

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

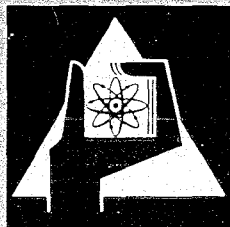
Dezember 1969

KFK 1033
EUR 4307 d

Institut für Angewandte Reaktorphysik

Die Entwicklung der SEFOR ENERGY PROBES

H. Bumm, H.W. Glauner, E. Rühl, W. Schikarski, M. Tavosanis



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Dezember 1969

KFK 1033
EUR 4307 d

Institut für Angewandte Reaktorphysik

DIE ENTWICKLUNG DER SEFOR ENERGY PROBES^{†)}

von

H. Bumm⁺⁺
H.W. Glauner⁺⁺⁺
E. Rühl⁺
W. Schikarski⁺
M. Tavosanis⁺

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

-
- ⁺ Institut für Angewandte Reaktorphysik
 - ⁺⁺ Institut für Material- und Festkörperforschung
 - ⁺⁺⁺ Institut für Reaktorentwicklung

^{†)} Diese Arbeit wurde im Rahmen der Assoziation zwischen der Europäischen Atomgemeinschaft und der Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe, auf dem Gebiet der Schnellen Reaktoren durchgeführt.

<u>Inhaltsübersicht</u>	Seite
1. Einleitung	- 1 -
2. Die Auslegung der SEFOR ENERGY PROBES	- 3 -
2. 1. Grundlagen der Auslegung	- 3 -
2. 2. Aufbau und konstruktive Gestaltung der SEP	- 5 -
2. 2. 1. Bauteile der SEP	- 7 -
2. 2. 2. Herstellung und Vorbereitung der Einzelteile	- 9 -
2. 2. 3. Anschweißen der Thermoelementdrähte an das Niob-Uran- Stäbchen und Zusammenbau der Sonde	- 13 -
2. 2. 4. Zusammenbau der SEP	- 16 -
2. 2. 5. Endprüfung	- 18 -
3. Erprobung der SEP	- 20 -
3. 1. Erprobung im Zyklotron	- 20 -
3. 1. 1. Versuchsdurchführung	- 21 -
3. 2. SEP-Testversuche am Forschungsreaktor München (FRM)	- 25 -
3. 2. 1. Zweck und Aufgabe der Versuche	- 25 -
3. 2. 2. Beschreibung der Versuchseinrichtungen	- 25 -
3. 2. 3. 1. Versuchsdurchführung am 12.11.68	- 29 -
3. 2. 3. 2. Versuchsdurchführung am 4.6.69	- 29 -
3. 2. 4. Ergebnisse beider Versuche	- 30 -
3. 2. 5. Schlußfolgerungen	- 35 -
4. Meßgenauigkeit der SEFOR ENERGY PROBES	- 36 -
4. 1. Fehler bei der Messung im stationären Zustand	- 37 -
4. 1. 1. Fehler durch Aufheizung durch γ -Strahlung	- 37 -
4. 1. 2. Fehler aufgrund der Nickelschicht	- 39 -
4. 1. 3. Fehler durch die Wärmeableitung in den Thermoelement- drähten	- 40 -
4. 2. Fehler bei der Messung im dynamischen Fall	- 41 -
4. 2. 1. Fehler durch Aufheizung durch γ -Strahlung	- 41 -
4. 2. 2. Fehler durch die veränderliche spezifische Wärme der UNb-Legierung	- 43 -
4. 2. 3. Der Einfluß der Ni-Schicht auf die SEP-Ansprechzeit	- 46 -
 Literatur	 - 51 -

1. Einleitung

Bringt man spaltbares Material in einen Neutronenfluß, so ergibt sich eine Temperaturerhöhung des bestrahlten Materials, die der Neutronenflußdichte proportional ist. Unter der Bedingung einer völligen Umsetzung der Spaltungsenergie in Wärme folgt die Temperaturerhöhung ΔT der Gleichung

$$\Delta T = \frac{1}{\rho c} \phi \sigma N \gamma \Delta t \quad (1)$$

Es bedeuten

ρ = Dichte des bestrahlten Materials

c = Spezifische Wärme

ϕ = Neutronenflußdichte

σ = Spaltquerschnitt

N = Anzahl spaltbarer Atome je Volumeneinheit

γ = Energie pro Spaltung

t = Zeit

Mit Hilfe einer direkten Temperaturmessung an einer Probe aus spaltbarem Material läßt sich somit die in der Probe erzeugte Leistung oder über die integrale Temperaturänderung die in der Probe insgesamt erzeugte Energie bestimmen. Insbesondere eignet sich eine solche Energiesonde (energy probe) zur Messung von Leistungstransienten in Kernreaktoren.

