

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

Dezember 1969

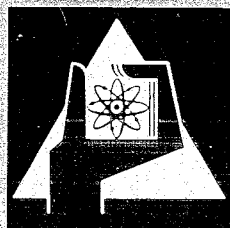
KFK 1118

Institut für Reaktorbauelemente

Brennstäbe mit Innenrippen.

Eine Möglichkeit zur Senkung des Spaltstoffbedarfs
bei Schnellen Brutreaktoren

S. Malang, K. Rust



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Dezember 1969

KFK 1118

Institut für Reaktorbauelemente

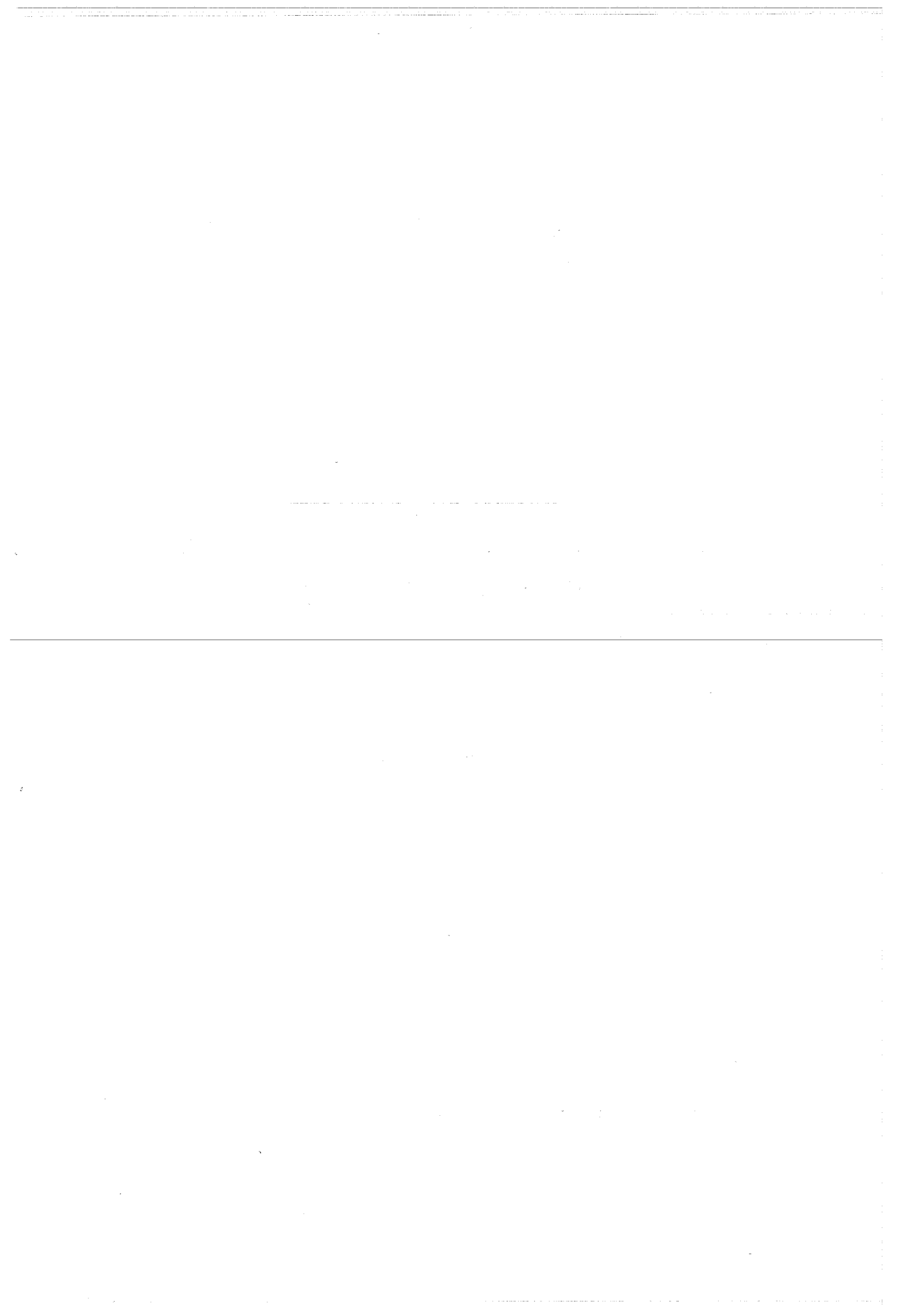
Brennstäbe mit Innenrippen

Eine Möglichkeit zur Senkung des Spaltstoffbedarfs

bei Schnellen Brutreaktoren

S. Malang K. Rust

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG MBH., KARLSRUHE



Inhalt

Aus strategischen Gründen wird bei Schnellen Brutreaktoren ein möglichst kleines Spaltstoffinventar angestrebt. Die Voraussetzung hierfür ist eine hohe Leistungsdichte im Core. Diese wird in erster Linie durch die zulässige Brennstofftemperatur im Zentrum der Brennstäbe begrenzt, welche massgeblich durch die Wärmeleitfähigkeit des Brennstoffes bestimmt ist. Für Schnelle Brutreaktoren wird die Verwendung zweier Brennstoffarten unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit erwogen:

- a) Uran-Plutonium-Mischoxid
- b) Uran-Plutonium-Mischkarbid

Um trotz seiner schlechten Wärmeleitfähigkeit den weitaus besser bekannten und unproblematischeren oxydischen Brennstoff beibehalten zu können, wurde eine Möglichkeit untersucht, die Wärmeleitung desselben innerhalb der Brennstäbe zu verbessern, welcher die folgende Erwägung zugrunde liegt:

Der grösste Temperaturgradient im Brennstoff tritt in Hüllrohrnähe auf. Da hier gleichzeitig die niedrigsten Brennstofftemperaturen vorliegen, ist es möglich, durch metallische Rippen auf der Hüllrohr-Innen-seite die Wärmeleitfähigkeit und damit auch die Stabileistung entscheidend zu steigern, was weitgehend unabhängig von dem verwendeten Kühlmittel ist.

Der nachfolgende Bericht zeigt den Einfluss der Rippengeometrie auf das Temperaturfeld im Brennstab, woraus sich die mit oxydischem Brennstoff erzielbare Stabileistung ergibt.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Mittlere Wärmeleitfähigkeit eines aus Brennstoffoxid und radialen Metalleinsätzen bestehenden Brennstabes	3
3. Ausführungsformen von Brennstäben mit Innenrippen	3
4. Berechnung des Temperaturfeldes in einem innenberippten Brennstab	4
5. Ergebnisse und Diskussion der berechneten Temperaturfelder	6
5.1 Brennstäbe mit innenberippten Hülseinsätzen	6
5.1.1 Einfluss der Rippenform und der Rippenhöhe auf das Temperaturfeld	7
5.1.2 Einfluss des Hülseenvolumens und der Anzahl der Innenrippen auf das Temperaturfeld	8
5.1.3 Einfluss des Brennstabdurchmessers auf das Temperaturfeld	9
5.1.4 Einfluss der Brennstoffdichte und der Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Brennstoff und Hülseinsatz auf das Temperaturfeld	9
5.1.5 Einfluss unterschiedlicher Hülsematerialien auf das Temperaturfeld	10
5.2 Brennstäbe mit integralen Nocken auf der Innenseite des Hüllrohres	11
6. Zusammenfassung	14
Literatur	

Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1: Wärmeleitung von Brennstoff-Metallgemischen bei Parallel- und Reihenschaltung der Mischungselemente
- Abb. 2: Ausführungsformen von Brennstäben mit Innenrippen
Brennstab mit innenberipptem Hülseneinsatz -
- Abb. 3: - Aufteilung des Stabausschnittes A-A in ein Netzwerk aus wärmeleitenden Stäben
- Abb. 4: - Radiales Temperaturprofil, 6 Innenrippen mit radialen Flanken
- Abb. 5: - Radiales Temperaturprofil, 6 spitze Innenrippen
- Abb. 6: - Einfluss der Stableistung und der Rippenhöhe auf die Zentral- und die Rippenkopf-temperatur
- Abb. 7: - Einfluss des Hülsenvolumens auf die Stableistung und die Rippenhöhe
- Abb. 8: - Einfluss der Anzahl der Innenrippen auf die Stableistung und die Rippenhöhe
- Abb. 9: - Einfluss des Innendurchmessers des Hüllrohres auf die Stableistung und die Rippenhöhe
- Abb. 10: - Einfluss der Brennstoffdichte auf die Zentraltemperatur im Brennstoff
- Abb. 11: - Einfluss des Wärmeübergangs vom Brennstoff zum Hülseneinsatz auf die Zentraltemperatur im Brennstoff

Brennstab mit integralen Innennocken

Abb. 12: - Ausschnitt aus einem Brennstab mit Innennocken

Abb. 13: - Aufteilung des Brennstabausschnittes in ein Netzwerk aus wärmeleitenden Stäben

Abb. 14: - Radiales und axiales Temperaturprofil

Abb. 15: Einfluss der Stableistung auf die Zentraltemperatur im Brennstoff bei glatten und innenberippten Brennstäben

1. Einleitung

Ein wichtiges Kriterium für die Auswahl eines Brutreaktors ist, neben Stromerzeugungs- und Investitionskosten sowie Verfügbarkeit, die Grösse des erforderlichen Spaltstoffinventars. Solange nämlich Schnelle Brutreaktoren deutliche Kostenvorteile gegenüber den heute betriebenen und erprobten Kernkraftwerkstypen erwarten lassen, kommt es zunächst darauf an, mit der verfügbaren und in thermischen Reaktoren anfallenden Plutoniummenge möglichst viele Schnelle Reaktoren in Betrieb nehmen zu können. Ein geringes Spaltstoffinventar setzt die Erzielung einer hohen Brennstoffbelastung (MW_{th}/kg) voraus.

Für den Einsatz in Schnellen Leistungsreaktoren sind ausschliesslich stabförmige Brennelemente vorgesehen. Bei einem solchen Brennstab ist die je cm Stablänge erzielbare Leistung unabhängig vom Brennstabdurchmesser. Eine Erhöhung der Brennstoffbelastung lässt sich demzufolge grundsätzlich durch eine Verringerung des Stabdurchmessers erzielen. Diese Möglichkeit ist begrenzt, da mit kleiner werdendem Brennstabdurchmesser die Fabrikations- und Wiederaufbereitungskosten steigen, und daher aus wirtschaftlichen Gründen der Stabdurchmesser ein gewisses Minimum nicht unterschreiten darf.

Die Stableistung ist in erster Linie von den folgenden Grössen abhängig:

- a) von der Oberflächentemperatur des Brennstoffes,
- b) von der zulässigen Zentraltemperatur im Brennstoff,
- c) von der Wärmeleitfähigkeit des Brennstoffes.

Die Oberflächentemperatur des Brennstoffes wird bei gegebener Stableistung im wesentlichen durch die Kühlmitteltemperatur und den erzielbaren Wärmeübergang zwischen Kühlmedium und Brennstaboberfläche bestimmt.

Die Zentraltemperatur im Brennstoff muss bei allen Betriebszuständen unterhalb des Schmelzpunktes desselben bleiben.

Die Wärmeleitfähigkeit hängt vornehmlich von der Art und Dichte des verwendeten Brennstoffes ab.

Um den unproblematischen und weitaus am besten bekannten oxidischen Brennstoff beibehalten zu können, wurde nach Möglichkeiten gesucht, die Wärmeleitung desselben durch metallische Einlagerungen zu verbessern. Für einen solchen Metallzusatz ergeben sich grundsätzlich zwei Varianten:

- a) ungeordnete, über den Querschnitt einheitlich verteilte Anordnung (z.B. Cermets),
- b) radiale, auf die äussere Ringzone beschränkte Anordnung (Rippen).

