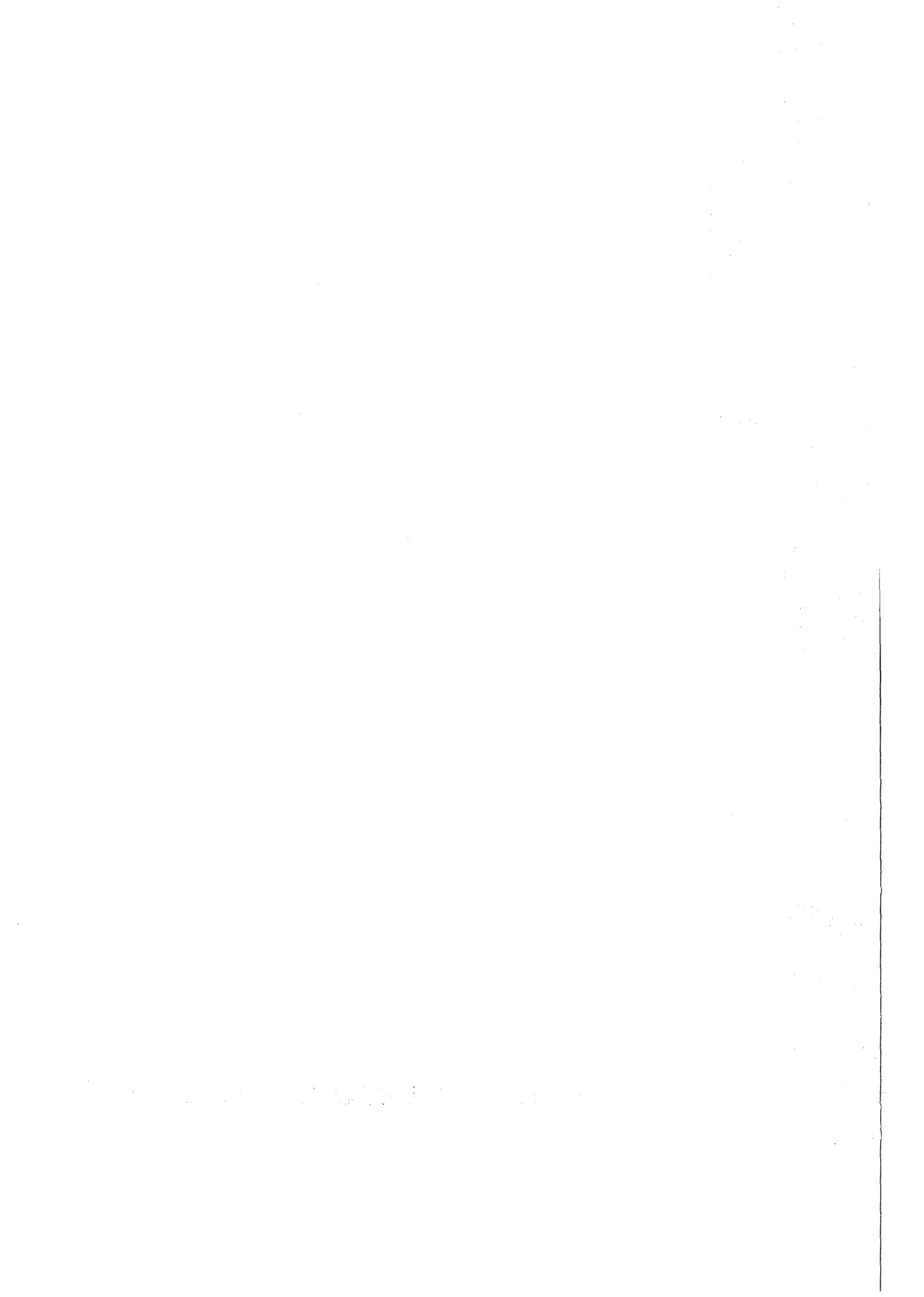


KfK 4178
Februar 1987

Inhärent sicheres SNR-Abschaltsystem mit Curiepunkt-gesteuerter Sensor/Schaltereinheit

K. Müller, P. Norajitra, H. Reiser
Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Kernforschungszentrum Karlsruhe



Kernforschungszentrum Karlsruhe
Institut für Material- und Festkörperforschung

Projekt Schneller Brüter

KfK 4178

Inhärent sicheres SNR-Abschaltsystem mit
Curiepunkt-gesteuerter Sensor/Schaltereinheit

K. Müller, P. Norajitra, H. Reiser

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Z u s a m m e n f a s s u n g :

Es wurde das Konzept eines inhärent sicher wirkenden Abschaltsystems zum Einsatz in natriumgekühlten schnellen Brütern entwickelt. Die inhärente Abschaltung bei einem unzulässigen Anstieg der Natriumtemperatur am Core-Austritt wird dadurch ausgelöst, daß die Stromversorgung von elektromagnetischen Absorberelement-Haltekupplungen durch Curiepunkt-gesteuerte Sensor /Schaltereinheiten unterbrochen wird. Diese Schalter sind unabhängig von den Abschaltelementen über geeigneten Brennelementpositionen angeordnet.

Im Vergleich zu anderen derartigen Systemen werden sehr kurze Ansprechzeiten erreicht. Eine prototypische Schaltereinheit wurde bereits umfangreichen Tests unterzogen. Diese Versuche bei quasistatischen Temperaturen bestätigen, daß die Schaltung in einem sehr eng begrenzten Temperaturbereich erfolgt.

Inherently Safe SNR Shutdown System with Curie Point Controlled Sensor/Switch Unit

A b s t r a c t :

The concept of an inherently safe shutdown system was developed for use in liquid metal-cooled fast breeder reactors. Inherent shutdown due to increase in the sodium temperature at the core outlet is triggered by interruption of the current supply to the electromagnet coupling of absorber elements via curie point controlled sensor/switch units. These switches are arranged above suitable fuel element positions and spatially independent of the shutdown elements.

Compared with other similar systems very short response times are achieved. A prototype switch unit has already undergone extensive testing. These tests have confirmed that switching takes place in a very narrow temperature range.

<u>Inhaltsverzeichnis:</u>	<u>Seite</u>
1 Einführung	1
2 Konzeptbeschreibung	2
3 Auslegung der Abschaltelinrichtung	3
3.1 Materialeigenschaften	4
3.2 Auslegung des Schalter-Magnetkreises	5
3.3 Auslegung der Absorberstab-Haltekupplung	8
3.4 Transientes Verhalten der Schaltereinheit	9
4 Experimente	10
4.1 Langzeittest	10
4.2 Bestrahlungsexperiment in KNK II	11
5 Zusammenfassung, Beurteilung des Konzeptes	13

1 Einführung

Bei natriumgekühlten schnellen Reaktoren ist die Zuverlässigkeit der Reaktorabschalteinrichtungen von besonderer Bedeutung für die Behandlung des Kernschmelzstörfalles. Daher werden gegenwärtig bei der Planung von Schnellen Brütern zwei unabhängige und diversitäre Abschaltssysteme vorgesehen, und es werden Anstrengungen unternommen, eines dieser Systeme inhärent sicher zu gestalten.

Definitionsgemäß muß ein inhärent sicheres Abschaltssystem die Abschaltung des Reaktors auch dann sicherstellen, wenn alle Reaktorschutzsysteme versagen, und wenn am Reaktorsystem schwere mechanische Schäden aufgetreten sind. Eine inhärent sichere Abschaltung kann durch ein System erzielt werden, das unmittelbar im Bereich des Reaktorkerns angeordnet ist, das die Temperatur des aus dem Core austretenden Natriums überwacht und die Bewegung des Abschaltabsorbers direkt, ohne Hilfe von außen, auslöst. Darüber hinaus muß ein inhärent sicheres Abschaltssystem einer Anzahl von Kriterien genügen; die wichtigsten sind unter anderem:

- Das System soll fail safe arbeiten.
- Es soll diversitär zu den anderen Abschaltssystemen sein.
- Die Ansprech- und Abschaltzeiten sollen ausreichend kurz sein, um definierte Störfälle beherrschen zu können.
- Alle Funktionen des Systems sollen in-pile getestet werden können.
- Die Abschalteinheiten sollen die Geometrie normaler Brennelemente haben und wie diese ausgewechselt werden können.
- Die Bauteile müssen für lange Einsatzdauer geeignet sein (wenigstens gleich der Brennelement-Lebensdauer).
- Sicherheit gegen menschliches Versagen muß gegeben sein.

