

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

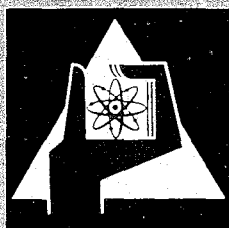
Mai 1968

KFK 776
EUR 3955 d

Institut für Angewandte Reaktorphysik

Untersuchung der Abhängigkeit der Reaktivität eines schnellen
dampfgekühlten 500 l Reaktors von der Dampfdichte in SNEAK-3A

P. Engelmann, A.M. Raberain, D. Wintzer



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Mai 1968

KFK 776
EUR 3955 d

Institut für Angewandte Reaktorphysik

Untersuchung der Abhängigkeit der Reaktivität eines
schnellen dampfgekühlten 500 l Reaktors von der Dampf-
dichte in SNEAK-3A*

P. Engelmann, A.M. Raberain; *D. Wintzer

* Diese Arbeit wurde im Rahmen der Assoziation zwischen der Europäischen Atomgemeinschaft und der Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe, auf dem Gebiet der schnellen Reaktoren durchgeführt.

** Delegiert von EURATOM

Kurzfassung

Durch eine Reihe von Void- und Flutungs-Experimente an den Urananordnungen SNEAK-3A-1 und SNEAK-3A-2 wurde die Abhängigkeit der Reaktivität von der Wasserstoffkonzentration im Bereich von $N_H=0$ bis $N_H=3.6 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ untersucht. Der Vergleich der Meßwerte mit Rechnungen zeigt, daß die tatsächlichen Reaktivitätsänderungen mit den betrachteten 26 Gruppensätzen SNEAK-Satz, SNEAK-PMB-Satz und ABN-Satz mehr oder weniger unterschätzt werden. SNEAK-PMB-Satz und auch noch der SNEAK-Satz liefern im Bereich zwischen Dampfichte Null und der Dampfichte am Arbeitspunkt ($N_H=1.8 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$) brauchbare Ergebnisse (Abweichungen 5 bis 15%), die Flutreaktivität wird dagegen stärker unterschätzt (um 20 bis 25%). Der ABN-Satz gibt insgesamt einen flacheren Verlauf der Kurve $k(\rho_H)$ und liefert um 30 bis 35% zu kleine Reaktivitätseffekte sowohl für den Void- wie für den Flutfall.

Abstract

A series of steam-void- and flood-experiments has been performed in the uranium fueled SNEAK assemblies 3A-1 and 3A-2, in order to study the dependence on hydrogen concentration of the reactivity in the range of $N_H=0$ to $N_H=3.6 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$. A comparison of experimental data has been made with calculations using the 26 group SNEAK set, SNEAK-PMB set, and ABN set respectively. All calculations tend to underpredict the reactivity changes: both SNEAK-PMB and SNEAK set give reasonable values in the range $N_H=0$ to $N_H=1.8 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ (working point), the max. deviations are 5 and 15% respectively. The flood reactivity is underestimated with these sets by 20 and 25%. The ABN set, however, underpredicts both void- and flood-reactivities by 30 to 35%.

1. Einleitung

Für die Auslegung dampfgekühlter schneller Reaktoren und ihre Sicherheitsanalyse ist die Kenntnis der Reaktivitätsänderungen bei Änderungen der Dampfdichte erforderlich. Wichtige Parameter sind vor allem die Reaktivitätsänderung bei Dampfverlust, der Dampfdichtekoeffizient der Reaktivität am Arbeitspunkt des Reaktors und die Reaktivitätsänderung beim Fluten des Reaktors. Die Berechnung dieser Größen ist schwierig, da sich das Neutronenspektrum des Reaktors zwischen Void-Fall, Betriebsdruck und Flutfall sehr stark ändert. Bisher lagen wenig integrale Experimente an hinreichend moderierten schnellen Systemen vor, an denen man Rechnungen überprüfen konnte. Um diese Lücke zu schließen, wurde im SNEAK-Programm den Messungen an der "Dampf-Anordnung" SNEAK-3 Vorrang eingeräumt. In einer ersten Reihe von Experimenten, SNEAK-3A, wurde bis zum März 1968 das neutronenphysikalische Verhalten dampfgekühlter schneller Reaktoren mittlerer Größe (500 - 700 l Corevolumen) mit Uranbrennstoff untersucht; in einer zweiten Reihe, SNEAK-3B, wird jetzt das Verhalten von Mehrzonencores mit Plutonium und Uran als Spaltstoff untersucht.

Bei den Experimenten in SNEAK-3A wurde die Wasserstoffkonzentration im Core schrittweise zwischen Null und der doppelten Konzentration am Arbeitspunkt verändert, wobei die Konzentration der übrigen Materialien beibehalten wurde.

Es wurden 2 Grundanordnungen aufgebaut: SNEAK-3A-1 mit einer Wasserstoffkonzentration $N_H = 7.41 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, und SNEAK-3A-2 (Arbeitspunkt) mit $N_H = 17.9 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Ausgehend von SNEAK-3A-1 und 3A-2 wurden Void-Experimente durchgeführt, bei denen die Polyäthylenfolien, die zur Simulation des Wasserdampfes dienen, schrittweise aus Teilzonen des Core entfernt wurden. Dabei wurde jeweils die Reaktivitätsabnahme aus der Änderung der kritischen Stabstellung ermittelt. Nach größeren Void-Schritten wurde durch Zuladen von Randelementen wieder für eine hinreichende Reaktivitätsreserve für den nächsten Schritt gesorgt.

Ausgehend von SNEAK-3A-2 wurde auf entsprechende Weise ein Flutungsexperiment durchgeführt, bei dem die CH_2 -Konzentration in Teilzonen des Core verdoppelt wurde. In einem Zusatzexperiment wurde der Einfluß der Zusammensetzung des Axialblankets auf den Void-Effekt ermittelt.

Eine unmittelbare Messung der Reaktivitätsänderung bei Veränderung der CH_2 -Konzentration in einem Core fester Größe wäre in SNEAK schwer zu realisieren gewesen, weil der Reaktivitätshub zwischen Void-Fall und doppelter Arbeitsdichte mehr als $10\% \frac{\Delta k}{k}$ beträgt. Aus den an SNEAK-3A-1 und 3A-2 durchgeführten Messungen läßt sich jedoch durch Umrechnung das Dampfichte-Reaktivitätsverhalten z.B. des Reaktors 3A-2 bei fester Coregröße im Bereich zwischen Dampfichte Null und der doppelten Arbeitspunktdichte ($N_H = 36 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) bestimmen.

In den folgenden Abschnitten werden die Experimente im einzelnen beschrieben und mit Rechnungen verglichen. Die wesentlichen Ergebnisse sind im letzten Abschnitt zusammengefaßt.

Für eine allgemeine Information über die integralen Messungen an den Anordnungen SNEAK-3A-1 und 3A-2 wird auf die Berichte /1/ und /2/ verwiesen.

2. Das Void-Experiment in SNEAK-3A-1

2.1 Durchführung des Experimentes

Fig. 1 zeigt in Horizontal- und Vertikalschnitten den Aufbau der 670 l-Anordnung SNEAK-3A-1 während des Void-Experimentes, Fig. 2 die Plättchenfolge in den Core-Elementen (Typ 1). Das axiale und radiale Blanket besteht aus abgereichertem metallischen Uran (0.4% U235) von 30.5 cm bzw. ca. 25 cm Dicke. Die genaue Materialzusammensetzung von Core und Blanket ist in /1/ angegeben.

In einem ersten Schritt wurde die axiale Abhängigkeit des Dampf-Void-Effektes im Core untersucht. Die Polyäthylenfolien wurden aus den zentralen 21 Elementen in folgenden Unterschritten entfernt (vergl. Fig. 1):

Schritt 1a :	aus den mittleren 16 Zellen	$(h=h_c/4 = 20.15 \text{ cm})$
1b :	" " "	32 " $(h=h_c/2 = 40.30 \text{ cm})$
1c :	" " "	48 " $(h=3/4 h_c = 60.45 \text{ cm})$
1d :	aus allen	64 " $(h=h_c = 80.60 \text{ cm}).$

Im Schritt 2 wurde die CH_2 -freie Zone in 2 Unterschritten auf die zentralen 45 Elemente ausgedehnt:

Schritt 1 :	21 zentrale Elemente über h_c entleert
2a :	37 " " " " "
2b :	45 " " " " "

Die Schritte 3 und 4 sind die Teile eines Sektorexperimentes:

Schritt 3a :	45 zentrale Elemente + 6 Sektorelemente
3b :	45 " " + 16 "
Schritt 4a :	wie 3b + zusätzliche 6 Sektorelemente
4b :	wie 3b + " 16 "

Zusammen mit den Schritten 1 und 2 dient das Sektorexperiment zur Ermittlung der radialen Abhängigkeit des Void-Effektes und ermöglicht darüber hinaus eine Extrapolation auf die Reaktivitätsabnahme beim völligen Dampfverlust aus dem Core $(\frac{\Delta k}{k})_{L, \text{Core}}$. Bei einem reinen Sektorexperiment mit hinreichend großem Sektor gilt

$$(1a) \left(\frac{\Delta k}{k}\right)_{L, \text{Core}} \approx \left(\frac{\Delta k}{k}\right)_{L, \text{Sektor}} \cdot \frac{V_{\text{Core}}}{V_{\text{Sektor}}}$$

Wird das Sektorexperiment in 2 Teilschritten durchgeführt, so lassen sich Oberflächen- und Volumeneffekte trennen und man kann für die Extrapolation die durch zweidimensionale Diffusionsrechnungen gestützte Formel benutzen

$$(1b) \left(\frac{\Delta k}{k}\right)_{L, \text{Core}} \approx \left(\frac{\Delta k}{k}\right)_{L, \text{Sektor}} \cdot \frac{V_{\text{Core}}}{V_{2. \text{Sektor}}}$$

die ebenfalls umso besser gilt, je größer die Sektoren sind.

Bei der Auswertung wurde letztere Methode angewendet, und zwar nur für den äußeren Corebereich. Für den zentralen Bereich wurde der Meßwert von Schritt 2 eingesetzt:

$$(2b) \left(\frac{\Delta k}{k}\right)_{L, \text{Core}} \approx \left(\frac{\Delta k}{k}\right)_{L, \text{Schritt 2}} + \left(\frac{\Delta k}{k}\right)_{L, 2. \text{Teilsektor}} \frac{V_{\text{Core-Außenbereich}}}{V_{2. \text{Teilsektor}}}$$

Hierdurch wird die Unsicherheit aus der Extrapolation wesentlich reduziert.

Die Reaktivitätsabnahme bei jedem Schritt wurde aus der Änderung der kritischen Stabstellungen bestimmt. Zur Reaktivitätskompensation wurden die Trimmstäbe TO14 und TO16 sowie der Regelstab ROO2 benutzt.

Die experimentellen Ergebnisse sind in Fig. 3 und 4 sowie in Tabelle 1 zusammen mit berechneten Werten dargestellt. Fig. 3 zeigt die Axialabhängigkeit des Void-Effektes in SNEAK-3A-1, wie sie sich aus den Meßschritten 1a - 1d ergibt, d.h. bei CH_2 -Entnahme aus den zentralen 21 Elementen (Radius der zylindrisierten Zone $r_1 = 14.07 \text{ cm}$). Kurve 1 gibt die Reaktivitätsabnahme in β bei CH_2 -Entnahme über die jeweilige Höhe der zentralen Void-Zone (vergl. Fig. 1). In Kurve 2 ist die entsprechende Reaktivitätsabnahme pro Gramm CH_2 dargestellt.

Die Extrapolation der Kurve 2b auf die Höhe 0 stimmt sehr gut mit dem Wert überein, der bei einer Materialwertmessung mit einer sehr kleinen CH_2 -Probe im Zentrum gemessen wurde /1/.

Fig. 4 zeigt die Radialabhängigkeit des Void-Effektes, die aus den Schritten 1, 2a, 2b, 4a und 4b ermittelt wurde. Die Meßpunkte aus dem Sektorexperiment sind durch die Extrapolation mit einer relativ großen Unsicherheit behaftet (s. Abschnitt 5).

Die Meßwerte in Tab. 1 sind auf $\% \frac{\Delta k}{k}$ umgerechnet. Für die Umrechnung wurde der Wert $\beta_{\text{eff}} = 0.708\%$ benutzt.

Ein Vergleich der Meßwerte der Schritte 3 und 4 zeigt, daß die Reaktivitätsabnahme bei Entnahme des CH_2 aus dem 2. Teilsektor im Mittel um 6% geringer war als beim 1. Teilsektor.

Der Schritt 5 bedeutet CH_2 -Entnahme aus dem gesamten Core, der experimentelle Wert wurde durch Extrapolation nach Gleichung (2b) gewonnen.

2.2 Rechnungen für das Void-Experiment in SNEAK-3A-1

Die Schritte 1 und 2 wurden mit einem ein-dimensionalen Diffusionsprogramm in Platten- bzw. Zylindergeometrie berechnet. In der jeweils abseparierten Richtung wurden **mischungsabhängige** Bucklings verwendet. Diese Bucklings wurden aus den extrapolierten Coredimensionen der Anordnung SNEAK-3A-1 berechnet, d.h. aus den gemessenen Coredimensionen zuzüglich der radialen bzw. axialen Reflektorsavings, die durch Extrapolation gemessener U235-Spaltratentraversen bestimmt wurden /1/.

Die experimentellen Reflektorsavings stimmen gut mit berechneten Werten überein.

Folgende Werte wurden verwendet:

Extrapolierter Radius : $R_{ex} = 66.70 \text{ cm}$

Extrapolierte Höhe : $H_{ex} = 111.80 \text{ cm}$

Radiales Buckling : $B_r^2 = \left(\frac{2.405}{R_{ex}}\right)^2 = 1.3 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-2}$

Axiales Buckling : $B_{ax}^2 = \left(\frac{\pi}{H_{ex}}\right)^2 = 7.9 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$.

Die Rechnungen wurden mit dem 26 Gruppen SNEAK-Satz /3/ durchgeführt, für Vergleichsrechnungen wurden der 26 Gruppen ABN-Satz /4/ und ein verbesserter SNEAK-Satz mit modifizierten Absorptionsquerschnitten für U238 und Spaltquerschnitten für U235, SNEAK-PMB /5/ verwendet. Falls im folgenden nicht anders vermerkt, wurden die Rechnungen jeweils mit dem SNEAK-Satz durchgeführt.

