flüssigkeitskühlung konkurrieren. Diese Tatsache ist wohl ein wichtiger Grund dafür, dass im Reaktoren-Entwicklungsprogramm der Vereinigten Staaten keine gasgekühlten Systeme aufgenommen sind.»

Es liegt aber auf der Hand, dass man vom Brookhaven-Reaktor nicht so sprechen sollte, als ob es ein Leistungsreaktor wäre. Tabelle 4 zeigt typische Werte für Wärmeübergänge verschiedener Reaktortypen. Der Brookhaven-Reaktor und der X-10-Reaktor in Oak Ridge sind mit dem Siedewasser-Reaktor, dem Druckwasser-Reaktor und dem Natrium-Graphit-Reaktor verglichen (Tabelle 4 a), um zu zeigen, was Dr. Weinberg mit dem oben zitierten Abschnitt sagen wollte. Ein Vergleich mit Werten von gasgekühlten Leistungsreaktoren wäre besser angebracht gewesen. Solche Werte sind am Schluss der Tabelle 4 a angegeben. Während die Wärmeübergangszahl nicht sehr hoch liegt, ist doch das Produkt aus Wärmeübergangszahl und Temperaturdifferenz, oder also die pro Flächeneinheit übertragene Wärmemenge ganz beträchtlich. Man sieht, dass der vorgeschlagene Leistungsreaktor mit Gaskreislauf [4] in dieser Tabelle einen Wärmefluss und eine spezifische Leistung aufweist, die vergleichbar sind mit allen anderen Anlagen mit Ausnahme der zuletzt vorgeschlagenen, mit Natrium gekühlten Anlage.

E. Der Entwurf von Reaktoren mit Gaskreislauf

Nachdem wir festgestellt haben, dass ein Reaktor mit Gaskreislauf sich zur Wärmeerzeugung bei hohen Temperaturen eignet, wollen wir unsere Aufmerksamkeit einigen wesentlichen Problemen zuwenden, die mit dem Entwurf einer solchen Anlage zusammenhängen.

1. Wahl des Arbeitsmediums

In einer geschlossenen Gasturbinen-Anlage, die eine nukleare Wärmequelle verwendet, ist bei der Wahl des Arbeitsmediums ein Kompromiss zwischen widersprechenden Forderungen zu schliessen. Zwei Dinge müssen betrachtet werden: die kernphysikalischen Eigenschaften des Gases und die Auswirkungen der Gaseigenschaften auf die Planung der Wärmekraftmaschine. Der Reaktor könnte zum Beispiel als ein einfacher Wärmeaustauscher betrachtet werden, in dem möglichst viel Wärme mit möglichst geringem Leistungsaufwand abgeführt werden soll. Nun stellt aber die Anwesenheit des Neutronenflusses zusätzliche Forderungen: Das Gas muss geeignete kernphysikalische Eigenschaften haben; es muss ferner thermisch und chemisch unter den Bedingungen, wie sie im Reaktor auftreten, stabil sein.

Um die Eignung des Arbeitsmittels im Hinblick auf den Leistungsaufwand zur Ueberwindung der Strömungswiderstände beurteilen zu können, stellen wir eine Beziehung zwischen diesem Leistungsaufwand und der abzuführenden

Wärme q auf. Dazu gehen wir von folgenden Gleichungen aus:

$$\text{Der Druckverlust ist: } \Delta p = f \frac{A}{A_c} \frac{G^2}{2 g_c} \frac{1}{\rho}$$

$$\text{die Wärmeübergangszahl: } h = \frac{j C_p G}{P_r^{2/3}}$$

für die abgeführte Wärme gelten die beiden Gleichungen:

$$q = w c_p dt$$

$$q = h A \Delta T_m$$

Durch Kombination dieser Gleichungen erhalten wir eine Formel für das Verhältnis der aufzuwendenden Leistung W zur abzuführenden Wärme q :

$$\frac{W}{q} = \left(\frac{R^2}{J g_c} \right) \left(\frac{q^2 T^2}{\delta t^2 \Delta T_m} \right) \left(\frac{1}{\lambda} \right) \left(\frac{1}{A_c^2 P^2} \right) \left(\frac{P_r^{2/3} M}{M c_p^3} \right)$$

Das Verhältnis W/q ist hier in Funktion einiger Grössen wiedergegeben, die mit den Konstruktions- oder Betriebsbedingungen zusammenhängen. Nur der letzte Ausdruck $P_r^{2/3} M / M c_p^3$ hängt von der Wahl des Arbeitsmittels ab. Untersuchen wir nun einige Gase auf ihre Eignung!

Luft wird in einer Anzahl von Reaktoren schon als Kühlmittel verwendet. Luft ist auch das Arbeitsmittel in allen bis heute gebauten geschlossenen Gasturbinenanlagen. Aber Luft ist ungeeignet für Kernenergieanlagen mit geschlossenem Kreislauf wegen der Aktivierung des Argons.

Mit **Kohlendioxid** arbeitet der französische Reaktor in Saclay. Auch die britische Anlage in Calder Hall wird mit Kohlendioxid als Reaktorkühlmittel betrieben. Es hat relativ gute Wärmeübergangseigenschaften, einen kleinen Einfangsquerschnitt für Neutronen und ist bei nicht allzu hohen Temperaturen chemisch inaktiv. Unglücklicherweise wirkt es aber bei hohen Temperaturen oxydierend auf Graphit unter Bildung von Kohlenmonoxyd. Der Neutronenfluss beschleunigt diesen Effekt und löst ihn schon bei tieferen Temperaturen aus. Dies ist von grösster Bedeutung in graphitmoderierten Reaktoren, in denen die Oxydation von nur einigen Prozent des Graphits die mechanischen Eigenschaften im Sinne einer Herabsetzung des Elastizitätsmoduls und der Bruchgrenze merklich beeinflusst. Darüber hinaus sind Anzeichen da, dass ein Massentransport des Kohlenstoffes von Stellen höherer Temperatur nach solchen tieferer Temperatur eintritt. Daher kann Kohlendioxid nicht als Kühlmittel für graphitmoderierte Reaktoren verwendet werden, es sei denn, der Graphit werde verkleidet. Dadurch würden aber die Kosten des Reaktors wesentlich höher ausfallen. Diese Einwände gegen Kohlendioxid bestehen für Reaktoren nicht mehr, die zum Beispiel mit Berylliumoxyd modifiziert sind.

Mit **Kohlendioxid** wurde im Turbomaschinenbau schon seit Jahren gearbeitet; es stellt in dieser Hinsicht keine neuen Probleme. Da es ein hohes Molekulargewicht besitzt, ist es nicht schwierig abzudichten.

Stickstoff ist im französischen Versuchsreaktor in Saclay auch schon als Kühlmittel verwendet worden. Leider sind uns wenig spezifische Daten zugänglich über die französischen Erfahrungen mit diesem Gas. Es ist heute noch ungewiss (und es besteht offenbar noch keine Übereinstimmung bei den Fachleuten), ob Stickstoff unter Reaktorbedingungen Nitrierung von rostfreiem Stahl verursacht. Dies ist sehr wichtig im Falle von metallisch verkleideten Brennstoffelementen, da die Verkleidung normalerweise sehr dünn ist und Nitrierung die Gefahr von Rissbildungen erhöht. Durch Risse würden die Spaltprodukte austreten, was unbedingt zu vermeiden ist. Stickstoff hat noch nie in einer geschlossenen Gasturbinenanlage als Arbeitsmedium gedient. Da aber die Luft zum grössten Teil aus Stickstoff besteht, sind die Ingenieur-Probleme zur Verwirklichung des Kreislaufes dieselben wie bei Luft. Und hier steht eine grosse Fülle von Erfahrungen zur Verfügung.

Tabelle 4. Gaseigenschaften bei 440° C / 1120° C

	Luft	N ₂	CO ₂	He
Molekulargewicht M	28,97	28,01	44,01	4,00
Gaskonstante R mkg/kg °C	29,27	30,28	19,26	157,0
Molare spezifische Wärme kcal/kmol °C	6,95/7,55	6,96/7,48	8,95/12,20	5,00/5,00
Spezifische Wärme kcal/kg °C	0,240/0,261	0,246/0,267	0,204/0,278	1,25/1,25
Verhältnis der spez. Wärmen $c_p/c_v = \kappa$	1,40/1,36	1,40/1,36	1,29/1,19	1,658/1,658
$\kappa/(\kappa - 1)$	3,50/3,81	3,50/3,77	4,52/6,16	2,52/2,52
Wärmeleitfähigkeit k kcal/h m °C	0,0232/0,052	0,025/0,045	0,012/0,043	0,129/0,22
Zähigkeit μ 10 ⁻³ poise	0,188/0,359	0,182/0,343	0,157/0,335	0,205/0,380
Prandtl'sche Kennzahl Pr	0,704/0,652	0,670/0,730	0,770/0,716	0,695/0,750
Schallgeschwindigkeit σ_a (pro Molekül) in Barn (10 ⁻²⁴ cm ²)	351/550	356/561	254/419	1027/1637
Kompressionsleistungs-Modul	2,79	3,4	0,0034	0
	0,0685/0,0461	0,0635/0,0492	0,0513/0,0195	0,0251/0,0265

Tabelle 4a. Wärmeabgabe-Eigenschaften verschiedener Reaktoren

	Wärmeleistung pro Volumeneinheit kW/m ³	Spezifische Leistung pro kg U ²³⁵ kW/kg	Leistung pro kg Uran kW/kg	Wärmefluss Maximalwerte kW/m ³
Oak Ridge National Laboratory X-10 Reaktor	54	11,1	0,087	23,05
Brookhaven BGRR	34	70	0,61	65,44
Siedewasser-Reaktor EBWR	710	1050	4,4	473,5
Druckwasser-Materialprüfungs-Reaktor MTR	8300	10 000	11 000	928,2
Druckwasser-Reaktor PWR	—	—	—	1206
Natrium-Graphit-Reaktor SGR	180	565	10	1105
Gasturbinen-Reaktor	~ 900	~ 1500	~ 75	~ 1263

Tabelle 5. Vergleich von verschiedenen Gasen und Gasmischungen, die für die Verwendung als Arbeitsgas in einer geschlossenen Gasturbinenanlage geeignet sind (nach Prof. Dr. J. Ackereit)

Gas oder Gasmischung	Luft	He/CO ₂	He/CO ₂	He
Volumen % CO ₂	—	10	5	0
Molekulargewicht	29	8	6	4
Spezifische Wärme kcal/kg °C	0,26	0,755	0,90	1,25
Verhältnis der Schallgeschwindigkeit zu derjenigen von Luft	1	2,1:1	2,4:1	3:1
Adiabatische Druckverhältnisse für gleiche Temperaturverhältnisse	4:1	2,92:1	2,71:1	2,52:1
Verhältnis der Stufenzahlen für konstante Höchstgeschwindigkeit	1	2,8:1	3,5:1	4,8:1
Verhältnis der Wärmeübertragungsflächen	1	0,54:1	0,47:1	0,30:1

Helium ist meines Wissens noch nie als Reaktorkühlmittel verwendet worden, obschon es für den Hanford-Reaktor in Betracht gezogen wurde. Seine Eignung steht ausser Frage, da es ein Edelgas mit Neutronen-Einfangsquerschnitt 0 ist. Es wurde nie als Arbeitsmedium für eine geschlossene Gasturbinenanlage verwendet, jedoch wurden detaillierte Studien für Helium-Turbinenanlagen gemacht. Sein niedriges Molekulargewicht wird einige Dichtungsprobleme aufwerfen.