Die letztgenannte radiale Anordnung geht davon aus, dass der grösste Temperaturgradient in dem äusseren Brennstoffbereich auftritt. In diesem weist der Brennstoff die niedrigste Temperatur auf. Daher ergibt sich die Möglichkeit, durch verhältnismässig geringfügige metallische Einlagerungen in diesem Bereich, welche die Form von Umfangsrippen, Längsrippen oder einer Kombination aus beiden annehmen können, und die die gleiche Richtung wie der Wärmefluss haben, die effektivste Verbesserung des Wärmetransportes vom Brennstoffbereich zur Hülle zu erreichen.

Ausschliesslich verschiedene Formen dieser Anordnung werden daher nachfolgend untersucht um zu zeigen, welche Steigerung der Stabileistung und der Brennstoffbelastung erreichbar sind. Berechnet werden hierbei jeweils die Temperaturfelder im Brennstoff, im Metalleinsatz und im Hüllrohr in Abhängigkeit von der Stabileistung, vom Brennstabdurchmesser und von der Form des eingelagerten Metalls.

2. Mittlere Wärmeleitfähigkeit eines aus Brennstoffoxid und radialen Metalleinsätzen bestehenden Brennstabes

Je nach Anordnung des Metalls im Brennstoff ergibt sich bei einem bestimmten Metallanteil eine recht unterschiedliche mittlere Wärmeleitfähigkeit des betrachteten Systems. In Abb. 1 ist abhängig vom Volumenanteil des eingelagerten Metalls die mittlere Wärmeleitfähigkeit für die Anordnung von radialen bzw. tangentialen Wärmestrassen dargestellt, wie sie sich bei Verwendung von radialen Rippen und von konzentrischen Metallringen ergeben. Cermets mit ihren "ungeordneten Wärmestrassen" liegen zwischen diesen beiden Grenzfällen.

Die in dieser Abbildung gezeigten Kurven wurden mit einem idealisierten Modell gerechnet, wobei die anteilmässigen Wärmewiderstände von Brennstoff und Metall im Falle der radialen Rippen parallel, im Falle konzentrischer Ringe in Reihe geschaltet waren. Tatsächlich liegt die mittlere Wärmeleitfähigkeit bei einer Rippenanordnung noch höher, weil auch im Bereich der Rippenflanken Wärme vom Brennstoff an das Metall übertragen wird. Zur Untersuchung der möglichen Leistungssteigerung durch Innenrippen ist daher die Berechnung des Temperaturfeldes in dem Brennstabquerschnitt erforderlich.

3. Ausführungsformen von Brennstäben mit Innenrippen

Thermodynamisch bieten Umfangsrippen bzw. Gewinde die gleiche Möglichkeit wie Längsrippen. Der Effekt der Innenrippen auf den Wärmetransport steigt mit grösser werdenden Rippenhöhen. Gleichzeitig steigt jedoch bei einem bestimmten Metallanteil auch die Rippenkopftemperatur. Die Rippenkopftemperatur und damit die Rippenhöhe werden begrenzt durch die Schmelztemperatur des Metalls und die chemische Verträglichkeit zwischen Brennstoff und Metall.

Die Temperaturdifferenzen zwischen Rippenkopf und Rippenfuss können unzulässig hohe Wärmespannungen zur Folge haben. Deshalb scheiden durchgehende integrale Längsrippen auf der Hüllrohrinnenseite aus. Es werden nur die in Abb. 2 dargestellten beiden Ausführungsformen von Brennelementen mit Innenrippen betrachtet:

- a) kurze Hülseneinsätze mit Längsrippen,
- b) Hüllrohre mit integralen Nocken.

Die Herstellung berippter Hülseneinsätze kann auf pulvermetallurgischem Weg erfolgen. Die integralen Nocken entstehen, wie aus Abb. 2 ersichtlich, durch Einbringen links- und rechtsgängiger Nuten. Zur Herstellung dieser verdrallten Nuten wird ein ökonomisches, elektrochemisches Abtrageverfahren entwickelt, d.h. ein Elysiersenken mit erhöhtem Vorschub.

Bei beiden Varianten wird der Brennstoff durch Vibrieren eingebracht.

4. Berechnung des Temperaturfeldes in einem innenberippten Brennstab

Die Bestimmung der mit innenberippten Brennstäben erzielbaren Leistung, bzw. des Temperaturfeldes im Brennstoff, in den Rippen und im Hüllrohr ist in Anbetracht der komplizierten Geometrie auf analytischem Wege nicht möglich. Die Temperaturberechnung erfolgte daher unter Verwendung der Relaxationsmethode der Thermodynamik [1]. Hierbei handelt es sich um die Umwandlung der partiellen Differentialgleichung in eine Differenzgleichung. Zu diesem Zweck wird der Körper in ein Netzwerk aufgeteilt. Die jeweilige Masse der so entstandenen Zellen wird in Punkten zusammengefasst, die durch wärmeleitende Stäbe miteinander verbunden sind. Zur Berechnung des Temperaturfeldes muss für jeden Punkt des Netzwerkes die Wärmebilanz gebildet werden. Dadurch ergibt sich ein lineares

Gleichungssystem, dessen Summe an Unbekannten gleich der Anzahl der Massepunkte ist. Die Lösung dieses Gleichungssystems ergibt das Temperaturfeld in dem Körper.

Mit dem nach dieser Methode arbeitenden Rechenprogramm RELAX [2] wurden unter Variation des eingelagerten Metallvolumens, der Rippengeometrie, der Anzahl der Innenrippen, des Brennstabdurchmessers, des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Brennstoff und Strukturmaterial und der Brennstoffdichte das Temperaturprofil in innenberippten Brennstäben für verschiedene Stableistungen berechnet. Die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitung im Brennstoff und im Strukturmaterial wurde berücksichtigt. Die Berücksichtigung des Nachsinterns des Brennstoffes im Bereich hoher Temperaturen, welches eine Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit und damit ein Absenken der Zentraltemperatur bewirkt, hätte einen wesentlichen Mehraufwand an Rechenarbeit bedeutet. Der Vergleich von innenberippten mit konventionellen Brennstäben wird durch diese Vernachlässigung nicht beeinträchtigt.

Die Berücksichtigung dieses Effekts ergibt in beiden Fällen eine Erhöhung der Stableistung um ca. 20 %.

Die Kühlmitteltemperatur und die Wärmeübergangszahl zwischen Brennelementhülle und Kühlmittel wurden so gewählt, dass sich in allen Fällen die gleiche Hüllrohroberflächentemperatur ergab, um vergleichbare Ergebnisse für alle Kühlmittel zu erhalten. Die Übertragung der Resultate auf Fälle mit anderen Hüllenoberflächentemperaturen ist nicht völlig exakt, da sich hierbei das ganze Temperaturniveau verschiebt. Der hierbei entstehende Fehler ist jedoch gering, da sich die Wärmeleitfähigkeiten des Brennstoffes und des Strukturmaterials bei einer Temperaturverschiebung um 100 °C nur unwesentlich ändern.

Untersucht wurden folgende Fälle:

a) Brennstäbe mit innenberippten Hülseneinsätzen.

Variiert wurden Stableistung, Brennstabdurchmesser,

Metallanteil, Rippenhöhe, Brennstoffdichte, Werkstoff des Hülseneinsatzes und Wärmeübergangszahl zwischen Brennstoff und Hülseneinsatz.

- b) Brennstäbe mit Nocken auf der inneren Hüllrohr-
oberfläche. Variiert wurden Stableistung und Nocken-
höhe.

5. Ergebnisse und Diskussion der berechneten Temperaturfelder

5.1 Brennstäbe mit innenberippten Hülseneinsätzen (siehe Abb. 2a)

Die Berechnung der radialen Temperaturprofile wurde für einen repräsentativen Hüllrohrausschnitt durchgeführt. Für einen Brennstab mit Hülseneinsatz mit 6 Innenrippen, deren Flanken radial verlaufen, ist dieser Hüllrohrausschnitt in Abb. 3 dargestellt. Für jeden der eingezeichneten Punkte dieses Netzwerkes, das durch 2 Adiabaten begrenzt ist, wurde die zugehörige Temperatur bestimmt.

Der Rechnung lagen folgende Daten zugrunde:

Brennstabdurchmesser:	$D_a = 7,0 \text{ mm}$
Hüllwandstärke:	$s = 0,4 \text{ mm}$
Hüllmaterial:	Incoloy 800
Hülsenvolumen:	25 % des Brennstoff- volumens eines "konventionellen" Brennstabes
Hülsenwandstärke:	$s' = 0,2 \text{ mm}$
Hülsenmaterial:	Incoloy 800
Rippenhöhe:	$h = 1,2 \text{ mm}$
Stableistung:	$\chi = 525 \text{ W/cm}$
Brennstoff:	$\text{UO}_2 - \text{PuO}_2$

Brennstoffdichte:	$\rho = 85 \% \text{ d. th. D.}$
Wärmeübergang Brennstoff-Hülse:	$\alpha_1 = 1,0 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{grad})$
Wärmeübergang Hülse-Hülle:	$\alpha_2 = 1,0 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{grad})$
Wärmeübergang Hülle-Kühlmittel:	$\alpha_3 = 1,9 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{grad})$
Kühlmitteltemperatur:	$T = 450 \text{ }^\circ\text{C}$

5.1.1 Einfluss der Rippenform und der Rippenhöhe auf das Temperaturfeld

Das Ergebnis der Temperaturfeldberechnung ist in Abb. 4 gezeigt. Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, dass im Vergleich zum konventionellen Brennstab, welcher gleichen Betriebsbedingungen unterworfen ist, die Zentraltemperatur durch die Innenberippung um ca. $340 \text{ }^\circ\text{C}$ reduziert wird. Ferner zeigt diese Abbildung, dass im Gegensatz zum theoretischen Modell der Abb. 1 auch im Bereich der Rippenflanken Wärme vom Brennstoff zur Rippe übertragen wird. Dadurch ergibt sich eine wirksamere Verbesserung der mittleren Wärmeleitfähigkeit als es dem Diagramm in Abb. 1 entspricht.

Bedingt durch den Einfluss der 1,2 mm hohen Innenrippen des Hülseneinsatzes tritt auf der Hüllrohrinnenoberfläche direkt unter den Rippen eine um $24 \text{ }^\circ\text{C}$ höhere Temperatur auf als an den entsprechenden Stellen zwischen den Innenrippen. Der Wärmeübergang zwischen Hüllrohr und Kühlmittel hat nur einen geringen Einfluss auf diese Temperaturvariation. Selbst bei einer starken Vergrößerung der Wärmeübergangszahl von 1,9 auf $12,5 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{grad})$ wird diese Temperaturschwankung nur von $24 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $17 \text{ }^\circ\text{C}$ verkleinert.

Um den Einfluss der Rippenform zu zeigen, ist in Abb. 5 das Temperaturfeld in einem Brennstab dargestellt, dessen Innenrippen nicht radiale, sondern stärker geneigte Flanken haben. Rippenhöhe

und Rippenvolumen wurden beibehalten. Ein Vergleich der Abb. 4 und Abb. 5 zeigt, dass die unterschiedliche Rippenform keinen grossen Einfluss auf die Temperaturverteilung im Brennstab hat. Bei der spitzen Rippe ist die Rippenkopftemperatur um etwa 10 °C niedriger und die Zentraltemperatur um etwa 75 °C höher als bei Rippen mit radialen Flanken.

Einen wesentlich grösseren Einfluss auf die Zentraltemperatur im Brennstoff und die Rippenkopftemperatur hat die Höhe der Innenrippen. Der Zusammenhang zwischen Zentraltemperatur und Rippenkopftemperatur in Abhängigkeit von der Stabileistung und der Rippenhöhe wird in Abb. 6 gezeigt. Um die Aussage dieses Diagrammes allgemein zu halten, wurden nicht die Temperaturen angegeben, die sich im Zentrum des Brennstoffes bzw. am Rippenkopf einstellen, sondern die jeweiligen Differenzen zur mittleren Oberflächentemperatur des Hüllrohres.