Für Schritt 1 wurde mit radialen Diffusionsrechnungen in Zylindergeometrie die Reaktivitätsänderung beim "Entleeren", d.h. bei CH_2 -Entnahme aus einer radialen Zone mit einem Zylinderradius von 14.07 cm im radial reflektierten Reaktor, $(\Delta k/k)_{r=14.07 \text{ cm}}$, und die Reaktivitätsänderung beim totalen Entleeren eines unreflektierten Cores, $(\Delta k/k)_{r=R_{ex}}$, berechnet. Das Verhältnis

$$(3a) C_1 = \frac{(\Delta k/k)_{r=14.07 \text{ cm}}}{(\Delta k/k)_{r=R_{ex}=66.7 \text{ cm}}}$$

wurde als Korrekturfaktor für die Ergebnisse der axialen Rechnungen für die Schritte 1a bis 1d genommen.

Zur Interpretation der Schritte 2 und 5 wurden zwei radiale k_{eff} -Rechnungen durchgeführt, bei denen das Polyäthylen bis zu einem Radius von $\bar{r}=20.59$ cm (Schritt 2) bzw. $\bar{r}=51.34$ cm (Schritt 5) entfernt wurde. Wie im Schritt 1 wurde ein Korrekturfaktor berechnet, um zu berücksichtigen, daß das Polyäthylen nur im Core, nicht jedoch im axialen Blanket, entfernt wurde. (Bei den unkorrigierten Radialrechnungen wird angenommen, daß sich die entleerte Zone axial bis zur extrapolierten Höhe erstreckt.) Dieser Korrekturfaktor wurde axial in Plattengeometrie berechnet und besteht aus dem Verhältnis zwischen der Reaktivitätsänderung beim totalen Entleeren des Cores und der Reaktivitätsänderung beim totalen Entleeren eines unreflektierten Reaktors:

$$(3b) C_2 = \frac{(\Delta k/k)_{h=h_c} = 80.6 \text{ cm}}{(\Delta k/k)_{h=h_{\text{ex}}} = 111.8 \text{ cm}} .$$

Für die Schritte 3 und 4 wurden zwei-dimensionale Rechnungen in r - η^2 -Geometrie mit dem gleichen axialen Buckling wie im Schritt 1 durchgeführt. Es wurden 4 Fälle gerechnet (s. Fig. 5):

- a) die CH_2 -freie Zone erstreckt sich über 45 zentrale Elemente ($\bar{r}=20.59$ cm)
- b) die CH_2 -freie Zone erstreckt sich über 45 zentrale Elemente und einen 1/16-Coresektor
- c) die CH_2 -freie Zone erstreckt sich über 45 zentrale Elemente und einen 1/8-Coresektor
- d) totale Entleerung.

Um den Einfluß des Wichtungsspektrums und der Gruppeneinteilung zu untersuchen, wurden diese Rechnungen mit drei unterschiedlich kondensierten Querschnittssätzen durchgeführt:

- 1) Einheitliches Wichtungsspektrum von null-dimensionalen Rechnungen ohne Unterscheidung zwischen Corezonen mit und ohne CH_2 . 10-Gruppenenergieeinteilung gemäß Tabelle 2.
- 2) Getrennte Wichtungsspektren von ein-dimensionaler Rechnung für die Corezonen mit bzw. ohne CH_2 und für das Blanket. Gleiche 10-Gruppeneinteilung wie in 1).

- 3) Gleiche Wichtungsspektren wie in 2) aber mit einer verbesserten 11-Gruppenverteilung (Tabelle 2), die die Bedeutung der Gruppen mit starker Moderation besonders berücksichtigt.

Die Ergebnisse dieser Rechnungen sind in Tabelle 3 zusammen mit den Meßwerten angegeben. Man sieht, daß Gruppeneinteilung und Wichtungsspektrum einen erheblichen Einfluß auf die Ergebnisse haben. Nur der 3. Querschnittssatz gibt die Meßwerte in ihrer Tendenz, Reaktivitätsabnahme beim 2. Teilsektor kleiner als beim 1. Teilsektor, richtig wieder. Eine auswärts durchgeführte Testrechnung mit 26 Gruppen ergab gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen des 3. Querschnittssatzes.

Alle Rechnungen wurden zunächst homogen durchgeführt. Die Ergebnisse wurden anschließend für die heterogene Corestruktur korrigiert. Die Berechnung von Heterogenitätskorrekturen ist notwendig, da der Heterogenitätseinfluß auf die Reaktivität in den Zellen mit Polyäthylen größer ist als in den Zellen ohne CH_2 . Die Differenz der Korrekturen beeinflusst die Void-Effekte.

Die Berechnung der Korrekturen erfolgte über Störungsrechnungen, wobei der "ungestörte" Reaktor mit Wirkungsquerschnitten für die homogenisierten Zellen berechnet wurde. Als Störquerschnitte wurden "heterogenitätskorrigierte" Wirkungsquerschnitte benutzt, die das Zellprogramm ZERA /6/ lieferte. Die korrigierten Querschnitte berücksichtigen den Einfluß der räumlichen Feinstruktur des Neutronenflusses auf die Reaktionsraten. Darüberhinaus berücksichtigen sie Änderungen in den Gruppen-Diffusionskonstanten, die auf unterschiedliche Transportquerschnitte in den verschiedenen Platten der Grundzelle zurückzuführen sind. Die Anisotropie der Diffusionseigenschaften wurde in einer Näherung für enge Plattenzellen behandelt, die in /6/ beschrieben ist.

Die Heterogenitätskorrekturen für die Teilschritte der Void-Experimente liegen zwischen 4% und 7% (s. Tab. 4), beim Flutungsexperiment in SNEAK-3A-2 zwischen 5% und 9%.

Die gemessenen und heterogenitätskorrigierten, mit dem SNEAK-Satz berechneten Reaktivitätsänderungen beim Void-Experiment in SNEAK-3A-1 sind in Tab. 1 gegenübergestellt, die Ortsabhängigkeit ist in Fig. 3 und 4 verglichen.

Es zeigt sich, daß der SNEAK-Satz die Reaktivitätsabnahme bei Dampfverlust im Mittel um 12% unterschätzt: Der zentrale Wert von CH_2 wird um 15% zu klein gerechnet, im mittleren Corebereich liegen die Abweichungen bei 10 bis 12% und werden zum Corerand hin wieder größer. Hier liegen offenbar methodische Abweichungen vor, die sich auch in anderen Meßresultaten an SNEAK-3A widerspiegeln: der tatsächliche Flußabfall zum radialen Blanket ist etwas flacher als der gerechnete.

Homogene Vergleichsrechnungen mit anderen Multigruppensätzen wurden für den Schritt 5, CH_2 -Entnahme aus dem gesamten Core, ausgeführt. Sie ergaben nach einheitlicher Anwendung der Heterogenitätskorrektur aus Tab. 4:

der SNEAK-Satz		unterschätzt die Reaktivitätsabnahme um	12%
" SNEAK-PMB-Satz	"	" "	" "
" ABN-Satz	"	" "	" 2%
" KFK-26/10-Satz	"	" "	" 31%
	/7/		" 23%

Die Korrektur der Kerndaten von U238 und U235 nach den Empfehlungen von Pönitz, Menlove und Beckurts (SNEAK-PMB-Satz) ergibt eine wesentliche Verbesserung in der Berechnung der Void-Effekte. Messung und Rechnung stimmen hier innerhalb der Meßgenauigkeit überein.

3. Flutungs- und Void-Experimente in SNEAK-3A-2

Ausgehend von der Grundanordnung SNEAK-3A-2 /2/ wurden 2 Experimente durchgeführt: ein größeres Flutungsexperiment und ein Void-Experiment, das auf die zentralen 9 Elemente beschränkt blieb.

3.1 Durchführung der Flutungs- und Void-Experimente in SNEAK-3A-2

Die Schritte des Flutungsexperimentes sind in Fig. 6 dargestellt. In den Schritten 1a bis 1d wurde die Dicke der Polyäthylenfolien in den 9 zentralen Elementen nacheinander in den mittleren 16, 32, 48 und 64 Einheitszellen verdoppelt. In den Schritten 2a bis 2e wurde die

"Flutzzone" von 9 auf 37 zentrale Elemente erweitert. Die Schritte 3a bis 3d dienen, zusammen mit den Schritten 1, 2a und 2d, zur Messung der Radialabhängigkeit des Fluteffektes. Sie treten an die Stelle des Sektorexperimentes in SNEAK-3A-1.

Während des Flutens stieg die Reaktivität des Reaktors an. Dieser Anstieg wurde durch Coreelemententladungen kompensiert (s. Fig. 6). Nach dem Umladungen wurden die benutzten Trimmstäbe und der Regelstab jeweils neu geeicht (s. Abschnitt 5.).

Die Ergebnisse des Flutungsexperimentes sind in Tab. 5 und in den Fig. 7 und 8 dargestellt und mit Rechnungen verglichen.

Die Unterteilung der Schritte 2a und 2b sowie 2d und 2e wurde vorgenommen, um zu prüfen, ob die Reaktivitätsänderung beim Fluten von 3 Elementen repräsentativ für das Fluten einer Zylinderschale bei diesem Radius ist. Die Meßwerte

Schritt 2a : 0.151 μ /g CH ₂	und 2d : 0.135 μ /g CH ₂
2b : 0.152 "	2e : 0.133 "

zeigen, daß diese Annahme zumindest im Coreinnern gut erfüllt ist. Damit wird durch Integration über den gemessenen Radialverlauf $f(r)$ des CH₂-wertes eine Extrapolation auf den gesamten Coreflutungseffekt möglich:

$$(4) \quad \frac{1}{k\beta} \Delta k_{F,Core} = A \cdot 2\pi \int_0^{r_c} f(r) \cdot r \, dr$$

mit $f(r)$ in μ /g CH₂. A ist die CH₂-Menge je cm² Corequerschnitt, die beim Fluten zugefügt wird. Mit $A = 1.73 \text{ g/cm}^2$, einem Coreradius $r_c = 41.8 \text{ cm}$ und $\beta = 0.708\%$ wird

$$\Delta k_{F,Core} \approx +5.9\% .$$

Beim Void-Experiment wurde das CH₂ in Teilschritten aus den zentralen 9 Elementen entfernt. Dieses Experiment sollte das Void-Experiment in SNEAK-3A-1 und die kritischen Experimente an den Anordnungen 3A-1 und 3A-2 ergänzen. Außerdem wurde der Einfluß des

Axialblankets auf den Void-Effekt untersucht, indem die zentralen 16 Zellen ($h_c/4$) und alle 64 Zellen (h_c) einmal mit dem normalen SNEAK-Blanket aus abgereichertem Uranmetall ($h_b = 30.5$ cm oben und unten) und einmal mit einem sog. Brüterblanket entleert wurden. Das Brüterblanket besteht je SNEAK-Element aus einem Bündel von 4×4 37 cm langen zylindrischen Stäben aus abgereichertem UO_2 mit Stahlhülle. Der Raum zwischen den Stäben war mit CH_2 (Polyäthylenschaum) von etwa SNEAK-3A-2 Dichte ausgefüllt (Fig. 2). Das Brüterblanket war in den 21 zentralen Elementen oberhalb und unterhalb des Corebereichs eingesetzt.

Fig. 9 zeigt den Coreaufbau der Anordnung SNEAK-3A-2 beim Void-Experiment und die Elementbeladungen in der zentralen Zone bei den verschiedenen Teilschritten. Tab. 6 gibt die Kernzahldichten im Brüterblanket mit und ohne Polyäthylen, Tab. 7 die Meßergebnisse des Void-Experimentes.

Die Meßwerte zeigen, daß der Einfluß des axialen Blankets bei SNEAK-3A-2 auf den Void-Effekt gering ist: die zentrale Void-Reaktivität wird durch den Übergang von dichtem SNEAK-Blanket zum Brüterblanket nicht geändert, die über die Corehöhe gemittelte Void-Reaktivität ist beim Brüterblanket nur um 1.5% größer als beim SNEAK-Blanket. Die Reaktivitätsänderung beim Entleeren des axialen Brüterblankets ist sehr klein und positiv. Die über Core und Axialblanket summierte Reaktivitätsänderung ist praktisch gleich der bei Coreentleerung mit SNEAK-Blanket.

3.2 Rechnungen für die Flutungs- und Void-Experimente in SNEAK-3A-2

Die Rechnungen für die Schritte 1 und 2 des Flutungsexperimentes wurden wieder mit einem eindimensionalen Diffusionsprogramm in Platten- bzw. Zylindergeometrie durchgeführt. Im Gegensatz zu den Rechnungen für SNEAK-3A-1 wurden energie- und mischungsabhängige Bucklings für die jeweils abseparierte Richtung verwendet. Diese Bucklings wurden aus Rechnungen mit dem TDS-Code für die jeweilige Corezusammensetzung gewonnen. Der TDS-Code ist Teil des NUSYS-Programmsystems und ermöglicht die iterative Lösung zweidimensionaler Probleme durch eindimensionale Diffusionsrechnungen. Er stand für die Rechnungen für SNEAK-3A-1 noch nicht zur Verfügung. Zum Vergleich der Rechenmethoden wurde eine nachträgliche Testrechnung mit dem SNEAK-Satz durchgeführt. Sie ergab,

daß die Reaktivitätsänderung beim Entleeren des gesamten SNEAK-3A-1 Cores mit dem TDS-Code um 3% niedriger gerechnet wird als mit einer eindimensionalen Rechnung unter Verwendung experimentell bestimmter universeller Bucklings.

Die Schritte (2a+2b) sowie (2c+2d+2e) wurden für die Rechnung zusammengefaßt.

