

KfK 2988  
August 1980

# **Einfluß der Vorläuferkonzentrationen auf die Energetik von prompt kritischen Leistungsexkursionen**

**W. Maschek**  
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik  
Projekt Schneller Brüter

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Projekt Schneller Brüter

KfK 2988

Einfluß der Vorläuferkonzentrationen auf die Energetik  
von prompt kritischen Leistungsexkursionen

W. Maschek

Kernforschungszentrum Karlsruhe, GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003

## ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Bericht wurde auf der Basis von Punkt-kinetikexkursionsrechnungen der Einfluß der Vorläuferkonzentrationen auf die Energetik von prompt kritischen nuklearen Leistungsexkursionen während der Übergangsphase bzw. Phase integraler Materialbewegung untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, daß die Exkursionsenergetik nur relativ schwach von den Vorläuferkonzentrationen abhängt. Die Vorläufer wirken dabei in den Punktkinetikgleichungen im überprompt kritischen Bereich als eine Art Fremdquelle. In den Störfallphasen, in denen im Kernbereich geschmolzene oder siedende Brennstoff/Stahlmischungen auftreten, kann es zu einem verstärkten Ausdampfen von Teilen der Vorläufer aus dem aktiven Bereich kommen, da die Temperaturen des Brennstoffs dann teilweise sehr viel höher als die Siedepunkte der Vorläufer (und ihrer Verbindungen) liegen.

Bei einer Sekundärexkursion während dieser Störfallphasen (Übergangsphase und Phase integraler Materialbewegung) setzt diese durch den Vorläuferverlust auf niedrigerem Leistungs- und Vorläuferniveau ein was i. a. zu einer Erhöhung der Exkursionsenergetik führt. Wie die hier durchgeführten Rechnungen jedoch zeigen, ist die Zunahme der Energie im geschmolzenen Brennstoff selbst bei pessimistischer Beschreibung (kompensierende Effekte wurden nicht berücksichtigt) nur relativ gering.

## ABSTRACT

### THE INFLUENCE OF PRECURSER CONCENTRATIONS ON THE ENERGETICS OF PROMPT CRITICAL NUCLEAR POWER EXCURSIONS

Based on point kinetics excursion calculations the influence of the precursor concentrations on the energetics of prompt critical nuclear power excursions in the transition phase and phase of integral material motion is analyzed in this report. The results show that the energetics of the excursion depend only weakly on the precursor concentrations. During the prompt critical phase of the excursion the precursors serve as some sort of external fission source. In the accident phases with molten or boiling fuel/steel mixtures in the core region an increased evaporation of precursors from the active region is possible, since partly the fuel temperatures are much higher than the boiling points of the precursors (and their compounds). A secondary excursion during these accident phases (transition phase and phase of integral material motion) will start from a lower power and precursor level due to precursor evaporation, which usually results in an increase of the energetics of the excursion.

The performed calculations however show that the increase of energy in molten fuel is rather low, though a pessimistic modelling (compensating effects have not been taken into account) has been chosen.

## INHALTSVERZEICHNIS

	<u>Seite</u>
Verzeichnis der Tabellen	
Verzeichnis der Abbildungen	
1. Einleitung	1
2. Einfluß der Vorläuferkonzentrationen auf den Verlauf von prompt kritischen Leistungsexkursionen	4
2.1 Die Abhängigkeit der Energetik einer nuklearen Exkursion von den Parametern Anfangsleistung und Anfangsvorläufer- konzentration	4
2.2 Reduktion der Vorläuferkonzentrationen durch Ausdampfprozesse aus siedenden Brennstoff/Stahlpools	16
3. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	29
4. Literaturverzeichnis	30
Anhang 1: Kinetische Parameter, Leistungsvertei- lungen und Materialwertkurven	33

VERZEICHNIS DER TABELLEN

		<u>Seite</u>
Tab.2.1.1	Ergebnisse der Referenzexkursionsrechnung mit KADIS	6
Tab.2.1.2	Ergebnisse der Exkursionsrechnungen mit unterschiedlichen Anfangsleistungen und Vorläuferkonzentrationen	7
Tab.2.2.1	Vorläufertabelle aus Keepin /1/	16
Tab.2.2.2	Schmelz- und Siedepunkte verschiedener Vorläuferelemente bzw. ihrer Verbindungen	19
Tab.2.2.3	Werte der nuklearen Leistung und der Vorläuferkonzentrationen beim Erreichen prompter Kritikalität mit und ohne Berücksichtigung des Vorläuferausdampfens.	26
Tab.2.2.4	Ergebnisse der Exkursionsrechnungen mit KADIS mit und ohne Berücksichtigung des Vorläuferverlustes durch Verdampfen	28

Tab.A.1.1	Kinetischer Parameter	34
Tab.A.1.2	Dopplerkonstanten ( $\frac{dk}{dT} = \frac{A}{T}$ ) für die transienten Exkursions- rechnungen mit KADIS	34
Tab.A.1.3	Normierte Leistungsdichtevertei- lung für die transienten Exkursions- rechnungen mit KADIS	35
Tab.A.1.4	Totale Materialwertverteilung ( $\Delta k/k/cm^3$ ) für die KADIS-Zonen im Corebereich	36

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

	<u>Seite</u>
Abb.2.1.1 Verlauf der nuklearen Leistung in Abhängigkeit von der An- fangsleistung und- Vorläufer- konzentration	8
Abb.2.1.2 Energie im geschmolzenen Brenn- stoff als Funktion der Vor- läuferdichte und Leistung zu Beginn der prompt kritischen Exkursion	11
Abb.A.1.1 Zuordnung der KADIS-Zonen im Corebereich	33

## 1. EINLEITUNG

---

Bei der Spaltung eines Uran- oder Plutoniumkerns entstehen neben den prompt emittierten Neutronen auch noch Spaltprodukte (sog. Vorläufer), die zu einer zusätzlichen Neutronenemission führen; nach  $\beta$ -Zerfallsprozessen dieser Vorläuferkerne, die hauptsächlich der Brom- und Jodgruppe angehören, entstehen instabile Isotope, welche sog. verzögerte Neutronen aussenden können.

Die Kettenreaktion in einem Reaktor wird nun bei Normalbetrieb gemeinsam durch die bei der Spaltung prompt sowie verzögert emittierten Neutronen aufrechterhalten. Die Größe  $k_{\text{eff}}(1-\beta_{\text{eff}})$  stellt dabei den Multiplikationsfaktor der prompten Neutronen und  $k_{\text{eff}} \beta_{\text{eff}}$  den der verzögerten Neutronen dar, wobei  $\beta_{\text{eff}}$  den Anteil der verzögerten Neutronen bezeichnet. Wenn  $k_{\text{eff}}(1-\beta_{\text{eff}}) < 1$  ist, so wird die Geschwindigkeit des Neutronenzuwachses von einer Generation zur nächsten im wesentlichen nur durch die verzögert emittierten Neutronen bestimmt. Auf der relativ großen "Lebensdauer" der verz. Neutronen basiert nun die effektive Regelungsmöglichkeit von Kernreaktoren (für Details siehe etwa /1-3/). Wird in einem Reaktor ein Wert von  $k_{\text{eff}} \geq 1 + \beta_{\text{eff}} k_{\text{eff}}$  erreicht, so kann die Kettenreaktion allein von den prompten Neutronen aufrechterhalten werden (prompte Kritikalität). Die Neutronenpopulation und damit auch die Leistung wachsen dann exponentiell mit einer sehr kurzen Zeitkonstanten an.

Der retardierende Effekt der verzögerten Neutronen fällt ab dem prompt kritischen Punkt fort, jedoch wird der Verlauf von prompt kritischen Leistungsexkursionen und die damit verbundene Energiefreisetzung weiterhin durch die verzögerten Neutronen beeinflusst.

Prompt kritische Leistungsexkursionen in einem schnellen natriumgekühlten Brutreaktor könnten nur durch extrem unwahrscheinliche, sogenannte, hypothetische Störfälle (z.B. Kühlmitteldurchsatzstörfall bei Versagen aller unabhängigen Abschalttsysteme) ausgelöst werden.

Bei einer konsequent pessimistischen Modellierung können dabei prompt kritische Zustände z.B. in der Einleitungsphase des Störfalles durch Kühlmittelsieden, Brennstoff- und Hüllrohrmaterialbewegung oder in der folgenden Übergangsphase durch das Auftreten von Rekritikalitäten (Poolkollabieren, Wiedereintritt von vorher ejeziertem Kernmaterial etc.) erreicht werden.

Da die einzelnen Störfallphasen z.Zt. meistens mit jeweils speziell für sie entwickelte Codes mechanistisch beschrieben werden, müssen neben den übrigen neutronischen Parametern wie z.B. Reaktivitätsrampen, Leistungs- und Reaktivitätsniveaus auch die Vorläuferkonzentrationen für die verzögerten Neutronenanteile möglichst konsistent von einem Code zum folgenden übergeben werden. Eine Überschätzung der Vorläuferkonzentrationen bei einer nicht konsistenten Übergabe würde dabei i.a. zu einer Unterschätzung der Energiefreisetzung einer Leistungsexkursion und damit zu nicht konservativen Ergebnissen führen.

Schwierigkeiten bei der Bestimmung der tatsächlich vorhandenen Vorläuferkonzentrationen können sich nun dadurch ergeben, daß u.U. verschiedene Störfallparameter (wie z.B. die Vorläufer) über bestimmte Zeiträume, welche nicht direkt mechanistisch modelliert werden, extrapoliert werden müssen, um als Eingabeparameter für einen weiteren Rechencode zu dienen.

In den Untersuchungen zum Auftreten von Sekundärkritikalitäten während der Übergangsphasen bzw. Phase integraler Kernmaterialbewegung im Kernbereich des SNR-300 /2/ wurde, um die neutronischen Anfangsbedingungen für die Sekundärkritikalitätsmodellfälle möglichst konsistent an die SAS3D Analyse der Einleitungsphase /6/ anzukoppeln, so vorgegangen, daß der Zeitraum zwischen Ende der Einleitungsphase und Eintritt der Sekundärkritikalität mit Punktkinetikrechnungen überbrückt wurde.

Zusätzlich kann es während des Störfallablaufs in der Übergangsphase oder Phase integraler Kernmaterialbewegung z.B. durch das verstärkte Ausdampfen von Vorläuferkernen (teilweise werden natürlich diese Spaltprodukte schon in der Einleitungsphase

freigesetzt) aus siedenden Brennstoff/Stahlpools zu Veränderungen in den Vorläuferkonzentrationen kommen. Diese Ausdampfprozesse werden z.Zt. auch noch nicht in den fortgeschrittenen Störfall-Codes wie SIMMER /7/ berücksichtigt, mit welchen diesen Störfallphasen mechanistisch analysiert werden können.

Im vorliegenden Bericht soll nun anhand von Exkursionsrechnungen mit dem Störfallcode KADIS /8/ der Einfluß der Vorläuferkonzentrationen auf die Energetik von prompt kritischen Leistungsexkursionen (speziell Sekundärexkursionen) analysiert werden. Insbesondere wird die relative Erhöhung der Energiefreisetzung von Sekundärexkursionen untersucht, wenn es im Zeitraum zwischen Primär- und Sekundärexkursion<sup>6</sup> zu verstärkten Ausdampfprozessen von Vorläuferkernen kommt. Die Sekundärexkursionen werden dabei während der sogenannten Übergangsphase bzw. in der Phase integraler Materialbewegung postuliert /4/, wobei der Zustand des Reaktorkerns als ein dispergiertes Brennstoff/ Stahlgemisch angenommen wird.

Diese Untersuchungen erfolgen dabei unabhängig von speziellen Störfallscenarien und Störfallabläufen.