Bei konstantem Volumen des innenberippten Hülseinsatzes, durch den 25 % des Brennstoffvolumens durch Strukturmaterial ersetzt sind, und konstanter Stabileistung nimmt mit zunehmender Rippenhöhe die Zentraltemperatur ab, während die Rippenkopftemperatur steigt. Je grösser die zulässige Rippenkopftemperatur ist, desto höher können die Rippen gemacht werden, was einen entscheidenden Einfluss auf die zulässige Stabileistung hat.

5.1.2 Einfluss des Hülsenvolumens und der Anzahl der Innenrippen auf das Temperaturfeld

Die Zentraltemperatur im Brennstoff und die Rippenkopftemperatur dürfen eine obere Grenze

nicht überschreiten. Eine gegebene Stableistung kann daher thermodynamisch nur dann realisiert werden, wenn bei einem bestimmten Volumenanteil des Hülseneinsatzes die Rippen eine definierte optimale Höhe haben. Diesen Zusammenhang zeigt Abb. 7 für den Fall, dass der Hülseneinsatz mit 6 Innenrippen versehen wird.

Durch Vergrößerung der Rippenanzahl von 6 auf 12, kann die Stableistung, wie Abb. 8 zeigt, nur geringfügig erhöht werden, wobei die Herstellung solcher Brennstäbe schwieriger würde.

5.1.3 Einfluss des Brennstabdurchmessers auf das Temperaturfeld

Die Wahl des Stabdurchmessers stellt einen Kompromiss dar zwischen der Forderung nach kleinen Fabrikationskosten, d.h. möglichst grossem Durchmesser, und einem geringen Spaltstoffinventar, d.h. möglichst kleinem Durchmesser.

Während beim "glatten" Brennstab die erreichbare Leistung unabhängig vom Durchmesser ist, steigt sie bei einem innenberippten Stab mit grösser werdendem Durchmesser an, wie aus Abb. 9 hervorgeht. Somit ergeben sich durch die Verwendung von Innenrippen neue Gesichtspunkte bei der Festlegung des optimalen Stabdurchmessers.

5.1.4 Einfluss der Brennstoffdichte und des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Brennstoff und Hülseneinsatz auf das Temperaturfeld

Der Einfluss der Brennstoffdichte auf die Zentraltemperatur ist bei einem innenberippten

Brennstab kleiner als bei einem konventionellen Stab. Dies folgt daraus, dass im Bereich der Innenrippen der grösste Teil des Wärmestromes durch die Rippen abgeführt wird, so dass die mit geringer werdender Dichte abnehmende Wärmeleitfähigkeit des Brennstoffes weniger Einfluss hat [3]. Aus Abb. 10 geht hervor, dass bei Verringerung der Brennstoffdichte von 85 % auf 80 % d. th. D. die Zentraltemperatur nur um 35 °C ansteigt.

Infolge der durch die Rippen vergrösserten Brennstoffoberfläche hat auch die Wärmeübergangszahl zwischen Brennstoff und innenberipptem Hülseneinsatz einen geringeren Einfluss auf die Zentraltemperatur als bei einem herkömmlichen Brennstab. Wie Abb. 11 zeigt, nimmt bei einer Reduzierung der Wärmeübergangszahl von 1,0 auf 0,75 W/(cm²·grad) die Zentraltemperatur um etwa 75 °C zu.

5.1.5 Einfluss unterschiedlicher Hülsenmaterialien auf das Temperaturfeld

An den Werkstoff der Hülseneinsätze werden folgende Forderungen gestellt:

- a) geringe Neutronenabsorption,
- b) hoher Schmelzpunkt,
- c) möglichst grosse Wärmeleitfähigkeit,
- d) gute chemische Verträglichkeit mit dem Brennstoff.

Diese Bedingungen werden am besten von reinem Eisen und mit geringem Abstand von Incoloy 800 erfüllt. Die Neutronenabsorption von Eisen beträgt etwa 70 % der von Incoloy 800. Der

Schmelzpunkt von Eisen liegt bei 1530 °C, der von Incoloy 800 bei ca. 1350 °C. In der Wärmeleitfähigkeit unterscheiden sich die beiden Werkstoffe im interessierenden Temperaturbereich kaum [4], [5]. Infolgedessen werden beim Übergang von Incoloy 800 auf Eisen die Rippenkopftemperatur und die Zentraltemperatur nur um ca. 10 °C angehoben. Auch die chemische Verträglichkeit mit dem Brennstoff ist bei beiden Werkstoffen ungefähr gleich gut. Nach [6] sind die Eisen- und Nickelbasislegierungen mit UO_2 praktisch bis zum Schmelzpunkt der Systeme, d.h. 1300 - 1400 °C, gut verträglich. Eine ähnlich gute Verträglichkeit ist auch beim PuO_2 mit Eisen und rostfreiem Stahl festgestellt worden [7].

5.2 Brennstäbe mit integralen Nocken auf der Innenseite des Hüllrohres (siehe Abb. 2b)

Wie aus den bisherigen Ausführungen hervorgeht, beträgt die mögliche Erhöhung der Stableistung bei Verwendung von Brennstäben mit innenberippten Hülseneinsätzen 25 bis 30 % gegenüber glatten Stäben [8]. Bei der Betrachtung des radialen Temperaturprofils in einem solchen Stab, das in Abb. 4 dargestellt ist, fällt der grosse Temperatursprung zwischen Hülseneinsatz und Hüllrohr auf. Dieser bewirkt eine Erhöhung der Zentraltemperatur um rund 250 °C. Durch Vermeidung dieses Temperatursprunges könnte die Stableistung um weitere 25 % auf ca. 50 % gesteigert werden. Theoretisch ist dies möglich durch integrale Rippen auf der Innenseite des Hüllrohres. Durch die Temperaturdifferenz zwischen Hüllrohr und den Köpfen der Rippen würden sich jedoch Wärmespannungen ergeben, die das Hüllrohr gefährden könnten.

Eine Möglichkeit, diese Wärmespannungen zu verkleinern, bieten unterbrochene Rippen, bzw. Nocken, auf der Innenseite des Hüllrohres. In Abb. 12 ist ein Viertel eines solchen Nockens mit dem zugehörigen Hüllrohrausschnitt dargestellt. Die Kantenlänge des quadratischen Nockens beträgt am Fuss ca. 1 mm. Die Nuten zwischen den Nocken haben die gleiche Breite. Zur Berechnung des dreidimensionalen Temperaturfeldes im Brennstoff, Nocken und Hüllrohr wurden in axialer Richtung die in Abb. 12 angedeuteten 5 Schnitte BB bis FF gelegt. Dabei genügt es, den vierten Teil eines Nockens zu betrachten, der durch 3 Flächen begrenzt wird, über die kein Wärmetausch mit der Umgebung stattfindet. Die Aufteilung eines solchen Brennstabausschnittes in ein Gitterwerk aus wärmeleitenden Stäben, durch welche die Massepunkte miteinander verbunden sind, ist aus Abb. 13 für die einzelnen Schnittebenen zu ersehen. Der Berechnung des Temperaturfeldes, das sich aus 169 Punkten zusammensetzt, liegen folgende Daten zugrunde:

Brennstabdurchmesser:	$D_a = 7,0 \text{ mm}$
Hüllwandstärke:	$s = 0,4 \text{ mm}$
Hüllmaterial:	Incoloy 800
durch Innennocken ersetztes Brennstoffvolumen:	ca. 20 %
Nockenhöhe:	$h = 1,3 \text{ mm}$
Stableistung:	$\chi = 630 \text{ W/cm}$
Brennstoff:	$\text{UO}_2 - \text{PuO}_2$
Brennstoffdichte:	$\rho = 85 \% \text{ d. th. D.}$
Wärmeübergang Brennstoff-Hülle:	$\alpha_1 = 1,0 \text{ W/(cm}^2 \cdot \text{grad)}$
Kühlmitteltemperatur:	$T = 450 \text{ }^\circ\text{C}$

Das Ergebnis der Temperaturfeldberechnung ist in Abb. 14 in radialer und in axialer Richtung dargestellt. Die Zentraltemperatur im Brennstoff beträgt ca. 2300 °C, die Rippenkopftemperatur ca. 1050 °C.

Beide Temperaturen liegen somit um 500 bzw. 300 °C unter den Schmelztemperaturen von $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ bzw. Incoloy 800. Eine Verringerung der Nockenhöhe um 0,1 mm würde eine Erhöhung der Zentraltemperatur um ca. 80°C und eine Erniedrigung der Rippenkopftemperatur um ca. 25 °C ergeben.

Aus dem in Abb. 14 dargestellten Temperaturfeld ist ersichtlich, dass der Wärmestrom im Hüllrohr unter den Nocken um ca. 30 % grösser ist als in dem Bereich zwischen den Nocken. Dies hat zur Folge, dass im Falle der Dampfkühlung die Oberflächentemperatur der Hülle über den Nocken um etwa 35 °C höher ist als im Bereich zwischen den Nocken.

Eine ähnliche Temperaturvariation an der Oberfläche des Hüllrohres ergibt sich auch für Brennstäbe, die mit Natrium gekühlt sind. Durch den günstigeren Wärmeübergang ($\alpha = 12,5 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{grad}$) zwischen Brennstab und Flüssigmetall wird das Temperaturfeld im Hüllrohr nur unwesentlich beeinflusst. An der äusseren Hüllrohroberfläche schwankt die Temperatur in diesem Fall um ca. 25 °C.

Durch den Einfluss der Innemocken auf den Wärmetransport ergeben sich sowohl für dampf- als auch für natriumgekühlte Brennstäbe an der inneren Hüllrohroberfläche zwischen den Nocken Temperaturen, die um 10 - 15 °C niedriger sind als bei "innen glatten" Brennstäben gleicher Stableistung, was bei den Festigkeitsbetrachtungen zu berücksichtigen ist.

6. Zusammenfassung

Für zwei Arten von innenberippten Brennstäben, nämlich kurze Hülseneinsätze mit Innenrippen sowie integrale Nocken auf der Hüllrohrinnenseite, wurde das Temperaturfeld innerhalb des Brennstabes berechnet. Das Ergebnis ist in Abb. 15 dargestellt. Aus dieser Abbildung ist ersichtlich, dass bei gleicher Zentraltemperatur die Leistung von Brennstäben mit innenberippten Hülseneinsätzen um ca. 25 % und bei Verwendung von Innennocken um ca. 50 % höher liegt als bei konventionellen Brennstäben.

Bei der Variation aller interessierenden Parameter, wie Rippenhöhe, Rippenvolumen, Rippenanzahl, Brennstabdurchmesser, Brennstoffdichte, sowie der Wärmeübergangszahl zwischen Brennstoff und der Hülle ergab sich, dass die erreichbare Leistung vor allem durch die Rippenhöhe bestimmt wird. Diese Höhe wird begrenzt durch die zulässige Temperatur im Rippenkopf.

Ausserdem zeigte es sich, dass die erzielbare Leistung im Gegensatz zum konventionellen Brennstab nicht unabhängig vom Stabdurchmesser ist, sondern mit grösser werdendem Durchmesser ansteigt. Hieraus ergeben sich neue Gesichtspunkte für die Festlegung des optimalen Stabdurchmessers.

