

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

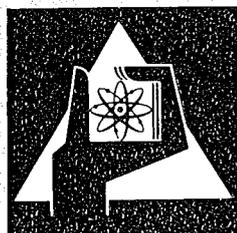
Juli 1974

KFK 2018

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

**Untersuchungen zu Abschaltstäben mit
Moderatorfüllung für schnelle Reaktoren**

V. Heinzel



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 2018

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Untersuchungen zu Abschaltstäben mit
Moderatorfüllung für schnelle Reaktoren *)

V. Heinzel

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

*) Dissertation, genehmigt von der Fakultät für
Maschinenbau der Universität Karlsruhe

Zusammenfassung

Der Reaktivitätswert eines Abschaltelements in einem schnellen Reaktor hängt neben der Position im Reaktor und den eingebauten Absorbermengen ebenso von der Energieverteilung der Neutronen im Elementbereich ab. Durch den Einbau eines zusätzlichen Moderators können Neutronen im Elementbereich abgebremst werden, was infolge der zu niedrigeren Energien hin ansteigenden Absorptionsquerschnitte zu höheren Absorptionsraten im Absorber führt.

In der vorliegenden Arbeit wird das Potential, welches Elemente aus einer derartigen Kombination von Moderator und Absorber bieten, systematisch theoretisch und experimentell untersucht. Die Parameter der theoretischen Untersuchungen sind dabei die Volumenanteile von Moderator und Absorber, geometrische Anordnung der beiden Materialien im Element, Elementgröße, Art und Dichte von Moderator und Absorber sowie Anreicherungen des Absorbers. Die durchgeführten Experimente dienen einmal der Bestätigung der rechnerisch erzielten Ergebnisse. Sie gehen darüberhinaus auf Elemente mit stabbündelförmigem Aufbau ein, wie sie in Leistungsreaktoren vielfach verwendet werden, jedoch nicht rechnerisch behandelt werden können.

Die Ergebnisse zeigen für kombinierte Elemente zwei interessante Einsatzbereiche. 1. Ausgehend von Abschaltelementen mit nicht angereicherten Absorbermaterialien kann durch den Einbau eines Moderators der Reaktivitätswert gesteigert werden. Anreicherungen bei größeren geforderten Reaktivitätswerten können entfallen. 2. Ausgehend von hoch angereicherten Absorbern, etwa Tetraborkarbid mit 90% Bor-10 im Bor, können durch Modatoreinbau keine nennenswert höhere Reaktivitätswerte erzielt werden. Es ist jedoch möglich, bei gleichbleibendem Reaktivitätswert einen Teil des sehr teuren, hoch angereicherten Absorbers durch einen weit billigeren Moderator zu ersetzen.

Investigations about shut-down rods loaded with a combination of an absorber and a moderator for fast reactors

Abstract

The reactivity worth of a shut-down rod in a fast reactor depends in part from the position in the reactor, the quantity and kind of inserted absorber, and also the neutron energy spectrum within the field of the shut-down rod. The insertion of an additional moderator shows the neutrons down inside the rod, causing an increase in the absorption rate on account of the increasing absorption cross section at lower neutron energies.

In this report the potential which is represented by rods assembled with a moderator and an absorber, is theoretically and experimentally investigated. The theoretical investigations use as varying parameters volume ratio of the moderator and absorber, rod construction and size, type and density of moderator and absorber, and finally the boron enrichment. The experiments were used to confirm the theoretical results, and in addition they also investigated rod bundle geometries typically used in power reactors.

The results show two interesting operational scopes:

1. Assuming a shut-down rod using only unenriched absorber material, the insertion of a moderator causes an increase in reactivity worth. In case a higher reactivity worth is demanded, one need not increase the enrichment of the absorber, instead one can add a moderating material.
2. Assuming a shut-down rod using a highly enriched absorber like B_4C with 90% enriched boron-10, no more increase of reactivity worth can be obtained by the addition of moderating materials. However it is possible to partially replace the very expensive highly enriched absorber by adding a moderator without loss of reactivity worth.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einleitung	1
2. Theoretische Untersuchungen zu Abschaltetelemen- ten mit Moderator-Absorber-Kombinationen	6
2.1 Analytische Betrachtung	7
2.2 Numerische Untersuchungen	10
2.2.1 Homogene Mischung oder heterogener Aufbau	10
2.2.2 Optimales Moderator-Absorber-Volumenver- hältnis bei heterogenen Elementen	12
2.2.3 Abhängigkeit der optimalen Reaktivitäts- wertverbesserung von der Elementgröße	13
2.2.4 Optimale Reaktivitätswerte in Abhängigkeit von Absorber und Moderator	14
2.2.4.1 B_4C als Absorber	14
2.2.4.2 Eu_2O_3 als Absorber	17
2.3 Interpolationsverfahren	17
3. Experimentelle Bestimmung der Reaktivitätswerte	22
3.1 Meßanordnung im STARK	23
3.1.1 Aufbau der Testelemente	23
3.1.1.1 Zylindrische Testelemente	24
3.1.1.2 Bündel mit 61 Rohren mit je 7 mm Außen- durchmesser	25
3.1.1.3 Bündel aus 19 Rohren mit je 18 mm Außen- durchmesser	26
3.1.2 Absorber- und Moderatormaterialien	27
3.1.2.1 Absorber	27
3.1.2.2 Moderator	29
3.2 Reaktivitätswertmeßmethode	30
3.3 Reaktivitätswertmessungen und Meßergebnisse	36
3.3.1 Zylindrische Testelemente im STARK 7C und Einführung kürzerer Testelemente	37
3.3.1.1 Zylindrische Testelemente im STARK 7B	38

	Seite
3.3.2 Testelemente aus einem Bündel von 61 Stäben im STARK 7B	40
3.3.3 Testelemente aus einem Bündel von 19 Stäben im STARK 7B	43
4. Untersuchungen über Leistungsspitzen im Brennstoffbereich in der Nachbarschaft von Moderator-Absorber-Elementen mit stabbündelförmigem Aufbau	45
4.1 Messungen mit Spaltspurdetektorfolien	45
4.2 Auswirkungen des thermischen Ausflusses	47
5. Zusammenfassung und Schlußbetrachtung	51
Literatur	56
Bezeichnungen und Abkürzungen	60
Tabellen	62
Abbildungen	68
Anhang A Absorberwerkstoffe	
Anhang B Moderatorwerkstoffe	

1. Einleitung

In schnellen Reaktoren werden die Abschaltelemente für ein von den Regel- oder Trimmeinrichtungen getrenntes System ausgelegt. Die Abschaltelemente befinden sich während des Reaktorbetriebs vollständig außerhalb der Spaltzone und werden nur zum Abschalten in den Reaktorkern eingefahren. Sie werden dort zum Aufrechterhalten des unterkritischen Zustandes während der gesamten Abschaltphase belassen (Abb.1.1).

Als Absorbermaterial ist für die Abschaltelemente schneller Reaktoren mit wenigen Ausnahmen (EBR1, Argonne Fast Source Reactor) in der ersten Generation, die Uran-238 als Abschalt-elementmaterial benutzten, bisher nur Bor verwendet worden /1/. Chemisch in der Form des Tetraborkarbids wird es als Pulver in Metallrohre eingerüttelt oder als gesinterte Tabletten in diese eingesetzt. Mehrere Stäbe bilden jeweils ein Absorberelement. Der wirksame Neutronenabsorber ist dabei das Bor-10. Auf Grund seines $1/v$ -Querschnitts weist es auch bei so hohen Neutronenenergien, wie sie im Spektrum schneller Reaktoren vorherrschen, einen verhältnismäßig großen Querschnitt für Neutronenabsorption auf (Abb.1.2) /2/. Der Anteil des Bor-10 bei natürlicher Isotopenzusammensetzung beträgt 19,6%.

Innerhalb der Spaltzone steht den Abschaltelementen nur beschränkt Platz zur Verfügung. Ein einzelnes Element kann maximal den Querschnitt eines Brennelements einnehmen. Wegen der üblichen hexagonalen Gitteranordnung müßten für größere Abschaltelemente bereits vier oder sieben Brennelemente aus der Spaltzone entnommen werden. Bei einem 300 MWe-Reaktor ist dabei der Ausbau eines Brennelements gleichbedeutend mit der Entnahme von 0,5 bis 1% des Spaltstoffinventars oder 5 bis 10 kg Plutonium-239. Die Zahl der Abschaltelemente soll außerdem möglichst klein bleiben. Jedes Abschaltelement beansprucht nicht nur jeweils eine Brennelementposition in der

Zum Druck eingereicht am

Spaltzone, sondern erfordert auch die gesamten technischen Einrichtungen wie Antrieb und Instrumentierungen. Somit können keine beliebig großen Mengen Bor in die Spaltzone eingebracht werden. Werden trotzdem größere Reaktivitätswerte für die Abschaltelemente gefordert, als dies Borkarbid mit Bor natürlicher Isotopenzusammensetzung ermöglicht, ist es üblich, durch Anreicherung des Bor-10 Gehalts die Wirksamkeit der Elemente zu erhöhen. So werden in den derzeit geplanten und gebauten schnellen Reaktoren (SNR-300, PFR, Phenix, BN-350) Anreicherungsstufen von 45 und bis zu 90% vorgesehen. Diese Reaktoren erzeugen Leistungen von 600 bis 700 MW_{th} bei einem Corevolumen von ca. 1,7 m³ (SNR). Die nächste Ausbaustufe dieser Baulinie wird über Reaktorkores für ca. 3000 MW_{th} mit einem Volumen von etwa 6 m³ verfügen. Die Anforderungen an die Abschaltelemente werden dadurch noch steigen, wenn ihre Anzahl nicht erhöht werden soll.

Mit einem Isotopenanteil von nahezu 100% Bor-10 im Bor findet die Erhöhung der Wirksamkeit der Abschaltelemente durch Anreicherung eine natürliche Grenze. Außerdem steigt der Preis für das Borkarbid mit hoher, ca. 90% Bor-10, Anreicherung um einen Faktor 1000 gegenüber dem mit Naturbor (ca. DM 30,--) an.

Es stellt sich somit die Frage nach weiteren Möglichkeiten außer der Anreicherung, mit denen die Wirksamkeit der Abschaltelemente vergrößert werden kann: mit abnehmender Neutronenenergie steigt der Wirkungsquerschnitt des Bor-10 für Neutroneneinfang an, wie aus Abbildung 1.2 zu ersehen ist. Ein Abschaltelement, das neben dem Absorber noch Moderator enthält, um die Neutronen im Bereich des Elements abzubremesen, sollte daher gegenüber einem Element ohne Moderator eine höhere Neutroneneinfangrate zeigen.

Hinsichtlich des Reaktivitätswertes eines solchen, aus einem Moderator und Absorber kombinierten, Abschaltelementes werden dabei die Art des Moderators und des Absorbers, deren Ver-

teilung und Anteile am Elementvolumen von Bedeutung sein. Die Wirksamkeit der Kombination wird sich aus dem Vergleich der Reaktivitätswerte eines kombinierten Moderator-Absorber-Elements und eines volumengleichen reinen Absorberelements im gleichen Reaktor an der gleichen Position zeigen. Die hier gebrauchten Ausdrücke 1. "reines Absorberelement" und 2. "kombiniertes (Moderator-Absorber-)Element" stehen für 1. ein Abschaltenelement, das in seinem Füllvolumen neben den natürlich erforderlichen Strukturmaterialien nur Absorber enthält bzw. 2. für ein Abschaltenelement, das neben dem Absorber noch über einen Moderator verfügt. Sie werden in dieser Bedeutung auch weiterhin verwendet. Um einen echten Vergleich zwischen den beiden Abschaltenelementarten zu erhalten, müssen das jeweils zu vergleichende kombinierte Element und das reine Absorberelement die gleiche Absorberart verwenden.

Theoretische Untersuchungen über solche Elemente wurden von W. Köhler durchgeführt /3,4/. Er erhält für kombinierte Elemente Reaktivitätswerte, die um einen Faktor 2 bis 3 höher liegen als bei reinen Absorberelementen. Ähnliche Faktoren ergeben sich aus experimentellen Untersuchungen von E. Hellstrand /5/. Diese Messungen sind in nahezu allen Fällen für Vergleiche von Moderator-Absorber-Elementen mit einem Element ohne Moderator, aber sonst gleicher Absorbermenge und -anordnung entsprechend den Positionen 1 und 3 in Abbildung 1.3 ausgelegt. Ein solcher Elementvergleich ist aber nicht sinnvoll, da ein Element mit maximal erreichbarem Abschaltwert niemals nur aus einer Ringzone oder mit einer 3- bis 4-fachen Absorberverdünnung aufgebaut wird. Die Ergebnisse von Hellstrand gestatten jedoch außerdem, die Reaktivitätswertunterschiede zwischen kombinierten Elementen und solchen, die ganz mit Absorber gefüllt sind, - Position 2 und 1 in Abbildung 1.3 - abzuschätzen. Danach sind die Vergrößerungen der Reaktivitätsbeträge mit 30 bis 70% bei Verwendung von Tetraborkarbid mit natürlicher Isotopenzusammensetzung anzusetzen.

Nach Bekanntwerden der Ergebnisse von Hellstrand hat die Firma Interatom Rechnungen für SNR-Bedingungen durchgeführt und kommt zu Verbesserungen von maximal 10% /6/. Der Absorber war in diesem Fall B_4C mit hoher Bor-10 Anreicherung.

Die bisherigen Untersuchungen greifen nur Einzelfälle auf. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, das Potential, welches kombinierte Elemente bieten, systematisch theoretisch und experimentell zu untersuchen. Parameter sind dabei:

1. Volumenanteile von Moderator und Absorber
2. Geometrische Anordnung der beiden Materialien im Element
3. Größe der Elemente
4. Art und Dichte des Absorbers
5. Anreicherungen im Absorbermaterial
6. Art und Dichte des Moderators

Ihre Einflüsse auf den Reaktivitätswert der Elemente werden in Abschnitt 2 zunächst theoretisch untersucht. In 2.1 wird dabei für Elemente, die Moderator und Absorber homogen gemischt enthalten, die Abhängigkeit vom Mischungsanteil der beiden Materialien analytisch betrachtet. Der Einfluß der Anreicherung im Absorbermaterial auf den Reaktivitätswert einer Materialpaarung wird gezeigt. In Abschnitt 2.2 werden numerische Rechnungen benutzt, um:

1. Reaktivitätswertunterschiede aus den verschiedenen geometrischen Anordnungen von Moderator und Absorber zu finden,
2. die Einflüsse von der Anreicherung und Dichte des Absorbers sowie der Dichte des Moderators auf die Volumenverhältnisse bei optimalem Reaktivitätswert einer Materialpaarung darzustellen,
3. den Einfluß der Elementgröße zu betrachten und
4. die Abhängigkeit der optimalen Reaktivitätswertverbesserungen von der Absorberart, -anreicherung und

-dichte bzw. Moderatorart und -dichte zu untersuchen. Im anschließenden Punkt 2.3 wird aus den numerischen Ergebnissen ein Interpolationsverfahren abgeleitet, mit dem aus den Reaktivitätswerten weniger berechneter Fälle beliebige Zwischenwerte gefunden werden können.

Abschnitt 3 behandelt Messungen bezüglich der Einflußfunktionen von Elementlängen, verschiedenen Volumenverhältnissen für je zwei Moderator- und Absorbermaterialien sowie bei stabbbündelförmigem Elementaufbau Effekte der Bündelgeometrie. Randeffekte von Stabbündeln werden im anschließenden Kapitel beschrieben. Eine Zusammenfassung schließt die Arbeit ab.

2. Theoretische Untersuchungen zu Abschaltelementen mit Moderator-Absorber-Kombinationen

Die theoretischen Untersuchungen der folgenden Abschnitte werden im wesentlichen mit B_4C als Absorber durchgeführt. Es gibt noch eine Reihe weiterer möglicher Absorbermaterialien für schnelle Reaktoren (siehe Anhang A), jedoch liegen für B_4C mit Bor-10 als absorbierendem Isotop die meisten Erfahrungen bezüglich der Fertigung und des Einsatzes im Reaktor vor. Für die Untersuchungen ergibt B_4C die größte Variationsmöglichkeit, da sowohl die Dichte des Karbids als auch das Isotopenverhältnis im Bor durch Anreicherung geändert werden kann. Vom elementaren Bor abgesehen, das nur schwierig rein und hochdicht hergestellt werden kann, werden die Bor-10-Dichten und damit die Reaktivitätswerte des B_4C von keiner anderen Verbindung erzielt. Um jedoch auch einen zweiten Absorber mit ebenfalls zu niederen Energien hin stark ansteigendem Einfangquerschnitt zu betrachten, wird in Abschnitt 2.2.4 auch auf die Dichtefunktion von Eu_2O_3 eingegangen. Dieses Material wird zur Zeit als weiterer möglicher Absorber für schnelle Reaktoren diskutiert. Daten über mögliche Moderatoren sind in Anhang B zusammengestellt. Danach können nur mit wasserstoffhaltigen Substanzen in kombinierten Abschaltelementen Reaktivitätsgewinne erzielt werden. Unter den Betriebsbedingungen eines schnellen, Natrium-gekühlten Brutreaktors sind Metallhydride ausreichend beständig, wobei für Zirkonhydrid bereits umfangreiche Kenntnisse über den Einsatz im Reaktor vorliegen. Im Hinblick auf die durchzuführenden Experimente war außerdem Polyäthylen von Interesse. Es besitzt die höchste Wasserstoffdichte und ist einfach zu handhaben. Die ersten Berechnungen wurden daher mit Polyäthylen durchgeführt. Für die Untersuchungen über die Materialdichteeinflüsse auf den Reaktivitätswert wurde jedoch Zirkonhydrid verwendet.

2.1 Analytische Betrachtung

In schnellen Reaktoren bleibt die durch die Absorberelemente hervorgerufene Flußdepression im Bereich von $\Delta\phi/\phi = 10\%$. Daher ist die Störungstheorie anwendbar. Sie beschreibt die Beziehung der Reaktivität zu Änderungen im Reaktorkern mit dem folgenden Ausdruck in allgemeiner Form:

$$\rho = \frac{\iiint_V \bar{\phi}^+(E) \phi(E) \cdot [\bar{\gamma} \delta \Sigma_f(E) - \delta \Sigma_a(E)] - \text{grad } \phi^+(E) D(E) \text{grad } \phi(E) dE dV}{\iiint_V \phi^+(E) \gamma \Sigma_f(E) \phi(E) dE dV}$$

Es sind dabei

ρ	Reaktivität
ϕ, ϕ^+	Neutronenfluß bzw. adjungierter Fluß
E	Energie
γ	Zahl der pro Spaltung neu entstehenden Neutronen
Σ_f	Spaltquerschnitt
Σ_a	Absorptionsquerschnitt
D	Diffusionskonstante
V	Reaktorvolumen

Bei Änderungen am Abschaltelement ist $\delta \Sigma_f \ll \delta \Sigma_a$. Weiterhin wird als Näherung der Ausfluß unabhängig vom Abschaltelement angenommen. Danach ergibt sich:

$$\rho = \frac{\iiint_V \phi^+(E) \phi(E) \Sigma_a(E) dE dV}{\iiint_V \phi^+(E) \phi(E) \gamma \Sigma_f(E) dE dV}$$

Der adjungierte Fluß des SNR ändert sich dabei nur wenig mit der Energie, wie es Tabelle 2.1 zeigt. Als Vereinfachung wird er daher energieunabhängig eingesetzt. Dies führt für die Reaktivität des Abschaltelementes zu:

$$\rho \sim \int_E \Sigma_a(E) \cdot \phi(E) dE = N_{B-10} \cdot \int_E \sigma_a(E) \phi(E) dE$$

mit N_{B-10} der Teilchendichte des Bor-10 in cm^{-3} . Nach Wichtung von σ_a , dem mikroskopischen Absorptionsquerschnitt, mit dem Neutronenspektrum zu $\bar{\sigma}_a$ kann die folgende Proportionalität für die Reaktivität erzielt werden:

$$\rho \sim N_{B-10} \cdot \bar{\sigma}_a$$

Das zur Wichtung benutzte Spektrum $\phi(E)$ wird dabei durch Wasserstoff im Element zu kleineren Energien hin verschoben. Bor dagegen, das niederenergetische Neutronen bevorzugt absorbiert, bewirkt eine Anhebung des Spektrums zu höheren Energien. Daher wird durch die Wichtung über das Spektrum

$$\bar{\sigma}_a = f(N_{B-10}, N_H)$$

mit N_H der Wasserstoffdichte in cm^3 .

Wegen des komplizierten Verlaufs der Wirkungsquerschnitte ist auch für homogene Moderator-Absorber-Mischungen diese Funktion f nicht analytisch darstellbar. Sie kann nur aus numerischen Rechnungen gewonnen werden. Hierzu wurden eindimensionale S_N -Rechnungen in Zylindergeometrie mit 26 Energiegruppen durchgeführt. Als Coremischungen wurden die Zusammensetzungen der zentralen Spaltzone des SNR-300 Mark I gewählt. Das Abschaltelement wurde als zentrale Zone entsprechend seinem Außenradius in der Rechnung behandelt. Moderator und Absorber wurden als eine über den gesamten Elementquerschnitt homogene Mischung angenommen.

Für Elemente mit Mischungen aus B_4C von 100% der theoretischen Dichte als Absorber und Polyäthylen von 70% der theoretischen Dichte als Moderator wurden die so gewichteten Einfangquerschnitte in Abbildung 2.1.1 aufgetragen. Der An-

teil des Bor-10 im Bor des Karbids bildet dabei jeweils den Parameter für verschiedene Kurven. Jede Kurve entspricht einem Element, bei dem der Volumenanteil ω des Moderators variiert wird. Für $\omega=0$ entspricht das Element dem reinen Absorberelement und bei $\omega=1$ einem reinen Moderatorzylinder.

Wie zu erwarten, wächst $\bar{\sigma}_a$ mit N_H und nimmt mit wachsendem N_{B-10} ab. Weiterhin sind für jeweils gleiche Moderatoranteile bei größeren Bor-10 Dichten geringere Verbesserungen oder Vergrößerungen von $\bar{\sigma}_a$ zu erreichen, wie es durch die mit zunehmender Anreicherung kleiner werdenden Steigerungen der Kurven verdeutlichen. Dies läßt sich damit erklären, daß bei höheren makroskopischen Absorptionsquerschnitten für die Neutronen die Wahrscheinlichkeit wächst, absorbiert zu werden, ehe sie eine oder mehrere Streureaktionen ausführen können.

Nun enthält das der Reaktivität proportionale Produkt noch die Bor-10-Teilchendichte. Da bei der Herstellung der kombinierten Elemente von einem maximal aufgefüllten, reinen Absorberelement ausgegangen wurde, bedeutet der Einbau von Moderator immer gleichzeitig die Verdrängung von Absorbiermaterial. Dadurch kommt für N_{B-10} eine Abhängigkeit von N_H zustande. Es ist

$$N_H \sim \omega \quad \text{und} \quad N_{B-10} \sim 1-\omega ,$$

so daß sich N_{B-10} als eine Gerade über N_H auftragen läßt. Mit den Anreicherungsstufen wieder als Parameter zeigt dies Abbildung 2.1.2 für die zuvor genannten Materialien.

Es ist zu erkennen, daß damit für die Reaktivität zwei gegenläufig von N_H abhängige Größen bestehen. Für das Produkt $N_{B-10} \cdot \bar{\sigma}_a$ ist so ein Optimum zu erwarten. Wie sich aus den Steigungen in Abhängigkeit von der Anreicherung im Bor für die beiden Funktionen von Bor ableiten läßt, wird dabei das Optimum bei größeren Anreicherungsgraden bei kleineren Moderatoranteilen auftreten.

Da die in Abb.2.1.1 dargestellten Funktionen durch Zusammenwirken mehrerer Probleme kompliziert werden, ist es unmöglich, sie durch eine einfache, mathematische Funktion darzustellen, so daß die Abschätzung hinsichtlich der Optima hier abgebrochen werden muß.

2.2 Numerische Untersuchungen

Die numerischen Rechnungen zur Fortsetzung der theoretischen Betrachtungen entsprechen dem bereits skizzierten Verfahren mit eindimensionalen k_{eff} -Rechnungen mit 26 Energiegruppen, Corezusammensetzung entsprechend der zentralen Zone des SNR-300 Mark I Cores und dem Abschaltelement mit einer bzw. zwei Zonen im Zentrum. Der Reaktivitätswert des Abschaltelements ergab sich dann aus der Differenz der k_{eff} -Rechnungen, bei denen die zentrale Zone einmal entsprechend dem Abschaltelement und zum anderen mit Natrium aufgefüllt wurde. Natrium Volumenanteile im Abschaltelement brauchten nicht berücksichtigt zu werden. Ihr Einfluß auf den Reaktivitätswert blieb vernachlässigbar.

2.2.1 Homogene Mischung oder heterogener Aufbau

Neben einer Abhängigkeit des Reaktivitätswertes kombinierter Abschaltelemente vom Volumenverhältnis Moderator/Absorber steht ein Einfluß von der geometrischen Anordnung zu erwarten. Ausgehend von zylinderförmigen Geometrien zeigen sich drei prinzipielle Möglichkeiten, beide Materialien zu kombinieren. Dabei sind, wie in Abb.2.2.1 gezeigt, Moderator und Absorber

1. homogen gemischt,
2. heterogen, d.h. getrennt angeordnet, wobei sich der Moderator im Zentrum des zylindrischen Elements befindet und von einem Absorberring umgeben wird,
3. ebenfalls getrennt angeordnet, jedoch befindet sich der Absorber im Zentrum und wird vom Moderator umschlossen.

Hierzu wurden k_{eff} -Rechnungen für ein Element mit $R = 41$ mm

Außenradius, mit B_4C von 90% Bor-10 angereichertem Bor bei 100% der theoretischen Dichte als Absorber und als Moderator Polyäthylen von 70% der theoretischen Dichte durchgeführt. Ihre Ergebnisse sind in Abb.2.2.2 aufgetragen. Sie erfassen die drei Anordnungsprinzipien mit jeweils verschiedenen Moderator-Absorber-Volumenverhältnissen. Für die heterogenen Elemente kennzeichnet die Abszisse den Radius r der variablen Grenze zwischen zentraler Zone und äußerer Ringzone. Die Ordinate gibt den Reaktivitätswert eines Elements mit dem durch den Abszissenwert gegebenen Volumenverhältnis an. Durch die Werte für $r=0$ und $r=R$ werden die Vergleichswerte für die nur Absorber oder Moderator enthaltenden Elemente angegeben.

Im Fall der homogenen Elemente wird für die Mischungen von den Volumenverhältnissen der heterogenen Elemente mit dem zentralen Moderatorzylinder und Absorberring ausgegangen, so daß sie ebenfalls über dieser Abszisse aufgetragen werden können. Kurve 1 und 2 bilden daher eine Vergleichsmöglichkeit für diese beiden Anordnungsprinzipien. Beide Kurven erreichen ausgehend von $r=0$ dem reinen Absorberelement mit zunehmendem Radius der Moderatorzone bzw. des Moderatoranteils einen optimalen, negativen Reaktivitätswert, streben dann aber schnell dem positiven Wert des reinen Polyäthylenelements zu. Dabei überschreitet der Optimalwert des heterogenen Elements den des homogenen. Das optimale Moderator-Absorber-Verhältnis stellt sich zudem beim heterogenen Element bei einem größeren Moderatoranteil ein.

Die Kurve 3 gibt die Reaktivitätswerte des dritten Elementtyps wieder, der den Absorber in der zentralen Zone und den Moderator in einem äußeren Ring enthält. Die Kurve beginnt bei $r=0$ mit dem nur Polyäthylen enthaltenden Element bei einem positiven Reaktivitätswert. Dieser positive Wert kommt, wie die Rechnungen zeigen, durch die große Anzahl im Polyäthylen bis zu thermischen Energien abgebremster Neutronen zustande. Mit zunehmendem Absorberkern strebt die Kurve dem negativen Wert des reinen Absorberelements zu, ohne diesen

Wert zu übersteigen. Für die weiteren Optimierungsfragen ist eine solche Anordnung somit nicht mehr von Interesse.

Der Vergleich homogenes/heterogenes Element wird in Abb. 2.2.3 auf Absorber mit geringerer Bor-10 Dichte erweitert. Wie zuvor zeigt sich in allen Fällen die aus der ersten Abschätzung erwarteten Abhängigkeit vom Moderatoranteil mit einem Optimum für den Reaktivitätswert. Für die Optimierung der kombinierten Elemente ist dieser optimale Wert jedoch allein ausschlaggebend, so daß mit den Angaben in der Abbildung die nachstehende Schlußfolgerung gezogen werden kann: die heterogenen Anordnungen mit einem zentralen, von einem Absorberring umschlossenen Moderatorkörper sind den Elementen mit homogenen Mischungen von Absorber und Moderator vorzuziehen, da

1. heterogene Anordnungen höhere, optimale Reaktivitätswerte ergeben und
2. die optimalen Reaktivitätswerte bei heterogenen Elementen mit kleineren Absorberanteilen erzielt werden. Letzteres ist für Elemente, die von einem hoch angereicherten Bor als Absorber ausgehen, von Bedeutung, da durch die heterogene Anordnung mehr von dem teuren Absorber durch den weit billigeren Moderator ersetzt werden kann.

2.2.2 Optimales Moderator-Absorber-Volumenverhältnis bei heterogenen Elementen

Bei den heterogenen Elementen mit der das Element außen umschließenden Absorbierschicht ist der in Abschnitt 2.1 benutzte Volumenanteil gleichbedeutend mit der Dicke der Absorbierschicht für das optimal zusammengesetzte Element. Wie aus Tabelle 2.2 zu ersehen ist, trifft die Abschätzung über das optimale Volumenverhältnis auch auf die heterogenen Elemente zu. Infolge des großen Rechenaufwands besitzen die Werte in Tabelle 2.2 eine große Toleranz (ca. $\pm 0,5$ mm). Sie gestatten jedoch folgende über die Abschätzung hinausgehende

Feststellung bezüglich der Absorberschichtdicke bei heterogen kombinierten Elementen im jeweiligen Reaktivitätswertoptimum:

1. Die Absorberschichtdicke wächst mit abnehmender Moderator-dichte;
2. die Reaktivitätswertoptima treten bei Absorberschichtdicken dünner als 10 mm auf;
3. bei Elementen mit größer werdendem Außenradius wird die Absorberschichtdicke weniger durch unterschiedliche Materialdichten beeinflusst;
4. für einen gewissen Bereich ist die Schichtdicke nur wenig vom Außenradius des Elements abhängig; dies gilt für Elemente mit $30 \text{ mm} \leq R_o \leq 50 \text{ mm}$, einer Wasserstoffdichte im Moderator entsprechend 70% dichtem Polyäthylen und einem Absorber aus B_4C mit 90% Bor-10 Anreicherung und 40 bis 80% der theoretischen Dichte.

2.2.3 Abhängigkeit der optimalen Reaktivitätswertverbesserung von der Elementgröße

Für eine Moderator-Absorber-Paarung muß nur die Konfiguration betrachtet werden, die den optimalen Reaktivitätswert Δk_{MAopt} ergibt. Der Reaktivitätswert des reinen Absorberelements mit diesem Absorber zum Vergleich ist Δk_A . Daraus kann das Verhältnis $\Delta k_{MAopt} / \Delta k_A$, die optimale Reaktivitätswertverbesserung durch die Kombination des Absorbers mit dem Moderator, gebildet werden. Dieses Verhältnis wurde für verschiedene Elementgrößen bzw. Elementaußenradien bestimmt und in Abb.2.2.4 für verschiedene B_4C -Dichten aufgetragen. Es zeigte sich, daß über den gesamten dargestellten Dichtebereich der Einfluß der Elementgröße auf die optimale Reaktivitätswertverbesserung gering ist. Dies ergab sich in gleicher Weise bei der Verwendung von B_4C mit natürlichem Bor.

Da die Elemente mit 41 mm Außenradius in allen Fällen Verbesserungswerte nahe den Maximalergebnissen liefern, werden

die Untersuchungen an Elementen mit diesem Außenradius fortgesetzt. Diese Abmessung entspricht zudem dem Außenradius des Absorberelements des SNR, so daß sie in den Bereich der technischen Anwendung fällt.

2.2.4 Optimale Reaktivitätswerte in Abhängigkeit von Absorber und Moderator

Die in Abb.2.2.4 aufgetragenen optimalen Reaktivitätswertverbesserungen zeigen neben der Radiusabhängigkeit auch den Einfluß der Absorberdichte. Da sie jedoch leicht einen falschen Eindruck über die tatsächlich erreichbaren Reaktivitätswerte erwecken, werden in folgenden Darstellungen der absoluten Reaktivitätswerte verwendet. Für eine jeweilige Moderator-Absorber-Paarung werden wiederum nur die optimalen Reaktivitätswerte eingetragen. Um den Vergleich $\Delta k_{MAopt}/\Delta k_A$ aber noch weiterhin zu ermöglichen, werden die Werte für die reinen Absorberelemente entsprechend mit aufgetragen.

2.2.4.1 B_4C als Absorber

1. Änderung der Anreicherung bei konstanter B_4C -Dichte:

Die erste Darstellung hierzu, Abb.2.2.5, geht auf ein B_4C mit 40% der theoretischen Dichte ein. Als Moderator wird $ZrH_{1,6}$ mit drei Dichtegraden verwendet. Die Ursachen für diese Materialverdünnungen, sei es aus konstruktiven Gründen oder wegen Fertigungsfragen, sollen hier nicht untersucht werden. Die Auftragung der Reaktivitätswerte erfolgte über einer logarithmischen Einteilung nach der Bor-10-Dichte bzw. der Bor-10-Anreicherung auf der Abszisse. In gleicher Weise wurden in Abb.2.2.6 die Ergebnisse für ein Borkarbid mit 100% der theoretischen Dichte dargestellt.

Entsprechend diesen Abbildungen steigen auch für heterogene Elemente die Reaktivitätswertverbesserungen mit abnehmender

Bor-10-Dichte an. Trotzdem werden aber auch in den kombinierten Elementen mit hoch angereichertem Absorber noch die höchsten Reaktivitätswerte erzielt.

Als Beispiel erreichen Abschaltetelemente mit B_4C mit 90% Bor-10 angereichertem Bor und 100% der theoretischen Dichte bei Kombination mit einem $ZrH_{1,6}$ von ebenfalls 100% der theoretischen Dichte einen um 4% höheren Reaktivitätswert als mit dem reinen Absorberelement. Mit einem Ausgangsabsorber mit natürlichem Bor in einem 100% dichten B_4C werden ca. 30% und in einem 40% dichten Absorber werden ca. 95% Reaktivitätswertverbesserungen durch die Kombination mit dem gleichen Moderator erzielt.

Verringerung der Zirkonhydridichte oder Reduktion der Wasserstoffkonzentration im Hydrid hat kleinere Erhöhungen von Δk zur Folge. Bei Kombination mit einem hoch angereicherten Bor werden Verbesserungen gegenüber dem reinen Absorberelement überhaupt nur mit sehr dichtem Zirkonhydrid möglich.

2. Änderung der B_4C -Dichte bei konstanter Bor-10-Anreicherung:

Die Darstellungen 2.2.5 sowie 2.2.6 zeigen auf der Abszisse außer dem Bor-10-Anreicherungsgrad auch eine Skala mit der Bor-10-Konzentration. So konnten in Abb.2.2.7 die Reaktivitätswerte für die reinen Absorberelemente mit Kurve 1 und 3 für das 40% bzw. 100% dichte Karbid und mit den Kurven 2 und 4 für die mit dem 100% dichten Zirkonhydrid kombinierten Elemente gemeinsam aufgetragen werden. Diese Werte wurden ergänzt durch die Kurven 5 und 6 für reine Absorberelemente, deren Bor-10-Konzentration nur durch die Änderung der B_4C -Dichte bei konstanter Anreicherung variiert wurde. Es zeigt sich daraus, daß sich für die verschieden dichten Karbide bei gleichen Bor-10-Konzentrationen unterschiedliche Reaktivitätswerte ergeben. Die Unterschiede sind sowohl bei den reinen Absorberelementen als auch bei den kombinierten Elementen vorhanden.