Die axiale Abhängigkeit des Fluteffektes (Schritt 1) wurde auf zwei Arten gerechnet:

Die erste (Methode 1) besteht aus zwei radialen Diffusionsrechnungen in Zylindergeometrie zur Bestimmung der Reaktivitätsänderung beim Fluten der 9 zentralen Elemente über die ganze Höhe h_c (Schritt 1d) und aus einer axialen Rechnung in Plattengeometrie für ein ungeflutetes Core. Diese diente als Grundlage für eine Reihe von Störungsrechnungen zur Bestimmung des Fluteffektes längs der Achse in 16, 32, 48 oder 64 zentralen Zellen, die den Schritten 1a, 1b, 1c, 1d entsprechen. Die Störungsrechnungen wurden an die Ergebnisse der Diffusionsrechnungen für den Schritt 1d angepaßt. Auf diese Weise wird das radiale Gewicht der zentralen 9-Element-Zone besser erfaßt, als wenn man sich nur auf Störungsrechnungen stützen würde.

Die zweite Methode lehnt sich an Rechnungen zur Auswertung von Na-void-Experimenten am ZPR VI an /8/. Sie besteht aus einer Reihe von axialen k_{eff} -Rechnungen für die Fluteffekte, bei denen die radialen Ausflußverluste der Gruppe i durch eine beim Fluten zunächst nicht veränderte Leakage-Korrektur an den Removalquerschnitten $\sum_{rem,i}$ nach der Gleichung

$$(5) \quad \sum_{rem,i}^{korr} = \sum_{rem,i} + D_i B_i^2 \text{ rad}$$

berücksichtigt wurden. Die so gerechneten Δk_{eff} -Werte wurden mit dem radialen Gewichtungsfaktor der zentralen gefluteten Zone multipliziert. Sie enthalten noch nicht den Beitrag der radialen Leakageänderungen. Dieser Beitrag wurde für jeden Höhenschritt gesondert aus Störungsrechnungen für das ungeflutete Core bestimmt. Aus diesen Störungsrechnungen stammt auch der radiale Gewichtungsfaktor der gefluteten Zone.

Nach jedem größeren Flutungsschritt wurden mehrere Coreelemente am Rand ausgeladen und durch Blanketelemente ersetzt (Fig. 6). Dies wurde bei den Rechnungen für die radiale Abhängigkeit insofern be-

rücksichtigt, als bei jedem Schritt als Coreradius der Mittelwert zwischen dem Radius vor und nach dem Fluten verwendet wurde. Der Coreradius bei Schritt (2a+2b) entspricht einem Core mit 202 Elementen, der bei Schritt (2c+2d+2e) einem Core mit 194 Elementen.

Die Rechnungen für Schritt 3 wurden zweidimensional in x-y-Geometrie mit gruppenunabhängigen axialen Bucklings gerechnet. Die Wirkungsquerschnitte für die homogenisierten Mischungen wurden wieder mit Hilfe der 26-Gruppen-Spektren, die aus den radialen Rechnungen in Zylindergeometrie vorlagen, zu 11 Gruppen kondensiert (s. Tab. 2). Bei der zweidimensionalen 11-Gruppenrechnung standen genügend Ortspunkte zur Verfügung, um bei der geometrischen Anordnung jedes einzelne Element zu beschreiben.

Alle Rechnungen wurden zuerst mit Wirkungsquerschnitten für die homogenisierte Corezone durchgeführt. Danach wurden mit Hilfe des Störungsprogramms wieder die Heterogenitätskorrekturen bestimmt. Tab. 5 gibt die heterogenitätskorrigierten Werte, die Größe der Korrekturen ist aus Tab. 4 zu entnehmen. Diese Tabelle zeigt die Korrekturen für die unterschiedlich heterogene Flußstruktur im Grundcore SNEAK-3A-2 und im gefluteten Fall. Die Korrekturen sind positiv und im Zentrum relativ am größten (8.5% des Gesamtwertes der berechneten Reaktivitätsänderung) und sinken wegen der negativen Beiträge des Diffusionseffektes nach außen ab (5% im Teilschritt 3).

Der Schritt 4 in Tab. 5 bedeutet die Flutung des restlichen Corebereiches.

Aus Tab. 5 und den Fig. 7 und 8 sieht man, daß die Rechnungen mit dem SNEAK-Satz die Meßwerte um 19 bis 24% unterschätzen. Obwohl der SNEAK-Satz mit dem 3A-2 Spektrum gewichtet ist, sind die Abweichungen hier also größer als im Bereich der 3A-1 Dichte. Auch der k_{eff} -Wert der Anordnung 3A-2 weicht stärker von 1 ab als bei 3A-1 /2/. Andere Messungen an SNEAK-3A deuten darauf hin, daß die Kerndaten von U238 und U235 fehlerhaft sind. Ein Teil der Fehler liegt im unteren Energiebereich und macht sich bei höherer Wasserstoffkonzentration stärker bemerkbar.

Die Vergleichsrechnungen, die wieder homogen durchgeführt und dann mit der Heterogenitätskorrektur nach Tab. 4 versehen wurden, zeigen folgende mittlere Abweichung beim Fluten von SNEAK-3A-2:

Der SNEAK-Satz unterschätzt die Reaktivitätszunahme um	22%
" SNEAK-PMB-Satz " " " " "	20%
" ABN-Satz " " " " "	30%.

Die Korrektur der U235- und U238-Kerndaten im SNEAK-PMB-Satz bringt hier keine wesentliche Verbesserung. Der ABN-Satz, der mit einem 1/E-Spektrum gewichtet ist, zeigt etwa die gleiche Abweichung wie beim Void-Experiment in SNEAK-3A-1.

Die axiale Abhängigkeit (Schritte 1a-1d) wird durch die Störungsrechnung besser beschrieben als mit der 2. Methode. Dies liegt wohl daran, daß der radiale Gewichtungsfaktor bei der 2. Methode mit der Störungsrechnung nicht richtig berechnet wird. Die Stärke dieser 2. Methode, die in der gesonderten Behandlung der radialen Leckageänderungen bei jedem Höhenschritt besteht, kommt bei der kleinen radialen Ausdehnung der zentralen Zone ($\bar{r} = 9.2$ cm) dagegen nicht zum Tragen.

Die Rechnungen für das Void-Experiment in SNEAK-3A-2 wurde für den Corebereich eindimensional, für die Blanketentleerung zweidimensional in Diffusionstheorie durchgeführt. Die Axialabhängigkeit des Void-Effektes wurde mit Störungstheorie gerechnet. Die Rechnung der Reaktivitätsänderung beim Entleeren der 9 zentralen Elemente über die inneren 16 Zellen wurde in Kugelgeometrie wiederholt, wobei ein äquivalenter Volumenanteil der kritischen Kugel entleert wurde. Die Werte stimmen innerhalb von 2% überein.

Die Entleerung des axialen Blankets der 9 zentralen Elemente in einer Umgebung von Elementen mit Brüterblanket wurde zweidimensional in r-z Geometrie mit 11 Energiegruppen gerechnet. Die Rechnung wurde mit eindimensionalen 26-Gruppenrechnungen in Zylindergeometrie wiederholt, bei denen zonen- und energieabhängige axiale Bucklings verwendet wurden, die aus der Anpassung der axialen Gruppenflüsse an eine Cosinus-Verteilung gewonnen wurden. Der Unterschied zwischen den Ergebnissen beider Methoden beträgt etwa 10% (s. Tab. 7).

Aus Tab. 7 ist ersichtlich, daß die Reaktivitätsabnahme beim Entleeren der zentralen Core-Zone von SNEAK-3A-2 mit dem SNEAK-Satz um etwa 17% unterschätzt wird, beim Axialblanket ist die Abweichung etwas größer.

4. Die Abhängigkeit der Reaktivität von der Dampfdichte für den Reaktor SNEAK-3A-2

Aus den Messungen an SNEAK-3A-1 und 3A-2 kann durch Umrechnung der Reaktivitätsverlauf mit der Dampfdichte für das Core 3A-2 ermittelt werden. Für die experimentellen kritischen Dimensionen von 3A-2 wurden homogene Rechnungen in Zylindergeometrie mit den 3 Datensätzen SNEAK, SNEAK-PMP und ABN für verschiedene Dampfdichten durchgeführt^{*)}. Die mit dem SNEAK- und SNEAK-PMB-Satz gerechneten Reaktoren 3A-2 sind um mehr als 1% unterkritisch, der mit dem ABN-Satz gerechnete um etwa 1% überkritisch /2/. Alle Werte wurden dann bei der Wasserstoffkonzentration der Anordnung SNEAK-3A-2 (sie entspricht einer Dampfdichte von 0.0757 g/cm^3 in 35% des Corevolumens) auf $k_{\text{eff}}=1$ normiert. Diese Werte sind als Kurven in Fig. 10 zusammen mit einer experimentellen Kurve dargestellt, die ebenfalls auf den Wert $k_{\text{eff}}=1$ für die 3A-2 Dichte normiert ist. Die anderen Punkte der experimentellen Kurve wurden wie folgt ermittelt:

$$k_{\text{eff},3} \text{ (doppelte Dampfdichte)} = 1.000 + \frac{\Delta k_{2,3} \text{ (SNEAK-Satz, normiert)}}{0.78} = 1.048$$

$$k_{\text{eff},0} \text{ (Dampfdichte Null)} = 1.000 + \frac{\Delta k_{2,0} \text{ (SNEAK-Satz, normiert)}}{0.83} = 0.929$$

D.h. die mit dem SNEAK-Satz berechneten Reaktivitätsänderungen, normiert auf $k_{\text{eff}}=1$ für 3A-2, wurden jeweils mit den aus den Messungen gefundenen mittleren Verhältnissen Messung/Rechnung korrigiert.

Der k_{eff} -Wert für die Dampfdichte der Anordnung 3A-1, $k_{\text{eff},1}$, kann ebenfalls aus $\Delta k_{2,1}$ (SNEAK-Satz, normiert) ermittelt werden. Die experimentelle Korrektur ergibt sich aus den beiden kritischen Experimenten für 3A-1 und 3A-2: die heterogenitätskorrigierten k_{eff} -Werte für die kritischen Coregeometrien mit dem SNEAK-Satz sind

$$k_{\text{eff}}(3A-1) = 0.995$$

$$k_{\text{eff}}(3A-2) = 0.989$$

^{*)} Die homogenen Rechnungen wurden mit folgenden einheitlichen Heterogenitätskorrekturen $(\Delta k/k)_{\text{het}}$ versehen:

3A-0 : 0.09%	3A-2 : 0.39%
3A-1 : 0.25%	3A-3 : 0.71%

Der Reaktivitätsanstieg von 3A-1 auf 3A-2 wird mit dem SNEAK-Satz also um 0.7% unterschätzt. Damit wird

$$k_{\text{eff},1}(\text{3A-1 Dampfdichte}) = k_{\text{eff},1}(\text{SNEAK-Satz, normiert}) - 0.007 = 0.961$$

Mit diesem Wert folgt aus dem Void-Experiment ein weiterer Wert für $k_{\text{eff},0}$:

$$k_{\text{eff},0}(\text{Dampfdichte Null}) = k_{\text{eff},1} \frac{k_{1,0}(\text{SNEAK-Satz, normiert})}{0.88} = 0.930$$

in guter Übereinstimmung mit dem Wert aus dem Void-Experiment in 3A-2 (0.929).

Am Arbeitspunkt (SNEAK-3A-2) ergeben sich aus Störungsrechnungen bzw. aus Fig. 10 folgende Dampfdichtekoeffizienten der Reaktivität (% Reaktivitätsänderung pro % Dampfdichteänderung):

SNEAK	$\frac{\Delta k/k}{\Delta \rho/\rho} = 0.047$
SNEAK-PMB	" = 0.051
ABN	" = 0.040
EXPERIMENT	" = 0.053

Der Dampfdichtekoeffizient ist positiv. Er wird mit allen Querschnittsätzen in seiner Größe unterschätzt. Der SNEAK-PMB-Satz und auch noch der SNEAK-Satz liefern Werte, die für eine Sicherheitsanalyse genügend genau sind, der ABN-Satz gibt jedoch einen um etwa 25% zu kleinen Wert.

5. Fehlerbetrachtungen

Bei den Meßfehlern sind 2 Arten zu unterscheiden:

1. Fehler aus:

Temperaturschwankungen,

begrenzter Reproduzierbarkeit beim Ausladen, Umfüllen und Wiedereinhängen von Core-Elementen,

begrenzter Reproduzierbarkeit der Stabstellungen,

Veränderungen im Wert der Trimmstäbe und des Regelstabes durch die Umladungen, und

Schwankungen im Gewicht der Polyäthylenfolien.

2. Fehler durch ungenügende Berücksichtigung von ortsabhängigen Effekten bei den Trimmstabeichungen und aus der Umrechnung von den gemessenen Reaktivitätswerten in β auf relative Änderungen des Multiplikationsfaktors, $\Delta k/k$.

Die Fehler der ersten Art konnten relativ klein gehalten werden:

Die Coretemperatur wurde an 3 Positionen gemessen und laufend registriert. Die Schwankungen zwischen 2 Reaktivitätsmessungen betragen max. 0.6°C . Die Reaktivitätswerte wurden mit dem experimentell bestimmten Temperaturkoeffizienten der Anordnung SNEAK-3A-1 von

$$\frac{1}{T} \frac{dk}{dT} = -(0.3 \pm 0.15) \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$$

korrigiert. Die hieraus resultierenden Unsicherheiten in $\frac{\Delta k}{\beta k}$ betragen max. $\pm 0.1 \text{ } \%$.

Die Reproduzierbarkeit beim Ausladen, Umfüllen und Wiedereinhängen von Core-Elementen wurde an SNEAK-1 eingehend gemessen /9/. Sie liegt bei $\pm 0.01 \text{ } \%$ pro Element und hat eine nahezu statistische Verteilung. Bei 21 Elementen ergibt sich damit eine Unsicherheit von nur etwa $\pm 0.05 \text{ } \%$.

Die Positionen der Trimmstäbe und des Regelstabes sind auf $\pm 0.02 \text{ } \%$ reproduzierbar /9/. Bei den meisten Messungen wurde nur der Regelstab verschoben, nur bei größeren Änderungen auch gleichzeitig einer der Trimmstäbe. Der hieraus resultierende Meßfehler bleibt $\leq \pm 0.04 \text{ } \%$.

