

EUR 770.d

REPRINT

ASSOZIIERUNG

Europäische Atomgemeinschaft - EURATOM
Gesellschaft für Kernforschung mbH - Karlsruhe

**PARAMETERSTUDIEN
AN GASGEKÜHLTEN SCHNELLEN REAKTOREN**

von

D. SMIDT

1964



Bericht abgefasst von
der Technischen Abteilung des Kernforschungszentrums Karlsruhe - Deutschland

Assoziierung Nr. 009-63-10 RAAD

Sonderdruck aus
NUKLEONIK
Band 5, Heft 8 - 1963

HINWEIS

Das vorliegende Dokument ist im Rahmen des Forschungsprogramms der Kommission der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM) ausgearbeitet worden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Euratomkommission, ihre Vertragspartner und alle in deren Namen handelnden Personen:

- 1° — keine Gewähr dafür übernehmen, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen richtig und vollständig sind oder dass die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden und Verfahren nicht gegen gewerbliche Schutzrechte verstößt;
- 2° — keine Haftung für die Schäden übernehmen, die infolge der Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden oder Verfahren entstehen könnten.

This reprint is intended for restricted distribution only. It reproduces, by kind permission of the publisher, an article from "NUKLEONIK", Band 5, Heft 8 - 1963, 353-360. For further copies please apply to Springer-Verlag — Heidelberg, Neuenheimer Landstrasse 28-30 (Deutschland).

Dieser Sonderdruck ist für eine beschränkte Verteilung bestimmt. Die Wiedergabe des vorliegenden in „NUKLEONIK“, Band 5, Heft 8 - 1963, 353-360 erschienenen Aufsatzes erfolgt mit freundlicher Genehmigung des Herausgebers. Bestellungen weiterer Exemplare sind an Springer-Verlag — Heidelberg, Neuenheimer Landstrasse 28-30 (Deutschland), zu richten.

Ce tiré-à-part est exclusivement destiné à une diffusion restreinte. Il reprend, avec l'aimable autorisation de l'éditeur, un article publié dans «NUKLEONIK», Band 5, Heft 8 - 1963, 353-360. Tout autre exemplaire de cet article doit être demandé à Springer-Verlag — Heidelberg, Neuenheimer Landstrasse 28-30 (Deutschland).

Questo estratto è destinato esclusivamente ad una diffusione limitata. Esso è stato riprodotto, per gentile concessione dell'Editore, da «NUKLEONIK», Band 5, Heft 8 - 1963, 353-369. Ulteriori copie dell'articolo debbono essere richieste a Springer-Verlag — Heidelberg, Neuenheimer Landstrasse 28-30 (Deutschland).

Deze overdruk is slechts voor beperkte verspreiding bestemd. Het artikel is met welwillende toestemming van de uitgever overgenomen uit „NUKLEONIK“, Band 5, Heft 8 - 1963, 353-360. Meer exemplaren kunnen besteld worden bij Springer-Verlag — Heidelberg, Neuenheimer Landstrasse 28-30 (Deutschland).

EUR 770.d

REPRINT

PARAMETERSTUDIEN AN GASGEKÜHLTEN SCHNELLEN REAKTOREN von D. SMIDT.

Assoziierung : Europäische Atomgemeinschaft - EURATOM.

Gesellschaft für Kernforschung mbH - Karlsruhe.

Bericht abgefasst von der Technischen Abteilung des Kernforschungszentrums Karlsruhe (Deutschland).

Assoziierung Nr. 009-63-01 RAAD.

Sonderdruck aus „Nukleonik“ - Band 5, Heft 8 - 1963 - Seiten 353-360.

Für heliumgekühlte schnelle Reaktoren mit zylindrischen Brennstoffstäben und UO_2 - PuO_2 -Gemisch wird die gegenseitige Abhängigkeit einer grossen Anzahl von Auslegungsgrößen quantitativ ermittelt. Ein System von vier Gleichungen beschreibt das kühlungstechnische und neutronenphysikalische Verhalten des Cores sowie den Sekundärkreis. Die Variablen lassen sich in vier Gruppen ordnen : Temperaturen, Formparameter, Kreislaufparameter und Einflüsse der

EUR 770.d

REPRINT

PARAMETER STUDIES ON GAS-COOLED FAST REACTORS by D. SMIDT.

Association : European Atomic Energy Community - EURATOM.

Gesellschaft für Kernforschung mbH - Karlsruhe.

Work performed by Technischen Abteilung des Kernforschungszentrums Karlsruhe (Germany).

Association No. 009-63-01 RAAD.

Reprinted from "Nukleonik", Vol. 5 - No. 8 - 1963 - pp. 353-360.

The interdependence of numerous design parameters for helium-cooled fast reactors with cylindrical fuel rods and UO_2/PuO_2 mixture is quantitatively determined. A system of four equations describes the behaviour of the core in respect of cooling and neutron physics, as well as the secondary circuit. The variables can be placed in four categories: temperatures, form parameters, circulation parameters and influence of material composition. For the most part the variations in specific power, critical mass and overall efficiency are stu-

EUR 770.d

REPRINT

PARAMETER STUDIES ON GAS-COOLED FAST REACTORS by D. SMIDT.

Association : European Atomic Energy Community - EURATOM.

Gesellschaft für Kernforschung mbH - Karlsruhe.

Work performed by Technischen Abteilung des Kernforschungszentrums Karlsruhe (Germany).

Association No. 009-63-01 RAAD.

Reprinted from "Nukleonik", Vol. 5 - No. 8 - 1963 - pp. 353-360.

The interdependence of numerous design parameters for helium-cooled fast reactors with cylindrical fuel rods and UO_2/PuO_2 mixture is quantitatively determined. A system of four equations describes the behaviour of the core in respect of cooling and neutron physics, as well as the secondary circuit. The variables can be placed in four categories: temperatures, form parameters, circulation parameters and influence of material composition. For the most part the variations in specific power, critical mass and overall efficiency are stu-

EUR 770.d

REPRINT

PARAMETER STUDIES ON GAS-COOLED FAST REACTORS by D. SMIDT.

Association : European Atomic Energy Community - EURATOM.

Gesellschaft für Kernforschung mbH - Karlsruhe.

Work performed by Technischen Abteilung des Kernforschungszentrums Karlsruhe (Germany).

Association No. 009-63-01 RAAD.

Reprinted from "Nukleonik", Vol. 5 - No. 8 - 1963 - pp. 353-360.

The interdependence of numerous design parameters for helium-cooled fast reactors with cylindrical fuel rods and UO_2/PuO_2 mixture is quantitatively determined. A system of four equations describes the behaviour of the core in respect of cooling and neutron physics, as well as the secondary circuit. The variables can be placed in four categories: temperatures, form parameters, circulation parameters and influence of material composition. For the most part the variations in specific power, critical mass and overall efficiency are stu-

Materialzusammensetzung. Zum wesentlichen Teil werden die Variationen der spezifischen Leistung, der kritischen Masse und des Gesamtwirkungsgrades in Abhängigkeit von den vier Variablen Gruppen studiert. Es werden einige Richtlinien herausgearbeitet, die die Festlegung der vielen Parameter für die praktische Auslegung einer Anlage erleichtern.

died as functions of the four groups of variables. Several guiding principles are worked out which facilitate the fixing of the many parameters for the practical design of a plant.

died as functions of the four groups of variables. Several guiding principles are worked out which facilitate the fixing of the many parameters for the practical design of a plant.

died as functions of the four groups of variables. Several guiding principles are worked out which facilitate the fixing of the many parameters for the practical design of a plant.