Da bei gleichen Bor-10-Dichten sich die unterschiedlich dichten Karbide nur in den Bor-11- und Kohlenstoffdichten unterscheiden, kann sich nur aus den nuklearen Eigenschaften dieser Isotope eine Begründung dieses Effektes herleiten. Die Absorption in Bor-11 und Kohlenstoff kann sicher vernachlässigt werden. Es bleibt somit nur die Streuung, die sich jedoch zweifach auswirken kann. Einmal ist sie bei den kleinen Massen von Bor-11 und Kohlenstoff stets mit Abbremsung, d.h. Moderation verbunden. Zum anderen können Neutronen aus dem Element in den Brennstoff zurückgestreut werden, ohne auf ein Absorberatom zu treffen.

Durch den ersten Effekt entsteht die gleiche Wirkung wie durch die Wasserstoffzugabe im kombinierten Element. Er liefert im Fall der reinen Absorberelemente bei konstanten Bor-10-Konzentrationen die höheren Reaktivitätswerte der dichteren Karbide. Für die technische Ausführung hat dies zur Folge, wenn bei reinen Absorberelementen Reaktivitätswertsteigerungen erforderlich werden, daß die ersten Überlegungen der Erhöhung der B_4C -Dichten gelten sollten.

Der zweite Effekt der Streuung, die Reflektion, zeigt sich dagegen aus den Kurven 2 und 4 für die kombinierten Elemente. Je mehr Bor-11 und Kohlenstoff, also je dichter das Karbid in der schmalen Randschicht der kombinierten Elemente, um so mehr Neutronen werden in den Brennstoff zurückreflektiert, ohne auf absorbierendes Bor-10 zu treffen. Durch die gegenüber Wasserstoff vergleichsweise geringe Abbremsung erreichen die Neutronen auch nicht den Energiebereich, in dem ein ausreichend großer Bor-10-Absorptionsquerschnitt im Bereich der dünnen Randzone eine genügende Reduktion der im Borkarbid gestreuten Neutronen bewirken könnte. Mit gleichem Moderator material können die kombinierten Elemente mit hoch dichtem B_4C bei gleicher Bor-10-Konzentration nur geringere Reaktivitätswerte ergeben als mit stark verdünntem, aber hoch angereichertem Borkarbid. Die Unterschiede sind jedoch gering und betragen bei Elementen mit 100% dichtem Zirkonhydrid ca. 1%. Mit abnehmender Moderator dichte wird die Differenz zudem

kleiner und bei einem 60% dichten Zirkonhydrid vernachlässigbar.

2.2.4.2 Eu₂O₃ als Absorber

Zur Berechnung des Reaktivitätswertes von Elementen mit Europiumoxid wurden die gleichen Geometrien und Rechenmethoden wie beim Borkarbid angewendet. Auch die graphischen Darstellungen sind entsprechend, so daß in Abb.2.2.8 eine logarithmische Einteilung der Abszisse nach der Europiumoxiddichte aufgetragen ist. Nach diesen Ergebnissen übersteigt mit der Kombination von 100% dichtem Europiumoxid und Zirkonhydrid der erzielbare Reaktivitätswert um ca. 50% den des reinen Eu₂O₃-Elements. Das Element nur mit Eu₂O₃ besitzt einen ca. 20% geringeren Reaktivitätswert als das mit 100% dichtem Tetraborkarbid mit Naturbor. Der Unterschied der entsprechenden mit ZrH_{1,6} kombinierten Elemente beträgt ca. 6%. Bei Europiumoxid ergeben sich bei Kombination mit einem Moderator in einem Abschaltetelelement die gleichen Abhängigkeiten von den Materialdichten wie beim Borkarbid.

2.3 Interpolationsverfahren

Für monoenergetische Neutronen kann das Problem der Selbstabschirmung in einem Absorber mit Selbstabschirmfaktoren f gelöst werden. Diese Faktoren übertragen durch die Multiplikation mit den Absorptionsquerschnitten Σ_a zu sogenannten effektiven Wirkungsquerschnitten Σ_{eff} die Flußdifferenzen im Absorber auf die Wirkungsquerschnitte. Die Reaktionsrate im Absorber kann so mit dem Neutronenfluß an der Absorberoberfläche berechnet werden. Das Produkt $f\Sigma_a V$ (V =Absorbervolumen) ergibt dann wieder einen Wert, der proportional ist zur Reaktionsrate und damit auch dem Reaktivitätswert des Absorbers. Die Selbstabschirmfaktoren werden für Zylinder meist als Funktion von

$$\begin{aligned} f &= f(2V\Sigma_a/S) \\ &= f(\Sigma_a r) \end{aligned}$$

aufgetragen /26,27/. Dabei ist

- V = Zylindervolumen
- S = Zylinderoberfläche
- r = Zylinderradius

Daraus kann eine Darstellung $f\Sigma_a$ über Σ_a abgeleitet werden, die der von Δk über der Teilchendichte entspricht. Bei einer logarithmischen Auftragung von Σ_a auf der Abszisse und linearem Maßstab für $f\Sigma_a$ auf der Ordinate wie in Abb.2.3.1 ergibt sich für die Funktion ein Bereich, in dem eine Gerade eingetragen werden kann. Ein Abweichen von der Geraden besteht bei großen und kleinen Σ_a -Werten, d.h. hier bei großen und kleinen Absorberdichten. Diese aus den Rechnungen für monoenergetische Neutronen gefundene Darstellung stimmt damit qualitativ mit dem Verlauf der Kurven in den Abbildungen 2.2.5 und 2.2.6 überein, abgesehen jedoch von dem Bereich für hohe Σ_a -Werte, die in diesen Abbildungen nicht erreicht werden. Die Übereinstimmung gilt für die reinen Absorberelemente und mit gewissen Einschränkungen auch für die kombinierten Elemente. Diese Einschränkungen sind gegeben 1. bei geringen Moderatorichten und 2. bei kleinen Bor-10-Konzentrationen. Die Gerade kann hier über den bei reinen Absorberelementen gültigen Bereich hinaus verlängert werden.

Die Selbstabschirmung wirkt sich demnach in der Multigruppenrechnung für schnelle Reaktoren in gleicher Weise wie bei den monoenergetischen Rechnungen aus. Diese Aussage kann noch ergänzt werden mit Hilfe der in Tabelle 2.3 genannten Werte von $\Sigma_a \cdot r$ für Absorberzylinder mit 41 mm Außenradius und für Wirkungsquerschnitte aus dem Energiebereich, in dem im Neutronenspektrum eines schnellen Cores die größte Absorptionsrate zu erwarten ist. Für ein Borkarbid mit 40% der theoretischen Dichte und natürlichem Bor zeigen die Werte, in Abb.2.3.1 eingesetzt, daß ein Absorberelement mit diesem Material nicht mehr in den Bereich der Geraden der Reaktivitätswertkurven fällt. Dies ändert sich wiederum in Übereinstimmung zu den Ergebnissen der Multigruppenrechnung bei höheren Anreicherungs-

graden von Bor-10 (bei ca. 40%). Bei den Borkarbid mit 100% der theoretischen Dichte läßt sich durch alle Punkte vom Bor natürlicher Isotopenzusammensetzung bis zum 90% angereicherten Bor in Abb.2.2.6 mit ausreichender Genauigkeit eine Gerade ziehen. Dies entspricht auch der Abschätzung gemäß Tabelle 2.3 und Abb.2.3.1.

Eine Gerade entsteht in keinem Fall, wenn die Bor-10-Konzentration im Absorber über Dichteänderungen variiert wird, da dadurch außer dem Absorptionsquerschnitt auch das makroskopische Bremsvermögen des B_4C mit der Bor-11- und Kohlenstoffdichte geändert wird. Dies wird durch die Kurven 5 und 6 der Abb.2.2.7 deutlich. Bei den Anreicherungsänderungen bleiben die Bremsvermögen dagegen konstant, da sie bei beiden Borisotopen nahezu übereinstimmen.

Entsprechend der logarithmischen Auftragsweise der Bor-10-Konzentration wurden die Reaktivitätswerte der kombinierten Elemente auch über einer Abszisse mit logarithmischer Einteilung der Moderatorichte in den Abb.2.3.2, 2.3.3 und 2.3.4 aufgetragen. Es ergeben sich ebenfalls Geraden bei 40% dichtem B_4C unabhängig vom Anreicherungsgrad bis zum 60% dichten $ZrH_{1,6}$. Beim 100% dichten B_4C existieren Geraden nur bei niederen Anreicherungen und hochdichtem Hydrid. Diese Abhängigkeit des Reaktivitätswertes der kombinierten Elemente von der Moderatorichte ist sicher ebenfalls auf den Effekt der Selbstabschirmung zurückzuführen. Eine Abschätzung wie zuvor ist jedoch nicht möglich. Die Neutronen werden lediglich am Wasserstoff des Moderators abgebremst. Die Absorption erfolgt dann erst im Absorberring. Wäre die Energieverminderung nach einem Stoß an einem Wasserstoffatom so groß, daß die Neutronen im Absorber vollständig absorbiert würden, könnte die Betrachtung der Selbstabschirmung der Bremsquerschnitte des Moderators eingesetzt werden. Dies trifft jedoch nicht zu. Neutronen aus einer Energiegruppe abgebremst, tauchen in den nahe darunterliegenden bereits als Quellneutronen auf, ohne ausreichend absorbiert werden zu können. Andererseits treten

im Moderator mit hoher Wasserstoffkonzentration ja Mehrfachstöße auf, die das Bild ebenfalls verfälschen. Der Bereich, in dem die Gerade mit ausreichender Genauigkeit gültig ist, ist somit aus zeichnerischen Darstellungen zu entnehmen. Im Falle der hier vorliegenden Elemente zeigt es sich jedoch, daß der zulässige Bereich in etwa mit der technisch interessanten Materialwahl zusammenfällt.

Daraus läßt sich nun eine interessante Kombination entwickeln. Sie zielt darauf ab, mit wenigen bekannten Punkten für ein Borkarbid mit vorgegebener Dichte alle Zwischenpunkte für verschiedene Anreicherungen und jeweils verschiedenen Zirkonhydridichten zu bestimmen. Mindestvoraussetzung sind die Reaktivitätswerte für zwei Borkarbide mit verschiedenen Bor-10-Anreicherungen aber gleicher Dichte und jeweils zwei Zirkonhydridichten, die in die Bereiche der Geraden zu liegen kommen. In der Auftragung des Reaktivitätswertes über der Bor-10-Teilchendichte werden durch die Verbindungslinien von zwei Punkten mit gleicher Borkarbidichte und gleicher Moderatorordichte die Reaktivitätswerte aller Zwischenanreicherungsstufen des Bor-10 angegeben. Andererseits liefert die Darstellung mit der Moderatorordichte auf der Abszisse die Zwischenwerte für unterschiedliche Moderatorordichten, wenn für ein Borkarbid bestimmter Dichte die Reaktivitätswerte für die zwei Moderatoren der ersten Darstellung durch eine Gerade verbunden werden.

Die Absorptionsquerschnitte von Europiumoxid wurden ebenfalls hinsichtlich der Selbstabschirmung abgeschätzt. Danach sollten die Reaktivitätswerte der Elemente mit diesem Absorber in der halblogarithmischen Darstellung in den Bereich der Geraden fallen. Dies wird durch die Abb.2.2.8 bestätigt. Gegenüber dem B_4C mußten die Streuquerschnitte hier bei Änderung des Absorptionsquerschnittes mitvariiert werden. Offensichtlich spielt dies bei Eu_2O_3 jedoch keine Rolle mehr, da das makroskopische Bremsvermögen wesentlich kleiner als beim B_4C ist.

Die Auftragung der Reaktivitätswerte über der Moderator-
dichte in Abb.2.3.4 liefert Geraden bis zu 60% der theo-
retischen Dichte von Zirkonhydrid. Die Kombination der
Darstellungen 2.2.8 und 2.3.4 erlaubt die gleiche Bildung
der Zwischenwerte wie aus den Abbildungen für das Bor-
karbid.

3. Experimentelle Bestimmung der Reaktivitätswerte

Zur Überprüfung der Rechnungen wurden Reaktivitätswertmessungen am STARK, dem Schnell-Thermischen-Argonaut-Reaktor Karlsruhe, durchgeführt. Dieser Reaktor besteht aus zwei miteinander gekoppelten Zonen, einer inneren Zone mit schnellem Neutronenspektrum und einer äußeren Ringzone mit einem vorwiegend thermischen Neutronenenergiespektrum. Einen Querschnitt des Reaktors zeigt Abb.3.1.1. Die schnelle Zone besteht aus 37 Brennelementen, die vertikal in einem quadratischen Gitter mit einer Teilung von 54 mm angeordnet sind. Die Brennelemente enthalten in rechteckigen Kästen mit dem Hohlmaß $51 \times 51 \text{ mm}^2$ den Brennstoff in übereinander geschichteten Plättchen. Die Brennstoffhöhe beträgt 61 cm mit zusätzlich je 8 cm Natururan als Reflektor an den beiden Enden. Neben den Brennstoffplättchen können Aluminium, Graphit oder andere Materialien in Plättchenform eingebaut werden, um so verschiedene Corezusammensetzungen zu erreichen. Den Aufbau des Cores 7B und 7C, in denen die vorliegenden Messungen vorgenommen wurden, stellt Abb.3.1.2 dar. Eine weiterführende Beschreibung über den Aufbau des Reaktors ist in der Arbeit von Meister et al. /28/ zu finden.

Zur Reaktivitätswertmessung wurden Testelemente mit Absorber oder Kombinationen von Absorber und Moderator in die schnelle Zone des Reaktors gebracht. Um Platz für Testelemente mit geeigneten Abmessungen zu schaffen, wurden vier zentrale Brennelemente der schnellen Zone ausgebaut (siehe Abb.3.1.1). An deren Stelle wurde dann ein Element nach dem anderen der verschiedenen zur Verfügung stehenden Testelementserien eingesetzt. Die Reaktivitätswertunterschiede von Element zu Element wurden durch die Regelplatten, die sich außen an die thermische Ringzone anschließen, ausgeglichen. Innerhalb einer Serie von Testelementen wurde die Reihenfolge so gewählt, daß stets Elemente mit höher zu erwartendem Reaktivitätswert nachfolgten. Rod-drop-Messungen ergaben dann die Reaktivitätswertunterschiede von Element zu Element.

3.1 Meßanordnung im STARK

Der für die Experimente zur Verfügung stehende Absorber Tetra-
borkarbid, B_4C , wurde als lose Pulverschüttung in die Test-
elemente eingefüllt. Der Versuchsaufbau mußte daher so ausge-
legt sein, daß auf keinen Fall beim Hantieren mit den Test-
elementen das Absorberpulver im Bereich des Reaktors auslaufen
konnte. Es wurde ein Doppelbehälter verwendet (Abb.3.1.3),
dessen einer Teil ein in der schnellen Zone des Reaktors fest
eingebautes, unten verschlossenes Rohr bildete. Dieses sog.
Containerrohr diente gleichzeitig als Führungsrohr zum Ein-
setzen der Transportbehälter oder Container in den Corebereich,
die den Absorber oder eine Kombination enthielten.

Das Führungsrohr nutzte zur exakten Positionierung die Zentrier-
einrichtungen für die ausgebauten Brennelemente in der unteren
Gitterplatte im Reaktor aus. Im Bereich der Oberkante der Brenn-
elemente war außen am Rohr eine Dichtung angebracht, die mit-
tels Schrauben an die entsprechenden Dichtungen der benachbar-
ten Brennelemente dicht angedrückt wurde. Dadurch wurde der
Sicherheitsbestimmung des STARK entsprochen, wonach kein Was-
ser, das auf die Oberfläche des schnellen Cores gelangt, in
den darunter befindlichen Brennstoffbereich eindringen darf.
Das Führungsrohr war über das Core hinaus verlängert, so daß
es durch eine Öffnung im Drehdeckel des Reaktors mit der Hand
zu erreichen war. Es war mit einem Schraubdeckel verschlossen,
der nur zum Wechseln der Elemente geöffnet wurde.

Den zweiten Teil des Doppelbehälters für das Borkarbid bilde-
ten die eigentlichen Testelementbehälter. Ihnen kam gleich-
zeitig die Funktion des Transport- und Handhabungsbehälters
zu, was entsprechende Ausführungen bedingte.

3.1.1 Aufbau der Testelemente

In Abschnitt 2.2.1 erwies sich in den theoretischen Unter-
suchungen über die Art, Moderator und Absorber zu kombinieren,

die heterogene Anordnung mit dem Absorber in einer Ringzone, die den Moderator vollständig umschloß, als optimal. Diese Konfiguration wird mit den sog. zylindrischen Testelementen, wie sie in Abb.3.1.4 dargestellt sind, erreicht. Sie bildeten die Anfangsserien der Testelemente. Ein Aluminiumzylinder mit der lichten Weite von 70 mm \emptyset enthält im Zentrum als Moderator einen Polyäthylen-Formkörper, um den Borkarbidpulver in einem äußeren Ring eingerüttelt wurde. Von Element zu Element wurden Polyäthylenkörper mit jeweils größerem Radius eingebaut. Ein Element wurde ohne zentralen Moderator vollständig mit dem Absorber gefüllt und diente als reines Absorberelement zum Vergleich.

Da technische Ausführungen von Abschalt-elementen stets Stab-bündel vorsehen, bestanden die Elemente der darauffolgenden Serien aus Stäben bzw. aus zahlreichen kleinen Rohren, die das Borkarbid enthielten. Es wurden Rohre mit Durchmessern von 7 und 18 mm Außendurchmesser verwendet (Abb.3.1.4). Sie wurden zu Bündeln mit 61 bzw. 19 Rohren zusammengesetzt. Die reinen Absorber- oder Vergleichselemente bestanden nur aus Borkarbid gefüllten Rohren. Die kombinierten Moderator-Absorber-Bündeln enthielten auf den zentralen Positionen statt B_4C gefüllte Rohre Polyäthylenstäbe. Für die Stabbündel mit den 18 mm \emptyset Rohren standen außerdem Zirkonhydrid gefüllte Rohre zur Verfügung.

3.1.1.1 Zylindrische Testelemente

Die zylindrischen Testelemente bestanden aus einem Aluminiumzylinder, der den Absorber bzw. die Absorber-Moderator-Kombination enthielt (siehe Abb.3.1.5). Sein Verschluß nach oben wurde durch einen Schraubdeckel und eine zusätzliche Deckplatte gebildet, die durch den Schraubdeckel über eine Feder auf die Füllung des Elements gedrückt wurde. Die Deckplatte sicherte die Pulverfüllungen der Elemente gegen Verschieben und Verrutschen. Die zentralen Bohrungen in der Deckplatte und in dem Boden des Elements hielten die Moderatorkörper

aus Polyäthylen der kombinierten Elemente in der Behältermitte. Der Schraubdeckel blieb so unabhängig von der Elementfüllung und konnte sicher den Dichtungsring auf die Behälteroberkante drücken. Damit war ein Auslaufen des Absorberpulvers ausgeschlossen. Der Schraubdeckel zentrierte durch seinen Außendurchmesser zusammen mit einer Scheibe am Elementfuß das Testelement im Containerrohr im Reaktor. Ein Distanzstück, mit dem Elementfuß verschraubt, fixierte den Behälter im Reaktor so, daß zur Messung die Mitte der Behälterfüllung mit der Coremitte übereinstimmte.

3.1.1.2 Bündel mit 61 Rohren mit je 7 mm Außendurchmesser

Der Aufbau dieser Testelemente erfolgte mit 61 Rohren, die das Borkarbidpulver enthielten. Die Rohre besaßen einen Außendurchmesser von 7 mm bei einer Wandstärke von 0,4 mm. Sie bestanden aus den Werkstoffen Incoloy 800 (31% Ni, 21% Cr, 1,3% Mn, 46% Fe) und Inconel 625 (63% Ni, 22% Cr, 9% Mo, 3% Nb, 2% Fe). Der Einfluß der verschiedenen Materialien auf die Reaktivitätswerte der Elemente wurde untersucht und als unerheblich befunden. Im Experiment konnten daher Rohre von beiden Materialien ohne weiteres zum Aufbau von Bündel-elementen gemeinsam verwendet werden.

Die Rohre waren an beiden Enden mit Aluminiumkappen verschlossen (siehe Abb.3.1.6). Mit den Verschlusskappen steckten die Rohre in Gitterplatten, die sie zu einem Bündel mit festen Positionen zusammenhielten. In den Platten waren 61 Positionen vorgesehen, das sind ein zentrales Rohr und Ringe mit je 6, 12, 18 und 24 Rohren. Es wurden Gitterplatten mit drei verschiedenen Stababständen verwendet, für die die Radien in Tabelle 3.1 angegeben sind.

Zur Kombination mit dem Moderator wurden Absorberrohre dem Bündel entnommen und durch Polyäthylenstäbe mit der Abmessung 300 mm x 7 mm \emptyset ersetzt. Durch Endkappen aus Aluminium

ließen sich auch die Polyäthylenstäbe in den Gitterplatten positionieren.

Die Bündel wurden mit Gewindestangen und den Gitterplatten zusammengehalten. Sie wurden in Behälter, ähnlich denen der zylindrischen Testelemente, eingesetzt. Stifte in der Wand dieser Behälter sicherten die eingeschlossenen Bündel gegen Verdrehen. Der Schraubverschluß der Behälter verhinderte ein Auslaufen von Borkarbidpulvern während der Handhabung. Die axiale und radiale Positionierung im Containerrohr im Reaktor erfolgte entsprechend der der zylindrischen Elemente.

3.1.1.3 Bündel aus 19 Rohren mit 18 mm Außendurchmesser

19 Rohre mit 18 mm Außendurchmesser und einer Wandstärke von 1 mm aus einem austenitischen Stahl bildeten die Elemente einer weiteren Testserie (siehe Abb.3.1.7). In die Rohre wurde der Absorber bzw. die Moderatorkörper eingefüllt. Die Bündelgeometrie bestand aus einer zentralen Position und zwei Ringen mit 6 bzw. 12 Rohrpositionen. Die Rohre des äußeren Ringes waren dicht auf die des darunterliegenden Ringes gepackt, so daß ihr Abstand nur 0,4 mm betrug. Dadurch sollten die Ausflüsse von thermischen Neutronen im Fall der kombinierten Elemente durch die Lücken zwischen den Stäben begrenzt werden. Außerdem war dies notwendig, um einen Elementradius passend für den Einbau in das Containerrohr mit weniger als 45 mm Außenradius zu schaffen. Auf verschiedene Radien der Teilkreise für mehrere Gitterplatten mußte verzichtet werden.

Die Stabbündel wurden mit Gewindestangen über die Gitterplatten zusammengehalten. Die unteren Endkappen der Rohre waren dicht eingeklebt, während die oberen Verschlußkappen mit einer langen Passung dicht eingesetzt wurden. Mit seinen radialen Abmessungen und der Stabzahl entspricht dieses Element weitgehend den Abmessungen eines Abschaltlements

des SNR. Zusammen mit den zuvor beschriebenen Bündeln aus 61 Stäben wurden damit zwei repräsentative Geometrien für die technische Anwendung untersucht.

3.1.2 Absorber- und Moderatormaterialien

3.1.2.1 Absorber

Die als Absorber zur Herstellung der Testelemente verwendeten Tetraborkarbide, B_4C , bestanden einmal aus einem Material mit natürlicher Isotopenzusammensetzung im Bor sowie bei einem Teil der Meßreihen aus einem Karbid, dessen Bor auf 93% Bor-10 angereichert war. Das Pulver des Borcarbids mit Naturbor besaß eine Kornzusammensetzung, die eine hohe Rütteldichte ermöglichte. Daher enthielt es sehr feine Kornfraktionen, die beim Umfüllen stets zur Staubeentwicklung führten. Dies war der Grund, warum die Elemente außerhalb des Reaktorgebäudes gefüllt werden mußten. Vor dem Transport zum Reaktor war eine gründliche Reinigung notwendig. Die Handhabung erforderte daher einmal eine ausreichende mechanische Festigkeit des Elements und zum anderen eine stabile Pulverfüllung, in der kein unerwünschtes Nachverdichten stattfand. Durch Klopfen am Füllgefäß ergab das Karbidpulver mit Naturbor schnell eine Dichte von $1,6 \text{ g/cm}^3$. Höhere Dichten bei erträglichem Zeitaufwand konnten nur durch maschinelles Rütteln erreicht werden.

Dazu wurde eine vorhandene Siebmaschine umgebaut. Ein eigens hierfür angefertigter Aufsatz hielt die Testelemente auf der Maschine und übertrug auch die Rüttelbewegungen von 50 Hz auf die Elemente. Das Einfüllen der Karbidpulver erfolgte bei laufender Maschine. Trotz der ständigen Rüttelbewegungen stopfte das sehr harte und rauhe Borkarbid während des Einfüllvorganges ungleichmäßig in den Rohren und bildete Brücken. Zusätzliche Schläge auf die Behälterwand waren erforderlich. Die maximal so erreichbare Dichte betrug $1,76 \text{ g/cm}^3$. Sie war jedoch nicht immer exakt erreichbar und nicht konstant über

eine größere Behälterlänge. Gewählt wurde schließlich eine Dichte von $1,7 \text{ g/cm}^3$, entsprechend 67% der theoretischen Dichte von $2,54 \text{ g/cm}^3$ des Tetraborkarbids. Diese Dichte war stets reproduzierbar. Die Nachverdichtungen wurden nach der Messung jeweils geprüft und nur bei einem Element festgestellt, das zu Wartungs- und Reparaturarbeiten am Reaktor mehrmals ein- und ausgebaut werden mußte. Auf diesen Fall wird in den Abschnitten über die Meßergebnisse nochmals hingewiesen.

Das mit der beschriebenen Methode eingefüllte Borkarbid bildete eine feststehende Pulverschüttung, die nur durch Herausstoßen und -kratzen aus den Behältern wieder entfernt werden konnte. Das ermöglichte es, durch stufenweises Auskratzen und wiederholtes Wiegen die Konstanz der Dichte über die Behälterlänge nachzuweisen.

Die aus den aufzufüllenden Volumen und der geforderten Dichte berechneten Borkarbidmengen wurden durch Wiegen überprüft und bei den zylindrischen Testelementen mit einer Toleranz von $1/10 \text{ g}$ eingehalten. Der Fehler blieb damit maximal kleiner als 1% der Einfüllmenge. Bei den einzelnen Rohren oder Stäben betrug die Gewichtstoleranz $1/100 \text{ g}$, so daß der Einfüllfehler pro Rohr unter 1% lag. Die vorgegebene Einfüllhöhe wurde auf 1 mm genau eingehalten, was einer Ungenauigkeit von 3% entsprach.

Das Borkarbid mit dem Bor-10 angereicherten Bor ergab demgegenüber wesentlich kleinere Rütteldichten. Die maximalen Korngrößen waren schon kleiner als $200 \mu\text{m}$, so daß selbst der große Anteil extrem feiner Korngrößen bei Anlieferung die maximale Rütteldichte nicht über $0,7 \text{ g/cm}^3$ brachte. Erst das Stampfen von Teilmengen des Pulvers mit drei verschiedenen Stampfzeiten erlaubte eine reproduzierbare Dichte mit $0,75 \text{ g/cm}^3$ für die erste Elementserie. Das Pulver stand mengenmäßig nur beschränkt zur Verfügung und mußte daher häufig umgefüllt werden. Infolge dieser Umfüllungen ergab sich eine weitere Aufarbeitung des Pulvers. Die letzten

Testelemente konnten daher mit einer Dichte von $0,9 \text{ g/cm}^3$ gefüllt werden. Sie betrug damit 33% der theoretischen Dichte. Der Einfüllvorgang entsprach dem bei dem ersten Pulver. Die Einfülltoleranzen wurden ebenso eingehalten. Ein nennenswerter prozentualer Fehlerbetrag der Reaktivitätswerte aus der B_4C -Gewichtstoleranz ergab sich lediglich bei diesem vergleichsweise dünnen Material bei einigen Testelementen aus der Serie der zylindrischen Elemente.

Zur Überprüfung der vom Lieferanten genannten Bor-10-Anreicherung wurde eine Isotopenanalyse durchgeführt. Es ergab sich ein Gewichtsverhältnis von $\text{B-10/B-11} = 14.81/1 \pm 0,05$. Eine zweite Analyse, die nach Beendigung der Versuche vorgenommen wurde, zeigte, daß während der Experimente keine Änderung dieses Isotopenverhältnisses eingetreten war.

Zur Kontrolle der Herstellungsmethode der Testelemente wurden mehrfach Elemente nach der Messung des Reaktivitätswertes im Reaktor entleert und wieder neu gefüllt. In keinem Fall konnte ein Unterschied festgestellt werden.

3.1.2.2 Moderator

In den kombinierten Testelementen wurden sowohl Polyäthylen als auch Zirkonhydrid als Moderatormaterialien verwendet. Das Polyäthylen besaß eine Dichte von $0,95 \text{ g/cm}^3$ und wurde als massive Formkörper in die Elemente eingebaut. Es wurde in allen Elementserien verwendet, da es als Drehteil in allen erforderlichen Abmessungen leicht angefertigt werden konnte.

Das Zirkonhydrid kam nur in den Bündelelementen mit den $18 \text{ mm } \varnothing$ Rohren zum Einsatz. Das Hydrid lag in Form von Sinterkörpern mit den Abmessungen $15,3 \text{ mm } \varnothing \times 52,5 \text{ mm}$ vor. Es handelte sich um ein Material aus anderen Experimenten. Die Zusammensetzung entsprach $\text{ZrH}_{1,7}$ bei einer Dichte von $5,64 \text{ g/cm}^3$.

3.2 Reaktivitätswertmeßmethode

Die Reaktivitätswertmessung erfolgte als Vergleichsmessung von Element zu Element. Der Wert eines Testelementes ist daher durch Addition mehrerer Meßergebnisse zusammengesetzt.

Die Meßserien begannen jeweils mit der Bestimmung des kritischen Zustandes, d.h. der kritischen Regelplattenstellung am Reaktor bei leerem Containerrohr. Anschließend wurde ein Testelement oder Container in das Rohr in der schnellen Reaktorzone eingesetzt und der Reaktor wieder kritisch gefahren. Die Regelplatten mußten dabei weiter ausgefahren werden, um den Reaktivitätswert des Absorbers im Testelement auszugleichen. Da die Core-Konfiguration wegen des Umbaus der schnellen Zone und Nachladens in der thermischen Zone des Reaktors gegenüber dem normalen Coreaufbau geändert war, lag keine Kalibrierkurve für die Regelplatten vor. Weiter wurde der Reaktor durch jedes Testelement und durch mehrfaches Nachladen zusätzlicher Brennelemente innerhalb einer Serie verändert. Da nicht bekannt war, wie diese Coreänderungen den Reaktivitätswert der Regelplatten beeinflussen würden, hätten zahlreiche Kalibrierkurven aufgenommen werden müssen, um die Reaktivitätswerte der Testelemente aus den Regelplattenstellungen bestimmen zu können. Es wurden statt dessen für jedes Element Messungen nach der inversen Kinetik durchgeführt. Dabei wurden die Regelplatten bei kritischem Reaktor auf die Stellung zurückgefahren, bei der der Reaktor mit dem vorausgegangenen Element kritisch war. Die darauf folgende Abnahme des Neutronenflusses wurde gemessen und daraus der Reaktivitätswertunterschied zwischen den beiden Elementen bestimmt. Nachträglich konnte aus diesen zahlreichen Einzelmessungen eine Kalibrierkurve für die Regelplatte R_3 zusammengesetzt werden, die zeigte, daß der Reaktivitätswert der Platte unabhängig von den verwendeten Beladezuständen war. Diese Kurve konnte daher noch zur Überprüfung der Meßergebnisse herangezogen werden.

Die für die Rod-drop Methode erforderliche Neutronenflußmessung erfolgte mit einer in Abb.3.2.1 gezeigten Meßanordnung. Als Detektor diente eine BF_3 -Ionisationskammer. Deren Kammerstrom wurde verstärkt und über einen Analog-Digital-Wandler zu einem Vielkanalanalysator mit 256 Kanälen übertragen. Die ausgedruckten Werte des Vielkanalanalysators wurden mit einem Programm /29/ ausgewertet.

Reaktivitätswertmessungen mit der inversen Kinetik hängen beim STARK in ihrer Zuverlässigkeit sehr stark von der Position des Detektors im Reaktor ab. Aus früheren Untersuchungen /29/ geht hervor, daß nur dann der positionsabhängige Fehler vernachlässigbar wird, wenn der Detektor in Coremitte in einem Umfangswinkel von 60° zur auszumessenden Regelplatte angeordnet wird. Da der Detektor in der thermischen Säule untergebracht war (siehe Abb.3.1.1), konnten somit nur die Platten R_1 und R_3 im Experiment zum Regeln verwendet werden. Durch die Sicherheitsbestimmungen des STARK ist außerdem festgelegt, daß die zulässige Regelreaktivität auf eine Platte beschränkt bleibt. Zur Ausgleichsregelung wurde im Experiment daher die Regelplatte R_3 benutzt. Dies engte den Reaktivitätswertunterschied zwischen zwei Elementen auf ca. 50 cent ein. Um den Ausgangswert einer Serie, d.h. für Elemente, die nur Borkarbid enthielten, zu bestimmen, mußten zunächst teilweise gefüllte Elemente eingesetzt werden. Die Abstufung der kombinierten Elemente einer Serie war dagegen ausreichend fein.

Eine besondere Bedeutung kam der Temperaturüberwachung des Moderatorwassers der thermischen Zone zu. Das Wasser wirkt mit einem Temperaturkoeffizienten von $d\rho/dT \approx -1,5 \text{ \%/}^\circ\text{C}$ auf die Reaktivität ein. Es war daher wichtig, daß die Wassertemperatur während einer Messung konstant blieb. Weiterhin mußte sie bei der Bestimmung der jeweiligen kritischen Regelplattenstellung für zwei zu vergleichende Elemente übereinstimmen.

Nun befindet sich bei abgeschaltetem Reaktor das gesamte Moderatorwasser in einem im Reaktorkeller aufgestellten Abblaßtank. Es muß vor Aufnahme des Reaktorbetriebs in den Reaktor hochgepumpt werden. Aus Sicherheitsgründen wird beim STARK für den Betrieb eine Moderatortemperatur von ca. 80°C vorgeschrieben. Vor Einfüllen in den Reaktor wird das Wasser daher durch eine Heizung im Abblaßtank bereits annähernd auf diese Temperatur gebracht. In der Betriebsphase wird durch ein Kreislaufsystem ständig ein Teil des Moderatorwassers aus dem Reaktorbehälter in den Kellertank abgelassen und durch eine Pumpe zum Reaktor zurückgefördert, so daß die Tankheizung auch der Regelung der Betriebstemperatur des Wassers dient (siehe Abb.3.2.2).

Ein Temperaturfühler T_3 im Reaktorbehälter vergleicht die Wassertemperatur mit dem vom Reaktoroperator vorgegebenen Wert und regelt danach die Leistung der Tankheizung. Temperaturmeßstelle und Heizung sind so im Kreislauf weit entfernt angeordnet, und es entsteht auch infolge der geringen Umpumpmenge eine lange Regelstrecke mit großer Verzögerungszeit. In der Temperaturregelung treten daher Schwankungen um den Sollwert auf mit einer Wiederholungsfrequenz von 20 bis 30 Minuten. Die Abweichungen betragen nach Einfüllen des Wassers einige Grad Celsius. Sie sinken nach 1 bis 2 Stunden Wartezeit auf ca. $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Die Instrumentierung des STARK gestattet jedoch keine Temperaturmessung mit dieser Genauigkeit. Eine zusätzliche Meßeinrichtung müßte eingebaut werden, mit der die Einhaltung zulässiger Temperaturschwankungen während den Messungen kontrolliert wurde. Dabei zeigte es sich außerdem, daß sich der Mittelwert der Temperaturschwingungen auch nach langer Wartezeit nur selten wieder einstellte, wenn das Moderatorwasser für eine Vollabschaltung des Reaktors vorübergehend in den Kellertank abgelassen wurde. Eine Beseitigung der Restabweichung vom Sollwert hätte zwar durch Änderung der Sollwerteinstellung korrigiert werden können, jedoch hätte dies eine zusätzliche Wartezeit von mehreren Stunden bis zu einer minimalen Abweichung von der Regel-

größe zur Folge gehabt. Voraussetzung für die Vergleichsmessung von einem zum anderen Testelement mit hoher Genauigkeit war somit das Umladen der Testelemente bei nur teilabgeschaltetem Reaktor. Das Wasser der thermischen Zone blieb dabei im Reaktor. Die erforderliche Unterkritikalität zum Ausbau der Elemente wurde nur durch Einfahren der Regelplatten und einer Sicherheitsplatte erreicht. Während des gesamten Umladevorganges konnte die Temperaturregelung so ungestört weiter arbeiten, und die Temperaturschwingungen reduzierten sich bis zum Ende eines Betriebstages auf Amplituden unter $\pm 0,05$ °C. Zusätzlich wurden die Rod-drop-Messungen immer dann gestartet, wenn der Temperaturschreiber den Mittelwert stets von der gleichen Seite überschritt. Um den Fehler der Messungen damit noch sicher anzugeben, wird ein Reaktivitätswert entsprechend der halben Amplitude der Temperaturschwingung als statistischer Fehler in der Auswertung berücksichtigt. Als maximale Amplitude wurde der größte Ausschlag des Temperaturschreibers während 30 Minuten vor und nach der Messung angenommen. Damit ergeben sich Grenzen für Fehler aus den Temperaturschwankungen von $\pm 0,038$ bis $0,11$ $\%$ pro Messung.