Der Vorteil der Verwendung einer "energy probe" für reaktordynamische Versuche liegt vor allem darin, daß hier ein unabhängiges Meßprinzip vorliegt, d. h., daß die Leistung bzw. die Energie nicht wie bei den Neutronenfluß- oder γ -Fluß-Kammern über den Ionisierungs-Effekt der Strahlung, sondern über die direkte Temperaturerhöhung durch Kernspaltung gemessen wird. Ein unabhängiges Meßprinzip ist bei Versuchen mit Leistungsexkursionen, die über mehrere Dekaden gehen, auch aus einem anderen Grunde von Bedeutung. Da Neutronenfluß- und γ -Fluß-Kammern gewöhnlich nur über 3 Dekaden verläßlich genau messen, müssen verschiedene Kammern in den verschiedenen Leistungsbereichen einer Exkursion eingesetzt werden. Das ergibt Probleme der Anschluß-Genauigkeit und der Kalibrierung. Die dadurch auftretenden Meßfehler in Leistung und Energie werden bei einem anderen Meßprinzip von

anderer Natur sein und damit im gewissen Rahmen eine Kontrolle der Leistungsmessung ermöglichen.

Darüberhinaus können "energy probes" als unabhängige Detektoren für die Neutronenflußdichte bei einer Mehrfach-Instrumentierung sowie zur Kalibrierung von Neutronenfluß-Meßkammern im Hochleistungsbereich dienen.

Die Nachteile von "energy probes" als Leistungsmesser in Kernreaktoren ergeben sich aus dem thermodynamischen Meßprinzip:

- Die Leistungsmessung ist an eine thermodynamische Zeitkonstante gekoppelt, die sich aus dem Wärmetransport spaltbares Material-Thermoelement ergibt.
- Die in der "energy probe" gespeicherte Wärme wird mit einer entsprechenden Zeitkonstante an die Umgebung (Kühlmittel) abgegeben. Der abfallende Teil eines Leistungstransienten kann daher nicht direkt gemessen werden.

Erstmals angewendet wurde das Prinzip der "energy probes" im Jahre 1964 bei den SNAPTRAN-Experimenten (1). Dort wurden 13 μm dicke Cr-Al Thermoelement-Drähte mit einer 50 mg schweren Probe des SNAP-Brennstoffs (Uran-Zirkon-Hydrid) direkt und innig verbunden und zur Messung rascher Exkursionen eingesetzt. Wenig später, im Jahre 1965, wurde im Rahmen des SEFOR-Projekts (2) die Entwicklung der SEFOR ENERGY PROBES in Angriff genommen, um sie insbesondere bei den Exkursions-Experimenten einzusetzen.

Die im Kernforschungszentrum Karlsruhe durchgeführte Entwicklung und Erprobung der SEFOR ENERGY PROBES (SEP) konnte Anfang 1969 abgeschlossen werden. Der Einsatz der SEP im experimentellen Programm des SEFOR ist für 1970 vorgesehen. Dieser Bericht gibt einen Überblick über

- die konstruktive und materialtechnologische Entwicklung der SEP
- die Erprobung und Bestimmung der charakteristischen Eigenschaften
- die theoretischen Überlegungen zur Meßgenauigkeit der SEP.

2. Die Auslegung der SEFOR ENERGY PROBES

2. 1. Grundlagen der Auslegung

Die wesentlichen Bestimmungsstücke einer "energy probe" sind das spaltbare Material und das Thermoelement.