## 2. EINFLUSS DER VORLÄUFERKONZENTRATIONEN AUF DEN VERLAUF VON PROMPT KRITISCHEN LEISTUNGSEXKURSIONEN

---

### 2.1 DIE ABHÄNGIGKEIT DER ENERGETIK EINER NUKLEAREN EXKURSION VON DEN PARAMETERN ANFANGSLEISTUNG UND ANFANGSVORLÄUFERKONZENTRATION

---

Der Einfluß der Vorläuferkonzentrationen auf den Verlauf einer prompt kritischen Leistungsexkursion, wurde an dem für Exkursionscodes wie KADIS /8/ typischen Punktkinetikgleichungssystem untersucht.

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (2.1.1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (2.1.2)$$

$$\rho(t) = \rho_{\text{DRIVE}}(t) + \rho_{\text{DOP}}(t) + \rho_{\text{MATW}}(t)$$

$n(t)$  Neutronenniveau (proportional zur neutronischen Leistung)

$C_i(t)$  Konzentration der  $i$ -ten Vorläufergruppe

$\beta_i$  Anteil der verzögerten Neutronengruppe  $i$   
( $\beta = \sum_1^6 \beta_i$ )

$\lambda_i$  Zerfallkonstante der Vorläufergruppe  $i$

$\Lambda$  Neutronengenerationszeit ( $\Lambda = \frac{1}{k_{\text{eff}}}$  mit  $l$  als prompte Lebensdauer)

$\rho(t)$	Reaktivität
$\rho_{\text{DRIVE}}(t)$	Treiberreaktivität
$\rho_{\text{DOP}}(t)$	Dopplerrückwirkung
$\rho_{\text{MATW}}(t)$	Reaktivitätsrückwirkung durch Kernmaterialbewegung

Das obige Gleichungssystem wurde auf ein Reaktorcore angewandt, welches die Dimensionen des SNR-300 hat.

Im Reaktorcore wird dabei ein dispergiertes Brennstoff-Stahlgemisch (80% des Coreinventars/mittl. Brennstofftemperatur = 3270 K) angenommen. Die für die Exkursionsrechnung notwendigen Materialwert- und Leistungsverteilungen können neben anderen Parametern, wie Dopplerkoeffizienten etc. aus Anhang 1 ersehen werden.

In dem vorliegenden Core wird nun eine Leistungsexkursion initiiert, indem man eine gewisse vorgegebene Reaktivitätsrampe in das System einlaufen läßt. Die Referenzrechnung wird am prompt kritischen Punkt initiiert wobei eine Reaktivitätsrampe von 30  $\beta$ /sec und eine Anfangsleistung  $n_0$  von  $7.6 \cdot 10^9$  Watt (entspricht etwa 10 Mal der thermischen Leistung des SNR-300) gewählt wurden. Die Anfangsvorläuferkonzentrationen werden im Gleichgewicht mit der Leistung  $n_0$  angenommen, und mittels der Gleichung 2.1.3 bestimmt

$$C_i = \frac{\beta_i}{\lambda_i \Lambda} n_0 \quad (2.1.3)$$

Mit den in Anhang A1 spezifizierten Eingabegrößen ergeben sich dann für diese Exkursionsrechnung die in Tab. 2.1.1 dargestellten Werte.

Rampe	$\beta/\text{sec}$	30
Anfangsreaktivität	$\beta$	1
Normierte Anf.leistung	SS	10
Normierte Anf.vorläuferkonzentration	SS	10
Anfangsenergie im geschm. Brennstoff	MWs	2150
Energie im geschm. Brennstoff	MWs	4771
$\bar{T}$	K	4263
$\bar{T}_{\text{max}}$	K	5368
max. Reakt.	$\beta$	1.075
max. Leistung	MW	1.009 + 6

Tab.: 2.1.1 Ergebnisse der Referenzexkursionsrechnung mit KADIS  
(SS entspricht Normierung auf 760 MW)

In einem ersten Schritt soll nun der Einfluß der gewählten Vorläuferkonzentrationen auf den Exkursionsverlauf dargestellt werden. Dazu wurden die in Tab.2.1.2 zusammengestellten Rechnungen durchgeführt. Im einzelnen wurden 4 Wertpaare von Anfangsleistung  $n_0$  und Anfangsvorläuferkonzentrationen (proportional  $x \cdot n_0$ ) untersucht. Der Leistungsverlauf dieser vier Exkursionsrechnungen ist in Abb.2.1.1 dargestellt.

Die in Tab.2.1.1 und Abb.2.1.1 dargestellten Ergebnisse zeigen, daß der erste Leistungsanstieg  $\frac{dn}{dt}$  am prompt kritischen Punkt im wesentlichen durch die Vorläuferkonzentrationen bestimmt wird. Dieses Verhalten läßt sich auch direkt für  $\rho \sim \beta$  aus der Gleichung (2.1.1) ablesen.

Die Leistungsverläufe der Exkursionsrechnungen für gleiche Vorläuferkonzentrationen besitzen eine ähnliche Form, und zwar um so

Rampe	§/sec	30	30	30	30
Anfangsreaktivität	§	1	1	1	1
Normierte Anf.leistung	SS	1	1	10	10
Normierte Anf.vorläuferkonzentration	SS	1	10	1	10
Energie im geschm. Brennstoff	MWs	5251	4799	5080	4771
$\bar{T}$	K	4444	4274	4379	4263
$T_{\max}$	K	5709	5388	5588	5368
max. Reakt.	§	1.125	1.077	1.117	1.075
max. Leistung	MW	1.467+6	1.043+6	1.298+6	1.009+6

Tab.:2.1.2 Ergebnisse der Exkursionsrechnungen mit unterschiedlichen Anfangsleistungen und Vorläuferkonzentrationen ( SS entspricht Normierung auf 760 MW)

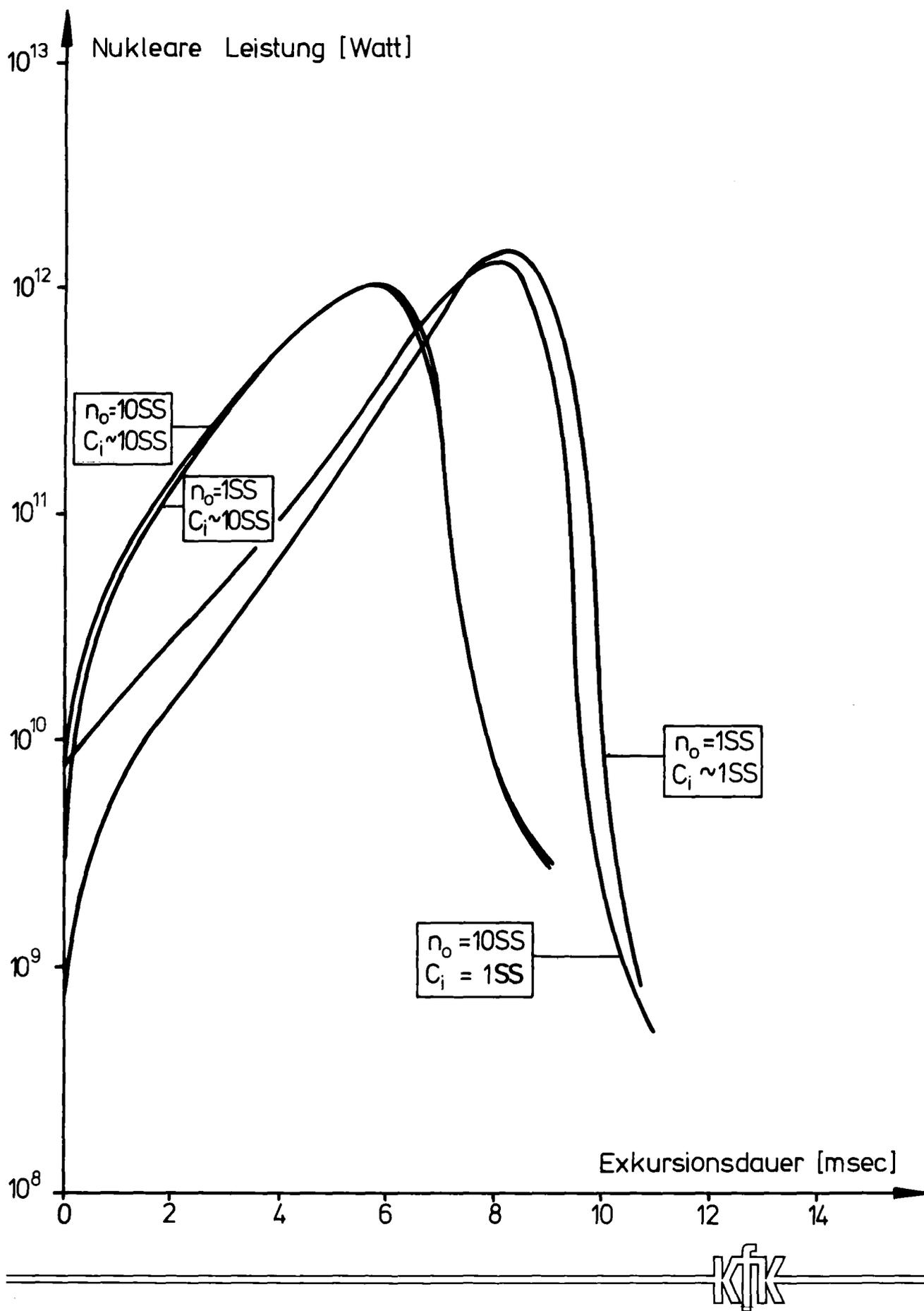


ABB.2.1.1 VERLAUF DER NUKLEAREN LEISTUNG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER ANFANGSLEISTUNG UND -VORLÄUFER-KONZENTRATION

ähnlicher, je höher die Vorläuferkonzentrationen sind.

Durch die als eine Art "Fremdquelle" wirkenden verzögerten Neutronen im überprompt kritischen Bereich kommt es zu einem schnellen Leistungsanstieg, es setzen aber auch die Reaktivitätsrückwirkungen durch den Dopplereffekt und die Kernmaterialbewegungen früher ein.

Der Leistungsabfall nach dem Maximum erfolgt für höhere Vorläuferkonzentrationen etwas langsamer, da hier wieder der retardierende Effekt der verzögerten Neutronen, insbesondere im unterkritischen Bereich, zum Tragen kommt. Die niedrigen Vorläuferkonzentrationen führen wegen der später einsetzenden Rückwirkungen zu höheren Leistungsmaxima, und größerer Halbwertsbreite der Exkursionskurve und damit auch zu einer erhöhten Energiefreisetzung. Bei gleichen Vorläuferkonzentrationen führt die höhere Anfangsleistung jeweils zu einer geringeren Energiefreisetzung.

Diese hier dargestellten Ergebnisse behalten qualitativ auch ihre Gültigkeit für höhere Reaktivitätsrampen bzw. Anfangsreaktivitäten.

In einem weiteren Schritt wurde noch einmal detailliert der Einfluß der Anfangsleistung zusammen mit der Anfangsvorläuferkonzentration auf den Exkursionsverlauf untersucht. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abb.2.1.2 dargestellt. Als Maß für die Schwere der Exkursion ist in diesem Schaubild die Energie im geschmolzenen Brennstoff als Ordinate über einer normierten Anfangsvorläuferkonzentration ( $C_i \sim X \cdot n_0$  (= 760 MW)) aufgetragen. Als Parameter der einzelnen Kurven dient die Leistung zu Exkursionsbeginn am prompt kritischen Punkt. Als Reaktivitätsrampe wurde wieder die 30  $\beta$ /sec Rampe gewählt. Aus der Abb.2.1.2 ergibt sich, daß für niedrige Anfangsleistungen und kleine Vorläuferkonzentrationen sich zunächst höhere Energiefreisetzung ergeben und diese bei Leistungserhöhung mit festgehaltener Vorläuferzahl absinken. Durch die niedrige Anfangsleistung kommen die Rückwirkungseffekte wie Dopplereffekte und Materialbewegung später zur Wirkung und es kann dem Reaktor relativ viel Reaktivität zugeführt werden.