Einige Testelemente überschritten den Reaktivitätswert der drei Regelplatten. Da der Reaktor durch Zuladen von Brennelementen auch mit diesen Testelementen kritisch wurde, wäre er während einer Teilabschaltung nach dem Ausbau des Testelementes nur noch um einen Teil des Reaktivitätswertes der Sicherheitsplatte unterkritisch gewesen. Ein solcher Zustand mußte einmal aus Sicherheitsgründen unbefriedigend sein. Außerdem konnte das Herausziehen des Testelementes leicht einen Reaktorschnellachluß durch Überschreiten des Periodengrenzwertes auslösen. Weitere Sicherheitsplatten durften wegen der Betriebsvorschriften jedoch nicht für eine Teilabschaltung eingefahren werden. Vor dem Ausbau solcher Testelemente mußte daher der Reaktor durch Maßnahmen, die nicht im normalen Kontrollsystem vorgesehen sind, zusätzlich unterkritisch gemacht werden. Diese Maßnahmen

bestanden in dem Ausbau eines Brennelementes der schnellen Zone, in dessen Position ein Brennstoffhalter eingesetzt wurde, der vollständig mit dem Absorberwerkstoff der Abschaltetelemente der SNEAK gefüllt war.

Vollständige Abschaltungen des Reaktors innerhalb einer Serie waren trotzdem unumgänglich. Einmal erstreckte sich die Meßzeit einer ganzen Elementserie über mehrere Tage. Um jedoch Fehler aus den so auftretenden Nachtabschaltungen des Reaktors zu vermeiden, blieb stets das zuletzt gemessene Element über Nacht im Reaktor und wurde am nächsten Tag als Referenzelement benutzt. Abschaltungen waren außerdem dann erforderlich, wenn durch Zuladung wirksamer Testelemente die Regelreaktivität überschritten wurde. Der Reaktor wurde nicht mehr kritisch, und es mußten Brennstoffplatten in der thermischen Zone zugeladen werden. Das Testelement verblieb während der Veränderung an der thermischen Zone eingebaut. Es diente bei der Fortsetzung der Serie im neuen Beladezustand als Bezugselement.

Die zugeladenen Brennstoffplatten konnten ohne Messung nicht zur Bestimmung der Größe eines Reaktivitätswertsprunges benutzt werden, da ihr Reaktivitätswert sehr stark von ihren Positionen im Reaktor abhing. Es wurden Werte von 6,7 bis 10,1 $\%$ für jeweils gleiche Platten an verschiedenen Positionen gemessen. Jedoch nicht nur die Position in der Ringzone, sondern auch das Einsetzen des Brennstoffverbands, d.h. eines Brennelementes in die Ringzone, erbrachte Veränderungen im Beladezustand. So können die Brennelemente nach innen oder außen am Ringbehälter anliegend eingesetzt werden. Dies tritt beim Beladevorgang zufällig nach der einen oder anderen Seite ein. Dieser Effekt machte sich einige Male störend bemerkbar. Der geschätzte Reaktivitätswert der nachzuladenden Brennstoffplatten, mit dem der Regelplattenwert möglichst gut ausgenutzt werden sollte, konnte dann nicht erreicht werden. Um den Umfang des Effektes auf den Beladezustand des Reaktors zu kennen, wurde

eine Messung durchgeführt. Die Brennelemente wurden beim Einsetzen bewußt mit dem unteren Ende einmal nach innen und einmal nach außen anliegend in den Ringtank eingesetzt. Durch Keile wurden die oberen Enden der Brennelemente jeweils in die gleichen Richtungen wie unten gedrückt. Durch Rod-drop-Messungen ergab sich daraus ein Reaktivitätswertunterschied von 76 ϕ , die die Beladung mit allen Brennelementen außen anliegend gegenüber derjenigen mit innen anliegenden Brennelementen mehr wert war. Nachdem dieser Wert bekannt war, wurden bei allen folgenden Meßreihen die Keile vorsichtshalber im Reaktor belassen. Durch die Verwendung eines Referenzelementes nach der Wiederaufnahme des Reaktorbetriebs nach Brennelementzuladungen konnten jedoch durch diesen Effekt keine Fehler für die Meßgenauigkeit entstehen.

Die Veränderung der Reaktivität zur Messung und Bestimmung des Reaktivitätswertunterschiedes von Element zu Element wurde somit lediglich durch Verfahren der Regelplatte R_3 bewirkt. Der Fahrauftrag erfolgte hierzu vom Reaktorfahrer am Reaktorpult und wird durch eine Anzeige dort kontrolliert. Die Anzeige besitzt eine Ungenauigkeit, die zusammen mit der Ablesegenauigkeit pro Element zu einem maximalen Fehler von $\pm 0,318 \phi$ pro Messung abgeschätzt wurde.

Dieser Fehler, aus der Regelplattenstellung als auch der aus den Temperaturschwankungen des Moderatorwassers resultierende, beeinflussen direkt das Reaktivitätswertergebnis einer Messung. Bei der Addition mehrerer Meßwerte zum Reaktivitätswert eines Testelementes setzt sich daher der Fehler eines solchen Reaktivitätswertes aus den Fehlern der Einzelmessungen zusammen.

Der Einfüllfehler eines Elementes wirkt sich dagegen nur auf den Wert dieses Elementes aus und wird bei der Addition einer Vergleichsmessung zu einem weiteren Testelement nicht weitergegeben, da er den Meßwert selbst nicht variabel macht. Da der Fehlerbetrag ohnehin klein ist, beim Borkarbid und Poly-

äthylen liegt er stets unter $0,16 \text{ ‰}$, kann er vernachlässigt werden.

Schwankungen der Zählraten der Neutronenflußmessung, bedingt durch die Elektronik, konnten nicht von denen des Neutronenflusses getrennt werden. Durch die Auswertung mit dem 256-Kanalanalysator und zeitlicher Mittelung der Ergebnisse aus mehreren Kanälen mußten sie nicht berücksichtigt werden. Während einer Versuchsreihe kam es jedoch einige Male zu Fehlverhalten der Hochspannungsmeßgeräte. Der Fehler konnte an Hand der Auswertung erkannt werden, so daß die fraglichen Geräteteile ausgewechselt wurden. Aus Zeitgründen konnten zwei der mit fehlerhafter Anordnung gewonnenen Messungen nicht mehr wiederholt werden. Die Reaktivitätswerte dieser beiden Messungen ließen sich jedoch zufriedenstellend aus der nachträglich zusammengestellten Kalibrierkurve für die Regelplatte ablesen.

Aus dieser Kurve konnte außerdem festgestellt werden, daß die getroffenen Fehlergrenzen außer bei den beiden genannten Messungen eingehalten wurden.

3.3 Reaktivitätswertmessungen und Meßergebnisse

Der Brennstoffbereich der schnellen Zone des STARK besitzt eine Höhe von 610 mm. Eine Absorberfüllung mit dem für die Testelemente erforderlichen Querschnitt in dieser Höhe ließ aber einen sehr hohen Reaktivitätswert erwarten. Das Ausmessen eines solchen Wertes wäre sehr umständlich gewesen, da jedes Überschreiten der Regelaktivität das Einfügen eines Zwischenelementes, verbunden mit einer Nachladung von Brennstoffplatten in der thermischen Zone, erfordert hätte. Ein solcher Vorgang hätte einen beträchtlichen Zeitaufwand beansprucht und einen Fehler erzeugt, der bei Aufsummieren bis zu den Elementen mit den höchsten Reaktivitätswerten zu erheblichen Ungenauigkeiten im Endergebnis geführt hätte.

Andererseits verlangte die Themastellung keine Bestimmung des Reaktivitätswertes von Borkarbid. Es genügte vielmehr, den Unterschied zwischen reiner Absorber- und kombinierter Moderator-Absorber-Füllung zu ermitteln sowie die mengenmäßig optimalen Verhältnisse von Absorber zu Moderator festzulegen, um den experimentellen Vergleich zur Rechnung zu liefern. Diese Verhältnisse konnten daher sicher auch mit kürzeren Elementen erzeugt werden.

Von Anfang an war beabsichtigt, die Untersuchungen mit einem hoch angereicherten Borkarbid durchzuführen. Dieses hoch angereicherte Material ist jedoch so teuer, daß sich hieraus ein zweiter Grund für kleinere, d.h. kürzere Elemente ergab.

Die ersten Testserien der zylindrischen Elemente waren daher angelegt, um den Einfluß der Elementlänge zu untersuchen. Die Elementlängen wurden von 60 cm über 50 und 40 bis 30 cm den kürzesten abgestuft. Für jede Elementlänge wurde eine entsprechende Zahl Polyäthylenkörper angefertigt.

3.3.1 Zylindrische Testelemente im STARK 7C und Einführung kürzerer Testelemente

Die ersten Elementserien wurden im STARK mit der Ladung 7C eingesetzt. Der Absorber war B_4C mit Bor natürlicher Isotopenzusammensetzung und einer Rütteldichte von $1,7 \text{ g/cm}^3$. Die Moderatorkörper waren, wie bereits beschrieben, aus Polyäthylen mit der Dichte $0,95 \text{ g/cm}^3$ hergestellt. Es wurden zunächst die in Abb.3.3.1 gezeigten Serien mit den 30 und 60 cm langen Elementen durchgeführt. Die gute Übereinstimmung erlaubte die Reduktion der 40 und 50 cm Elementserien auf wenige Kontrollelemente. Die Darstellung entspricht denen aus dem theoretischen Abschnitt 2.2.1, wobei auf der Abszisse der Radius des zentralen Moderatorkörpers aufgetragen ist, und die Ordinate den Reaktivitätswert wiedergibt. Hier wurde der Reaktivitätswert der kombinierten

Elemente auf den des reinen Absorberelementes normiert, um die gewünschte Vergleichbarkeit zu schaffen.

Die durchgezogene Linie in Abb.3.3.1 repräsentiert die vergleichbaren Rechenwerte. Sie ergaben sich aus S4-Rechnungen mit den Wirkungsquerschnitten des 26-Gruppensatzes MØXTØT. Die Übereinstimmung der normierten Reaktivitätswerte ist in diesem Fall ausgezeichnet, wird jedoch in den weiteren Untersuchungen nicht mehr erreicht. Stets gut wiedergegeben durch die Rechnung wird in allen Fällen dagegen der Bereich der optimalen Reaktivitätswerte.

Die aus den theoretischen Berechnungen gefundenen Ergebnisse dürfen damit als gültig angesehen werden. Weiterhin zeigen die in Abb.3.3.1 aufgeführten Testserien, daß mit den 30 cm langen Elementen die gleichen Reaktivitätswertunterschiede wie mit Elementen über die gesamte Corehöhe gemessen werden kann. Alle weiteren Experimente wurden daher auf Elemente mit dieser Länge, d.h. mit ca. 30 cm hohen Füllungen beschränkt.

3.3.1.1 Zylindrische Testelemente im STARK 7B

Die Untersuchungen mit zylindrischen Testelementen wurden im STARK 7B fortgesetzt. Die Meßreihe blieb dabei jedoch auf die 30 cm hoch gefüllten Behälter beschränkt. Der Unterschied gegenüber den ersten Messungen bestand einmal in der Ladung mit dem anderen Neutronenenergiespektrum in der Testzone. Weiterhin wurde neben Borkarbid mit natürlicher Isotopenzusammensetzung das zweite Absorbermaterial aus B_4C mit einem Bor, das zu 93% aus Bor-10 bestand, verwendet. Die Einfüllsdichte dieses zweiten Absorbers betrug $0,75 \text{ g/cm}^3$. Hinsichtlich der Temperaturüberwachung in der thermischen Zone wurden die in Abschnitt 3.2 beschriebenen Maßnahmen getroffen, um die in der ersten Meßreihe festgestellten Ungenauigkeiten zu vermindern.

Außerdem wurde die Zahl der Meßpunkte pro Testserie vergrößert. Die Ergebnisse sind in Abb.3.3.2 eingetragen. Die Darstellungsart entspricht der in Abschnitt 3.3.1 und 2.2.1, wobei hier die Ordinate einmal die absoluten Reaktivitätswerte als auch die auf den Wert des reinen Absorberelementes normierten Reaktivitätswerte der Testelemente angibt. Alle Meßpunkte lassen sich gut durch eine Kurve verbinden, jedoch fällt eine Ausnahme auf. Es ist dies das Element mit B_4C mit natürlichem Bor und einem Polyäthylenzentralkörper mit 30 mm Radius. Dieses Element mußte wegen mehrerer, plötzlich auftretender Betriebsstörungen am Reaktor während der Meßzeit mehrfach ein- und ausgebaut werden. Die damit verbundenen Erschütterungen verursachten ein starkes Nachverdichten des B_4C -Pulvers. Der Polyäthylenkörper ragte danach ca. 5 mm aus dem Absorber heraus und dürfte so zu dem etwas niederen Meßwert geführt haben. Die Veränderung wurde leider zu spät entdeckt, und das Element konnte während der am Reaktor verfügbaren Meßzeit nicht mehr nachgeprüft werden.

Die gerechneten normierten Reaktivitätswerte liegen für beide Serien über den Meßergebnissen, wobei hier als Querschnittssatz der 26 Gruppen- INR -Satz verwendet wurde. Zum Vergleich wurde auch der 26 Gruppen- $MØXTØT$ -Satz angewendet, der jedoch keine besseren Resultate ergab. Der optimale Reaktivitätswert stimmte in der Lage bezüglich der Abszisse bei Rechnung und Messung weitgehend überein, wobei er durch die Rechenwerte enger begrenzt wird. Die Meßergebnisse bestätigen aber auch den theoretisch bestimmten Verlauf der Kurve, den höheren Reaktivitätswert des Elementes mit dem angereicherten Material als auch die damit geringeren, erzielbaren Verbesserungsmöglichkeiten durch die Kombination mit dem Moderator.

Im Falle der Elemente mit B_4C mit natürlichem Bor beträgt die Reaktivitätswertterhöhung durch die kombinierten Elemente gegenüber dem reinen Absorberelement 53%. Bei der Verwendung des Borkarbid mit angereichertem Bor kann dagegen eine Verbesserung von 25% erreicht werden.

3.3.2 Testelemente aus einem Bündel von 61 Stäben im STARK 7B

Die Bündel mit 61 Stäben wurden in Abschnitt 3.1.1.2 beschrieben. Um auch bei dieser Elementserie die Vorteile kurzer Elemente (300 mm) nutzen zu können, wurden die Bündel für eine Füllhöhe des Absorbers in den Rohren von ebenfalls 300 mm ausgelegt. Die als Moderator benutzten Polyäthylenstäbe wurden ebenso entsprechend bemessen (siehe Abb.3.1.6). Die Gitterplatten und Endkappen der Bündel wurden in ihrer axialen Dicke den Verschlüssen der zylindrischen Elemente angepaßt. Durch die gleichen axialen Materialschichtdicken entstanden so gleiche axiale Reflektoreigenschaften. Das Absorbervolumen in 61 Rohren betrug 52% des Füllvolumens der zylindrischen Elemente. Im Fall des Borkarbid mit natürlichem Bor enthielt ein Rohr 15,4 g des Karbids und bei dem angereicherten Material 8,15 g, das mit einer Dichte von $0,9 \text{ g/cm}^3$ eingefüllt wurde. Die Einfüllichte des Naturbor-karbid betrug auch hier wieder $1,7 \text{ g/cm}^3$.

In der ersten Serie dieser bündelförmigen Testelemente wurde die Gitterplatte mit den kleinsten Stababständen (siehe Tabelle 3.1) und zunächst nur das Karbid mit dem natürlichen Bor verwendet. Das Vergleichselement, das reine Absorberelement, bestand aus 61 mit Borkarbid gefüllten Rohren. Im Laufe der Serie wurde von der Mitte des Bündels beginnend eine Stabreihe nach der anderen ausgebaut und durch Polyäthylenstäbe ersetzt. Es entstanden so die kombinierten Moderator-Absorber-Elemente mit von Element zu Element wachsendem Moderatoranteil. Die Ergebnisse der Reaktivitätswertmessungen sind in Abb.3.3.3 aufgetragen. Die Abszisse der Darstellung gibt die Anzahl der Moderatorstäbe an, wobei dann die Differenz zu 61 die Anzahl der Borkarbidstäbe des jeweiligen Elementes ergibt. Die Ordinate gibt wieder einmal die absoluten Reaktivitätswerte und zum anderen die auf das reine Absorberelement normierten Werte an.

Durch die Punkte bis 19 Polyäthylenstäbe läßt sich sofort eine Kurve ziehen. Darüber hinausgehend ist eine Unstetig-

keit erkennbar. Dies ist verständlich, da bei Elementen mit mehr als 19 Polyäthylenstäben nur noch der äußere Ring von Absorberstäben geschlossen ist. Es kommen Moderatorstäbe vor Lücken zu stehen, die nicht mehr durch Absorber abgedeckt werden, so daß thermalisierte Neutronen aus dem Moderator den Brennstoff erreichen.

Da aber nicht nur die Anzahl der unabgeschirmten Lücken über den Ausfluß an thermischen Neutronen entscheidet, sondern auch die Höhe des thermischen Flusses im Moderatorbereich des Elementes, liegt es nahe, in einem gewissen Umfang den Moderator im Elementzentrum wieder durch Absorber zu ersetzen. Es wurden demzufolge in einem Element mit 37 Polyäthylenstäben, d.h. mit nur einem äußeren Ring von Absorberstäben, von der Mitte her beginnend, wieder anstelle der Moderatorstäbe B_4C -Stäbe eingesetzt. Der Erfolg zeigt sich deutlich bei der Messung mit einem zentralen Absorberstab und nur 36 Polyäthylenstäben innerhalb des äußeren Absorberringes. Es wurde nahezu der optimale Wert erreicht. Die Gesamtzahl der Absorberstäbe beträgt hier nur 25 gegenüber den 36 bei der optimalen Konfiguration ohne zentralen Absorber. Dies kann ausgenutzt werden, wenn ein Element mit möglichst wenig Absorber, aber trotzdem hohem Reaktivitätswert hergestellt werden soll. Wie die Punkte mit 18 und 30 Polyäthylenstäben zeigen, verringern zusätzliche Absorberstäbe im Zentrum den Moderatoranteil soweit, daß kein weiterer Reaktivitätsgewinn erzielt wird.

Weiterhin wurde in einem Element mit 19 Moderatorstäben die vorletzte Absorberreihe über den ganzen zentralen Bereich gleichmäßig verteilt, so daß nur noch der äußere Absorberring geschlossen vorhanden war. Dies ergab jedoch keinen Vorteil gegenüber dem ursprünglichen Element.

Um zu untersuchen, ob verbesserte Reaktivitätswerte auch bei kleineren Elementen erzielt werden können, wurden Elemente mit 37 Stäben, also ohne die 24 Stäbe des äußeren Ringes, zusammgebaut. Es wurde ein ähnlicher Reaktivitätswertan-

stieg wie mit den Bündeln mit 61 Stäben bei 1 bzw. 7 Polyäthylenstäben und dem gleichen Absorber erreicht (siehe Tabelle 3.2).

Die Meßserien wurden nach längerer Meßpause in den wichtigsten Punkten wiederholt, um die Reproduzierbarkeit nachzuweisen. Die Punkte sind in Abb.3.3.3 eingetragen und zeigen eine Übereinstimmung innerhalb der Fehlergrenzen.

Über die Wiederholung hinausgehend wurden jedoch außerdem die beiden weiteren Gitterplatten zum Aufbau der Testelemente benutzt. Als zweiter Absorber wurde dann auch das B_4C mit 93% angereichertem Bor-10 im Bor verwendet. Abb.3.3.4 gibt die Ergebnisse dieser Meßreihen wieder. Die Auftragsweisen entsprechen denen der vorhergehenden. Die Kurven zeigen alle bei 19 Polyäthylenstäben die Unstetigkeit, wenn der vorletzte Absorberring mit zunehmender Anzahl der Moderatorstäbe aufgebrochen wird. Aus dem Unterschied der Kurven für die drei Gitterplatten wird die nachteilige Wirkung der Lücken des Absorbers deutlich. Ein zentraler Absorberstab in dem Element mit dem größten Stababstand und nur noch einem Absorberring und Moderator auf den restlichen Positionen zeigt eine Verbesserung gegenüber dem Element mit 37 Polyäthylenstäben, kann aber den Wert des optimalen Elementes mit dieser Gitterplatte nicht erreichen.

Die Elemente mit dem angereicherten Material ergeben allgemein höhere Reaktivitätswerte. Die Verbesserung der kombinierten Elemente gegenüber den reinen Absorberelementen bleibt dagegen kleiner. Dies entspricht wiederum den rechnerisch erzielten Ergebnissen, die in dem Diagramm der normierten Reaktivitätswerte eingetragen sind. Da die Rechnung die Lücken zwischen den Stäben nicht berücksichtigt, ergeben sich Abweichungen gegenüber den Meßwerten. Die Rechnung überschätzt die Elemente und kann zudem das Maximum nicht wiedergeben.

Insgesamt fallen die mit den kombinierten Elementen erreichten Verbesserungen gegenüber den reinen Absorberelementen bei diesen Stabbündeln kleiner als bei den zylindrischen Testelementen aus. Die Verbesserungswerte betragen hier bei Borkarbid mit Naturbor 39% und bei dem Borkarbid mit dem angereicherten Bor 18% mit jeweils der Gitterplatte mit den kleinsten Stababständen.

Zur Ergänzung wurden aus den Stäben mit Naturborkarbid Elemente aufgebaut, deren Stabpositionen auf den einzelnen Ringen nur zur Hälfte besetzt waren. Das Ersetzen von Absorberstäben durch Moderator ergab dabei in keinem Fall einen günstigeren Reaktivitätswert, die Lücken zwischen den Absorberstäben waren eben zu groß.

3.3.3 Testelemente aus einem Bündel von 19 Stäben im STARK 7B

Mit den in Abschnitt 3.1.1.3 beschriebenen Elementen mit 19 Stäben wurden Testserien mit beiden zur Verfügung stehenden Absorbern sowie mit Polyäthylen und Zirkonhydrid als Moderator im STARK 7B ausgemessen. Die Einfüllhöhen der Absorber und Moderatoren in die Rohre betragen in allen Fällen 315 mm. Diese geringfügige Abweichung von den Elementlängen der vorherigen Serie ergab sich aus der Zusammensetzung der für die Experimente zur Verfügung stehenden Zirkonhydridkörper von je 52,5 mm Länge zu einer Moderatorsäule. Die Einbaulängen der anderen Materialien mußten daher angepaßt werden.

Die Meßergebnisse dieser Elemente werden in den Abbildungen 3.3.5.1 und 3.3.5.2 dargestellt. Die Auftragsweise beider Abbildungen erfolgt wie im vorherigen Abschnitt mit der Moderatorstabzahl auf der Abszisse. Der Unterschied dieser Zahl zu 19 gibt die Absorberstabzahl an. In der Darstellung der normierten Reaktivitätswerte sind weiterhin die rechnerisch ermittelten Werte eingetragen. Danach werden die Elemente mit geringem Moderatoranteil unterschätzt, während

die mit hohem Moderatoranteil, wie zu erwarten, überschätzt werden. Der Umfang des Rechenfehlers ist hier jedoch geringer als bei den Bündeln aus 61 dünnen Stäben. Die wichtigsten Aussagen aus der theoretischen Untersuchung werden hier ebenfalls bestätigt: je größer die Bor-10-Konzentration, um so größer ist der Wert des reinen Absorberelementes. Von diesem steigen die kombinierten Elemente bei höheren Bor-10-Konzentrationen prozentual zu kleineren optimalen Verbesserungen an als bei Elementen mit kleiner Bor-10-Dichte. Bei geringeren Wasserstoffdichten, hier bei $ZrH_{1,7}$ als Moderator, bleiben die Verbesserungen der Reaktivitätswerte klein. Sie erreichen beim B_4C mit Bor-10 in natürlicher Konzentration einen Reaktivitätswert um ca. 17% über dem des reinen Absorberelementes. Mit dem hier verwendeten angereicherten Material werden nur ca. 8% Reaktivitätswertverbesserung erzielt.

Die entsprechenden Verbesserungswerte für Polyäthylen als Moderator sind der Abb.3.3.5.2 zu entnehmen. Hierbei konnte jedoch der Reaktivitätswert für das kombinierte Element mit B_4C mit Naturbor nicht mehr gemessen werden, da der Reaktor nicht mehr zur Verfügung stand.

4. Untersuchungen über Leistungsspitzen im Brennstoffbereich in der Nachbarschaft von Moderator-Absorber-Elementen mit stabbündelförmigem Aufbau

In den Rechnungen zu den Experimenten wurden außer den k_{eff} -Werten die 26 Gruppenflüsse erzeugt. Sie zeigen, daß im Zentrum der kombinierten Elemente ein Teil der abgebremsten Neutronen den thermischen Energiebereich erreichen. Bei den hohen Absorptionsquerschnitten von Bor-10 bei solch kleinen Neutronenenergien genügen B_4C -Schichten von wenigen Zehntel Millimeter, um thermische Neutronen beim Durchdringen vollständig zu absorbieren. Bei den stabförmigen Abschaltelementen ergibt sich für die kombinierten Elemente mit hohem Moderatoranteil keine geschlossene äußere Absorberschicht um den Moderator, so daß durch die Lücken zwischen den Stäben ein Ausfluß von thermischen Neutronen in den umgebenden Brennstoff entsteht. Der Brennstoff besitzt gegenüber thermischen Neutronen einen großen Spaltquerschnitt, so daß die Reichweite dieser Neutronen im Brennstoff klein ist. Zusammen mit dem über den Umfang des Stabbündels örtlich stark unterschiedlichen Ausfluß von thermischen Neutronen infolge der schmalen Stababstände können so im Brennstoff, der den Abschaltelementen benachbart ist, örtliche Leistungsspitzen auftreten.

4.1 Messungen mit Spaltspurdetektorfolien

Zur Untersuchung über den Umfang solcher Leistungsspitzen wurden Messungen mit Spaltspurdetektorfolien durchgeführt. Das Meßverfahren sieht eine Kunststoffolie, Lexan, vor, die auf eine Uran beschichtete Aluminiumfolie gelegt und in den zu messenden Neutronenfluß gebracht wird. Eine dem Neutronenfluß proportionale Anzahl von Spaltprodukten fliegt in die Kunststoffolie und hinterläßt dort Materialschäden. Durch Ätzen der Kunststoffolien mit Kalilauge nach dem Bestrahlen werden die Materialschäden vergrößert und im Mikroskop sichtbar. Die Spaltspurdichte wird durch Auszählen der Folien be-

stimmt und ist ein Maß für die Spaltratenverteilung in der Uransicht.

Die verwendeten Metallfolien besaßen die Abmessungen $6 \times 12 \text{ mm}^2$ und waren mit Uran beschichtet, das zu 93% aus Uran-235 bestand. Die Anordnung der Folien an den Testelementen wird durch die Abbildungen 4.1 und 4.2 gezeigt. Im Falle der Stab-
bündel mit 61 dünnen Stäben wurden sie außen am Container-
rohr so angeklebt, daß die Folienmitte über einer Stablücke zu liegen kam. Die zur Messung benutzten Elemente bestanden aus 37 Polyäthylenstäben und 24 mit B_4C mit 93% angereicher-
tem Bor-10 im Bor gefüllten Rohren. Um den Moderator stand somit nur noch eine Reihe von Absorberstäben. Die Messung wurde dreimal durchgeführt, wobei zu jeder Messung eine an-
dere Elementgitterplatte mit einem anderen Stababstand (siehe Tabelle 3.1) im Bündel verwendet wurde. Die Bestrahlung er-
folgte über eine Stunde an der im vorigen Abschnitt beschrie-
benen Position in der schnellen Zone des STARK. Die ortsab-
hängige Spaltspurdichte auf den bestrahlten und geätzten Fo-
lien über der Folienlänge lieferte die unterschiedliche Spaltrate am Elementumfang, die gesuchte Größe. Für das Ele-
ment mit dem kleinsten Stababstand wurde so eine örtliche Spaltratenerhöhung von $15\% \pm 10$ gegenüber dem Minimum bestimmt. Das Element mit mittlerem Stababstand ergab $20\% \pm 15$ und das mit großem Stababstand $25\% \pm 11$. Die großen Unsicherheiten bei diesen Werten werden durch das Meßverfahren mit einigen Pro-
zent für die Spaltratendichte und die anschließende Differen-
zenbildung bedingt.

Durch den großen, radialen Abstand von der Meßfolie zur äußeren Stabreihe machen sich Überlagerungen aus benach-
barten Stablücken bemerkbar. Dieser Abstand als auch die gegenseitige Überlappung muß jedoch nicht als Nachteil für den Aussagewert der Messung hinsichtlich des Element-
einsatzes in einem Leistungsreaktor angesehen werden. Eine technische Ausführung eines kombinierten Elementes in Stabbündelform aus solch kleinen Stäben braucht ohnehin

eine Ummantelung oder Führungsrohr für die mechanische Festigkeit. Um den Kühlmittelfluß durch das Abschaltelement zu kontrollieren und um den Reaktorkernverband nicht zusätzlich zu stören, ist ein Brennelement ähnlicher Kasten an der Position des Abschaltelementes erforderlich. Die benachbarten Brennelemente selbst sind von ihren eigenen Kästen umgeben. Der im Experiment vorhandene Abstand Brennstoff-Absorberstablücke ist damit auch in einem Leistungsreaktor gegeben. Die Strukturmaterialien besitzen zudem Streueigenschaften und werden zusammen mit der Streuung im Natrium, das sich in den Räumen zwischen den Kästen befindet, zu einem Ausgleich der Flußspitzen beitragen.

Mit den Bündelelementen aus 19 Stäben wurden die gleichen Messungen durchgeführt. Die Bündel bestanden aus 12 Stäben mit Borkarbid mit dem angereicherten Bor und 7 Stäben aus Polyäthylen bzw. Zirkonhydrid. Die Spaltspurdetektoren wurden so angebracht (siehe Abb.5.2), daß sie die Lücken zwischen den Stäben von außen überspannten. Die Bestrahlung erfolgte wie zuvor im STARK. Bei Verwendung von Polyäthylen als Moderator zeigen sich Spaltratenspitzen, die gegenüber den Minima um $31\% \pm 20$ ansteigen. Mit Zirkonhydrid bleiben die Schwankungen innerhalb der Meßgenauigkeit von $\pm 10\%$.

4.2 Auswirkungen des thermischen Ausflusses

Für einen normalen Abschaltvorgang im Reaktor haben Leistungsspitzen in diesem Umfang um ein Abschaltelement keine Bedeutung. Die Abschaltelemente, die stets gemeinsam in den Reaktor einlaufen, erbringen eine Abschaltreaktivität von mehr als 10\$. Dadurch sinkt der Neutronenfluß sofort nach Einfahren der Elemente auf ein Elftel des ursprünglichen Wertes. Die weitere Flußabnahme bewirkt, daß nach ca. 10 sec die Wärme-freisetzung im Brennstoff durch die Nachzerfallswärme der Spaltprodukte bestimmt wird. Eine örtlich höhere Spaltrate durch thermische Neutronen kann dann keine Gefährdung für den Brennstoff oder die Brennstabhüllen bewirken.

Es kann jedoch ein Fehlverhalten der Antriebe der Abschalt-elemente angenommen werden, so daß nur ein Abschaltelement in den Reaktor einläuft. Bei mindestens drei Abschaltelementen mit zusammen 10 \$ bleiben als Abschaltreaktivität für ein Element ca. 3 \$. Nach der einfachen Formel für den prompten Sprung wiederum nimmt der Fluß im Reaktor prompt auf $1/1-\rho = 1/4$ ab. Wird der Reaktor, vom Fehlverhalten der Abschaltelemente abgesehen, noch beherrscht, da die Primärkühlung nicht ausfällt, könnten die lokalen Überhitzungen im Brennstoff um das Abschaltelement nur kurzzeitig auftreten. Sie müßten außerdem die normale Wärmefreisetzung um mehr als das Dreifache übersteigen, damit die Ausführung des Abschaltelementes als kombiniertes Element in Stabbündelform zur Ursache einer Beschädigung der Brennelemente wird.

Eine Ausnahmesituation, die die Umfangsschwankungen der Spaltleistung im Brennstoff stärker begrenzt, ergibt dagegen die folgende Unfallbetrachtung. Der Reaktor muß wegen einer zu großen Überschußreaktivität abgeschaltet werden. Ein fehlerhaftes Antriebssystem verfährt nur ein Abschaltelement und dieses nur teilweise in die Spaltzone des Reaktors. Die Reaktorleistung wird dadurch nur langsam reduziert, bis weitere Maßnahmen ergriffen werden. Dies kann aber nicht verhindern, daß sich um das eingefahrene Teilstück des Abschaltelementes eine Flußsenke ausbildet. Wie die Rechnungen zeigen, betragen die Flußabsenkungen im Wirkungsbereich eines voll eingefahrenen Elementes ca. 20% gegenüber dem ungestörten Fluß. Um die obere Grenze für die Spaltratenschwankungen um das kombinierte Element abschätzen zu können, wird dieses Ergebnis auch auf ein teilweise eingefahrenes Element übernommen. Es liegt im Bereich der zuvor gemessenen Schwankungen an den Stabbündeln mit den 7 mm Stäben, so daß beim Einbau in den Leistungsreaktor diese Unfallsituation genauer überprüft werden muß. Es ist vor allem die Zeitspanne zu untersuchen, in der Temperaturgradienten mit entsprechenden Thermospannungen in den benachbarten Brennstabhüllen auftreten können.

Sollte daran gedacht werden, kombinierte Moderator-Absorber-Elemente auch als Regelemente zu verwenden, so ist besonders dieser letzte Punkt zu beachten. Zu Beginn eines Betriebszyklusses tauchen die Regelstäbe während des Leistungsbetriebs zu etwa einem Drittel der Absorberlänge in das Core ein. Sie befinden sich in der oberen, der heißeren Corehälfte. Ein Ausfluß von thermischen Neutronen aus einem stabbündelförmigen, kombinierten Element würde dann eine einseitige Belastung der dem Element benachbarten Brennstäbe bewirken. Daraus resultierende Temperaturgradienten würden zu Spannungen im Hüllrohr führen, die als Dauerbelastung den Betriebsspannungen der Hülle addiert werden müßten.