Als spaltbares Material bot sich bei der Materialauswahl zunächst Uran oder eine Uranverbindung an. Um jedoch eine gute Verarbeitung und einfache Herstellung zu erzielen, war Uran-Metall oder eine Legierung vorzuziehen. Dies galt auch im Hinblick auf die Schweißverbindung der Thermoelement-Drähte mit dem eigentlichen Probenmaterial (siehe Kap. 2. 2.). Eine weitere Bedingung ergab sich aus der Forderung nach einer stabilen Probe bis zu hohen Temperaturen. Einerseits sollte die Probe im Betrieb nie in die Nähe des Schmelzpunkts gelangen, andererseits sollten im Bereich der vorgesehenen Betriebstemperaturen keine wesentlichen Änderungen in der Probe (Phasenwechsel o. ä.) auftreten. Alle diese Forderungen führten auf eine Uran-Niob-Legierung, deren Phasendiagramm in Abb. 1 dargestellt ist. Aus Abb. 1 geht hervor, daß eine Probe mit hohem Niob-Gehalt wünschenswert war.

Auf der anderen Seite bedeutete jedoch ein geringer Uran-Gehalt ein entsprechend kleines Temperatursignal am Thermoelement. Dies ließ sich durch eine ausreichend hohe Anreicherung des spaltbaren Isotops U-235 kompensieren. Eine Parameter-Rechnung unter Zugrundelegung des am vorgesehenen Einbauort im SEFOR zu erwartenden Neutronenflusses ergab die folgenden Daten für die SEP:

Legierungsanteile : 80 % Nb, 20 % U
Anreicherung : 90 % U-235

Auch an das Thermoelement waren Anforderungen zu stellen. Um bei relativ langsamen Leistungstransienten mit entsprechend langsamer Temperaturerhöhung keine Falschmessung durch Wärmeableitung über die Thermoelement-Drähte zu erhalten, wurden relativ dünne Drähte (Durchmesser: 50 μ m) gefordert. Auf die damit verbundenen Probleme des Anschweißens der Drähte an die Probe wird in Kap. 2. 2. eingegangen.

Das gesamte System der SEP war natürlich in geeigneter Weise zu halten, um es unter definierten Bedingungen im SEFOR einbauen zu können. Diese Halterung sollte