Eine Erhöhung der Vorläuferkonzentration bei kleiner Anfangsleistung führt schließlich zu einem Absinken der Energiefreisetzung während sich bei hohen Anfangsleistungen ein leichter Anstieg der Energiefreisetzung ergibt. Insgesamt zeigt sich aber, daß der Einfluß der Vorläuferkonzentration auf die Energiefreisetzung für eine bestimmte Anfangsleistung über mehrere Größenordnungen der  $C_i$ 's relativ gering ist. Die Ursache liegt vor allem darin, daß für derartig geringe Vorläuferkonzentrationen der Term  $\frac{\rho - \beta}{\Lambda} \cdot n$  in der Glg. 2.1.1 relativ gegenüber  $\sum \lambda_i C_i$  überwiegt.

\* Die obigen Aussagen sind insbesondere für Exkursionsrechnungen gültig, bei denen der Exkursionsverlauf durch den Dopplereffekt bestimmt wird. Nimmt man im Reaktorcore sehr steile Temperaturprofile an, sodaß von Beginn der Exkursion an die Reaktivitätsrückwirkung durch Materialbewegung dominiert, so kann u.U. die Rechnung mit geringerer Anfangsleistung und Vorläuferkonzentration zu einer kleineren Energiefreisetzung führen, da die Leistung von Beginn der Exkursion an bereits abzusinken beginnt, und dann die absolute Leistungshöhe zu Beginn der Exkursion die Energie  $E = \int n(t) dt$  weitgehend bestimmt.

Bei Exkursionen im verzögert kritischen Bereich tritt die Erhöhung der Energiefreisetzung bei Verringerung der Vorläuferkonzentrationen nicht auf.

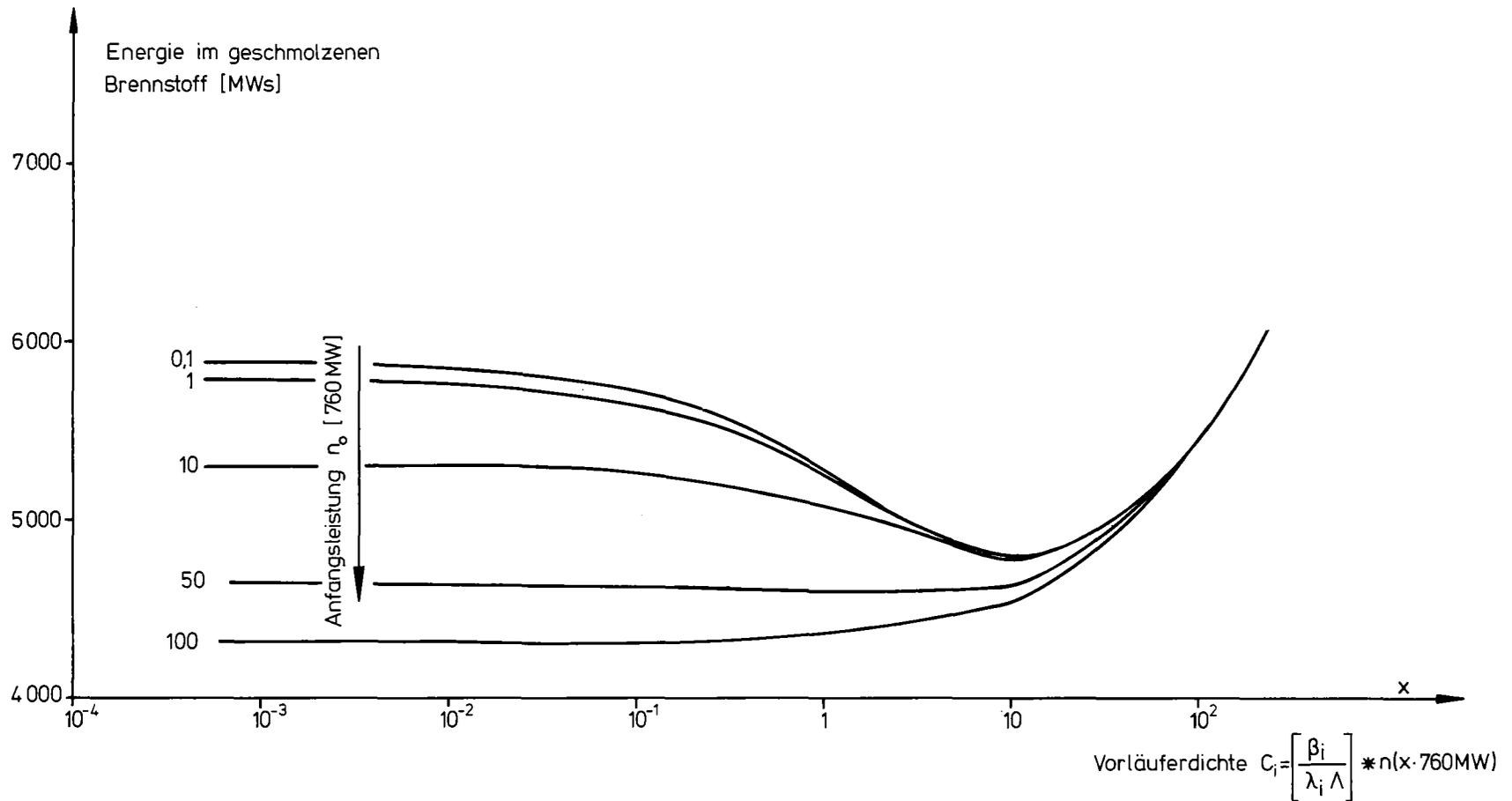


ABB.2.1.2

ENERGIE IM GESCHMOLZENEN BRENNSTOFF ALS FUNKTION DER VORLÄUFERDICHTEN UND NUKLEAREN LEISTUNG ZU BEGINN DER PROMPT KRITISCHEN EXKURSION

Bei Erhöhung der Vorläuferkonzentrationen wird schließlich für die kleinen Leistungen ein Minimum der Energiefreisetzung erreicht, da durch Erhöhung des Terms  $\Sigma \lambda_i c_i$ , der als eine Art "Fremdquelle" in der Gleichung von 2.1.1 auftritt, die Größe  $\frac{dn}{dt}$  insgesamt wächst und zu früherem und schnellerem Auftreten von Rückwirkungseffekten führt, welche die Leistungsexkursion begrenzen. Bei hohen Anfangsleistungen überwiegt der direkte Einfluß einer höheren Startleistung, sodaß die Energiefreisetzung monoton anwächst. Für sehr große Werte von  $\Sigma \lambda_i c_i$  fallen schließlich unabhängig von der gewählten Anfangsleistung die Energetikkurve in Abb.2.1.2 zusammen, da durch die extreme Ungleichgewichtssituation der Term  $\Sigma \lambda_i c_i$  in Glg.2.1.1 zu dominieren beginnt.

Für höhere Rampen oder Corekonfigurationen mit geänderten Brennstoffmassen- und temperaturen ergeben sich ähnliche Kurven und ein ähnliches Verhalten wie in Abb.2.1.2. Geht man z.B. von einem Reaktorkern aus, bei dem noch große Teile nicht aufgeschmolzen sind, der Dopplereffekt dann durch "Haltepunkte" verzögert eintritt, so verschieben sich die Kurven etwas nach rechts, das Minimum der Energiefreisetzung für kleine Leistungen rückt zu höheren Vorläuferkonzentrationen wobei wegen der dann auch geringeren Anfangsenergie im geschmolzenen Brennstoff das Minimum der Energie auch etwas tiefer liegt; die Energiefreisetzung bei kleinen Leistungen und niedrigen Vorläuferkonzentrationen liegt dann allerdings etwas höher als bei den in Abb.2.1.2 gezeigten Kurven.

Für Störfallanalysen ist nur die Kurvenschar auf der linken Seite der Abb.2.1.2 von Relevanz. Im stationären Betrieb des Reaktors vor Störfallbeginn befinden sich die Vorläuferkonzentrationen im Gleichgewicht mit der stationären Leistung. Während des Störfalles werden, solange eine Phase der Überkritikalität herrscht, die Vorläuferkonzentrationen  $c_i$  nicht mehr im Gleichgewicht mit der neutronischen Leistung sein, sondern wegen ihres verzögerten Entstehens einer sehr viel geringeren neutronischen Gleichgewichtsleistung entsprechen. Nach einer neutronischen Abschaltung des Reaktors z.B. durch Kernmaterialdispersion wird die prompte Leistung sehr schnell

abfallen und die Vorläuferkonzentrationen werden höheren Leistungswerten entsprechen. Jedoch werden auch in diesem Fall die Vorläuferkonzentrationen nie Werte proportional einem 100 fachen Nominalleistungsniveau besitzen. Aus diesen Gründen hat der Verlauf des rechten Kurvenastes für das Störfallverhalten eines schnellen Brutreaktors keine Bedeutung.

Führt die primäre Exkursion noch nicht zu einer permanenten unterkritischen Anordnung, so besteht während der nachfolgenden Störfallphasen (Übergangsphase und Phase integraler Materialbewegung /4/) das Potential für eine weitere Exkursion in dem nunmehr schon weitgehend zerstörten Core. Während dieser beiden Störfallphasen ist der Reaktor i.a. stark unterkritisch (bedingt durch Ejektion von Brennstoff aus dem aktiven Bereich und Blockadebildungen in den Blankets), sodaß die neutronische Leistung und auch die Vorläuferkonzentrationen weiter abfallen.

Wird nun in einem derartigen unterkritischen System eine Exkursion initiiert, so steigen bis zum Erreichen prompter Kritikalität die Leistung aber auch die Vorläuferkonzentrationen wieder an. Werden während der Phase starker Unterkritikalität bis zum Einsetzen einer erneuten Exkursion Ausdampfprozesse von Vorläufern aus dem dispergierten heißen Brennstoff/Stahlgemisch im Core angenommen, so wird dieses erneute Anwachsen der Vorläufer und der neutronischen Leistung jedoch verlangsamt.

Die Ausgangssituation für eine Sekundärexkursion /5/ stellt sich dann so dar, daß man von erniedrigtem Leistungs- und Vorläufer-niveau ausgeht, wobei jedoch zwischen neutronischer Leistung und Vorläuferkonzentration noch ein starker Ungleichgewichtszustand herrscht, da die Leistung sehr viel schneller angestiegen ist.

Überschätzt man nun die Zahl der Vorläufer, so wird man bei niedrigen Anfangsleistungen die bei der Exkursion freigesetzte Energie i.a. unterschätzen.

Die für die Untersuchung von Sekundärexkursionen während der Übergangsphase und Phase integraler Materialbewegung interessante Kurvenschar liegt in Abb.2.1.2 zwischen den Leistungskurven 0.1 -10

mal stationärer Leistung. (Siehe /5/). Dabei wird schon am Beispiel der Kurve entsprechend der Nominalleistung ( $n_0 = 1.0 \sim 760$  MW) deutlich, daß bei Annahme einer Gleichgewichtssituation bzgl. der Vorläuferkonzentrationen ( $C_i = \beta_i n_0 / \lambda_i$ ) die thermische Energiefreisetzung maximal um 10 Prozent unterschätzt wird, die Exkursionsenergetik also nicht entscheidend von der Vorläuferkonzentration abhängt.

Um die Energiefreisetzung während einer Sekundärexkursion möglichst genau zu bestimmen, wurde in /5/ so vorgegangen, daß im Anschluß an die Störfallanalyse der Einleitungsphase mit SAS3D /6/ (entsprechend dem Reaktivitätsverlauf während der neutronisch unterkritischen Phase) die Leistung und die Vorläuferkonzentrationen (6 Gruppen) bis zum Einsetzen der Sekundärexkursion vorausberechnet wurden.

Der Dopplereffekt wurde bei diesen Punktkinetikrechnungen voll mitberücksichtigt. Die vorausberechneten Werte für Leistung und Vorläufer am prompt kritischen Punkt dienten dann als Eingabeparameter für die Exkursionsrechnungen mit KADIS /5/.