Diese Kriterien bildeten die Grundlage bei der Ausarbeitung des im folgenden beschriebenen Abschaltssystem-Konzeptes.

2 Konzeptbeschreibung

Das vorgeschlagene System besteht aus zwei Teilen, nämlich der Absorberstabeinheit und einer Curiepunkt-gesteuerten Sensor/Schaltereinheit. Die Absorberstabeinheit soll - etwa wie beim Konzept für Superphenix /1/ - aus mehreren gelenkig miteinander verbundenen Stabbündeln bestehen. Sie ist so flexibel, daß sie auch bei stärkster Deformation des Hüllkastens in die Corezone gleitet. Die Absorbereinheit ist durch eine elektromagnetische Kupplung mit dem Absorbergestänge verbunden. Die Teilungsebene der Kupplung liegt im gezogenen Zustand im Bereich der Oberkante des Absorberelement-Hüllkastens im Primärnatrium. Mithin wird auch bei Beschädigung der Absorberstab-Aufhängung die Funktion der Kupplung nicht beeinträchtigt.

Bei einem Ansteigen der Natriumtemperatur am Core-Austritt wird die Abschaltung dadurch ausgelöst, daß die oben erwähnte selbsttätig wirkende Sensor/Schaltereinheit die Stromzufuhr zur elektromagnetischen Absorberstabskupplung unterbricht. Die Sensor/Schaltereinheit soll so über dem Core angeordnet werden, daß sie direkt von dem aus einem oder mehreren Brennelementen austretenden Natrium angeströmt wird. Dieses Konzept hat gegenüber Konzepten, bei denen das temperatursensitive Element Bestandteil der Kupplung ist, den Vorteil, daß bis zur Auslösung der Abschaltung eine wesentlich geringere Materialmasse aufgeheizt werden muß. Darüber hinaus kann die elektromagnetische Kupplung aus einem Werkstoff mit höherer Curie-temperatur gefertigt werden. Sie hat damit unabhängig vom Betriebszustand eine nahezu konstante Haltekraft.

Abbildung 1 zeigt den Aufbau der Sensor/Schaltereinheit: Ein Dauermagnet bildet mit den weichmagnetischen Jochteilen und dem Schaltgewicht einen geschlossenen Magnetkreis. Das Schaltgewicht ist gegenüber dem Gehäuse elektrisch isoliert. Es überbrückt im angezogenen Zustand die elektrischen Kontakte, durch die der Erregerstrom der Absorberelement-Kupplung fließt. Im Magnetkreis des Schalters befindet sich ein Sensorelement, das als Teil des Gehäuses direkt von strömendem Natrium umgeben ist. Es ist zur Verbesserung der Wärmeübertragung außen mit Rippen versehen. Als Werkstoff für das Sensorelement wird eine binäre 65 % Nickel-35 % Eisen-Legierung

vorgeschlagen, deren Curiepunkt bei 600 °C liegt. Wenn das Natrium diese Temperaturgrenze erreicht, wird der magnetische Fluß, der durch das Schaltgewicht verläuft, unterbrochen. Er fließt nun zum größten Teil über einen entsprechend dimensionierten Nebenschluß. Dadurch fällt das Schaltgewicht ab und unterbricht die Stromversorgung der Magnetkupplung, was zum Abfallen der Absorberstab-Einheit mit einer sehr geringen Verzögerung führt.

Eine zusätzlich eingebaute Spule sorgt im Bedarfsfall für den Aufbau eines Sekundärmagnetkreises. Dessen Richtung kann durch Umpolen der Spule gleich- oder gegensinnig zum dauermagnetischen Fluß eingestellt sein. Bei gleichsinnigem Verlauf wird der dauermagnetische Fluß soweit verstärkt, daß das abgefallene Schaltgewicht wieder angehoben wird. Andererseits kann durch umgekehrte Polung der Spule das Schaltgewicht abgeworfen und damit die Funktion der Abschalteneinrichtung getestet werden. Die Gefahr einer Fehlfunktion der Spule während des stationären Betriebes wird durch eine einfache Sicherheitsschaltung ausgeschlossen. Wie Abbildung 2 zeigt, wird die Spule aus einem Kondensator mit vorgeschaltetem Widerstand mit ihrem Arbeitsstrom versorgt. Die Spule kann dadurch in beiden Richtungen nur von kurzen Stromstößen oder - bei Fehlschaltung - von einem vernachlässigbar kleinen Strom durchflossen werden.

3 Auslegung der Abschalteneinrichtung

Schwerpunkt der bisherigen Arbeiten waren die Magnetkreis-Auslegung der Schaltereinheit und der Kupplung, die Berechnung des transienten Verhaltens und die Bearbeitung von Materialfragen. Im folgenden werden die Auslegungsdaten der Abschalteneinrichtung zusammengestellt. Wie in einem späteren Abschnitt gezeigt wird, konnten diese Daten weitgehend durch Vorversuche bestätigt werden.

3.1 Materialeigenschaften

Weichmagnetische Werkstoffe:

Die für die Auslegung von Magnetkreisen interessanten Materialdaten sind die Sättigungsflußdichte und die Permeabilität der verwendeten weichmagnetischen Materialien. Besondere Bedeutung kommt außerdem der Curietemperatur zu.

Die Sättigungsflußdichte ist eine Funktion der Temperatur mit dem Maximum am absoluten Nullpunkt und einem steilen Abfall nahe der Curietemperatur.

Die Permeabilität eines magnetischen Materials ist abhängig von der Werkstoffstruktur und der magnetischen Flußdichte. Sie steigt, ausgehend von der Anfangspermeabilität μ_i bei Flußdichte "Null" auf die Maximalpermeabilität μ_m an, um bei der Sättigungsflußdichte auf die Permeabilität des freien Raumes μ_o abzufallen.

Als Werkstoffe für den Magnetkreis der Schaltereinheit sind kohlenstoffarmes Eisen und - für das Sensorglied - eine Legierung aus 65 % Nickel und 35 % Eisen vorgesehen. Die magnetischen Werte dieser Werkstoffe sind (bezogen auf Raumtemperatur):

	Armco	65Ni35Fe
Sättigungsflußdichte	2,15 Vs/m ²	1,25 Vs/m ²
Anfangspermeabilität	min. 200 μ_o	min. 1200 μ_o
Maximalpermeabilität	min. 3500 μ_o	
Curietemperatur	1043 K (770 °C)	873 K (600 °C)

Bestrahlungseinfluß:

Bei der Bestrahlung weichmagnetischer Materialien können die strukturabhängigen Eigenschaften, insbesondere die Permeabilität, durch die auftretenden Störungen und Defekte im Kristallgitter beeinflusst werden. Dagegen ist keine Änderung der Sättigungsflußdichte und des Curiepunktes zu erwarten. Für die Funktion der Schaltereinheit sind gerade die zuletzt genannten Werte wichtig, während hohe Permeabilitätswerte ohnehin nicht genutzt werden.