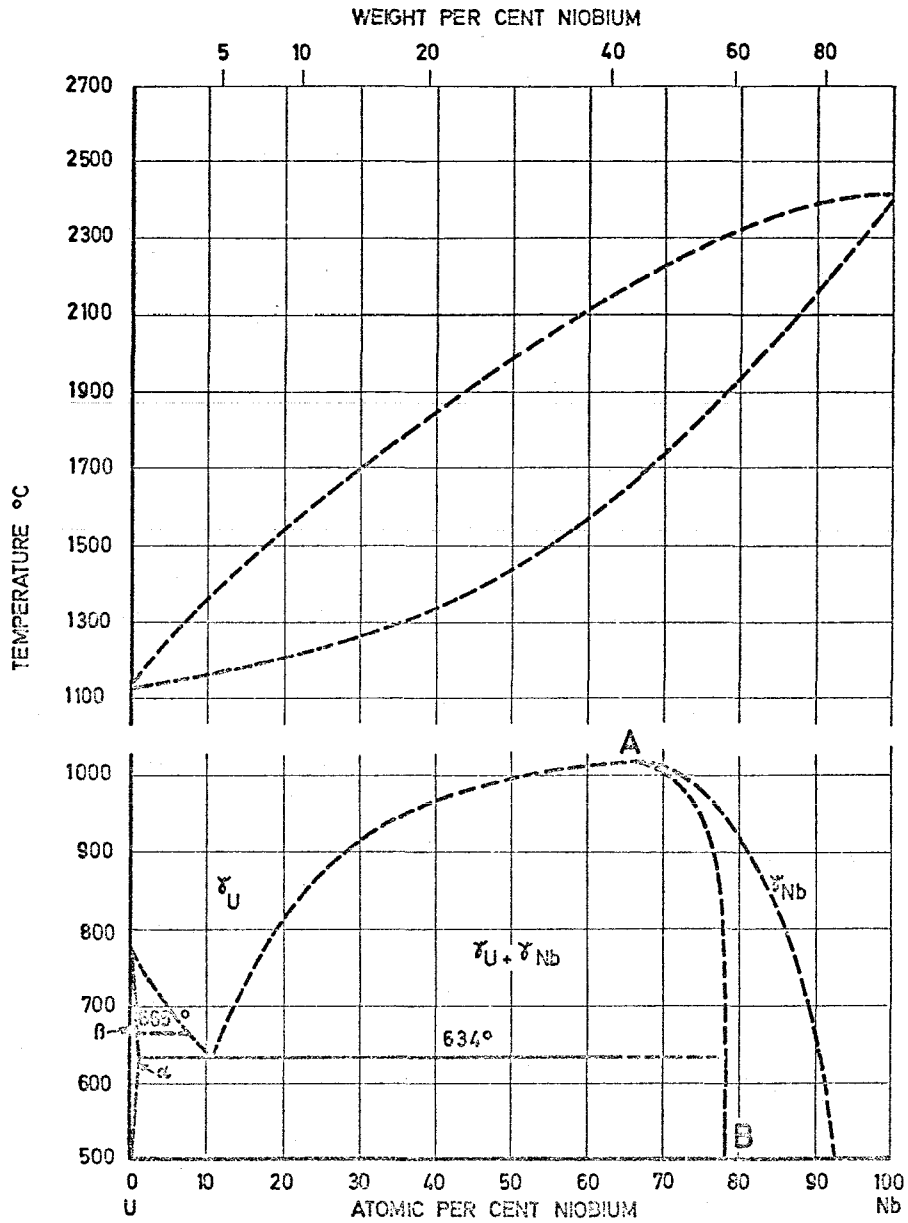


Abb. 1

aus Touloukian: Thermophysical properties of high temperature materials (1967)

auch eine zwar langsam wirkende aber doch endlich große Wärmeableitung bewirken, um zu gewährleisten, daß die SEP nach einer bestimmten Zeit wieder auf eine bestimmte Bezugstemperatur (Nullpunkt) zurückkehrt und keine meßtechnisch unerwünschten Nullpunktschwankungen zeigt. Ferner sollte dadurch der extreme Fall einer Aufheizung über den Schmelzpunkt ausgeschlossen werden, der sonst bei guter Isolation der Probe möglich wäre. Diese Wärmeableitung wurde durch die Verlötung der eigentlichen Probe mit einer Grundplatte erreicht, die ihrerseits mit dem SEP-Gehäuse und dessen Kühlrippen im Gasstrom (Kühlung) liegt (Kap. 2. 2.).

2. 2. Aufbau und konstruktive Gestaltung der SEP

Bei der Konstruktion der SEP waren folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen.

Die SEP sollte

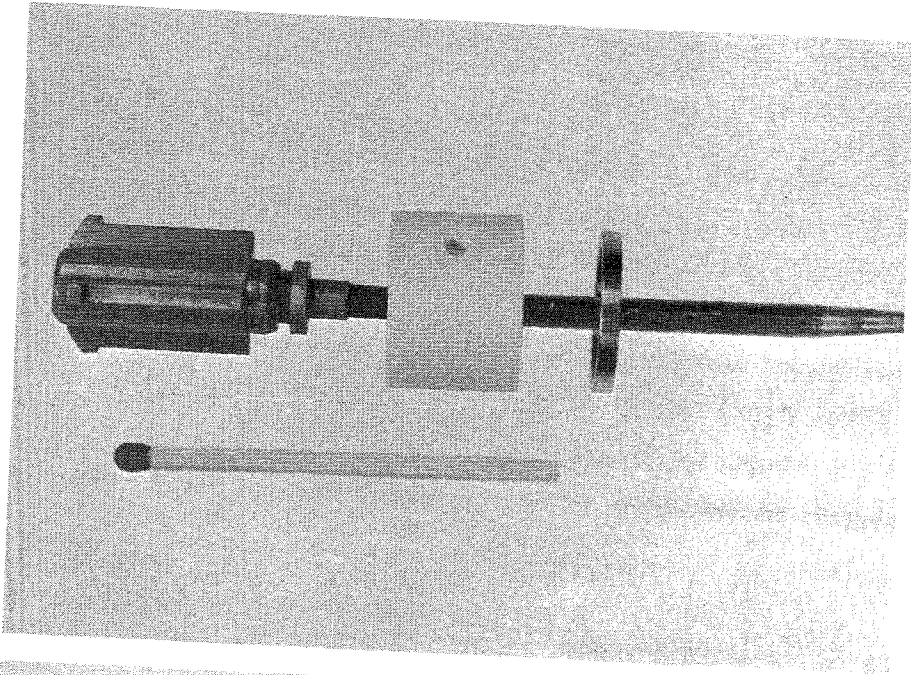
- in einem gasgekühlten Aluminium-Instrumentenrohr von 17,25 mm Innendurchmesser in definierter Höhe befestigt werden,
- gegenüber diesem Instrumentenrohr elektrisch isoliert sein,
- zuverlässig und ausreichend gekühlt werden,
- jeweils in Zwillingsanordnung als "SEP assembly" im Instrumentenrohr zum Einsatz kommen.