Aus den Rechnungen zu Abb.2.1.2 kann wegen des relativ geringen Einflusses der Vorläuferkonzentration auf die Störfallenergetik auch geschlossen werden, daß die Berücksichtigung der Vorläufermitbewegung mit dem Kernmaterial keinen entscheidenden Einfluß auf die Exkursionsenergetik hat. Die Punktkinetikgleichungen (2.1.1) gelten in dieser Form nur unter der Annahme daß die prompten und verzögerten Neutronen an derselben räumlichen Stelle emittiert werden. Wegen der Kernmaterialumverteilungen in einem siedenden Brennstoff/Stahlgemisch werden insbesondere die verzögerten Neutronen der langlebigen Vorläufer jedoch an einem anderen Ort emittiert werden, sodaß die Gleichung 2.1.2 strenggenommen nicht gültig ist.

Es ist dabei zu beachten, daß die verzögerten Neutronen bei Berücksichtigung der Kernmaterialbewegung auch einen anderen "Einfluß" auf die Neutronenpopulation bekommen, da sich die Einflußfunktion  $\phi^+(\vec{r}, t)$  am Ort der eigentlichen Spaltung und am Ort der Emission des verzögerten Neutrons von einander unterscheiden wird. Die Mitbewegung der Vorläufer kann in den ortsabhängigen Kinetikgleichungen für die Vorläuferkonzentrationen /1,2/ durch einen Term der Form  $(\vec{v}(\vec{r}, t) \nabla C_i(\vec{r}, t))$  mitberücksichtigt werden.

## 2.2 REDUKTION DER VORLÄUFERKONZENTRATIONEN DURCH AUSDAMPF-PROZESSE AUS SIEDENDEN BRENNSTOFF/STAHLPOOLS

Die verzögerten Neutronen werden im wesentlichen von Vorläuferisotopen der Brom und Jodgruppe geliefert, wobei jedoch auch noch andere Elemente wie z.B. Rb, As, Se, Te, Sb, Cs, Y, etc zur Neutronenökonomie beitragen.

Aus Keepin /1/ (Tab. 4.19) können z.B. für U-235 die Halbwertzeiten und die diesen zugeordneten wichtigsten Vorläuferelemente entnommen werden,

Gruppe	Vorläuferzuordnung	Halbwertzeit (sec)
1	Br <sup>87</sup>	54.5
2	J <sup>137</sup> Br <sup>88</sup>	24.4 16.3
3	J <sup>138</sup> Br (89,90)	7.2 4.4
4	J <sup>139</sup> (+Br+?) Br (90-92) + (1.6-2.4sec, Cs, Sb or Te)	2.25 1.9
5	J <sup>140</sup> + Kr?)	0.5
6	(Br, Rb, As+?)	0.2

Tab.2.2.1 Vorläufertabelle aus Keepin (pp 122, 123) /1/  
(Klammer: nicht gesicherte Vorläuferzuordnung)

Während der Übergangsphase oder Phase integraler Materialbewegung können sich im Core ausgedehnte geschmolzene und siedende Brennstoff/Stahlbereiche ausbilden. Dampfen aus diesen siedenden Pools Teile der Spaltprodukte sowie der Vorläufer aus, so beeinflusst dies die neutronische Spaltleistung. Außerdem wird natürlich die Nachwärmeleistung, welche für das Aufsieden der Pools von entscheidender Bedeutung ist /11/ durch das Ausdampfen von Spaltprodukten reduziert. Die von den flüchtigen Spaltprodukten wie Xe, Kr, J, Cs, Sb, Te, gelieferte Nachwärme liegt dabei im Zeitraum bis 100 sec nach dem neutronischen Abschalten immerhin in der Größenordnung von 20 - 30% der gesamten produzierten Nachwärme.\* Die gasförmigen Anteile Xe und Kr tragen dabei zur Nachwärmeentwicklung etwa 6% bei.

\* —————

Selbst unter der Voraussetzung des völligen Ausdampfens der leichtflüchtigen Spaltprodukte kann der Pool in den ersten 100 sec nach dem nuklearen Ausschalten noch dispersiv bleiben. Untersucht man einen UO<sub>2</sub>-Pool /13/ mit einer Höhe H<sub>c</sub>, wobei die Brennstoffmasse gerade noch kritisch ist (H<sub>c</sub> = 11 cm in /5/ - der Stahlanteil schwimmt dabei auf der Pooloberfläche), so kann die Wärmemenge G, die für ein Aufsieden mit 50% Voidfraktion notwendig ist, wie folgt grob abgeschätzt werden /13/:

$$\left( \frac{V_s}{V_\infty} \right)_{\text{UO}_2} = \frac{H_c \cdot G_v}{\lambda \cdot \rho_v \cdot V_\infty}$$

V<sub>s</sub> ..... " superficial vapor velocity" an der Oberfläche des Pools

λ ..... Verdampfungswärme (500 cal/g)

ρ<sub>v</sub> ..... Dampfdichte (10<sup>-3</sup> g/cm<sup>3</sup>)

Mit dem Wert von V<sub>∞</sub> aus Gleichung 2.2.3 ergibt sich dann:

$$\left( \frac{V_s}{V_\infty} \right)_{\text{UO}_2} = 0.09 G_v H_c$$

(Fortsetzung nächste Seite)

Die Kinetik des Ausdampfens von Vorläuferkernen aus siedenden Brennstoff/Stahlmischungen stellt einen äußerst komplexen Vorgang dar. Die Menge und Geschwindigkeit der Freisetzung aus dem Pool hängt neben den Pooltemperaturen, den Siedepunkten der einzelnen Vorläufer und den im Pool herrschenden Dampfdrücken der einzelnen Komponenten von einer Reihe anderer Parameter ab, die sich z.T. gegenseitig beeinflussen.

Als Beispiele sollen das Nachwärmeniveau, die Strömungsform im Pool, die Dampfgeschwindigkeiten und Verdampfungsraten, die chemische Zusammensetzung des Pools sowie die der Spaltprodukte, die Verdampfungswärmen, die Oberflächenschichten des Pools etc. erwähnt werden. Nicht zuletzt hängen die Ausdampfprozesse auch von dem Störfallablauf selbst, der zu einem siedenden Pool führt, ab.

Neben den flüchtigen Vorläuferelementen, von denen die wichtigsten in Tab.:2.2.2 zusammengestellt sind, existieren auch schwerer- und nichtflüchtige Vorläufer (siehe etwa /15/ und /16/), welche nach dem Brennstoff/Stahlschmelzen entweder in oxidischer oder metallischer Phase vorliegen. Der Hauptanteil der verzögerten Neutronen wird allerdings von den flüchtigen Vorläuferelementen geliefert. Teilweise können diese Elemente jedoch z.B. auch mit Brennstoff wiederum stabile Verbindungen (Uranate) bilden /12/, so daß die Tab.: 2.2.2 in der die Schmelz- und Siedepunkte verschiedener flüchtiger Vorläufer und ihrer Verbindungen zusammengestellt sind, nur als Basis-Grundlage für die Diskussion von Vorläuferverlusten aus siedenden Brennstoff/Stahlmischungen dienen kann.

\* —————

Um eine Voidfraktion von 50% zu erreichen, was eine sichere Unterkritikalität garantieren würde, müßte nach /13/ der Ausdruck  $(V_g/V_\infty) = 1.8$  sein. Damit muß dann eine Wärmemenge  $G_v = 1.89$  (cal/cm<sup>3</sup> sec) zur Verdampfung aufgebracht werden.

Nach etwa 100 sec liegt die Nachwärme in einem abgebrannten Core (440 d) zwischen 2-4 Prozent der Nominalleistung. Für den SNR-300 beträgt dies 5-10 cal/cm<sup>3</sup> sec. Dampfen die flüchtigen Spaltprodukte völlig aus, so würde sich die Nachwärmeproduktion entsprechend auf 3.5 - 7 cal/cm<sup>3</sup> sec erniedrigen, läge aber immer noch um mindestens 50% über der für das Verdampfen notwendigen Wärmeproduktion.

Element/Verbindung	Schmelzpkt. /C°/	Siedepkt. /C°/	Element/Verbind.	Schmelzpkt./C°/	Siedepkt./C°/
<u>Br</u>	-7.2	58.78	<u>Cs</u>	28.5	690
BrO <sub>2</sub>	(zers.)		CsBrO <sub>3</sub>	420 (zers.)	
Br <sub>2</sub> O	-17		CsBr	636	1300
Br <sub>3</sub> O <sub>5</sub>	(stabil bei -40)		CsBr <sub>3</sub>	180	-
			CsJBr <sub>2</sub>	248	320(zers.)
<u>J</u>	113.5	184.35	CsJ	621	1280
JBr	50(subl)	116 (zers.)	CsJ <sub>5</sub>	73	-
JO <sub>2</sub>	75 (zers.)		Cs <sub>2</sub> O	490	400 (zers.)
JO <sub>4</sub>			Cs <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	400	650 (-O <sub>2</sub> )
J <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	300-350 (zers.)		Cs <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	400	-
			Cs O <sub>2</sub>	600	(zers.)
<u>Xe</u>	Edelgas		<u>Rb</u>	38.89	688
<u>Kr</u>	Edelgas		RbBr	682	1340
			RbBr <sub>3</sub>	140 (zers.)	
			RbJBr <sub>2</sub>	225	265(zers.)
<u>As</u>	817	613(subl)	RbJ	642	1300
AsBr <sub>3</sub>	32.8	221	RbJ <sub>3</sub>	190	-
AsJ <sub>2</sub>	136(zers.)		Rb <sub>2</sub> O	400(zers.)	
AsJ <sub>5</sub>	76	-	Rb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	570	1011(Zers.) <sup>*</sup>
AsJ <sub>3</sub>	146	403			
As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	360	-	<u>Se</u>	217	684.9
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	315	-	Se <sub>2</sub> Br <sub>2</sub>	-	227(zers.)
			Se <sub>2</sub> J <sub>2</sub>	100(zers.)	
<u>Sb</u>	630.5	1380	Se <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-	38.4
SbBr <sub>3</sub>	96.6	280	Se <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	118	180(zers.)
SbJ <sub>5</sub>	79	400.6	SeOBr <sub>2</sub>	41.6	217
SbJ <sub>3</sub>	170	401			
Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	380(-0)		<u>Te</u>	452	
Sb <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	930(-0)		TeBr <sub>2</sub>	210	
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	656	1550(subl.)	TeBr <sub>4</sub>	380	
Sb <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	611	-	TeJ <sub>4</sub>	280	
Sb <sub>2</sub> Te <sub>2</sub>	629	-	TeO <sub>2</sub>	733	
			TeO	370(zers.)	

Tab. 2.2.2

Schmelz- und Siedepunkte verschiedener  
Vorläuferelemente bzw. ihrer Verbindungen  
(Werte gelten bei 1 bar (bzw. 760 mmHg<sup>+</sup>))

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich ,daß die wichtigsten Vorläufer, also die Elemente der Brom und Jodgruppe, Siedepunkte besitzen, die weit unter den in siedendem Brennstoff/Stahlmischungen herrschenden Temperaturen von 3000-3500 K liegen. Neben den Edelgasen Xe und Kr werden also die Elemente Jod und Brom in derartigen siedenden Pools in voll flüchtiger Form vorliegen. Es ist allerdings zu beachten, daß die in Tab.2.2.2. angegebenen Siedepunkte für 1 bar gelten, in sog. "bottled up pools" (mit ihrem Potential für Sekundärkritikalitäten) aber höhere Drücke herrschen, sodaß sich die Siedepunkte also in Richtung höherer Temperaturen verschieben werden. (siehe auch /14/-Raoultsches Gesetz)

Da die Siedepunkte der übrigen reinen Elemente in Tab.2.2.2 zwischen 680-1390°C (bei 1 bar!) liegen, werden für die Elemente Cs, Rb, Te, Se, Sb dampfförmige und flüssige Anteile erwartet werden können, wobei die Dampfdrücke jedoch schon recht hoch liegen werden. Ähnliches gilt für einige der in Tab.2.2.2 zusammengestellten Verbindungen und Oxide. Aus Berechnungen von Gabelnick und Chasanov /12/ kann ersehen werden, daß für die reinen flüchtigen Elemente (außer Xe, Kr, J, Br, As) bei Temperaturen über 3000 K (unter Leistungsexkursionsbedingungen) weniger als 50% desjeweiligen Vorläuferelements in Dampfform vorliegen. Bei niedrigeren Brennstoffspitzentemperaturen liegen die nicht verdampften Anteile natürlich noch höher. Extrapoliert man diese Ergebnisse vorerst auf offene siedende Pools /5/ in der Übergangsphase oder Phase ausgedehnter Materialbewegung (vernachlässigbares Rekritikalitätspotential) so muß im Zeitraum von einigen Minuten mit einem weitgehenden Ausdampfen der flüchtigen Spaltprodukte (Vorläufer) gerechnet werden.