Der Hauptbeitrag zu den Fehlern der ersten Art kommt aus den Unsicherheiten, die durch Änderungen des Wertes der Trimmstäbe und des Regelstabes während der Umladungen verursacht werden. Der Reaktivitätswert der verwendeten Stäbe ändert sich systematisch mit jeder Änderung der Core-Geometrie bzw. der Flußverteilung. Um die resultierende Unsicherheit an den einzelnen Meßergebnissen möglichst klein zu halten, wurden der Regelstab und die verwendeten Trimmstäbe nach jeder Elementzuladung und nach größeren Void- bzw. Flutungsschritten neu geeicht. Die max. Änderung im Gesamtwert des Regelstabes beim Void-Experiment in SNEAK-3A-1 trat während des Schrittes 2 auf, sie betrug $-0.4 \text{ } \%$. Der Wert von TO14 änderte sich um max. $1 \text{ } \%$ zwischen

2 Eichungen, wobei die Form der Charakteristik sich nicht wesentlich veränderte. Bei den Schritten 2 und 3 wurden jeweils 2 verschiedene Positionen von T016 verwendet. In diesen Fällen wurde T014 für beide Stellungen von T016 geeicht. Beim Flutungsexperiment wurden nach den Schritten 1b; 1d; 2b,1; 2c; 2d und 3e Randelemente entladen, um den Reaktivitätsüberschuß des Reaktors klein zu halten (Fig. 6). Für die Messung der Reaktivitätsänderung wurde vorwiegend der Trimmstab T012 und der Regelstab verwendet. Die Änderung der Eichkurve des Stabes T012 während des Flutungsexperimentes ist in Fig. 11 dargestellt. Dabei bedeuten:

Kurve 1 :	Eichkurve vor Beginn des Flutungsexperimentes	
Kurve 2 :	Eichkurve nach Randkorrektur 1 und Flutungsschritt 1c,1(T14 ein)	
Kurve 3 :	" " " " " "	3 " " 2b,2(T14 ein)
Kurve 4 :	" " " " " "	3 " " 2b,2(T14 aus)
Kurve 5 :	" " " " " "	5 " " 2e (T14 aus)
Kurve 6 :	Eichkurve nach Abschluß des Flutungsexperimentes	(T14 aus)

Durch die regelmäßigen Nacheichungen konnten die relativen Unsicherheiten aus den Änderungen der Stabwerte in den Einzelschritten bei 1 bis 2% gehalten werden.

Die Gewichte der einzelnen Polyäthylenfolien, die bei den Experimenten zugefügt bzw. entnommen wurden, schwanken um ca. $\pm 10\%$. Durch Selektion wurde dafür gesorgt, daß das Gesamtgewicht der 64 Folien eines Elementes nur um wenige Prozent schwankte. Bei den Umladungen wurde jeweils auch das CH_2 -Gewicht bestimmt. Die Tabellen 1, 5 und 7 enthalten Angaben über die gewogenen CH_2 -Mengen. Die Rechnungen gehen dagegen von der mittleren CH_2 -Konzentration aus, so daß beim Vergleich von Einzelwerten ein Fehler aus den nicht übereinstimmenden CH_2 -Mengen auftritt, der in der Größenordnung $\pm 2\%$ liegt.

Wenn man die Fehler durch Temperaturschwankungen, mangelnde Reproduzierbarkeiten und Schwankungen im CH_2 -Gewicht statistisch, die Fehler aus den Trimmstabwerten linear addiert, da hier Abweichungen u.U. stets in die gleiche Richtung gehen können, so ergibt sich ein resultierender relativer Meßfehler von etwa $\pm 3\%$ für die Fehler der Gruppe 1.

Für den extrapolierten Reaktivitätsverlust bei Entleerung des gesamten Cores kann ebenfalls ein relativer Meßfehler von 3% angenommen werden, der sich bei der Hochrechnung auf das größere Volumen ergibt. Hinzu kommt eine prinzipielle Unsicherheit durch die Extrapolationsmethode. Eine Abschätzung über die Größe dieser Unsicherheit ist aus den Ergebnissen des Sektorexperimentes in SNEAK-3A-1 möglich, wenn man für die Extrapolation einmal die Gleichung

$$(2a) \left(\frac{\Delta k}{k}\right)_{L, \text{Core}} \approx \left(\frac{\Delta k}{k}\right)_L (\text{Schritt 2}) + \left(\frac{\Delta k}{k}\right)_{L, \text{Sektor}} \frac{V_{\text{Core-Außenbereich}}}{V_{\text{Sektor}}}$$

und einmal die Gleichung (2b) benutzt. Die beiden Ergebnisse für die Entleerung des gesamten Core unterscheiden sich um 2.2%. Man kann daher erwarten, daß der methodische Fehler durch die Extrapolation <5% ist.

Die Fehler durch ortsabhängige Effekte bei den Stabeichungen lassen sich aus Messungen des Kontrollstabwertes abschätzen, die mit mehreren Meßkammern auf verschiedenen Positionen im Blanketbereich durchgeführt wurden. Die Reaktivitätswerte, die hierbei ermittelt wurden, schwanken für die verwendeten Trimmstäbe um 1% bis 2% /2/.

Die Parameter der verzögerten Neutronen sind so gut bekannt, daß der β_{eff} -Wert der Anordnungen auf $\pm 3\%$ genau sein dürfte.

Damit ergibt sich für die auf $\% \frac{\Delta k}{k}$ umgerechneten Meßwerte eine Unsicherheit von max. $\pm 5\%$.

Die Rechnungen enthalten methodische Fehler und solche durch ungenaue Kerndaten. Die Fehler in den Kerndaten führen u.a. dazu, daß die Reaktoren in der experimentell gefundenen kritischen Geometrie ein k_{eff} haben, daß von 1.000 abweicht. Bei den TDS-Rechnungen wurde der Reaktor jeweils in der experimentellen Geometrie berechnet, was einer Variation von ν entspricht. Dieses Vorgehen erscheint sinnvoller als eine Variation der Bucklings. Solange die Abweichungen im Multiplikationsfaktor klein bleiben, führen beide Varianten zu sehr ähnlichen Ergebnissen: die Reaktivitätsänderung beim Entleeren des Cores SNEAK-3A-1 wurde mit dem TDS-Code um 3% niedriger gerechnet als mit einer

eindimensionalen Rechnung mit experimentellen axialen Bucklings. Eine Testrechnung beim Fluten einer Ringzone in SNEAK-3A-2 (Schritt 2a+b) ergab bei einer Verringerung des axialen Bucklings um 10% eine Abnahme der Flutreaktivität um 3% des ursprünglichen Wertes.

Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich dadurch, daß sich die Reaktorgröße bei den Experimenten änderte, weil alle Messungen im kritischen Zustand durchgeführt wurden. Dieses Problem wurde dadurch gelöst, daß auch die Rechnungen für die jeweils veränderte Geometrie durchgeführt wurden. Bei der Umrechnung auf den Reaktivitätsverlauf als Funktion der Dampfdichte bei fester Geometrie treten dann natürlich gewisse Unsicherheiten auf.

Für den heterogenen Coreaufbau wurden Korrekturen angebracht, die aus Störungsrechnungen mit heterogenitätskorrigierten Wirkungsquerschnitten ermittelt wurden. Alle Rechnungen hierfür wurden mit einer Version des ZERA-Programms durchgeführt, die einen kleinen Fehler enthielt. Die korrigierte Form dieses Programms ergab für Testfälle etwas kleinere Heterogenitätskorrekturen (s. Tab. 4). Die Resultate der Void- und Flutrechnungen werden dadurch jedoch nur geringfügig beeinflusst (ca. $\pm 2\%$), so daß auf eine Wiederholung der umfangreichen Rechnungen verzichtet werden konnte.

Die Berechnung der Ortsabhängigkeit wurde aus Rechenzeitgründen mit unzureichenden Mitteln durchgeführt, so daß insbesondere der Axialverlauf größere methodische Fehler aufweisen kann. Ebenso muß an der Core-Blanket-Grenze mit größeren methodischen Fehlern gerechnet werden, da die speziellen Grenzflächeneffekte mit den verwendeten Rechenmethoden nicht richtig erfaßt werden konnten.

Betrachtet man nur den Reaktivitätseffekt beim Entleeren bzw. Fluten größerer Corezonen bzw. des Gesamtcore, so muß mit methodischen Fehlern von max. $\pm 5\%$ gerechnet werden. Die darüber hinausgehenden Abweichungen sind auf Fehler in den Datensätzen, d.h. vor allem auf Fehler in den mikroskopischen Daten und z.T. auch in den Wichtungsspektren, zurückzuführen.

6. Zusammenfassung

In der Uran-Anordnung SNEAK 3A wurde die Abhängigkeit der Reaktivität von der Wasserstoffkonzentration untersucht. Aus den durchgeführten kritischen Experimenten und den Void- und Flutungsexperimenten wurde der Reaktivitätsverlauf mit der Dampfdichte für den Grundreaktor SNEAK-3A-2 (510 Liter Corevolumen, Wasserstoffkonzentration entsprechend einer Dampfdichte am Arbeitspunkt von 0.0757 g/cm^3 im Kühlmittelvolumen, d.h. in 35% des Core) im Bereich zwischen Null und der doppelten Arbeitspunktdichte bestimmt. Hieraus wurde der Dampfdichte-Reaktivitätskoeffizient $(\frac{\Delta k}{k} / \frac{\Delta \rho}{\rho})$ am Arbeitspunkt ermittelt. Darüberhinaus wurde die Ortsabhängigkeit der Void- und Flutungseffekte gemessen. Alle Meßwerte wurden mit Rechnungen verglichen, die mit dem 26 Gruppen SNEAK-Satz sowie teilweise auch mit dem 26 Gruppen SNEAK-PMB-Satz und dem 26 Gruppen ABN-Satz ausgeführt wurden. Für die Rechnungen wurde Diffusionstheorie benutzt, die Ergebnisse wurden für Heterogenitätseffekte korrigiert. Für die Fälle, in denen die Wasserstoffkonzentration im gesamten Core geändert wurde, wurden auch Transportkorrekturen ermittelt.

Der Vergleich zwischen Rechnung und Messung zeigt, daß die Reaktivitätsänderungen mit allen Datensätzen unterschätzt werden. Die Diskrepanzen wachsen mit zunehmender Dampfdichte. Diese Tendenz läßt sich auch in der zunehmenden Unterschätzung von k_{eff} durch den SNEAK- und SNEAK-PMB-Satz in der Reihe 3A-0, 3A-1, 3A-2, 3A-3 erkennen.

Im Bereich zwischen Dampfdichte Null und Arbeitspunktdichte wird der relative Reaktivitätsverlauf mit dem SNEAK-PMB-Satz innerhalb der Fehlergrenzen ($\pm 5\%$) richtig berechnet, während die Reaktivitätsabnahme bei Dampfverlust mit dem SNEAK-Satz um 15%, mit dem ABN-Satz um 35% - bezogen auf den Meßwert - unterschätzt wird. Im Bereich zwischen einfacher und doppelter Dampfdichte am Arbeitspunkt treten auch beim SNEAK-PMB-Satz größere Abweichungen auf: die Reaktivitätszunahme wird um 20% unterschätzt, mit dem SNEAK-Satz um 23% und mit dem ABN-Satz um 30%. Dies zeigt, daß Multigruppenrechnungen mit den verfügbaren Datensätzen Systeme mit weicherem Neutronenspektrum nicht gut beschreiben.

Eine bessere Berücksichtigung des Wichtungsspektrums bei der Berechnung von Gruppenquerschnitten, wie sie beim Übergang vom ABN- und KFK-Satz zum SNEAK- und SNEAK-PMB-Satz geschieht, verringert zwar die Diskrepanzen, jedoch nicht entscheidend. Dasselbe gilt für die Berücksichtigung von Heterogenitätseffekten. Die aufgeführten Tendenzen bleiben auch dann deutlich erkennbar, wenn man Ungenauigkeiten der benutzten Geometriemodelle und Transportmethoden in Betracht zieht. Beispielsweise ergibt sich der Reaktivitätseffekt beim Entfernen des CH_2 aus der zentralen Zone 1a in 3A-2 in Kugelgeometrie ganz ähnlich wie in Zylindergeometrie. Ferner sind die Unterschiede zwischen Diffusionsrechnungen und Störungsrechnungen gewöhnlich kleiner als die Unterschiede zwischen Experiment und Rechnung, so daß keine entscheidenden Verbesserungen durch Verwendung besserer Transportnäherungen zu erwarten sind. Unvollkommene Geometriemodelle und Transportnäherungen können dagegen für das Wachsen der Diskrepanzen mit zunehmender Entfernung vom Corezentrum verantwortlich sein.

Die Unterschätzung der Wasserstoffwirkung ist konsistent mit einer Unterschätzung des niederenergetischen Teils des Neutronenspektrums, die durch Lebensdauermessungen angedeutet wird, und mit einem stärkeren Importance-Anstieg im unteren keV-Bereich, wie er sich bei Adjungiertenmessungen mit Neutronenquellen ergab /2/. Diese beiden Effekte würden den Importance-Gewinn bei Streuprozessen an Wasserstoff stärker hervorheben.

Obwohl die Einführung der PMB-Daten in den SNEAK-Satz die Wasserstoffwirkung in 3A-1 gut beschreibt, bringt sie keine wesentlichen Verbesserungen in der Anordnung 3A-2, die ein deutlich weiches Spektrum hat. Hierin liegt ein Hinweis, daß Korrekturen der Kerndaten im keV- und 100 eV-Gebiet erforderlich sind.

Die Ortsabhängigkeit der Void- und Flutungseffekte kann in ihrem qualitativen Verlauf relativ gut vorausgesagt werden. Bei einfacher Geometrie erweisen sich eindimensionale 26 Gruppenrechnungen mit geeigneten Querbucklings als brauchbar, für kompliziertere Geometrien zweidimensionale Rechnungen mit 11 Gruppensätzen, die für jede Materialmischung mit getrennten Wichtungsspektren aus 26 Gruppenrechnungen kondensiert werden. Lokale Void-Effekte werden am besten mit Störungsrechnungen behandelt.

Der Void-Effekt im Gesamtcore 3A-1 und der Flutungseffekt in 3A-2 wurden experimentell mit 2 verschiedenen Methoden ermittelt: in 3A-1 wurde ein Sektorexperiment mit 2 Teilschritten gewählt, in 3A-2 wurde die Radialabhängigkeit beim Fluten bestimmt. Beide Methoden erwiesen sich als geeignet für die Extrapolation auf den gesamten Void- bzw. Flutungseffekt.