Die Eigenschaften von Helium und Kohlendioxyd sind derart, dass eine Mischung der beiden Gase interessant sein könnte. Dies wurde von Prof. J. Ackeret am Anfang der vierziger Jahre untersucht. Tabelle 5 zeigt einen Vergleich von Luft und Helium mit zwei Mischungen von Helium und CO_2 . Man sieht, dass eine Zugabe von nur 10 % CO_2 zu Helium die benötigte Stufenzahl um fast auf die Hälfte gegenüber reinem Helium vermindert. Gleichzeitig erlaubt diese Zugabe eine Reduktion der benötigten Wärmeübertragungsfläche gegenüber einer Luftanlage ebenfalls auf rund die Hälfte.

Die Eigenschaften eines Kühlmittels, welche den Aufbau des Reaktors beeinflussen, sind die Wirkungsquerschnitte für Streuung und für Absorption; der erste beeinflusst das Abbremsen der Neutronen und der zweite den Neutronenverlust durch Absorption. Normalerweise ist in einem Reaktor die Anzahl Gasmoleküle pro Volumeneinheit äusserst gering; daher fällt der Anteil des Arbeitsgases am Abbremsen der Neutronen nicht in Betracht. Darum beschränken sich die kernphysikalischen Betrachtungen eines Arbeitsgases auf den Wirkungsquerschnitt für Absorption. Dieser ist aus zwei Gründen wichtig, nämlich erstens für die Multiplikationskonstante des Reaktors und zweitens für die Intensität der Aktivierung des Arbeitsmediums. In einem Breeder-Reaktor ist der erste Umstand ausschlaggebend; Helium kann in diesem Fall als ideal betrachtet werden, da es das einzige Gas ist, das keinen parasitischen Neutroneneinfang verursacht. In allen übrigen Fällen wird jedoch der zweite Umstand, die Aktivierung des Arbeitsmediums, in erster Linie berücksichtigt werden müssen.

Die Frage der Aktivierung des Arbeitsmediums ist von Wichtigkeit, da die Aktivität die Dimensionierung der Abschirmung beeinflusst und die Zugänglichkeit zu den Anlageteilen zu Wartungszwecken beeinträchtigt. Die Aktivität hat verschiedene Ursachen, nämlich: 1. Neutronenreaktionen mit dem Gas; 2. Neutronenreaktionen mit Verunreinigungen im Gas; 3. Neutronenreaktionen fester Teilchen im Gas, wie sie sich bei Erosion ergeben; 4. Gasförmige Spaltprodukte, die aus den Brennstoffelementen herausdiffundieren.

Nur die Ursachen 1 und 2 sind in Rechnung zu ziehen. Im Laufe der Studien sind verschiedene Gase als Arbeitsmittel betrachtet worden. Man fand, dass mit Ausnahme des Argons in der Luft keine beträchtliche Aktivität entstehen würde bei Anwendung von Gasen wie Luft oder ihre Komponenten, Kohlendioxyd, Wasserstoff, die tieferen aliphatischen Kohlenwasserstoffe usw.

Bei der Betrachtung von Luft als Arbeitsmittel erfährt das Argon, das zu ungefähr 1 % vertreten ist, eine n - γ -Reaktion und es entsteht A^{41} , das innerhalb relativ kurzen Betriebszeiten auf ein beträchtliches Niveau ansteigen kann. Dies wird eine Abschirmung der Anlage bedingen und könnte die Zeit beträchtlich verlängern, die nach dem Abstellen bis zum Betreten der Anlage zwecks Wartung abgewartet werden muss. Aus diesem Grund kann Luft als Arbeitsmedium für eine solche Anlage nicht in Betracht fallen.

Sehr reiner Stickstoff ist ein annehmbares Arbeitsmittel. Er kann auf mehrere Arten mit einer Reinheit von 99,99 % erhalten werden. Seine Verunreinigungen sind alsdann A weniger als 0,05 %, O_2 weniger als 0,02 %, H_2O weniger als 0,001 %, übrige Stoffe weniger als 0,01 %.

Es gibt zwei Reaktionen mit Stickstoff, $\text{N}^{14} (np) \text{C}^{14}$ und $\text{N}^{15} (n\gamma) \text{N}^{16}$. Die erste produziert C^{14} von 5570 Jahren Halbwertszeit, das keine γ -Strahlung aussendet und ein weicher β -Strahler ist. Bei ihr stellen sich keine Abschirmungsprobleme. Solchen ist erst Rechnung zu tragen, wenn das Gas das System verlässt. Die Aktivität von 7,35 sec N^{16} kann unberücksichtigt bleiben wegen des kleinen Isotopenanteils, auch wegen des kleinen Absorptionsquerschnittes von N^{15} , und weil der relativ schnelle Zerfall das Gleichgewicht nach wenigen Halbwertszeiten zu erreichen erlaubt.

Man sieht daraus, dass Stickstoff ein befriedigendes Arbeitsmittel für eine Kernanlage mit geschlossenem Gasturbinenkreislauf darstellt. Es ist nicht ein ideales Arbeitsmittel, jedoch wurde bis heute noch kein besseres gefunden. Andere Gase und Gasgemische, die in bestimmten Hinsichten dem Stickstoff überlegen sind, können erst empfohlen werden, wenn noch weitere Entwicklungsarbeiten gemacht sein werden.

2. Die Auswahl der Reaktormaterialien

Wie bei der Wahl der Arbeitsmittel gibt es auch spezielle Probleme bei der Wahl der anderen Reaktorkomponenten wie Brennstoff, Moderator, Kontrollstäbe usw.

a) Brennstoff-Materialien

Die Wahl der Materialien für Brennstoffelemente verlangt eine sorgfältige Betrachtung aller Anforderungen und die Anwendung vernünftiger Kompromisse. Das erste Kriterium ist der Neutronenhaushalt; weitere Kriterien sind: gute Warmfestigkeiten, gute Wärmeleitfähigkeiten, Widerstandsfähigkeit gegen Temperatursprünge und Dichtheit (keine Porosität). Die Baustoffe sollen ferner widerstandsfähig sein gegen Strahlungsschäden, und sie müssen eine chemische Aufbereitung der verbrauchten Brennstoffelemente zulassen. Weitere Faktoren sind die Beschaffungsmöglichkeit und der Preis der Rohmaterialien. Schliesslich müssen die Materialien zu den gewünschten Formen verarbeitet werden können.

Die drei bekannten spaltbaren Stoffe sind U^{233} , U^{235} und Pu^{239} . Die jetzige Diskussion ist beschränkt auf U^{235} , da dieses Isotop der einzige Brennstoff ist, der in der Natur vorkommt, und zwar zu 0,7 % im Urangehalt von Erzen.

Uran hat drei temperaturabhängige Kristallformen, die α , β und γ genannt werden. Bei Raumtemperatur ist der α -Zustand stabil. Die Umwandlung in β tritt bei 662 °C ein und diejenige in γ bei 720 °C. Eine andere störende Eigenschaft ist seine Anisotropie: Seine Eigenschaften sind in den drei kristallographischen Richtungen verschieden. Zum Beispiel ist der lineare Ausdehnungskoeffizient in zwei Richtungen positiv und in der dritten negativ. So kann es sich mit steigender Temperatur in einer Richtung ausdehnen und in einer anderen zusammenziehen. Diese Eigenschaft, zusammen mit den Dimensionsänderungen, die beim α - β -Übergang auftreten, machen es ziemlich schwierig, ein Brennstoffelement aufzubauen, das bei höheren Temperaturen seine Form beibehält. Wärmefluss und Strahlungsschäden tragen noch das ihre bei zur Deformation von Brennstoffelementen. Der tiefe Schmelzpunkt und die geringe Warmfestigkeit des Urans sind zusätzliche Nachteile. Wenn man daran denkt, dass die Aufgabe des Urans in einem Kernreaktor in der Erzeugung und Abgabe von grossen Wärmemengen bei erhöhter Temperatur besteht, werden seine Eigenschaften unweigerlich als sehr nachteilig empfunden.

Wegen den schlechten Eigenschaften des Urans bei hohen Temperaturen müssen Brennstoffelemente in Reaktoren, die bei höheren Temperaturen arbeiten, aus Legierungen oder Verbindungen von Uran bestehen. Glücklicherweise haben die meisten Metalle mit guten Hochtemperatur-Eigenschaften kleine Absorptions-Wirkungsquerschnitte. Ausnahmen sind Kobalt mit einem Wirkungsquerschnitt von 60 barns und Nickel mit einem solchen von durchschnittlich $4\frac{1}{2}$ barns ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$). Von den Legierungen mit kleinen Wirkungsquerschnitten sind bei Uran-Chrom, Uran-Molybdän und Uran-Niobium die besten Hochtemperatur-Eigenschaften zu erwarten.