Parameterstudien an gasgekühlten schnellen Reaktoren

Von DIETER SMIDT

(Aus der Technischen Abteilung des Kernforschungszentrums Karlsruhe)

Mit 4 Textabbildungen

(Eingegangen am 19. Juli 1963)

Zusammenfassung. Für heliumgekühlte schnelle Reaktoren mit zylindrischen Brennstoffstäben und UO_2 - PuO_2 -Gemisch wird die gegenseitige Abhängigkeit einer großen Anzahl von Auslegungsgrößen quantitativ ermittelt. Ein System von vier Gleichungen beschreibt das kühlungstechnische und neutronenphysikalische Verhalten des Cores sowie den Sekundärkreis. Die Variablen lassen sich in vier Gruppen ordnen:

Temperaturen, Formparameter, Kreislaufparameter und Einflüsse der Materialzusammensetzung. Zum wesentlichen Teil werden die Variationen der spezifischen Leistung, der kritischen Masse und des Gesamtwirkungsgrades in Abhängigkeit von den vier Variablengruppen studiert. Es werden einige Richtlinien herausgearbeitet, die die Festlegung der vielen Parameter für die praktische Auslegung einer Anlage erleichtern.

1. Einleitung

Flüssiges Natrium gilt heute in mehrfacher Hinsicht als das bestgeeignete Kühlmittel für schnelle Reaktoren. In der Tat besitzt diese Substanz eine Reihe von bemerkenswerten Vorteilen. An erster Stelle stehen die hohen erzielbaren Wärmeübergangszahlen, die durch die hervorragende Wärmeleitfähigkeit bedingt sind, die hinreichende Wärmekapazität und der niedrige Dampfdruck. Im Hinblick auf die großen Leistungsdichten, die durch die hohe Brennstoffanreicherung im schnellen Reaktor bedingt sind, sind diese Eigenschaften von unschätzbarem Wert. Hierzu kommt das geringe Absorptions- und Moderationsvermögen des Natriums für die schnellen Neutronen. Neben diesen unleugbaren Vorteilen gibt es aber auch eine Reihe von Nachteilen. Die chemische Reaktionsfreudigkeit des Natriums erfordert eine Anzahl die Kosten erhöhender Sondermaßnahmen, für die etwa die Zwischenschaltung eines weiteren Kreislaufs zwischen den primären Natriumkühlkreis und den Wasser-Dampf-Arbeitskreislauf charakteristisch ist. Das Arbeiten der Brennstoff-Belademaschinen unter Natrium erfordert besondere Vorkehrungen. Die für die Brennelementkühlung erwünschte hohe Wärmeleitfähigkeit kann für Behälter und Rohrleitungen im Hinblick auf Thermoschocks ein Problem bilden.

Diese und andere Schwierigkeiten lassen sich durch entsprechende technische Maßnahmen weitgehend eindämmen. Es fehlt jedoch der Beweis, daß damit auch eine wirtschaftliche Lösung gewährleistet ist.

Von besonderer Tragweite ist schließlich ein neutronenphysikalischer Tatbestand. Bei größeren kritischen Massen ($M_K > 1000$ kg) wird der Natrium-Blaskoeffizient der Reaktivität positiv, da bei großen Reaktoren das Härterwerden des Neutronenspektrums bei Verminderung der Natriumdichte die gleichzeitige Erhöhung der Leckverluste überwiegt.

Mit diesen Erkenntnissen werden auch gasförmige Kühlmittel für schnelle Reaktoren wieder diskutabel, die wegen ihrer geringen Dichte nur wenig moderierend wirken. In erster Linie eignet sich Dampf aus leichtem oder schwerem Wasser, außerdem Helium. Alle erlauben einen wesentlich einfacheren Kreislaufaufbau als Natrium. Thermodynamisch gesehen ist der Wasserdampf dem Helium überlegen, zumal er unter Verzicht auf einen Wärmetauscher direkt in einer Turbine entspannt werden kann. Ähnlich wie beim Natrium existiert aber auch hier ein negativer Kühlmittel-Dichtekoeffizient der Reaktivität, der bei grö-

ßeren kritischen Massen dynamische Schwierigkeiten mit sich bringt. Eine Abnahme der Gasdichte durch Temperatursteigerung oder Drucksenkung führt zu einer Erhöhung der Reaktivität. Die sicherheitstechnischen Konsequenzen sind evident. Bei Dampf aus leichtem Wasser ist dieser Effekt wegen des relativ hohen restlichen Moderationsvermögens am ausgeprägtesten, bei schwerem Wasser ist er geringer und bei Helium unbedenklich. Außerdem spielen Korrosionsfragen hier eine geringere Rolle.

Im Rahmen des Projektes „Schneller Brüter“ des Kernforschungszentrums Karlsruhe wird neben der „konventionellen“ Natriumkühlung vor allem die Gaskühlung sowohl vom theoretischen als auch vom praktisch-technischen Standpunkt aus untersucht. Es ergibt sich dabei eine Fülle von neuartigen Auslegungs- und Optimierungsproblemen. Der wesentliche Unterschied zum natriumgekühlten schnellen Reaktor besteht in der größeren Anzahl der beteiligten Variablen. Das liegt in erster Linie daran, daß die Wärmeübergangszahlen bei Natrium so groß sind, daß die Temperaturdifferenzen zwischen Kühlmittel und Brennstoffoberfläche praktisch nicht berücksichtigt zu werden brauchen. Für die Kühlmittelgeschwindigkeit gelten lediglich allgemeine Vorschriften von der Art, daß ein bestimmter Maximalwert nicht überschritten werden darf. Bei einem Gas dagegen hängt die Temperaturdifferenz Brennstoffoberfläche—Kühlmittel empfindlich von der Kühlmittelgeschwindigkeit ab, und der Sollwert muß je nach der Leistung durch die Wahl des freien Querschnitts der Kühlkanäle eingestellt werden. Jede Änderung des freien Querschnitts ändert aber den Volumenanteil des Kühlmittels im Core, und dieser wirkt sich gerade bei einem schnellen Reaktor empfindlich auf dessen kritische Größe, d. h. also auch auf die Länge der Kühlkanäle aus. Die Länge der Kühlkanäle ist aber wiederum für den Kühlmitteldurchsatz und darum auch für den erforderlichen freien Querschnitt wesentlich. So sind in besonderem Maße thermische und neutronenphysikalische Auslegungsgesichtspunkte eng miteinander verknüpft. Ebenso ist im Gegensatz zur Natriumkühlung der Einfluß der Gasumwälzleistung auf den Gesamtwirkungsgrad von äußerstem Interesse und trägt auch seinerseits zur Erhöhung der Anzahl der wesentlichen Variablen bei.

Man fragt sofort, ob mit einem gasförmigen Kühlmittel überhaupt die hohen Leistungsdichten, die für einen schnellen Reaktor charakteristisch sind, erzielt werden können. Diese Frage läßt sich im wesentlichen

bejahen, wie in den folgenden Parameterstudien nachgewiesen wird.

Ihr Sinn ist zunächst die Feststellung des Einflusses der einzelnen Variablen in ihrer gegenseitigen Wechselwirkung. Im Anschluß an eine frühere Arbeit [1] wird dazu eine möglichst übersichtliche auf wenige simultan zu lösende Gleichungen zusammengezogene Formulierung des Problems angestrebt. Daneben bereitet die große Anzahl der Variablen einige Schwierigkeiten für die Auswertung der Lösungen, die ja ihrerseits den Ausgangspunkt für eine Optimalisierung des Systems hinsichtlich minimaler Stromerzeugungskosten bilden sollen. Durch Gesichtspunkte technischer Erfahrung in Verbindung mit den hier gefundenen Ergebnissen kann man jedoch die meisten Variablen schon vor der Lösung der eigentlichen Optimalisierungsaufgabe festlegen bzw. auf einen engen Bereich begrenzen und dadurch den Umfang der notwendigen Rechnungen sehr einschränken.