Für SNEAK-3A-2 ergaben sich folgende Daten:

	Experiment	SNEAK- PMB	SNEAK	ABN	
$(\frac{\Delta k}{k})_L, \%$	-7.0	-6.7	-5.9	-4.6	Reaktivitätsänderung bei Dampfverlust
$\frac{\Delta k}{k} : \frac{\Delta \rho}{\rho}$	0.053	0.051	0.047	0.040	Reaktivitätskoeffizient der Dampfdichte
$(\frac{\Delta k}{k})_V, \%$	+4.8	+3.9	+3.7	+3.4	Reaktivitätszunahme bei Verdopplung der Dampfdichte
$\frac{\Delta k}{k} : \Delta m, \%/kg$	+1.7		+1.4		Zentraler CH ₂ -Wert

Die zahlreichen Umladungen und die kritischen Experimente wurden von der SNEAK-Betriebsgruppe durchgeführt, deren Mitgliedern wir für ihre Unterstützung und für die große Sorgfalt bei den Messungen danken möchten. Den Herren Dr. F.W.A. Habermann und Dipl.-Ing. H. Walze danken wir für die zahlreichen Eichungen der Kontrollstäbe, den Herren Dipl.-Phys. E.A. Fischer, Dr. F. Helm und Dr. R. Schröder für anregende Diskussionen und Hinweise.

Literatur

- /1/ BARLEON, L., et al.: "Physics Investigations of a 670 l Steam Cooled Fast Reactor System in SNEAK, Assembly 3A-1"
Bericht KFK-627
IAEA-Symposium on Fast Reactor Physics and Related Safety Problems, Karlsruhe, 30. Okt. - 3. Nov. 1967
- /2/ SCHRÖDER, R., et al.: "Physics Investigations of Uranium Fueled Fast Steam Cooled Reactors in SNEAK Assemblies 3A-0, 3A-2, and 3A-3"
in Vorbereitung als KFK-Bericht
- /3/ BACHMANN, H., et al.: "The Group Cross Section Set KFK-SNEAK. Preparation and Results"
Bericht KFK- 628
IAEA-Symposium on Fast Reactor Physics and Related Safety Problems, Karlsruhe, 30. Okt. - 3. Nov. 1967
- /4/ ABAGJAN, L.P., et al.: "Gruppenkonstanten schneller und intermediärer Neutronen für die Berechnung von Kernreaktoren"
Bericht KFK-tr-144 (Übersetzung aus dem Russischen)
-
- /5/ PÖNITZ, W.P., et al.: "Some New Measurements and Renormalizations of Neutron Capture Cross Section Data in the keV Energy Range"
Bericht KFK-635
IAEA-Symposium on Fast Reactor Physics and Related Safety Problems, Karlsruhe, 30. Okt. - 3. Nov. 1967
- /6/ WINTZER, D. : "Zur Berechnung von Heterogenitätseffekten in periodischen Zellstrukturen thermischer und schneller Reaktoren"
Bericht KFK-743 (im Druck)
- /7/ KÜSTERS, H., and METZENROTH, K. : "The Influence of Some Important Group Constants on Integral Fast Reactor Quantities"
Bericht ANL-7120, (1965), 423
- /8/ HELM, F.H., and TRAVELLI, A. : "Calculations of Sodium-Void Coefficients in Large Fast Neutron Carbide Cores, Assemblies No. 2 and 3 of ZPR-6"
Bericht ANL-7210, (1966), 116
- /9/ BICKEL, W., ENGELMANN P., WALZE, H., WITTEK, G.
"Operational Characteristics and Related Design Features of SNEAK"
Bericht KFK-632
IAEA-Symposium on Fast Reactor Physics and Related Safety Problems, Karlsruhe, 30. Okt. - 3. Nov. 1967

Tabelle 1:

Vergleich der gemessenen und gerechneten Reaktivitäts-
änderungen beim Void-Experiment in SNEAK-3A-1

Schritt	Δm Einzelschritt g CH ₂	Ak/k, Messung		Ak/k, Rechnung		Rechnung	
		Einzelschritt %	Gesamt %	Einzelschritt %	Gesamt %	Messung Einzelschritt	Gesamt
1a	-106	-0.164	-0.164	-0.140	-0.140	0.85	0.85
1b	-106	-0.140	-0.304	-0.127	-0.267	0.91	0.87
1c	-105	-0.106	-0.410	-0.098	-0.365	0.92	0.89
1d	-105	-0.049	-0.459	-0.041	-0.406	0.84	0.89
2a	-321	-0.323	-0.782				
2b	-161	-0.153	-0.935	-0.419	-0.825	0.88	0.88
3a	-120	-0.088					
3b	-199	-0.056	-1.079	-0.122	-0.947	0.85	0.88
4a	-121	-0.084					
4b	-202	-0.051	-1.214	-0.104	-1.051	0.77	0.86
5	Gesamtmenge -5740		-3.18 ^{*)}		-2.79		0.88

^{*)} extrapoliert nach Gleichung (2b)

Tabelle 2: Gruppeneinteilung der Querschnittssätze

26 Gruppen Sätze				10 Gruppen Sätze			11 Gruppen Satz		
Gruppe	Energieintervall			Gruppe	Energieintervall		Gruppe	Energieintervall	
1	6.5	-	10.5 MeV	1	6.5	- 10.5 MeV	1	4.0	- 10.5 MeV
2	4.0	-	6.5 "	2	2.5	- 6.5 "			
3	2.5	-	4.0 "				2	1.4	- 4.0 "
4	1.4	-	2.5 "	3	0.8	- 2.5 "			
5	0.8	-	1.4 "				3	0.4	- 1.4 "
6	0.4	-	0.8 "						
7	0.2	-	0.4 "	4	0.1	- 0.8 "	4	0.1	- 0.4 "
8	0.1	-	0.2 "						
9	46.5	-	100 keV				5	4.65	- 100 keV
10	21.5	-	46.5 "	5	10.0	- 100 keV	6	21.5	- 46.5 "
11	10.0	-	21.5 "				7	4.65	- 21.5 "
12	4.65	-	10.0 "						
13	2.15	-	4.65 "	6	1.0	- 10.0 "	8	1.0	- 4.65 "
14	1.0	-	2.15 "						
15	465	-	1000 eV				9	215	- 1000 eV
16	215	-	465 "	7	100	-1000 eV			
17	100	-	215 "						
18	46.5	-	100 "				10	21.5	- 215 "
19	21.5	-	46.5 "	8	10.0	- 100 "			
20	10.0	-	21.5 "						
21	4.65	-	10.0 "	9	4.65	- 10.0 "			
22	2.15	-	4.65 "						
23	1.0	-	2.15 "				11		
24	0.465	-	1.0 "	10		< 4.65 eV			
25	0.215	-	0.465 "						
26	0.025		eV						

Tabelle 3: Vergleich der Rechnungen für das Sektorexperiment

	gemessen (differentiell)	Reaktivitätsänderung beim Sektorexperiment, $\Delta k/k$		
		gerechnet (mit Heterogenitätskorrektur)		
		Querschnittssatz 1	Querschnittssatz 2	Querschnittssatz 3
Schritt 3	-0.144 %	-0.093 %	-0.113 %	-0.122 %
Schritt 4	-0.135 %	-0.114 %	-0.137 %	-0.104 %
Totale Ent- leerung	-3.18 % (extrapoliert)	-2.74 %	-2.62 %	-2.66 %

Tabelle 4:

Heterogenitätskorrektur bei den Void- und Flutungsexperimenten *)

Schritt	Void-Experiment 3A-1		Flutungsexperiment 3A-2	
	$\Delta k/k$, hom (gesamt) %	Heterogenitätskor- rektur (gesamt) $\Delta k/k$, %	$\Delta k/k$, hom (gesamt) %	Heterogenitätskor- rektur (gesamt) $\Delta k/k$, %
			(Methode 1)	
1a	-0.130	-0.010	+0.140	+0.013
1b	-0.250	-0.017	+0.258	+0.025
1c	-0.343	-0.022	+0.344	+0.032
1d	-0.382	-0.024	+0.373	+0.035
2	-0.778	-0.047	+1.40	+0.103 (+0.090)**)
3			+1.65	+0.115
4			+4.36	+0.254
5	-2.640	-0.150		

*) gewonnen mit der unkorrigierten Version des ZERA-Programms

**) Vergleichsrechnung mit der korrigierten Version des ZERA-Programms

Tabelle 5: Vergleich der gemessenen und gerechneten Reaktivitätsänderungen beim Flutungsexperiment in SNEAK-3A-2

Schritt	Δm Einzel- schritt g CH ₂	$\Delta k/k$, Messung		$\Delta k/k$, Rechnung			Rechnung/Messung		
		Einzel- schritt %	Gesamt %	Einzelschritt %		Gesamt %	Einzelschritt		Gesamt
				Methode 1	Methode 2		Methode 1	Methode 2	
						(Methode 1)			(Methode 1)
1a	112	+0.188	+0.188	+0.153	+0.147	+0.153	0.81	0.78	
1b	111	+0.160	+0.348	+0.130	+0.108	+0.283	0.81	0.68	
1c	112	+0.112	+0.460	+0.093	+0.071	+0.376	0.83	0.64	
1d	112	+0.057	-0.517	+0.042	+0.031	+0.418	0.74	0.55	0.81
2a	155	+0.166							
2b	463	+0.500							
2a+2b	618	+0.666	+1.183	+0.503	+0.921		0.76		0.78
2c	205	+0.202							
2d	154	+0.149							
2e	462	+0.435							
2c+2d+2e	821	+0.786	+1.97	+0.588	+1.51		0.75		0.77
3a	154	+0.137							
3b	154	+0.098							
3c	154	+0.075							
3d	154	+0.039							
3a+3b+3c+3d	617	+0.349	+2.32	+0.252	+1.76		0.72		0.76
4	Gesamt- core 9500 ($\bar{r}_c =$ 41.8 cm)		+5.9 ^{*)}	+2.86	+4.62				0.78

^{*)} Extrapoliert nach Gleichung (4)

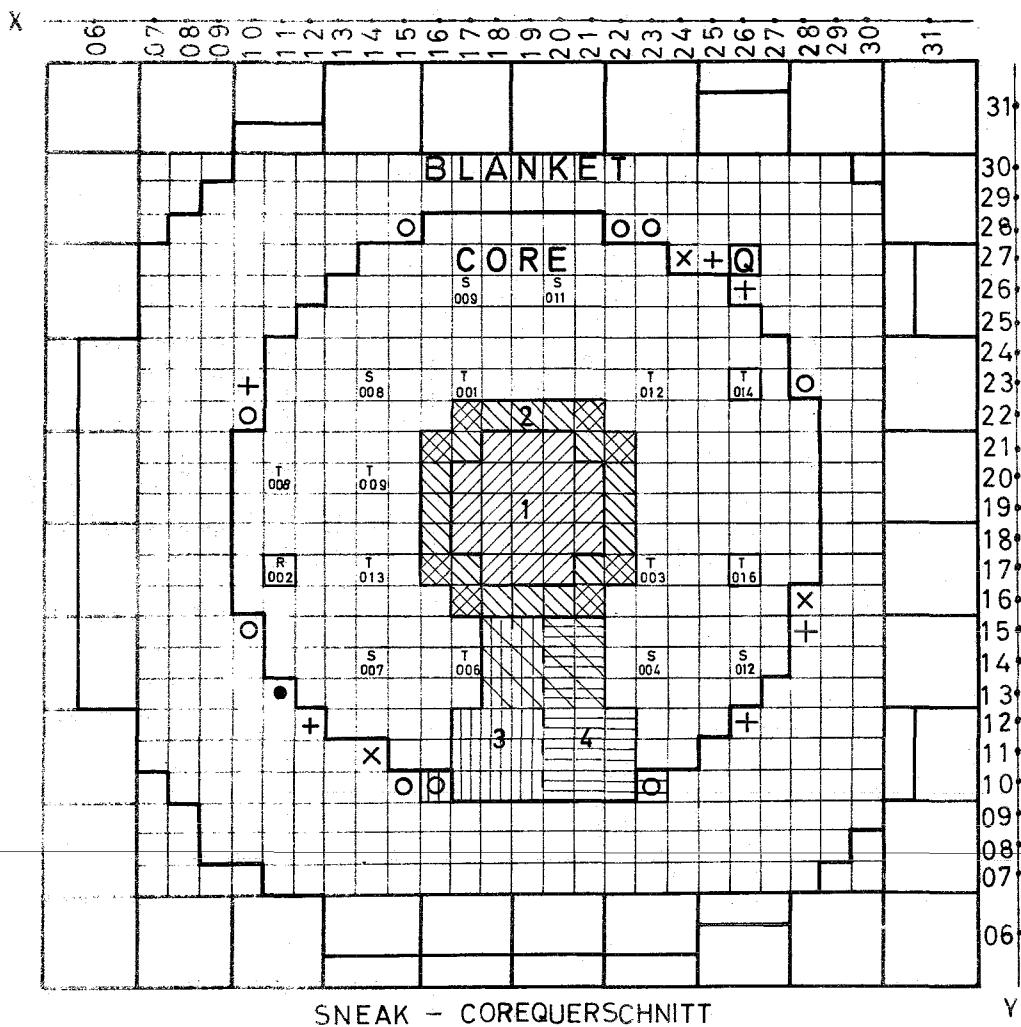
Tabelle 6: Kernzahldichten im Brüter Blanket
von SNEAK-3A-2, $10^{20}/\text{cm}^3$

	mit CH ₂	ohne CH ₂
C	9.5047	0.310796
Cr	25.4688	25.4688
Fe	87.4029	87.4029
H	18.388	-
Ni	12.768	12.68
O	200.735	200.735
Si	1.54126	1.54126
Ti	0.651	0.651
U235	0.405685	0.405685
U238	99.7391	99.7391