Die Stabilität und die Hochtemperatur-Eigenschaften von Brennstoffelementen können beträchtlich verbessert werden, wenn ihnen Uran in Form von Keramiken beigegeben wird. Ja, es kann sogar das ganze Brennstoffelement aus Keramik bestehen. Die Oxyde, Karbide, Nitride, Boride und Silizide werden gewöhnlich als keramische Materialien bezeichnet. In Tabelle 6 sind einige dieser Materialien mit ihren Eigenschaften angegeben [5]. Die dort aufgeführten Zahlen für die Dichte sind die theoretischen Werte. Einige dieser Materialien können fast mit theoretischer Dichte hergestellt werden, die meisten mit mindestens 95 % dieser Werte. Die angeführten Schmelzpunkte sind nicht unbedingt massgebend für die Eignung bei hohen Temperaturen. Einige Materialien verlieren die Festigkeit, werden plastisch, reagieren mit ihrer Um-

Tabelle 6. Eigenschaften von keramischen Materialien

Material	Schmelzpunkt °C	Dichte gr/cm ³	Absorptions- Wirkungs- querschnitt cm ² /cm ³	Wärmeleitzahl cal/cm °C sec	Lin. Wärme- ausdehnungs- koeffizient 10 ⁻⁶ /°C	Elastizitätsmodul 10 ⁶ kg/cm ²	Spezifische Wärme cal/gr °C
Beryllia, BeO	2530	2,86	0,00074	0,500 (100° C) 0,107 (600° C) 0,039 (1200° C)	8 (100° C) 8 (500° C) 9 (1000° C)	3,16 (20° C) 1,97 (800° C) 0,84 (1400° C)	0,24 (20° C) 0,50 (500° C)
Thoria, ThO ₂	3220	9,6	0,160	0,020 (100° C) 0,008 (600° C) 0,0076 (1200° C)	8 (100° C) 9 (500° C) 9 (1000° C)	1,48 (20° C) 1,27 (800° C) 0,98 (1400° C)	0,58 (50° C)
Urania, UO ₂	2878	10,02	0,165	0,018 (100° C) 0,008 (600° C) 0,006 (1000° C)	11,2 (27÷1260° C)	1,76 (20° C)	0,56 (17° C)
Silikonkarbid, SiC	2200	3,2 (theor.)	0,00647	0,049 (600° C) Rekristallisiert	4,7 (20÷1500° C)	—	0,143 (0° C)
Urankarbid, UC	2400	11,28 (theor.)	0,192	0,082 (20° C) (für Dichte 10,0 g/cm ³)	—	—	0,035 (100° C)
Molybdän-Disilicid MoSi ₂	1870	6,2	0,0653	0,75 (20° C÷200° C)	—	—	—
Uran-Disilicid USi ₂	1700	—8,98 (theor.) —9,25 (theor.) hohe Temp.	0,141	—	—	—	—
Graphit, C	3700	1,55	0,000350	0,298 (100° C) 0,154 (600° C) 0,105 (1000° C)	3,34 (25÷1800° C)	0,07 (20° C)	~ 0,03 (20° C)
Silizium-Si	1400	3,10	0,00659	0,50 (50° C) 0,06 (1000° C)	4,2 (20° C)	2,52 (20° C)	0,228 (400° C) 0,252 (700° C) 0,267 (1000° C)

gebung oder sind instabil bei Temperaturen, die viel tiefer liegen als der Schmelzpunkt. Ein mehr charakteristischer Wert ist die höchstzulässige Betriebstemperatur, die von den Betriebsbedingungen abhängen wird.

Die Wärmeleitfähigkeit von Keramik sinkt mit steigender Temperatur oft mehr als bei Metall. So ändert sie sich z. B. bei BeO um einen Faktor 10 zwischen 20° C und 1000° C. Aenderungen um Faktoren von 2 bis 5 in diesem Temperaturbereich sind nichts Aussergewöhnliches. Immerhin weisen viele keramischen Materialien höhere Wärmeleitfähigkeiten bei 1000° C auf als Legierungen, wie zum Beispiel rostfreie Stähle.

Während die Zugfestigkeit von Keramik bei tieferen Temperaturen relativ gering ist, behält sie doch brauchbare Werte für hohe Temperaturen bei. Eine Anzahl von keramischen Materialien, wie Graphit, SiC und einige Oxyde, steigern ihre Festigkeit mit steigender Temperatur. Weil diese Materialien spröde sind, brechen sie bei Zugbeanspruchung mit Bruchstellen, die von äusseren oder inneren Oberflächen ausgehen. Daher sind sie empfindlich auf Oberflächenfehler, Risse und örtliche Spannungsspitzen.

Eine wesentliche Forderung für Baustoffe von Brennstoffelementen ist zu erfüllen: Sie müssen dem Bombardement von Kernteilchen unter Betriebsbedingung standhalten. Während wenig Angaben über keramische Baustoffe existieren, die Schädigungen durch Spaltprodukte erleiden, so gibt es doch viele Studien über Beschädigung durch Neutronenfluss [6]. Ausserdem findet man noch einige Mitteilungen über die Fähigkeit von Keramik, Spaltprodukte bei hohen Temperaturen zurückzuhalten.

Vorübergehende oder bleibende Schäden können bei Reaktormaterialien eintreten durch Einwirkung von Spaltprodukten, schnellen und langsamen Neutronen und zu einem kleineren Teil durch γ -Strahlen und β -Teilchen, die das Kristallgitter mit hoher Geschwindigkeit durchqueren. Es ergeben sich daraus Umlagerungen und Anregungen, die die Materialeigenschaften beeinflussen. Unterbrüche im Gitter korrigieren sich wieder je nach der Diffusion, der Kompaktheit des Gitteraufbaues, der Natur des Kristallgitters und der Art von Gittereinschlüssen. Ein solches Ausheilen des Gitters vollzieht sich bei keramischen Baustoffen und tiefen Temperaturen im allgemeinen weniger gut als bei Metallen; dagegen erholen sich keramische Erzeugnisse bei höheren Temperaturen, wo sie ja mit Vorteil anwendbar sind, leichter.

In keramischen Brennstoffelementen erzeugte Spaltprodukte werden vielleicht bei hohen Temperaturen diffundieren. Es ist zu erwarten, dass flüchtige Isotope wie Xe, I, Te, Kr und andere leicht diffundieren, speziell entlang der Korngrenzen. Man hat festgestellt, dass dicht verkleidete Brennstoffelemente von Sandwich-Bauart ebenso wie rostfreier Stahl bei hohen Temperaturen in 24 Stunden ungefähr 99,9 % der flüchtigen Spaltprodukte zurückhalten, während unverkleidete nur 90 bis 99 %.

In Tabelle 7 sind einige keramische Materialien angegeben, die einen mikroskopischen Wirkungsquerschnitt für Absorption von weniger als 0,5 barns aufweisen und Brennstoff enthalten sowie auch Materialien, die sich durch Neutroneneinfang in spaltbare Stoffe umwandeln. Diese Materialien eignen sich für den Aufbau von Brennstoffelementen in Hochtemperatur-Reaktoren.

Im allgemeinen haben die Oxyde mit Ausnahme von BeO relativ kleine Wärmeleitfähigkeiten, so dass ihre Verwendung für Reaktoren kleiner Leistung etwas begrenzt ist, es sei denn, sie seien in anderen Materialien enthalten. Die Karbide lassen sich nur schwer mit maximaler Dichte herstellen, so dass sie gewöhnlich porös sind. Relativ wenig weiss man über die Herstellung von Siliziden, obschon Molybdändisilizid vom NACA untersucht worden ist [8].

Sofern es der Neutronenhaushalt gestattet, kommen einige sogenannte «Cermets» als Brennstoffelemente in Frage wie Cr-Al₂O₃, TiC-Ni und ZrC-Fe. Von besonderem Interesse ist SiC-Si, welches einen Wirkungsquerschnitt von etwa 0,1 barns hat, bei 1000° C eine höhere Wärmeleitfähigkeit aufweist als rostfreier Stahl und sich ausserdem durch andere erwünschte

Tabelle 7. Keramische Materialien mit einem Wirkungsquerschnitt kleiner als $0,5 \cdot 10^{-24}$ cm², sowie Brennstoff- und Breeder-Material

Oxyde	Karbide	Silizide
Al ₂ O ₃	Be ₂ C	ZrSi ₂
BeO	ZrC	(MoSi ₂)
MgO	(Graphit)	Si
SiO ₂	—	—
ZrO ₂	—	—
UO ₂	UC	USi ₂
U ₃ O ₈	UC ₂	USi ₃
ThO ₂	—	ThSi ₂

Tabelle 8. Flüssige Metalle für Verwendung als Kühlmittel oder als Brennstoffträger

Metall	Wirkungs- querschnitt 10 ⁻²⁴ cm ² /Atom	Schmelz- punkt °C	Kosten \$/kg
Bi	0,032	271	4,96
Li ⁷	0,033	186	sehr hoch
Mg	0,059	650	0,71
Pb	0,170	327	0,33
Al	0,215	660	0,55
Na	0,49	97	0,44
Sn	0,65	232	2,12
Zn	1,06	419	0,29
K	1,97	63	0,33
Hg ²⁰⁰	60	—39	sehr hoch
Li (natürliches)	70	186	24,26
Hg (natürliches)	380	—39	9,26

physikalische Eigenschaften auszeichnet. Aus diesem Material können sehr homogene und nicht poröse Teile mit relativ einfachen Hilfsmitteln hergestellt werden.

Eine andere Möglichkeit, den Brennstoff in den Reaktor einzubringen, besteht darin, ihn in Flüssigkeiten aufzulösen oder in Flüssigkeiten oder Gasen zu suspendieren. Die Brennstoffe enthaltende Flüssigkeit kann dann entweder ruhend sein, oder durch einen äusseren Wärmeaustauscher geleitet werden. Von einem solchen Brennstoffträger sind folgende Eigenschaften zu wünschen: 1. tiefer Schmelzpunkt, 2. hoher Siedepunkt (d. h. tiefer Dampfdruck), 3. kleiner Wirkungsquerschnitt für Absorption, 4. Strahlungsbeständigkeit, 5. hohes Lösungsvermögen für Brennstoff und 6. geringes Lösungsvermögen für alle anderen Reaktormaterialien.

Es ist schwierig, einen Stoff zu finden, der allen diesen Bedingungen genügt. Für höhere Reaktortemperaturen ist die Wahl beschränkt auf flüssige Metalle, geschmolzene Salze und auf Gase, in denen die Brennstoffteilchen suspendiert sind.

Reaktoren mit flüssigem Brennstoff lassen folgende Vorteile erwarten: 1. kleine Herstellungskosten für Brennstoffelemente, 2. keine parasitischen Neutroneneinfänge in der Brennstoffverkleidung, 3. Vereinfachung der Wärmeübertragungsprobleme im Reaktorkern, 4. Ausschalten von gasförmigen Spaltprodukten und 5. Verringerung des Reservebrennstoffes für Brennstoff-Aufbereitung. Diesen Vorteilen steht die Schwierigkeit gegenüber, einen Brennstoffträger zu finden, der genug spaltbares Material löst und sich doch den anderen Reaktorteilen gegenüber inaktiv verhält. Der Massentransport als eine Art der Korrosion ist besonders bei Systemen mit geschmolzenen Salzen und flüssigen Metallen unangenehm.