Literatur

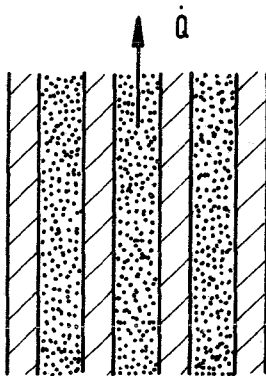
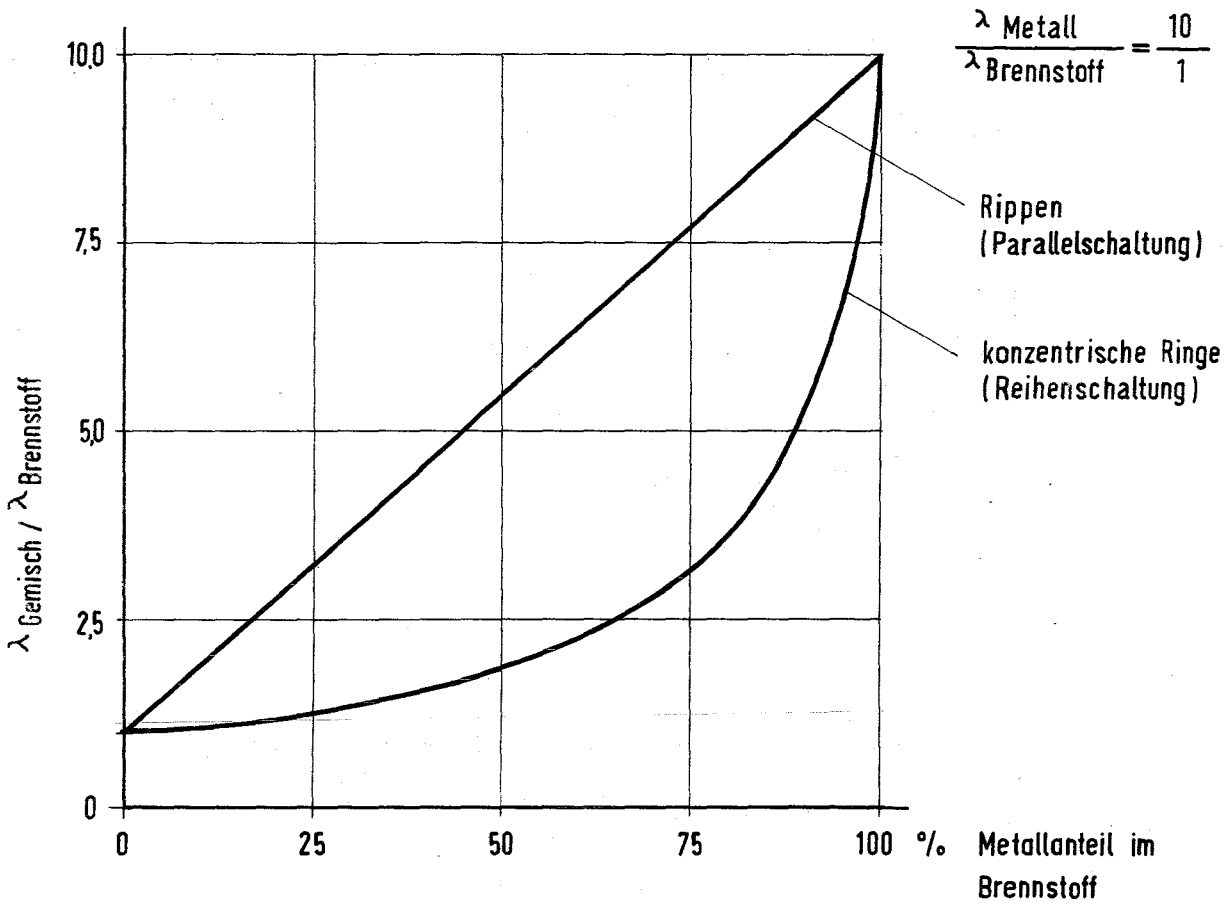
- [1] DUSINBERRE G.M.:
"Numerical Analysis of Heat Flow".
McGraw-Hill Book Company, New York 1949
- [2] MALANG S., K. RUST:
"RELAX - Ein Fortran Programm zur numerischen
Bestimmung von Temperaturfeldern mittels der
Relaxationsmethode der Thermodynamik".
KFK 1053, Sept. 1969
- [3] BEISSWENGER H. et al.:
"Die Entwicklung von Brennelementen Schneller
Brutreaktoren".
KFK 700, Dez. 1967
- [4] Technical Bulletin T-40:
"Engineering Properties of Incoloy Alloy 800".
The International Nickel Comp., Inc.
Huntington, WVA, 1964
- [5] LANDOLT-BÖRNSTEIN:
"Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie,
Astronomie, Geophysik, Technik".
IV. Band, Technik, Teil 2, Stoffwerte und Ver-
halten metallischer Werkstoffe, Bandteil a.
- [6] BÖHM H. et al.:
"Hüllwerkstoffe für Schnelle Brutreaktoren".
KFK 985, Juli 1969
- [7] GRISON E., W.B.H. LORD, R.D. FOWLER:
"Plutonium 1960 (Properties of Plutonium based
Fuels)".
Cleaver-Hume Press Ltd., London 1961
- [8] SMIDT D., G.SCHUSTER
"Die Vergleichsstudie der ENEA über Schnelle
Reaktoren".
Atomwirtschaft, August 1969

Nomenklatur

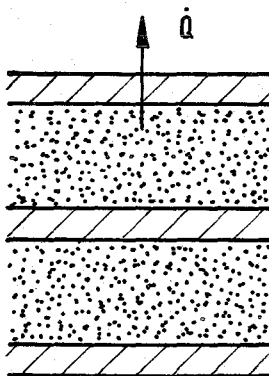
D	mm	Durchmesser
h	mm	Rippenhöhe
\dot{Q}	W	Wärmestrom
s	mm	Wandstärke der Hüllrohre
s'	mm	Wandstärke der Hülse
T	°C	Temperatur
V	mm ³	Volumen
z		Anzahl der Innenrippen
α	W/(cm ² ·grd)	Wärmeübergangszahl
λ	W/(cm·grd)	Wärmeleitfähigkeit
ρ	gr/cm ³	Dichte
χ	W/cm ³	Stableistung

Indices

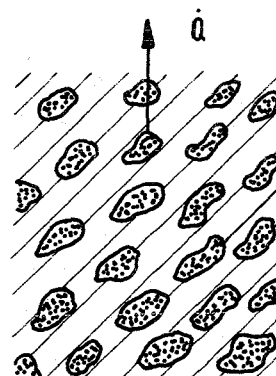
a	aussen
i	innen
RK	Rippenkopf
Z	Brennstabzentrum



Metall parallel zum
Wärmefluß z.B. Rippen
(Parallelschaltung von
Widerständen)



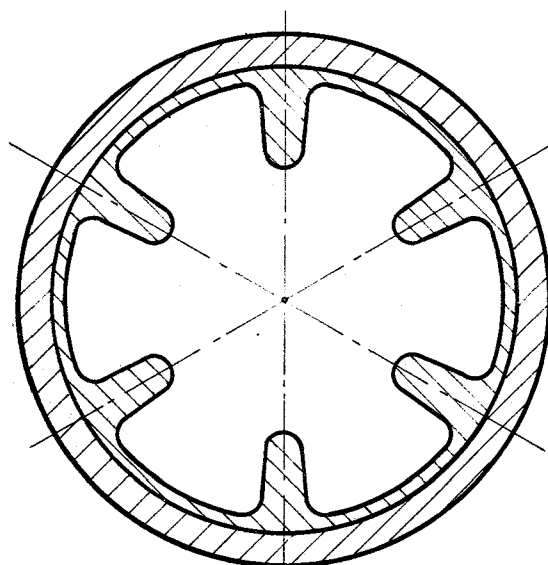
Metall senkrecht zum
Wärmefluß z.B. konzent.
Ringe (Reihenschaltung
von Widerständen)



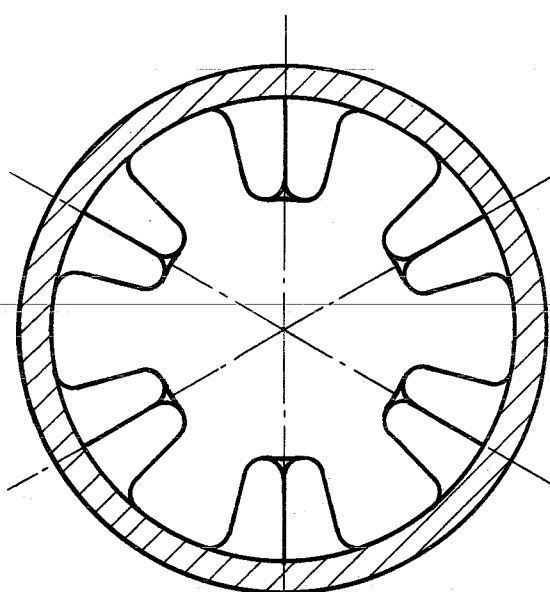
Cermets

Wärmeleitung von Brennstoff-Metallgemischen bei Parallel-
und Reihenschaltung der Mischungselemente

Abb. 1

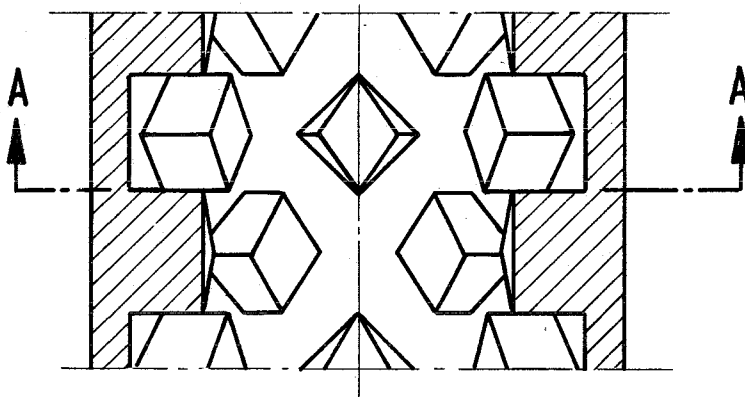


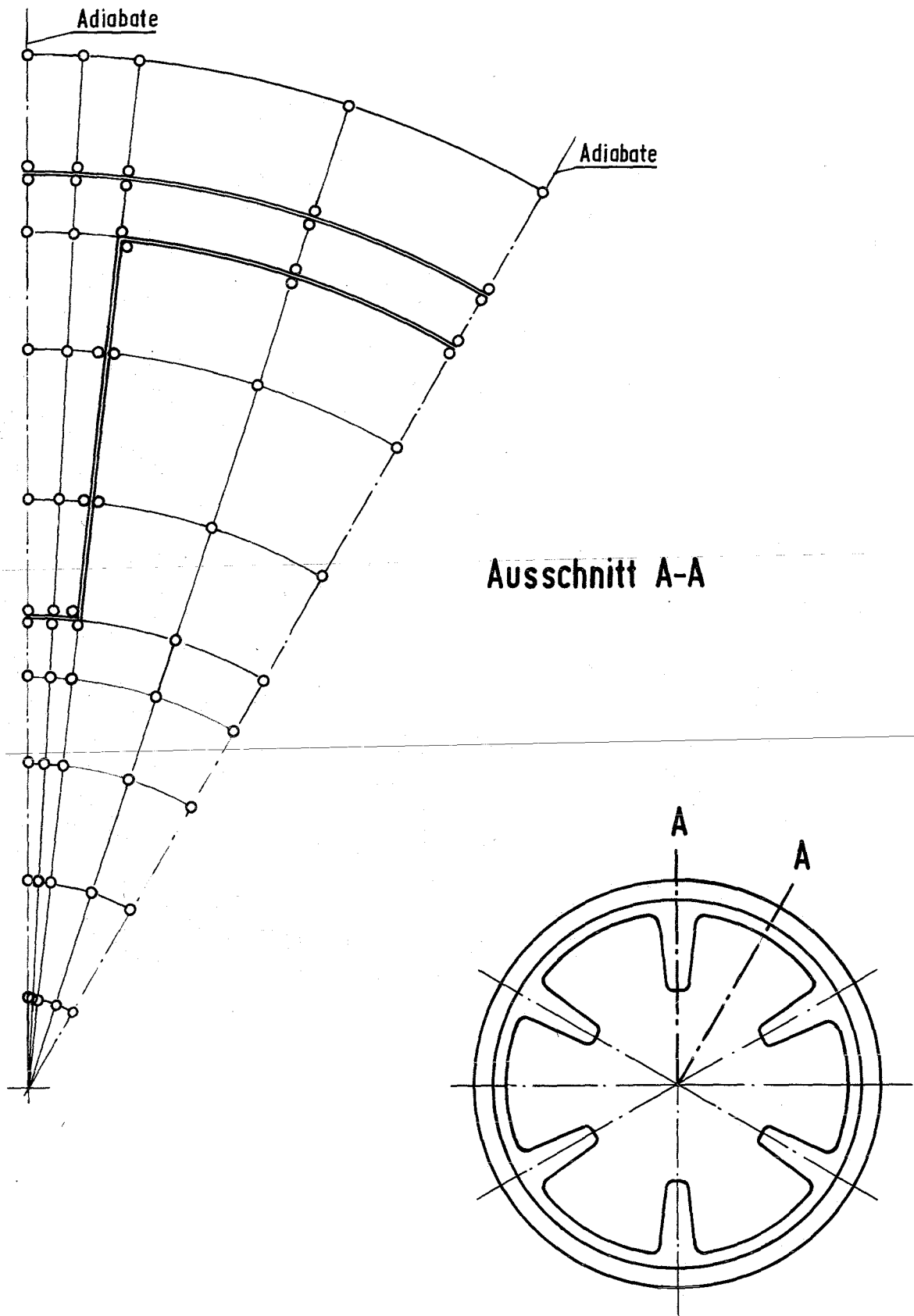
a) Hüllrohr und Hülseinsatz
mit Innenrippen