Dauermagnetwerkstoffe:

Als Magnetwerkstoff wird AlNiCo450 vorgesehen. Dieser Werkstoff weist optimale Temperaturbeständigkeit auf. Er entspricht etwa dem US-Werkstoff AlNiCo-VIII. Die chemische Zusammensetzung ist:

Al	7-7,5	%
Ni	14-15	%
Co	30-35	%
Cu	4	%
Ti	5	%
Fe	34	%

Der Curiepunkt des Materials liegt bei etwa 1133 K (860 °C). Von besonderem Interesse ist die Stabilität des Magnetmaterials bei hohen Temperaturen. Im Kernforschungszentrum Karlsruhe sind hierzu schon früher ausführliche Untersuchungen angestellt worden /2/. Auch neuere Ergebnisse zeigen, daß das Material bei Betriebstemperaturen um 560 °C sehr gefügestabil ist, und daß Standzeiten von mehreren Jahren erwartet werden können. Dies gilt insbesondere, wenn vorher eine "Vor-Alterung" - eine kurzzeitige Auslagerung bei höherer Temperatur - durchgeführt wird.

Die Bestrahlung hat keinen Einfluß auf die magnetischen Eigenschaften. Dies haben Bestrahlungsexperimente im BR2-Reaktor in Mol bis zu einer Dosis schneller Neutronen von $4 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ ergeben.

3.2 Auslegung des Schalter-Magnetkreises

Abbildung 3 zeigt den magnetischen Kreis der Schaltereinheit. Im normalen Betriebszustand, das heißt, bei geschlossenem Schalter (linke Seite) verläuft der magnetische Nutzfluß Φ_N über das äußere Joch aus Armco-Eisen, das Sensorteil aus NiFe, das durch Gasspalte getrennte Schaltgewicht und das zentrale Jochteil. Parallel dazu wird ein Teil des Flusses Φ_S über einen Nebenschluß geleitet. Durch diese Magnetkreisanordnung wird zum Zeitpunkt der Abschaltung (rechte Seite) der durch das Schaltgewicht verlaufende Streufluß und damit die unerwünschte Rückhalte­kraft soweit wie möglich reduziert.

Besonders wichtig für den exakten Ablauf der Abschaltfunktion ist die Auslegung des Sensorteiles. Hierfür gelten folgende Forderungen:

- Die Ansprechzeit muß so kurz wie möglich sein. Das heißt, die Wandstärke des Sensorteils muß gering sein.
- Demgegenüber soll die magnetische Flußdichte im Sensorteil klein gegenüber der Sättigungsflußdichte sein. Dies ist, wie später gezeigt wird, wichtig für das Erreichen einer genau definierten Abschalttemperatur.
- Die Abmessungen der Bauteile, die Breite der Spalte zwischen Magnetjoch und Schaltgewicht und die Masse des Schaltgewichtes dürfen nicht zu klein sein, um den Einfluß der Toleranzen bei der Fertigung und bezüglich der magnetischen Materialdaten klein zu halten.

Aufgrund dieser Forderungen wurden folgende Auslegungsdaten gewählt:

- Fläche des zentralen Gasspaltes $A_i = 0,79 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
- Fläche des äußeren Gasspaltes $A_a = 1,44 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
(Querschnitt des Sensorteiles)
- Wandstärke des Sensorteiles $S = 1,5 \text{ mm}$
- Breite der Gasspalte $L_i = L_a = 0,3 \text{ mm}$
- Gewichtskraft des Schaltgewichtes $F_G = 0,7 \text{ N}$
- Magnetkraft auf das Schaltgewicht $F_M = 1,4 \text{ N}$
- Betriebstemperatur $T_B = 560 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (833 K)}$
- Curietemperatur des Sensorwerkstoffes $T_C = 600 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (873 K)}$

Damit ergibt sich folgende Magnetkreisauslegung:

- Erforderlicher Nutzfluß:

Für die Magnetkreisanordnung nach Abbildung 3 (bei Vernachlässigung des magnetischen Widerstandes in den metallischen Teilen des Magnetkreises) gilt:

$$\Phi_N^2 = \frac{F_M \cdot 2 \mu_0 A_i A_a}{f_x (A_i + A_a)}$$

Der Streuverlustfaktor f_x wurde experimentell ermittelt. Er beträgt $f_x = 0,55$. Damit wird $\Phi_N = 1,8 \times 10^{-5} \text{ Vs}$.

- Flußdichte im Sensorteil:

Bei Betriebstemperatur herrscht im Sensorteil eine Flußdichte von

$$B_s = \Phi_N / A_a = 0,13 \text{ Vs/m}^2.$$

Die Sättigungsflußdichte des Sensorwerkstoffes am absoluten Nullpunkt beträgt

$$B_{\text{sat},0} = 1,45 \text{ Vs/m}^2 \quad /3/.$$

Sie fällt gemäß Abbildung 4 bis zur Betriebstemperatur T_B ab auf

$$B_{\text{sat}} = 0,35 B_{\text{sat},0} = 0,5 \text{ Vs/m}^2.$$

Im normalen Betrieb beträgt also die Flußdichte B_s nur etwa 26 % der Sättigungsflußdichte B_{sat} des Sensormaterials.

- Abschaltpunkt:

Bis zum Abfallen des Schaltgewichtes muß die magnetische Haltekraft auf die Hälfte absinken. Entsprechend muß der Magnetfluß im Sensorteil verringert werden auf

$$B = B_s / \sqrt{2} = 0,09 \text{ Vs/m}^2.$$

Zum Zeitpunkt des Schaltens beträgt also $B/B_{\text{sat},0} = 0,06$.

Aus Abbildung 4 ist zu ersehen, daß bei einem Temperaturanstieg über die Betriebstemperatur hinaus der Magnetfluß und damit die Haltekraft voll erhalten bleiben, bis die Curietemperatur nahezu erreicht ist. Die Abnahme des Magnetflusses bis zum Abschalten erfolgt innerhalb einer Temperaturspanne von wenigen Grad. Das heißt, daß der Schalter unempfindlich gegen kleinere Temperaturschwankungen ist, daß aber die Abschaltung bei einer genau definierten Temperatur erfolgt. In der Tat konnte dieses Verhalten im Versuch bestätigt werden.

Der Shunt-Spalt und die Magnetabmessungen wurden so festgelegt, daß sich bei Betriebstemperatur ein Streufluß von $\Phi_S = \Phi_M - \Phi_N = 0,7 \Phi_M$ einstellt. Damit wirken folgende Kräfte im Normalbetrieb und zum Zeitpunkt der Schaltung auf das Schaltgewicht:

	Magnetkraft	Gewichtskraft	Differenz
Normalbetrieb	1,40 N	0,70 N	0,70 N
Schaltung	0,30 N	0,70 N	-0,40 N

3.3 Auslegung der Absorberstrab-Haltekupplung

Für die Kupplung wurden folgende Auslegedaten gewählt, die mit den für den SNR 2 vorgesehenen Gittermaßen kompatibel sind:

- . Windungszahl der Spule 920
- . Masse der Absorberstabanordnung ca. 40 kg
- . Maximale magnetische Haltekraft 2000 N
- . Spulenstrom 0,2 A

Mittels einer Kupplungs-Attrappe wurden Haltekraftmessungen durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 5 dargestellt. Sie zeigt die Kupplungshaltekraft als Funktion des Stromes. Im Hinblick auf eine denkbare Verschmutzung der Kupplungsteilungsflächen wurde bei den Versuchen der Spalt zwischen Kupplung und beweglichem Jochteil variiert. Es zeigte sich, daß dadurch die Magnetkraft stark beeinflußt wird. Bei Auslegungsbedingungen wäre bei einer gleichmäßigen Schmutzschicht von 0,1 mm mit dem Abfallen der Absorberstäbe zu rechnen.

Von Bedeutung für die Abschätzung der Schaltverzögerung der Abschalteinrichtung ist auch der Strom- und Haltekraftverlauf nach dem Öffnen des Stromschalters. Der Strom wird durch die Selbstinduktionsspannung weitergetrieben, bis die magnetische Energie der Spule verbraucht ist. Hierzu wurden Experimente mit der Kupplungsattrappe unter Verwendung der in Abbildung 2

dargestellten Schaltung durchgeführt. Abbildung 6 zeigt den Stromverlauf und die resultierende Haltekraft für die oben aufgeführten Auslegungsbedingungen. Es ist zu ersehen, daß die Haltekraft innerhalb von 0,45 sec von ca. 2000 N auf die dem Absorberstabgewicht entsprechende Kraft von 400 N absinkt.