Die im Reflektor des SEFOR eingebauten Rohre werden von einem nach oben gerichteten N_2 -Gasstrom mit einer Geschwindigkeit von bis zu 60 m/sec umströmt. Zur Kühlung von Einbauten besitzen die Instrumentenrohre radiale Bohrungen.

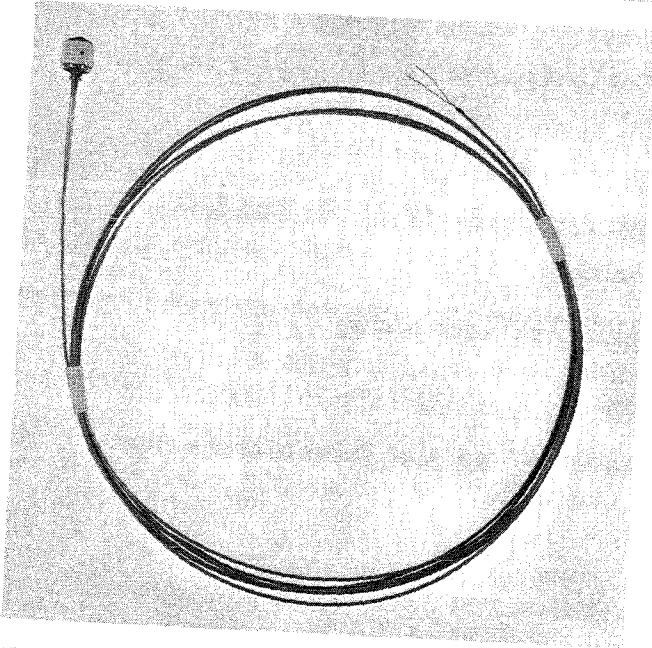
Bei der Berechnung der an den einzelnen Bauteilen maximal auftretenden Temperaturen wurden folgende Zahlen zugrundegelegt:

mittlere Kühlgastemperatur (N_2)	: 70°C
wirksame Kühlfläche	: 1,5 cm ²
Wärmeübergangszahl	k = 0,8 W/cm ² · °C

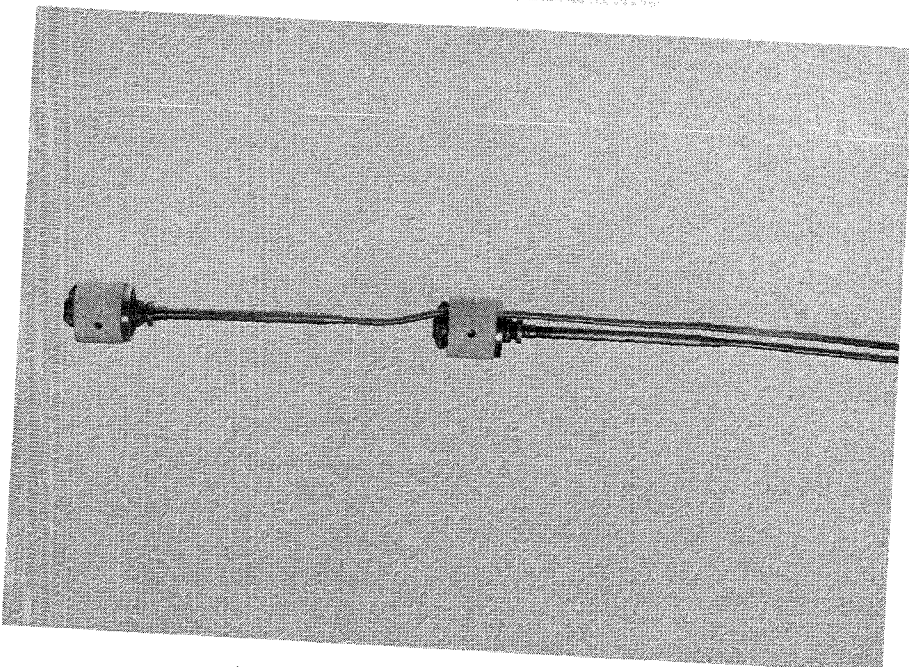
Unter stationären Bedingungen ergeben sich damit bei einer schnellen Neutronen-