b) Hüllrohr mit integralen
Nocken

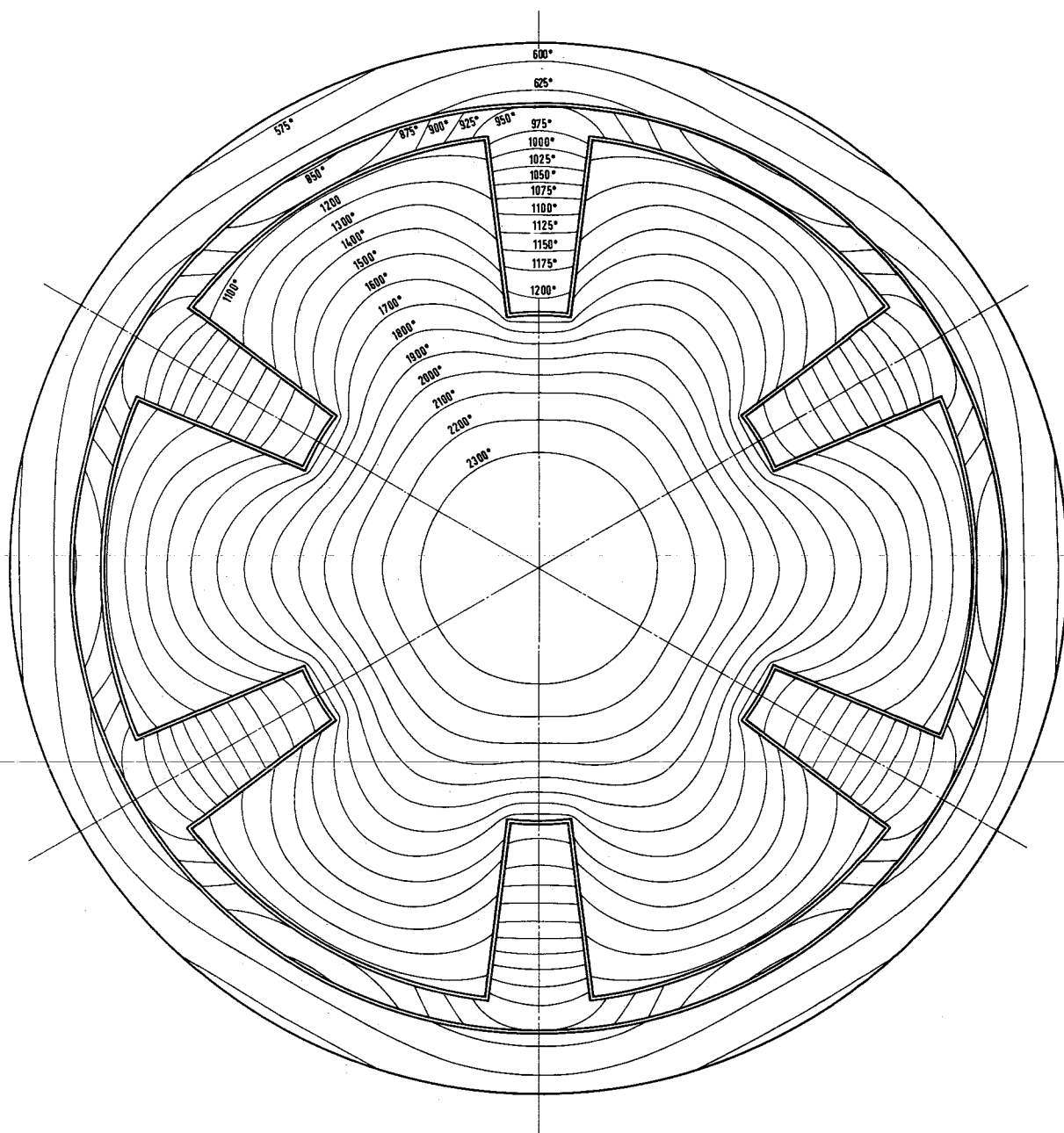
Schnitt A - A





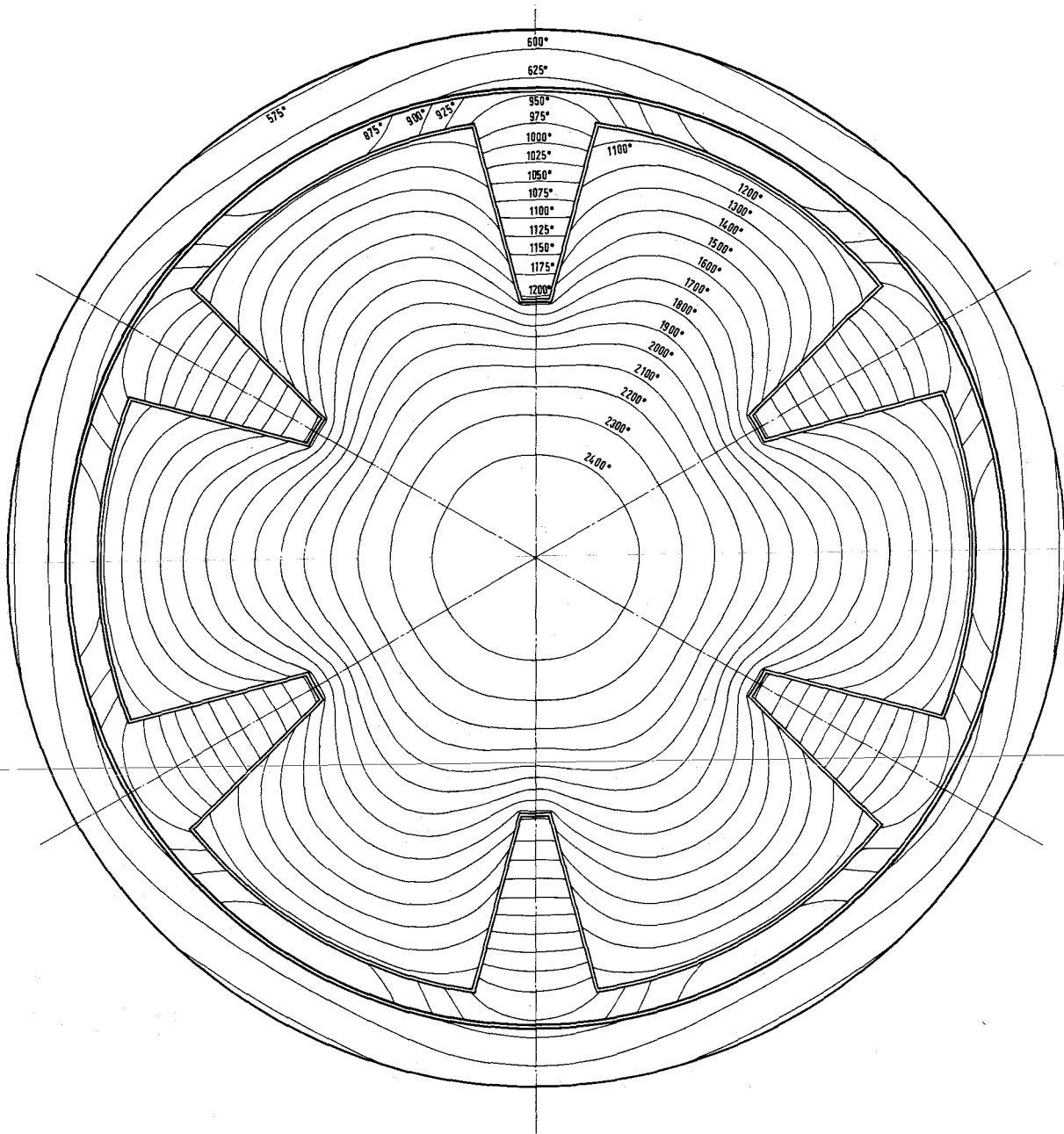
Brennstab mit innenberipptem Hülseinsatz :
 Aufteilung des Stabausschnittes A-A in ein
 Netzwerk aus wärmeleitenden Stäben

Abb. 3



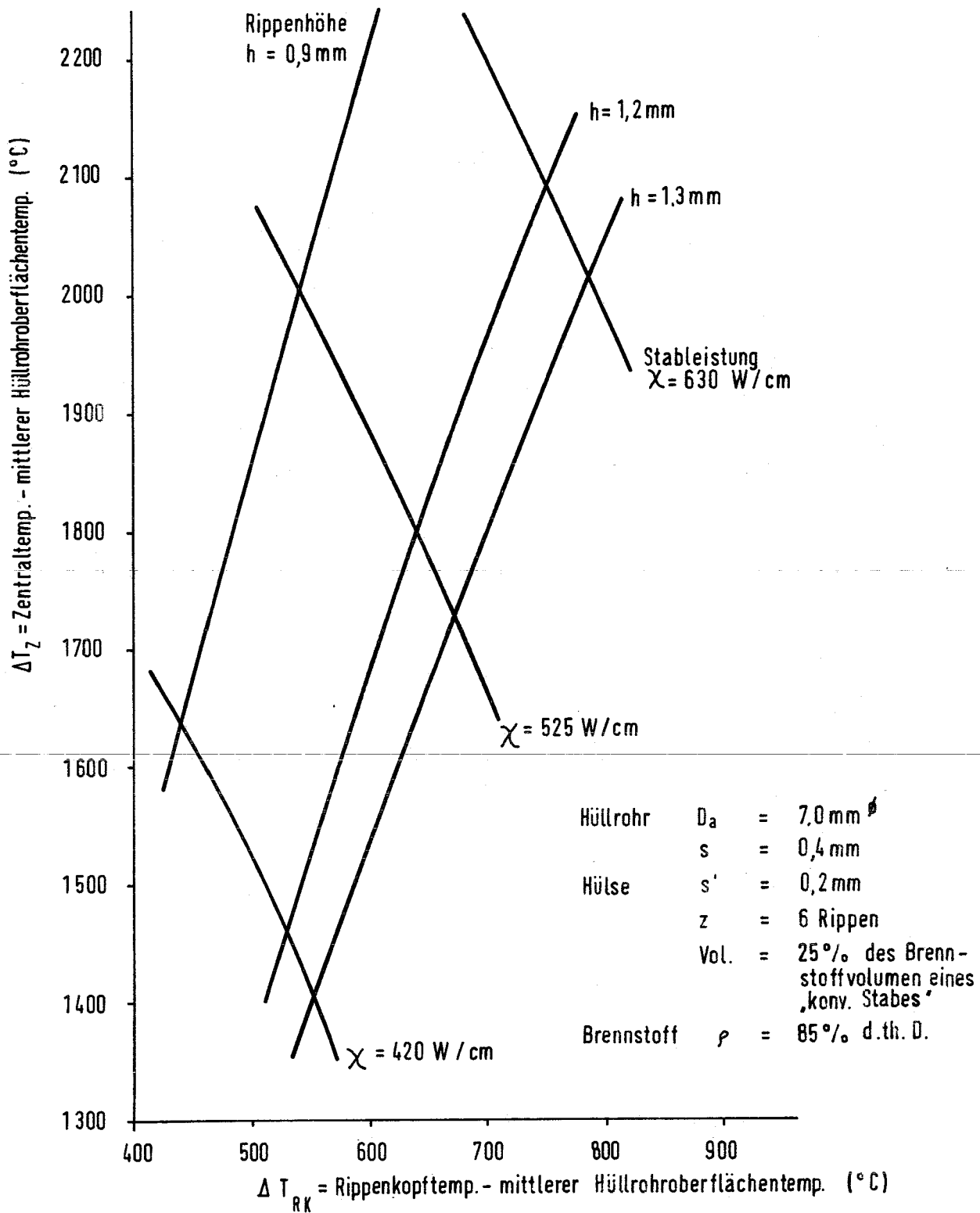
**Brennstab mit innenberipptem Hülseinsatz:
 Radiales Temperaturprofil, 6 Innenrippen mit radialen
 Flanken**