Ausdampfprozesse von Vorläufern und deren Einfluß auf die Exkursionsenergetik in der Übergangsphase oder Phase integraler Materialbewegung sind im wesentlichen nur bei sog. "bottled up pool situations" von Interesse /5/. Also bei einem Störfallscenario, welches zu einem durch Blockadebildung in den Blanketbereichen abgeschlossenen Poolssystem im aktiven

Corebereich führt, wobei eine derartigen Anordnung über den Zeitraum von einigen Sekunden existiert bis es z.B. durch eine weitere Exkursion (deren Energetik dann auch vom vorhandenen Vorläuferniveau abhängt) zu einer weitgehenden Entladung des Brennstoffs kommt und schließlich eine permanente unterkritische Corekonfiguration zurückbleibt. Im Falle eines offenen oder partiell offenen Pool-systems im Kernbereich führt eine kontinuierliche Entladung zur nuklearen Abschaltung und Ausdampfprozesse von Vorläufern haben für dieses Störfallszenario keine Relevanz.

Der tatsächliche Anteil der Vorläufer der durch Ausdampfen aus dem aktiven Bereich die Neutronenbilanz im Pool beeinflusst, wird also noch durch die weiteren Randbedingungen des "bottled up pool" bestimmt. Das Verdampfen erfolgt in dem abgeschlossenen Corebereich, wobei es in den kälteren Gebieten auch wieder zu Kondensationsprozessen kommt, die vorerst verdampften Vorläufer also den aktiven Bereich nur schwer verlassen und mit dem Pool z.T. auch wieder in Lösung gehen können (Henry'sches Gesetz /14/ ). Schließlich werden auch die Bewegungsprozesse des Pools selbst zu einem "reentrainment" und Einschluß der teilweise verdampften Spaltprodukte führen. Aus diesen Gründen wird der Anteil der tatsächlich aus dem aktiven Bereich pro Zeiteinheit verlorengegangenen Vorläufer bei einem "bottled-up pool" kleiner sein, als etwa auf Grund der Tab.2.2.2 und der Diskussion auf Seite 20 angenommen werden könnte.

Um eine grobe Abschätzung des Einflusses zu erhalten den das Ausdampfen der Vorläufer auf die Leistungs- und Vorläuferentwicklung in einem siedenden Pool hat, wurden die 6 Gleichungen für die Vorläufer (Glg. 2.1.1) noch durch einen Zusatzterm  $\theta_i C_i$  mit einer Art - "Zerfallskonstanten" erweitert, die den Wegtransport der Vorläufer aus dem Kernbereich durch die dort herrschende Dampfströmung berücksichtigt. (Siehe auch Seite 15 ). Es wird dann folgendes Gleichungssystem\* gelöst:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (2.2.1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) - \theta_i C_i(t) \quad (2.2.2)$$

$$\theta_i = \frac{V_D}{(H_C/2)} \left| \lambda_i n_i \right| \quad i=1 \dots 6$$

$V_D$  ..... Dampfgeschwindigkeit

$H_C$  ..... Corehöhe (96 cm)

$\eta_i$  ..... Anteil der Vorläufer ( $0 < \eta_i \leq 1$ ) der nach einer Zeitspanne  $\tau = \frac{H_C/2}{V_D}$  noch im Pool verblieben ist ( $\eta_i = n_i$  (thermohyd. Bedingungen d. Pools))

\* entspricht näherungsweise in der üblichen "inhour Gleichung" einer Verkleinerung von  $\beta_i \rightarrow \beta_i^*$  /1/

Der Anteil  $\eta_i$ , den die Dampfströmung nach der Zeitspanne  $\tau$  noch nicht aus dem Pool transportiert hat, wurde hier entsprechend der Diskussion auf Seite 21 in einer konservativen Abschätzung für den "bottled up pool" mit 50% ( $\eta_i = 0.5$ ) angesetzt. Um die Sensitivität der Ergebnisse bei einer weiteren Vergrößerung des Vorläuferverlustes zu untersuchen, wurden zusätzlich noch Rechnungen mit einem  $\eta$ -Wert von 0.25 (es befinden sich dann jeweils nach der Zeitspanne  $\tau$  nurmehr 25% der vorgegebenen Vorläuferkonzentrationen im Poolbereich) durchgeführt.

Die Dampfgeschwindigkeit  $V_D$  der siedenden Brennstoff/Stahlmischung im Core wurde mittels des "drift flux" Modells /10/ abgeschätzt. Unterstellt man eine Strömungsform des "Churn Turbulent" in diesen Pools /13/, so ergibt sich bei der konstant angenommenen Voidfraktion  $\alpha$  im Pool für die Dampfgeschwindigkeit  $V_D$  der Ausdruck:

$$V_D = \frac{\alpha}{1 - \alpha} V_\infty \quad (2.2.3)$$

$$V_\infty = 1,53 \left( \frac{g \cdot \sigma_l}{\rho_l} \right)^{1/4}$$

$V_\infty$  ..... Auftriebsgeschwindigkeit einer Einzeldampfblase

- |            |   |                           |                |
|------------|---|---------------------------|----------------|
| $g$        | = | 980 cm/sec <sup>2</sup>   |                |
| $\sigma_l$ | = | 450 dyn/cm                | } (Brennstoff) |
| $\rho_l$   | = | 8.5 g/cm <sup>3</sup>     |                |
| $\alpha$   | = | 50% mittlere Voidfraktion |                |

Bei einer 50 prozentigen Voidfraktion ergibt sich also im Pool eine mittlere Dampfgeschwindigkeit von etwa 23 cm/sec.

Nimmt man als obere Abschätzung an, daß der flüchtige Anteil der Vorläufer mit derselben Geschwindigkeit aus dem Poolbereich ausdampft, so ergibt sich für die Zeitkonstante  $\tau$  ein Wert von etwa 2 sec als Zeitspanne, in der ein flüchtiges Vorläuferelement aus der Poolmitte an den Poolrand transportiert werden könnte. Da sich nun bei dieser oberen Abschätzung dann die Vorläuferzahl entsprechend  $(n_j)^{t/\tau}$  vermindert, wären (wenn man annimmt, daß keine neuen Vorläufer gebildet werden) nach weniger als 1 Minute (und falls es nicht zwischendurch zu einer Sekundärexkursion kommt) fast alle Vorläuferkerne ausgedampft.

Um den Einfluß des Vorläuferausdampfens aus siedenden Brennstoff/Stahlmischungen auf die Energetik von prompt kritischen Sekundärexkursionen während der Übergangsphase bzw. Phase integraler Materialbewegung abzuschätzen, wurden zuerst mit dem Gleichungssystem 2.2.1 und 2.2.2 Punktkinetikrechnungen durchgeführt, mit denen der Leistungsverlauf und die Vorläuferkonzentrationen während der Phase starker Unterkritikalität im Core zwischen Primärexkursion in der Einleitungsphase bis zum Einsetzen einer erneuten prompt kritischen Leistungsexkursion bestimmt wurde. Als Anfangswerte für diese Kinetikrechnungen dienten Ergebnisse einer SAS3D Analyse für den Kühlmitteldurchsatzstörfall E in /6/. Während der Phase starker Unterkritikalität (Anfangsunterkritikalität = -13%, siehe /5/) fallen die neutronische Leistung und Vorläuferkonzentrationen stark ab und reduzieren sich noch weiter bei Annahme von Ausdampfprozessen aus dem dispergierten Brennstoff/Stahlgemisch im Core.

Der stärkere Leistungsabfall durch das Vorläuferausdampfen wird z.T. dadurch kompensiert, daß die Spaltprodukte parasitäre Neutronenabsorber darstellen, ihr Ausdampfen also in einer gewissen Anhebung des Reaktivitätsniveaus resultiert. Dieser kompensierende Effekt, der in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt wurde, führt am prompt kritischen Punkt zu etwas höheren als in Tab. 2.2.3 angegebenen Vorläufer- und Leistungsniveaus. Durch die hier gewählte pessimistische Modellierung werden also die Energiefreisetzung der Sekundärexkursionen (Tab. 2.2.4) überschätzt.

Kommt es nach einer gewissen Zeitspanne der Unterkritikalität zu Kernmaterialumverteilungen die eine weitere Leistungs-Exkursion auslösen (10 Sekunden entsprechen dabei etwa der Zeitspanne der Übergangsphase bzw. Phase integraler Materialbewegung bei LOF-Störfallscenarien im SNR-300 /5/), so steigen durch die Reaktivitätszufuhr die neutronische Leistung und Vorläuferkonzentrationen wieder an. Die Ergebnisse dieser Punktkinetikrechnungen sind in Tab.2.2.3 zusammengefaßt. Die einzelnen Spalten der Tabelle enthalten dabei die Werte für die Vorläuferkonzentrationen und nukleare Leistung beim Erreichen von prompter Kritikalität, wobei in den beiden letzten Spalten die entsprechenden Werte bei Berücksichtigung unterschiedlich stark angenommener Ausdampfprozesse ( $0.25 \leq \eta_1 \leq 0.5$ ) dargestellt werden.

Vorläufergruppen G	Anfangswerte aus der SAS3D Analyse für den LOF-Stör- fall E /6/	kein Vorläufer- ausdampfen	Vorläuferausdampfen	
		Anteil n der nach der Zeitspanne $\tau$ noch im Kern verbliebenen Vorläufer		
		$\eta_i = 1.00$	$\eta_i = 0.50$	$\eta_i = 0.25$
G1	8.8695 + 12	7.8679 + 12	2.8722 + 11	1.0399 + 10
G2	3.5819 + 13	2.6809 + 13	1.0808 + 12	4.3462 + 10
G3	1.0169 + 13	2.9728 + 12	2.0453 + 11	1.1645 + 10
G4	1.2941 + 13	7.9893 + 11	1.5580 + 11	1.1595 + 10
G5	3.6755 + 12	6.4670 + 10	2.6483 + 10	2.2215 + 09
G6	8.3308 + 11	1.3858 + 10	5.8438 + 09	5.0390 + 08
Nukleare Leist.	Startleistung  1.781 + 4 MW	Leistung am prompt kritischen Punkt  0.459 + 4 MW	Leistung am prompt krit. Punkt  0.199 + 4 MW	Leistung am prompt krit. Punkt  0.890 + 3 MW

Tab.: 2.2.3 Werte der nuklearen Leistung und der Vorläuferkonzentrationen beim Erreichen prompter Kritikalität mit und ohne Berücksichtigung des Vorläuferausdampfens (Zeitspanne der Unterkritikalität ab SAS3D Rechnung:  $t = 10$  sec)

Basierend auf den mit den Gleichungen 2.2.1 und 2.2.2 gewonnenen Anfangsbedingungen für Leistung und Vorläuferkonzentrationen (Tab. 2.2.3) wurden Exkursionsrechnungen mit dem Disassemblycode KADIS /8/ durchgeführt. Für diese Untersuchungen wurde dabei in Anlehnung an /5/ eine Reaktivitätsrampe von 30  $\beta$ /sec gewählt, welche sich dort aus der Analyse von energetischen Grenzfällen von Sekundärexkursionen ergab. Die Ergebnisse der Exkursionsrechnungen sind in Tab. 2.2.4 zusammengefaßt, wobei in der ersten Spalte kein Ausdampfen ( $\eta_i = 1.0$ ) und in den nächsten beiden Spalten verschieden starke Ausdampfprozesse ( $\eta_i = 0.5$  und  $0.25$ ) angenommen werden.