2. Aufstellung des Gleichungssystems

2.1. Gültigkeitsbereich der Variablen

Die Materialzusammensetzung und Geometrie des Reaktors sind innerhalb der folgenden Grenzen festgelegt:

Brennstoff: Eine Mischung von UO_2 und PuO_2 im Volumenverhältnis $y:1$, $y = 1 \div 4$, Dichte $\rho_B = 8 \text{ g cm}^{-3}$, in Form zylindrischer, axial umströmter Stäbe.

Canning: Inconel (15% Cr, 70% Ni, 7% Fe). Volumenverhältnis Canning: Brennstoff = $x:1$, $x = 0,3 \div 0,5$.

Sonstiges Strukturmaterial im Core: Inconel, Volumenverhältnis Strukturmaterial: Core = $0,15 = \beta_0$.

Brutmantel: 80 Vol.-% U^{238} , 20 Vol.-% Fe. Dicke überall 80 cm.

Form des Cores: Zylinder mit einem Verhältnis von Höhe: Radius $h/R = 1,2 \div 1,9$.

Kühlmittel: Helium von $50 \div 100$ at.

Temperaturen: Kühlmittel $150 \div 600^\circ \text{C}$. Brennstoffoberfläche maximal $700 \div 800^\circ \text{C}$.

2.2. Kühlungstechnische Gleichungen

Die kühlungstechnischen Grundgleichungen sind in einer früheren Arbeit [1] allgemein für gasgekühlte Leistungsreaktoren hergeleitet worden. Das Problem bestand in der geeigneten Auswahl der Variablen, wodurch einerseits eine analytische Lösung überhaupt erst ohne allzu großen numerischen Aufwand ermöglicht und andererseits die Kopplung mit den sonstigen geltenden Beziehungen, etwa den Gleichungen des Sekundärkreises durch wenige Variable, hier nur die Kühlmitteltemperaturen am Reaktorein- und -austritt, bewirkt wird.

Die erste Gleichung (Gl. (27b) aus [1]) ergibt den hydraulischen Durchmesser D des Kühlkanals:

$$\frac{1}{D} = M_1 \left(\frac{h}{h'}, T_{\max}, \vartheta_1, \vartheta_2 \right) \frac{q^{0,2}}{h^{0,8}}. \quad (1)$$

Die Bedeutung der Bezeichnungen ist im Abschnitt 6 angegeben. Die zweite Gleichung (Gl. (28b) und (28c) aus [1]) ergibt die relative Umwälzleistung N/Q , die sich additiv aus einem Reibungsanteil N_r/Q und einem

Beschleunigungsanteil N_2/Q zusammensetzt.

$$\frac{N}{Q} = M_2 \left(\frac{h}{h'}, T_{\max}, \vartheta_1, \vartheta_2 \right) \frac{q^{2,6} h^{0,6}}{p^2} \quad (2)$$

$$\left[f + \frac{M_3 \left(\frac{h}{h'}, T_{\max}, \vartheta_1, \vartheta_2 \right)}{M_2 \left(\frac{h}{h'}, T_{\max}, \vartheta_1, \vartheta_2 \right)} (hq)^{-0,2} \right]$$

M_1 , M_2 und M_3 sind Funktionen der angegebenen Variablen und in [1] genauer definiert.

Der hydraulische Durchmesser D läßt sich durch den Volumenanteil α des Kühlmittels im Core ausdrücken. Aus einfachen geometrischen Beziehungen findet man sowohl für Brennstoffplatten der Dicke a (einschließlich Canning), als auch für stabförmige Brennelemente mit dem Radius a

$$D = 2a \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (3)$$

Mit

$$R_1 = \frac{\alpha}{2} M_1$$

$$R_2 = \frac{M_2 \cdot f}{p^2}$$

$$R_3 = \frac{M_3}{p^2}$$

findet man als kühltechnische Reaktorgleichungen:

$$\frac{1 - \alpha}{\alpha} = R_1 q^{0,2} h^{-0,8}, \quad (4)$$

$$\frac{N}{Q} = R_2 q^{2,6} h^{0,6} \left(1 + \frac{R_3}{R_2} q^{-0,2} h^{-0,2} \right). \quad (5)$$

2.3. Kritische Gleichung

Die kritische Gleichung gibt den Zusammenhang zwischen der Materialzusammensetzung eines Reaktors und seiner kritischen Größe. Im Gegensatz zu thermischen Reaktoren wird man bei schnellen Reaktoren das Material-Buckling zumindest im frischen Zustand nicht ortsabhängig machen, da hierfür als einzige freie Parameter die Anreicherung und die Brennelementgeometrie verfügbar sind. Aus praktischen Gründen erscheint eine Ortsabhängigkeit dieser Größen unwirtschaftlich. Eine Bucklingänderung (meist im Sinne einer Flußabflachung) durch zusätzliche Absorber verbietet sich durch den angestrebten Brutgewinn, ebenso scheidet trivialerweise eine Variation des Brennstoff-Moderator-Verhältnisses aus.

Aus diesen Gründen enthält die kritische Gleichung für schnelle Reaktoren nur vier Variable:

x , y und α als ortsunabhängige Kenngrößen für die Materialzusammensetzung und h als Maß für die Reaktorgröße.

SCHMIDT, STITTGEN, MÜNZNER [2] u. a. haben nach einer 14-Gruppen-Diffusionstheorie eine große Anzahl kugelförmiger, homogener Anordnungen aus PuO_2 , UO_2 , Inconel und Helium berechnet. Die von ihnen gefundenen Werte für die kritische Masse der Kugel M_{KK} werden durch folgende Bedingungen auf zylindrisches Core der Höhe h , des Radius R und der kritischen Masse M_K übertragen.

Es soll gelten

$$\left. \begin{array}{l} \text{für } \frac{h}{R} = 1,2 \quad \frac{M_{KK}}{M_K} = 0,9 \\ \text{für } \frac{h}{R} = 1,9 \quad \frac{M_{KK}}{M_K} = 0,95 \end{array} \right\} \quad (6a)$$

(vergleiche auch die Ergebnisse von LOEWENSTEIN und OKRENT [3] für natriumgekühlte Anordnungen). Die Ergebnisse der Multigruppenrechnung werden nach OTT und STIRTGEN [4] durch eine Interpolationsformel mit großer Genauigkeit als Funktion von h/R , α , x und y wiedergegeben:

$$h = S\left(\frac{h}{R}\right) \left[R_4(x, y) + R_5(x, y) \left[\frac{\alpha}{1 - c(x, y)\alpha} \right] \right]. \quad (6)$$

Es gilt für $S(h/R)$:

$$\frac{h}{R} = 1,2 \quad S = 1,282$$

$$\frac{h}{R} = 1,9 \quad S = 1,71.$$

$R_4(x, y)$, $R_5(x, y)$ und $c(x, y)$ sind in der Tabelle angegeben.