Der Hauptvorteil der geschmolzenen Salze gegenüber anderen flüssigen Brennstoffen sind die niederen Dampfdrücke bei hohen Temperaturen und ihre Fähigkeit, grosse Mengen Brennstoff aufnehmen zu können. Die meisten Salze haben einen hohen Schmelzpunkt, was den Anlauf des Reaktors schwierig macht. Hydroxyde und Fluoride von Na, Li und Be wurden wegen ihrer guten kernphysikalischen Eigenschaften auch schon in Betracht gezogen [9]. Ihre Wärmeübertragungseigenschaften sind jedoch nicht so gut wie bei flüssigen Metallen. Im allgemeinen sind diese Salze ziemlich korrosiv über 500° C; sie können aber bei tieferen Temperaturen langfristig eingefüllt bleiben.

Tabelle 9. Moderatormaterialien

	Wasser	Schweres Wasser	Beryllium	BeO	Graphit
Atom- bzw. Molekulargewicht	18,0	20,0	9,0	25,0	12,0
Dichte gr/cm ³	1,00	1,10	1,84	2,80	1,62
Σ_s cm ⁻¹ (überthermisch)	1,64	0,35	0,74	0,66	0,39
Σ_a cm ⁻¹ (thermisch)	0,022	0,085 · 10 ⁻³	0,0011	0,62 · 10 ⁻³	0,37 · 10 ⁻³
$\xi = 2/(A + \frac{1}{2})$	0,93	0,51	0,206	0,17	0,158
$\xi \Sigma_s$ (SDP)	1,5	0,18	0,16	0,11	0,063
$\xi \Sigma_s / \Sigma_a$ (MR)	70	21 000	150	180	170
Diffusionskonstante, cm	0,18	0,85	0,61	0,56	0,92
Diffusionslänge, L cm	2,88	100	23,6	30	50
«Fermi Age» τ cm ²	33	120	98	110	350
Migrationslänge M cm	6,4	101	26	32	54

Flüssige Metalle als Brennstoffträger haben den Vorteil höherer Wärme- und Strahlungs-Widerstandsfähigkeit, eines höheren Wärmeleitvermögens und grösserer spezifischer Wärme. Metalle mit tiefem Schmelzpunkt und kleinem Absorptions-Querschnitt sind Blei, Zinn, Wismuth und Zink. Tabelle 8 zeigt einige Eigenschaften einer Auswahl von Metallen. Uran bildet mit Wismuth eine einphasige Lösung bis zu Konzentrationen von 4 % Uran. In Blei, Blei-Wismuth und Blei-Wismuth-Zinn geht Uran intermetallische Verbindungen ein, die bei Reaktor-Betriebstemperaturen wenig Löslichkeit in Trägern aus flüssigem Metall haben. Einphasige Lösungen sind den Suspensionen vorzuziehen; diese bringen Probleme der Ablagerung, der Aussonderung, der Erosion und der Kontrolle der Teilchengrösse mit sich.

Das grösste Problem bei der Anwendung von flüssigen Metallen ist die Korrosivität der Flüssigkeit. Versuche in Brookhaven zeigen, dass Stähle mit 2,25 % Chrom, 1 % Molybdän und solche mit 5 % und 1,5 % Silizium die widerstandsfähigsten sind. Kleine Beigaben von Magnesium und Zirkon scheinen für die Korrosionsverhütung vielversprechend zu sein. Thorium-Suspensionen wurden vorgeschlagen als Element in einem Breeder-Reaktor (Umwandlung von Th²³² in das spaltbare U²³³).

b) Moderator-Materialien

Die Auswahl der Materialien, die für die Verwendung als Moderator verfügbar sind, ist durch die kernphysikalischen Anforderungen eng begrenzt. Der Moderator ist im Reaktor hauptsächlich zum Abbremsen der Neutronen auf thermische Energien vorhanden. Dies wird am besten durch leichte Elemente erreicht wie leichter und schwerer Wasserstoff und seine Verbindungen, Beryllium und seine Verbindungen und Kohlenstoff. Die Eigenschaften einiger Moderatormaterialien sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

Die Moderatorfähigkeit eines Materials verbessert sich mit zunehmendem Wirkungsquerschnitt für Streuung und grösserem Energieverlust. Gute Moderatoren haben grosse Abbremsfähigkeit. Ein gutes Kriterium für die Wahl des Moderators ist das sogenannte «Fermi Age» τ (eine Grösse der Reaktorthorie), das zusammen mit der geometrischen Form des Reaktors den Verlust von schnellen Neutronen durch die Reaktor-Oberfläche in hohem Masse beeinflusst und dadurch bestimmt, ob ein Reaktor kritisch wird oder nicht. In erster Annäherung kann man sagen, dass der kritische Durchmesser eines Reaktors proportional der Quadratwurzel aus dem «Fermi-Age» ist. Hieraus ergibt sich z. B., dass ein Reaktor, der mit Berylliumoxyd moderiert ist, etwa 60 % der Grösse eines graphitmoderierten Reaktors bei gleichem Neutronenverlust durch die Oberfläche aufweist.

Es ist wichtig, zu bemerken, dass τ mit zunehmender Anzahl Atome pro cm³ des Moderators abnimmt. Man muss also nicht nur passende Elemente auswählen, sondern man muss sie im Rahmen der Kosten so verarbeiten, dass sie möglichst hohe Dichte sowie hohe Temperatur- und Strahlungsbeständigkeit aufweisen.

Wasser, der gewöhnlichste der Wasserstoffmoderatoren, ist bestechend wegen seinen niederen Kosten und den vorzüglichen kernphysikalischen Eigenschaften. Jedoch kommt es für Reaktoren, die mit hohen Temperaturen arbeiten müssen, nicht in Frage wegen seines hohen Dampfdruckes und der Unbeständigkeit gegen Strahlungseinflüsse.

Es wurden auch schon andere Materialien mit Wasserstoff als Moderatoren in Betracht gezogen. Ein Reaktor wurde geplant und Versuche sind im Gang, in welchem ein organischer Stoff mit hohem Wasserstoffgehalt zur Anwendung kommen soll. Im allgemeinen sind diese Stoffe nicht vielversprechend, weil sie durch Temperatur- und Strahlungseinflüsse zersetzt werden. Neuerdings wurden feste Metallhydride [11] vorgeschlagen. Von diesen sieht Zirkonhydrid vielversprechend aus. Nach dem Fermi-age beurteilt, brauchte ein Re-

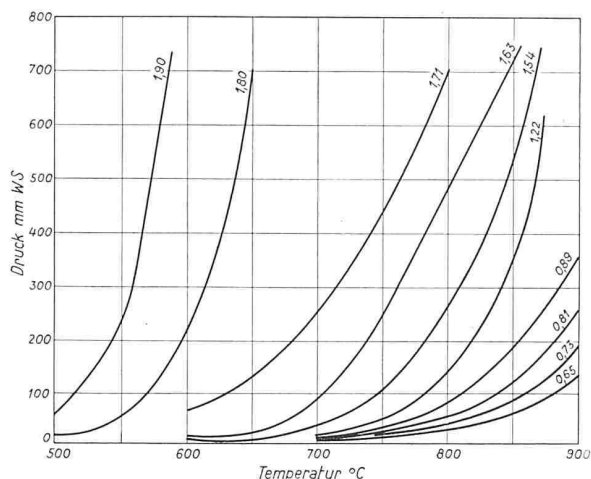


Bild 4. Dissoziationsdruck von Zirkoniumhydriden ZrH . Die Zahlen geben den Hydrierungsgrad an; die Zahl 1,80 z. B. bedeutet, dass im Mittel 1,8 Wasserstoffatome pro 1 Atom Zr hydriert sind

aktor, der mit Zirkonhydrid modifiziert ist, nur 40 % der Grösse eines Graphitreaktors. Der Dissoziationsdruck von Zirkonhydrid ist vom Wasserstoffgehalt des festen Stoffes stark abhängig. In Bild 4 ist der Gleichgewichts-Dissoziationsdruck in Funktion der Temperatur für einige Zirkon-Wasserstoff-Verhältnisse aufgezeichnet. Wie ersichtlich, nimmt die Temperaturbeständigkeit der Verbindung mit steigendem Wasserstoffgehalt ab. Wenn man diese Materialien in Reaktoren anwenden will, so ist es notwendig, einen Kompromiss zwischen höchstem Wasserstoffgehalt in der Volumeneinheit und der erforderlichen Temperaturbeständigkeit zu schliessen.

Beryllium und Berylliumoxyd sind vorzügliche Moderatorstoffe mit vielen technischen Vorteilen. Berylliumoxyd ist ziemlich stabil und chemisch inaktiv gegenüber den meisten Stoffen mit Ausnahme von Wasserdampf von hoher Temperatur. Leider ist es spröde und weist eine niedere Wärmeleitfähigkeit auf.

Graphit, der als Moderator sehr verbreitet ist, hat einige vorzügliche Eigenschaften. Die Wärmeleitfähigkeit ist so gut wie bei vielen Metallen; auch sind die Festigkeit, die Widerstandsfähigkeit gegen Temperaturschwankungen bei hohen Temperaturen, sowie die Bearbeitbarkeit gut; der Preis ist niedrig. Graphit ist jedoch empfindlich für Strahlungsschäden bei tiefen Temperaturen, aber diese werden wieder rückgängig gemacht bei den höheren Temperaturen, die uns hier interessieren. Bemerkenswerterweise nimmt die Festigkeit des Graphits mit steigender Temperatur bis 2500 °C zu. Nachteilig sind seine Empfindlichkeit gegen Oxydation und sein ziemlich grosser τ -Wert («Fermi-age»).

c) Materialien für die Regulierung

Regulievorrichtungen sollen grosse Reaktivitätsänderungen bei kleinem Volumenaufwand ergeben. Das übliche Reguliermaterial ist Bor, das in Stahl oder in Form von Keramik angewendet wird. Um in kleinen Reaktoren Raum einzusparen, verwendet man das Isotop Bor -10 mit dem grösseren Wirkungsquerschnitt. Die Isotopentrennung ergibt etwa einen viermal höheren Preis gegenüber natürlichem Bor. Cadmium hat als Reguliermaterial den Nachteil eines niederen Schmelzpunktes (332 °C). Auch sind die Änderungen des Wirkungsquerschnittes in Funktion der Energie unerwünscht, durch die es für Neutronen eines gewissen Energiegebietes wirkungslos wird. Es gibt noch weniger bekannte Materialien mit hohem Absorptions-Wirkungsquerschnitt, wie zum Beispiel die seltenen Erden Samarium und Gadolinium, die einen Wirkungsquerschnitt von 6500 bzw. 44 000 barns pro Atom haben, aber sich nicht als so vorteilhaft erwiesen wie Bor. Erwähnenswert ist, dass stets grössere Mengen Hafnium als Nebenprodukt der Zirkonproduktion erhältlich werden.