Somit ist eine Elementgeometrie zu empfehlen, die den Ausfluß von thermischen Neutronen verhindert. Dazu bieten sich die folgenden Varianten an:

1. Das Element verfügt über sehr dünne Absorberstäbe. Die optimale Absorberschicht wird aus einer Doppelreihe von Absorberstäben aufgebaut. Der Moderator wird als ein zentraler Block hergestellt. Die Moderatorverdünnung durch den Stabbündelaufbau wäre damit vermieden. Daß Metallhydridkörper in den hier zu erwartenden Dimensionen herstellbar sind, zeigt der Aufbau der Brennelemente des KNK-I Cores.
2. Bei ausreichend dicken Stäben wird der Moderator nicht getrennt vom Absorber in verschiedenen Rohren untergebracht. Vielmehr verfügt jedes einzelne Rohr über einen zentralen Moderatorzylinder, um den sich jedes Mal ein Absorberring schließt.
3. Ein Element, das dem für die Rechnungen angenommenen nahekommt. Der Moderator wird wie im ersten Beispiel in einem zentralen Rohr untergebracht. Der Absorber befindet sich zwischen zwei konzentrischen, axial geschlossenen Rohren, die zusammen den zentralen Moderator umgeben. Zwischen Moderatorumhüllung und dem Innenrohr der Absorberhülle bleibt ein Kühlspalt, um die Reaktionswärme aus den Einfangprozessen

im Bor abführen zu können. Schwierigkeiten für ein solches Element werden vor allem bei der Konstruktion dieses konzentrischen Rohres zu erwarten sein. Unterschiedliche Temperaturen des Innen- und Außenrohres können zu Wärmespannungen führen. Weiterhin entstehen bei einem Bor-10-Abbrand von 1% z.B. aus 1 cm³ Borkarbid mit 100% der theoretischen Dichte und Bor aus 100% Bor-10 41 cm³ (n,p,T) Helium. Da Helium im Stahl nicht löslich ist, kann die Diffusion durch das Absorberhüllrohr vernachlässigt werden. Da das konzentrische Innenrohr einen großen Radius besitzt, werden die hohen Innendrucke bei zunehmendem Bor-10-Abbrand zu größeren Hüllrohrspannungen führen als etwa bei dünnen Einzelstäben.

5. Zusammenfassung und Schlußbetrachtung

Die Angaben über Erhöhungen des Reaktivitätswertes von Abschaltetelementen für schnelle Reaktoren durch die Kombination von Moderator und Absorber in einem Element gegenüber Elementen, die nur Absorber enthalten, gingen sehr weit auseinander. Nachdem durch die k_{eff} -Rechnungen für ein dem SNR ähnliches Core festgestellt wurde, daß für zylindrische Abschaltetelemente bei jeweils gleichen Materialmengen die größten Reaktivitätswerte erzielt werden, wenn der Absorber einen zentralen Moderator in einer Ringzone umgibt (siehe Abb.2.2.2), wurde mit den gleichen Rechnungen der Einfluß von Moderator- und Absorbermaterialien auf den Reaktivitätswert untersucht. Die Betrachtung beschränkte sich dabei von vorneherein auf die Moderatoren und Absorber, die die größten Reaktivitätswerte und die größten Anwendungsbereiche in schnellen Reaktoren erwarten ließen, nämlich B_4C und Europiumoxid als Absorber sowie Wasserstoff in der Form eines Metallhydrids als Moderator. Hinsichtlich der vorgesehenen Experimente wurden teilweise die Untersuchungen auf Polyäthylen als Moderator ausgedehnt. In den Rechnungen wurden für die Materialien verschiedene Dichten eingesetzt, sowie bei Borkarbid Bor mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden für das Bor-10 verwendet und für jede Moderator-Absorber-Paarung das Volumenverhältnis mit dem optimalen Reaktivitätswert bestimmt. Diese Reaktivitätswerte dividiert durch den Wert eines volumengleichen Elementes, das vollständig mit dem Absorber der Paarung gefüllt war, dem reinen Absorberelement also, ergaben die maximal möglichen Verbesserungen durch die Kombination. Danach lassen sich in der Kombination mit Zirkonhydrid gegenüber den Elementen mit den Absorbern der nachstehenden Tabelle folgende Verbesserungen erzielen: (Außenradius des Elementes 41 mm)

Material	Anreicherung d.Bor-10 %	Dichte %d.th.D.	Verbesserung (kMA _{opt} /kA ⁻¹) 100%
B ₄ C	nat	100	30
"	90	100	4
"	nat	80	41
"	90	80	7
Eu ₂ O ₃	-	100	50
"	-	80	61

Dies sind einige Zahlen aus dem weiten Spektrum der möglichen Materialkombinationen. Sie zeigen aber bereits den wichtigsten Einsatzbereich:

1. bei B_4C mit natürlichem oder wenig angereichertem Bor sowie Eu_2O_3 sind nennenswerte Verbesserungen durch die Kombination mit Zirkonhydrid erreichbar. Die Anreicherungsersparnis bei B_4C mit 100% der theoretischen Dichte geht so bis zu einer Bor-10-Konzentration von 49%. Die Reaktivitätswerterhöhungen vergrößern sich noch, wenn die Absorberdichte aus fertigungs- oder kühltechnischen Gründen abnimmt.

2. bei hoch angereichertem Bor im Karbid bleibt der Reaktivitätswertgewinn klein. Hier kann nur der finanzielle Vorteil zum Tragen kommen, wenn ein großer Teil des hoch angereicherten Bors durch das weit billigere Metallhydrid ersetzt wird.

Diese theoretischen Untersuchungen wurden durch Experimente fortgesetzt, die einmal die Rechenwerte überprüfen sollten, als auch noch Geometrien erfassen, die technisch ausführbar sind, aber nicht mehr durch die Rechnung nachvollzogen werden können.

Es wurden Testelemente hergestellt und deren Reaktivitätswerte im STARK gemessen. In Anlehnung an die Rechnung bestanden die ersten Testelementserien aus Rohren mit einem zentralen Kern aus Polyäthylen als Moderator und mit einer B_4C -Pulverschüttung als Ringzone darum. Die Messungen wurden in STARK 7B und 7C durchgeführt. Im Fall des 7C-Cores stimmten die Meßergebnisse der Reaktivitätswertverbesserungen mit den rechnerischen Ergebnissen für das gleiche Core und die gleichen Elemente sehr gut überein. Beim 7B-Core ergaben die Rechnungen im Optimum einen ca. 5% zu optimistischen Wert für die kombinierten Elemente an. Die Lage der Optima der Reaktivitätswerterhöhungen hinsichtlich der Volumenverhältnisse von Moderator und Absorber stimmten in beiden Fällen zufriedenstellend überein.

Da die technischen Ausführungen der Abschaltetelemente im allgemeinen aus einzelnen Stäben in einem Bündel aufgebaut sind, wurden Elemente mit einer solchen Konfiguration zu weiteren Testelementserien verwendet. Der Absorber befand sich in einzelnen Rohren und der Moderator ebenso oder war ohne Zusatzumhüllung als Stab ausgebildet. Der Moderator bestand aus Polyäthylen oder Zirkonhydrid. Der Vergleich reines Absorberelement und kombiniertes Moderator-Absorber-Element ergab hier kleinere Werte an Reaktivitätswertverbesserungen als nach der Rechnung zu erwarten war. Dies erklärt sich durch die Lücken zwischen den Absorberstäben der Absorberringzonen, die im Bereich der größten Reaktivitätswerte nur noch aus einer geschlossenen Reihe von Absorberstäben bestand. Die thermalisierten Neutronen konnten hierdurch den benachbarten Brennstoff erreichen. Sie bewirkten einen positiven Reaktivitätsbeitrag, der den negativen Wert des Abschaltetelementes verminderte. Die Rechnungen konnten diesen Effekt nicht mehr wiedergeben und ermittelten einen stark nach oben abweichenden Wert für die Verbesserungen. Dies wird deutlich durch die Zahlenwerte der hier eingefügten Tabelle, die einige Ergebnisse zusammenfassend wiedergibt.

Reaktivitätswertunterschiede der Elemente mit 61 Stäben mit 7 mm Außendurchmesser. Die Angaben für $\Delta k_{M-A}/\Delta k_{B_4C}$ erfolgen in Prozent.

Anzahl der Moderatorstäbe	B_4C , B-10 nat $\rho = 1,7 \text{ g/cm}^3$		B_4C , B-10 93% $\rho = 0,9 \text{ g/cm}^3$	
	Rechnung	Messung	Rechnung	Messung
1	2,6	2,3	1,4	1,2
7	17,3	15,5	8,5	7,4
19	39,5	29,2	18,9	16,6
37	55,1	36,8	25,0	14,2

Reaktivitätswertunterschiede der Elemente mit 19 Stäben mit 18 mm Außendurchmesser. Die Angaben für $\Delta k_{M-A}/\Delta k_{B_4C}$ erfolgen in Prozent.

Anzahl der Moderatorstäbe	$B_4C, B-10 \text{ nat}, \rho = 1,7 \text{ g/cm}^3$				$B_4C, B-10 \text{ 93\%}, \rho = 0,76 \text{ g/cm}^3$			
	Polyäthylen		ZrHx		Polyäthylen		ZrHx	
	Rechnung	Messung	Rechnung	Messung	Rechnung	Messung	Rechnung	Messung
1	6,5	6,9	3,0	3,7	3,3	5,9	1,4	2,1
4	27,8	23,0	13,0	11,9	15,3	13,3	7,1	6,3
7	39,5		22,0	16,5	22,4	18,7	11,45	8,1

Sie zeigt für Abschaltetelemente mit Stabbündelaufbau nur geringfügige Erhöhungen der Reaktivitätswerte durch die Kombination Moderator-Absorber. Vor allem bei der Verwendung des technisch interessanten Moderators bleiben die Werte klein. Wird zudem die geringe Dichte der im Experiment verwendeten Borkarbide beachtet, steht zu erwarten, daß mit den höheren, technisch herstellbaren Sinterdichten der Absorberpulver bei hoch angereichertem Bor keinerlei Verbesserungen mehr erzielt werden können. Die Anwendung der kombinierten Elemente kann, wenn ein Stabbündelaufbau des Abschaltetelementes unumgänglich ist, dann nur noch aus finanziellen Erwägungen gerechtfertigt werden.

LITERATUR

- /1/ Directory of Nuclear Reactors :
IAEA, Wien, Band 1-9
- /2/ Stehn, J.R. et al. :
Neutron Cross Sections, BNL-325, Band 1,
5-10 (2. Auflage 1964)
- /3/ Köhler, W.H. :
Offenlegungsschrift Nr. 146 4769
Deutsches Patentamt, BRD
Aktenzeichen: P 1464 769.9 (K 51216)
Anmeldetag: 30.10.1963
- /4/ Köhler, W.H. :
Notiz an Herrn M. Kühle (11.8.1969)
- /5/ Hellstrand, E. :
Reactivity worth of control rods containing a
combination of an absorber and a hydrogenous
material
The Physics of Fast Reactors - Operation and
Design, Conference, London (June 1969)
- /6/ Dr. Voss :
Reaktivitätswerte von SNR-Absorberelementen mit
Zirkonhydrid
Interatom-Notiz Nr. D-B75 (1969)
- /7/ Raberain, A.M. :
Rechnungen zu Absorbermaterialwertmessungen in
SNEAK 9B
Persönliche Mitteilung (14.6.1973)

- /8/ Spence, Interatom:
Persönliche Mitteilung (9.3.1971)
- /9/ Union Carbide Corporation:
Angebot vom 16.8.1971
- /10/ Interatom:
Persönliche Mitteilungen (Dez. 1971)
- /11/ Toulukian:
Thermal Conductivity, Vol.1
IFI/Plenum, New York (1970)
- /12/ Elektroschmelzwerk Kempten, München:
Angebot vom August 1972
- /13/ Ullmann:
Enzyklopädie der technischen Chemie
Band 4, 580-611 (3. Auflage, 1953)
- /14/ Gephardt, Thümmeler, Seghezi:
Reaktorwerkstoffe, Band 1, 262-282 (1964)
- /15/ Gmelins:
Handbuch der anorganischen Chemie
Band 20, Lithium (1960)
- /16/ Grathwohl, G.:
Erzeugung und Freisetzung von Tritium durch
Reaktoren und Wiederaufbereitungsanlagen und
die radiologische Belastung bis zum Jahr 2000;
KFK ext. 4/73-36
- /17/ Raberain, A.M.:
Materialwertmessungen im Corezentrum von SNEAK-9A-O
und SNEAK-9B
Persönliche Mitteilung (6.11.1972)

- /18/ Abagjan, L.P. et al.:
Gruppenkonstanten schneller und intermediärer
Neutronen für die Berechnung von Kernreaktoren
KFK-tr-144
- /19/ Tipton, C.R.:
Reactor Handbook, Vol.1, Materials, 1109
(2. Auflage, 1960)
- /20/ BASF:
Handbuch der Kunststoffe
3-12 (6. Auflage, 1963)
- /21/ Bober, M., Dorner, S., Schumacher, G.:
Kinetik des Sauerstofftransportes in oxidischen
Brennelementen
KFK-1272/3, 112/15-112/22 (1972)
- /22/ Mueller, M.W. et al.:
Metal Hydrides
Academic Press, New York (1968)
- /23/ Gmelins:
Handbuch der anorganischen Chemie
Band 14, Bor (1954)
- /24/ Weast, R.C.:
Handbook of Chemistry and Physics
Chemical Rubber Co., B 63-B-156 (53. Auflage, 1972-73)
- /25/ Stom, F.G.A., West, R.:
Advances in organometallic Chemistry
Academic Press, Vol.3, 263-364 (1965)
- /26/ Bartels, W.J.C.:
Self-Absorption of Monoenergetic Neutrons
KAPL-336 (1950)

- /27/ Dwark, J. et al.:
Self-Shielding Factors for Infinitely Long,
Hollow Cylinders
KAPL-1262, 11-18 (1955)
- /28/ Meister, H.:
The Karlsruhe Fast-Thermal Argonaut Reactor
Concept
KFK-217 (1964)
- /29/ Kußmaul, G.:
Reaktivitätswertmessung im STARK
Persönliche Mitteilung 1970

BEZEICHNUNGEN UND ABKÜRZUNGEN

EBR-1:

Experimental Breeder Reactor 1, (Idaho, USA)

Leistung 1,2 MW_{th}

Argonne Fast Source Reactor, (Idaho, USA)

Leistung 1 kW_{th}

SNR-300:

Schneller natriumgekühlter Reaktor

Leistung 300 MWe

Schnellbrüter-Prototyp, Kernkraftwerk der Debenelux-Länder in Kalkar

PFR:

Prototype Fast Reactor, (Dounreay, GB)

Leistung 250 MWe

BN 350:

Schneller natriumgekühlter Reaktor

(Schewtschenko, UdSSR)

Leistung 150 MWe + 120000 t/d-entsalztes Wasser

Reines Absorberelement:

Abschaltelement, das außer den Materialien für den konstruktiven Aufbau nur noch Absorbermaterial enthält.

Kombiniertes Element:

Abschaltelement, das neben Absorber noch einen Moderator enthält.

Clementine:

Schneller quecksilbergeköhlter Reaktor

Leistung 25 kW_{th}, (Los Alamos, USA, 1946-1953)

STARK:

Schnell-Thermischer-Argonaut-Reaktor-Karlsruhe

SNEAK:

Schnelle-Nullenergie-Anlage-Karlsruhe

TABELLEN

- 2.1 Adjungierter Fluß im SNR-300 Mark I Core
- 2.2 Dicke der optimalen Randschicht
- 2.3 Absorptionsquerschnitte von Borkarbid im Maximum des Neutronenspektrums eines schnellen Reaktors
- 3.1 Hauptabmessungen der Gitterplatten für die Bündel mit 61 Stäben
- 3.2 Ergebnisse der Messungen im STARK 7B mit den Bündeln mit 37 Stäben

Tabelle 2.1: Adjungierter Fluß im SNR-300 Mark I Core

Energie- gruppe	mittlere Energie	$\phi^+ \cdot 10^4$	Energie- gruppe	mittlere Energie	$\phi^+ \cdot 10^4$
1	8,5 MeV	0,4436	14	1,575 keV	0,2805
2	5,25 MeV	0,3873	15	732,5 eV	0,3360
3	3,25 MeV	0,3932	16	340 eV	0,3824
4	1,95 MeV	0,3758	17	157,5 eV	0,3737
5	1,1 MeV	0,3348	18	73,25 eV	0,4102
6	600 keV	0,3183	19	34 eV	0,2384
7	300 keV	0,2998	20	15,75 eV	0,4090
8	150 keV	0,2794	21	7,325 eV	0,2683
9	73,25 keV	0,2591	22	3,4 eV	0,3493
10	34 keV	0,2479	23	1,574 eV	0,1520
11	15,75 keV	0,2541	24	0,7325 eV	0,2153
12	7,325 keV	0,2693	25	0,34 eV	0,6056
13	3,4 keV	0,2756	26	0,0252 eV	0,6300

Tabelle: 2.2

Dicke der optimalen Randschicht in mm

Absorber	$R_0 = 3,0 \text{ cm}$			$R_0 = 4,1 \text{ cm}$	$R_0 = 5 \text{ cm}$
	Mod.: $(\text{CH}_2)_n$, % d.th. D.			Mod.: $(\text{CH}_2)_n$	Mod.: $(\text{CH}_2)_n$
% der thermischen Dichte	100	70	50	70 % d.th. D.	70 % d.th. D.
100	4,5	8		7	6,5
60	4	6,0	9,5	6	6,5
40	3,5	5,5	7,5	6	6,0
				5	
B_4C , B-10 nat.					
100 % d.th. Dichte		4,5	7,5	5	

Tabelle 2.3: Absorptionsquerschnitt von B^{10} im Bereich des Maximums im Spektrum eines schnellen Reaktors; $\Sigma_a \cdot r$ für ein Absorberelement mit 41 mm Außenradius und 1. B_4C mit 40 % d.th. Dichte und Naturbor ($B_4C, nat/40$) und 2. B_4C mit 100 % d.th. Dichte und 90 % Anreicherung von Bor-10 ($B_4C, 90/100$).

Energie- gruppe	Energie- bereich keV	σ_a -B-10 barn	$\Sigma_a \cdot 4,1$ $B_4C, nat/40$	$\Sigma_a \cdot 4,1$ $B_4C, 90/100$
6	400 - 800	0,5	0,018	0,20
7	200 - 400	0,9	0,032	0,37
8	100 - 100	1,6	0,057	0,65
9	46,5 - 100	2,4	0,085	0,98
10	21,5 - 46,5	3,6	0,128	1,47
11	10,0 - 21,5	5,2	0,185	2,12

Die Teilchendichten von B-10 sind in B_4C mit Naturbor und 40 % d.th. Dichte

$$N_{B-10} = 0,868 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

B_4C mit Bor von 90 % Bor-10 Anreicherung und 100 % d.th. Dichte

$$N_{B-10} = 9,96 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

Das Flußmaximum im ungestörten Spektrum liegt im Bereich der 7. und 8. Energiegruppe. Die größten Reaktionsraten von B-10 in diesem Spektrum ergeben sich in der 10. ten Gruppe.

Tabelle 3.1: Hauptabmessungen der Gitterplatten für die Bündel mit 61 Stäben

Gitterplatte	I				II				III			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Teilkreis												
Anzahl der Stäbe pro Kreis	6	12	18	24	6	12	18	24	6	12	18	24
Lochkreisradius	mm 7,2	14,4	21,6	28,8	7,4	14,8	12,2	19,6	7,6	15,2	22,8	30,4
Abstand zwischen den Stäben	mm 0,2	0,45	0,5	0,52	0,4	0,6	0,71	0,73	0,6	0,87	0,92	0,93

Tabelle 3.2: Ergebnisse der Messungen im STARK 7 B mit einem Bündel mit 37 Stäben;

Stabdurchmesser 7 mm; Absorber: B₄C, B-10 nat, ϱ = 1,7 g/cm³; Moderator: Polyäthylen, ϱ = 0,95 g/cm³

Element	Reaktivitätswert		Reaktivitätswert normiert auf den des B ₄ C-Elementes
Anzahl der Stäbe mit Polyäthyl. B ₄ C	β		$(\Delta k_{M-A} / \Delta k_{B_4C} - 1) \cdot 100\%$
-	37	- 0,370 ± 0,006	
1	36	- 0,377 ± 0,007	1,9 ± 3,2
7	30	- 0,431 ± 0,007	16,5 ± 4

ABBILDUNGEN

- 1.1 Skizze der Abschaltelementpositionen im SNR-300
- 1.2 Neutronenflußspektrum eines schnellen natriumgekühlten Reaktors und Neutroneneinfangquerschnitte von Bor-10
- 1.3 Wahl des Vergleichs kombinierter Elemente mit reinen Absorberelementen
- 2.1.1 Gewichtete Einfangquerschnitte von Bor-10 in Kombinierten Elementen
- 2.1.2 Bor-10 Teilchendichten als Funktion der Wasserstoffteilchendichte
- 2.2.1 Zylindrische Abschaltelemente mit verschiedenen Anordnungen von Absorber und Moderator
- 2.2.2 Vergleich der Reaktivitätswerte für verschiedene Anordnungen von Moderator und Absorber
- 2.2.3 Vergleich der Reaktivitätswerte für homogene und heterogene Anordnungen
- 2.2.4 Optimale Reaktivitätswertverbesserungen für verschiedene Elementradien bei unterschiedlichen Borkarbidichten
- 2.2.5 Reaktivitätswerte kombinierter Elemente mit B_4C mit 40% der theoretischen Dichte
- 2.2.6 Reaktivitätswerte kombinierter Elemente mit B_4C mit 100% der theoretischen Dichte

- 2.2.7 Reaktivitätswerte bei unterschiedlich dichtem B_4C und verschiedenen Isotopenzusammensetzungen des Bors
- 2.2.8 Reaktivitätswerte kombinierter Elemente mit Eu_2O_3
- 2.3.1 Selbstabschirmung in einem Zylinder
- 2.3.2 Reaktivitätswerte bei verschiedenen Moderator-dichten und B_4C mit 40% der theoretischen Dichte
- 2.3.3 Reaktivitätswerte bei verschiedenen Moderator-dichten und B_4C mit 100% der theoretischen Dichte
- 2.3.4 Reaktivitätswerte für verschiedene Moderator-dichten und Eu_2O_3
- 3.1.1 Prinzipieller Aufbau des STARK
- 3.1.2 Einheitszelle der schnellen Zone von STARK 7B und 7C
- 3.1.3 Doppelbehälter
- 3.1.4 Querschnitte der Testelemente
- 3.1.5 Zylindrisches Testelement
- 3.1.6 Stabbündel mit 61 Stäben
- 3.1.7 Stabbündel mit 19 Stäben
- 3.2.1 Blockschaltbild der Neutronenflußmeßanordnung
- 3.2.2 Moderatorwasserkreislauf des STARK

- 3.3.1 Reaktivitätswertmessung im STARK 7C,
 zylindrische Testelemente

- 3.3.2 Reaktivitätswertmessung im STARK 7B,
 zylindrische Testelemente

- 3.3.3 Reaktivitätswertmessung im STARK 7B,
 Elemente mit 61 Stäben, kleine Stababstände,
 Vergleich zweier Messungen

- 3.3.4 Reaktivitätswertmessung im STARK 7B,
 Element mit 61 Stäben

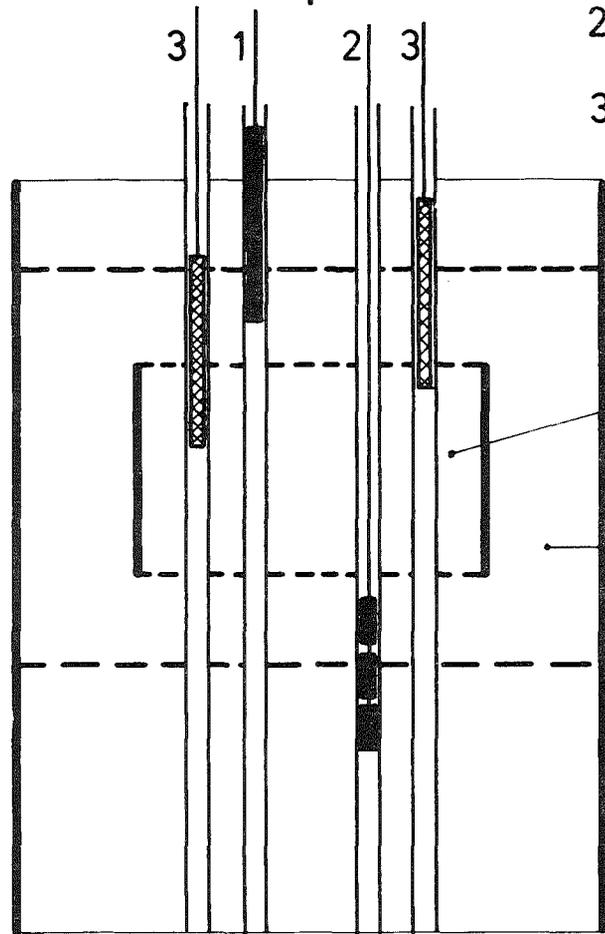
- 3.3.5.1 Reaktivitätswertmessung im STARK 7B,
 Element mit 19 Stäben und mit $ZrH_{1,7}$ als
 Moderator

- 3.3.5.2 Reaktivitätswertmessung im STARK 7B,
 Element mit 19 Stäben und mit Polyäthylen
 als Moderator

- 4.1 Folienposition im Bündelelement mit 61 Stäben

- 4.2 Folienposition im Bündelelement mit 19 Stäben

Na-Austritt 560°C ↑



Na-Eintritt 377°C ↑

Reaktor im Leistungsbetrieb

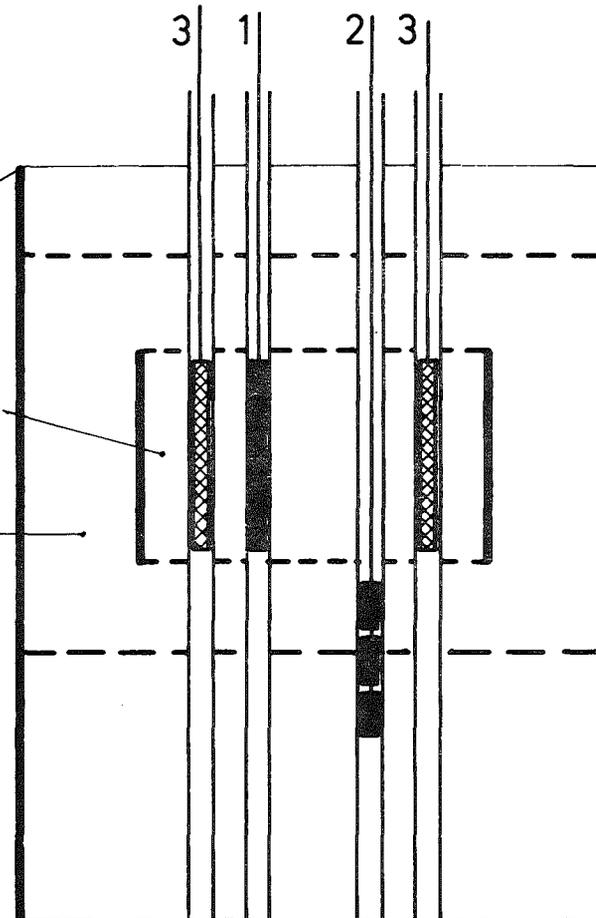
- 1 Abschaltssystem I (3 Elemente)
- 2 Abschaltssystem II (3 Elemente)
- 3 Regel-Trimmsystem (12 Elemente)

Brennelement -
oberkante

Spaltzone
(151 Brennelemente)

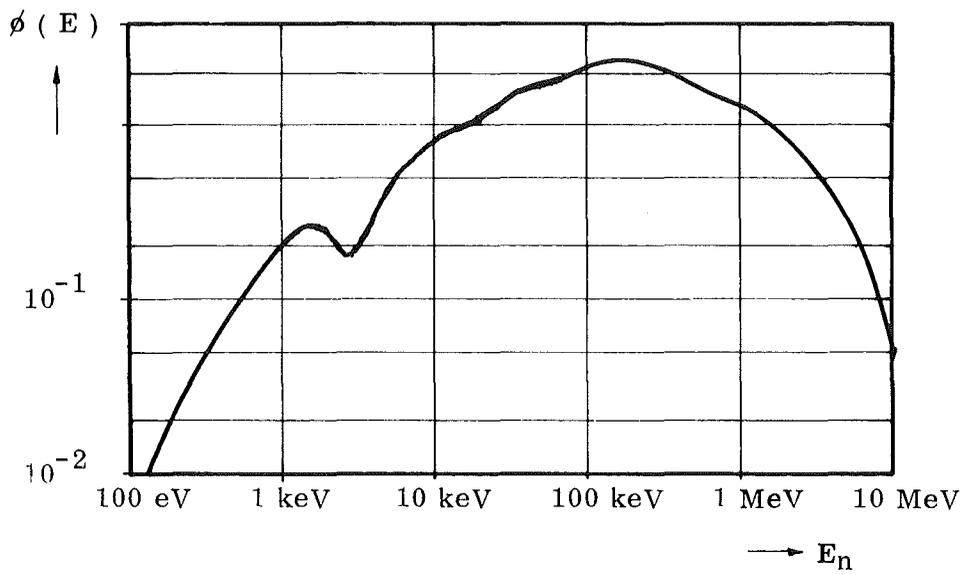
Brutzone
(350 Brutelemente)

SNR-300
Regel - Trimm - und
Abschaltssysteme

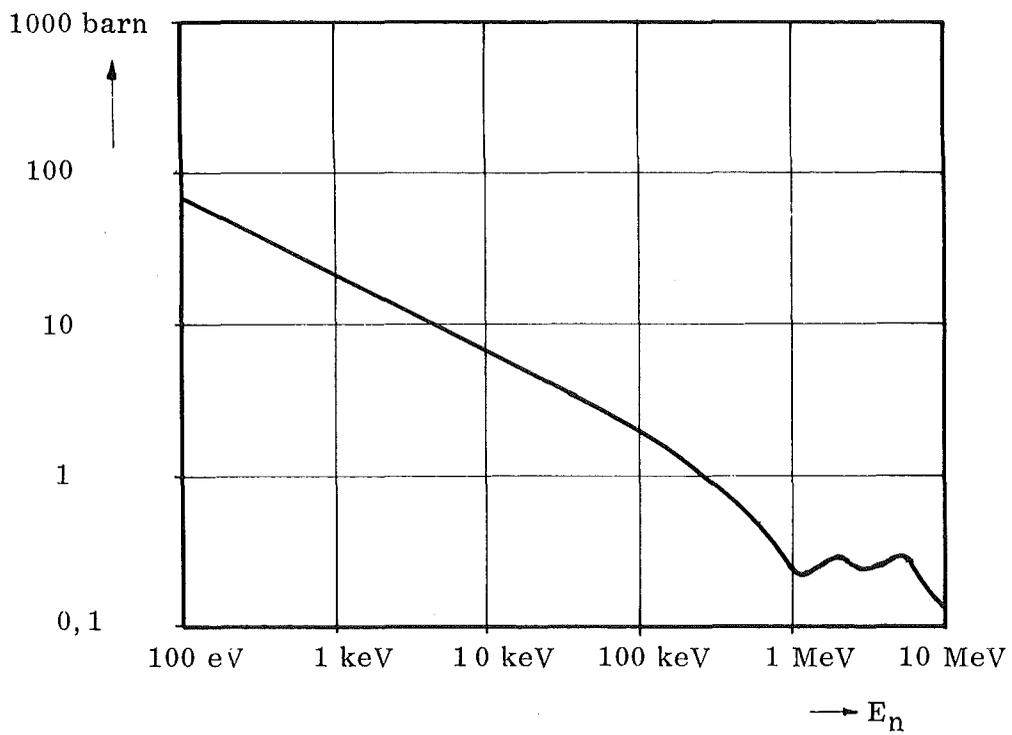


Reaktor abgeschaltet

Abb. 1.1: Skizze der Abschaltelementpositionen im SNR 300



Neutronenflußspektrum eines schnellen Natrium gekühlten
Brutreaktors mit oxidischem Brennstoff



Einfangquerschnitt von Bor - 10

Abb. 1.2

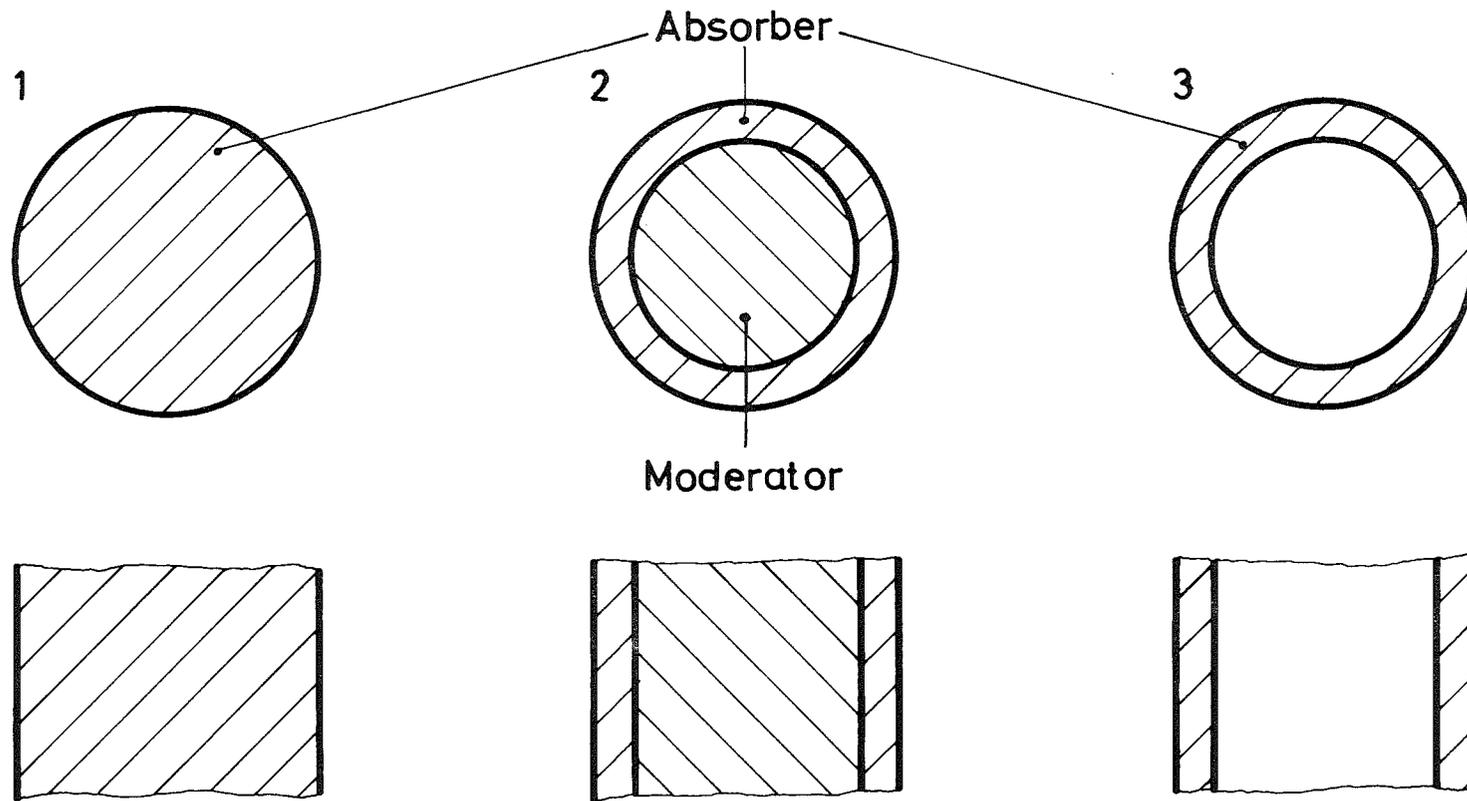


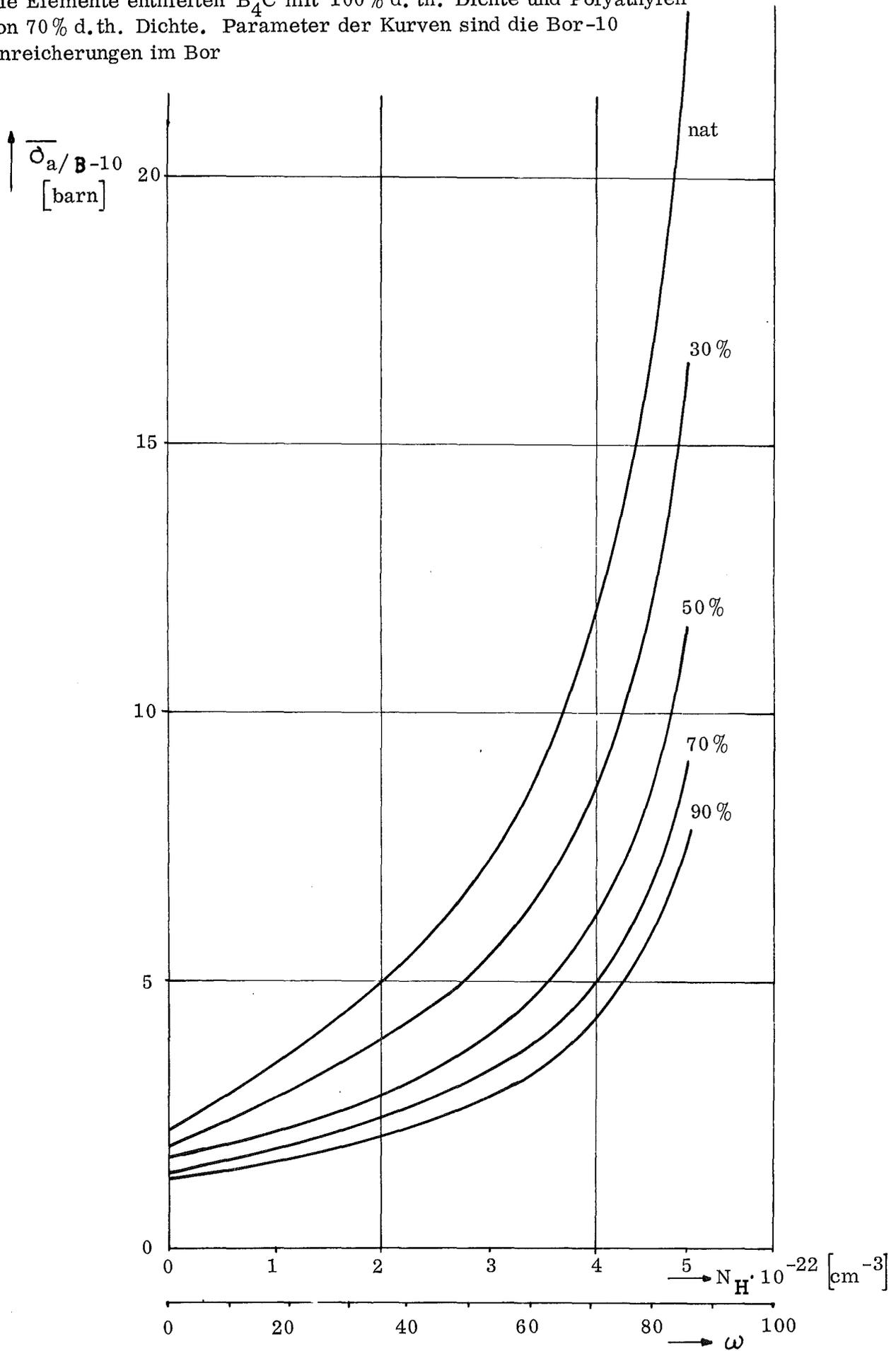
Abb. 1.3: Zylindrische Abschaltetelemente mit