Tabelle

x	y	R_4	R_5	c
0	1	13,35	11,96	1,13
	2	17,49	16,83	1,13
	3	21,64	21,67	1,15
	4	26,10	27,28	1,16
	5	31,10	33,33	1,18
	7	44,54	50,84	1,37
	0,3	1	16,5	16,0
2		21,2	22,0	1,14
3		29,13	30,52	1,16
4		36,20	40,20	1,18
5		45,88	51,06	1,38
0,5	1	18,1	17,6	1,14
	2	23,4	24,5	1,14
	3	16,19	27,18	1,15
	4	32,14	34,57	1,18
	5	39,94	44,29	1,22

2.4. Gleichung des Sekundärsystems

Das Kühlmittel strömt mit einer Temperatur ϑ_1 in den Reaktor ein, erwärmt sich hier auf ϑ_2 , wird im Wärmetauscher auf ϑ_3 abgekühlt und schließlich im Umwälzgebläse wieder auf ϑ_1 erwärmt. Der thermische Wirkungsgrad wird durch die in diesem System sekundärseitig erzielten Dampftemperaturen, Dampfdrücke, den Kondensationsdruck, die Zahl der Vorwärmstufen und schließlich die Turbinenleistung selbst bestimmt. Ein Teil dieser Größen hängt letztlich außer von den Übertragungseigenschaften des Wärmetauschers nur von den Gastemperaturen am Wärmetauscher ϑ_2 und ϑ_3 ab und ist dadurch mit den kühltchnischen Reaktorgleichungen verkoppelt. FRANZE [5] hat diese Abhängigkeit untersucht.

Für einen Eindruckprozeß macht er folgende Annahmen:

a) Der Kondensatordruck wird fest angenommen: $p_0 = 0,05$ ata.

b) Die Temperaturdifferenz Gas—Dampf am Überhitzer Austritt beträgt 30°C .

c) Die Temperaturdifferenz Gas—Wasser am Verdampfungsbeginn beträgt 10°C .

d) Es wird der optimale Dampfdruck verwendet. Der thermische Wirkungsgrad nimmt im allgemeinen mit dem Dampfdruck zu, doch wird der Anstieg mit steigendem Druck immer schwächer. Der optimale Dampfdruck ist dadurch definiert, daß

$$\frac{\Delta \eta_{th}}{\Delta p} = 0,02\% / \text{at}$$

geworden ist. Eine weitere Drucksteigerung wird nicht mehr als wirtschaftlich angesehen.

e) Es wird die optimale Anzahl von Vorwärmstufen verwendet. Diese ist analog zu d) dadurch definiert, daß der Gewinn an thermischem Wirkungsgrad bei Erhöhung der Stufenzahl um eins $\Delta \eta_{th} = 0,2\%$ wird.

Unter diesen Voraussetzungen kann der thermische Wirkungsgrad als Funktion von ϑ_2 , ϑ_3 und der Turbinenleistung N_T dargestellt werden.

Eine Interpolationsformel lautet:

$$\eta_{th}(\vartheta_2, \vartheta_3, N_T) = \left[32,4 + 1,5 \arctg \frac{N_T - 30}{25} + 2,98 \arctg \frac{\vartheta_3 - 186}{25,5} + \left(0,26 - 0,105 \arctg \frac{\vartheta_3 - 186}{45,7} \right) \frac{\vartheta_2 - 500}{10} \right] 10^{-2}. \quad (7)$$

Der Gesamtwirkungsgrad η der Anlage ergibt sich daraus durch Berücksichtigung der Umwälzleistung N im Core und N^* im Brutmantel und übrigen Kreislauf:

$$\eta = (1 - \delta) \eta_{th}(\vartheta_2, \vartheta_3, N_T) \left(1 + \frac{N + N^*}{Q \eta_i} \right) - \frac{N + N^*}{Q \eta_G}. \quad (8)$$

Der Summand $\frac{N + N^*}{Q \eta_i}$ in der Klammer beschreibt die Erwärmung des Kühlgases bei der Verdichtung im Gebläse. Für die vergleichende Untersuchung wird $N^* = 0,5N$ gesetzt.

ϑ_3 hängt mit ϑ_1 zusammen nach

$$\vartheta_2 - \vartheta_3 = (\vartheta_2 - \vartheta_1) \left(1 + \frac{N + N^*}{Q \eta_i} \right). \quad (9)$$

Unter Berücksichtigung dieses Sachverhalts wird aus (8)

$$\eta = (1 - \delta) \eta_{th}(\vartheta_2, \vartheta_1, N_T) \left(1 + \frac{1,5N}{Q \eta_i} \right) - \frac{1,5N}{Q \eta_G}. \quad (10)$$

3. Auflösung des Gleichungssystems

Die vier Grundgleichungen für den gasgekühlten schnellen Reaktor mit Wärmetauscher und Eindruck-Dampfprozeß lauten:

$$\frac{1 - \alpha}{\alpha} = R_1 \left(\frac{h}{h'}, a, T_{max}, \vartheta_1, \vartheta_2 \right) \frac{q^{0,2}}{h^{0,8}}, \quad (4)$$

$$\frac{N}{Q} = R_2 \left(\frac{h}{h'}, T_{max}, \vartheta_1, \vartheta_2 \right) q^{2,6} h^{0,6} \left(1 + \frac{R_3}{R_2} q^{-0,2} h^{-0,2} \right), \quad (5)$$

$$h = S\left(\frac{h}{R}\right) \left[R_4(x, y) + R_5(x, y) \left[\frac{\alpha}{1 - c(x, y)\alpha} \right] \right], \quad (6)$$

$$\eta = (1 - \delta) \eta_{th}(\vartheta_2, \vartheta_1, N_T) \left(1 + \frac{1,5N}{\eta_i Q} \right) - \frac{1,5N}{Q \eta_G}. \quad (10)$$

Im Prinzip kann nach vier der auftretenden Variablen aufgelöst werden. Die Auswahl richtet sich nach der praktischen Fragestellung und nach Gesichtspunkten des rechnerischen Aufwandes.

Als abhängige Variable werden ausgerechnet:

q : Aus der Flächenleistung folgt direkt die spezifische Leistung $q_{spez} \left[\frac{\text{MW}}{\text{kg Pu}} \right]$ nach der Leistungsbilanz je Längeneinheit des (hier z.B. zylindrischen) Brennstoffelements:

$$\frac{q_{spez} \varrho a^2 \pi}{(1 + x)(1 + y)} = 2\pi q a. \quad (11)$$

Mit wachsendem q_{spez} sinken der relative Anteil der Brennstoffverzinsung am Strompreis und die Verdopplungszeit. Wegen der hohen Anreicherung schneller Reaktoren ist q_{spez} eine entscheidende Größe.

h : Aus h folgt bei gegebenem h/R R und aus beiden bei bekannter Materialzusammensetzung die kritische Masse M_K .

α : α ist ein Maß für die Weite und damit die konstruktive Bemessung der Kühlkanäle und Brennstoffelemente.

N/Q als Maß für die Größe der Umwälzleistung.

η eignet sich nicht als abhängige Variable, weil sie sinnvollerweise auf den sehr kleinen Bereich zwischen 0,25 und 0,35 beschränkt ist. Um unnötige Rechnungen zu sparen, gibt man sie besser als Parameter vor.