Wir haben bisher nur über Reaktor-Baustoffe gesprochen. Das genügt nicht. Die Einzelteile müssen als ein Ganzes funktionieren. Die Brennstoffelemente, wie auch der Moderator, müssen gehalten, die Regulieranordnungen betätigt werden. Der Wärmeträger muss durch Rohre, Ventile und

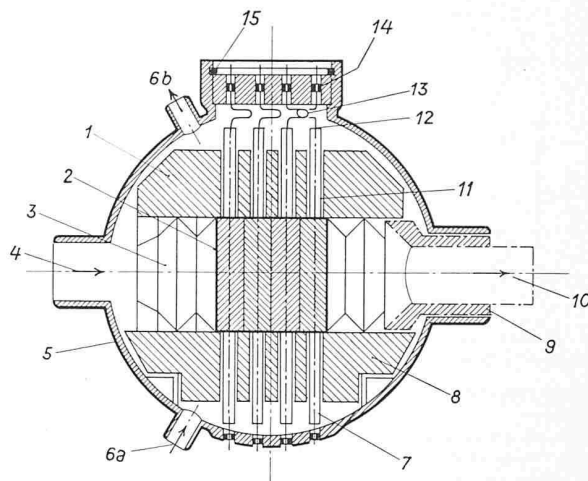
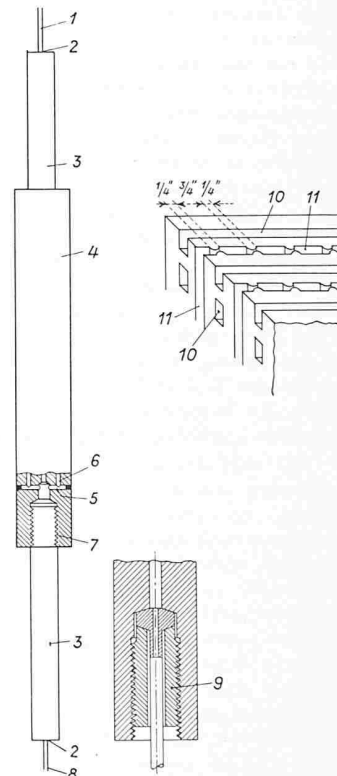


Bild 5. Vertikalschnitt durch einen kugelförmigen Reaktor für flüssigen Brennstoff

- | | |
|--|---|
| 1 Oberer Graphitreflektor | schlussrohre für die Brennstoffelemente aus Graphit |
| 2 Reaktorkern (Würfel von 1524 mm Kantenlänge) | 8 Unterer Graphitreflektor |
| 3 Schikanen zur Verteilung des eintretenden Gases auf die horizontalen Kanäle des Reaktorkerns | 9 innen angebrachte Wärmeisolierung |
| 4 Gaseintritt vom Wärmeaustauscher | 10 Gasaustritt zur Turbine |
| 5 Kugelschale von 4267 mm Innendurchmesser und 95 mm Wandstärke | 12 Verbindung der Stahlrohre mit den Anschlussrohren 11 aus Graphit |
| 6a, 6b Eintritt und Austritt des Mediums zur Kühlung der Reflektoren | 13 Stahlrohre mit Schleifen zum Kompensieren der Wärme-dehnungen |
| 7, 11 untere und obere An- | 14 Halteringe für 13 |
| | 15 Haltering für den Durchföhrungseinsatz |

Bild 6 (rechts), Brennstoffelement für den Reaktor nach Bild 5. Rechts unten: Verbindung der Stahlrohre mit den Anschlussrohren; rechts oben: Ausschnitt aus dem aktiven Mittelteil mit den Gaskanälen

- Einlassrohr bzw. Auslassrohr für den Brennstoff aus legiertem Stahl
- Verbindungsstellen
- Anschlussrohr aus Graphit von 152 mm äusserem und 25,4 mm innerem Durchmesser
- Aktives Brennstoffelement aus Graphit von quadratischem Querschnitt 381 x 381 mm und etwa 2100 mm Länge
- Verbindungsstellen für den Brennstoffdurchtritt, an den Enden mit Pfropfen verschlossen
- Senkrechte Brennstoffkanäle
- Eingeschraubtes und verkitetetes Ende des Anschlussrohres
- Schraube aus Graphit
- horizontale Kanäle für das Kühlgas
- Vertikale Schlitze für den Brennstoff



Anschlusssteile fliessen, und dazu müssen Anschlüsse am Reaktor-Kern angebracht werden. Der ganze Reaktor muss von einer thermisch und mechanisch hoch beanspruchten Hülle umgeben sein. Diese Bauelemente müssen aus Materialien hergestellt werden, welche nicht nur den konstruktiven Anforderungen genügen, sondern auch die speziellen Forderungen eines Kernreaktors erfüllen. Vor allem sollen die Materialien kleine Absorptions-Querschnitte aufweisen. Zudem müssen sie

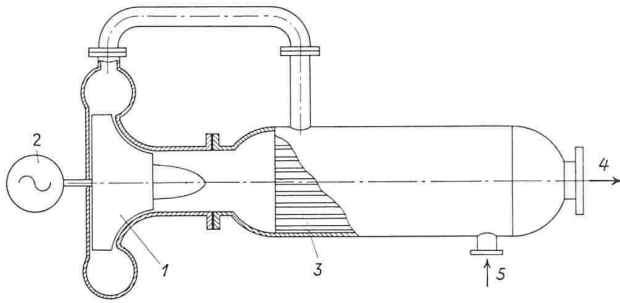


Bild 7. Schema einer «Kalten Stufe» für die Abscheidung von flüchtigen Spaltprodukten.

- | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1 Expansionsturbine | produkte ausgeschieden sind. |
| 2 Generator | Von hier strömt das Helium der |
| 3 Rohre, an denen sich das | Kompressorstufe zu |
| Xenon niederschlägt | 5 Eintrittsstutzen für Heliumgas |
| 4 Austrittsstutzen für Heliumgas, | mit Spaltprodukten vom |
| aus dem die flüchtigen Spalt- | Zwischenkühler des Kompressors |

dem dauernden Beschuss durch Spaltprodukte, Neutronen, Elektronen und Gammaquanten widerstehen. Die Energie, die von den verschiedenen Teilchen und Strahlungen bei der Abbremsung in den Konstruktionselementen abgegeben wird, tritt eventuell als Wärme in Erscheinung. Der Einfluss dieser Wärme auf die Materialeigenschaften muss bei der Konstruktion der Elemente in Betracht gezogen werden.

3. Konstruktive Anordnung

Viele konstruktive Einzelheiten sind beim Bau von Kernreaktoren zu berücksichtigen. Nachstehend sollen drei grundsätzlich verschiedene Reaktortypen beschrieben werden, die sich für den Betrieb bei hohen Temperaturen eignen.

a) Eine interessante Konzeption, die gegenwärtig am Brookhaven National Laboratory untersucht wird, betrifft einen Reaktor, der mit flüssigem Metall als Brennstoff mit geschmolzenem Wismuth als Brennstoffträger und mit Graphit als Moderator arbeitet [12]. Dieser Reaktor besteht im wesentlichen aus einem zylindrischen oder kugelförmigen Druckgefäß, das einen quergerillten Graphitblock als Kern trägt. Dieser ist mit einem Reflektor oder einer Hülle aus zu breedendem Material umgeben, Bild 5. Der Graphitkern ist von horizontalen Gaskanälen durchsetzt, die mit senkrechten Brennstoffkanälen abwechseln.

In Bild 6 ist ein einzelnes Brennstoffelement herausgezeichnet, so dass die konstruktiven Einzelheiten sichtbar sind. Die Brennstoffkanäle enthalten etwa 0,5 % Uran, das in flüssigem Wismuth gelöst ist. Geringe Anteile von Zirkon und Magnesium sind dem Brennstoff beigegeben, um Korrosionen zu verhindern. Dieser flüssige Brennstoff bleibt ruhend. Nur ein kleiner Teil von ihm wird zur Aufbereitung kontinuierlich durch ein System von geschmolzenen Salzen geleitet, in dem die nicht gasförmigen Spaltprodukte extrahiert werden.

Da man das Ausmass der Diffusion von flüchtigen Spaltprodukten durch den Graphit in das Arbeitsmedium nicht kannte, entschloss man sich, eine Einrichtung vorzusehen, die das Arbeitsmedium kontinuierlich reinigt. Die wichtigste flüchtige radioaktive Verunreinigung aus dem Spaltprozess ist das Xenon -135. Dessen Entfernung aus dem Arbeitsmedium ist erwünscht, um dessen Aktivität auf ein annehmbares Mass zu verringern und allzu ausgedehnte Abschirmungen unnötig zu machen.