1. vollständig mit Absorber gefüllt
2. Absorber in einer äußeren Ringzone und Moderator im Zentralteil
3. Absorber in einer äußeren Ringzone

Abb. 2.1.1 : Gewichtete Einfangquerschnitte von Bor-10 in kombinierten Elementen

Die Elemente enthielten B_4C mit 100% d. th. Dichte und Polyäthylen von 70% d. th. Dichte. Parameter der Kurven sind die Bor-10 Anreicherungen im Bor

$\bar{\sigma}_a =$
1640 barn



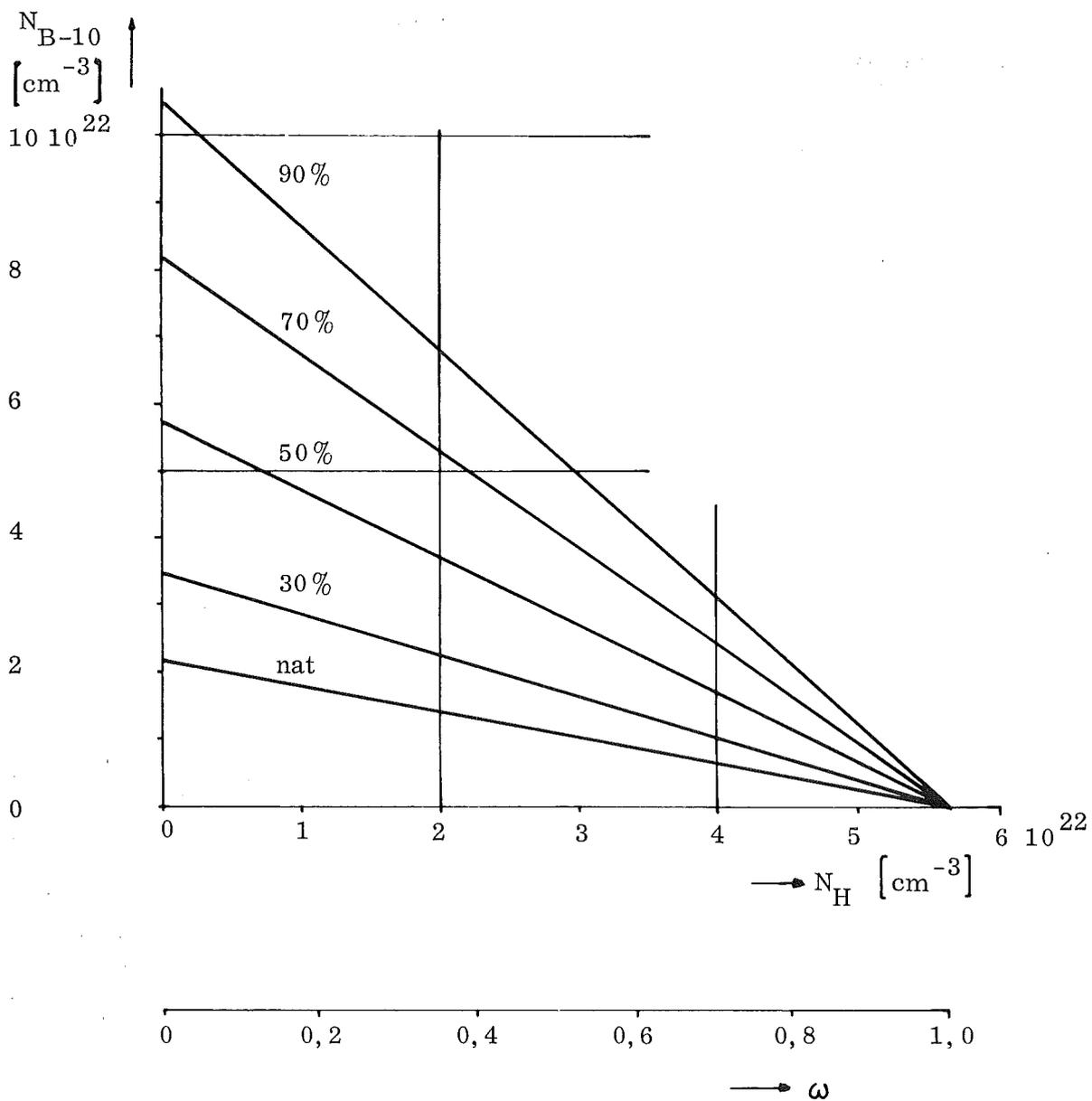


Abb.2.1.2: Bor-10 Teilchendichte als Funktion der Wasserstoffteilchenzahl
 Parameter der Geraden sind die Bor-10 Anreicherungen im Bor.

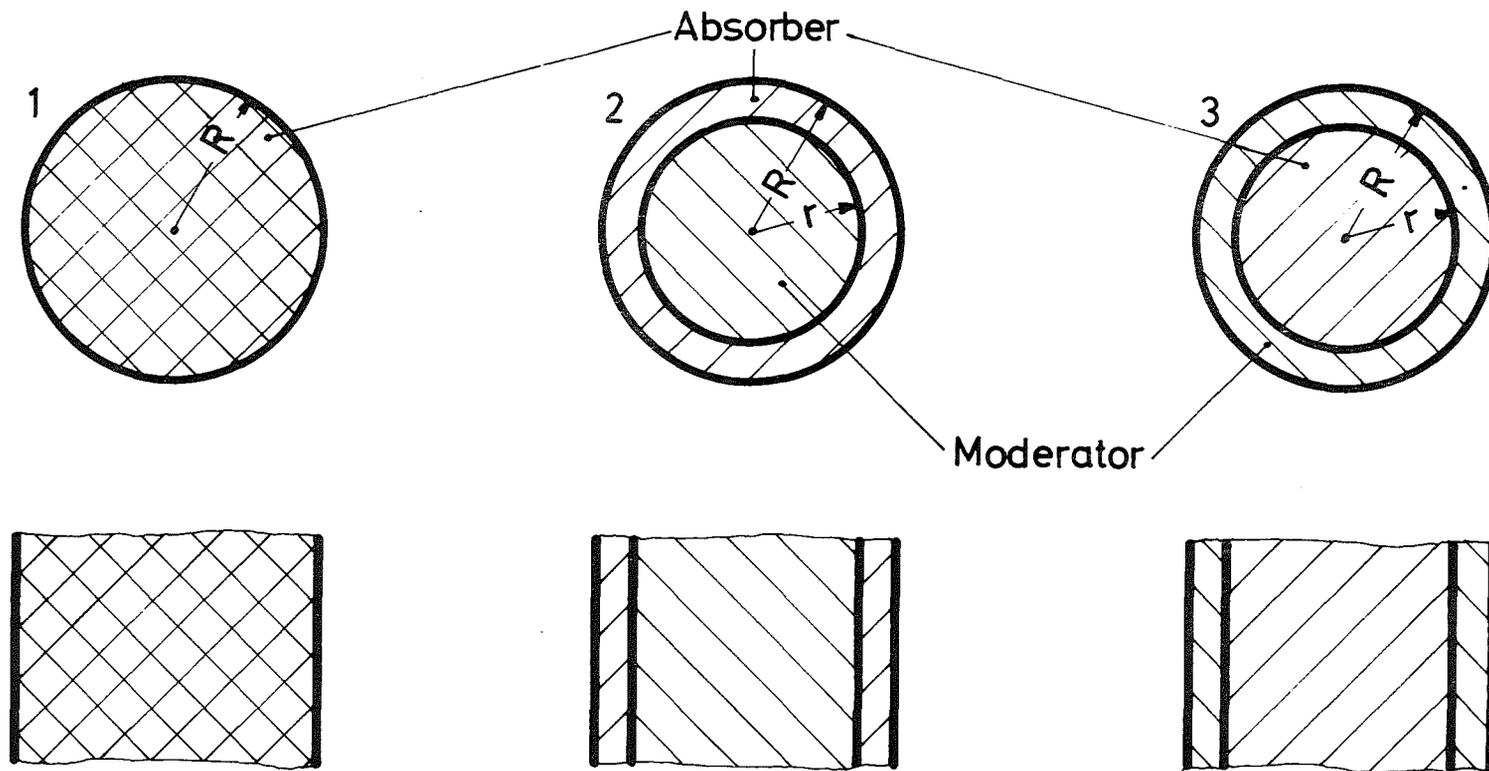
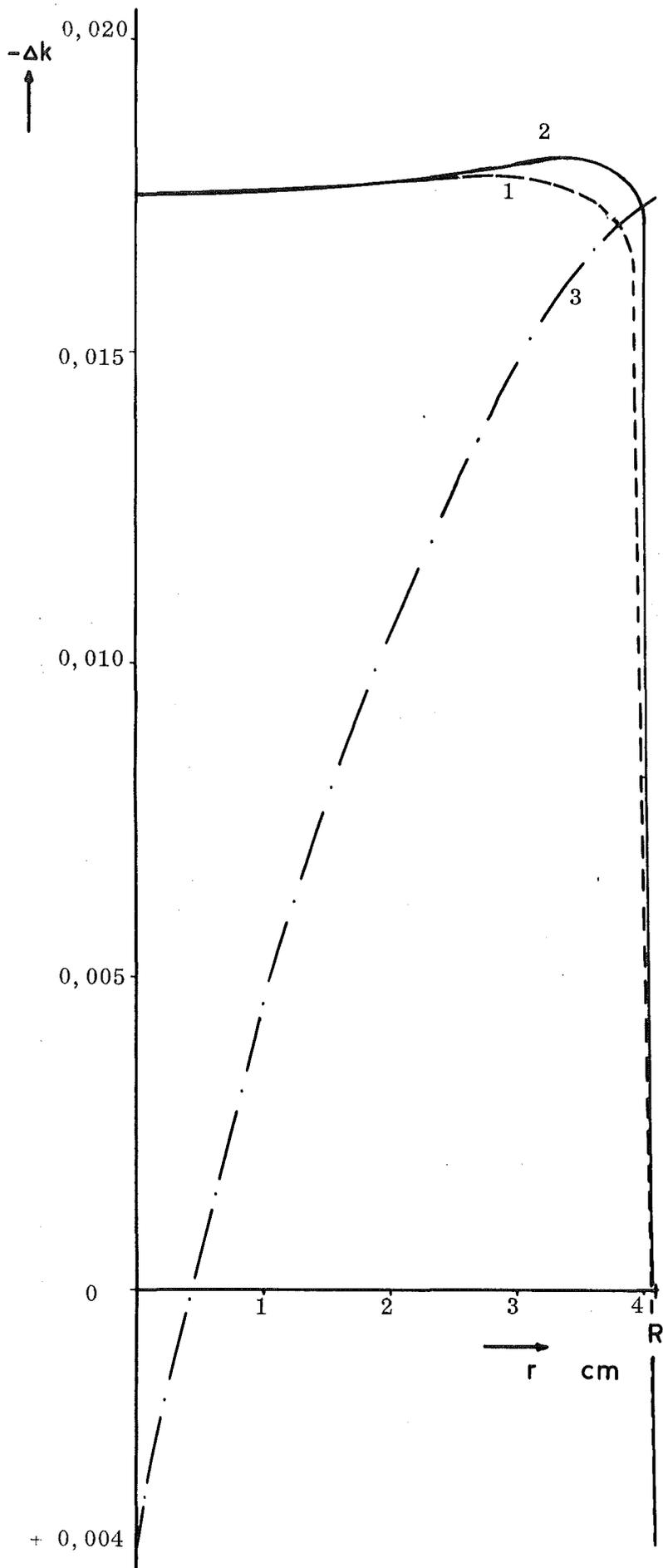


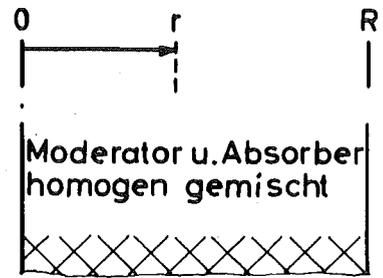
Abb. 2.2.1:

Zylindrische Abschaltetelemente mit verschiedenen Anordnungen von Absorber und Moderator

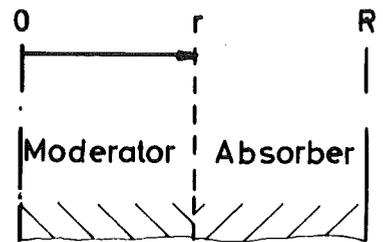
1. Absorber und Moderator sind homogen gemischt
2. Absorber in einer äußeren Ringzone; Moderator im Zentralteil
3. Moderator in einer äußeren Ringzone; Absorber im Zentralteil



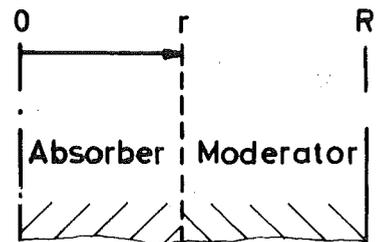
Kurve 1



Kurve 2



Kurve 3



Absorber :

B_4C , B - 10 zu 90 %
100 % d. th. Dichte

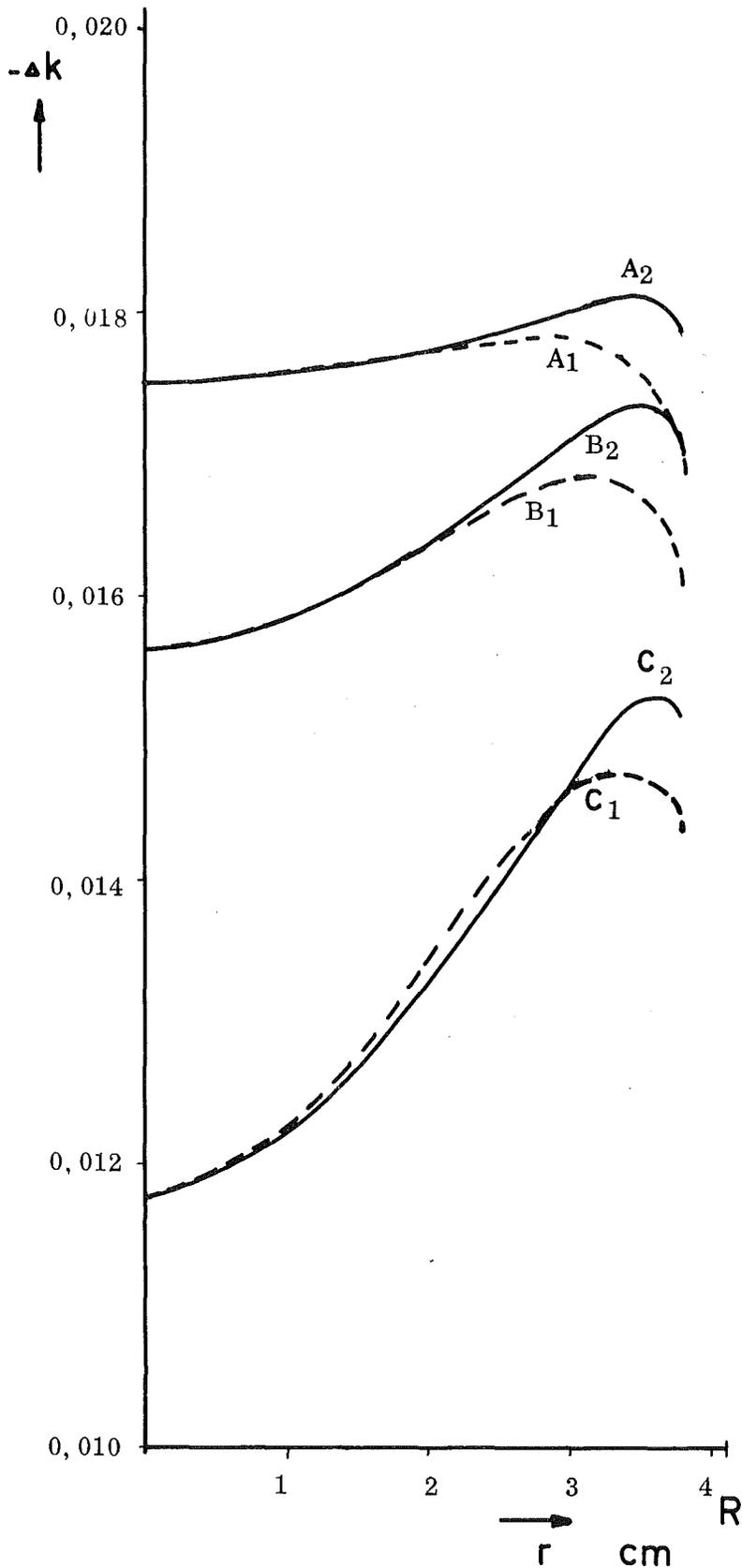
Moderator :

Polyäthylen

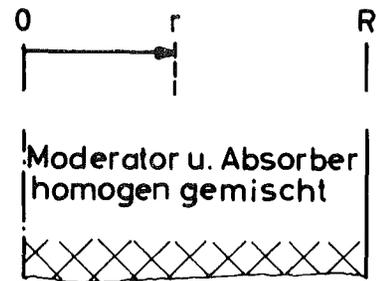
70 % d. th. Dichte

Abb. 2.2.2

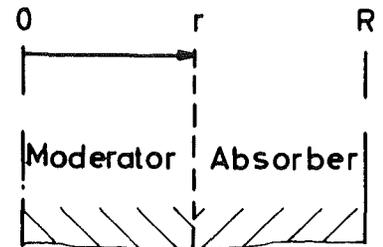
Vergleich der Reaktivitätswerte für verschiedene Anordnungen von Moderator und Absorber in einem Abschaltlement mit einem Außenradius von $R = 4,1$ cm



Kurven 1



Kurven 2



Absorber :

A B_4C , B - 10 zu 90 %
100 % d. th. Dichte

B B_4C , B - 10 zu 90 %
60 % d. th. Dichte

C B_4C , B - 10 nat.
100 % d. th. Dichte

Moderator :

A - C Polyäthylen
70 % d. th. Dichte

Abb. 2.2.3

Vergleich der Reaktivitätswerte für homogene bzw. heterogene Anordnung von Moderator und Absorber in einem Abschalteteil mit einem Außenradius von $R = 4,1$ cm

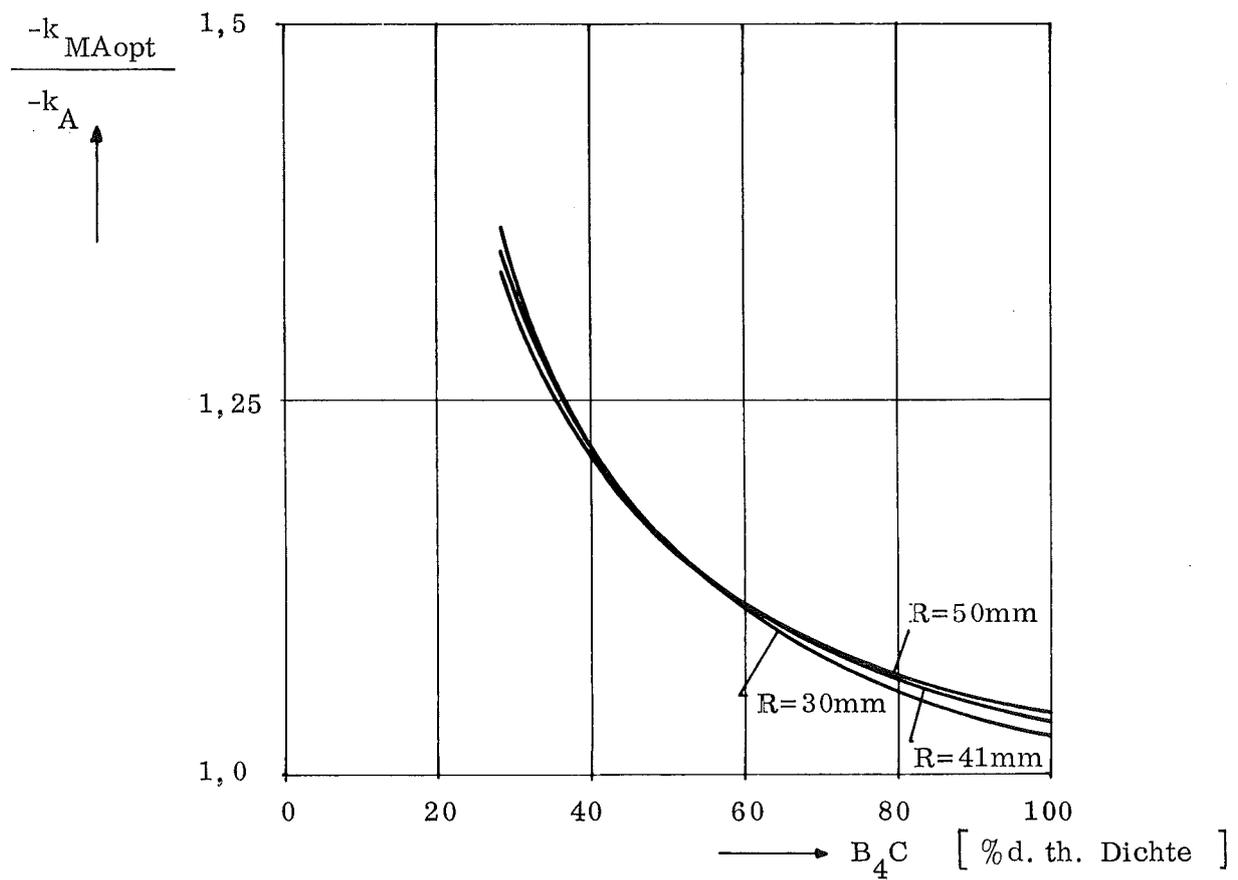


Abb. 2.2.4 : Reaktivitätswertverbesserungen für verschiedene Element-
radien bei unterschiedlichen Borkarbidichten

Absorber : B_4C , Bor-10 zu 90 %

Moderator : Polyäthylen mit 70 % d. th. Dichte

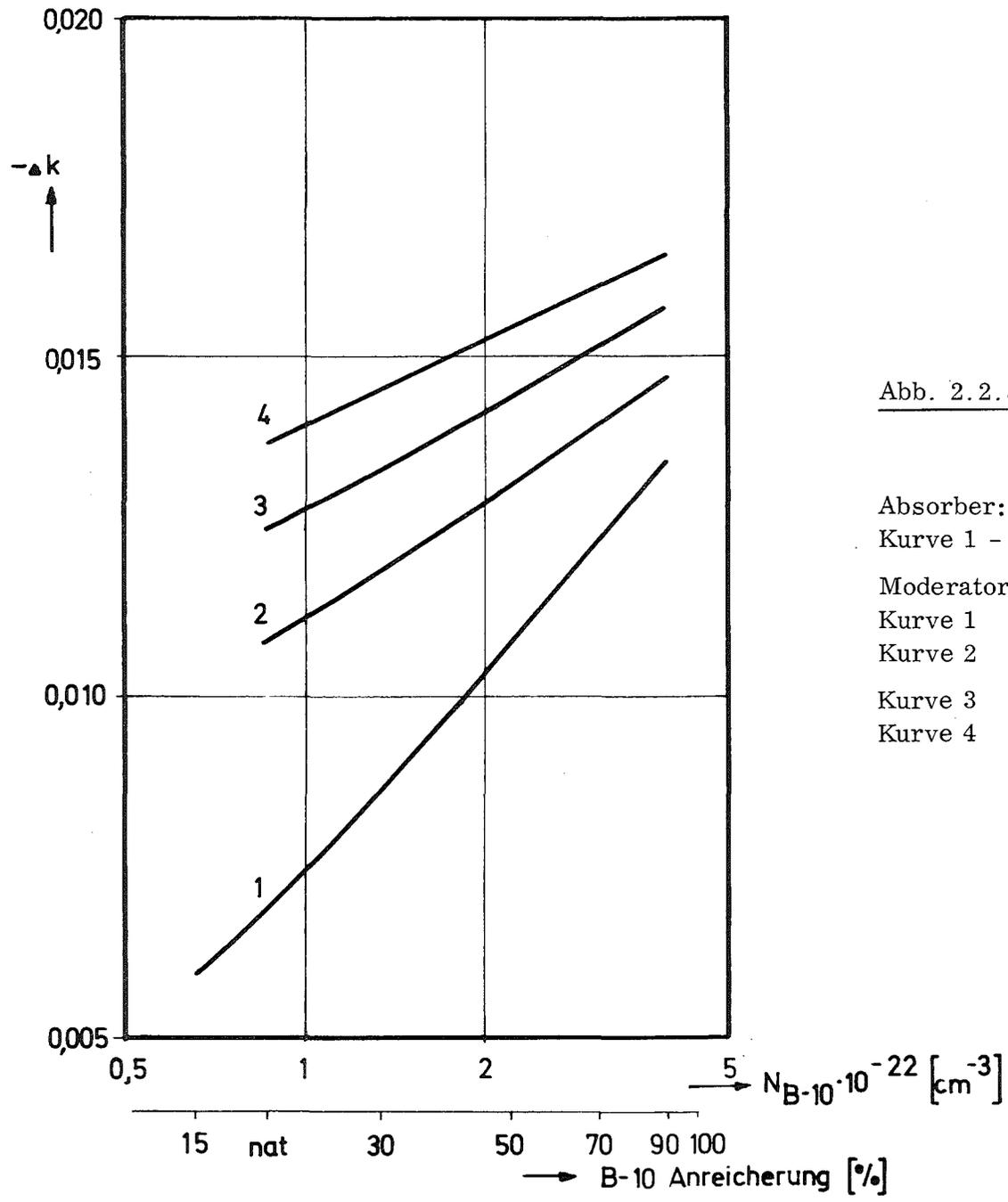


Abb. 2.2.5: Reaktivitätswerte kombinierter Elemente mit B₄C mit 40 % d. th. Dichte

Absorber:
 Kurve 1 - 4 B₄C, 40 % d. th. Dichte

Moderator:
 Kurve 1 ohne
 Kurve 2 ZrH_{1,6}, 60 % d. th. Dichte
 Kurve 3 ZrH_{1,6}, 80 % d. th. Dichte
 Kurve 4 ZrH_{1,6}, 100 % d. th. Dichte

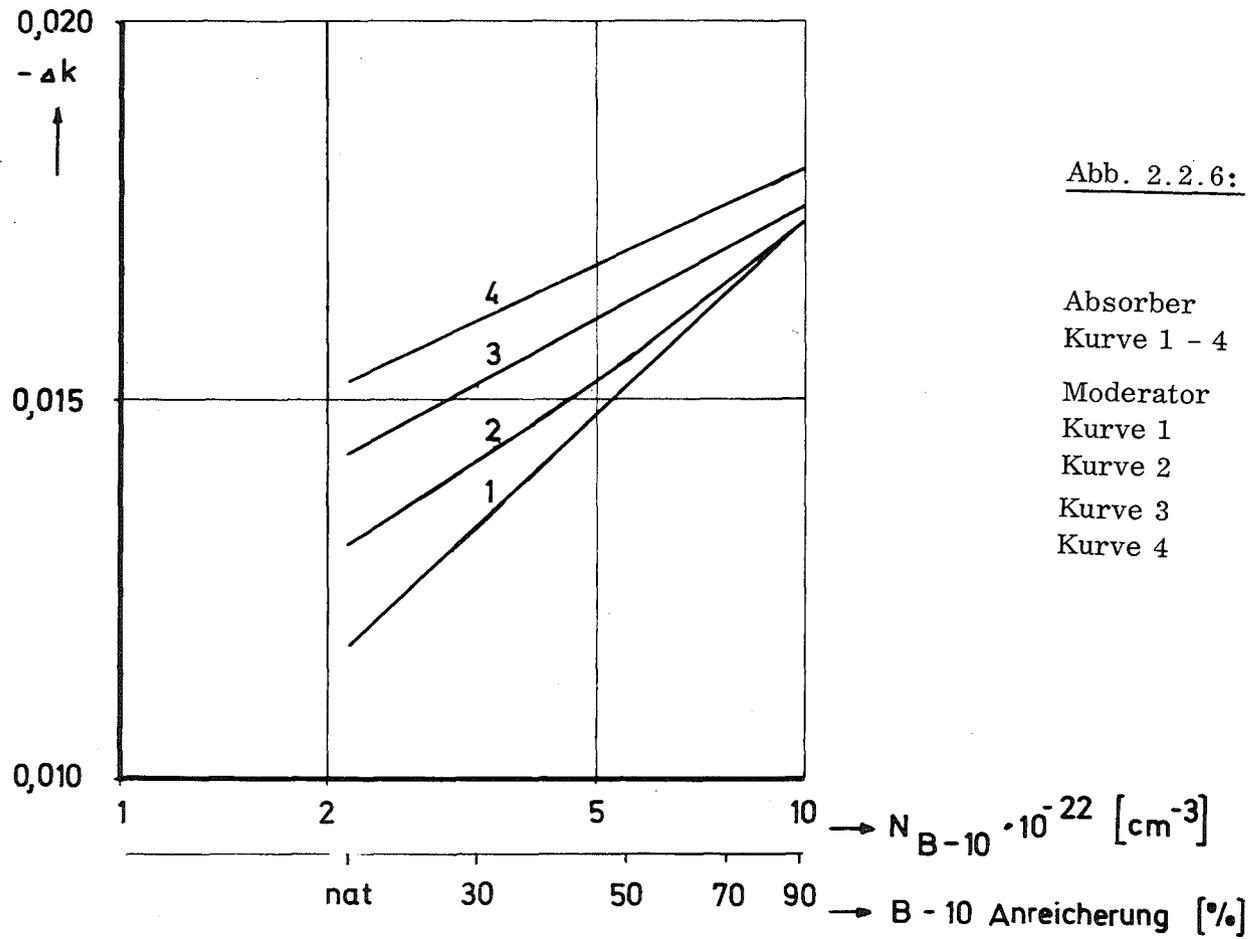


Abb. 2.2.6: Reaktivitätswert kombinierter Elemente mit B_4C mit 100 % d. th. Dichte

- Absorber
 Kurve 1 - 4 B_4C , 100 % d. th. Dichte
- Moderator
 Kurve 1 ohne
 Kurve 2 $ZrH_{1,6}$, 60 % d. th. Dichte
 Kurve 3 $ZrH_{1,6}$, 80 % d. th. Dichte
 Kurve 4 $ZrH_{1,6}$, 100 % d. th. Dichte

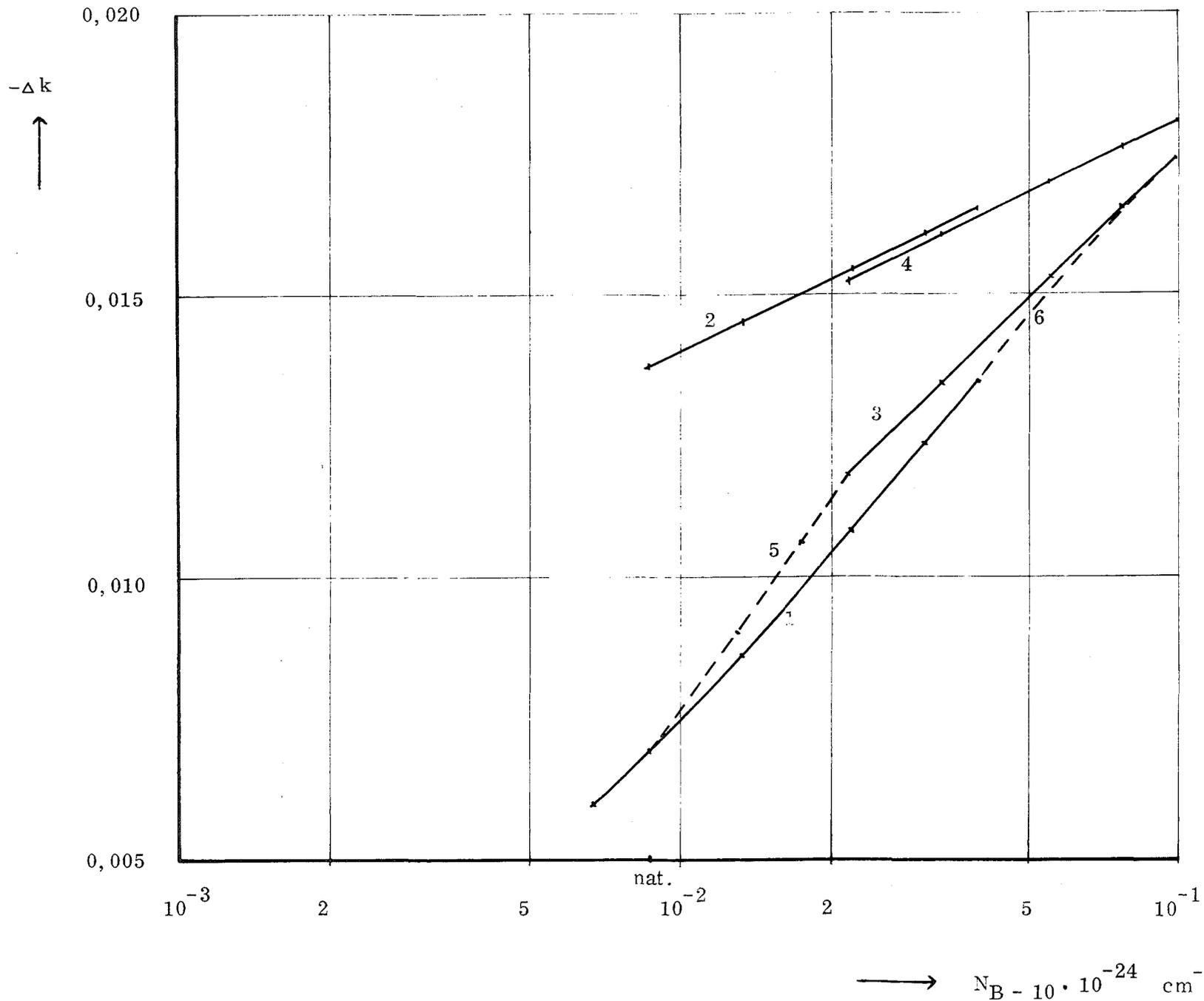


Abb. 2.2.7:

Reaktivitätswerte bei unterschiedlich dichtem B_4C und verschiedenen Isotopenzusammensetzungen von Bor

Absorber

Kurve 1 und 2 :
 B_4C , 40 % d. th. Dichte

Kurve 3 und 4 :
 B_4C , 100 % d. th. Dichte

Kurve 5 :
 B_4C , B - 10 nat.