Die Temperaturen ϑ_1 und ϑ_2 treten in sehr komplizierten Ausdrücken auf und sind vor allem Bestandteil

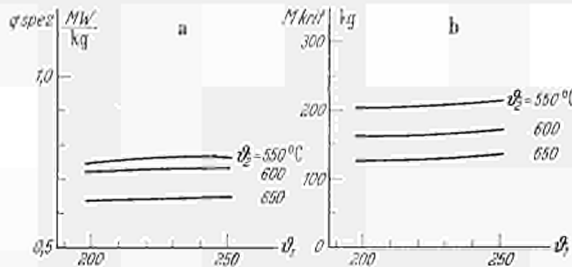


Abb. 1. q_{spez} und M_K als Funktion von ϑ_1 (Beispiel)¹

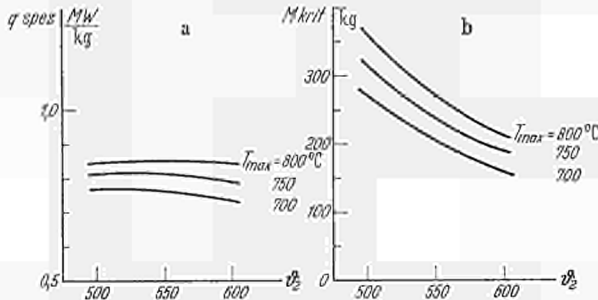


Abb. 2. q_{spez} und M_K als Funktion von ϑ_2 (Beispiel)

der Materialdaten des Kühlgases. Ihre explizite Ausrechnung als Unbekannte würde darum ebenfalls einen großen numerischen Aufwand bedeuten.

Wir haben als vorzugebende Parameter:

Temperaturen: $T_{\text{max}}, \vartheta_1, \vartheta_2$,

Formparameter: $\frac{h}{R}, \alpha$,

Kreislaufparameter: $\eta, \eta_U, \eta_i, p, N_T$,

Materialzusammensetzung: x, y .

Die Auflösung ist auf algebraischem Wege möglich, wenn man den langsam veränderlichen Ausdruck $(q\dot{h})^{-0,2}$ in Gl. (5) zunächst als Konstante behandelt und dann iteriert. Ebenso geht nach Gl. (8) und (9) der Ausdruck N/Q in den Faktor η_{th} der Gl. (10) ein.

Auch hier wird, ausgehend von $N/Q=0$, iteriert. Die gesamte Rechnung wurde auf der elektronischen Rechenmaschine IBM 7070 ausgeführt.

4. Ergebnisse

4.1. Einfluß der Temperaturen

Wir betrachten zunächst den Einfluß der Gastemperaturen ϑ_1 und ϑ_2 auf q_{spez} und auf M_K .

ϑ_1 : Abb. 1 a zeigt q_{spez} in Abhängigkeit von ϑ_1 . Alle anderen Parameter sind festgehalten. Man findet ein

flaches Maximum bei $\vartheta_1 \approx 230^\circ \text{C}$ ($\vartheta_2 \approx 550^\circ \text{C}$). [Wird ϑ_1 kleiner, so sinkt die erzielbare spezifische Leistung wegen des nach Gl. (7) sinkenden thermischen Wirkungsgrades der Anlage. Wird ϑ_1 größer als 230°C , so wird die Aufheizspanne $\vartheta_2 - \vartheta_1$ immer kleiner und das abführbare q_{spez} sinkt ebenfalls wieder ab.]

Die Weite der Kühlkanäle oder der gegenseitige Abstand der Brennstoffstäbe ist dabei [nach Gl. (4)] so eingestellt worden, daß jeweils die notwendige Gasgeschwindigkeit herrscht, die aus Wärmeübergangsgründen zur Erzielung der gewünschten maximalen Oberflächentemperatur T_{max} erforderlich ist. Das führt über α zu einer Variation der kritischen Masse. Dieser Zusammenhang geht aus Abb. 1 b hervor, die den Anstieg von M_K mit ϑ_1 zeigt. Je kleiner die Aufheizspanne wird, desto mehr Kühlgas muß umgewälzt werden und desto größer muß der hydraulische Durchmesser der Kühlkanäle sein. Entsprechend steigt die kritische Masse.

Das Maximum von q_{spez} (nach Abb. 1 a) ist relativ flach und in seiner Lage kaum beeinflusst durch die Wahl von ϑ_2 und den anderen Parametern. Im Sinne einer konsequenten Reduktion der Anzahl der Variablen wählen wir deshalb für die weiteren Untersuchungen fest $\vartheta_1 = 230^\circ \text{C}$ und können dann mit guter Genauigkeit mit dem optimalen Wert der spezifischen Leistung rechnen.

ϑ_2 : Auch für die Abhängigkeit der spezifischen Leistung von ϑ_2 ergibt sich ein ausgesprochenes Maximum. Dies geht aus Abb. 2 a hervor, die einen Schnitt durch Abb. 1 a bei $\vartheta_1 = 230^\circ \text{C}$ darstellt. Bei höheren ϑ_2 als dem Maximum entsprechend, wird die für den Wärmeübergang maßgebende Temperaturdifferenz $T_{\text{max}} - \vartheta(z_m)$ immer kleiner, so daß q_{spez} absinken muß. Bei kleinerem ϑ_2 dagegen werden der thermische Wirkungsgrad und die Aufheizspanne herabgesetzt. Die Lage des Maximums hängt stärker als in Abb. 1 a von den jeweiligen Werten der anderen Parameter ab.

Die kritische Masse (Abb. 2 b) sinkt mit wachsendem ϑ_2 . Die Kühlkanäle werden enger, weil die Wärmeübergangszahl und damit die Kühlmittelgeschwindigkeit zunehmen müssen und weil außerdem mit wachsender Aufheizspanne die umgewälzte Gasmenge abnimmt.

T_{max} : Aus Abb. 2 a ist auch der Einfluß der maximalen Brennstoffoberflächentemperatur T_{max} erkennbar. Erwartungsgemäß nimmt q_{spez} mit T_{max} stark zu. Das Maximum verschiebt sich gleichzeitig zu höheren ϑ_2 . Ebenso verschiebt sich in Abb. 2 b die Kurve für M_K nach rechts. Das heißt, daß bei gleichem ϑ_2 und ϑ_1 und erhöhtem T_{max} die Kühlkanäle weiter sein dürfen, die Gasgeschwindigkeit und die Wärmeübergangszahl kleiner werden usw. Will man die kritische Masse klein halten, und das ist besonders im Hinblick auf den Brutfaktor erwünscht, so muß man für höhere T_{max} auch höhere ϑ_2 verwenden. Das führt bald auf die bekannte Notwendigkeit, ab 550 bis 600°C die Heißgas führenden Teile der Anlage aus teurem austenitischen Material herzustellen. In Verbindung mit der Beanspruchung des Canningmaterials ist es dann aus diesen kombiniert neutronenphysikalischen, thermischen und technologischen Gründen wenig sinnvoll, die Brennstoffoberflächentemperaturen und damit die ganze Brennstoffentwicklung auf mehr als etwa 700°C abzustellen. Damit ist ein weiterer Parameter in engen Grenzen festgelegt.

¹ Abb. 1–4. Für diese Abbildungen gelten folgende Kenndaten: $\vartheta_1 = 230^\circ \text{C}$; $x = 0,5$; $\eta = 0,30$; $a = 0,3 \text{ cm}$; $f = 0,04$; $T_{\text{max}} = 700^\circ \text{C}$; $y = 2$; $\beta_0 = 0,15$; $p = 50 \text{ at}$; $h/R = 1,2$ (soweit nicht anders angegeben).