Das Xenon kann tatsächlich bis zu jedem gewünschten Rest-Anteil durch Ausfrieren in einer kalten Prozessstufe entfernt werden. Man zapft dazu eine kleine Gasmenge beim Austritt aus dem Zwischenkühler des Kompressors ab und führt es durch einen Wärmetauscher, in dem das Xenon durch Ausfrieren soweit erwünscht entfernt wird. Bild 7 zeigt die prinzipielle Anordnung. Das Xenon ist nur in sehr geringen Mengen vorhanden, so dass sogar eine vollständige Entfernung die gesamte Gasmenge nur unmerklich vermindern würde. Das gekühlte Gas expandiert in einer Turbinen auf den Saugdruck des Kompressors. Dabei kühlt es sich weiter ab. Es kann dann als Kühlmittel in genannten Wärmetauscher der kalten Stufe benützt werden. Ein typisches Kreislaufschema zeigt Bild 8. Ein Gasreiniger mit Aktivkohle vor einem

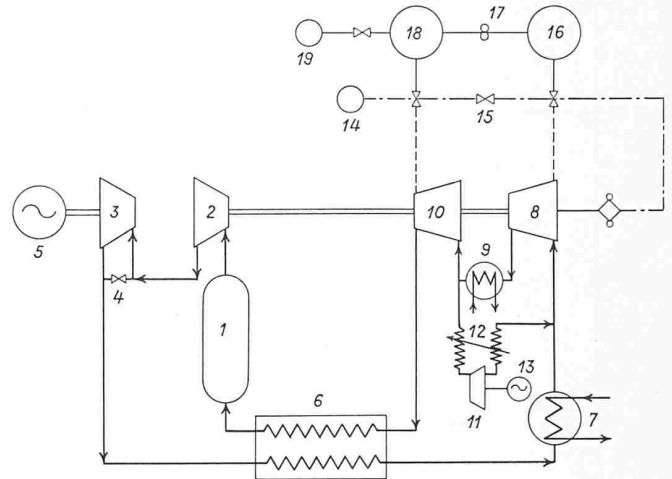


Bild 8. Schema einer Gasturbinenanlage mit geschlossenem Kreislauf und Hochtemperatur-Reaktor als Wärmequelle

- | | |
|----------------------------------|----------------------------------|
| 1 Reaktor für hohe Temperaturen | 11 Expansionsturbine kalte Stufe |
| 2 Hochdruck-Gasturbine | 12 Zugehöriger Wärmeaus- |
| 3 Niederdruck-Gasturbine | tauscher, in dem die Spalt- |
| 4 Niederdruck-Gasturbine | produkte ausgeschieden werden |
| 5 By-Pass-Ventil | 13 Generator zu 11 |
| 6 Generator | 14 Leistungsregelung |
| 7 Wärmeaustauscher | 15 By-Pass-Ventil zu 14 |
| 8 Vorkühler mit Kühlwasser | 16 Niederdruckbehälter |
| 9 Niederdruck-Kompressor | 17 Transportpumpe |
| 10 Zwischenkühler mit Kühlwasser | 18 Hochdruck-Behälter |
| 11 Hochdruck-Kompressor | 19 Nachfüll-Reservebehälter |

Gasfilter kann noch am kalten Ende dieses Nebenschleifes eingebaut werden.

Die Gasmenge, die zum Zwecke der Tiefhaltung der Xenonkonzentration im Arbeitsgas durch die kalte Stufe strömt, ist sehr klein, schätzungsweise 1 % des Gesamtflusses (oder etwa 1 kg/s in einer Anlage von 60 MW). Daher werden die Dimensionen des Wärmeaustauschers der kalten Stufe sowie auch diejenigen der Expansionsturbine sehr klein. Der Durchfluss durch die kalte Stufe wird allmählich mit Xenon und seinen Zerfallsprodukten verstopft werden; vielleicht muss man die Vorrichtung durch eine neue ersetzen. Bei der geringen Grösse wäre zu untersuchen, ob sich eine Reinigung lohnt oder nicht. Diese ist verhältnismässig teuer, da sie ferngesteuert vorgenommen werden muss.

b) Ein zweiter Vorschlag, der zuerst von der Reaktor-Entwicklungsgruppe des Niederländischen Reaktor Comités [13] gemacht wurde und auch an der Universität von Michigan studiert wird, bezieht sich auf einen Reaktor mit «Strömungsbett». Ich glaube, dass diese Art eines Reaktors für die Zukunft vielversprechend ist und habe daher eine Skizze gemacht, Bild 9. Brennstoff und Moderator werden hier in Form einer feinkörnigen Mischung von Uranoxyd und Graphit oder von in Graphit imprägniertem Uranoxyd in den Prozess eingeführt, die dann durch einen zirkulierenden Gasstrom aufgewirbelt wird. Das Arbeitsmedium der Wärmekraftanlage wird durch Rohre geleitet, welche die Energie in Form von Strahlung von den weissglühenden Brennstoff-Moderator-Teilchen erhalten. Flüchtige Spaltprodukte werden kontinuierlich vom aufwirbelnden Gasstrom abgetrennt. Ein kontinuierlicher Strom von Brennstoffteilchen kann abgeführt und in genau der selben Weise aufbereitet werden, wie die Katalysen für das Cracken in den Oelraffinerien abgetrennt und aufbereitet werden.

Die fluidumähnliche Natur des Brennstoffes bringt noch andere Vorteile mit sich. Sollte die Zufuhr des Gases aus irgendwelchem Grunde unterbrochen werden, so wird der aufgewirbelte Reaktorkern aus der Reflektorzone heraus in eine unterkritische Zone fallen. Sollte ein Reaktorunfall eintreten, wird die allererste Folge eine Erhöhung der Gastemperatur sein. Dadurch wird unverzüglich das spezifische Volumen erhöht und die Gasgeschwindigkeit durch das Strömungsbett gesteigert, was seine Ausdehnung über die Reflektorzone hinaus zur Folge hat. Der dadurch grösser werdende Neutronenverlust wird den Reaktor unterkritisch machen, wodurch sich die Störung von selber aufhebt.

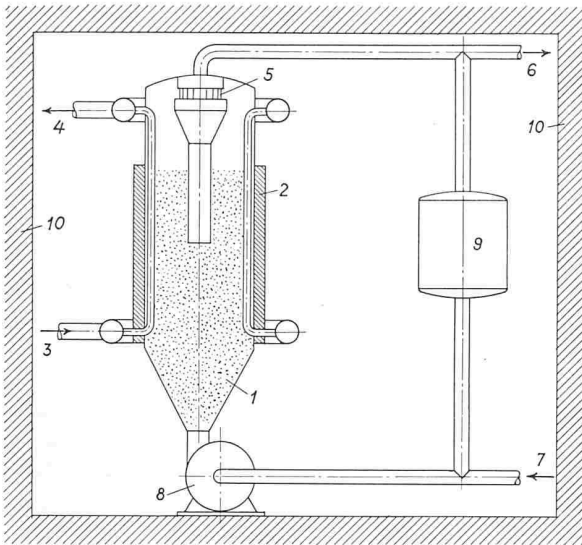


Bild 9. Schema eines Gaskreislauf-Reaktors, bei dem Brennstoff und Moderator im Gas suspendiert sind

- | | |
|--|--|
| 1 Füllung mit Brennstoff- und Moderatorpartikeln | 6 Gasleitung nach der Abscheidevorrichtung für Spaltprodukte |
| 2 Reflektor | 8 Gebläse |
| 3 Gaseintritt, vom Wärmeaustauscher | 9 Filter |
| 4 Gasaustritt, zur Turbine | 10 Abschirmung |
| 5 Zyklon zum Abscheiden der Teilchen aus dem Gas | |

Es ist zu erwarten, dass mit den beiden beschriebenen Reaktortypen sehr hohe Gastemperaturen erreicht werden können. In beiden Fällen ist aber noch viel Entwicklungsarbeit zu leisten.

c) Die konstruktive Konzeption, die heute schon soweit entwickelt worden ist, dass eine Ausführung einigermaßen möglich erscheint, ist die heterogene Konstruktion, wie sie in Bild 10 gezeigt ist. Einige konstruktive Einzelheiten sind von Interesse und sollen kurz beschrieben werden.

Für die Verbindung des Reaktors mit der Maschinengruppe werden koaxiale Rohre vorgesehen. Das relativ kalte, in den Reaktor eintretende Gas strömt durch den äusseren Ringquerschnitt, während das heisse austretende Gas durch das zentrale Rohr strömt. Bei dieser Anordnung wird der Druck, der das heisse Zentralrohr mechanisch beansprucht, nur gleich dem Druckverlust im Reaktor. Dieses Rohr kann daher mit kleiner Wandstärke ausgeführt werden. Dazu kommt noch, dass die Wärmespannungen im inneren Rohr viel geringer werden, da das Rohr nur durch die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Strömungen beansprucht wird, die gleich dem Temperaturanstieg im Reaktor ist und nicht durch die Differenz zwischen der Gastemperatur bei Reaktoraustritt und der Umgebungstemperatur.

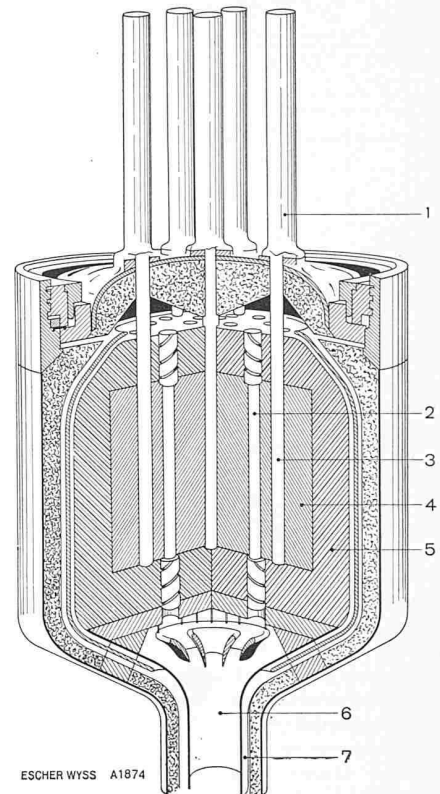
Die äussere Rohrwand ist an der Innenseite isoliert, so dass die Wandtemperatur nur etwa 65° C beträgt. Die Isolation trägt als Futter ein dünnes, perforiertes Blech aus rostfreiem Stahl. Bei dieser Bauweise muss nur das zentrale Rohr aus temperaturbeständigem Material hergestellt werden, während die äussere Rohrwand, die dem Druck des Systems standzuhalten hat, keinen hohen Temperaturen ausgesetzt ist.

Eine Verallgemeinerung dieses Prinzips ist bei der Reaktorumhüllung angewendet worden. Das eintretende Gas strömt aufwärts entlang der Innenseite der Druckgefässwand und anschliessend durch den Reaktorkern wieder abwärts. Das Druckgefäss ist nach der oben beschriebenen Art isoliert. Auf diese Weise wird die Reaktorhülle durch kaltes Gas und Isolierung gegen die hohen Temperaturen des Reaktor-Kerns geschützt, und es ergibt sich daraus eine wesentliche Verringerung der Wandstärke des Druckgefässes. Zum Beispiel beträgt die zulässige Spannung in Stahl-Platten aus St 304 bei 800° C nur 100 kg/cm² gegenüber 2500 kg/cm² bei 65° C.

Als Brennstoffelemente werden Platten und Röhren aus UO₂ in einem Gitter aus rostfreiem Stahl verwendet, wobei das ganze Element mit einer Hülle aus rostfreiem Stahl oder Chromnickel überzogen wird. Mit dem Fortschreiten der

Bild 10. Schnitt durch einen Gaskreislauf-Reaktor von 45 MW Wärmeleistung nach Ford Justement Company (USA); Durchm. rd. 2,5 m

- | |
|---|
| 1 Reguliermechanismus für Kontrollstäbe |
| 2 Brennstoffelemente |
| 3 Kontroll- und Regulierstab |
| 4 Graphit-Moderator |
| 5 Graphit-Reflektor |
| 6 Austrittsrohr für das erhitze Gas |
| 7 Eintrittskanal für das kalte Gas |



Technik in der Herstellung von Brennstoffelementen wird man voraussichtlich auf Elemente übergehen, die ganz aus Keramik bestehen, was ein Arbeiten mit höheren Temperaturen und mit den daraus sich ergebenden höheren Wirkungsgraden ermöglichen würde.