Abb. 4

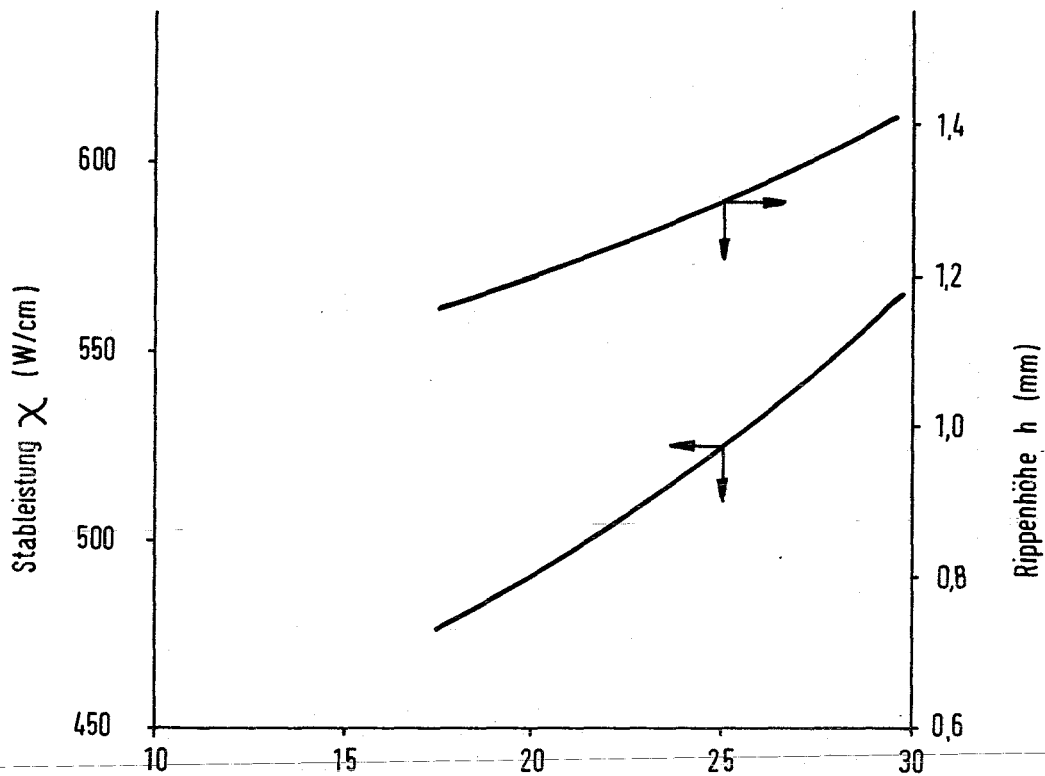


Brennstab mit innenberipptem Hülseinsatz:
 Radiales Temperaturprofil, 6 spitzen Innenrippen

Abb. 5



Brennstab mit innenberipptem Hülseinsatz:
Einfluß der Stableistung und der Rippenhöhe auf die
Zentral- und die Rippenkopftemperatur

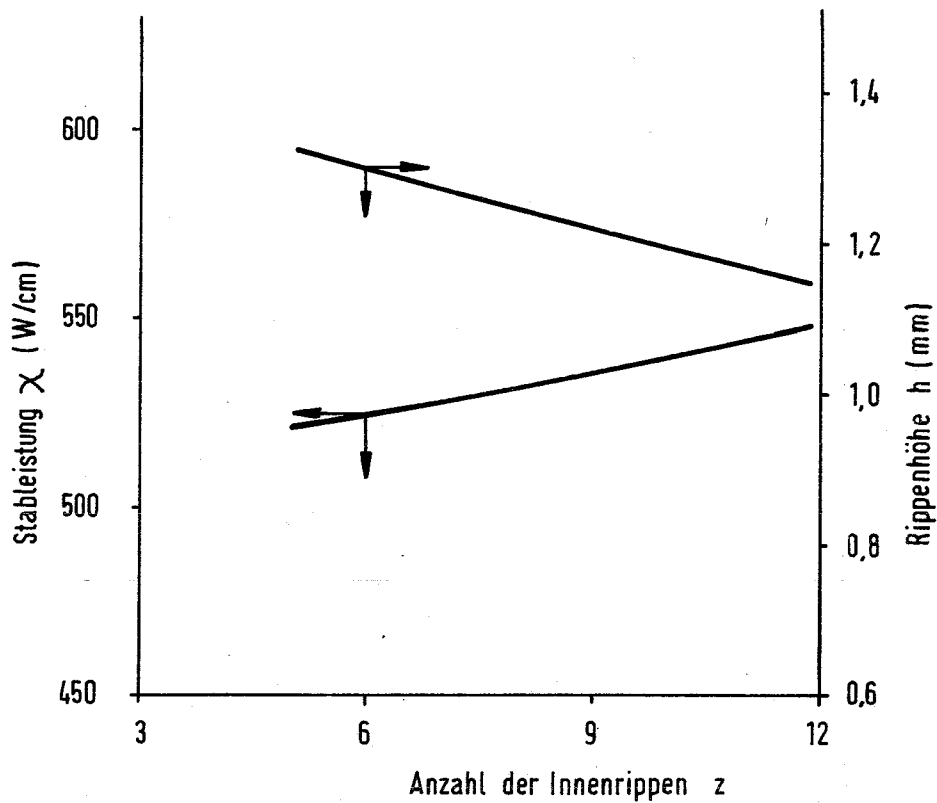


Durch Hülseinsätze ersetztes Brennstoffvolumen eines „konv. Brennstabes“ (%)

Hüllrohr	D_a	=	7,0 mm ϕ
	s	=	0,4 mm
Hülse	s'	=	0,2 mm
	z	=	6 Rippen
	T_{RK}	\sim	1250 °C
Brennstoff	ρ	=	85 % d.th.D.
	T_Z	\sim	2300 °C

Brennstab mit innenberipptem Hülseinsatz:
Einfluß des Hülseenvolumens auf die Stableistung und die Rippenhöhe

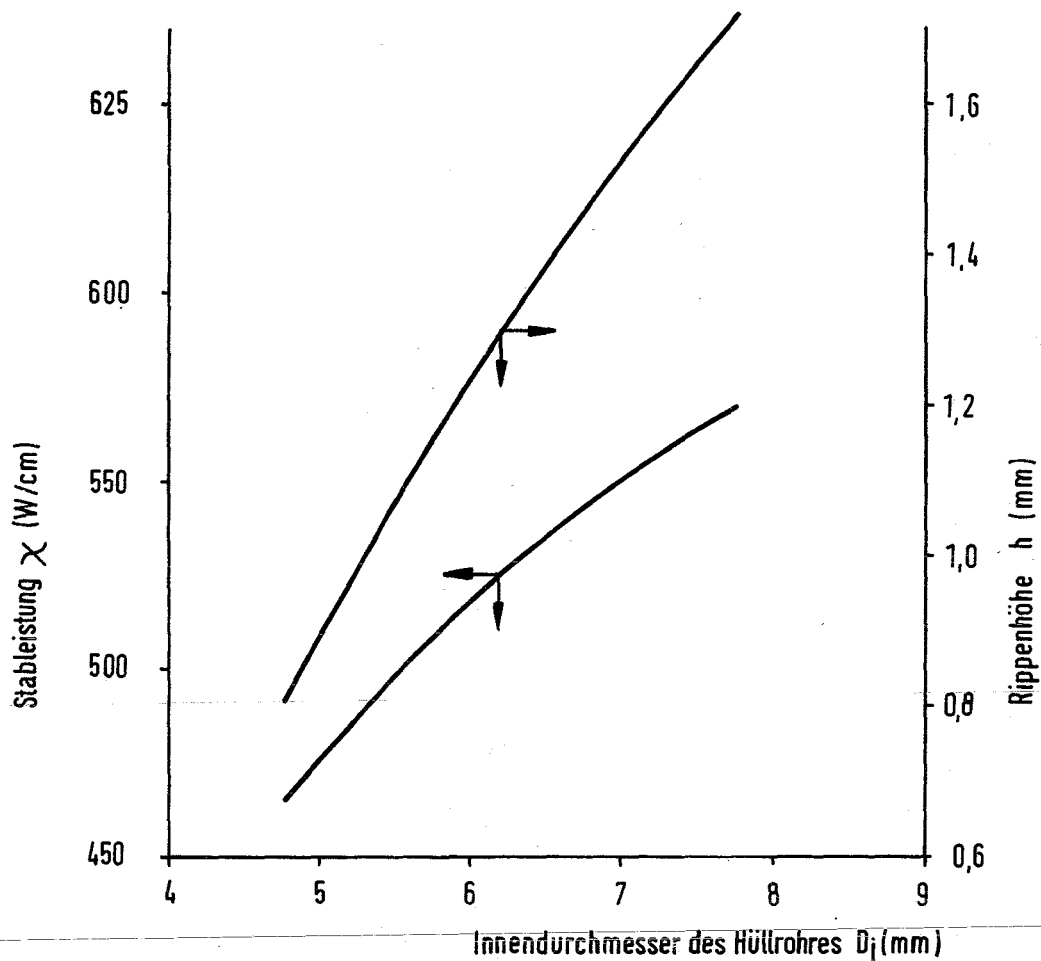
Abb. 7



Hüllrohr	D_a	=	7,0 mm ϕ
	s	=	0,4 mm
Hülse	s'	=	0,2 mm
	Vol.	=	25% des Brennstoff- volumen eines „konv. Stabes“
	T_{RK}	~	1250 °C
Brennstoff	ρ	=	85 % d. th. D.
	T_z	~	2300 °C

Brennstab mit innenberipptem Hülseinsatz :
Einfluß der Anzahl der Innenrippen auf die Stableistung
und die Rippenhöhe