4.2. Einfluß der Formparameter

h/R : Die mehr oder weniger große Abflachung des Reaktors, wie sie durch h/R ausgedrückt wird, macht sich neutronenphysikalisch als Änderung des Verhältnisses M_{KK}/M_K nach (6a), thermisch als Änderung in der Länge h der Kühlkanäle bemerkbar. Längere Kühlkanäle müssen aus thermischen Gründen auch weiter sein. Damit erfahren Reaktoren mit größeren h/R eine Erhöhung der kritischen Masse, die im allgemeinen den Effekt der günstigeren Formgebung, wie er in größeren M_{KK}/M_K zum Ausdruck kommt, weit überwiegt. In Abb. 3a und b sind wieder q_{spez} und M_K als Funktion von ϑ_2 für Werte $h/R = 1,2$ und $h/R = 1,9$ dargestellt. Der Reaktor mit den längeren Kühlkanälen hat die kleinere spezifische Leistung, während die kritische Masse wesentlich größer ist. Für geringere Anreicherung, also größere Werte von γ als das hier verwendete $\gamma = 2$ ist es fast unmöglich, einen Reaktor mit annehmbaren Werten von T_{max} , ϑ_1 und ϑ_2 bei annehmbarer spezifischer Leistung kritisch zu machen. Für die weiteren Untersuchungen beschränken wir uns darum auf $h/R = 1,2$.

a : Je kleiner der Brennstabradius wird, desto günstiger wird natürlich das Verhältnis von spezifischer zu Oberflächenleistung [Gl. (11)]. Die Wärmeübergangszahlen können kleiner werden, und man beobachtet sowohl in bezug auf q_{spez} als auch auf M_K ganz das analoge Verhalten, wie es im Zusammenhang mit der Erhöhung von T_{max} dargestellt wurde. Dies geht grundsätzlich aus Abb. 4 hervor, wo q_{spez} und M_K wieder als Funktion von ϑ_2 für verschiedene a dargestellt sind. Die Kurven sind mit abnehmenden a nach oben und rechts verschoben.

In Abb. 5 ist die aus Abb. 4 folgende maximale spezifische Leistung als Funktion von a mit verschiedenen Werten der anderen Parameter dargestellt. Man erkennt die fallende Tendenz mit a . Die zugeordneten Zahlenwerte geben die für diesen Punkt notwendige kritische Masse in [kg] an. An dieser Stelle soll nun auch der Einfluß der endlichen Leitfähigkeit des Brennstoffmaterials in die Betrachtung einbezogen werden, also der Einfluß der Brennstoffzentraltemperatur, während wir uns bisher auf die Oberflächentemperatur beschränkt haben.

Zwischen der Leistung je Längeneinheit $2\pi qa$, die durch (11) mit q_{spez} zusammenhängt und der maximalen Zentraltemperatur T_0 besteht die bekannte Beziehung

$$2\pi q_{max} a = 4\pi \int_{T_m}^{T_0} \lambda dT \quad \text{am Ort von } T_0. \quad (12)$$

$\int \lambda dT$ hat für das betrachtete Brennstoffmaterial mit $T_m = 700^\circ C$, $T_0 \approx 2000^\circ C$ etwa den Wert $30-50 \frac{W}{cm}$.

Die aus (11) und (12) folgende Kurve $q_{spez}^+(a)$ ist ebenfalls in Abb. 5 eingetragen (q_{spez}^+ ist dabei mit dem Flußformfaktor $\varphi = 0,572$ über das Core gemittelt). Sie verläuft steiler als die aus der kühlungstechnisch-neutronenphysikalischen Berechnung folgenden Kurven, und nur deren links von $q_{spez}^+(a)$ liegenden Werte führen zu zulässigen Zentraltemperaturen. Der schraffierte Bereich deutet die Genauigkeitsgrenzen des Leitfähigkeitsintegrals und den Einfluß eventueller Zusätze zur Leitfähigkeitserhöhung an. Bevor die Abhängigkeiten im einzelnen diskutiert werden, soll der Einfluß der Kreislaufparameter betrachtet werden.

4.3. Einfluß der Kreislaufparameter

Als Kreislaufparameter sind die Größen $\eta_G, \eta_i, N_T, p, \rho, \eta$ bezeichnet worden. Die ersten beiden bezie-

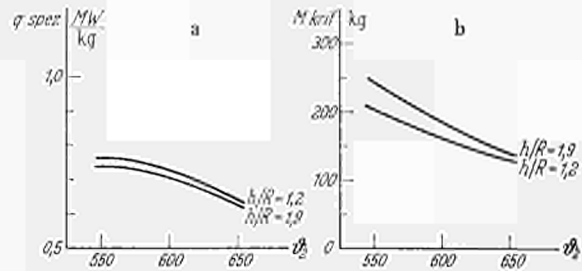


Abb. 3. Einfluß der Coreabflachung auf q_{spez} und M_K (Beispiel)

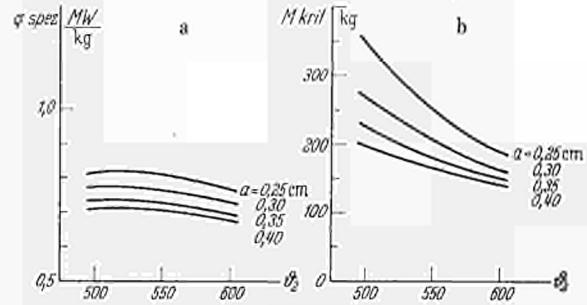


Abb. 4. Einfluß des Stabradius auf q_{spez} und M_K

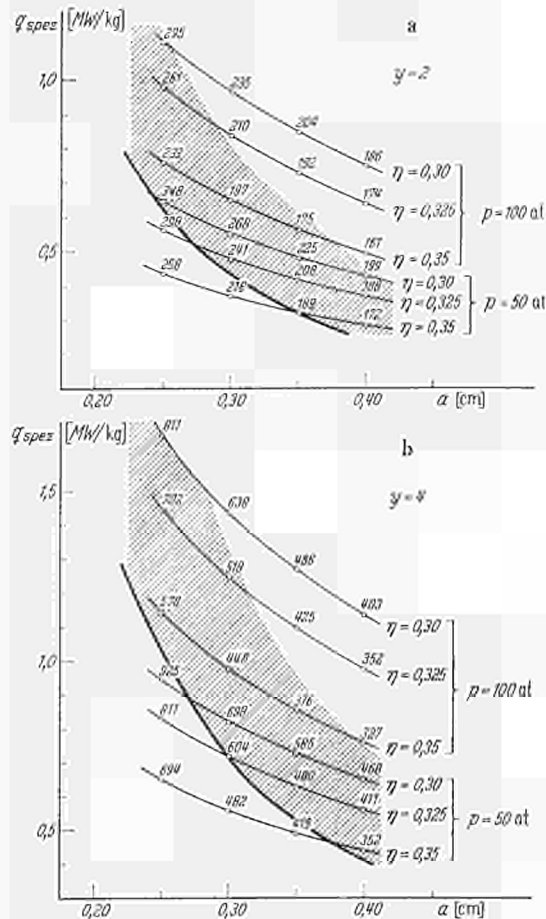


Abb. 5. Optimalwerte von q_{spez} als Funktion von a

hen sich auf das Kühlmittelumwälzgebläse. Es ist selbstverständlich, daß sie auf den technisch möglichen Höchststand gebracht werden. Ihr Einfluß soll nicht weiter untersucht werden. Wir setzen $\eta_G = 0,8$; $\eta_i = 0,85$.

Die Größe N_T gibt den Einfluß des leistungsabhängigen Turbinenwirkungsgrades auf den thermischen Wirkungsgrad wieder. Der Effekt ist gering und soll ebenfalls nicht untersucht werden. Wir halten für alle Untersuchungen $N_T = 100$ MW fest.

p : Der Gasdruck ist einer der wichtigsten Parameter überhaupt. Wie aus Gl. (2) hervorgeht, ist die Umwälzleistung dem Quadrat des Druckes umgekehrt proportional. In Abb. 5 ist für $p=50$ und $p=100$ atm gezeigt, wie bei festgehaltenem Gesamtwirkungsgrad η die erzielbare spezifische Leistung mit a variiert.