4. Leistungsfähigkeit eines Reaktors

Eines der wichtigsten Momente, das für die Leistungsfähigkeit eines Reaktors massgebend ist, betrifft die Lebensdauer der Brennstoffelemente. Diese entscheidet über die Frage, ob die Wärmeenergie von Reaktoren je in Konkurrenz treten kann mit derjenigen von fossilen Brennstoffen. Als Lebensdauer ist die Zeit zu verstehen, während der ein Brennstoffelement bestrahlt werden kann, ohne seine Wirksamkeit zu verlieren. Durch sie werden die Intervalle zwischen den Aufbereitungsprozessen bestimmt. Damit ergibt sich auch die Häufigkeit der Aufbereitungskosten und das Verhältnis dieser Kosten zu den Grundkosten des Brennstoffes.

Der prozentuale Anteil des verbrauchten spaltbaren Stoffes zum ursprünglich vorhandenen (Burnup) ist durch zwei Faktoren eingeschränkt, einen kernphysikalischen und einen metallurgischen. Der kernphysikalische Hauptfaktor besteht in demjenigen Teil des U²³⁵, der gespalten werden kann, ohne dass der Reaktor unterkritisch wird. Ein grosser Ueberschuss an Reaktivität beim Anlauf erlaubt ein grösseres Burnup, stellt jedoch ein ernstes Sicherheitsproblem hinsichtlich eines Reaktorunfalles dar. Die Verwendung von abbrennbaren Parasitstoffen kann den erforderlichen Reaktivitäts-Ueberschuss beim Anlaufen verringern. Die Umwandlung von U²³⁸ in Pu²³⁹ kann mithelfen, den Reaktivitätsabfall mit fortschreitendem Burnup zu vermindern.

Die metallurgischen Einschränkungen sind diejenigen, die durch Strahlungsschäden der Brennstoffelemente verursacht werden. Es ist zu erwarten, dass eine verhältnismässig niedrige Anreicherung (Grössenordnung 10 %) dieses Problem etwas erleichtert. Dazu hilft noch die Verwendung von Uran in Form von Keramik, etwa als Uranoxyd mit Rücksicht auf die Materialeigenschaften, da ja dann die α - β -Phasenumwandlung, welche beim Uranmetall bei etwa 662° C mit so verheerender Auswirkung eintritt, nicht vorkommt.

Leider kann ich jetzt noch keine detaillierteren Angaben betreffend Leistungsfähigkeit der gegenwärtigen Brennstoffelemente machen.

Ein anderes wichtiges Charakteristikum für die Leistungsfähigkeit ist der Temperaturkoeffizient der Reaktivi-

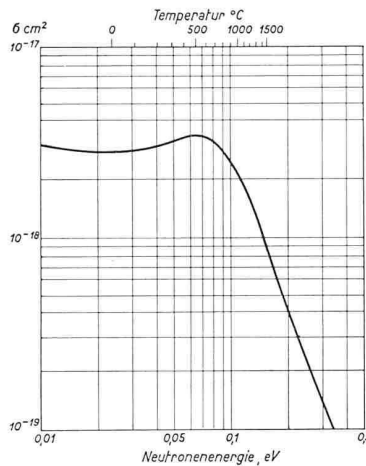


Bild 11. Wirkungsquerschnitt σ von Xenon Xe^{135} in Abhängigkeit der thermischen Neutronenenergie

tät. Reaktoren mit hohen negativen Temperaturkoeffizienten werden als in sich sicher bezeichnet. Gaskreislauf-Reaktoren tendieren nach positiven Temperaturkoeffizienten; im besten Fall sind sie schwach negativ. Grosse Temperatureffekte sind normalerweise die Folgen von Dichteänderungen des Moderators, oder, im Falle von homogenen Reaktoren, von Dichteänderungen der Brennstofflösung. Diese Einflüsse haben kein Analogon in Gaskreislauf-Reaktoren. Daher hängt hier der Temperatureffekt von der relativen Änderung der Spaltungs-Wirkungsquerschnitte des Brennstoffes und der Absorptions-Wirkungsquerschnitte der anderen Elemente im Reaktorkern ab. Der Absorptionsquerschnitt des Xenon-135, eines der wichtigsten parasitischen Spaltprodukte, ändert unglücklicherweise radikal im massgebenden Temperaturbereich, wie Bild 11 zeigt. Da dieser Wirkungsquerschnitt so stark mit steigender Temperatur abfällt, wird die Abnahme des parasitischen Neutroneneinfanges die Reaktivität ansteigen lassen. Bis zu einem gewissen Grad wird diesem Effekt durch die Dopplerverbreiterung¹⁾ der 7 eV-Absorptionsresonanz des U^{238} im Brennstoff entgegengewirkt. Eine sorgfältige Betrachtung all dieser vorhandenen Effekte führt auf Werte für den negativen Temperaturkoeffizienten von der Grössenordnung 10^{-5} pro $^{\circ}\text{C}$.

5. Regulierung und Sicherung

Da sich der eben beschriebene Reaktortyp nicht eines grossen negativen Temperaturkoeffizienten rühmen kann, muss er durch Stäbe reguliert werden. Das Material für diese Regulierstäbe hat natürlich den maximalen Reaktortemperaturen standzuhalten. Geeignete Reguliermaterialien sind Keramiken wie Borkarbid (B_2C), Bornitrid (BN) und Hafniumdioxid (HfO_2). Die Regulierstäbe müssen durch das Arbeitsgas dauernd gekühlt werden. Es ist vorgesehen, einen Stab zur Feinregelung zu verwenden und die anderen zur Grobregelung sowie auch zum Ausgleich der Flussverteilung über den Reaktorkern.

Um den Betrieb gegen eine Störung zu sichern, sind mehrere Sicherheits-Stromkreise in der Regulierung vorgesehen. Die konstruktive Aufgabe, die sich hier stellt, besteht darin, ein System zu schaffen, das einerseits gegen Störungen sichert und andererseits ein Abstellen des Reaktors durch falsche Signale ausschliesst.

Man wird voraussichtlich zwei Kontrollmesstellen vorsehen, an denen die Austrittstemperatur, der Ueberdruck, die Brennstofftemperatur und die Reaktor-Periode abgelesen werden können. Die erste Stelle wird die Reaktivität um eine Stufe tiefer setzen, während die zweite die Schnellabstellung des Reaktors betätigt. Durch diese zweistufige Betätigung sollen genügend Sicherheitsreserven erhalten und zugleich unnötiges Abstellen vermieden werden. Verschiedene Vorrichtungen zur Schnellabstellung sichern einander in Serie. Wenn zum Beispiel die Mechanik der Kontrollstäbe versagt, kann eine Druckflasche mit Bortrifluorid in das Arbeitsgas entleert werden und damit den Reaktor abstellen.

Wenn ich schon von Regulierung und Sicherung spreche, möchte ich gerne ein Wort über die Sicherheit sagen. Viel wurde schon publiziert über die Sicherheit von Reaktoren mit

¹⁾ Damit ist die Verbreiterung der Absorptionsresonanz durch Dopplereffekte der thermischen Bewegung gemeint.

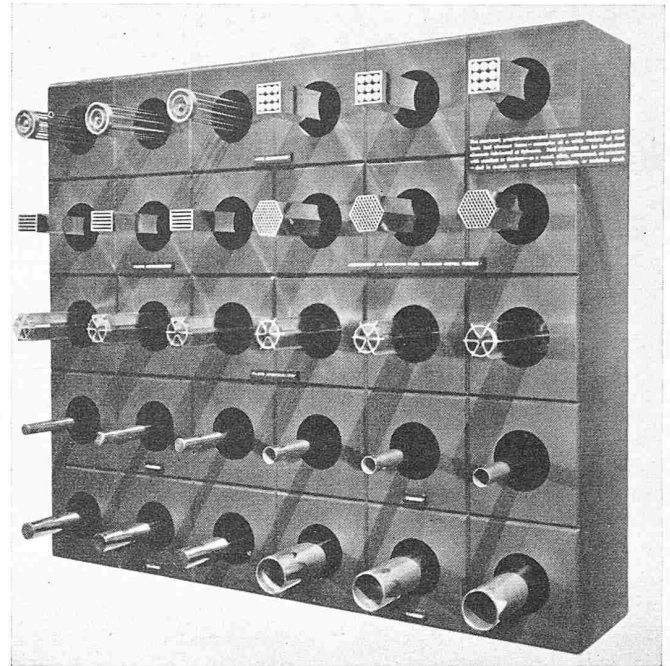


Bild 12. Typische Formen von Brennstoffelementen

hohem negativen Temperaturkoeffizienten. Wir haben gesehen, dass der jetzt betrachtete Reaktor bestenfalls einen schwach negativen, möglicherweise aber sogar einen positiven Temperaturkoeffizienten haben kann. Trotz dieser Tatsachen glauben wir, dass ein Hochtemperatur-Gaskreislauf-Reaktor ein sicherer Reaktor ist, und zwar aus folgenden Gründen:

Bei den verwendeten Materialien sind keine Zustandsänderungen von flüssiger zu dampfförmiger Phase möglich. Damit ist ein plötzlicher Abfall der Wärmeübergangszahl ausgeschlossen, der z. B. durch Bildung einer Dampfschicht an der Wärmeübertragungsfläche verursacht werden könnte.

Das Arbeitsmedium, das unter Druck steht, kann vielleicht entweichen, und es kann eine kleine Menge Radioaktivität mitführen, je nach der Wirksamkeit des Gas-Reinigungssystems. Ein plötzlicher Bruch in der Anlage kann das Gasvolumen auf etwa das 15fache erhöhen. Aber eine solche Volumenzunahme ist unverhältnismässig viel kleiner als die etwa 1800fache Vergrösserung, die bei plötzlich verdampfendem Wasser auftritt. Gaskreislauf-Reaktoren kennen die Unfallgefahr einer Verdampfungs-Explosion nicht, die vorhanden ist, wenn Wasser als Kühlmittel oder als Moderator verwendet wird.