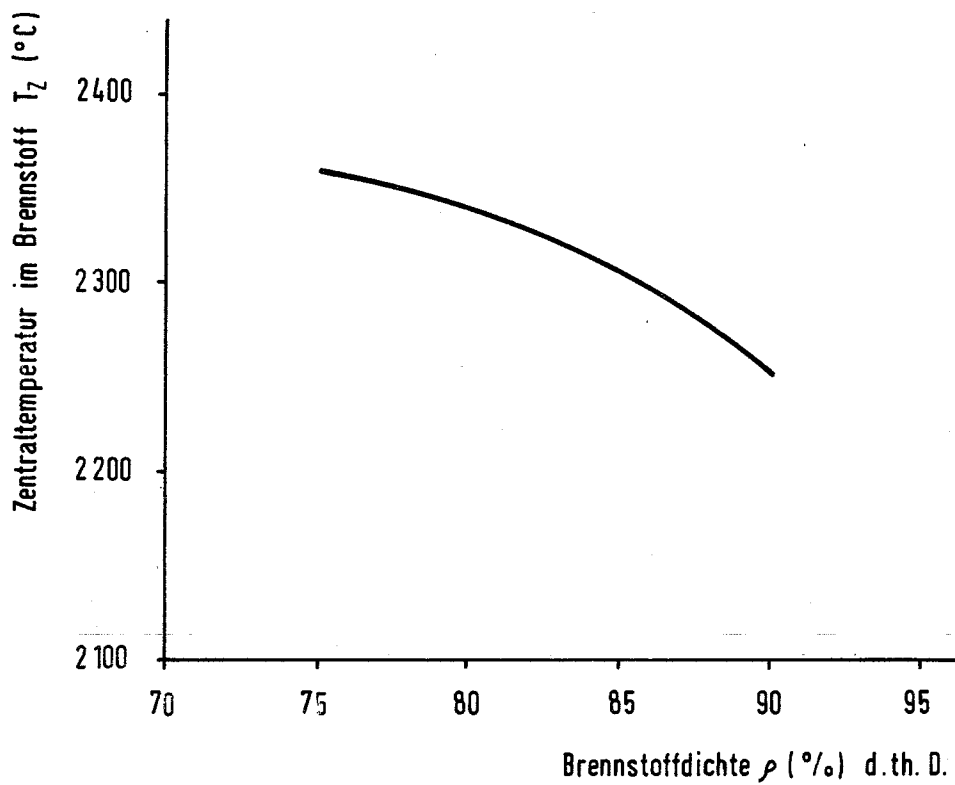
Abb. 8



Hülse	s	=	0,2 mm
	z	=	6 Rippen
	Vol.	=	25% des Brennstoff volumen eines „konv. Stabes“
	T_{RK}	~	1250 °C
Brennstoff	f	=	85 % d.th. D.
	T_z	~	2300 °C

Brennstab mit innenberipptem Hülseinsatz:
Einfluß des Innendurchmessers des Hüllrohres auf die
Stableistung und die Rippenhöhe

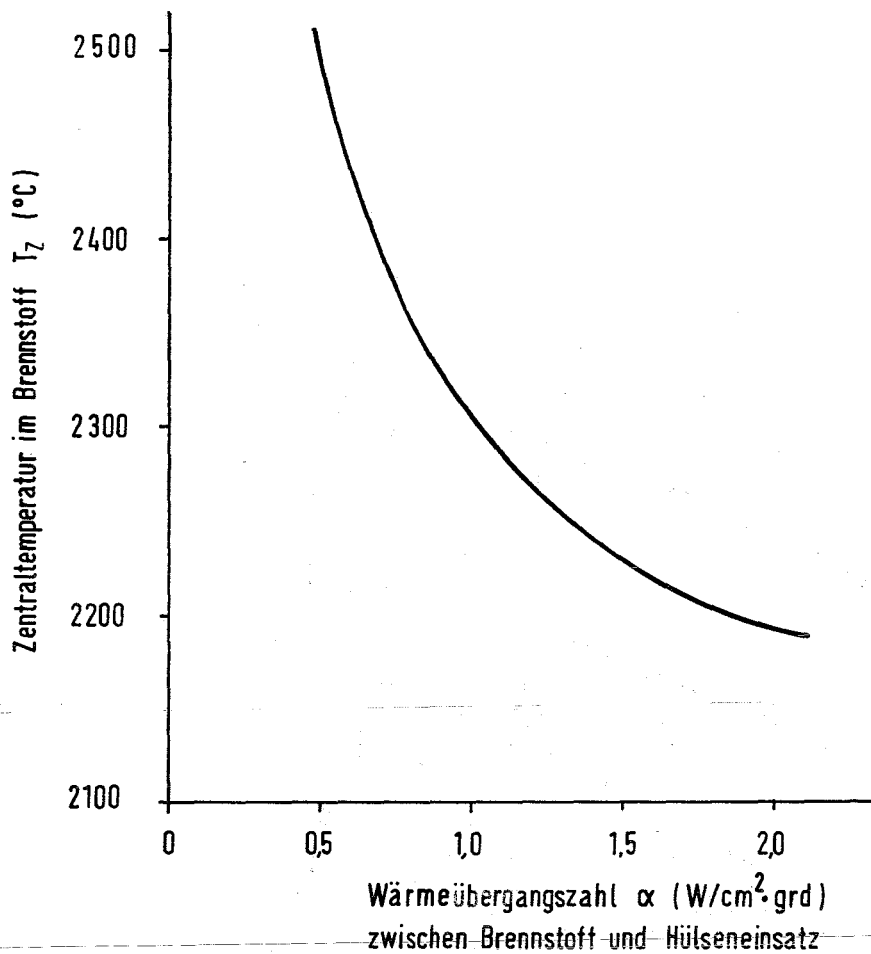
Abb. 9



Hüllrohr	D_a	=	7,0 mm ϕ
	s	=	0,4 mm
Hülse	s'	=	0,2 mm
	z	=	6 Rippen
	h	=	1,3 mm
	Vol.	=	25% des Brennstoff- volumen eines „konv. Stabes“
	T_{RK}	\sim	1250 °C
Stableistung	χ	=	525 W/cm

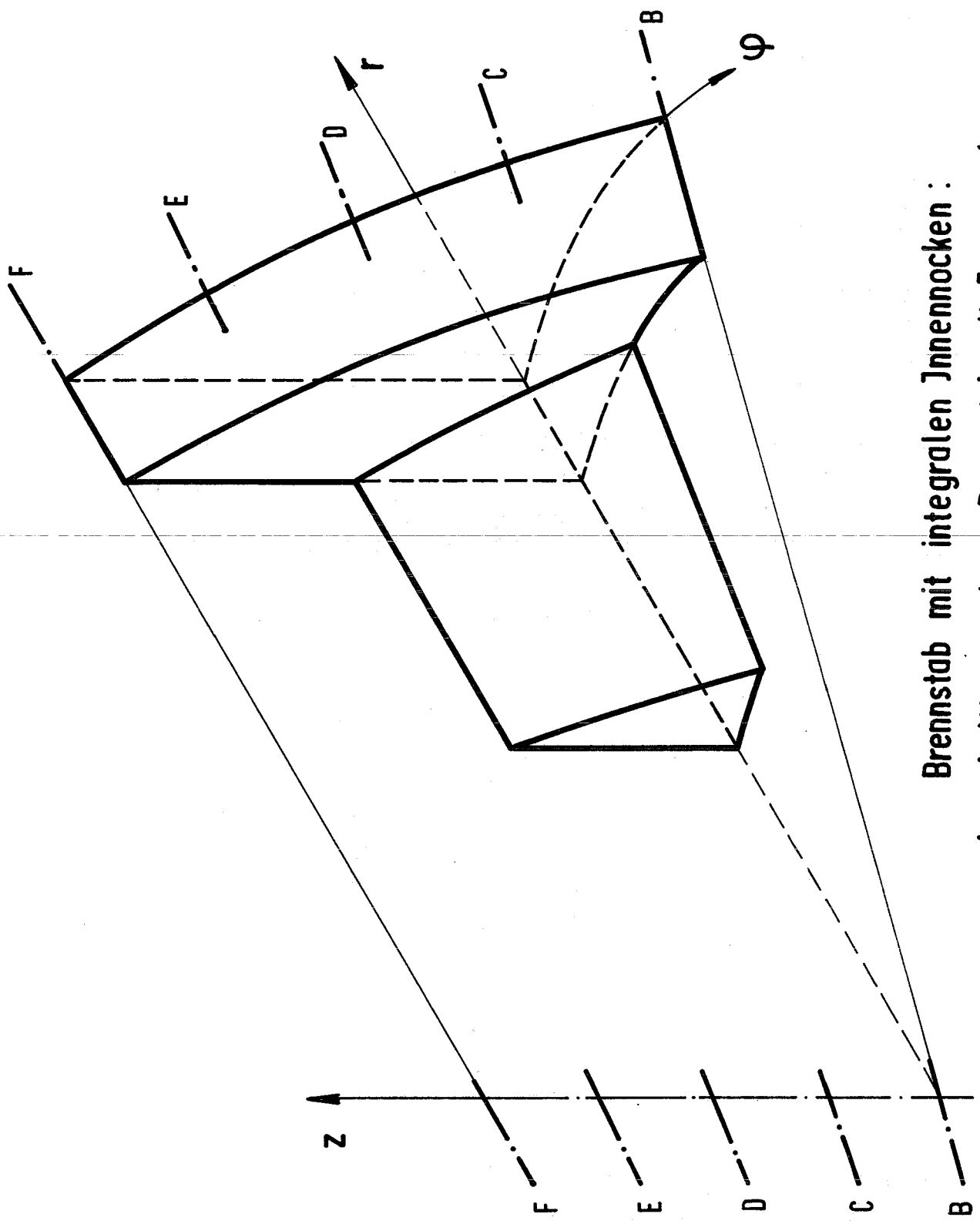
Brennstab mit innenberipptem Hülseinsatz:
Einfluß der Brennstoffdichte auf die Zentraltemperatur
im Brennstoff

Abb. 10

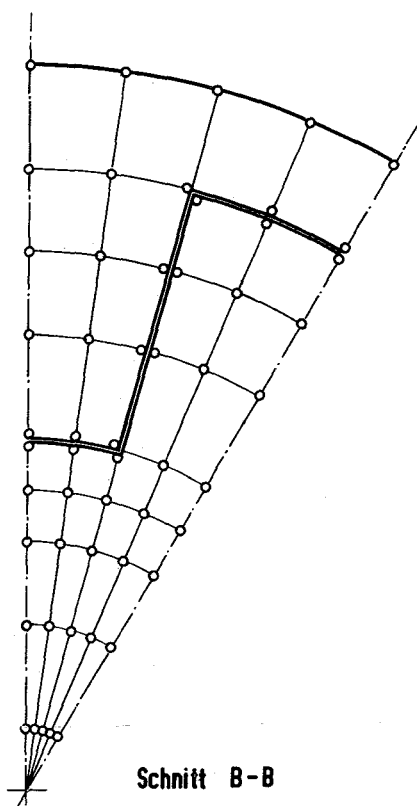


Hüllrohr	D_a	=	7,0 mm ϕ
	s	=	0,4 mm
Hülse	s'	=	0,2 mm
	z	=	6 Rippen
	h	=	1,3 mm
	Vol.	=	25 % des Brennstoff- volumen eines „konv. Stabes“
	T_{RK}	~	1250 °C
Brennstoff	ρ	=	85 % d. th. D.
Stableistung	χ	=	525 W/cm

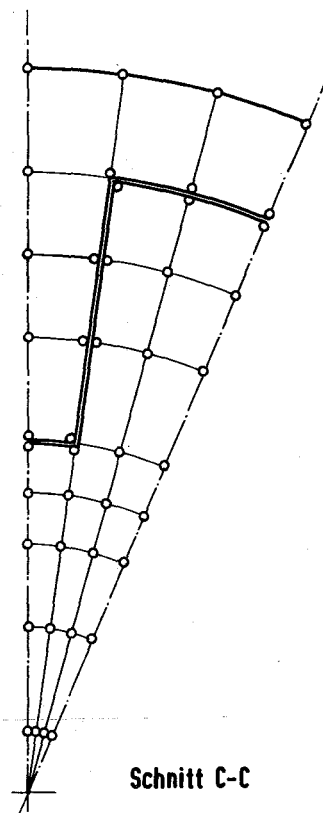
Brennstab mit innenberipptem Hülseneinsatz:
Einfluß des Wärmeübergangs vom Brennstoff zum Hülsen-
einsatz auf die Zentraltemperatur im Brennstoff