SEP vor der Montage
des Keramikringes



SEP mit Mantelleitung



SEP assembly

flußdichte von $1,5 \cdot 10^{14} \mu/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ folgende Werte:

UNb-Zylinder : 250°C

Gehäuseboden : 190°C

Kühlrippen : 90°C

2. 2. 1. Bauteile der SEP (Abb. 2)

UNb-Zylinder : 80 % Niob, 20 % Uran, davon 90 % U_{235}
Durchmesser : 3 mm
Höhe : 5 mm
Gewicht : 0,34 g (0,061 g U_{235})

Gehäuseboden : Werkstoff Nr. 4541 DIN 17006
größter Durchmesser : 6 mm
Höhe : 5 mm
UNb-Zylinder und Gehäuseboden sind mit
Reinkupfer unter Vakuum verlötet.

Thermoelement : NiCr-Ni; Drahtdurchmesser 50 μm .

Ausgleichsleitung : Mantelleitung. Hülle aus Werkstoff
Nr. 4541 DIN 17006
Gesamtlänge: 4250 mm
Außendurchmesser an der Muffe : 3,3 mm
Außendurchmesser der übrigen Leitung: 2 mm

Hülse : Werkstoff Nr. 4541 DIN 17006
Außendurchmesser : 6 mm
Innendurchmesser : 5 mm
Höhe : 16 mm