Es ist auch nichts vorhanden, was zu einer chemischen Explosion führen könnte, wie sie in Reaktoren theoretisch möglich ist, die Wasser und Natrium oder Wasser und Aluminium enthalten. In Systemen von Graphit oder BeO , Helium oder Stickstoff, Uran oder Urankarbid bestehen keine Möglichkeiten zu mechanischen Störungen im Bereiche von Temperaturen, die weit über die Betriebstemperaturen hinausgehen. Korrosion von Metallen durch Wasser und Korrosion von Stahl durch Natrium bei hohen Temperaturen finden in dem hier beschriebenen Reaktor nicht statt.

Im Falle einer Katastrophe am Reaktor können die Brennstoffelemente schmelzen und in ein unten angebrachtes Becken ausfliessen, das ausserhalb des kritischen Bereiches liegt. Die Gasturbinenanlage wird dann mit einer vorübergehenden Temperaturerhöhung den plötzlichen Energieanfall aufnehmen; aber es ist kein Grund, anzunehmen, dass dies verheerend wäre. Mit anderen Worten, das Ergebnis wird ein kostspieliger, jedoch kein aufsehenerregender Unfall sein.

E. Wirtschaftlichkeit

Die Technik der Kernreaktoren ist nun auf einem Stand angelangt, der es ermöglicht, einen Hochtemperatur-Reaktor für Energieerzeugung in Kraftwerk-Zentralen zu bauen und zu betreiben, wobei nur noch ein beschränkter Aufwand für die Entwicklung und für Versuche mit einzelnen Bauelementen nötig ist. Es bleibt noch die Frage, ob die Energie wirtschaftlich erzeugt werden kann. Zum grössten Teil ist die Wirtschaftlichkeit von den Brennstoffkosten abhängig.

Von den totalen Anlagekosten wird nicht gesprochen, da sie sehr stark streuen, je nach dem Grad des Optimismus der Leute, die die Schätzung vornehmen.

Der im Sommer 1955 in Genf genannte Preis für U^{235} betrug 25 \$ pro Gramm. Es kann gezeigt werden, dass 1 g U^{235} rd. 1 Megawatt \times Tag an Wärmeenergie liefert, womit sich die Grundkosten $= \frac{1,04}{\eta_t}$ Mills/kWh

stellen. η_t ist der Gesamtwirkungsgrad (1 Mill = $1/1000$ \$). Wenn eine nicht zu vernachlässigende Menge von umwandelbarem Material in spaltbares Material (z. B. Plutonium) umgesetzt wird, kann der angegebene Kostenwert noch um den Preis des Plutoniums verringert werden. Mit der Annahme, dass das gewonnene Plutonium den selben Preis hat wie U^{235} , nämlich 25 \$ pro Gramm, können die Brennstoffkosten um folgenden Betrag reduziert werden:

$$\text{Plutoniumwert} = \frac{25 \cdot 0,0416 C_r}{\eta_t} = \frac{1,04 C_r}{\eta_t} \text{ Mills/kWh}$$

Hierin bedeuten:

C_r Konversionsfaktor (Produziertes Pu^{239} zu konsumiertem U^{235})
25 angenommener Preis von 1 g Pu^{239} in Dollars
0,0416 Umrechnungsfaktor von \$/g U^{235} zu Mills/kWh

Da nur ein kleiner Bruchteil des Brennstoffes im Reaktor verbrannt wird, müssen grosse Brennstoffmengen und damit viel Kapital im Reaktor investiert werden; dies wird hier berücksichtigt in einem Zins-Anteil von 4 % des Brennstoffwertes;

$$\text{Zinsanteil} = \frac{0,04 \cdot 1,04}{\eta_t B} \text{ Mills/kWh}$$

wobei B den verbrauchten Anteil des Brennstoffes darstellt.

Da eine Aufbereitung der Brennstoffelemente periodisch notwendig ist, müssen auch die Aufbereitungskosten P [\$/g] pro Gramm spaltbarem Material berechnet werden. Die totalen Aufbereitungskosten betragen dann:

$$\text{Aufbereitungskosten} = \frac{0,0416 P [1 - B (1 - C_r)]}{\eta_t B} \text{ Mills/kWh}$$

Die Gesamtkosten sind dann die Summe aus Grundkosten, Zinsanteil und Aufbereitungskosten unter Abzug des Plutoniumwertes.

$$\text{Gesamtkosten} = \frac{(1 - C_r) 1,04}{\eta_t} + \frac{0,0416}{\eta_t B} + \frac{0,0416 P [1 - B (1 - C_r)]}{\eta_t B}$$

Diese Gleichung zeigt deutlich die Wichtigkeit des thermischen Wirkungsgrades. Ausser der Senkung der Brennstoffkosten ist es notwendig, die Werte η_t , B und C_r so gross als möglich zu machen, und P so klein als möglich. Es ist von Interesse, zu beachten, dass der Einfluss von P abnimmt, wenn η_t und B zunehmen.

Schlussfolgerungen

Ich glaube, die Technologie der Gaskreislauf-Reaktoren sei genügend fortgeschritten, um heute die Erwägung ihres Baues zu rechtfertigen. Solche Reaktor-Systeme haben den Vorteil eines hohen Temperaturpotentials, vielleicht eines höheren, als es mit flüssigen Metallen zu erreichen ist. Daher bieten sie ein Mittel, brauchbare Anlage-Wirkungsgrade zu erreichen und möglicherweise wirtschaftlich interessante

Kernenergie-Kosten. Die Konstruktionsprobleme werden erheblich erleichtert durch die Tatsache, dass das Gas kein Lösungsmittel für Brennstoff oder andere Reaktormaterialien darstellt.

Die Anwendung desselben Gases als Reaktorkühlmittel und als Arbeitsmedium in einer geschlossenen Gasturbinenanlage vermeidet die verschwenderische Herabsetzung der Temperatur, wie sie in anderen Systemen erfährt. Das Gas ist sauber und nicht verseucht; es erleidet keine Phasenänderungen; es ist stabil und kann in einem beträchtlichen Temperaturbereich erhitzt werden, ohne Veränderung seiner Eigenschaften zu erfahren.

Es wurde schon viel Arbeit dafür aufgewendet, die Leistungsfähigkeit von Brennstoffelementen verschiedener Konstruktion zu bestimmen. Unglücklicherweise gibt es viele Veränderliche, und die Kosten der Versuche sind hoch. Die Tatsache, dass die Zahl der Versuchseinrichtungen, in denen solche Experimente durchgeführt werden können, beschränkt ist, bleibt nicht ohne Auswirkung. Von den wichtigen Veränderlichen sind zu nennen der Neutronenfluss im Reaktor, die Zusammensetzung des Brennstoffelementes, die Verbindung zwischen Brennstoff- und Verkleidungsmaterial, die Korngrösse des Brennstoffes, dessen Temperatur und viele andere mehr.

Es ist meine Meinung, dass Kernenergie-Wärme eine teure Wärme ist und dass sie in Anlagen von hohem Wirkungsgrad verwendet werden muss, um wirtschaftlich interessant zu sein. Die Gasturbinenanlage mit geschlossenem Kreislauf entspricht dieser Forderung. Darüber hinaus lässt sie sich auf kleinstem Raum unterbringen. Es sind immer noch viele Probleme zu lösen, jedoch sind es solche technischer Natur und nicht solche der Grundlagenwissenschaften. Wesentliche Fortschritte sind in dieser Richtung schon erzielt worden, und die Zeit ist reif für eine Demonstration leistungsfähiger Anwendung der Kernenergie.

Literaturverzeichnis

- [1] L. F. Epstein: Corrosion by Liquid Metals, «Geneva Paper» Nr. 119, July 1955.
- [2] S. T. Robinson: Design Study of a 60 MW Closed Cycle Gas Turbine Nuclear Power Reactor.
- [3] A. M. Weinberg: Survey of Fuel Cycles and Reactor Types. «Geneva Paper» Nr. 863, July 8, 1955.
- [4] T. Jaris: Nuclear Reactor for Large Gas Turbines, «Nucleonics» 14 Nr. 3, p. 42 (1956).
- [5] J. R. Johnson: Ceramic Fuel Materials of Nuclear Reactors. Preprint Nr. 110, Nuclear Engineering and Science Congress, Dec. 12-16 (1955).
- [6] D. S. Billington: Radiation Damage in Reactor Materials, «Geneva Paper» Nr. 744, July 6, 1955.
- [7] W. E. Moody, W. W. Krieger: Unpublished Data, ORNL Contract North Carolina State College, Dept. of Ceramics. Diffusion of Selected Isotopes through Ceramics and Cermets.
- [8] W. A. Maxwell: NACA — RM — E9G01, Oct. 6, 1949.
- [9] R. Mela, A. Strasser: Special Materials for Reactor Components. Talk delivered before American Institute of Electrical Engineers 1955/56 Educational Program.
- [10] S. Galsstone: Principles of Nuclear Reactor Engineering, Van Nostrand, 1955.
- [11] H. McCullough, B. Kopelman: Review of Solid Hydrides. Preprint Nr. 352, Nuclear Engineering and Science Congress, Dec. 12-16 (1955).
- [12] L. Stoughton, T. V. Sheehan: The LMFR Closed Cycle Gas Turbine Power Plant, American Society of Mechanical Engineers.
- [13] J. J. Went, H. De Bruyn: Fluidized and Liquid Fuel Reactors with Uranium Oxides, «Nucleonics» 12 Nr. 9, p. 16 (1954).

Die Adresse des Uebersetzers ist bei der Redaktion zu erfragen.

Elementare Reaktortheorie

Von Prof. Dr. P. Scherrer, ETH, Zürich

DK 621.039.42.001

Die Reaktortechnologie wird in Zukunft einen ausserordentlich wichtigen Teil der Ingenieurwissenschaften darstellen und die Reaktortheorie bildet natürlich den Zentralkpunkt für das Verständnis dieses Gebietes. Der Betrieb eines Kernreaktors beruht wesentlich auf den mannigfachen Prozessen, welche sich zwischen den Neutronen und den Atomkernen des den Reaktor aufbauenden Materials, insbesondere

den spaltbaren Atomkernen abspielen. Es ist leicht, diese Vorgänge näherungsweise mathematisch zu erfassen und so einen guten Einblick in die Bedingungen zu gewinnen, welche erfüllt sein müssen, damit ein Reaktor als energieliefernde Maschine einwandfrei arbeitet und sich in weiten Grenzen regulieren lässt. Allerdings ist die *exakte* Berechnung eines Reaktors ausserordentlich schwierig; in der Praxis