3.4 Transientes Verhalten der Schaltereinheit

Bei der Auslegung der Schaltereinheit ist die Kenntnis ihres transienten Verhaltens beim Reaktorstörfall von großer Bedeutung. Es wurde deshalb versucht, durch Annahme geeigneter Randbedingungen die transienten Temperaturverläufe zu bestimmen.

Für die Berechnungen wurde in Anlehnung an /4/ ein LOF-Störfall für den SNR 2 zugrunde gelegt. Nach Ausfall der Energieversorgung beträgt die Halbwertszeit des Primärnatrium-Durchsatzes 5,7 s. Es soll der in /4/ angegebene Referenzfall angenommen werden, bei dem die axiale Brennstoffausdehnung und der Bowing-Effekt nicht berücksichtigt werden. Für diesen Fall ist der zeitliche Temperaturverlauf des Kühlmittels am Brennelementaustritt in Abbildung 7 (obere Kurve) dargestellt. Danach erreicht die Natriumtemperatur am Brennelementaustritt die Curietemperatur des Sensormaterials von 600 °C nach ca. 3,7 sec.

Für die transiente Berechnung wurde das Rechenprogramm HEATING5 /5/ herangezogen. Es wurden folgende Annahmen getroffen:

- Das Sensorteil des Schalters befindet sich in der Höhe der Brennelementoberkante.
- Die Wärmeleitfähigkeit λ des Sensormaterials mußte wegen fehlender Angaben aus der Wärmeleitfähigkeit von NiFe 51/49 aus /6/ abgeschätzt werden. Die Abschätzung erfolgte anhand der Wiedemann-Franz-Lorenzschen Beziehung $\lambda \sim T/\rho_{el}$, mit $\rho_{el} = f(T, \% Ni)$ aus ref. 7 (ρ_{el} = elektrischer Widerstand).
- Für die Bestimmung der Anfangsbedingungen wurde eine Natriumtemperatur am Brennelementaustritt von 562,5 °C angenommen.

- Der Wärmeübergang in Natrium wird aus der Beziehung errechnet $Nu(t, \vartheta) = 4,8 + 0,025 [Re(t) \cdot Pr(\vartheta)]^{0,8}$, wobei t die Zeit und ϑ die Temperatur ausdrückt.
- Entsprechend der Pumpenauslaufcharakteristik in /4/ und wegen der Proportionalität zwischen Reynoldszahl und Massendurchsatz wird angesetzt $Re(t) = Re_0 \cdot e^{-0,122 t}$.
- Die stationäre Reynoldszahl Re_0 und der zu berücksichtigende hydraulische Durchmesser D_h wurden für ein SNR-Brennelement abgeschätzt zu: $Re_0 = 4 \cdot 10^5$ und $D_h = 150 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Das Ergebnis ist in Abbildung 7 eingetragen. Die untere Kurve stellt den Temperaturverlauf der Sensorinnenwand dar. Danach erreicht die Sensorwandtemperatur nach 5,2 sec die Curietemperatur. Aus der Differenz zum Kühlmittel-Temperaturanstieg ergibt sich eine Schaltverzögerung der Schaltereinheit von 1,5 sec. Dazu kommt die Schaltverzögerung der Absorberstabhaltekupplung von 0,45 sec gemäß Abbildung 6.

Die Untersuchungen zeigten somit, daß Ansprechzeiten von weniger als 2 sec erreicht werden können. Dies ist ein für ein inhärentes Abschalt-system sehr günstiger Wert.

4 Experimente

4.1 Langzeittest

Als Grundlage und zur Bestätigung der Magnetkreis-Auslegung des Schalters wurden frühzeitig Experimente vorbereitet. Insbesondere wurde ein Teststand aufgebaut, in dem ein Schalter bei 550 bis 600 °C unter Schutzgas betrieben werden kann. Er wird dabei vom Spulenstrom einer vereinfachten Absorberstabhaltekupplung durchflossen. Auf Grund der ersten Betriebserfahrungen wurden verschiedene Verbesserungen an der Schalterkonstruktion vorgenommen, die schließlich zu einem voll funktionsfähigen Konzept führten. Eine Schaltereinheit wird nun seit Anfang 1985 unter Schutzgas bei einer Temperatur von

etwa 560 °C betrieben und in unregelmäßigen zeitlichen Abständen bis zum Schaltpunkt aufgeheizt. In größeren Zeitintervallen erfolgt eine Vermessung der Magnetkräfte. Derzeit beträgt die Einsatzdauer bei hohen Temperaturen etwa 380 Tage. Bisher konnte noch keine meßbare Änderung der Magnetkräfte festgestellt werden. Ebenfalls konstant blieb der Mittelwert der Abschalttemperatur. Die Streubreite der Abschalttemperatur beträgt, bei genau gleichen äußeren Bedingungen, weniger als 1 K. Insbesondere ist die Abschalttemperatur nicht abhängig von der der Abschaltung vorangegangenen Betriebsdauer.

Die Tests werden bis auf weiteres fortgesetzt.

4.2 Bestrahlungsexperiment in KNK II

In einem nächsten Schritt soll durch ein Bestrahlungsexperiment in der KNK II der zusätzliche Einfluß des Strahlenfeldes auf das Betriebsverhalten der Schaltereinheit untersucht werden. Das Experiment ist als integraler Funktionstest konzipiert, da eine Untersuchung einzelner Werkstoffeigenschaften in der Heißen Zelle zu aufwendig und darüber hinaus zu wenig effektiv wäre. Die zu testenden Schalter werden - wie bei den out-of-pile Versuchen - bei SNR 2-typischen Natriumtemperaturen stationär betrieben und in verschiedenen zeitlichen Abständen kurz auf die Abschalttemperatur aufgeheizt. Ein unmittelbarer Vergleich beider Versuchsreihen ist damit möglich. Bei der Festlegung der Bestrahlungsbedingungen wurde angenommen, daß die Schaltereinheiten im SNR 2 im Bereich der Brennelementoberkante positioniert werden. Der schnelle Neutronenfluß ($E > 0,1$ MeV) wird hier etwa $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ betragen. Für eine maximale Einsatzdauer von 1200 Volllasttagen ergibt sich eine Neutronendosis ($E > 0,1$ MeV) von $3,1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$.

Die Bestrahlung soll in der KNK II-Reflektorposition 511 durchgeführt werden. Diese besitzt einen Durchbruch im Reaktordeckel, so daß die notwendigen Meß- und Versorgungsleitungen zugeführt werden können. Der Bestrahlungskanal wird durch ein aufgebohrtes Reflektorelement gebildet.

Insgesamt werden bei dem Bestrahlungsexperiment drei Curiepunkt-gesteuerte Sensor/Schaltereinheiten getestet. Sie sind dazu in einer elektrisch beheizten und temperaturgeregelten Bestrahlungskapsel untergebracht. Diese wiederum

ist Bestandteil eines ca. 7 m langen Teststopfens, der bis zur Kern-
Unterkante in den Reaktor hineinragt.