Kurve 6 :
 B_4C , B - 10 zu 90 %

Moderator

Kurve 2 und 4 :
 $ZrH_{1,6}$, 100 % d. th. Dichte

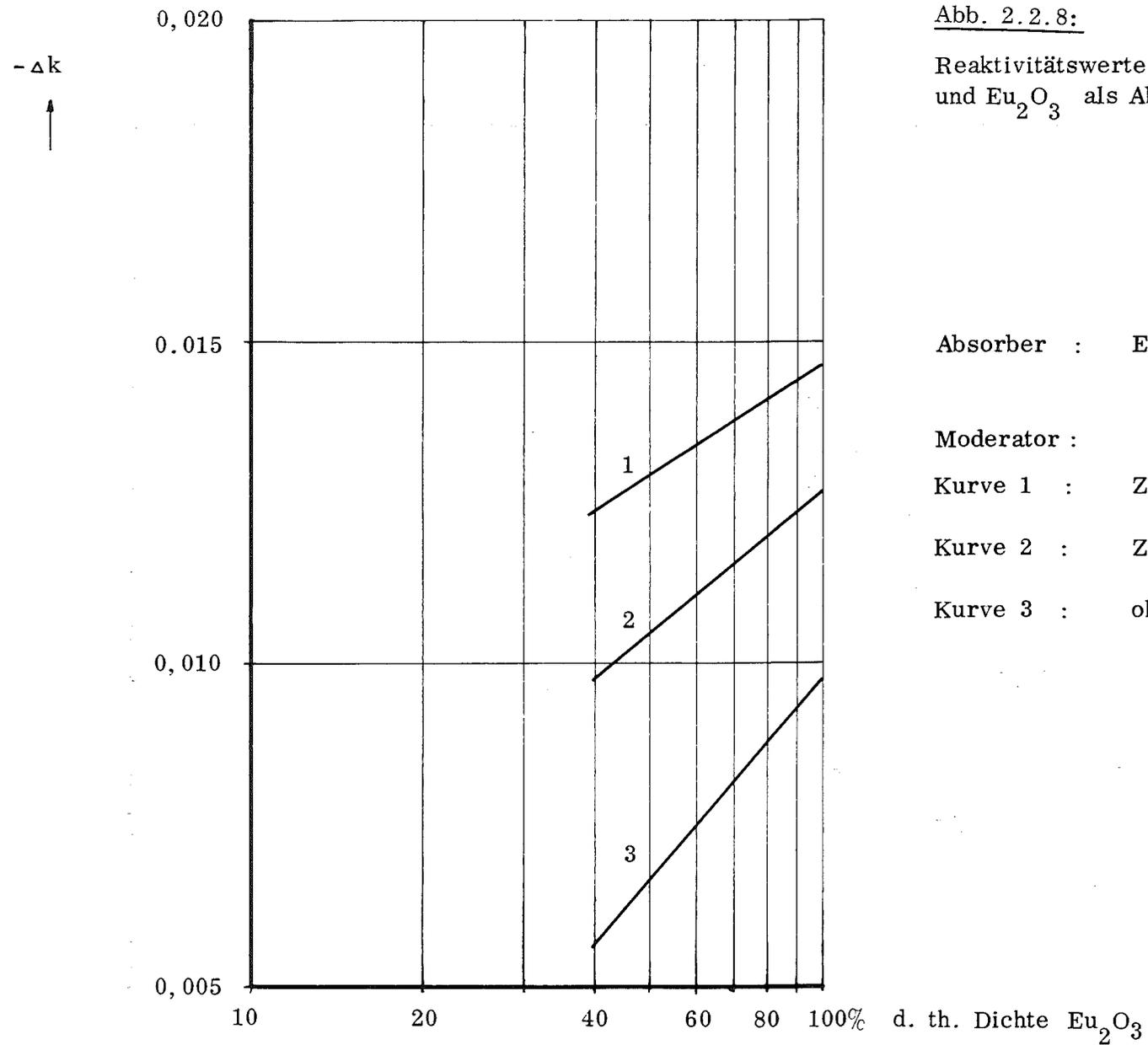


Abb. 2.2.8:

Reaktivitätswerte bei unterschiedlich dichtem Moderator und Eu_2O_3 als Absorber

Absorber : Eu_2O_3

Moderator :

Kurve 1 : $\text{ZrH}_{1,6}$, 100 % d. th. Dichte

Kurve 2 : $\text{ZrH}_{1,6}$, 60 % d. th. Dichte

Kurve 3 : ohne

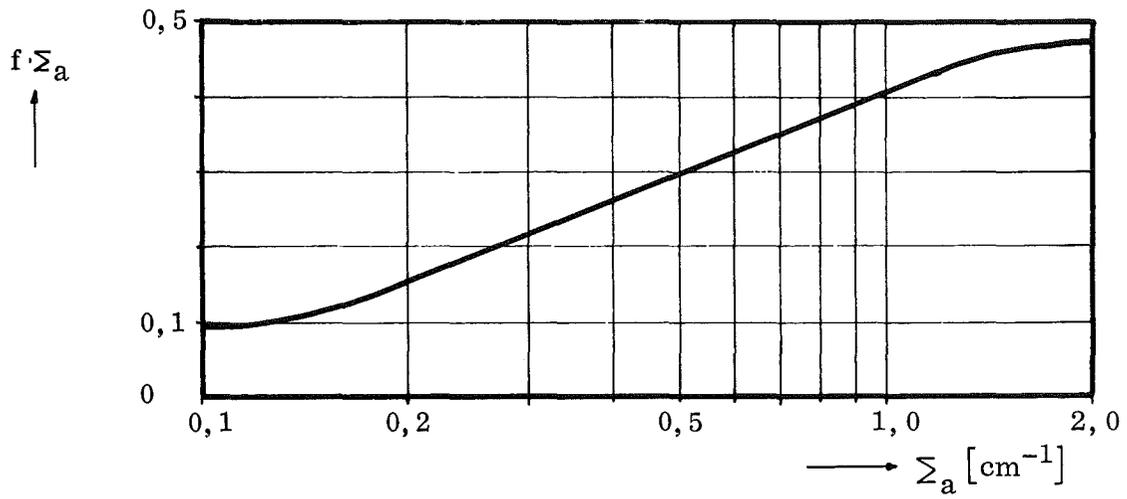


Abb. 2.3.1 : Selbstabschirmung in einem Zylinder mit dem Radius $r = 1$ cm.

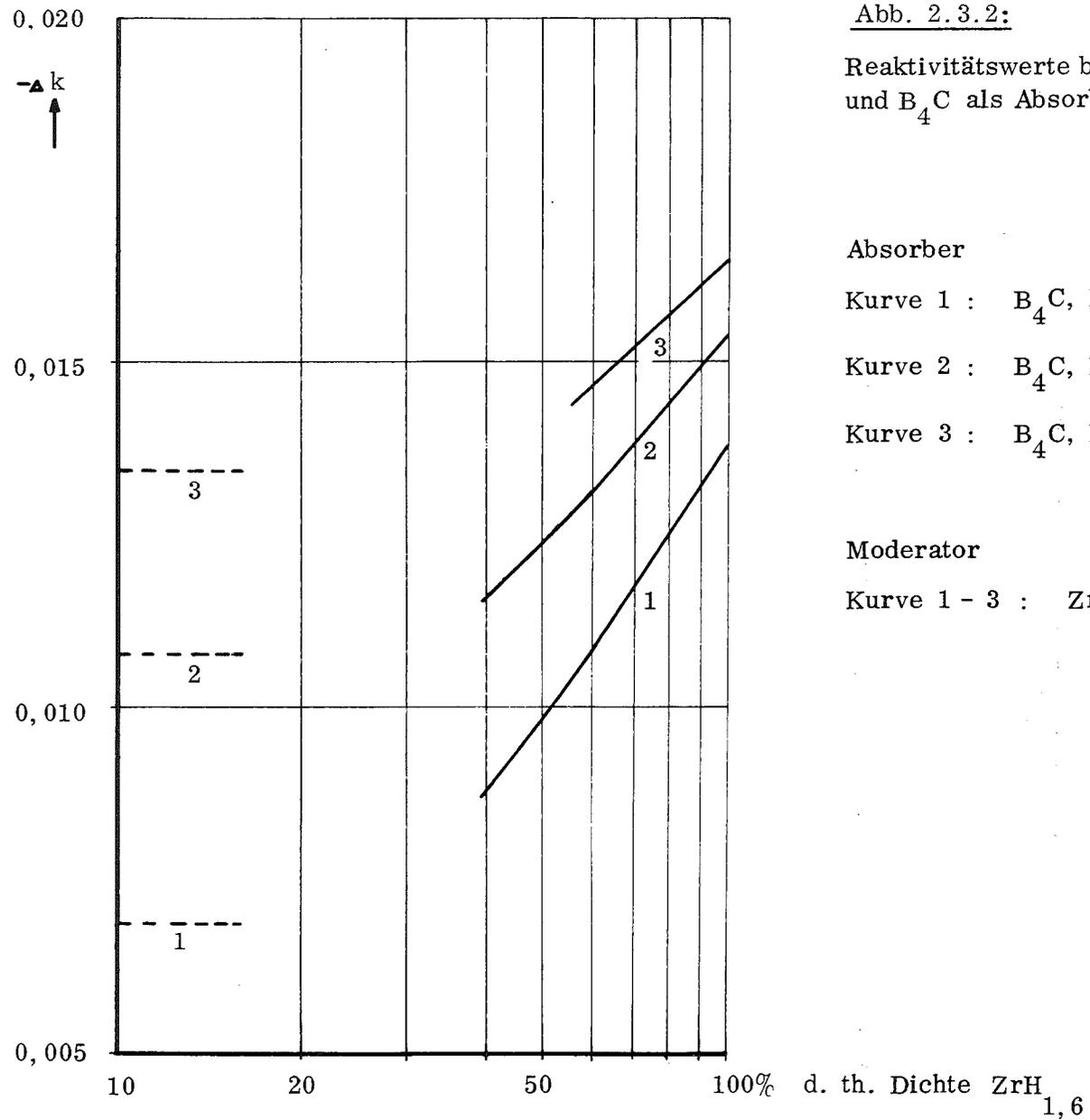


Abb. 2.3.2:

Reaktivitätswerte bei verschiedenen Moderatorordichten
und B_4C als Absorber

Absorber

Kurve 1 : B_4C , B - 10 nat., 40 % d. th. Dichte

Kurve 2 : B_4C , B - 10 zu 50 % ; 40 % d. th. Dichte

Kurve 3 : B_4C , B - 10 zu 90 % ; 40 % d. th. Dichte

Moderator

Kurve 1 - 3 : $ZrH_{1,6}$

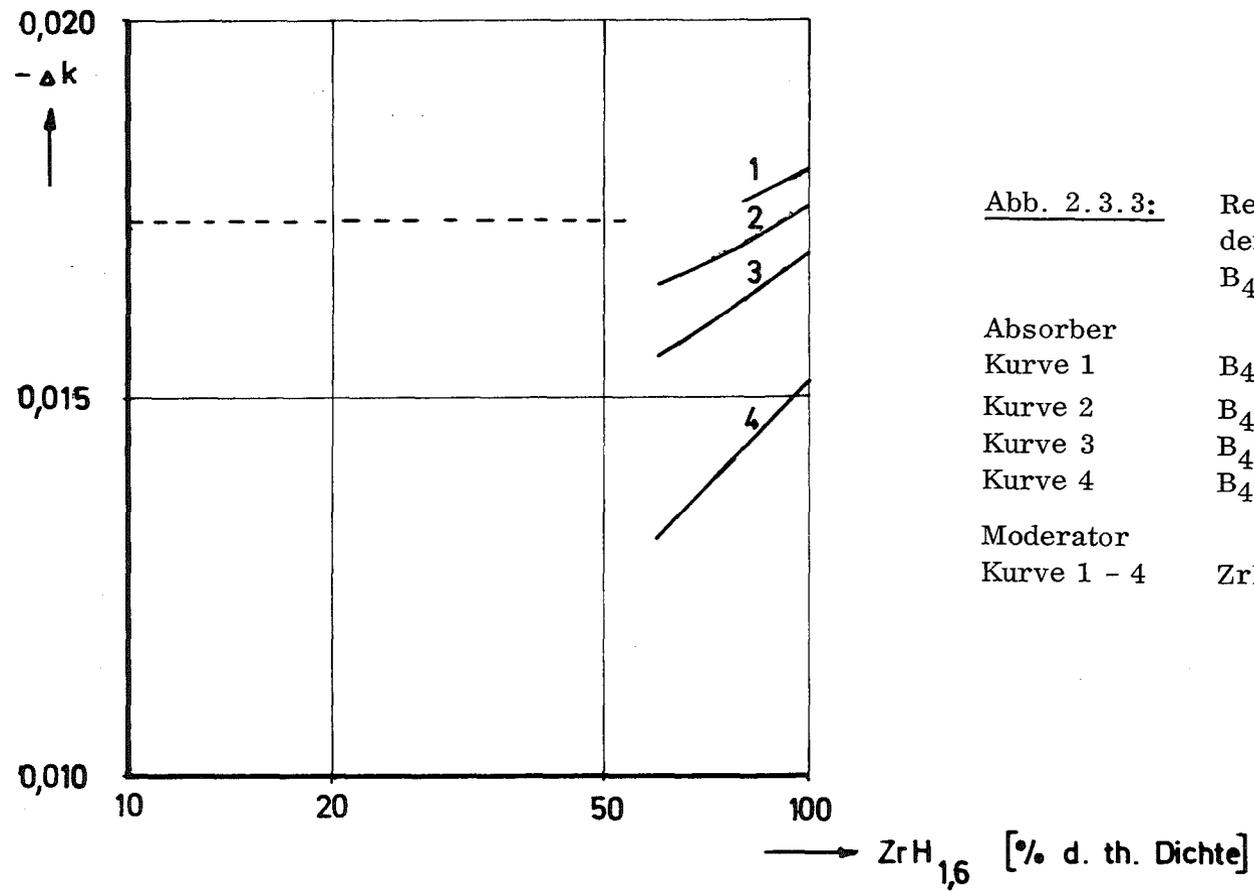


Abb. 2.3.3: Reaktivitätswert bei verschiedenen Moderatorichten und B_4C mit 100 % d. th. Dichte.

Absorber

- Kurve 1 B_4C , B-10 zu 90 % 100 % d. th. Dichte
- Kurve 2 B_4C , B-10 zu 70 %, 100 % d. th. Dichte
- Kurve 3 B_4C , B-10 zu 50 %, 100 % d. th. Dichte
- Kurve 4 B_4C , B-10 nat, 100 % d. th. Dichte

Moderator

- Kurve 1 - 4 $ZrH_{1,6}$

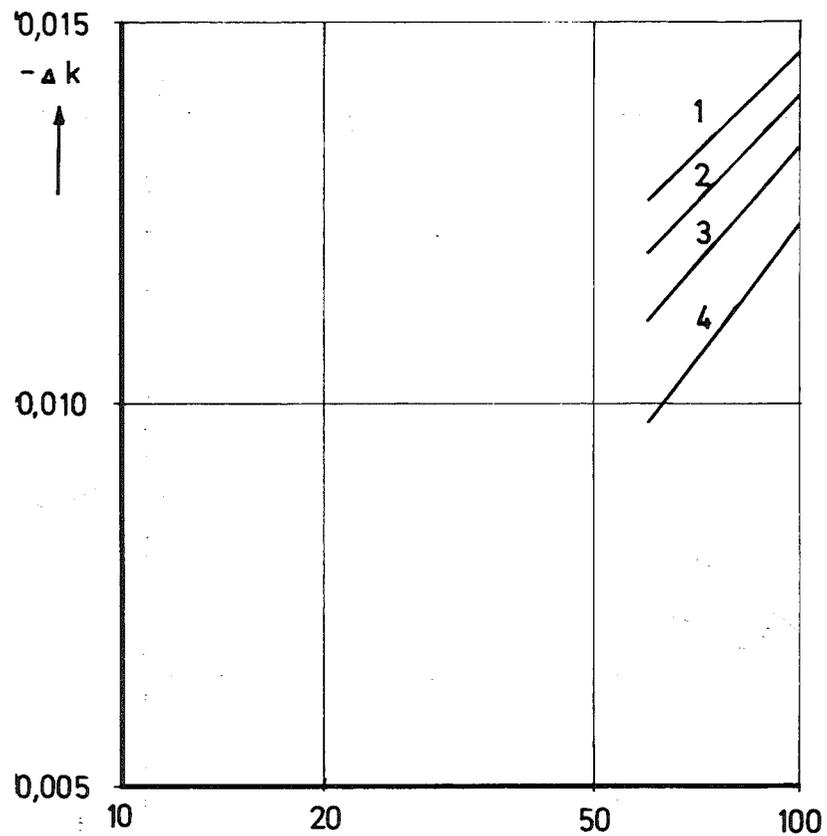


Abb. 2.3.4: Reaktivitätswerte für verschiedene Moderatorordichten und Eu_2O_3

Absorber

Kurve 1 Eu_2O_3 , 100 % d. th. Dichte

Kurve 2 Eu_2O_3 , 80 % d. th. Dichte

Kurve 3 Eu_2O_3 , 60 % d. th. Dichte

Kurve 4 Eu_2O_3 , 40 % d. th. Dichte

Moderator

Kurve 1 - 4 $ZrH_{1,6}$

→ $ZrH_{1,6}$ [% d. th. Dichte]

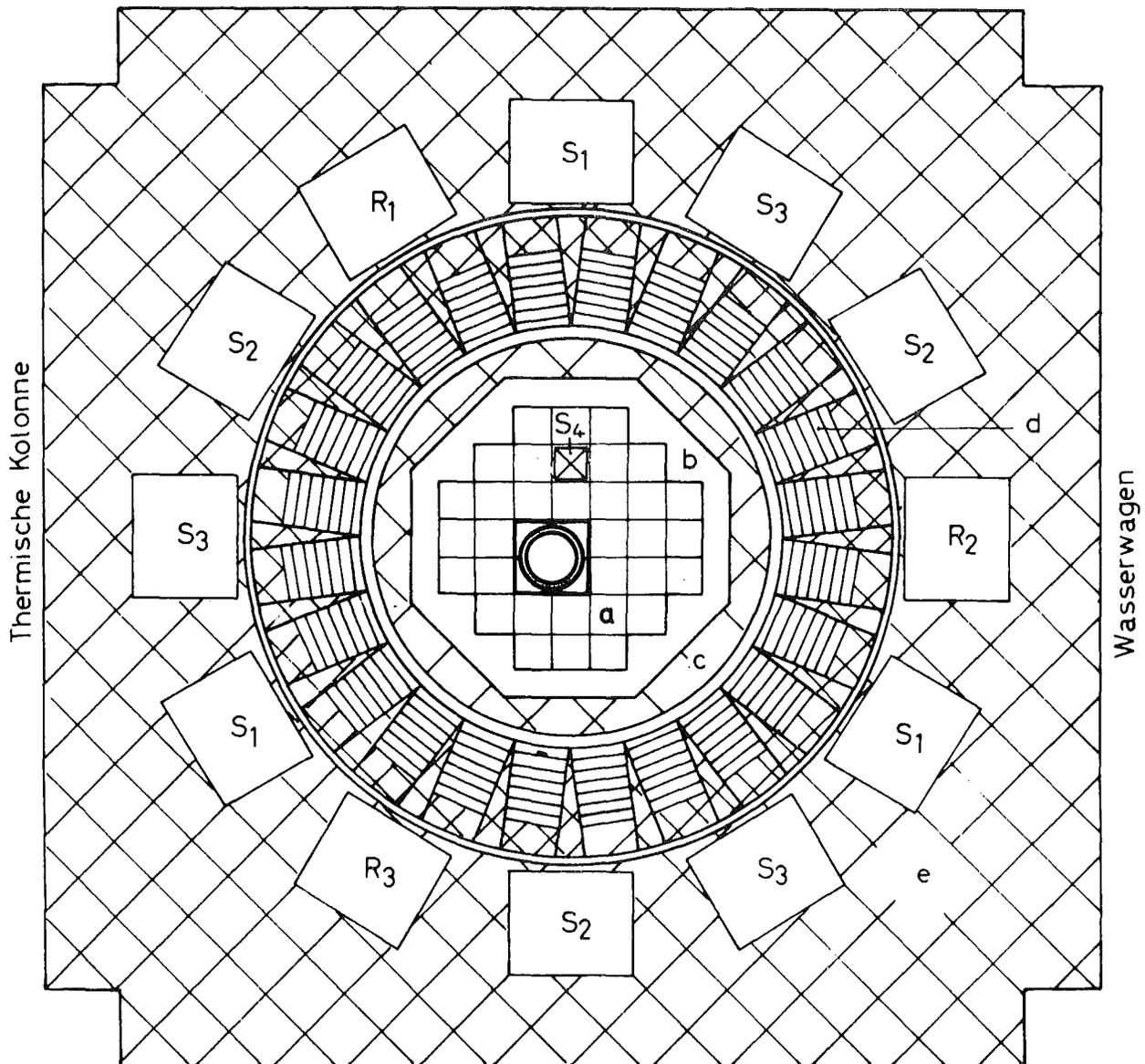


Abb. 3.1.1:

Prinzipieller Aufbau des STARK

- | | | | |
|---|--------------------------|-------------|------------------------------------|
| a | schnelle Spaltzone | $R_{1,2,3}$ | thermische Regelplatten |
| b | Mantel aus Natururan | $S_{1,2,3}$ | thermische Sicherheitsplatten |
| c | Graphitmantel | S_4 | Abschaltelement der schnellen Zone |
| d | thermische Spaltzone | | |
| e | äußerer Graphitreflektor | | |

C
U (20%)
C
C
U (20%)
C

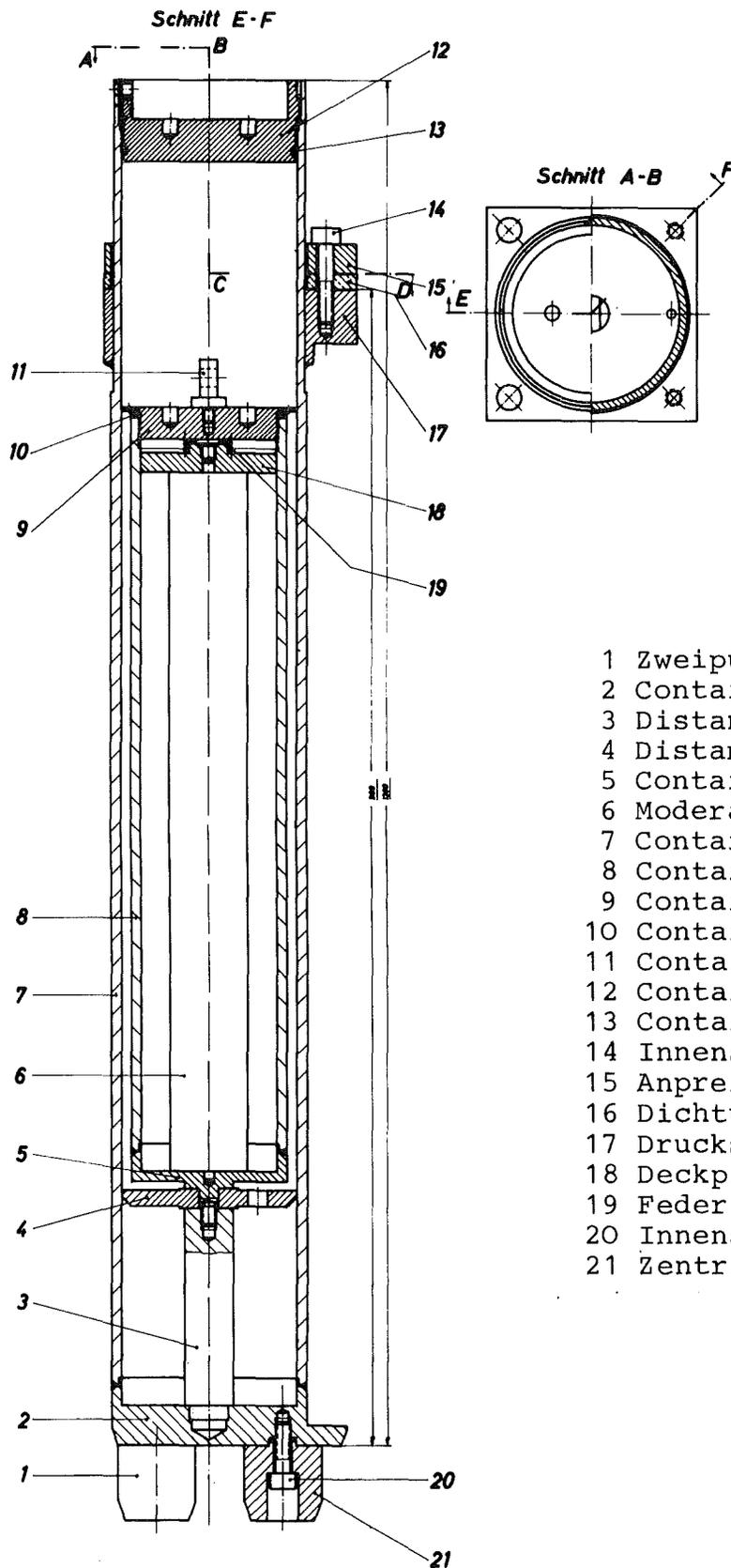
7B

Al (100%)
U (20%)
C
Al (40%)
U (20%)
C

7C

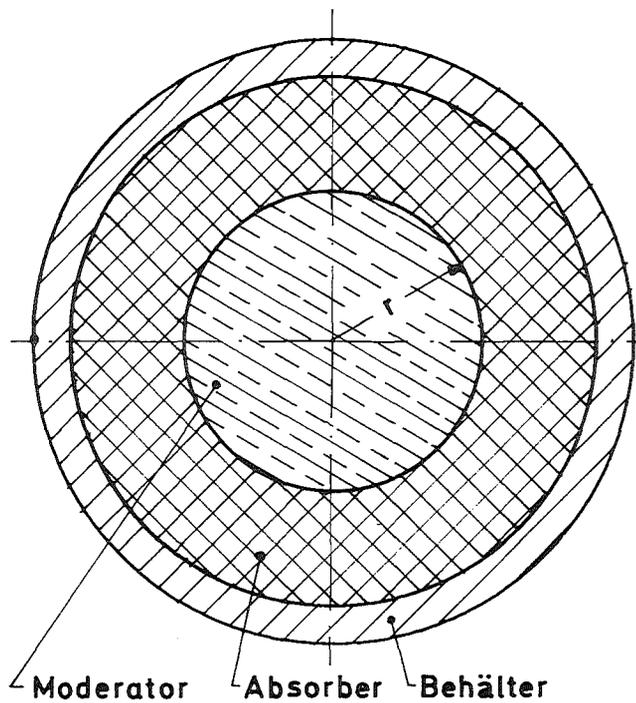
Abb. 3.1.2:

Einheitszelle der schnellen Zone von STARK 7 B
und 7 C



- 1 Zweipunktzentrierfuß
- 2 Containerrohrboden
- 3 Distanzstück
- 4 Distanzscheibe
- 5 Containerboden
- 6 Moderatorstab
- 7 Containerrohr
- 8 Container
- 9 Containerdeckel
- 10 Containerdichtung
- 11 Containerhaken
- 12 Containerrohrdeckel
- 13 Containerrohrdichtung
- 14 Innensechskantschrauben
- 15 Anpreßscheibe
- 16 Dichtung
- 17 Druckscheibe
- 18 Deckplatte
- 19 Feder
- 20 Innensechskant
- 21 Zentrierfuß rund

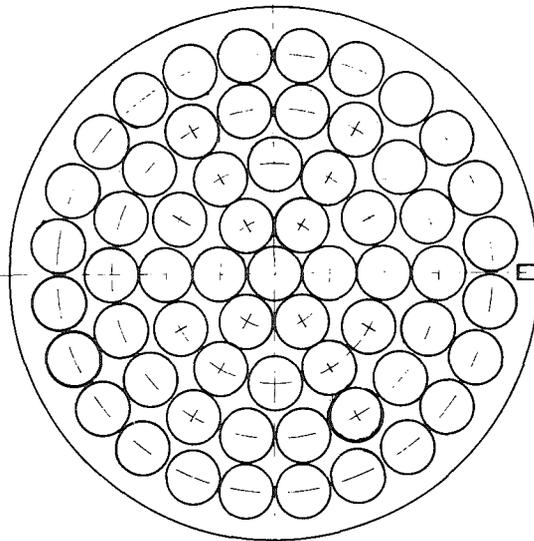
Abb. 3.1.3: Doppelbehälter



Zylinderelement

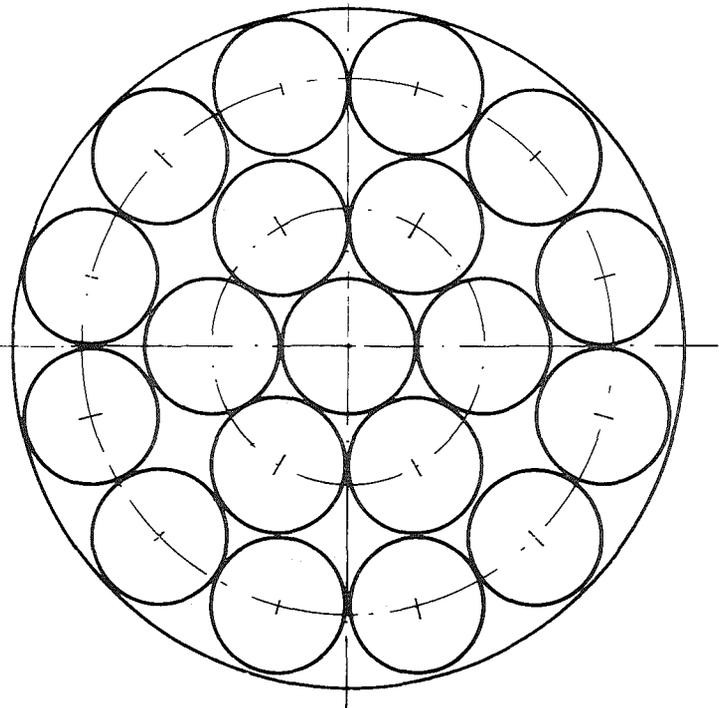
Behälterinnendurchmesser:

70 mm



Element mit
61 Stabpositionen

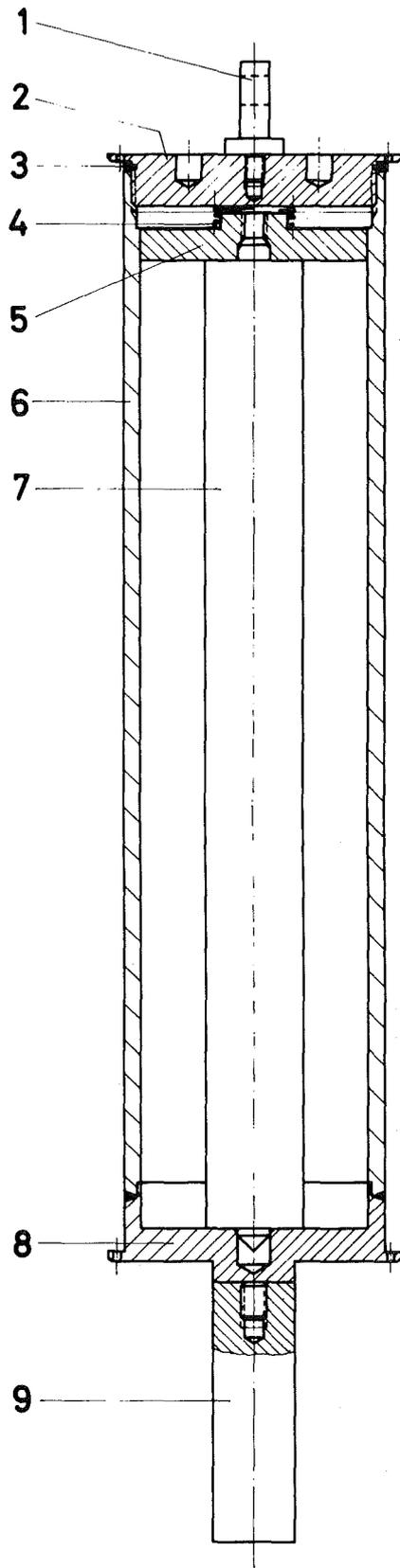
Stabdurchmesser: 7 mm



Element mit
19 Stabpositionen

Stabdurchmesser: 18 mm

Abb. 3.1.4: Querschnitte der Testelemente



- 1 Containerhaken
- 2 Containerdeckel
- 3 Dichtung
- 4 Feder
- 5 Deckplatte
- 6 Container
- 7 Moderatorstab
- 8 Containerboden
- 9 Distanzstück