η : Auch der Gesamtwirkungsgrad η ist in Abb. 5 als Parameter enthalten. Man erkennt, daß hoher Druck und hoher Wirkungsgrad gleichbedeutend sind und bei fast gleicher Abhängigkeit von a etwa die gleichen Werte von q_{spez} erzielen lassen wie niedriger Druck und niedriger Wirkungsgrad.

Die gegenseitige Bedingtheit von p und η läßt sich auch formelmäßig darstellen.

Aus Gl. (10) folgt:

$$\frac{N}{Q} = \frac{\eta_{\text{th}}(1-\delta) - \eta}{1,5 \left[\frac{1}{\eta_G} - \frac{\eta_{\text{th}}(1-\delta)}{\eta_i} \right]} \quad (13)$$

Ferner gilt nach (2)

$$\frac{N}{Q} = \frac{K}{p^2} \quad (2a)$$

mit einer Proportionalitätskonstante K , die von p unabhängig ist. Insbesondere hängt die in K enthaltene kritische Höhe h nicht von p ab, wie aus Gl. (6) hervorgeht, in der α durch Gl. (4) bestimmt ist.

Durch Gleichsetzen von (2a) und (13) und Bildung der Ableitung erhält man

$$\frac{d\eta}{dp} = \frac{2}{p} [\eta_{\text{th}}(1-\delta) - \eta] \quad (14)$$

Der Gewinn in η durch Drucksteigerung wird um so geringer, je höher der Druck ansteigt und je mehr sich η dem thermischen Wirkungsgrad η_{th} nähert.

4.4. Einfluß der Materialzusammensetzung

x : Die Größe x beschreibt letzten Endes die verwendete Canningwandstärke, die von T_{max} und dem Spaltgasdruck bestimmt wird. Für $x=0,3$ bis $0,5$ und $T_{\text{max}} \approx 700^\circ \text{C}$ wird damit ein Ausbrand bis $100000 \frac{\text{MWd}}{\text{t}}$ angestrebt.

Die kühlungstechnisch bedeutsame Größe ist die Flächenleistung q . Bei gegebenem q ist dann nach Gl. (11) $q_{\text{spez}} \sim \frac{(1+x)q}{a}$.

Andererseits geht nach der Tabelle und Gl. (6) h mit x in die Höhe. Bei festgehaltenen Parametern gilt nach (5) unter Vernachlässigung der Klammer

$$q \sim h^{-\frac{0,6}{2,6}} = h^{-0,23}$$

Schließlich gilt wegen (12)

$$q = \frac{\text{const}}{a}$$

Durch Elimination von a und q folgt

$$q_{\text{spez}} \sim \frac{1+x}{h^{0,46}} \quad (15)$$

y : Analog wie im Falle von x läßt sich ebenso herleiten

$$q_{\text{spez}} \sim \frac{1+y}{h^{0,46}} \quad (16)$$

Größere x und y kommen in ihrer Wirkung einer Verdünnung des Brennstoffs gleich, die die Kühlung in jedem Fall erleichtert. Aus dem Vergleich der Abb. 5a und 5b geht der Einfluß von y hervor. Der Unterschied besteht darin, daß sich bei höherem y sowohl im Hinblick auf die Kühlung mit bestimmten η und p als auch auf das Leitfähigkeitsintegral der Gl. (12) günstigere Verhältnisse ergeben.

5. Schlußfolgerungen

Aus den Ergebnissen des Abschnitts 4 lassen sich als wesentliche Erkenntnisse die folgenden zusammenfassen:

5.1. Unter den die Energieerzeugungskosten beeinflussenden Variablen treten als wichtigste die spezifische Leistung im Brennstoff, der Gesamtwirkungsgrad der Anlage und der Gasdruck (der die Anlagekosten beeinflusst) hervor. Bei konstantem Wirkungsgrad und Gasdruck ergibt sich für bestimmte Gasein- und -austrittstemperaturen ein Maximum der spezifischen Leistung. Als günstigste Gaseintrittstemperatur findet man ziemlich unabhängig von den anderen Parametern $\vartheta_1 = 230^\circ \text{C}$. Die Gasaustrittstemperatur hängt hauptsächlich von der maximalen Brennstoffoberflächentemperatur und vom Brennstoffstabdurchmesser ab.

5.2. Für eine spezifische Leistung von mehr als $0,5 \text{ MW/kg}$ bei einem Wirkungsgrad von mindestens 30% muß der Heliumdruck mindestens bei 50 atm liegen. Eine Druckerhöhung auf 100 atm bringt eine erhebliche Steigerung in η oder q_{spez} .

5.3. Die kritische Masse ist von den geforderten Temperaturen abhängig. Diese Abhängigkeit kommt durch die Anpassung der Kanalweite an die thermischen Bedingungen zustande. Die Größe des Plutoniumumsatzes geht selbst nicht direkt in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ein; die Kosten für die Verzinsung des Ersteinsatzes hängen vielmehr allein von der spezifischen Leistung ab. Indirekt aber wirkt sich die durch Veränderung von α hervorgerufene Veränderung der kritischen Größe auf den Brutfaktor und damit auf die Brennstoffkosten aus. Entsprechend den Abb. 2 und 5 ergeben sich daraus zusätzliche Argumente für die Auswahl von T_{max} und a . Reaktoren mit hohen Brennstoffoberflächentemperaturen oder kleinen Brennelementdurchmessern erfordern zusätzlich zu den aus der Thermodynamik kommenden Begründungen nun also auch wegen der Kleinhaltung der kritischen Masse im Interesse eines hohen Brutfaktors hohe Kühlmitteltemperaturen. Hieran werden in besonderer Weise die Gegebenheiten des gasgekühlten schnellen Reaktors deutlich.

5.4. Es muß berücksichtigt werden, daß zu den errechneten Canningtemperaturen Zuschläge für heiße Stellen hinzukommen. Es sind zunächst die statistischen hot-channel-Faktoren zu berücksichtigen, darüber hinaus aber ist durch die Geometrie der Kühlkanäle ein ungleichmäßiger Wärmeübergang bedingt, der dort am schlechtesten ist, wo sich zwei Stäbe am

nächsten gegenüberstehen. Schließlich ist der Einfluß von Störungen durch Verbiegen oder Anschwellen der Stäbe zu beachten, wodurch sowohl die Strömung behindert als auch der Wärmeübergang verschlechtert wird.

Während sich die Beeinflussung der Durchströmung, d.h. die Veränderung des Gasdurchsatzes bei gleicher Druckdifferenz einigermaßen erfassen läßt, fehlen noch weithin experimentelle Ergebnisse über die Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl vom Stababstand bei großen Flächenleistungen. Die theoretischen Untersuchungen von DEISSLER-TAYLOR [6] mit einem vereinfachten Modell, in dem insbesondere die Existenz von Sekundärströmungen vernachlässigt ist, dürfte aber eine obere Abschätzung ermöglichen. Wie an anderer Stelle ausführlich begründet [7], ergeben sich zusätzlich zu den statistischen Zuschlägen, Temperaturerhöhungen ($q_{spez} = 0,65 \text{ MW/kg}$, $y=4$) von etwa 50°C im regulären Falle, von etwa 200 bis 250°C dann, wenn der Kanalquerschnitt durch eine Störung auf $1/10$ seiner Länge auf die Hälfte reduziert worden ist. Daraus ergeben sich Anhaltspunkte für die Temperaturen, denen das Canningmaterial (Inconel) tatsächlich ausgesetzt ist.