In Abbildung 8 ist für die zweite KNK II-Kernbeladung der axiale Verlauf
des Neutronenflusses in der Position 511 dargestellt. Das Flußmaximum
liegt etwas unterhalb der Kernmitte und beträgt ca. $3,35 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.
In der Abbildung ist außerdem die axiale Position der drei Schalterein-
heiten im Stopfen angegeben. Auf der rechten Ordinate ist die Neutronen-
dosis ($E > 0,1 \text{ MeV}$) aufgetragen, die nach der vorgesehenen Bestrahlungs-
zeit von 180 Volllasttagen erreicht wird. Demnach ergeben sich folgende
Dosiswerte:

- Schalter 1: $5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$
- Schalter 2: $3,27 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$
- Schalter 3: $8,6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$

Als Folge der höheren Flußdichte in KNK II gegenüber dem Einsatzort im
SNR 2 ist eine größere Wärmequellldichte im Strukturmaterial der Schalter
(Gamma-Heizung) als im späteren Betrieb zu erwarten. Rechnungen mit dem
Programm HEATING 5 zeigten, daß die Temperatur der Permanentmagnete im
Zentrum des höchstbelasteten Schalters 1 um etwa 40 K über der Temperatur
des Sensorteiles liegt. Die Kapsel wurde so ausgelegt, daß im Dauerbetrieb
die Magnettemperatur 575 °C beträgt (Sensorteil 535 °C) und, daß bei der
Simulierung des Abschaltvorganges kurzzeitig ca. 640 °C erreicht werden.
Versuchsergebnisse /2/ zeigen, daß das Magnetmaterial AlNiCo450 unter
diesen Bedingungen stabil bleibt, sofern die Aufheizvorgänge schnell
(\leq ca. 1 h) durchgeführt werden.

5 Zusammenfassung, Beurteilung des Konzeptes

Das vorgeschlagene inhärente Abschaltssystem soll den Reaktor bei einer unzulässigen Erhöhung der Natriumtemperatur am Core-Austritt abschalten, indem eine Curiepunkt-gesteuerte Schaltereinheit den Erregerstrom einer - oder auch mehrerer - Abschaltetelement-Haltekupplungen selbsttätig unterbricht. Die durchgeführten Arbeiten bezogen sich weitgehend auf die Auslegung und den Nachweis der Funktionstüchtigkeit der Schaltereinheit.

Es wird vorausgesetzt, daß die Abschaltung selbst mittels einer gelenkigen Absorberstabeinheit mit extrem großem Spiel in einem verstärkten Hüllkasten ausgeführt wird, wobei das Superphenix-System als Vorbild dienen könnte.

Für die Beurteilung des vorgestellten Konzeptes ist zu prüfen, inwieweit es die eingangs aufgeführten Anforderungen erfüllt:

Fail-safe-Verhalten: Das Arbeitsprinzip der Schaltereinheit ist so, daß das alterungsbedingte Nachlassen des magnetischen Flusses zur Unterbrechung des Stromes führen würde. Das Eindringen von Natrium in das Schaltergehäuse würde Masseschluß und somit ebenfalls Abschaltung erzeugen. Ein Behindern der Bewegung des Schaltgewichtes kann bei richtiger konstruktiver Gestaltung nach Abschluß der geplanten Testserien ausgeschlossen werden. Andere mögliche Fehler, wie das Versagen der Spule haben keinen Einfluß auf die Schaltfunktion.

Sicherheit gegen Bedienungsfehler: Kritisch würde eine Fehlschaltung der Schalterspule sein, wenn sie unbemerkt während des Betriebes so von Strom durchflossen würde, daß die magnetische Haltekraft unzulässig verstärkt würde. Wie oben gezeigt wurde, läßt sich dies mittels einer einfachen elektrischen Schaltung ausschließen.

Testmöglichkeit: Alle mechanischen Funktionen des Systems - das Abwerfen des Schaltgewichtes und das Abwerfen des Absorbers - können mittels der vorgesehenen Schalterspule getestet werden.

Langzeitbetrieb: Die eingesetzten Materialien sollten eine mehrjährige Standzeit der Schaltereinheit ermöglichen. Zum Beweis dieser Annahme werden Langzeitversuche bei hohen Temperaturen im Labor und eine Bestrahlung bis zu den maximalen zu erwartenden Dosiswerten in KNK II durchgeführt.

Referenzenliste:

- /1/ Pignatelli, et al.
The Super Phenix shutdown system
Proceedings of the L.M.F.B.R. safety topical meeting,
Lyon-Ecully, Vol.2, p. 485-495, 19-23 July 1982
- /2/ St. Müller, G. Thun
Permanentmagnetische Durchflußmesser-Sonde für Flüssigmetalle
KfK-Bericht Nr. 2479, 1977
- /3/ C. Heck
Magnetische Werkstoffe und ihre Anwendung, p. 378
A. Hüthing, Heidelberg, 1975
- /4/ K. Kleefeldt
SNR 2 core dynamics and shut-down signals in a protected loss-
of-flow incident
Proceedings of the L.M.F.B.R. safety topical meeting,
Lyon-Ecully, Vol. 4, p. 513-522, 19-23 July 1982
- /5/ W.D. Turner, et al.
HEATING5 - An IBM 360 heat conduction program
ORNL/CSD/TM-15, 1979
- /6/ Y.S. Touloukian, et al.
Thermophysical properties of matter, metallic elements and
alloys
IFI/Plenum, New York-Washington, 1970
- /7/ F. Pawlek
Magnetische Werkstoffe
Springer Verlag, 1952