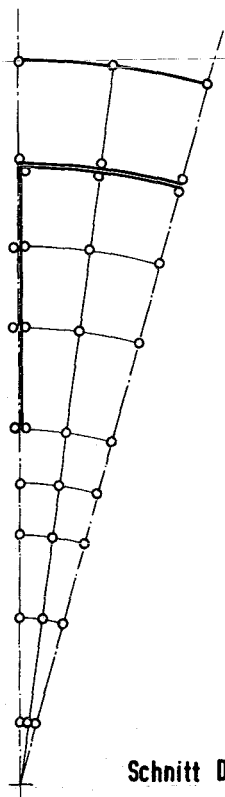
Brennstab mit integralen Innennocken :
 Ausschnitt aus einem Brennstab mit Innennocken



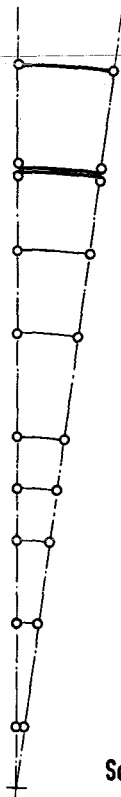
Schnitt B-B



Schnitt C-C



Schnitt D-D



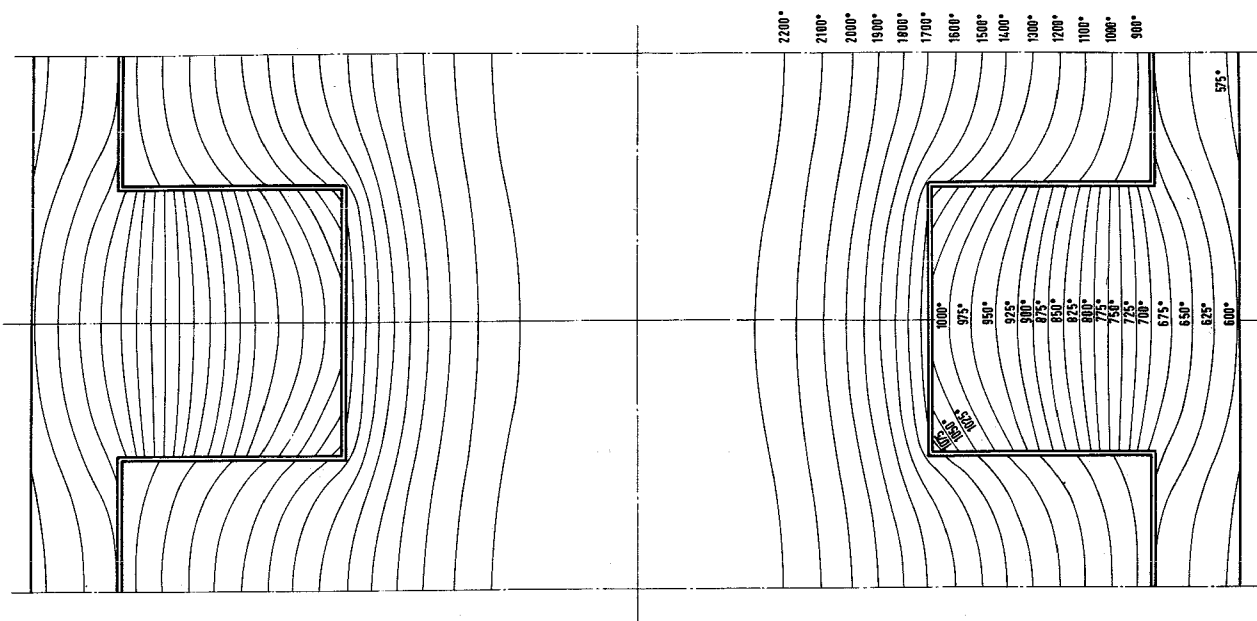
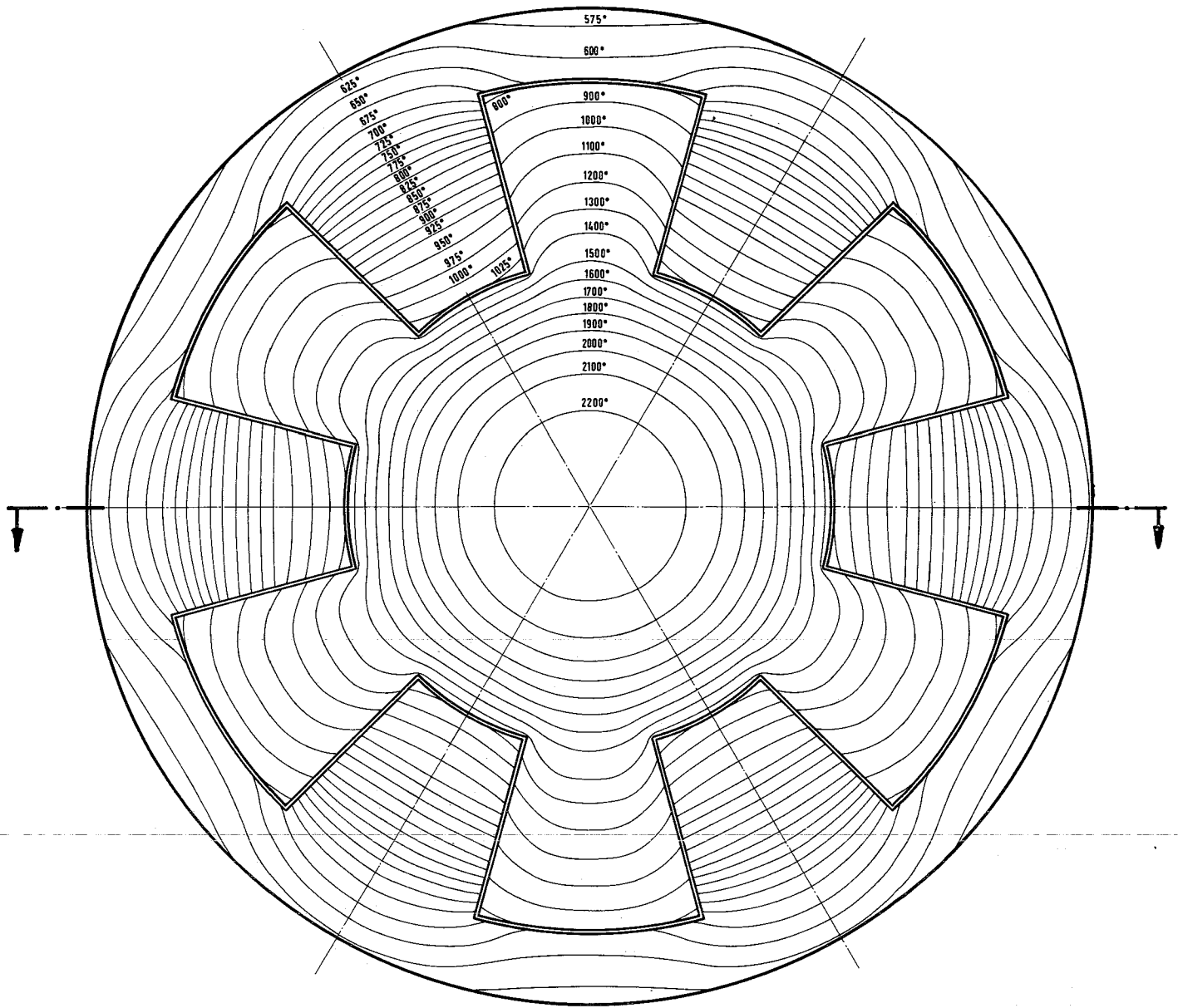
Schnitt E-E



Schnitt F-F

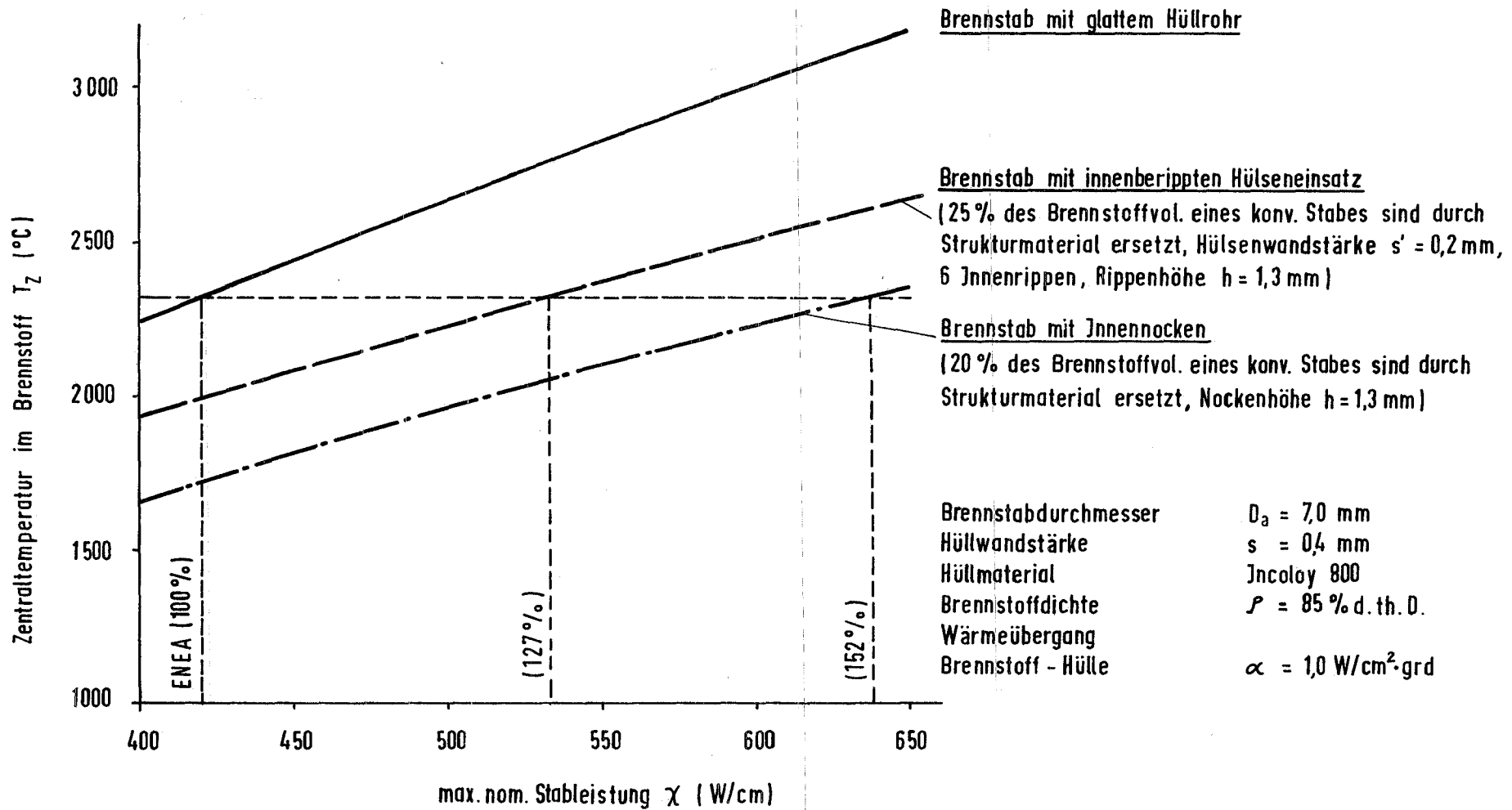
**Brennstab mit integralen Innennocken:
Aufteilung des Brennstabausschnittes in ein Netzwerk
aus wärmeleitenden Stäben**

Abb. 13



Brennstab mit integralen Innennocken :
 Radiales und axiales Temperaturprofil

Abb. 14



Einfluß der Stableistung auf die Zentraltemperatur im Brennstoff bei glatten und innenberippten Brennstäben

Abb. 15