5.5. Auswahlkriterien für die Variablen

Am Ende des Abschnitts 3 waren vier abhängige und zwölf unabhängige Variable zusammengestellt worden. Drei abhängige Variable sind durch das Gleichungssystem eliminiert worden, der Rest muß letztlich nach Richtlinien der Wirtschaftlichkeit ausgewählt werden. Im Prinzip müßte also der von den Variablen abhängige Ausdruck für die Stromerzeugungskosten zu einem Minimum gebracht werden. Außer den rein praktischen ergeben sich dabei auch mathematische Schwierigkeiten, da keinesfalls sichergestellt ist, daß das Minimum nicht auf dem Rande des Gültigkeitsbereichs der Variablen liegt. Die durchgeführten Parameteruntersuchungen erlauben, eine gewisse Ordnung in die Festlegung der bestimmenden Größen des Systems zu bringen und einige von ihnen im voraus festzulegen. Es schälen sich einige wesentliche Abhängigkeiten klar heraus, die die Dimensionierung der Anlage erleichtern.

Man findet als hauptsächliche Richtlinien:

T_{max} ist in erster Linie durch die Festigkeitseigenschaften des Canningmaterials bestimmt. Man beachte aber, daß über die kritische Masse nach 4.1 ϑ_2 mit T_{max} anwachsen und abnehmen muß.

ϑ_1 ist durch das Maximum in q_{spez} festgelegt, wobei sich allerdings die Auslegung etwas nach kleineren ϑ_1 , d.h. kleineren kritischen Massen verschieben sollte, ohne wesentlich in q_{spez} zu verlieren.

ϑ_2 ähnlich ϑ_1 , wobei hier Gesichtspunkte der Materialauswahl der Rohrleitungen usw. hinzukommen.

$h/R = 1,2.$

x (unter Berücksichtigung von T_{max}) durch den Ausbrand und damit den Spaltgasdruck, den das Canning aufzunehmen hat.

η_G, η_i sind in engen Grenzen durch die technischen Gegebenheiten des Gebläses vorgeschrieben.

y bestimmt in erster Linie die Größe des Reaktors, seine Leistung (bei $q_{spez} \approx 1 \text{ MW/kg}$, $\eta \approx 30\%$) und seine physikalischen Eigenschaften (Doppler- und Blasenkoeffizient).

Damit ist auch N_T festgelegt.

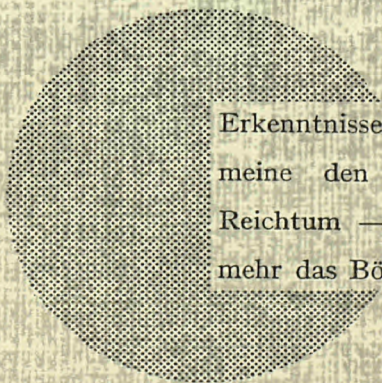
y, p, η, a und q_{spez} (als einziger abhängiger Variable) sind durch die in Abb. 5 dargestellten Beziehungen miteinander verknüpft. Damit kann eine Variable eliminiert werden. y ist bereits nach dem Vorstehenden in gewissen praktischen Grenzen festgelegt. Damit wird das aufzusuchende Minimum der Kostengleichung im wesentlichen von drei Veränderlichen abhängig sein, die gegeneinander optimalisiert werden müssen. Gl. (14) gibt eine weitere Relation zwischen η und p , die ebenfalls als Hilfe benutzt werden kann.

Herr Dipl.-Ing. W. KOOP hat sich sehr um die Aufstellung einiger der verwendeten Beziehungen verdient gemacht. Außerdem hat er das Gleichungssystem für die elektronische Rechenmaschine programmiert und die Ergebnisse ausgewertet. Dafür bin ich ihm zu Dank verpflichtet.

6. Bedeutung der Bezeichnungen

a [cm]	Radius des Brennstoffstabes,
D [cm]	hydraulischer Kühlkanaldurchmesser,
f	Reibungsfaktor,
h [cm]	Reaktorhöhe,
h' [cm]	bis $\Phi=0$ extrapolierte Reaktorhöhe,
M_K [kg]	Kritische Masse des zylindrischen Reaktors,
M_{KK} [kg]	Kritische Masse eines kugelförmigen Reaktors gleicher Materialzusammensetzung,
N [MW]	Kühlmittelumwälzleistung für das Core,
N^* [MW]	Kühlmittelumwälzleistung für den übrigen Primärkreis,
p [atm]	Kühlgasdruck,
$q \left(\frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \right)$	Oberflächenleistung am Brennstoff,
$q_{spez} \left(\frac{\text{MW}}{\text{kg Pu}} \right)$	spezifische Leistung,
$q_{spez}^+ \left(\frac{\text{MW}}{\text{kg Pu}} \right)$	aufgrund der Zentraltemperatur zulässige spezifische Leistung,
Q [MW]	Brutto-Wärmeleistung im Core,
R [cm]	kritischer Coreradius,
$R_1 - R_5$	im Text definierte Funktionen,
T_{max} [$^\circ\text{C}$]	maximale Canningtemperatur,
T_0 [$^\circ\text{C}$]	maximale Zentraltemperatur,
T_m [$^\circ\text{C}$]	dazugehörige Canningtemperatur,
S	in der Tabelle angegebener Faktor,
x	Verhältnis Canningvolumen zu Oxydvolumen,
y	Verhältnis UO_2 -Volumen zu PuO_2 -Volumen,
α	Verhältnis Kühlgasvolumen zu Corevolumen,
β_0	Verhältnis Strukturmaterialvolumen zu Corevolumen,
δ	Relativer Eigenbedarf außer Gebläse,
η	Netto-Gesamtwirkungsgrad,
η_{th}	thermischer Wirkungsgrad,
η_i	innerer Gebläsewirkungsgrad,
η_G	Gebläsewirkungsgrad (gesamt),
ϑ_1 [$^\circ\text{C}$]	Kühlmitteleintrittstemperatur in das Core,
ϑ_2 [$^\circ\text{C}$]	Kühlmittelaustrittstemperatur aus dem Core,
ϑ_3 [$^\circ\text{C}$]	Kühlmittelaustrittstemperatur aus dem Wärmetauscher,
$\vartheta(z_m)$	Kühlmitteltemperatur am Ort der max. Canning-Temperatur,
$\lambda \left(\frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$	Wärmeleitfähigkeit des Brennstoffes,
$\rho_B \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$	Dichte des Brennstoffes.

- Literatur:** [1] SMIDT, D.: Nukleonik 3, 257 (1961). — KFZ Karlsruhe. — [5] FRANZE, H. G.: Interner Brüterbericht 18/61, KFZ Karlsruhe. — [6] DEISSLER, R. G., u. M. F. TAYLOR: TID-7529 (Pt. 1), Book 2, S. 462ff. 1957. — [7] SMIDT, D.: Interner Brüterbericht 49/62, KFZ Karlsruhe.
- [2] Nach K. OTT, interner Brüterbericht B 27/61, KFZ Karlsruhe. — [3] LOEWENSTEIN: Okrent, 2nd Int. Conf. PUAE Geneva P/637. — [4] OTT, K.: Interne Brüternotiz 48/61,
-



Erkenntnisse verbreiten ist soviel wie Wohlstand verbreiten — ich meine den allgemeinen Wohlstand, nicht den individuellen Reichtum — denn mit dem Wohlstand verschwindet mehr und mehr das Böse, das uns aus dunkler Zeit vererbt ist.

Alfred Nobel

CDNA00770DEC