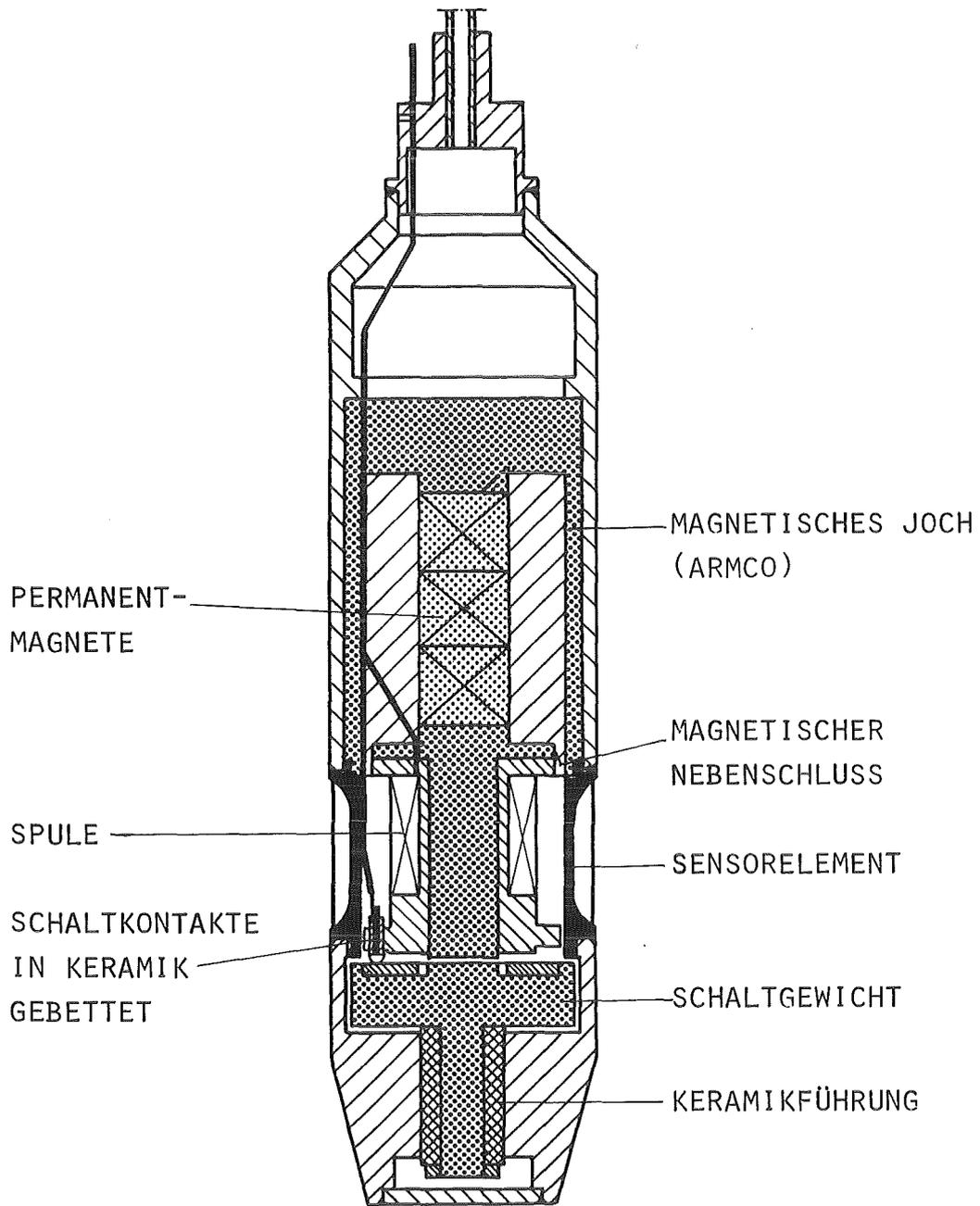


Abbildung 1: Curiepunkt-gesteuerte Schaltereinheit

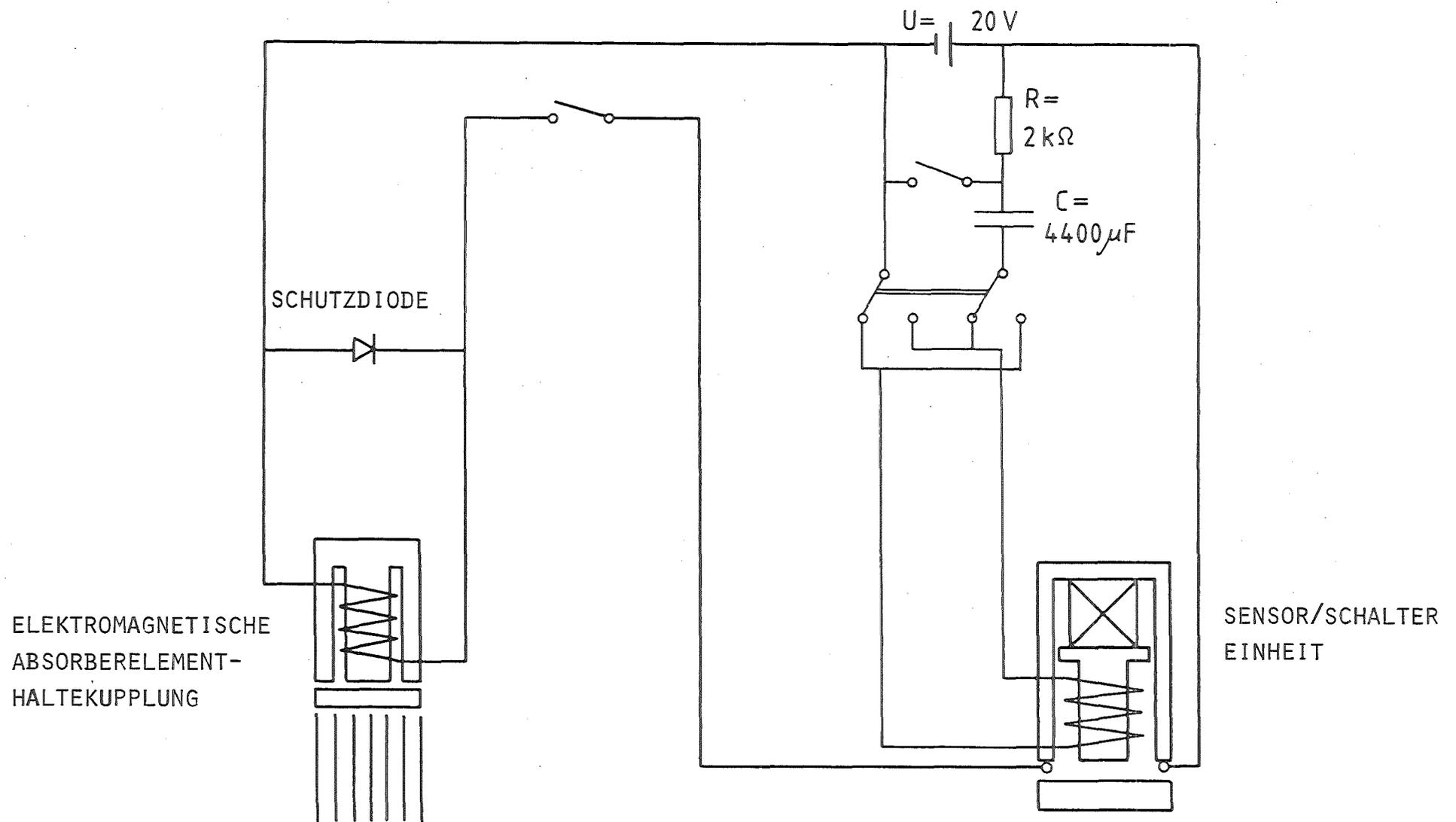


Abbildung 2: Elektrische Schaltung der Abschalteinrichtung

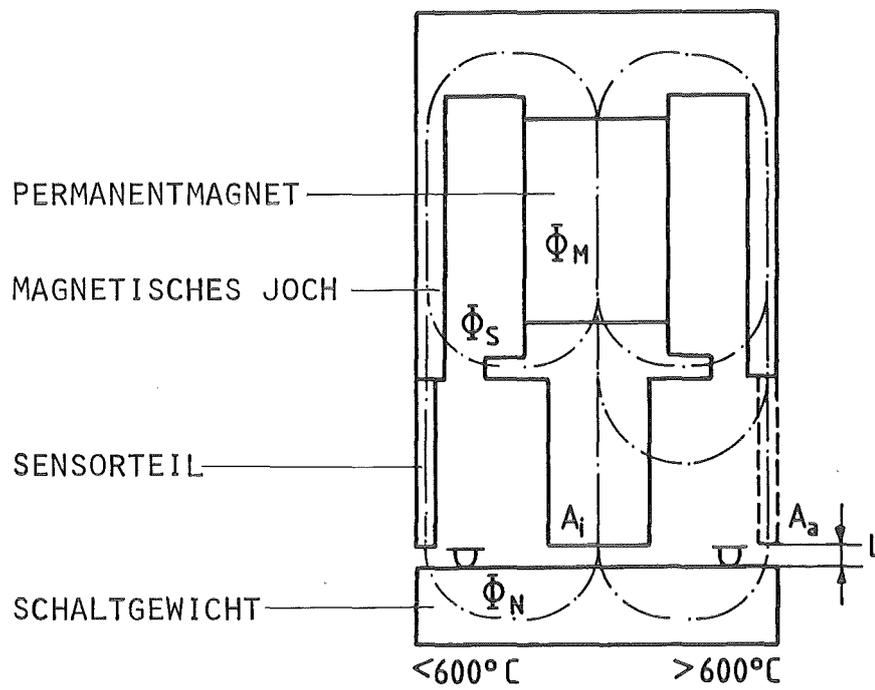


Abbildung 3: Schema des Magnetkreises

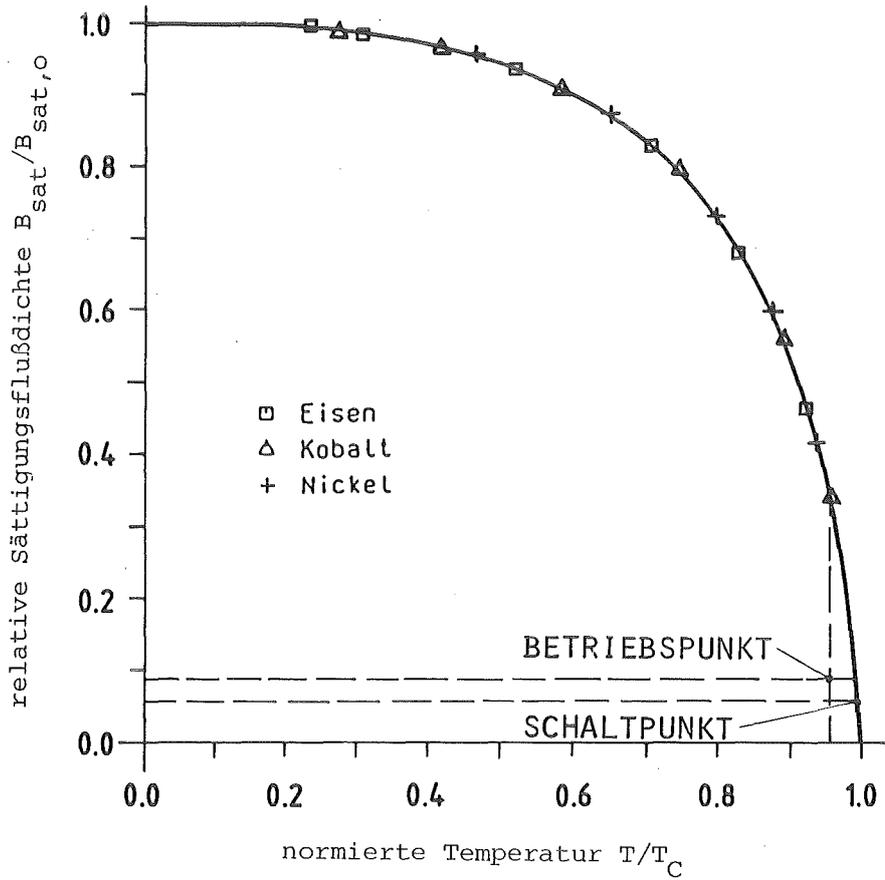