Durch die etwas niedrigeren Anfangsleistungen und Vorläuferkonzentrationen am prompt kritischen Punkt kommt es bei der Berücksichtigung des Vorläuferausdampfens zu einer geringfügigen Erhöhung der Energie im geschmolzenen Brennstoff, die jedoch sowohl beim Grenzfall mit 50 Prozent Vorläuferverlust nach jeder Zeitspanne  $\tau$  als auch beim zusätzlich untersuchten Parameterfall mit 75 Prozent Verlust noch unter 10 Prozent liegt. Dies gilt im gleichen Maße auch für höhere als im vorliegenden Bericht verwendete (30  $\beta$ /sec) Reaktivitätsrampen. Die Erhöhung der Energiefreisetzung wird teilweise noch dadurch kompensiert, daß es durch das Ausdampfen der Spaltprodukte gleichzeitig zu einer Verringerung der Neutronenabsorption kommt, wodurch das Reaktivitätsniveau und damit auch die neutronische Leistung und die Vorläuferkonzentrationen bis zum Eintritt einer Sekundärexkursion wieder angehoben werden. Dieser kompensierende Effekt wurde bei den Ergebnissen in Tab. 2.2.4 nicht berücksichtigt.

Der Einfluß des Prozesses des Vorläuferausdampfens auf die Exkursionsenergetik ist insgesamt als relativ gering anzusehen und wird durch die pessimistische Wahl vieler anderer Parameter bei den Analysen zu Sekundärkritikalitäten in /5/ abgedeckt.

	Dim.	kein Vorläuferausdampfen	Vorläuferausdampfen	
		Anteil $\eta_i$ der nach der Zeitspanne $\tau$ noch im Kern verbliebenen Vorläufer $\eta_i = 1.00$	$\eta_i = 0.50$	$\eta_i = 0.25$
Rampe	g/sec	30	30	30
Anfangsreaktivität	g	1	1	1
Anfangsleistung	MW	0.459 + 4	0.1999 + 4	0.890 + 3
Energie im geschmolz. Brennstoff	MWs	5265	5614	5752
$\bar{T}$	K	4460	4580	4633
$T_{max}$	K	5472	5966	6063
max. Reakt.	g	1.13	1.15	1.16
max. Leist.	MW	1.51 + 6	1.85 + 6	2.01 + 6

Tab.2.2.4 Ergebnisse der Exkursionsrechnungen mit KADIS mit und ohne Berücksichtigung des Vorläuferverlustes durch Verdampfen ( $\tau \sim 2$  sec)

### 3. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

---

Im vorliegenden Bericht wurde auf der Basis von Punktkinetikexkursionsrechnungen der Einfluß der Vorläuferkonzentrationen auf die Energetik von prompt kritischen nuklearen Leistungsexkursionen während der Übergangsphase bzw. Phase integraler Materialbewegung untersucht. Die Ergebnisse zeigen, daß die Exkursionsenergetik nur relativ schwach von den Vorläuferkonzentrationen abhängt. Die Vorläufer wirken dabei in den Punktkinetikgleichungen im überprompt kritischen Bereich als eine Art Fremdquelle. In den Störfallphasen in denen im Kernbereich geschmolzene oder siedende Brennstoff/Stahlmischungen auftreten, kann es zu einem erhöhten Ausdampfen von Teilen der Vorläufer aus dem aktiven Bereich kommen, da die Temperaturen des Brennstoffs dann teilweise sehr viel höher als die Siedpunkte der Vorläufer (und ihrer Verbindungen) liegen. Bei einer Sekundärexkursion während dieser Störfallphasen (Übergangsphase und Phase integraler Materialbewegung) setzt diese durch den Vorläuferverlust auf niedrigerem Leistungs- und Vorläuferniveau ein, was i.a. zu einer Erhöhung der Exkursionsenergetik führt. Wie die hier durchgeführten Rechnungen jedoch zeigen, ist die Zunahme der Energie im geschmolzenen Brennstoff selbst bei pessimistischer Beschreibung (kompensierende Effekte wurden nicht berücksichtigt) nur relativ gering.

#### 4. LITERATURVERZEICHNIS

/1/ Keepin, G.R.

Physics of Nuclear Kinetics  
Addison-Wesley Publishing Company, INC.  
Reading, Massachusetts (1965)

/2/ Hetrick, D.L.

Dynamics of Nuclear Reactors  
The University of Chicago Press  
Chicago (1971)

/3/ Bell, G.I., S. Glasstone

Nuclear Reactor Theory  
Van Nostrand Reinhold Company  
New York (1970)

/4/ Fröhlich, R., W. Maschek, P. Schmuck,

P. Royl, D. Struwe.  
Analyse schwerer hypothetischer Störfälle - Vorgehen und  
Anwendung auf Reaktorentwürfe  
KfK-Nachrichten, Jahrgang 10 3-4/78

/5/ Maschek, W., D. Struwe

Recriticality Considerations and Core Material Distribution in the Reactor Vessel of SNR-300 as Consequence of Unprotected Loss of Flow Transients in the Mark 1A Core  
ANS/ENS International Meeting of Fast Reactor Safety Technology, Seattle, August 1979

/6/ Royl, P., et al:

Analysis of Hypothetical Loss of Flow Accidents without Scram in the SNR-300 End of Life Mark 1A Core using the SAS3D Code System  
ANS/ENS International Meeting of Fast Reactor Safety Technology, Seattle, August 1979

- /7/ Bell, C.R., P.B. Bleiweis, J.E. Boudreau, et al:  
SIMMER-I, An Sn Implicit, Multifield, Multicomponent  
Eulerian Recriticality Code for LMFBR Disrupted Core  
Analysis  
LA NUREG-6447-MS (1977)
- /8/ Schmuck, P., G. Jacobs, G. Arnecke:  
KADIS: Ein Computerprogramm zur Analyse der Kernzer-  
legungsphase bei hypothetischen Störfällen in  
schnellen, natriumgekühlten Brutreaktoren  
KfK 2497 (1977)
- /9/ Handbook of Chemistry and Physics 52<sup>nd</sup> Edition (1971-1972)  
The Chemical Rubber Company  
Cleveland, Ohio
- /10/Wallis, G.B.  
One-dimensional Two-phase Flow  
Mc Graw Hill Book Co., Inc, (1969)
- /11/Fauske, H.K  
The Role of Core-disruptive Accidents in Design and  
Licensing of LMFBRs  
Nucl. Safety 17, 550 (1976)
- /12/Gabelnick, S.D., M.G. Chasanov  
Calculational Approach to the Estimation of Fuel  
and Fission Product Vapor Pressures and Oxidation States  
to 6000K  
ANL - 7867 (Oct. 72)
- /13/Kazimi, M. S  
Void Distribution in Boiling Pools with  
Generation  
Nucl. Science Eng. 65, 17 (1978)

/14/Schwabe, K.

Physikalische Chemie Bd 1

Akademieverlag, Berlin (1975)

/15/ Alexander, D.R., Y.K. Peng

Calculated Time-Dependent Delayed Neutron Group  
Yields for Thermal-Neutron Fission of Uranium-235

Nucl.Sci.Eng. 70,184 (1979)

/16/ Rider, B.F., M.E. Meek

Compilation of Fission Product Yields, '78

NEDO-12154-2E (1978)

ANHANG 1

KINETISCHE PARAMETER  
LEISTUNGSVERTEILUNGEN UND  
MATERIALWERTKURVEN

---

Für die Exkursionsrechnungen mit KADIS wurden die in diesem Anhang näher spezifizierten kinetischen Parameter, Leistungsverteilungen und Materialwertkurven benutzt. Die einzelnen Datenfelder können anhand der Abb.A.1.1 den einzelnen KADIS-Zonen zugeordnet werden.

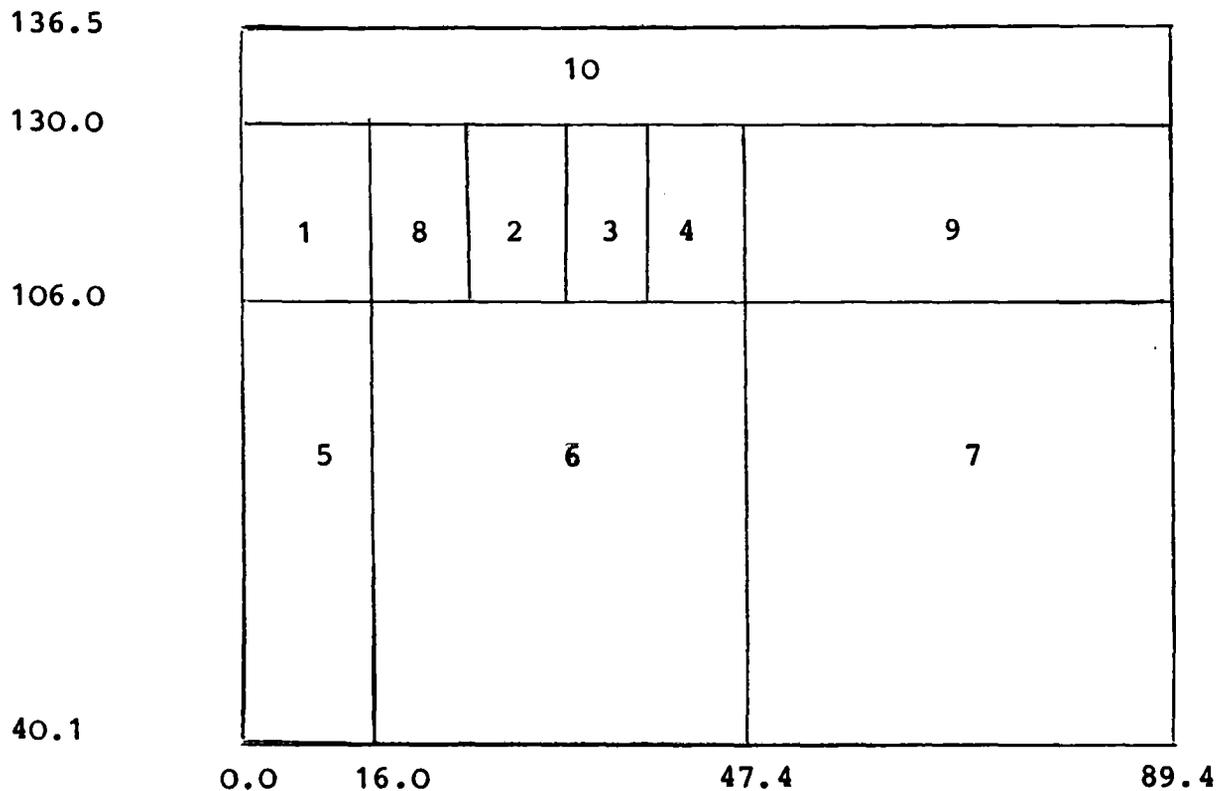


Bild A.1.1 Zuordnung der KADIS-Zonen im Corebereich

verz. Gruppe	$\lambda_{\text{eff}}$	$\beta_{\text{eff}}$
1	0.01295	0.75180-4
2	0.03131	0.67565-3
3	0.13488	0.56367-3
4	0.34404	0.11018-2
5	1.3727	0.4644-3
6	3.7691	0.15318-3
gesamt	-	0.30350-2
$l = 0.4621 \times 10^{-6} \text{ sec}$		

Tab. A.1.1 Kinetische Parameter (stationäre Werte)

KADIS-Zone	$A \times 10^{-4}$
1	- 0.32377
2	- 0.46143
3	- 0.22021
4	- 0.52067
5	- 0.35352
6	- 2.09240
7	- 2.46131
8	- 0.19894
9	- 0.80431
10	- 0.24633

Tab. A.1.2 Dopplerkonstanten  $\frac{dk}{dT} = \frac{A}{T}$  für die transienten Exkursionsrechnungen mit KADIS.