Abb. 3.1.5: Zylindrisches Testelement

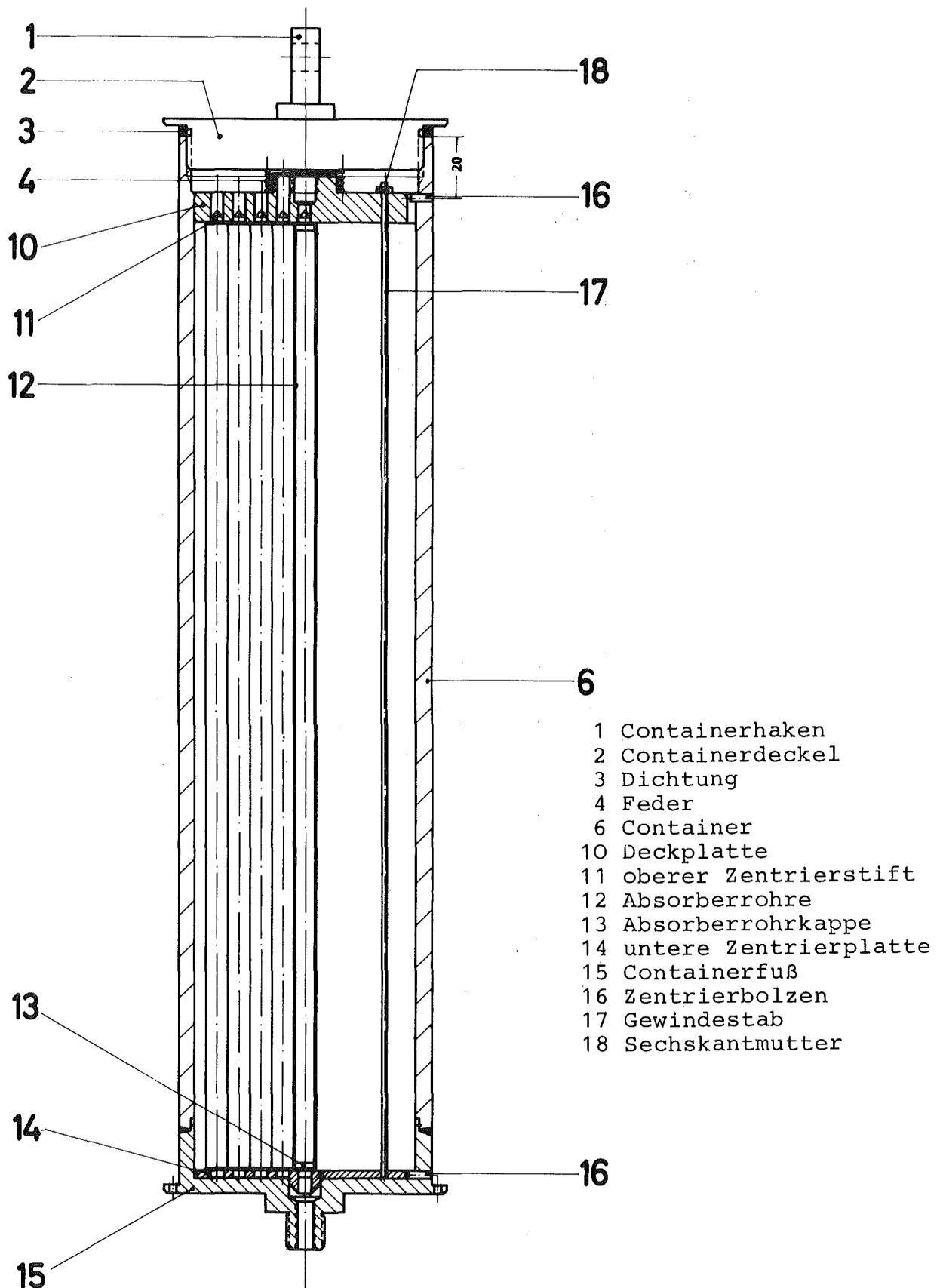
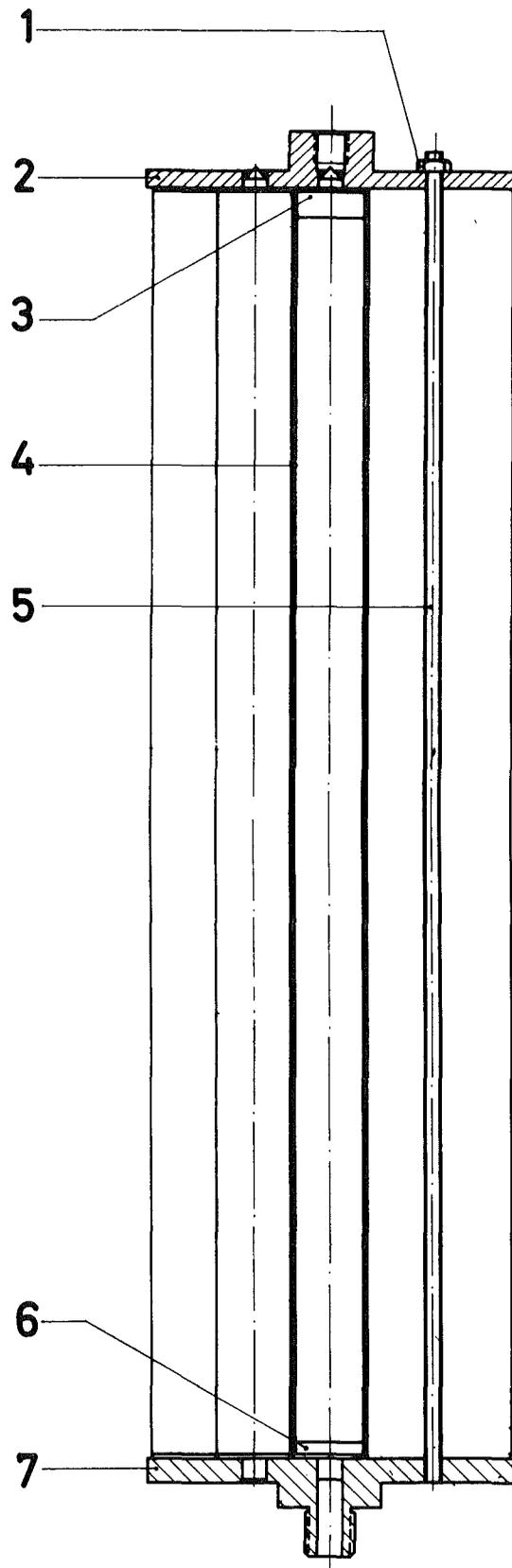


Abb. 3.1.6: Stabbündel mit 61 Stäben



- 1 Sechskantmutter
- 2 obere Zentrierplatte
- 3 oberer Zentrierstift
- 4 Absorberrohr
- 5 Gewindestab
- 6 unterer Zentrierstift
- 7 untere Zentrierplatte

Abb. 3.1.7: Stabbündel mit 19 Stäben

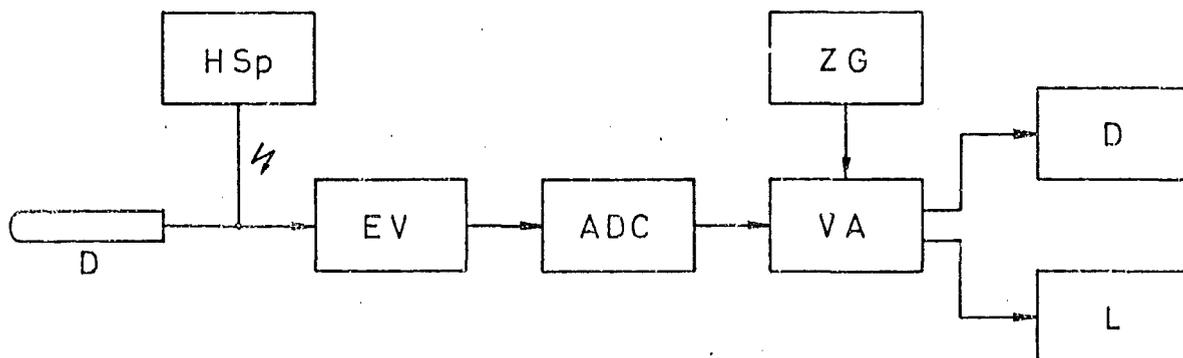


Abb. 3.2.1: Blockschaltbild der Neutronenflußmeßanordnung

- D : Detektor
- H Sp : Hochspannungsgerät
- EV : Elektromsterverstärker
- ADC : Analog-zu-Digital-Converter
- VA : Vielkanalanalysator
- ZG : Zeitmarkengenerator
- D : Drucker
- L : Locher

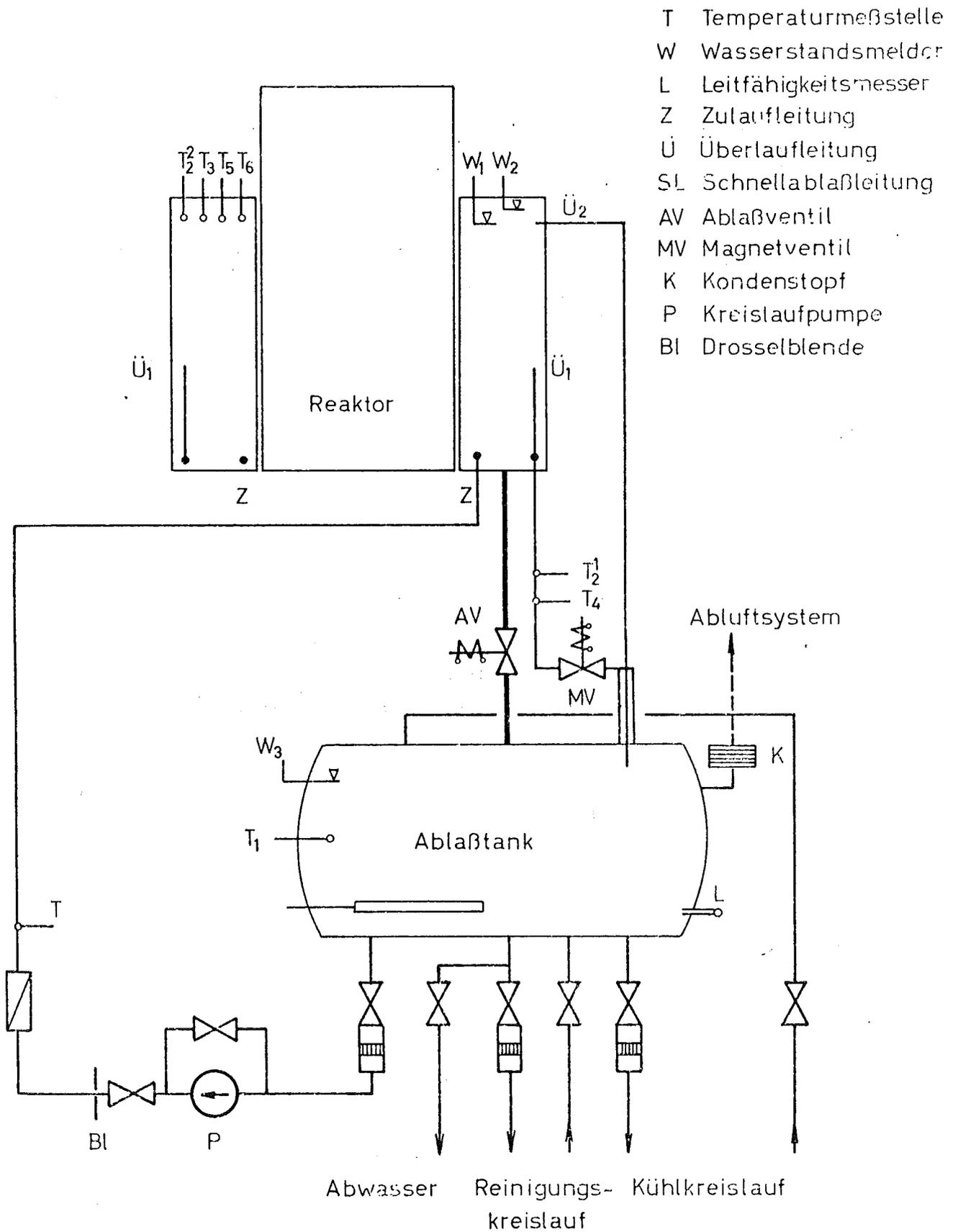


Abb. 3.2.2: Moderatorwasserkreislauf des STARK

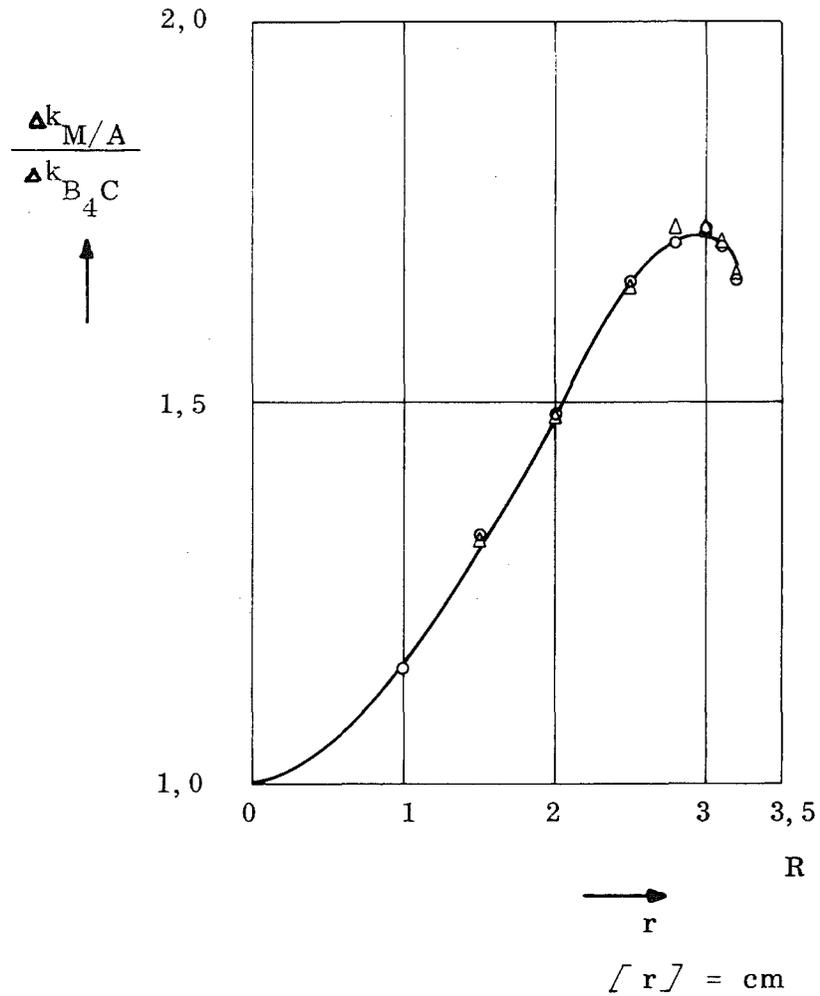


Abb. 3.3.1:

Reaktivitätswertmessung im STARK 7 C

Zylindrisches Element, Innendurchmesser 70 mm

Absorber :

B_4C , B-10 nat. $\rho = 1,7 \text{ g/cm}^3$

Moderator :

$\rho = 0,95 \text{ g/cm}^3$

Polyäthylen

○ Elementlänge 30 cm

△ Elementlänge 60 cm

— Rechenwert (S 4, MOXTOT)

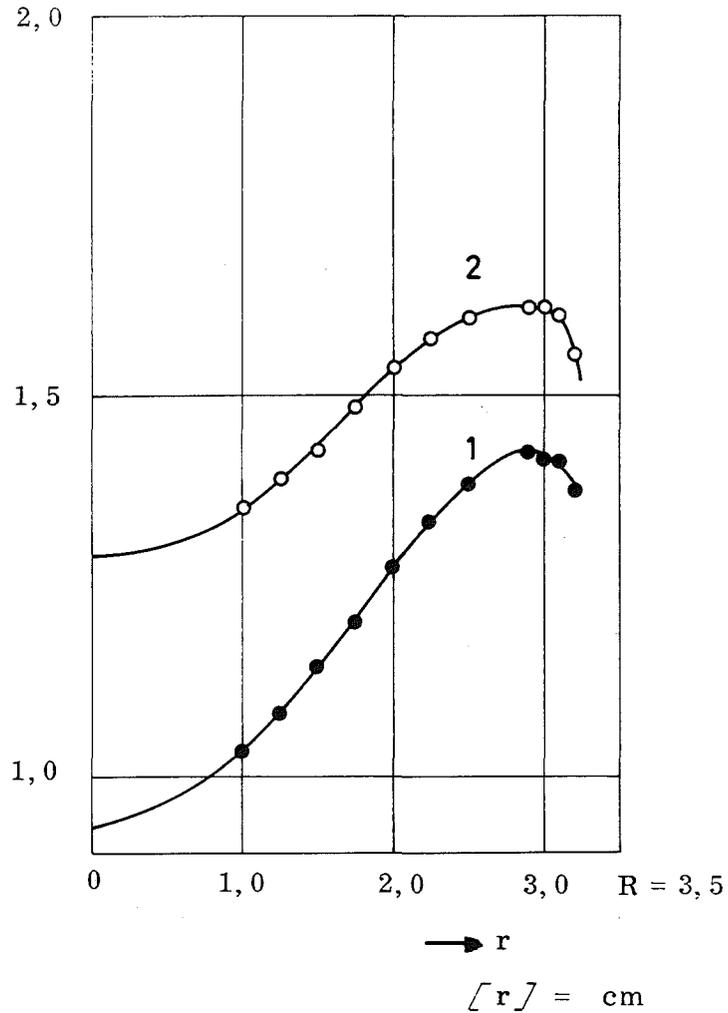


Abb. 3.3.2:

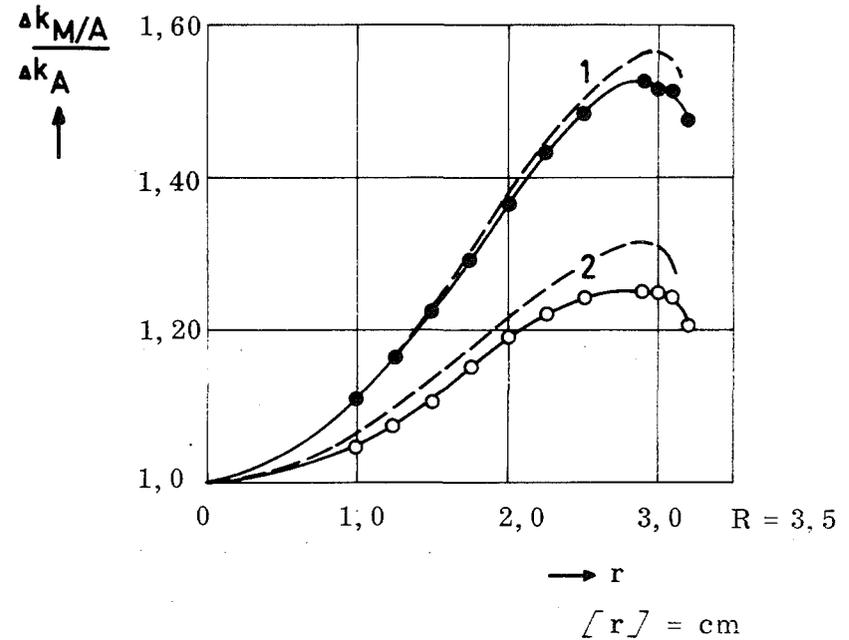
Reaktivitätswertmessung im STARK 7 B

Zylindrisches Element, Innendurchmesser : 70 mm

Absorber : 1. B_4C B - 10 nat., $\rho_{B_4C} = 1,7 \text{ g/cm}^3$

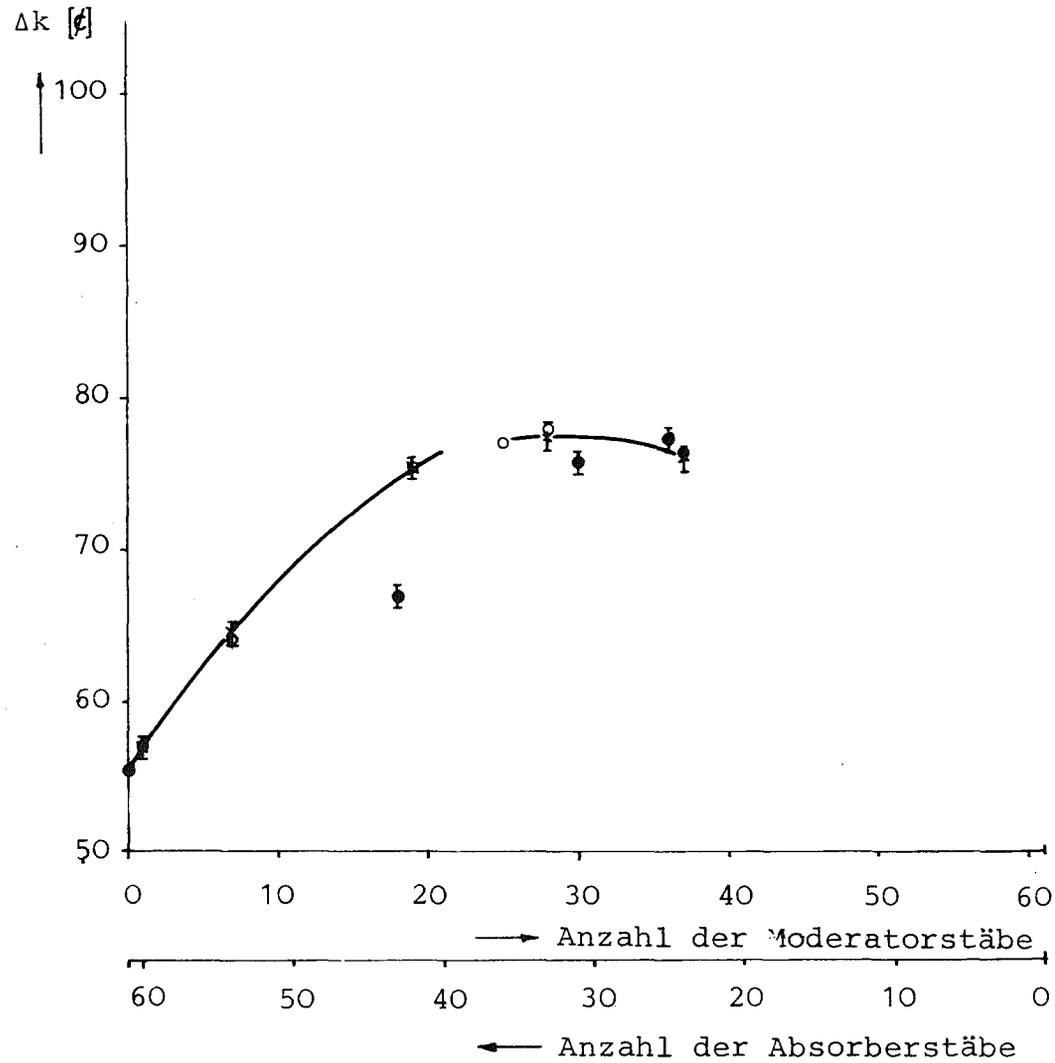
2. B_4C B - 10 93%, $\rho_{B_4C} = 0,75 \text{ g/cm}^3$

Moderator : Polyäthylen $\rho = 0,95 \text{ g/cm}^3$



o Messung

--- Rechnung (S4 . KFK - INR)



$$\frac{\Delta k}{\Delta k_{B_4C}}$$

↑

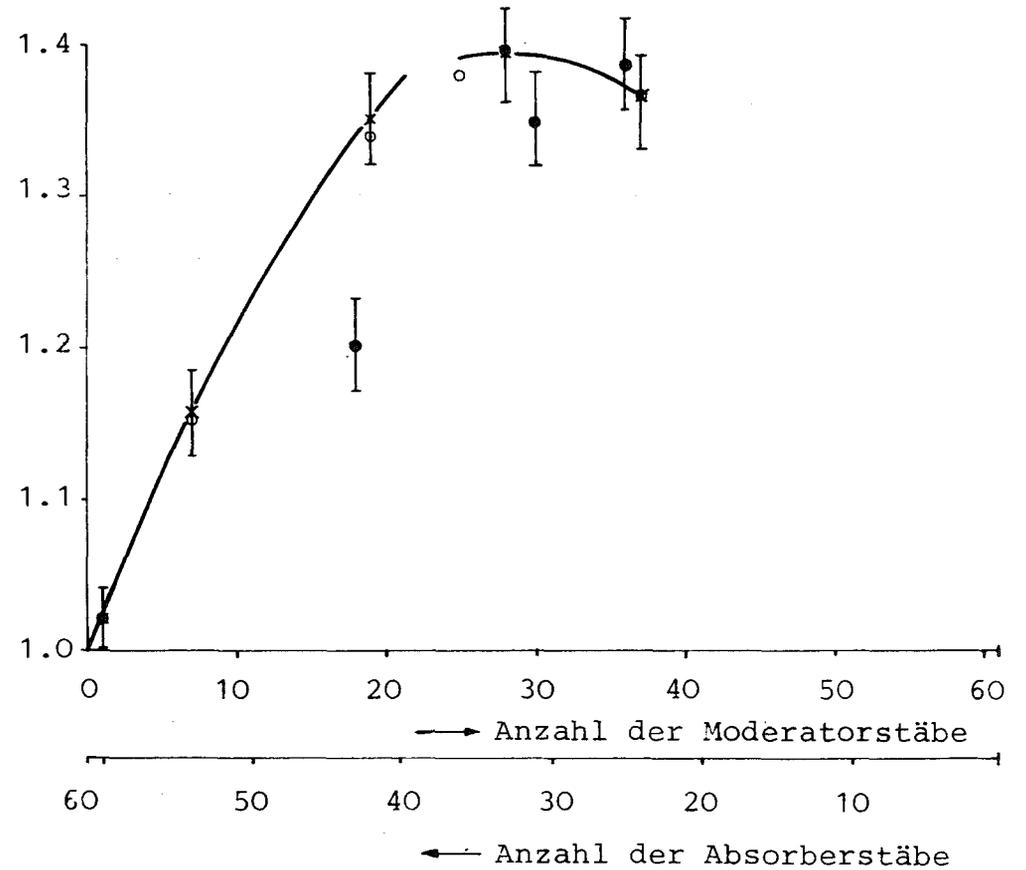


Abb.3.3.3: Reaktivitätsmessung im STARK 7B

Element mit 61 Stäben; kleine Stababstände

Vergleich zweier Messungen

x 1. Messung

o 2. Messung

• 1. Messung: zusätzlicher Absorber in Elementsmittle

- kleine Stababstände
- x mittlere Stababstände
- o große Stababstände
- Rechenwert
- * zusätzlich ein zentraler Absorberstab

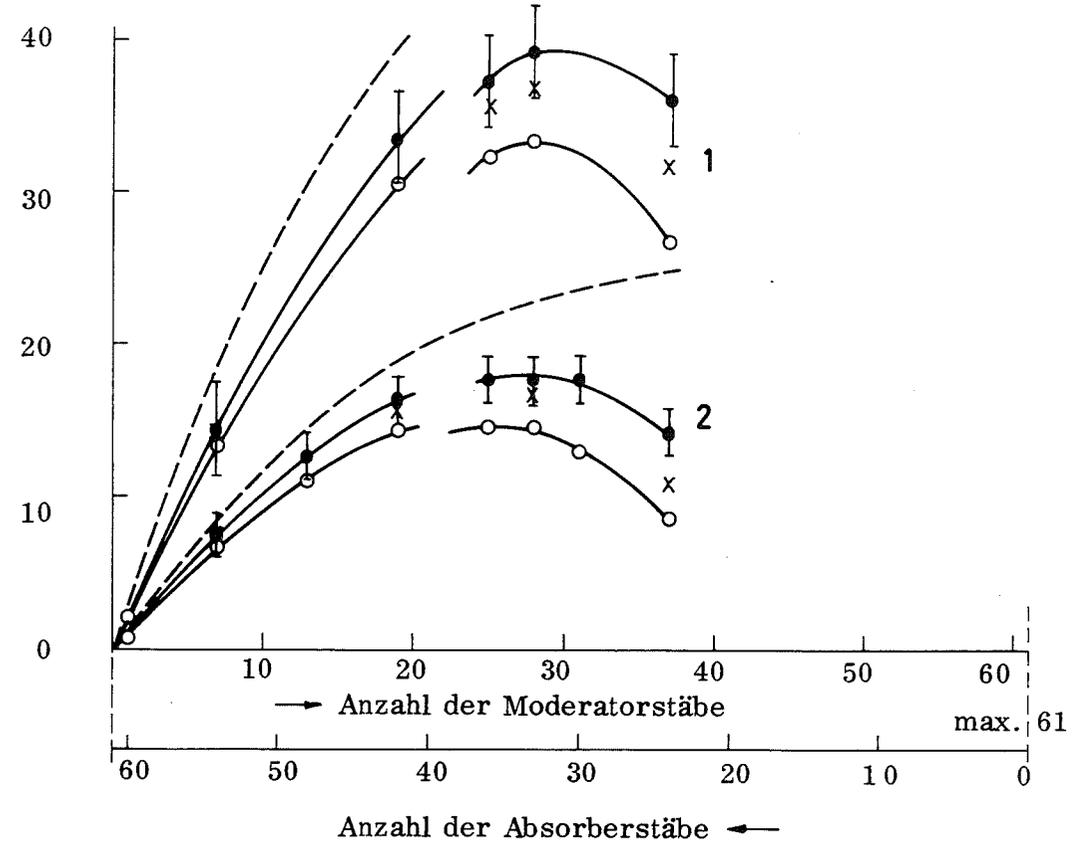
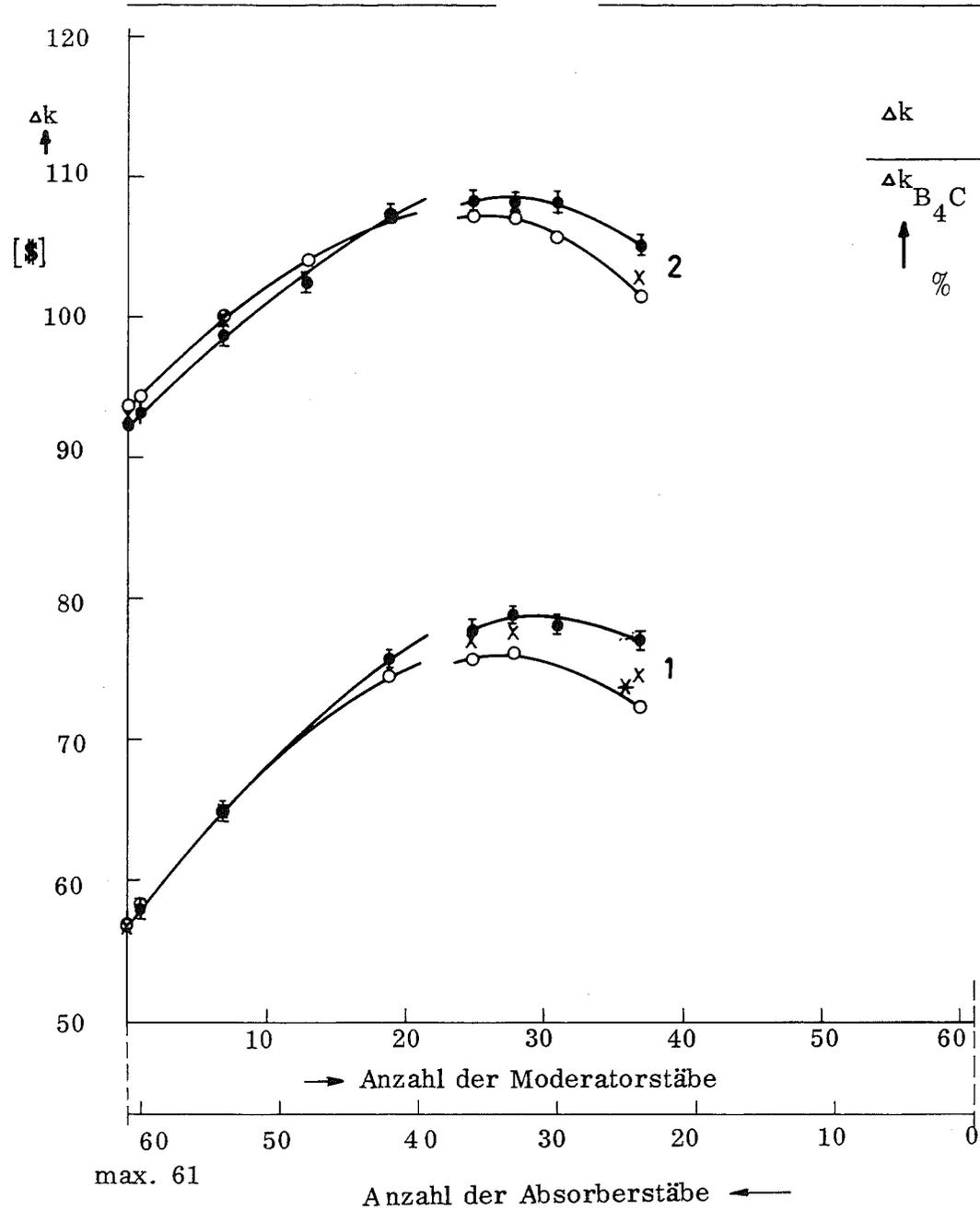


Abb. 3.3.4:

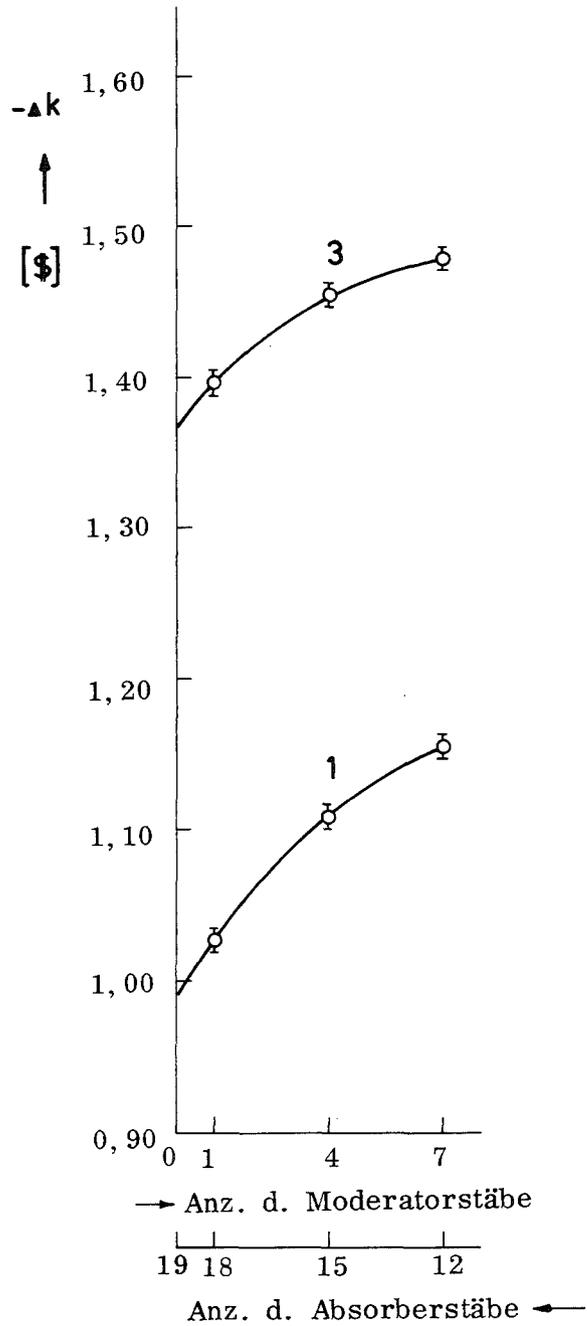
Reaktivitätswertmessung im STARK 7 B

Element mit 61 Stäben; Stabdurchmesser 7 mm

Absorber : 1. B_4C , B - 10 nat., $\rho = 1,7 \text{ g/cm}^3$

2. B_4C , B - 10 zu 93 %, $\rho = 0,9 \text{ g/cm}^3$

Moderator : Polyäthylen, $\rho = 0,9 \text{ g/cm}^3$



$$\frac{\Delta k_{MA}}{\Delta k_{B_4C}}$$

↑

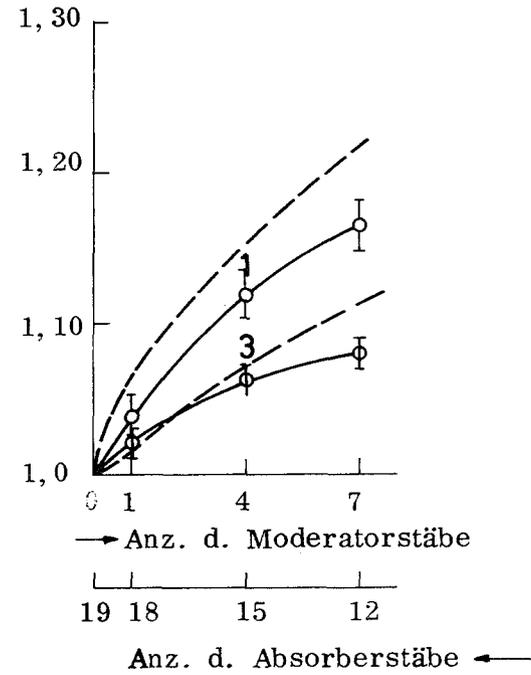


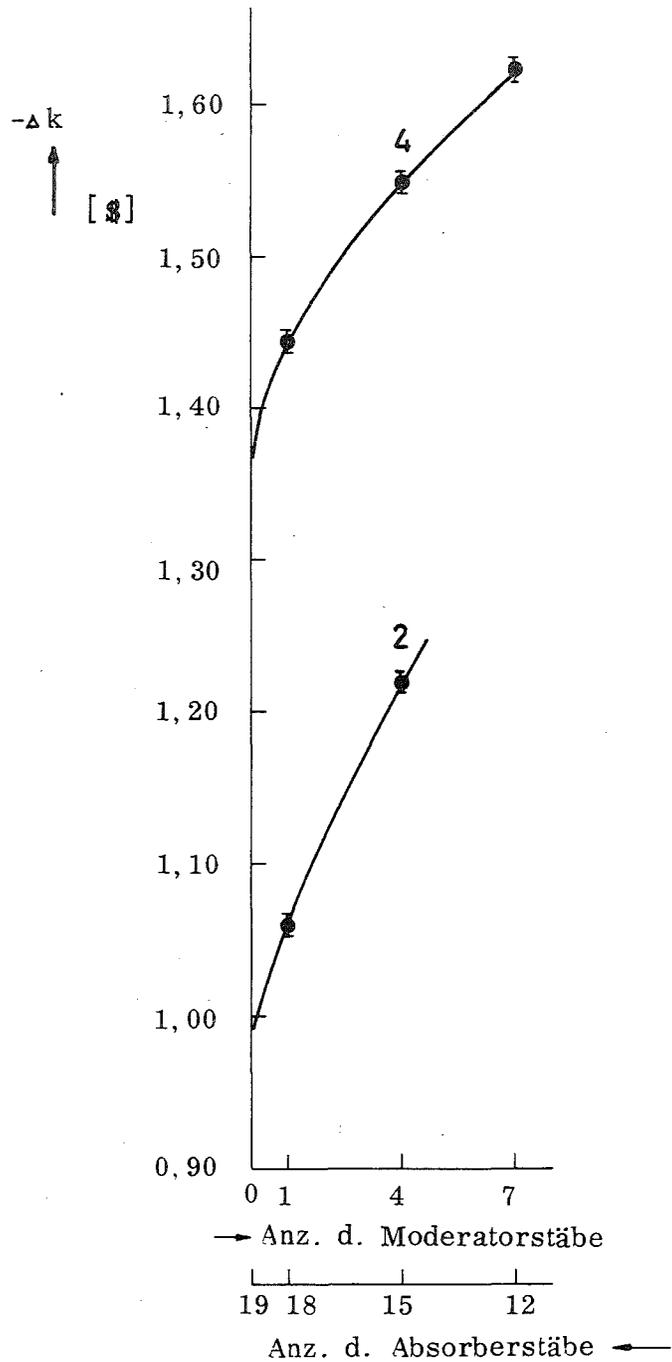
Abb. 3.3.5.1:

Reaktivitätswertmessung im STARK 7 B
 Element aus 19 Stäben
 Stabdurchmesser 18 mm

Kurve	Absorber	Moderator
1	B_4C , B - 10 nat. $\rho = 1,7 \text{ g/cm}^3$	Zyrkonhydrid
3	B_4C , B-10 93 % $\rho = 0,76 \text{ g/cm}^3$	Zyrkonhydrid

o = Messung

--- = Rechnung (S 4, KFK INR)



$$\frac{\Delta k_{MA}}{\Delta k_{B_4C}}$$

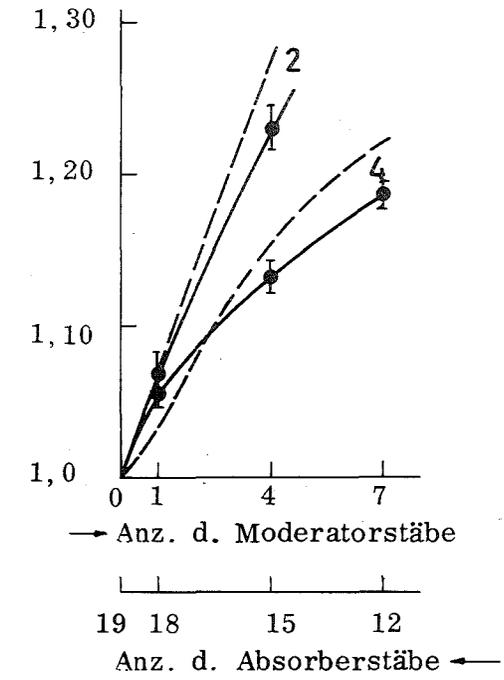


Abb. 3.3.5.2:

Reaktivitätswertmessung im STARK 7 B
 Element aus 19 Stäben
 Stabdurchmesser 18 mm

Kurve	Absorber	Moderator
2	B ₄ C, B-10 nat. ρ = 1,7 g/cm ³	Polyäthylen
4	B ₄ C, B-10 93 % ρ = 0,76 g/cm ³	Polyäthylen

● = Messung
 --- = Rechnung (S 4, KFK-INR)

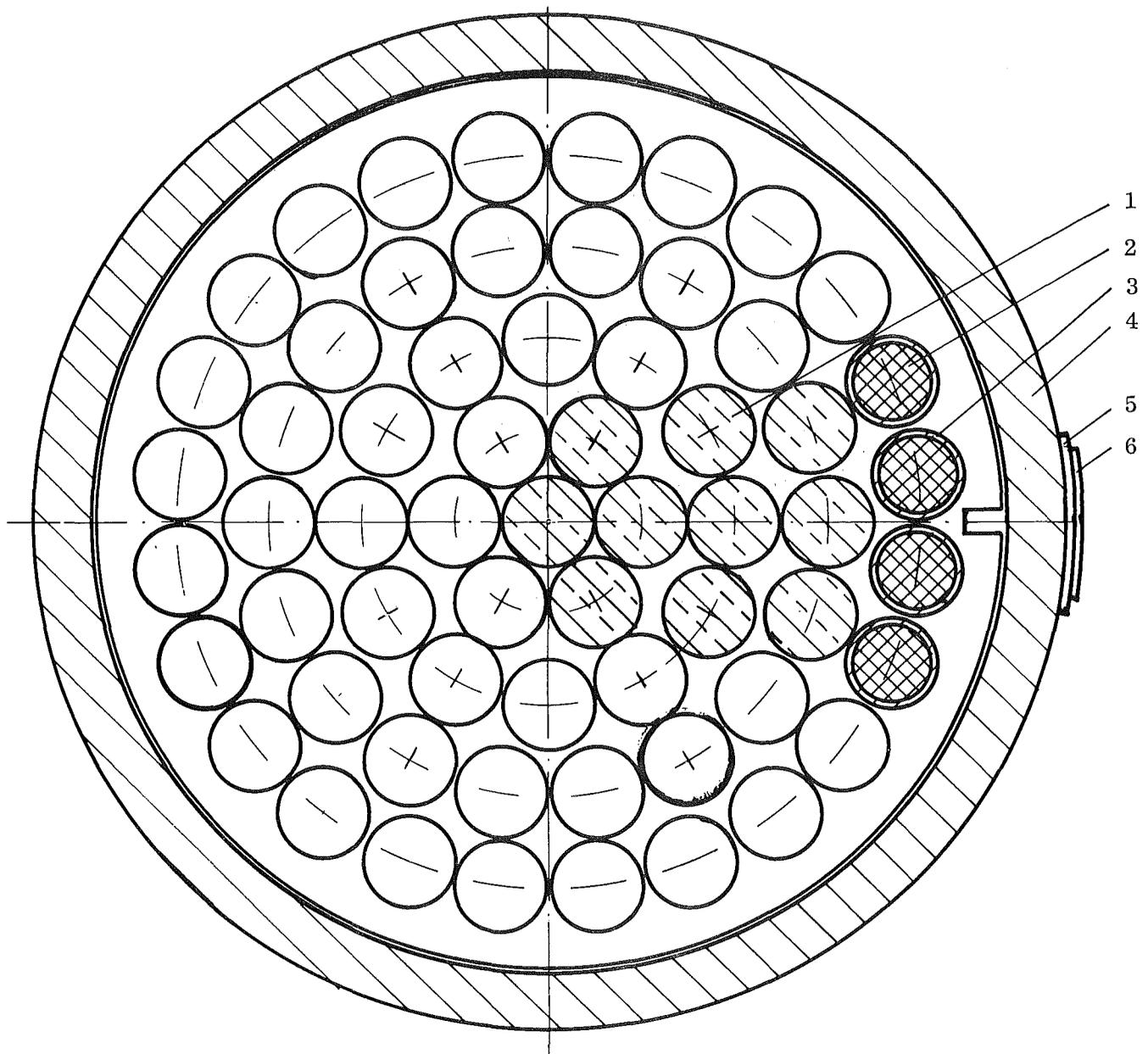


Abb. 4.1 : Folienposition im Bündelelement mit 61 Stäben

- | | |
|------------------|-----------------------------------|
| 1 Moderatorstäbe | 4 Elementbehälter |
| 2 Absorber | 5 Lexanfolie |
| 3 Absorberhülle | 6 Uranbeschichtete Aluminiumfolie |

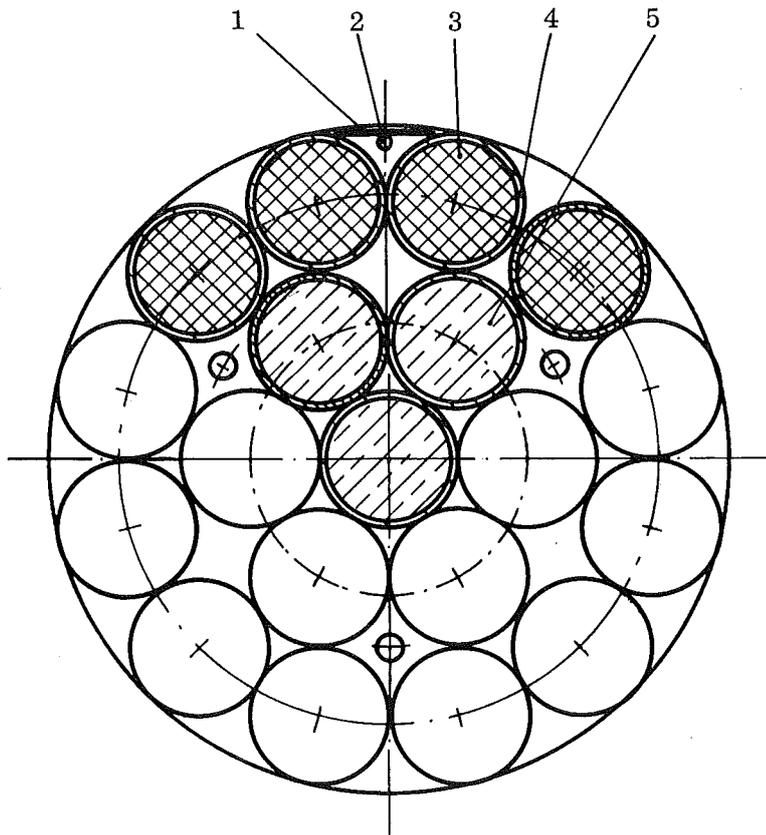


Abb. 4.2 : Folienposition im Bündelelement mit 19 Stäben

- | | | | |
|---|--------------|---|-----------|
| 1 | Folienpaar | 4 | Hüllrohr |
| 2 | Folienhalter | 5 | Moderator |
| 3 | Absorber | | |

ANHANG A

Absorberwerkstoffe

Als wichtigstes Kriterium zum Vergleich verschiedener Absorberwerkstoffe ist der makroskopische Einfangquerschnitt im Bereich des Energiespektrums der schnellen Reaktoren heranzuziehen, da die reinen Abschaltssysteme mit einem beschränkten Volumen einen möglichst großen Reaktivitätswert erbringen sollen. Natürlich wird auch der Materialpreis eine Rolle spielen. Chemische Stabilität unter Reaktorbedingungen wird vorausgesetzt.

Schnelle Reaktoren der zweiten Generation verwenden als Absorberwerkstoff für das Abschaltelement ausschließlich B_4C größtenteils mit Bor-10-Anreicherung. Ein Reaktor der ersten Generation, Clementine, arbeitete auch mit elementarem Bor, ebenfalls mit Anreicherung. Meistens wurden bei den Reaktoren der ersten Generation zum Abschalten jedoch Brennstoffteile oder Stäbe aus abgereichertem Uran im Core bewegt oder der Reflektor verändert.

Zusammen mit der 1000 MWe-Klasse der Zukunft wird Tantal als möglicher Absorber genannt. Europiumoxid (Eu_2O_3) wird hinsichtlich der Verwendung im SNR-300 getestet, jedoch zunächst nur als Regelwerkstoff /7,8/. Neben diesen Absorberwerkstoffen gibt es eine Reihe weiterer stabiler Borverbindungen sowie Elemente mit hohem Einfangquerschnitt für hohe Neutronenenergien. Einen Überblick über die möglichen Absorber gibt Tabelle A1. Außer Dichte und Teilchenzahl wird dabei ein vergleichender Reaktivitätswert genannt. Er bezieht sich auf ein zu 100% mit dem betreffenden Material gefülltes Abschaltelement mit 41 mm Außenradius und ist mit der in Abschnitt 2 beschriebenen Methode bestimmt. Die aufgeführten Preise wurden, wenn nicht anders vermerkt, Katalogen für Laborbedarf entnommen und

sollen nur grobe Anhaltswerte liefern. Mit den Dichtangaben umgerechnet wurden sie außerdem auf die Volumeneinheit bezogen. Die letzte Zeile soll eine Preisabschätzung pro Reaktivitätswert liefern.

Die höchsten Reaktivitätswerte, wie in der Tabelle angegeben, werden mit reinem Bor-10-Pulver erreicht. Gegenüber B_4C mit hoher Anreicherung, das diesen Reaktivitätswert nur geringfügig unterschreitet, besitzt Borpulver einige nachteilige Materialeigenschaften. Die Wärmeleitfähigkeit ist mit $0,0406 \text{ cal/cm sec } ^\circ K /11,12/$ nur etwa die Hälfte von B_4C mit $0,07 \text{ cal/cm sec } ^\circ K$ und nimmt mit steigender Temperatur zudem ab. Borpulver kann nur durch aufwendige Verfahren rein hergestellt werden. Technologien zur Herstellung von Abschalt-elementen sowie umfangreiche Kenntnisse des Bestrahlungsverhaltens fehlen. Bor ist weiterhin in Metallschmelzen löslich /13/.

Aus diesen Gründen wird B_4C als Absorberwerkstoff vorgezogen. Es liegen zahlreiche Bestrahlungsergebnisse aus thermischen Reaktoren vor. B_4C reagiert mit Stählen erst oberhalb $1000 ^\circ C$. Flüssiges Natrium greift B_4C erst bei Temperaturen über $580 ^\circ C$ an.

Mit etwas geringerem Reaktivitätswert folgen dem B_4C einige Metallboride. Aus den wenigen Angaben über diese Materialien ist zu entnehmen, daß ihr Korrosionsverhalten besser ist als das von B_4C /14/. Das Spaltproduktrückhaltevermögen wird anhand einiger Beispiele der Literatur als günstig beurteilt, jedoch bleiben auch diese Angaben unzureichend. Die Preise für die Boride mit angereichertem Bor können nicht angegeben werden, jedoch liegen die mit Bor natürlicher Isotopenzusammensetzung weit über dem des B_4C des elementaren Bors.

Hinsichtlich des Reaktivitätswertes schließt sich mit einigem Abstand dann Li_2O an, das mit einem Li^6 -Gehalt von 100%

angenommen wurde. Li_2O ist bis ca. 750°C fest und stabil /15/. Es besitzt jedoch als Neutronenabsorber zwei Nachteile:

1. Aus Li^6 entstehen pro Neutronenabsorption zwei Gasatome, nämlich Helium und Tritium, gegenüber nur Helium im Bor. Das entspricht bei einem einprozentigen Li^6 -Abbrand ca. 45 cm^3 npT.
2. Mit Tritium entsteht ein radioaktives Folgeprodukt mit einer Halbwertszeit von 12,3 Jahren. Für die oben genannten Abschaltetelemente hätte ein Abbrand von 1% des Lithiums eine Tritiumaktivität von 10^5 Ci zur Folge. Dies entspricht der Tritiumerzeugungsrate eines BWR mit 1000 MWe über 5 Jahre /16/. Hieraus wird deutlich, welche Probleme für die Handhabung verbrauchter Abschaltetelemente mit Lithium entstehen würden. Vom Preis her ist das hochangereicherte Li_2O zudem mit Bor mit 40% Bor-10-Konzentration zu vergleichen, das dem Li_2O entsprechende Reaktivitätswerte liefert.

Etwa in gleicher Reihenfolge mit ungefähr $2/3$ des Reaktivitätswertes folgen die gleichen Materialien ohne Bor-10-Anreicherung. Sie werden wieder angeführt vom elementaren Bor. Nahezu den gleichen Wert erreicht B_4C . Hier gelten die gleichen Argumente hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit, Kenntnis des Bestrahlungsverhaltens und der Fertigung wie bei angereichertem Bor und Borkarbid. Die Borkarbidhersteller bieten beliebige Körnungen der Pulver an, und selbst hochverdichtbare Pulverzusammensetzungen sind in großen Mengen sofort lieferbar.

Einige Anmerkungen sind jedoch hier hinsichtlich Eu_2O_3 erforderlich. Es besitzt zwei günstige Eigenschaften:

1. Durch Neutronenabsorption tritt kein Verlust von Absorbiermaterialien ein, denn die Folgeprodukte sind langlebige Isotope mit ebenfalls hohen Absorptionsquerschnitten.
2. Durch die Neutroneneinfangreaktionen entstehen keine Gase. Als Nachteil ergeben die radioaktiven Folgeprodukte einige Probleme bei der Handhabung bestrahlter Elemente.

Zur Zeit liegen zudem keine Kenntnisse über das Bestrahlungsverhalten vor. In der SNEAK 6A und 7A wurden Reaktivitätswertmessungen sowohl mit Tantal als auch mit Borkarbid und Europiumoxid durchgeführt /8,17/. Die Reaktivitätswerte pro Absorbervolumen verhielten sich dabei wie

	Tantal	B_4C , B-10 nat	Eu_2O_3
SNEAK 6A	1	1,82	2,42
SNEAK 7A	1	1,42	2,30

Doch selbst wenn die hohe Dichte von $8,18 \text{ g/cm}^3$, die in den Berichten /8,17/ angegeben wird, zugrundegelegt wird, bleiben die Reaktivitätswerte für Eu_2O_3 aus den SN-Rechnungen unter denen von B_4C mit natürlichem Bor. Natürlich können auch mit einem Europiumabsorber, dessen Absorptionsquerschnitt ebenfalls mit abnehmender Energie ansteigt, durch die Kombination mit einem Moderator größere Reaktivitätswerte erzielt werden.

Tabelle A 1: Absorberwerkstoffe

Material	B ₄ C, B ¹⁰ nat.	B ₄ C B-10 zu 90%	Li ₂ O, Li ⁶ nat.	Li ₂ O Li ⁶ zu 100%	Eu ₂ O ₃	B ₄ C B ¹⁰ zu 100%	Eu ₂ O ₃
Dichte	2,54		2,013		7,34		8,13
Molekulargewicht	55,2		29,88	8,06	351,9		51,9
B-10 Teilchendichte 10 ⁻²²	2,18	10,0				11,1	
Metallteilchendichte 10 ⁻²²			Li ⁶ : 0,6		2,52		2,8
Reaktivitätswert k [%]	1,16	1,74	0,35	1,45	0,90	1,77	
Preis pro kg	120,- ⁺ 30,- ⁺⁺	24.000,-	1.420,-	18.000,- ⁺⁺⁺	6.000,- ⁺ 3.000,- ⁺⁺		
Preis pro l	300,- ⁺ 76,- ⁺⁺	61.000,-	2.860,-	36.200,- ⁺⁺⁺	44.000,- ⁺ 22.000,- ⁺⁺		
Preis pro l k · 10 ²	248,- ⁺ 66,- ⁺⁺	35.000,-	8.200,-	25.000,- ⁺⁺⁺	49.000,- ⁺ 24.500,- ⁺⁺		

+ = Preis für Labormenge

++ = Preis für Kiloware

+++ = für Li⁶ - Metall

Material	HfB ₂ , B ¹⁰ nat.	HfB ₂ , B ¹⁰ 100%	TaB ₂ , B ¹⁰ nat	TaB ₂ B ¹⁰ zu 100%	N ₂ B ₅ , B ¹⁰ nat.	N ₂ B ₅ B ¹⁰ zu 100%	ThB ₄
Dichte	10,5		11,85		11,0		8,45
Molekulargewicht	200,1		202,6		421,8		275,4
B-10 Teilchendichte 10 ⁻²²	1,24	6,32	1,38	7,06	1,54	7,85	7,42
Metallteilchendichte 10 ⁻²²	3,16	3,16	3,53	3,53	3,14	3,14	1,85
Reaktivitätswert k [%]	1,04	1,61	1,12	1,66	1,04	1,65	
Preis pro kg	5.850,-		900,-		125,-		
Preis pro l	61.400,-		10.700,-		1.380,-		
Preis pro l k·10 ⁻²	59.000,-		9.500,-		1.330,-		

Material	B ^{nat}	B ¹⁰	Eu	Gd	Hf	Ta	N	Ag	In
Dichte	2,34		5,244	7,948	13,31	16,1	19,35	10,5	7,3
Molekulargewicht	10,8		152,0	157,3	178,5	181,0	183,9	107,9	114,8
B-10 Teilchendichte 10 ⁻²²	2,55	13,0							
Metallteilchendichte 10 ⁻²²			2,08	3,04	4,5	5,55	6,3	5,9	3,8
Reaktivitätswert k [%]	1,20	1,83	0,75	0,62	0,57	0,78	0,51	++	++
Preis pro kg	250,-	32.800,- ⁺	105.000,-	12.000,-	2.250,-	950,-	194,-	285,-	840,-
Preis pro l	585,-	77.000,-	555.000,-	95.000,-	30.000,-	15.800,-	3.750,-	2.900,-	6.100,-
$\frac{\text{Preis pro l}}{k \cdot 10^2}$	488,-	42.100,-	740.000,-	153.000,-	64.000,-	20.300,-	7.350,-		

++ = Nicht im INR-Satz enthalten; nach Vergleich der Querschnitte etwa wie Hf

+ = Anreicherung 35 %, bei 41 % B¹⁰ : 5.230,- $\frac{\text{DM}}{\text{kg}}$

Moderatorwerkstoffe

Eine erste Kenntnis über die Moderationseigenschaften eines Materials liefert die Größe des makroskopischen Bremsvermögens $\Sigma_S \xi$. Für die wichtigsten Moderatoren ergeben sie sich im Maximum des Energiespektrums aus den ABN-Querschnitten /18/ entsprechend Tabelle B1. Diese Aufstellung zeigt, daß das makroskopische Bremsvermögen wasserstoffhaltiger Substanzen, deren Wasserstoffteilchendichte über ca. $0,017 \cdot 10^{24}$ H-Atome/cm³ liegt, bereits den $\Sigma_S \xi$ -Wert des besten Moderators ohne Wasserstoff, Beryllium, übertrifft.

k_{eff} -Rechnungen für kombinierte Abschalt-elemente, die Kohlenstoff als Moderator enthalten, zeigen keine Verbesserungen des Reaktivitätswertes gegenüber reinen Absorberelementen. Die ebenfalls rechnerisch ermittelten Reaktivitätserhöhungen mit Berylliummoderatoren sind so gering, daß allenfalls bei kleinen Materialdichten im Absorber bei gleichbleibendem Reaktivitätswert ein Teil des Absorbers durch Beryllium ersetzt werden kann. Somit können nur wasserstoffhaltige Substanzen als Moderator für die Kombination in einem Abschalt-element in Frage kommen.

Die Substanz mit großer Wasserstoffdichte, die zudem jederzeit und in ausreichenden Mengen billig zu erhalten ist, ist Polyäthylen $(\text{CH}_2)_n$. Bei einer Dichte von $0,95$ g/cm³ ergibt sich eine Wasserstoffdichte von $0,082 \cdot 10^{24}$ H-Atome/cm³ (zum Vergleich Wasser: $N_H = 0,067 \cdot 10^{24}$ cm⁻³). Für Polyäthylen gibt es jedoch obere Temperaturgrenzen. Ab 350 °C beginnt die Zersetzung. Der Übergang vom elastischen Werkstoff zu einer plastischen, schmierigen Masse erfolgt je nach Herstellungsverfahren zwischen 110 °C und 140 °C /19/. Unter freiem Luftzutritt bildet sich bei Bestrahlung ein schmieriger Oxidfilm an der Oberfläche /20/. Bei Bestrahlungsdosen mit $1 \cdot 10^8$ rads setzt eine Gasfreisetzung ein, die mit

38 ml/g(npT) angegeben wird. Größere Polyäthylenkörper erfahren dann einen Schwellvorgang. Die Einsatzgrenze wird für Polyäthylen allgemein mit 100 °C bezeichnet. Damit kann dieses Material aber nur bei Forschungsreaktoren mit kleinen Leistungen zur Anwendung kommen.

Für die Verwendung bei den Betriebstemperaturen eines Leistungsreaktors bieten sich die Metallhydride als wasserstoffhaltige Substanz an. Eine ganze Reihe der Metallhydride erfüllt zudem die Bedingung mit einer Wasserstoffdichte über $0,017 \cdot 10^{24}$ H-Atome/cm³.

Nun ist es jedoch nicht möglich, einfach eine Liste der Metallhydride aufzustellen und nach der Wasserstoffdichte eine Entscheidung zu treffen, denn die Metallhydride besitzen kein festes Wasserstoff- zu Metallatomverhältnis. Vielmehr ist das Atomverhältnis x einer MeH_x -Verbindung variabel, und dem Atomverhältnis mehr oder minder eng verbunden ist der Wasserstoffdampfdruck.

Der Wasserstoffdampfdruck der Verbindung entscheidet mit über die Wasserstoffabgabe der Moderatorkörper. Große Wasserstoffverluste im Moderator wiederum hätten unzulässige Reaktivitätswertänderungen der Abschaltelemente zur Folge. Bei der Verwendung von oxidischem Brennstoff ist es weiterhin als Nachteil anzusehen, wenn der freiwerdende Wasserstoff in das Natrium übertritt. Der Wasserstoff wäre dann in der Lage, in den Sauerstofftransport im Brennstoff einzugreifen /21/.

Für den Wasserstoffdampfdruck der meisten Hydride gilt die folgende Abhängigkeit vom Atomverhältnis /22/. Für kleine Atomverhältnisse H/Me steigt er mit x sehr schnell an. Im Bereich mittlerer x -Werte beschreibt die isotherme Dampfdrucklinie eine Gerade, d.h. es existiert ein Bereich, in dem der Dampfdruck unabhängig vom Atomverhältnis ist. Vor Erreichen einer Phasengrenze, meist der stöchiometrischen Zusammensetzung, weicht die Isotherme von der Geraden ab und steigt mit wachsendem x wieder sehr schnell an.

Weiterhin muß die Temperaturabhängigkeit des Dampfdruckes beachtet werden. Temperaturdifferenzen in lang ausgedehnten Hydridkörpern dürfen keine Wasserstoffverschiebungen bewirken, so daß Veränderungen der Wirksamkeit der Abschaltetelemente auftreten.

Bei einer Wasserstoffverlustrate spielt auch die Diffusionsgeschwindigkeit des Wasserstoffs im Hydrid selbst eine Rolle. Andererseits bestehen Möglichkeiten, durch Diffusionsbarrieren, durch z.B. Kupferüberzüge, den Wasserstoffaustritt aus den Moderatorkörpern zu verringern. Durch Unterteilen der Moderatorkörper mit solchen Barrieren könnte auch die Wasserstoffwanderung infolge eines Temperaturgradienten beeinflusst werden.

Es trifft hier also eine große Zahl von Problemen zusammen, die keine Entscheidung für ein bestimmtes Hydrid an Hand von Literaturdaten mit zudem vielfach unterschiedlichen Angaben zulassen. Vielmehr müssen für jeden Anwendungsfall die genauen Betriebsbedingungen vorliegen und als Grundlage für eine experimentelle Untersuchung dienen.

Die vorliegende Liste von Metallhydriden, Tabelle B 2, soll daher nur einen Überblick über die Zahl der Metallhydride verschaffen, deren Wasserstoffdichte über 0,017 H-Atome pro cm^3 liegt und deren Wasserstoffdampfdruck bei 400 °C mindestens 1 at unterschreitet. Die Reihenfolge wurde entsprechend der Wasserstoffdichte geordnet. Soweit die Angaben dazu ausreichten, wurde für die Atomverhältnisse $x=\text{H}/\text{Me}$ die maximalen Werte aus dem Dampfdruckplateau verwendet, anderenfalls der stöchiometrische Wert. Zirkonhydrid wurde mit $x=1,6$ und $x=1,7$ eingesetzt. Dies ist der Bereich, in dem Zirkonhydride bereits in den TRIGA-Reaktoren und im KNK Verwendung fanden. Damit ist Zirkonhydrid aber auch das einzige, für das Erfahrungen für den technischen Einsatz vorliegen.

Mit dem Betrieb des KNK wird außerdem das Verhalten in einem natriumgekühlten Reaktor in zunehmendem Maße bekannt.

Natürlich stellt sich hier die Frage: gibt es eine chemische Verbindung, die sowohl den Absorber als auch Wasserstoff in ausreichender Dichte aufweist? Die Frage zunächst auf Bor bzw. dessen Wasserstoffverbindungen angewendet, führt zu keinem positiven Ergebnis. Die chemische Stabilität und niedere Schmelzpunkte schließen den Einsatz der Borhydride und Borane aus. Allenfalls $B_{10}H_{14}$, das bis $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ stabil ist /23/, mit einem Schmelzpunkt bei $99,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ könnte bei Versuchsreaktoren Verwendung finden. Die Teilchendichten von /24/ $B_{10}H_{14}$ bei einer Dichte von $0,94\text{ g/cm}^3$ sind $0,065 \cdot 10^{24}\text{ cm}^{-3}$ für Wasserstoff und $0,0465 \cdot 10^{24}\text{ cm}^{-3}$ für Bor. Weiter gibt es einige Carborane, z.B. /25/ $C_2H_2B_{10}H_{10}$ mit einem Schmelzpunkt um $310\text{ }^{\circ}\text{C}$ und stabil bis $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ für den gleichen beschränkten Einsatzbereich. Dichteangaben für diese Materialien lagen jedoch nicht vor, so daß die Teilchendichten nicht bestimmt werden konnten. Das Gebiet der Carborane ist andererseits sehr umfangreich. Für spezielle Anwendungsbereiche sollte die Gruppe dieser Verbindungen jeweils neu gesichtet werden.

Borazol, ebenfalls eine Borverbindung mit großer Wasserstoffdichte ($0,039 \cdot 10^{24}\text{ cm}^{-3}$), ist /24/ bei Raumtemperatur flüssig und scheidet aus. Alle weiteren, im vorausgegangenen Abschnitt genannten Absorber, waren Metalle. Sie finden sich daher teilweise in der Tabelle der Metallhydride wieder. Um ihren Wert als Absorbermaterial herauszustellen, wurden sie erneut in einer ergänzenden Tabelle B3 aufgeführt, wobei der rechnerisch bestimmte Reaktivitätswert für ein Abschaltelement mit 41 mm Außenradius bei einem Füllungsgrad entsprechend 100% der theoretischen Dichte des betreffenden Materials angegeben wird. Die Reihenfolge erfolgt hier nach dem Reaktivitätswert mit Li^6H an der Spitze. Dieses Hydrid sowie $Li^{nat}H$ wurden hier nur der Vollständigkeit halber aufgeführt, denn gegen Lithium sprechen auch hier alle die im Abschnitt über Absorber genannten Nachteile. Somit verbleibt noch die Diskussion von $GdH_{1,9}$, $HfH_{1,5}$, nachdem ThH_2 ausscheidet, da der damit erzielbare Reaktivitätswert auch mit B_4C mit natürlichem Bor erzielbar ist. Europiumhydrid konnte nicht eingefügt werden, da keine ausreichenden Daten für das Hydrid existieren.

Bei Gadolinium und Hafnium erfolgt die Neutronenabsorption über (n,γ) -Reaktionen, die pro absorbiertem Neutron eine Energie von ca. 7 MeV freisetzen. Demgegenüber erzeugt die Neutronenabsorption im Bor-10 mit 2,9 MeV nur ca. 40% der Reaktionsenergie von Gadolinium oder Hafnium. Bei Bor nehmen die beiden Folgeteilchen Helium und Lithium-7 den größten Teil der 2,9 MeV als kinetische Energie mit und geben sie schnell an die unmittelbare Umgebung, d.h. an das Absorbermaterial ab. Die Folgeprodukte der Metalle bauen die Anlagerungsenergie der absorbierten Neutronen ausschließlich über γ -Strahlung ab. Eine Abschätzung der Absorption von γ -Strahlen in den Metallhydriden zeigt jedoch, daß die Reduktion der Gammaenergie um 40%, entsprechend der Bor-10 Reaktionsenergie, bereits nach 3 cm beim Gadoliniumhydrid bzw. nach 2 cm beim Hafniumhydrid erreicht ist. Nur Hydrid enthaltende Absorberelemente müssen daher über Kühlspalten im Elementbereich mindestens von der Dimension der reinen B_4C -Elemente verfügen. Dies gilt um so mehr, als die maximal zulässigen Betriebstemperaturen im Zentrum der Hydridkörper wegen des ansteigenden Wasserstoffdampfdrucks mit 600 °C für Hafniumhydrid oder ca. 850 °C bei Gadolinium gegenüber ca. 2300 °C bei B_4C wesentlich ungünstiger sind.

Hier zeigt sich nun ein Nachteil, wenn der Wasserstoff an den Absorber gebunden ist. Muß der Absorber aus Gründen der Kühlung, gemittelt über den Elementquerschnitt, mit Dichten kleiner als 100% der theoretischen Dichte angeordnet werden, so wird außer dem Absorber auch die Wasserstoffmenge reduziert. Elemente mit einem zentralen Moderatorkörper und äußerem Absorberring verfügen auch bei verdünntem Absorber in der Ringzone noch über einen kompakten, hochdichten Moderatorkernel. Der Reaktivitätswert der Absorberhydridelemente nimmt mit der Verdünnung jedoch soweit ab, daß die gleichen Reaktivitätswerte mit den heterogenen Elementen und B_4C als Absorber erreicht werden können.

Tabelle B 1 Makroskopisches Bremsvermögen verschiedener Moderatoren [\bar{cm}^{-1}]

Energiegruppe				6 (0,4-0,8 MeV)	7 (0,2-0,4 MeV)	8 (0,1-0,2 MeV)	9 (46,5-100 keV)
Moderator	Teilchendichte						
ZrH _{1,6}	N _H = 0,059	10 ²⁴ cm ⁻³		0,34	0,48	0,65	0,83
ZrD _{1,6}	N _D = 0,059	10 ²⁴ cm ⁻³		0,045	0,049	0,053	0,064
Li ₂ ⁷ O	N _{Li7} = 0,0806	10 ²⁴ cm ⁻³		0,029	0,081	0,021	0,021
Be	N _{Be} = 0,123	10 ²⁴ cm ⁻³		0,095	0,104	0,128	0,143
B ₄ ¹¹ C	N _{B11} = 0,111	10 ²⁴ cm ⁻³		0,044	0,064	0,067	0,070
C	N _C = 0,1	10 ²⁴ cm ⁻³		0,046	0,062	0,067	0,071

Tabelle B 2 Wasserstoffteilchendichte der Metallhydride

TiH _{1,5}	0,069	(600 °C)	200 mm Hg
ZrH _{1,7}	0,0622		23 " "
HfH _{1,6}	0,0605	(595 °C)	120 " "
ErH _{2,0}	0,0595	(600 °C)	0,0025 " "
LiH	0,059	(561 °C)	1,0 " "
ZrH _{1,6}	0,0586		6 " "
H ₂ O	0,058		
DyH _{2,0}	0,057		
YH _{1,8}	0,053	(600 °C)	0,005 " "
SmH _{2,0}	0,0515	"	0,01 " "
GdH _{1,9}	0,0508	"	1,1 " "
ThH _{2,0}	0,0489	"	5,1 " "
PrH _{2,0}	0,0477	"	0,015 " "
NdH _{1,99}	0,0466	"	0,022 " "
CeH _{2,0}	0,0456	"	0,15 " "
CaH _{1,75}	0,051	(679 °C)	0,75 " "
LaH _{1,8}	0,0395	(600 °C)	0,015 " "
NaH	0,035		
KH	0,0206		
TaH _{0,2}	ca. 0,0111		

Tabelle B 3Metallhydride
=====

Hydride von stark absorbierenden Metallen

Hydrid	Reaktivitätswert Δk $R_0 = 4,1 \text{ cm}$	<u>H Atome</u> cm^3	Wasserstoffdruck bei		
			400 °C	500 °C	600 °C
			mm Hg		
Li^6H	- 0,0188	0,059			1,0
$\text{GdH}_{1,9}$	- 0,0167	0,0508			1,1
$\text{HfH}_{1,5}$	- 0,0163	0,0605	1	ca. 20	120
$\text{Li}^{\text{nat}}\text{H}$	- 0,0140	0,059			
ThH_2	- 0,0102	0.0489			