Abbildung 4: Abhängigkeit der normierten Sättigungsflußdichte von der normierten Temperatur

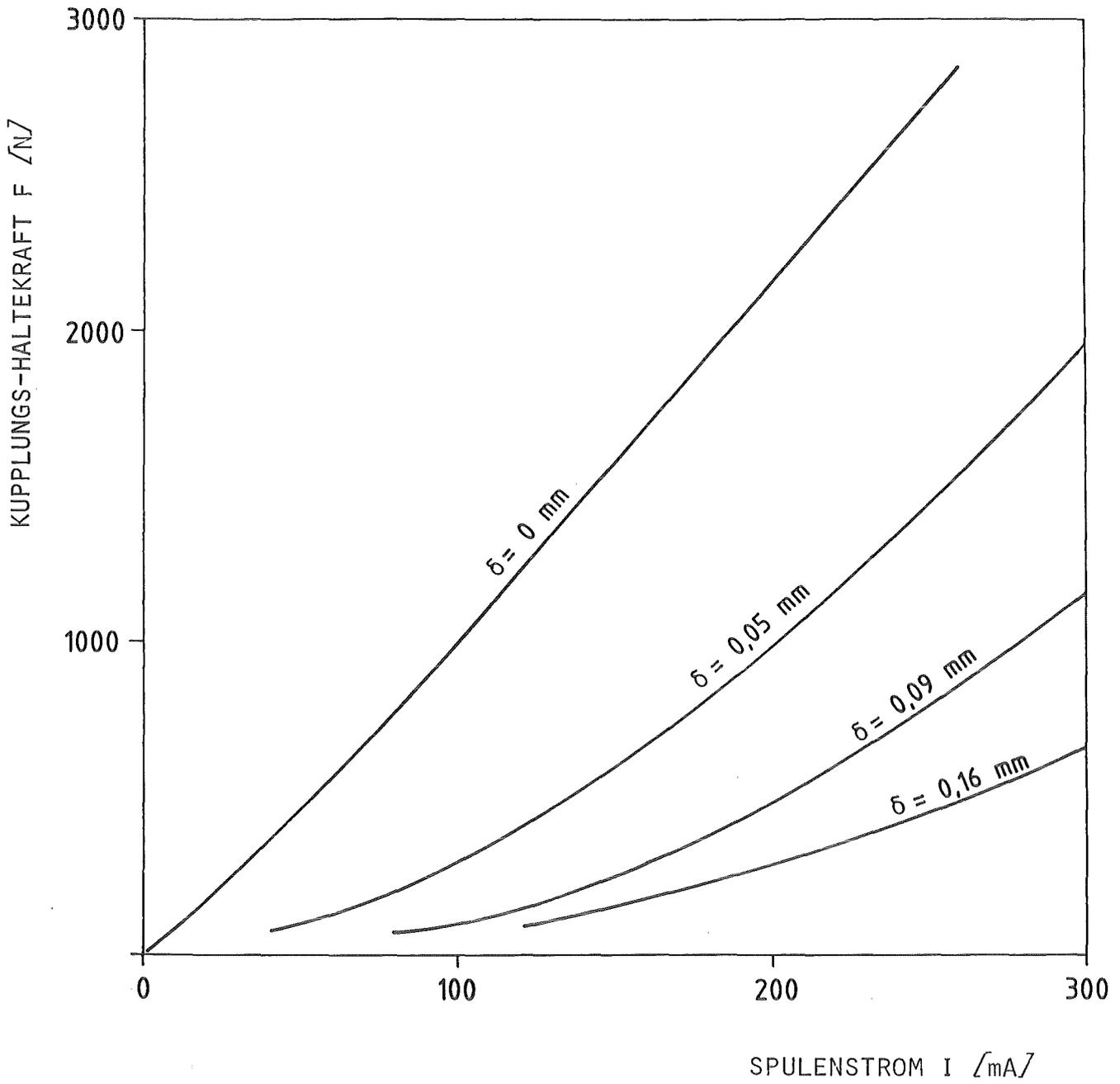


Abbildung 5: Haltekraft der Absorberelement-Kupplung über dem Strom mit Luftspalt δ als Parameter

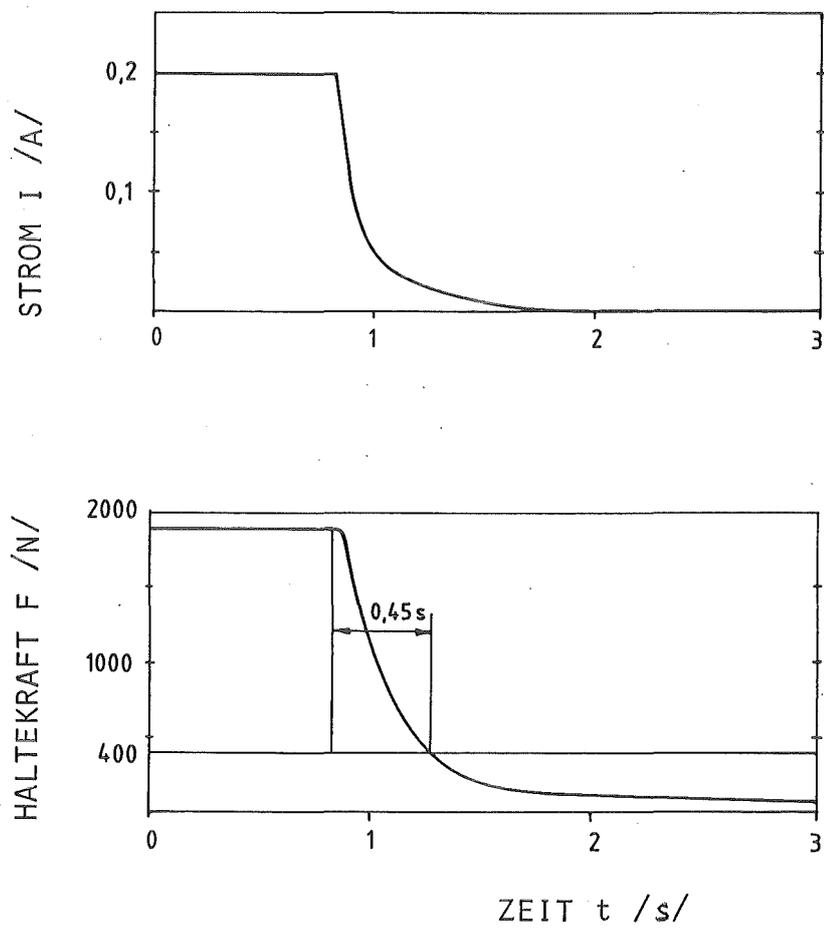


Abbildung 6: Zeitlicher Verlauf von Strom und Haltekraft der Kupplung nach der Abschaltung