POWER DENSITY DISTRIBUTION--NORMALIZED

	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	0.124C-07	0.125D-07	0.109C-07	0.116D-07	0.651D-08	0.103D-07	0.929D-08	0.751D-08	0.755C-08
3	0.343C-07	0.340D-07	0.287D-07	0.314C-07	0.174D-07	0.282C-07	0.255D-07	0.201D-07	0.209D-07
4	0.339C-06	0.331D-06	0.243D-06	0.259D-06	0.7C8D-07	0.273D-06	0.250C-06	0.176D-06	0.207D-06
5	0.358D-06	0.390D-06	0.372C-06	0.350C-06	0.331D-06	0.316D-06	0.291D-06	0.261D-06	0.236D-06
6	0.456D-06	0.448D-06	0.420D-06	0.4C8D-06	0.387D-06	0.364C-06	0.333D-06	0.298D-06	0.265D-06
7	0.508D-06	0.500D-06	0.481C-06	0.457D-06	0.434D-06	0.407D-06	0.370D-06	0.330D-06	0.297D-06
8	0.553D-06	0.544D-06	0.523D-06	0.497C-06	0.471D-06	0.441D-06	0.400D-06	0.357D-06	0.321C-06
9	0.588C-06	0.579D-06	0.556D-06	0.527D-06	0.500D-06	0.466D-06	0.422C-06	0.375D-06	0.337D-06
10	0.613C-06	0.603D-06	0.579C-06	0.548D-06	0.518C-06	0.482D-06	0.435D-06	0.386D-06	0.346D-06
11	0.629D-06	0.617D-06	0.591D-06	0.559C-06	0.527D-06	0.489C-06	0.439D-06	0.387D-06	0.347D-06
12	0.637C-06	0.622D-06	0.593C-06	0.561D-06	0.528D-06	0.486D-06	0.431C-06	0.379D-06	0.338D-06
13	0.119D-05	0.115D-05	0.582C-06	0.104C-05	0.634D-06	0.892C-06	0.413D-06	0.363D-06	0.324D-06
14	0.115D-05	0.110D-05	0.555D-06	0.953D-06	0.604D-06	0.847C-06	0.391C-06	0.344D-06	0.307D-06
15	0.105D-05	0.101D-05	0.509C-06	0.9C9D-06	0.554D-06	0.778D-06	0.362D-06	0.320D-06	0.286D-06
16	0.899D-06	0.876D-06	0.448C-06	0.791C-06	0.482D-06	0.688D-06	0.328D-06	0.291D-06	0.261D-06
17	0.400C-06	0.394D-06	0.381D-06	0.355D-06	0.334C-06	0.316C-06	0.292C-06	0.259D-06	0.232D-06
18	0.714C-07	0.707D-07	0.238C-06	0.640D-07	0.346C-07	0.591D-07	0.262D-06	0.172D-06	0.206D-06
19	0.351D-07	0.342D-07	0.129D-06	0.329C-07	0.190D-07	0.314C-07	0.148D-06	0.938D-07	0.114D-06
20	0.117C-07	0.113D-07	0.814C-08	0.117D-07	0.707D-08	0.110D-07	0.920C-08	0.571C-08	0.698D-08
	11	12	13	14					
2	0.619D-08	0.443D-08	0.427D-08	0.190D-08					
3	0.175C-07	0.126D-07	0.121C-07	0.525D-08					
4	0.226D-06	0.165D-06	0.224C-07	0.926C-08					
5	0.201C-06	0.151D-06	0.311D-07	0.124D-07					
6	0.229D-06	0.174D-06	0.377C-07	0.151C-07					
7	0.253C-06	0.193D-06	0.427D-07	0.171C-07					
8	0.273D-06	0.208D-06	0.464C-07	0.187D-07					
9	0.286D-06	0.219D-06	0.489C-07	0.197C-07					
10	0.294D-06	0.224D-06	0.501D-07	0.202D-07					
11	0.294C-06	0.224D-06	0.501C-07	0.202D-07					
12	0.287D-06	0.218D-06	0.487D-07	0.196C-07					
13	0.275C-06	0.209D-06	0.465D-07	0.187D-07					
14	0.260D-06	0.198D-06	0.438C-07	0.176D-07					
15	0.242D-06	0.184D-06	0.404D-07	0.162C-07					
16	0.222C-06	0.168D-06	0.362C-07	0.145D-07					
17	0.198D-06	0.150D-06	0.310C-07	0.124C-07					
18	0.366D-07	0.174D-06	0.234D-07	0.565D-08					
19	0.190D-07	0.101D-06	0.131C-07	0.561D-08					
20	0.629D-08	0.476D-08	0.459D-08	0.203C-08					

Tab. A.1.3 Normierte Leistungsdichteverteilung für die transienten Exkursionsrechnungen mit KADIS.

Tab. A.1.4  
 Totale Materialwertverteilung ( $\Delta K/K/cm^3$ )  
 für die KADIS-Zonen im Corebereich.

INPUT MATERIAL WORTH FOR REGION 1

0.639920-06	0.836930-06	0.828050-06	0.801580-06	0.764910-06
0.840390-06	0.837340-06	0.828280-06	0.801570-06	0.760720-06
0.829810-06	0.826660-06	0.817260-06	0.789210-06	0.744450-06
0.808610-06	0.805280-06	0.795360-06	0.765480-06	0.717970-06
0.778320-06	0.774770-06	0.764180-06	0.732220-06	0.682670-06
0.741700-06	0.737890-06	0.726520-06	0.692280-06	0.639570-06
0.702550-06	0.698490-06	0.686250-06	0.648510-06	0.589510-06
0.665430-06	0.661320-06	0.648810-06	0.608620-06	0.533660-06
0.634530-06	0.630500-06	0.618040-06	0.575410-06	0.479620-06

R LATTICE (CM)

0.0 0.30380+01 0.60750+01 0.11070+02 0.16070+02

Z LATTICE (CM)

0.10600+03 0.10900+03 0.11200+03 0.11500+03 0.11800+03 0.12110+03 0.12410+03 0.12710+03 0.13010+03

INPLT MATERIAL WORTH FOR REGION 2

0.684580-06	0.658200-06	0.625740-06
0.675240-06	0.654090-06	0.625420-06
0.659250-06	0.640300-06	0.612450-06
0.636160-06	0.618470-06	0.590990-06
0.606970-06	0.590380-06	0.563080-06
0.573120-06	0.558050-06	0.530280-06
0.536690-06	0.524380-06	0.494430-06
0.501410-06	0.495000-06	0.455930-06
0.476490-06	0.471690-06	0.414860-06

R LATTICE (CM)

0.26480+02 0.30150+02 0.33830+02

Z LATTICE (CM)

0.10600+03 0.10900+03 0.12200+03 0.11500+03 0.11800+03 0.12110+03 0.12410+03 0.12710+03 0.13010+03

INPUT MATERIAL WORTH FOR REGION 3

0.391360-06	0.371190-06	0.350530-06
0.389200-06	0.366340-06	0.343500-06
0.385070-06	0.362260-06	0.340670-06
0.379680-06	0.356950-06	0.335440-06
0.373170-06	0.350160-06	0.328080-06
0.366320-06	0.342640-06	0.319720-06
0.360180-06	0.335480-06	0.312560-06
0.355390-06	0.328650-06	0.311010-06
0.351440-06	0.324030-06	0.319520-06

R LATTICE (CM)

0.33830+02 0.36830+02 0.39840+02

Z LATTICE (CM)

0.10600+03 0.10900+03 0.11200+03 0.11500+03 0.11800+03 0.12110+03 0.12410+03 0.12710+03 0.13010+03

INPLT MATERIAL WORTH FCR REGION 6

0.22420D-06	0.21863D-06	0.20029D-06	0.20161D-06	0.23292D-06	0.21948D-06
0.17825D-06	0.14535D-06	0.13874D-06			
0.23911D-06	0.23287D-06	0.21959D-06	0.21487D-06	0.22270D-06	0.21295D-06
0.18876D-06	0.16529D-06	0.15470D-06			
0.25588D-06	0.24841D-06	0.23762D-06	0.23100D-06	0.22500D-06	0.21482D-06
0.20074D-06	0.18383D-06	0.17106D-06			
0.27327D-06	0.26479D-06	0.25371D-06	0.24515D-06	0.23541D-06	0.22533D-06
0.21384D-06	0.19919D-06	0.18580D-06			
0.29063D-06	0.28124D-06	0.26926D-06	0.25951D-06	0.24849D-06	0.23834D-06
0.22747D-06	0.21337D-06	0.19955D-06			
0.20765D-06	0.29744D-06	0.28457D-06	0.27406D-06	0.26237D-06	0.25201D-06
0.24110D-06	0.22688D-06	0.21257D-06			
0.22408D-06	0.31316D-06	0.29952D-06	0.28842D-06	0.27622D-06	0.26554D-06
0.25437D-06	0.23975D-06	0.22488D-06			
0.33970D-06	0.32817D-06	0.31384D-06	0.30225D-06	0.28957D-06	0.27851D-06
0.26697D-06	0.25185D-06	0.23638D-06			
0.35428D-06	0.34222D-06	0.32728D-06	0.31523D-06	0.30209D-06	0.29064D-06
0.27870D-06	0.26301D-06	0.24692D-06			
0.26764D-06	0.35508D-06	0.33960D-06	0.32714D-06	0.31355D-06	0.30171D-06
0.28935D-06	0.27309D-06	0.25638D-06			
0.27955D-06	0.36656D-06	0.35060D-06	0.33777D-06	0.32377D-06	0.31157D-06
0.29880D-06	0.28197D-06	0.26464D-06			
0.38985D-06	0.37646D-06	0.36010D-06	0.34655D-06	0.33261D-06	0.32009D-06
0.20695D-06	0.28958D-06	0.27163D-06			
0.29838D-06	0.38460D-06	0.36793D-06	0.35458D-06	0.33999D-06	0.32722D-06
0.21378D-06	0.29591D-06	0.27733D-06			
0.40503D-06	0.39080D-06	0.37395D-06	0.36054D-06	0.34586D-06	0.33296D-06
0.31933D-06	0.30105D-06	0.28182D-06			
0.40971D-06	0.39484D-06	0.37796D-06	0.36473D-06	0.35017D-06	0.33734D-06
0.22375D-06	0.30529D-06	0.28533D-06			
0.41248D-06	0.39644D-06	0.37966D-06	0.36708D-06	0.35293D-06	0.34031D-06
0.22721D-06	0.30929D-06	0.28852D-06			
0.41388D-06	0.39523D-06	0.37848D-06	0.36771D-06	0.35425D-06	0.34140D-06
0.22961D-06	0.31475D-06	0.29339D-06			
0.41752D-06	0.39143D-06	0.37462D-06	0.36809D-06	0.35500D-06	0.33792D-06
0.32931D-06	0.32840D-06	0.30697D-06			

R LATTICE (CM)

0.1607D+02 0.2128D+02 0.2648D+02 0.3015D+02 0.3383D+02 0.3683D+02 0.3984D+02 0.4364D+02 0.4745D+02

Z LATTICE (CM)

0.4018D+02 0.4405D+02 0.4792D+02 0.5180D+02 0.5567D+02 0.5954D+02 0.6341D+02 0.6728D+02 0.7115D+02 0.7503D+02  
 0.7890D+02 0.8277D+02 0.8664D+02 0.9051D+02 0.9439D+02 0.9826D+02 0.1021D+03 0.1060D+03

INPLT MATERIAL WORTH FOR REGION 4

0.56026C-06 0.52145D-06 0.48515D-06  
0.55631D-06 0.52365D-06 0.48943C-06  
0.54463D-06 0.51290D-06 0.47744D-06  
0.52492C-06 0.49252D-06 0.45577C-06  
0.49855D-06 0.46503D-06 0.42692C-06  
0.46743D-06 0.43234D-06 0.35211D-06  
0.43419D-06 0.39669D-06 0.35184C-06  
0.40306D-06 0.36203D-06 0.30591D-06  
0.37758D-06 0.33005D-06 0.25791D-06