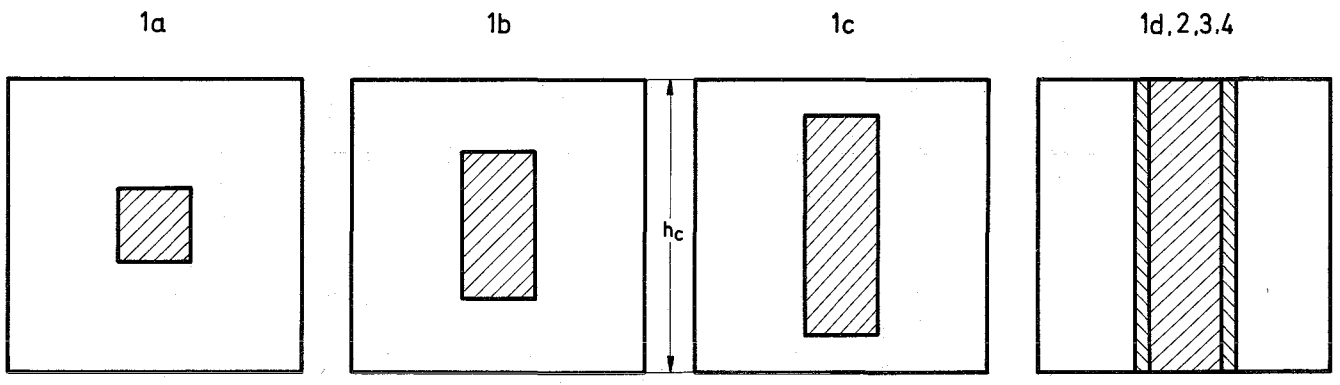
Tabelle 7:

Vergleich der gemessenen und gerechneten Reaktivitäts-
änderungen beim Void-Experiment in SNEAK-3A-2

Schritt	Entleerungs- bereich	Blanket- art	Δm g CH ₂	$\Delta k/k$, Messung %	$\Delta k/k$, Rechnung %	Rechnung/Messung
2	$h_c/4$	Brüter	113	-0.177	-0.154 (-0.151 Kugelgeometrie)	0.87 (0.85)
3	$h_c - h_c/4$	"	339	-0.328	-0.273	
2+3	h_c	"	452	-0.506	-0.427	0.84
4	$h_b - h_c$	"	396	+0.009	+0.007 2-dim.Rechnung (+0.006 1-dim.Rechnung)	0.78
2+3+4	h_b	"	848	-0.497	-0.420	0.84
7	$h_c/4$	SNEAK	113	-0.177	-0.147	0.83
6+7	h_c	"	452	-0.498	-0.413	0.83



- Coreelement -
zuladungen:
- X nach Schritt 1b
 - O " " 1d
 - + " " 2
 - " " 3



LÄNGSSCHNITTE DURCH DAS CORE (VOID-ZONEN SCHRAFFIERT)

FIG. 1 VOID EXPERIMENT SNEAK 3A - 1

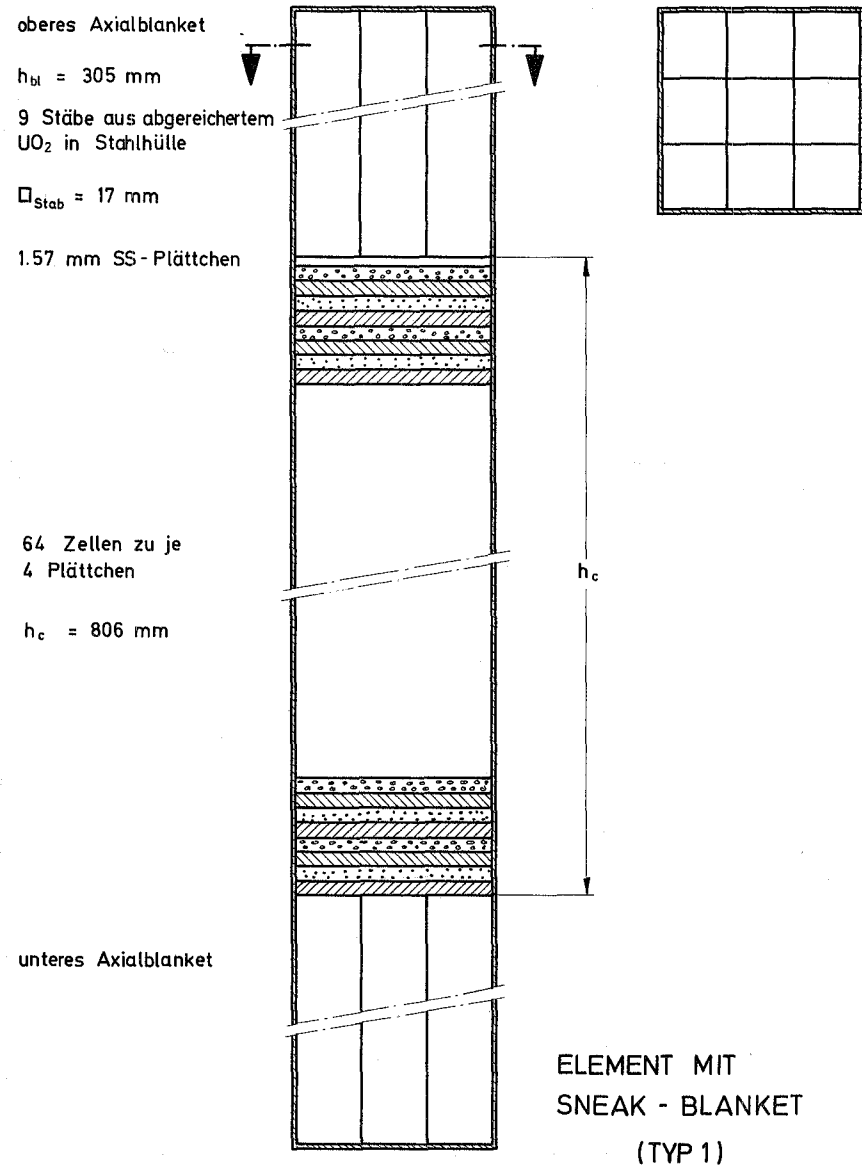
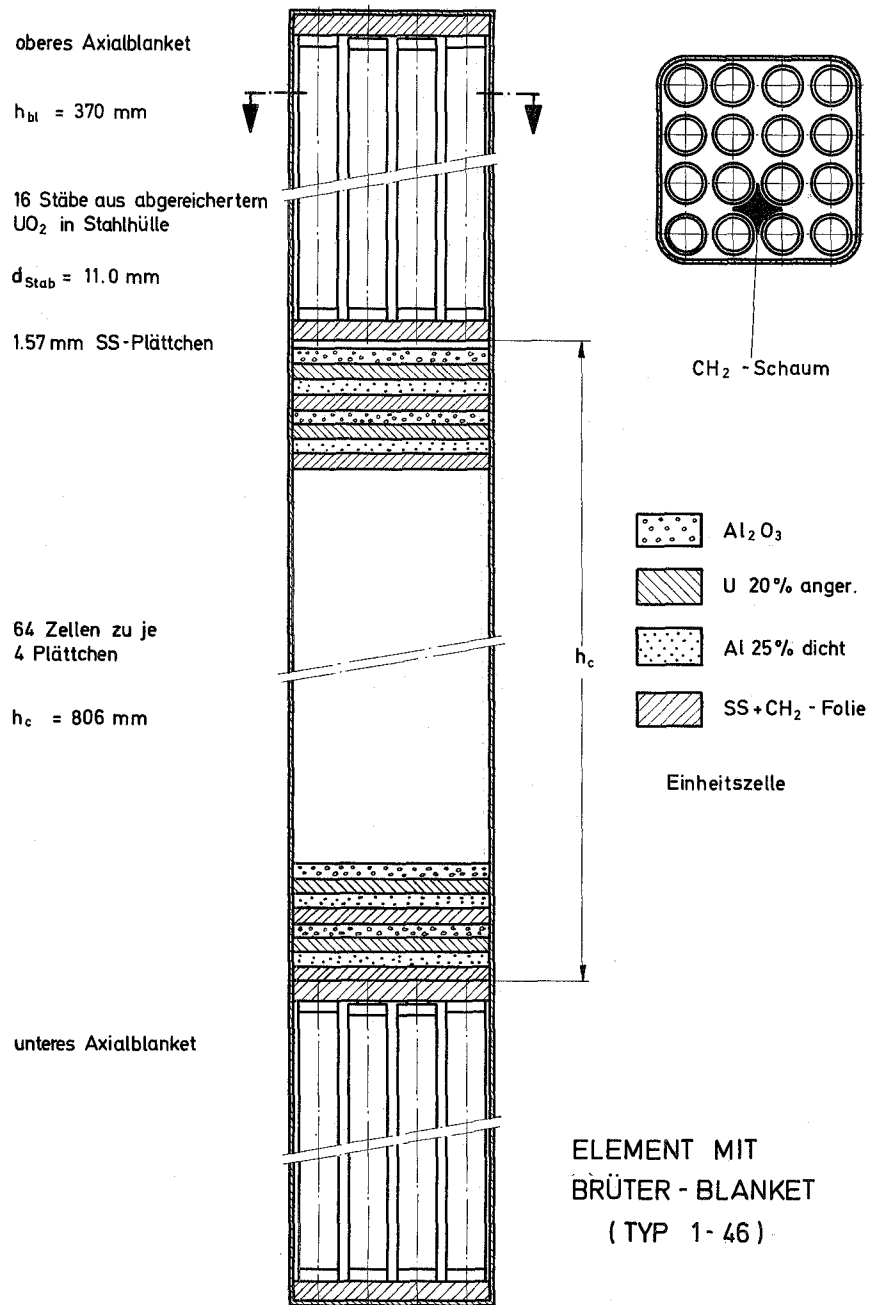


FIG. 2 AUFBAU DER CORELEMENTE

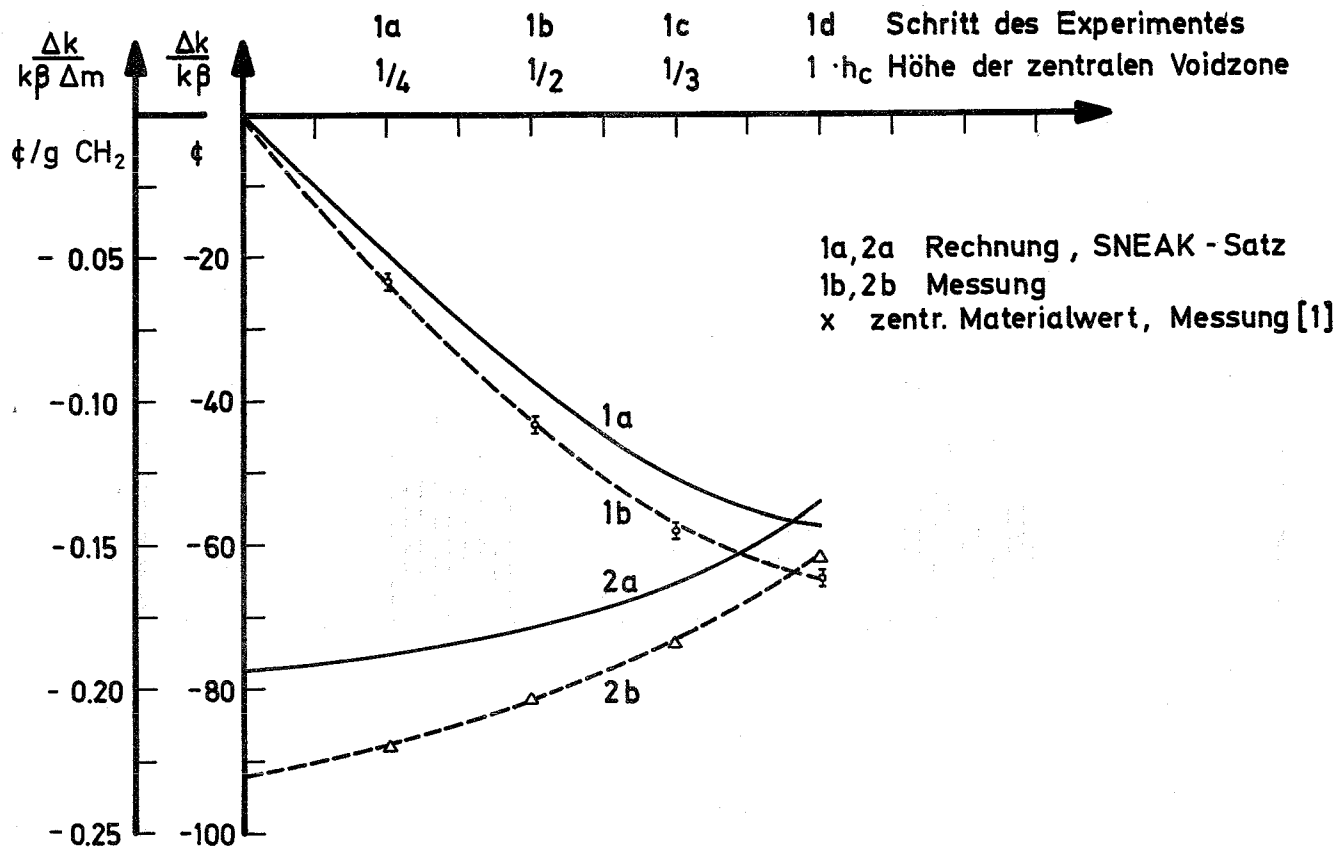


Fig. 3 Axialabhängigkeit des Void-Effektes in SNEAK 3A-1

Kurve 1: Reaktivitätsabnahme bei CH_2 -Entnahme über die angegeb. Höhe, $r = 14.07 \text{ cm}$
 Kurve 2: " " pro Gramm CH_2 bei CH_2 -Entnahme über die angegeb. Höhe