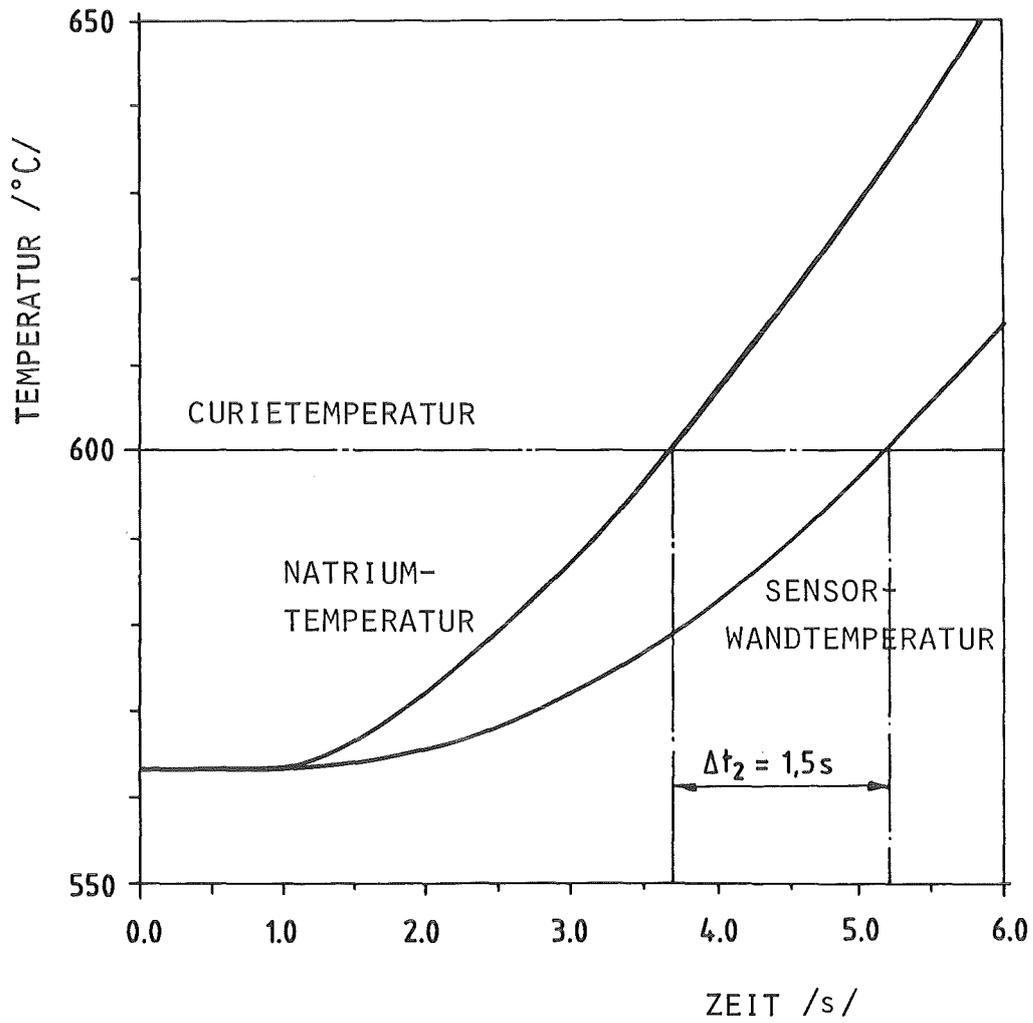


Abbildung 7: Zeitlicher Verlauf der Sensorwandtemperatur der Schaltereinheit bei einem SNR 2-LOF-Störfall

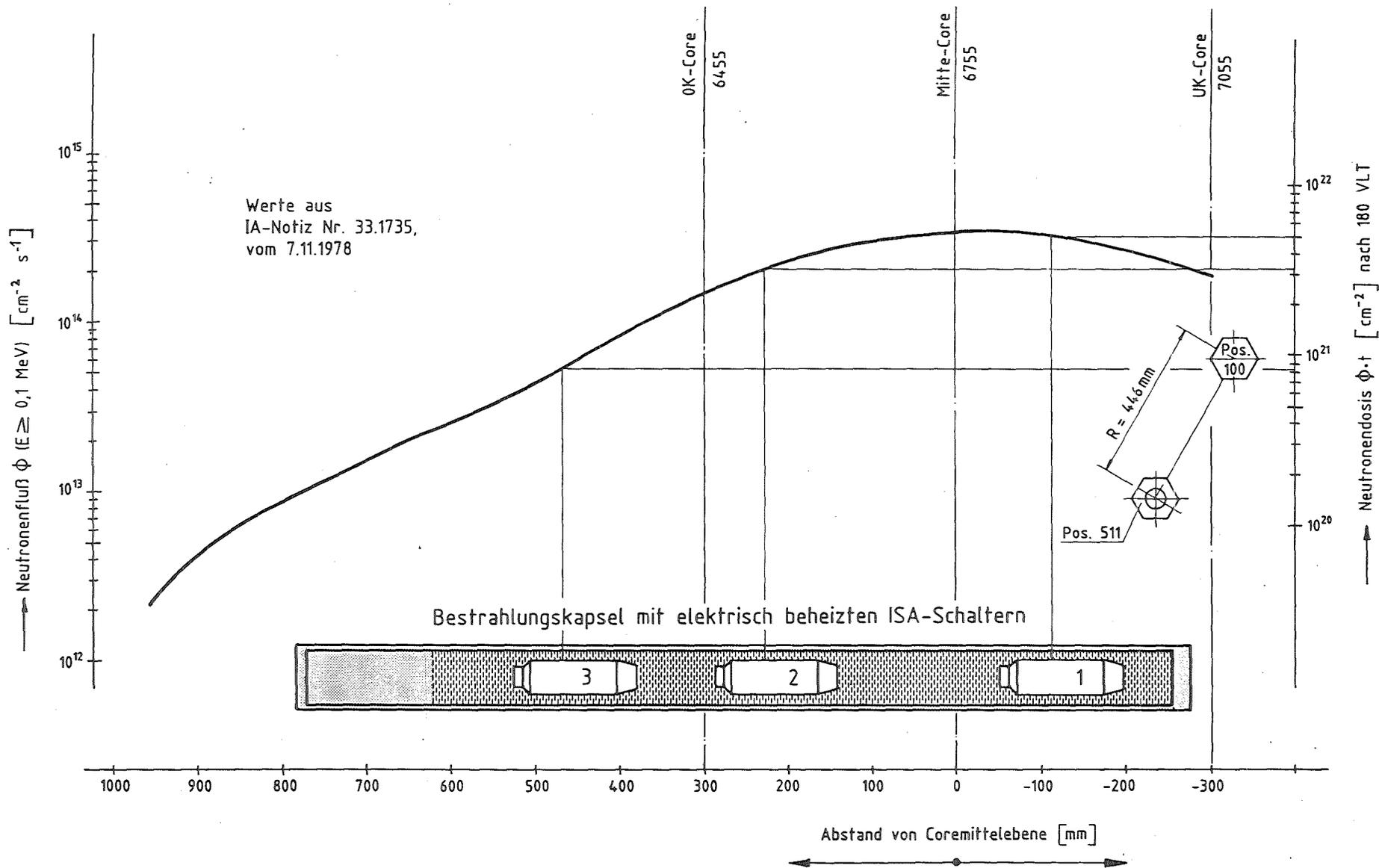


Abbildung 8: Bestrahlungskapsel mit drei Curiepunkt-gesteuerten Sensor/Schaltereinheiten, axialer Verlauf des schnellen Neutronenflusses und der -dosis