R LATTICE (CM)

0.3984D+02 0.4364D+02 0.4745D+02

Z LATTICE (CM)

0.1060D+03 0.1090D+03 0.1120D+03 0.1150D+03 0.1180D+03 0.1211D+03 0.1241D+03 0.1271D+03 0.1301D+03

INPUT MATERIAL WORTH FOR REGION 5

0.22260D-06 0.22224D-06 0.22127C-06 0.21970C-06 0.22420C-06  
0.24263D-06 0.24232D-06 0.24146D-06 0.23936D-06 0.23911D-06  
0.26340D-06 0.26309D-06 0.26220C-06 0.25958D-06 0.25588C-06  
0.28347D-06 0.28311D-06 0.28202D-06 0.27865D-06 0.27327C-06  
0.30277D-06 0.30233D-06 0.30105D-06 0.29704D-06 0.29063D-06  
0.32125D-06 0.32076D-06 0.31930C-06 0.31479D-06 0.30765C-06  
0.33885D-06 0.33832D-06 0.33672D-06 0.33180C-06 0.32408D-06  
0.35544D-06 0.35487D-06 0.35317C-06 0.34791D-06 0.33970D-06  
0.37088D-06 0.37028D-06 0.36848C-06 0.36293C-06 0.35428C-06  
0.38500D-06 0.38437D-06 0.38248D-06 0.37666D-06 0.36764D-06  
0.39765D-06 0.39699D-06 0.39501C-06 0.38893C-06 0.37955D-06  
0.40870D-06 0.40801D-06 0.40594D-06 0.39960D-06 0.38985C-06  
0.41809D-06 0.41736D-06 0.41519D-06 0.40854D-06 0.39838D-06  
0.42580D-06 0.42504D-06 0.42275C-06 0.41571C-06 0.40503D-06  
0.43196D-06 0.43114D-06 0.42870D-06 0.42117D-06 0.40971D-06  
0.43682D-06 0.43596D-06 0.43336C-06 0.42522D-06 0.41248D-06  
0.44101D-06 0.44009D-06 0.43734C-06 0.42866D-06 0.41388C-06  
0.44536D-06 0.44441D-06 0.44164D-06 0.43394D-06 0.41752D-06

R LATTICE (CM)

0.0 0.3038D+01 0.6075D+01 0.1107D+02 0.1607D+02

Z LATTICE (CM)

0.4018D+02 0.4405D+02 0.4792D+02 0.5180D+02 0.5567D+02 0.5954D+02 0.6341D+02 0.6728D+02 0.7115D+02 0.7503D+02  
0.7890D+02 0.8277D+02 0.8664D+02 0.9051D+02 0.9439D+02 0.9826C+02 0.1021D+03 0.1060D+03

INPLT MATERIAL WORTH FOR REGION 7

0.138740-06	0.133610-06	0.128860-06	0.116750-06	0.100380-06	0.925030-07
0.868100-07	0.773960-07	0.695540-07	0.659480-07	0.723050-07	
0.154700-06	0.145470-06	0.136590-06	0.125420-06	0.112040-06	0.104270-06
0.977290-07	0.862790-07	0.765130-07	0.681410-07	0.636840-07	
0.171060-06	0.158770-06	0.146680-06	0.135100-06	0.123070-06	0.115430-06
0.108380-06	0.952050-07	0.835380-07	0.727220-07	0.634070-07	
0.185800-06	0.171760-06	0.157970-06	0.145600-06	0.123700-06	0.125830-06
0.118310-06	0.103730-06	0.904420-07	0.779920-07	0.668880-07	
0.199550-06	0.184400-06	0.169450-06	0.156600-06	0.143990-06	0.135710-06
0.127700-06	0.111880-06	0.972590-07	0.836220-07	0.715940-07	
0.212570-06	0.196560-06	0.180670-06	0.167110-06	0.153840-06	0.145080-06
0.136580-06	0.119640-06	0.103900-06	0.893370-07	0.766230-07	
0.224880-06	0.208080-06	0.191350-06	0.177070-06	0.163110-06	0.153870-06
0.144880-06	0.126920-06	0.110220-06	0.948630-07	0.815620-07	
0.236380-06	0.218810-06	0.201280-06	0.186300-06	0.171650-06	0.161950-06
0.152500-06	0.133630-06	0.116070-06	0.100010-06	0.861750-07	
0.246920-06	0.228600-06	0.210290-06	0.194640-06	0.179330-06	0.169190-06
0.159320-06	0.139610-06	0.121310-06	0.104620-06	0.902930-07	
0.256380-06	0.237310-06	0.218250-06	0.201960-06	0.186020-06	0.175480-06
0.165220-06	0.144750-06	0.125790-06	0.108560-06	0.937890-07	
0.264640-06	0.244830-06	0.225030-06	0.208120-06	0.191600-06	0.180670-06
0.170060-06	0.148920-06	0.129410-06	0.111710-06	0.965580-07	
0.271630-06	0.251080-06	0.230530-06	0.213020-06	0.195940-06	0.184680-06
0.173750-06	0.152050-06	0.132060-06	0.113980-06	0.985220-07	
0.277330-06	0.255990-06	0.234680-06	0.216560-06	0.198970-06	0.187400-06
0.176190-06	0.154020-06	0.133660-06	0.115300-06	0.996210-07	
0.281820-06	0.259580-06	0.237410-06	0.218680-06	0.200580-06	0.188740-06
0.177310-06	0.154770-06	0.134160-06	0.115630-06	0.998200-07	
0.285330-06	0.261910-06	0.238680-06	0.219270-06	0.200710-06	0.188620-06
0.177020-06	0.154250-06	0.133520-06	0.114540-06	0.991030-07	
0.288520-06	0.263070-06	0.238390-06	0.218230-06	0.199240-06	0.186590-06
0.175290-06	0.152440-06	0.131730-06	0.113240-06	0.974830-07	
0.293390-06	0.263030-06	0.236260-06	0.215380-06	0.196090-06	0.183780-06
0.172070-06	0.149330-06	0.128820-06	0.110550-06	0.949540-07	
0.306970-06	0.260280-06	0.231630-06	0.210430-06	0.191170-06	0.178960-06
0.167380-06	0.144980-06	0.124840-06	0.106540-06	0.916980-07	

R LATTICE (CM)

0.47450+02 0.51730+02 0.56010+02 0.59720+02 0.63430+02 0.65550+02 0.68470+02 0.73720+02 0.78980+02 0.84240+02  
0.89500+02

Z LATTICE (CM)

0.40180+02 0.44050+02 0.47920+02 0.51800+02 0.55670+02 0.59540+02 0.63410+02 0.67280+02 0.71150+02 0.75030+02  
0.78900+02 0.82770+02 0.86690+02 0.90510+02 0.94390+02 0.98260+02 0.10210+03 0.10600+03

INPLT MATERIAL WORTH FOR REGION 8

0.417520-06 0.391430-06 0.374620-06  
 0.417170-06 0.388390-06 0.364020-06  
 0.417660-06 0.388130-06 0.366670-06  
 0.419310-06 0.389610-06 0.370920-06  
 0.421430-06 0.391810-06 0.376190-06  
 0.422820-06 0.393130-06 0.382570-06  
 0.421620-06 0.390790-06 0.390890-06  
 0.415500-06 0.379250-06 0.404220-06  
 0.362230-06 0.347800-06 0.372810-06

R LATTICE (CM)

0.16070+02 0.21280+02 0.26480+02

Z LATTICE (CM)

0.10600+03 0.10900+03 0.11200+03 0.11500+03 0.11800+03 0.12110+03 0.12410+03 0.12710+03 0.13010+03

INPUT MATERIAL WORTH FOR REGION 9

0.206970-06 0.260280-06 0.231630-06 0.210430-06 0.191170-06 0.178960-06  
 0.167380-06 0.144980-06 0.124840-06 0.106940-06 0.916980-07  
 0.281550-06 0.251850-06 0.225700-06 0.205070-06 0.186150-06 0.174140-06  
 0.162770-06 0.140790-06 0.121060-06 0.103540-06 0.886330-07  
 0.271460-06 0.244090-06 0.213650-06 0.198590-06 0.180170-06 0.168470-06  
 0.157380-06 0.135950-06 0.116740-06 0.996910-07 0.851870-07  
 0.263120-06 0.235620-06 0.210560-06 0.191150-06 0.173360-06 0.162060-06  
 0.151320-06 0.130550-06 0.111930-06 0.954500-07 0.814310-07  
 0.253750-06 0.225850-06 0.201400-06 0.182820-06 0.165850-06 0.155020-06  
 0.144710-06 0.124660-06 0.106710-06 0.908910-07 0.774570-07  
 0.242530-06 0.214420-06 0.191110-06 0.173710-06 0.157770-06 0.147520-06  
 0.137680-06 0.118380-06 0.101110-06 0.860930-07 0.733980-07  
 0.228960-06 0.203920-06 0.179700-06 0.163970-06 0.149320-06 0.139770-06  
 0.130450-06 0.111810-06 0.951530-07 0.811400-07 0.694770-07  
 0.212100-06 0.184730-06 0.167320-06 0.153860-06 0.140720-06 0.132030-06  
 0.123340-06 0.105960-06 0.887670-07 0.761170-07 0.661110-07  
 0.183450-06 0.164940-06 0.154510-06 0.143870-06 0.132150-06 0.124600-06  
 0.117000-06 0.982840-07 0.816970-07 0.710970-07 0.642080-07

R LATTICE (CM)

0.47450+02 0.51730+02 0.56010+02 0.59720+02 0.63430+02 0.65950+02 0.68470+02 0.73720+02 0.78980+02 0.84240+02  
 0.89500+02

Z LATTICE (CM)

0.10600+03 0.10900+03 0.11200+03 0.11500+03 0.11800+03 0.12110+03 0.12410+03 0.12710+03 0.13010+03

INPLT MATERIAL WORTH FCR REGION 10

0.34307D-06	0.34122D-06	0.33575D-06	0.32069D-06	0.36223D-06	0.34780C-06
0.37281D-06	0.28874D-06	0.25932D-06	0.25178C-06	0.23348D-06	0.15496D-06
0.18345D-06	0.16494D-06	0.15451C-06	0.14387C-06	0.13215D-06	0.12460C-06
0.11700C-06	0.98284D-07	0.81697D-07	0.71097D-07	0.64208D-07	
0.22567D-06	0.32460D-06	0.32145C-06	0.31253D-06	0.30617D-06	0.30404D-06
0.30269D-06	0.27612D-06	0.26568D-06	0.25127D-06	0.21946C-06	0.18242C-06
0.15753D-06	0.14748D-06	0.14240D-06	0.13443D-06	0.12289D-06	0.11693D-06
0.11303D-06	0.91408D-07	0.72761D-07	0.65807C-07	0.66311C-07	
0.21063D-06	0.31035D-06	0.30561D-06	0.30666C-06	0.28378D-06	0.26539C-06
0.27299D-06	0.27215C-06	0.27649D-06	0.25244C-06	0.20873D-06	0.17281D-06
0.14371D-06	0.13114D-06	0.13297C-06	0.12625C-06	0.11320C-06	0.11220C-06
0.11515D-06	0.84157D-07	0.62223D-07	0.62281D-07	0.78232D-07	

R LATTICE (CM)

0.0	0.3038D+01	0.6975D+C1	0.1107D+02	0.1607D+C2	0.2128D+02	0.2648C+02	0.3015D+02	0.3383D+02	0.3683D+02
0.3984D+02	0.4364D+02	0.4745D+02	0.5173D+02	0.5672D+02	0.5972C+02	0.6343D+02	0.6595D+02	0.6847D+02	0.7372D+02
0.7898D+02	0.8424D+02	0.8950D+02							

Z LATTICE (CM)

0.1301D+C3	0.1333D+03	0.1365D+C3
------------	------------	------------