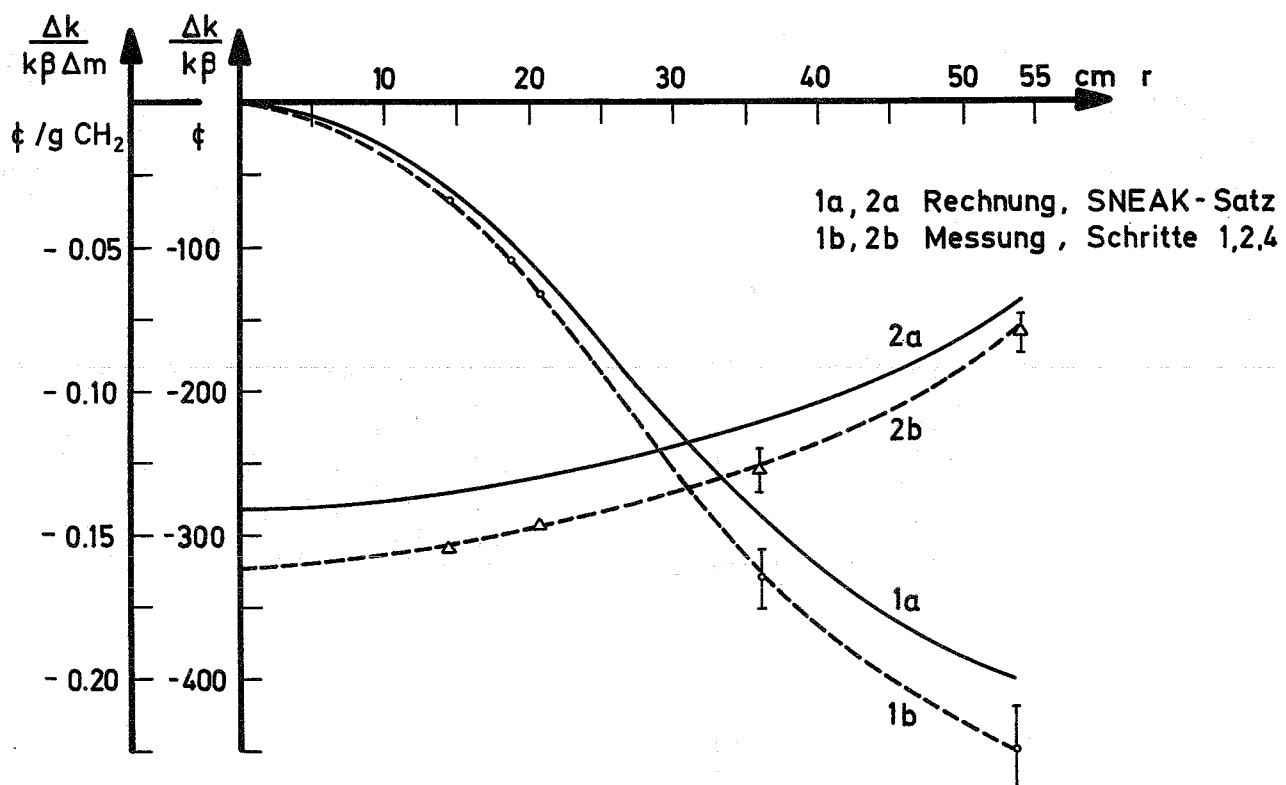
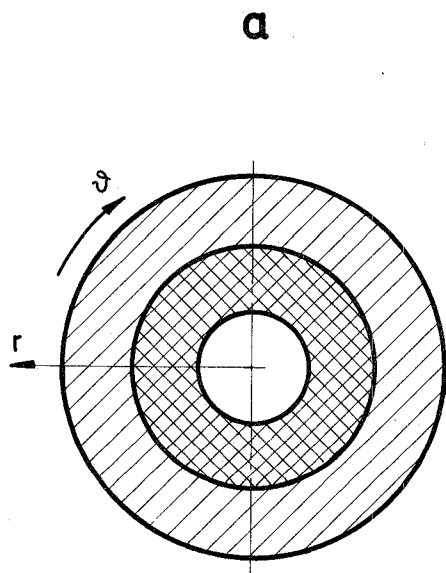


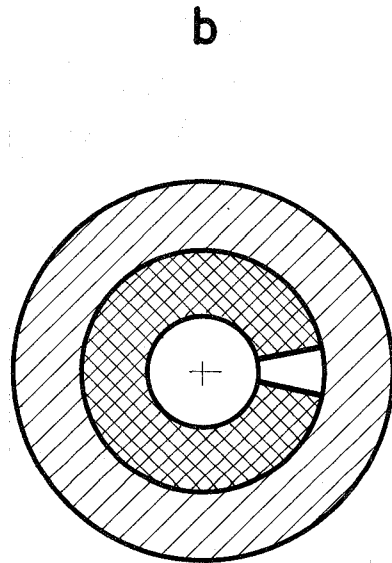
Fig. 4 Radialabhängigkeit des Void-Effektes in SNEAK 3A-1

Kurve 1: Reaktivitätsabnahme bei CH_2 -Entnahme über h_c bis zum Radius r
 Kurve 2: " " pro Gramm CH_2 beim gleichen Experiment



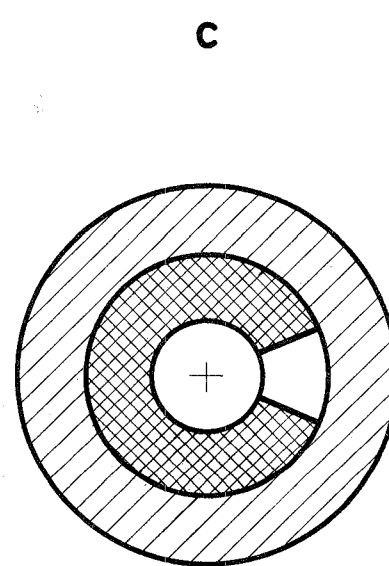
Schritt 2

Entleerung der 45
zentralen Elemente



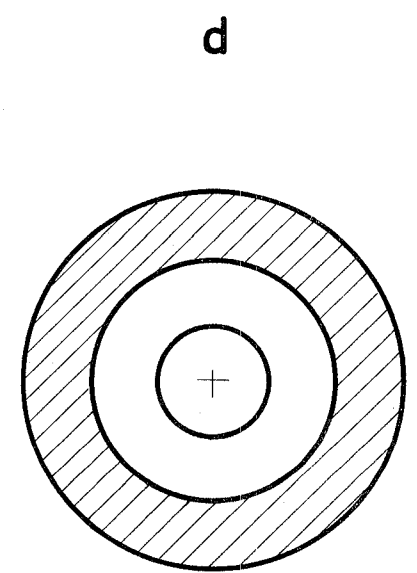
Schritt 3

zusätzliche Entleerung
eines $\frac{1}{16}$ Coresektors



Schritt 4

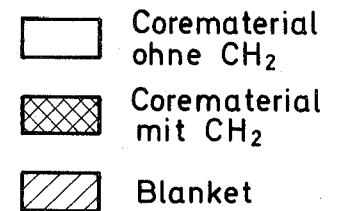
zusätzliche Entleerung
eines $\frac{2}{16}$ Coresektors

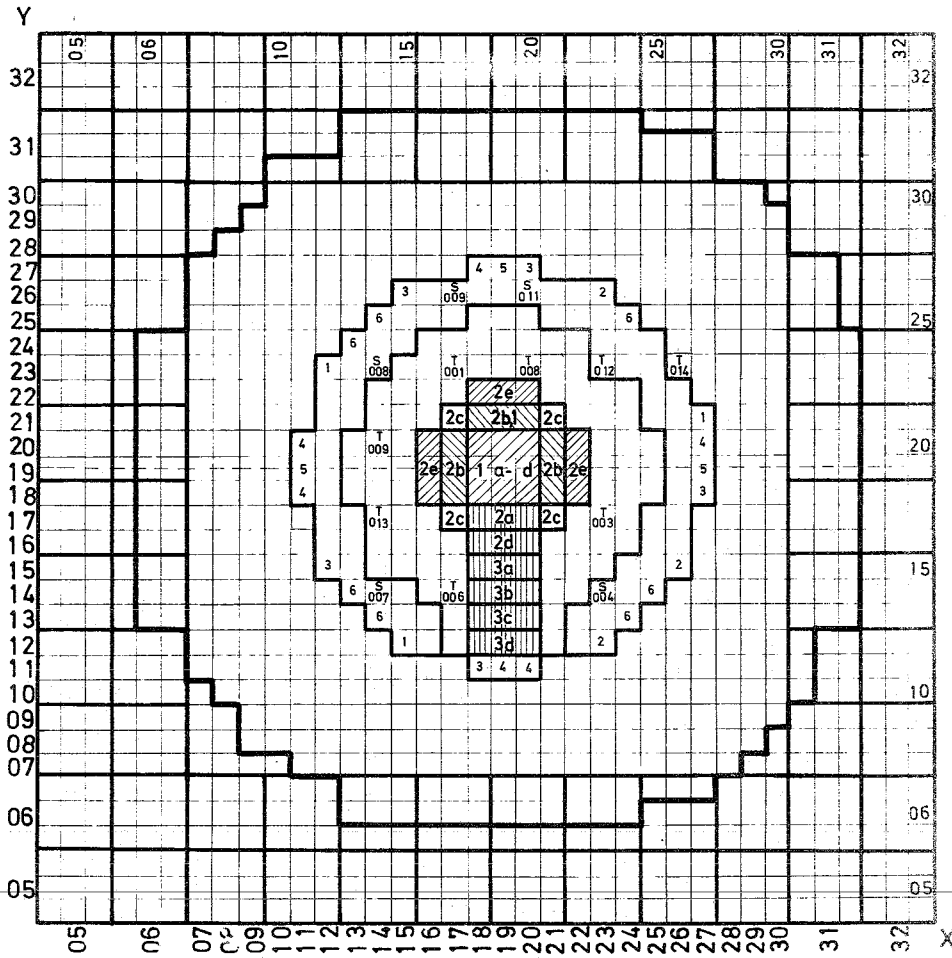


Schritt 5

totale Coreentleerung

Fig. 5 Modell für die zweidimensionalen Rechnungen beim
Sektorexperiment in SNEAK 3A-1 (Corequerschnitte)

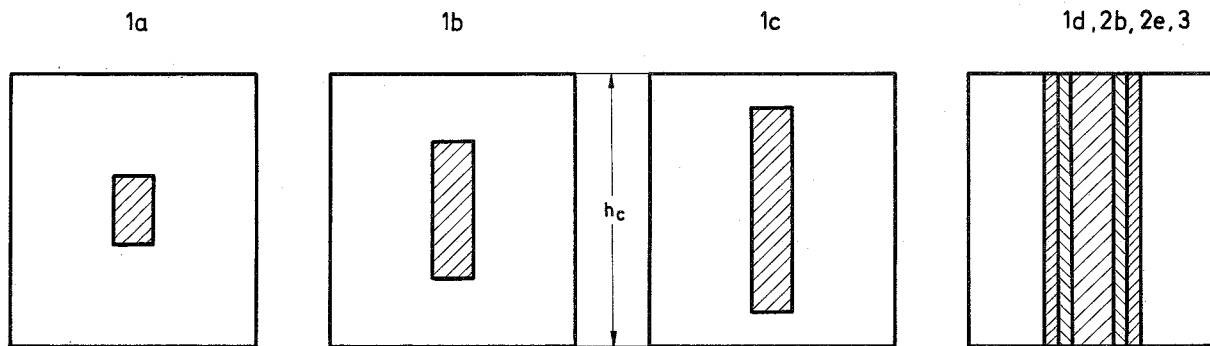




Elementausladungen
während des Experimentes:

Rand- korrektur	Zahl der Elemente	Nach Schritt Nr.
1	3	1 b
2	3 + R	1 d
3	5 + T14	2 b, 1
4	6	2 c
5	3	2 d
6	7	2 e

SNEAK- COREQUERSCHNITT



LÄNGSSCHNITTE DURCH DAS CORE (FLUTUNGSZONEN SCHRAFFIERT)

FIG. 6 FLUTUNGSEXPERIMENT SNEAK 3A-2

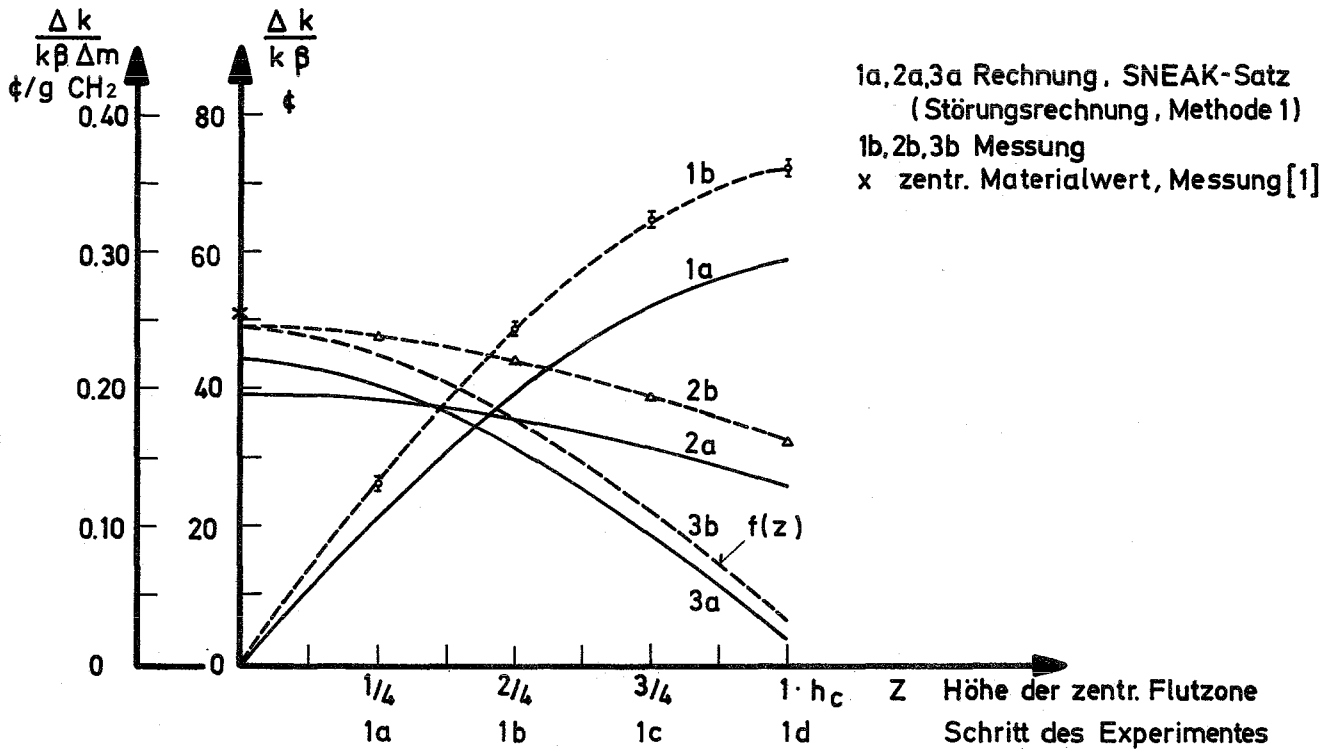


Fig.7 Axialabhängigkeit des Flut-Effektes in SNEAK 3A-2

Kurve 1: Reaktivitätsanstieg bei CH_2 -Zugabe über die angegebene Höhe, $r = 9.20 \text{ cm}$
 Kurve 2: Reaktivitätsanstieg pro Gramm CH_2 , kumulativ über die angegebene Höhe
 Kurve 3: " " " " , an der Höhe Z (differentiell)

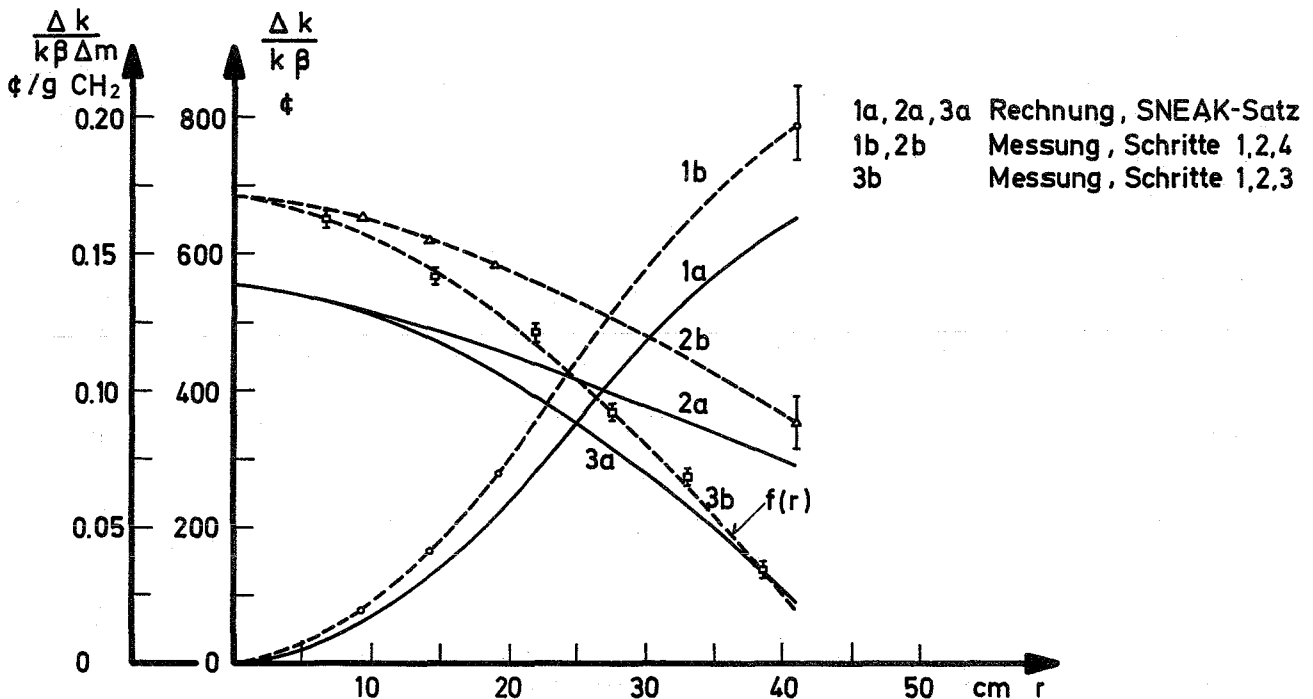
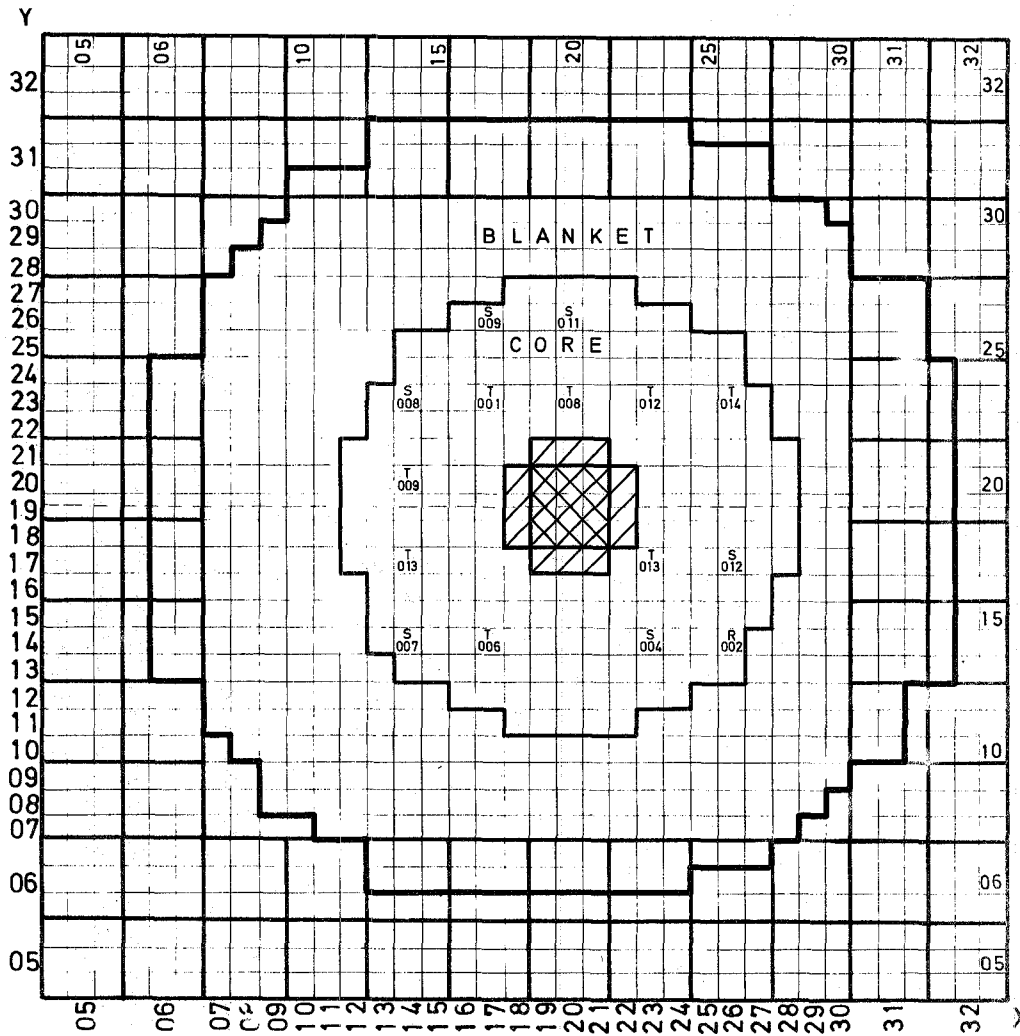


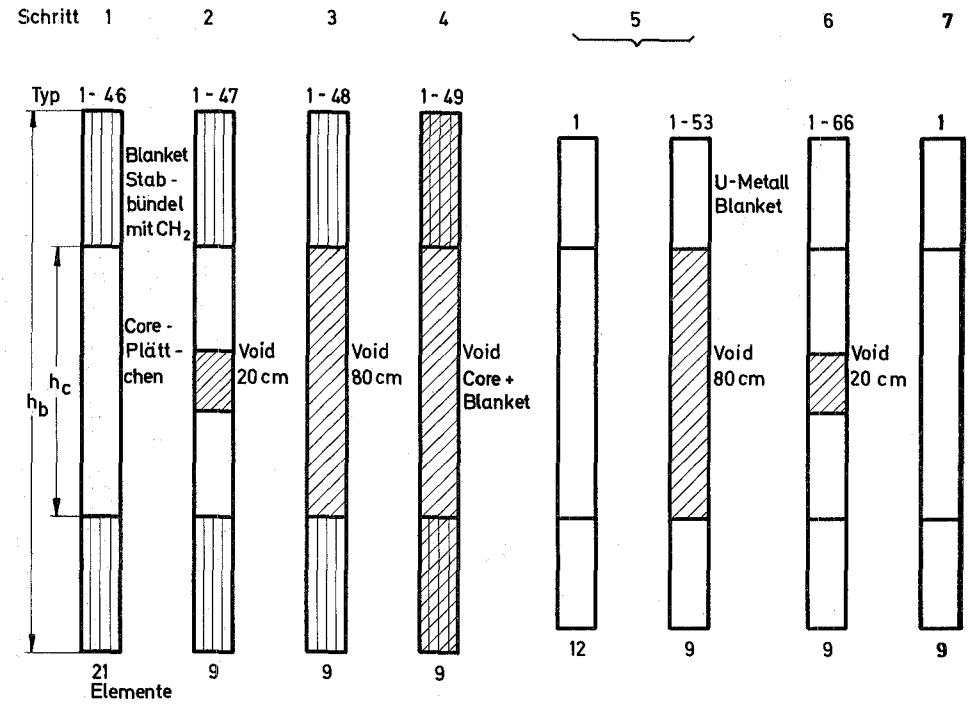
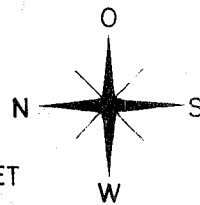
Fig.8 Radialabhängigkeit des Flut-Effektes in SNEAK 3A-2

Kurve 1: Reaktivitätsanstieg bei CH_2 -Zugabe über h_c bis zum Radius r
 Kurve 2: " " pro Gramm CH_2 beim gleichen Experiment, kumulativ bis r
 Kurve 3: " " " " " am Radius r (differentiell)



SNEAK-3A-2 COREQUERSCHNITT BEIM VOID-EXPERIMENT

- ▨ BEREICH DER VOID-EXPERIMENTE
- ▩ BEREICH MIT ZEITWEILIGEM BRÜTER-BLANKET



ELEMENTBELADUNGEN IN DER ZENTRALEN ZONE

FIG. 9 VOID EXPERIMENT SNEAK 3A-2

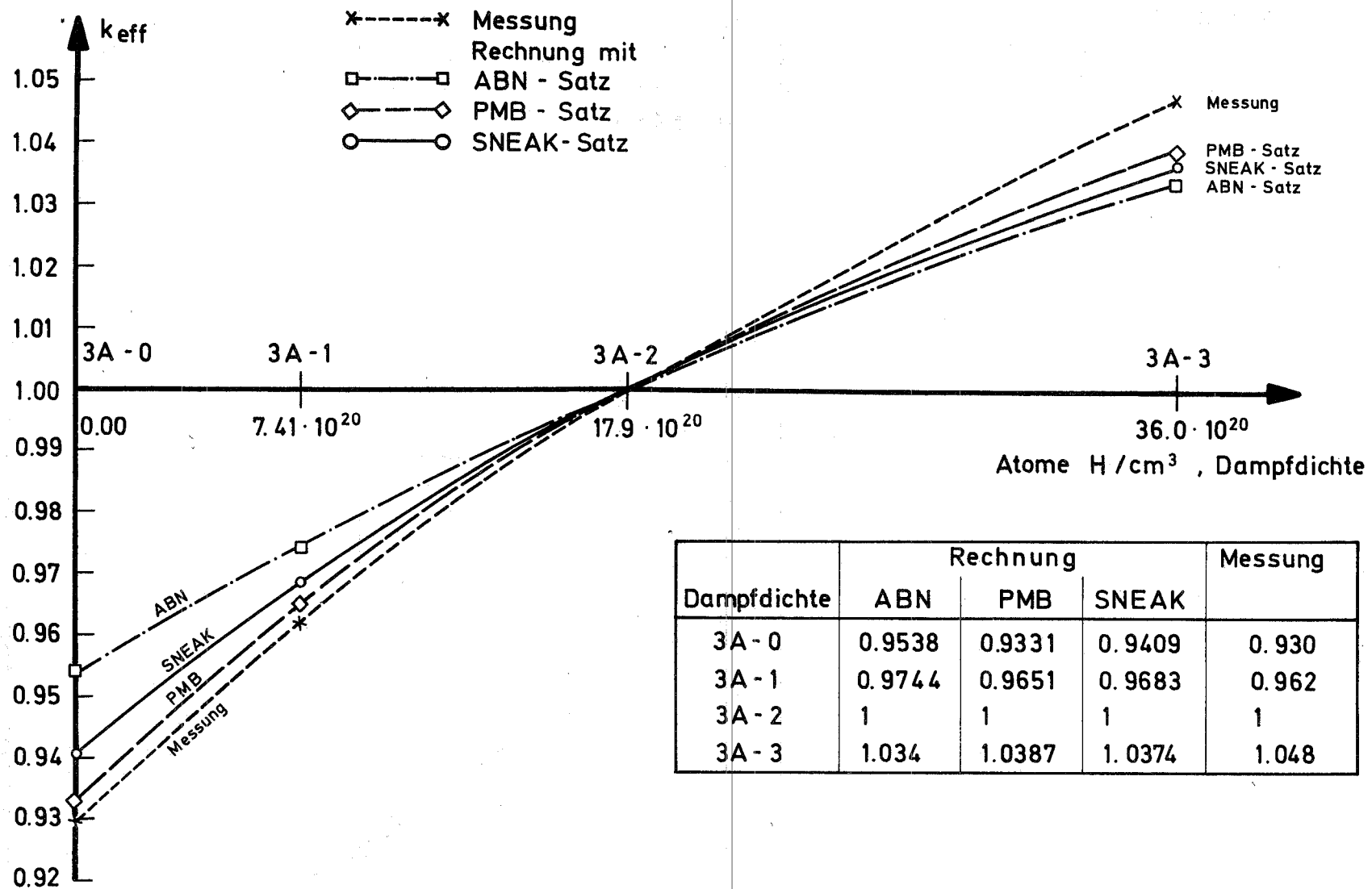


Fig. 10 Abhängigkeit der Reaktivität von der Dampfdichte bei fester Geometrie. Alle Werte sind bei 3A-2 — Dichte auf $k_{\text{eff}} = 1$ normiert.

Fig. 11 Eichkurven des Trimmstabes T 012
während des Flutungsexperimentes in SNEAK 3A-2
(s. Text)