Muffe : Werkstoff Nr. 4541 DIN 17006
größter Durchmesser : 7 mm
Höhe : 12 mm

view to A

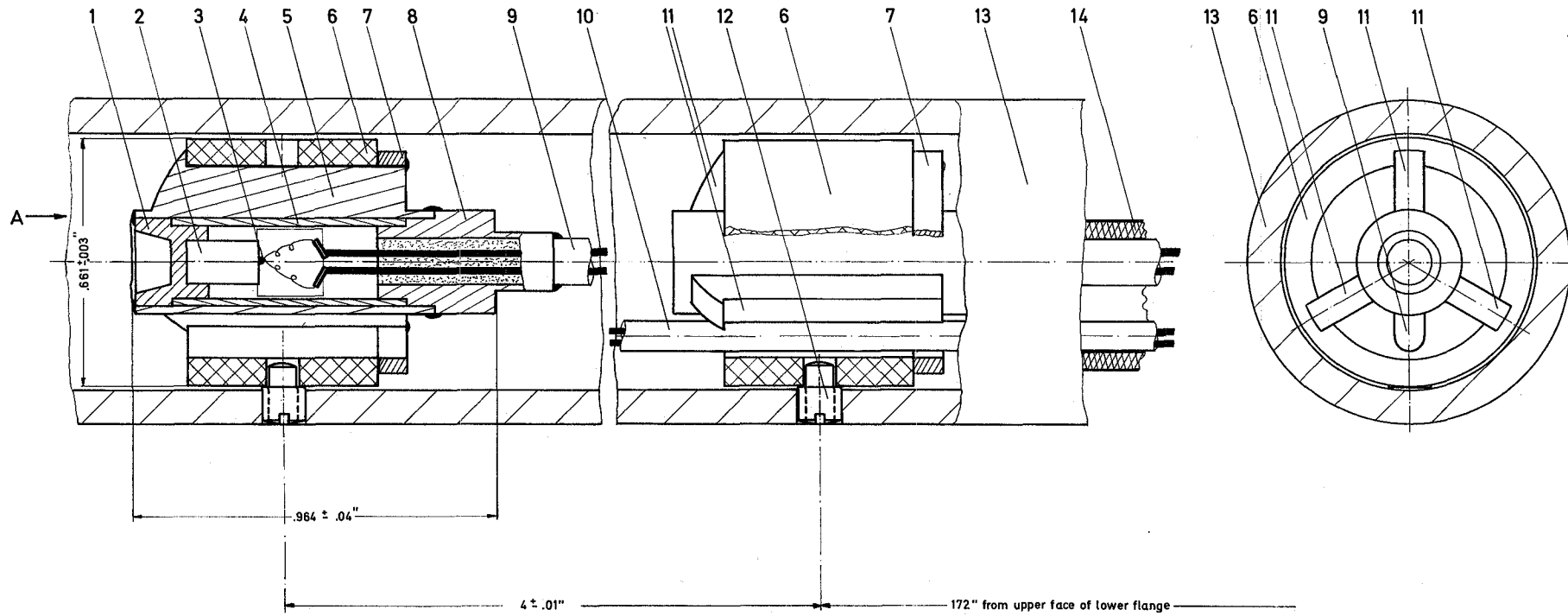


Abb. 2

14	heat shrinkable tubing					G. E.
13	tube				136 B 1629	G. E.
12	fixing screw			M3x2,5x1,6	DIN 926	
11	cooling fins					
10	compensation leads 2	NiCr - Ni				
9	compensation leads 1	NiCr - Ni				
8	sleeve	Nr. 4541			DIN 17006	
7	ring	Nr. 4541			DIN 17006	
6	ceramic cylinder	Al 2 O 3				
5	housing with radiator fins	Nr. 4541			DIN 17006	
4	hull	Nr. 4541			DIN 17006	
3	thermocouple					
2	UNb cylinder					
1	bottom	Nr. 4541			DIN 17006	
Teil	Stück	Benennung	Werkstoff	Abmessung	Zeichngs. Nr. Norm	Bemerkung
Oberflächenabw.	~	▽	▽▽	▽▽▽	bis 6	über 6 bis 10
Reinheitsgrad, in %	1000	40	10	4	1,6	
Freimabtoleranz		± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8 ± 1,2
1969	30	1.	Rühl	Gesellschaft für Kernforschung m. B. H.	Zugbeh. Zeichng.	
1969	2.			7500 Karlsruhe Postfach 947	Ersatz für	
1969					Ersatz durch	
Maßstab	Benennung	5 : 1		SEP assembly		Zeichnungs Nr.

Durchführung	Inventar	Änderung	Tag	Name

Kühlrippenrohr : Werkstoff Nr. 4541 DIN 17006
Rohraußendurchmesser : 7 mm
Rohrinnendurchmesser : 6 mm
Höhe : 20,5 mm
Kühlrippendicke : 2 mm
Gesamtkühlfläche : 885 mm²

Keramikring : Al₂O₃
Außendurchmesser : 17,2 mm
Innendurchmesser : 13,2 mm
Höhe : 12,8 mm

Haltering : Werkstoff Nr. 4541 DIN 17006
Außendurchmesser : 15,8 mm
Innendurchmesser : 12,8 mm
Breite : 2 mm

Stiftschraube : Werkstoff Nr. 4541 DIN 17006
M 3 x 2,5 x 1,6 DIN 926

2. 2. 2. Herstellung und Vorbereitung der Einzelteile

Die uranhaltigen Niob-Legierungen (80 Gew. % Niob, 20 Gew. % Uran) hat die Fa. Nukem, Hanau, aus reinstem Niob-Metall (eisenfrei) und Uran-Metall (90 % angereichertes U 235) im Lichtbogenofen erschmolzen.

Zur Makrohomogenisierung wurden anschließend die Knöpfe mehrmals umgeschmolzen. Das in diesem Zustand vorhandene grobkörnige Gußgefüge konnte durch einen Flachpreß-Prozess unter einer hydraulischen Presse beseitigt werden. Die glatten Ronden wurden dann noch einmal zur Rekristallisation und Homogenisierung bei hohen Temperaturen geglüht. Durch Zersägen und Aufteilen dieser etwa 5 mm dicken Ronden konnten anschließend kurze Vierkantstäbe gefertigt werden, die zu Rundstäbchen von 3 mm Ø und 5 mm Länge verarbeitet wurden.

Die beiden Endflächen dieser Proben mußten dann noch dünn glanzvernickelt werden

(Schichtstärke etwa 5 μm); es hatte sich nämlich gezeigt, daß ein sicheres Anschweißen der dünnen Thermoelement-Drähte nur bei Vorhandensein einer Nickel-zwischenschicht durchführbar ist. Ein geeignetes Bad und eine Haltevorrichtung für die Proben während des galvanischen Prozesses wurden entwickelt und erprobt.

Die dünnwandige Grundplatte (1) aus rostfreiem Stahl wurde aus einem 18/8 Cr-Ni-Stahlrundstab gedreht und das Niob-Uran-Stäbchen (2) im Zentrum so eingepaßt, daß ein enger Lötspalt verblieb. Die Lötung mit Reinkupfer erfolgte durch induktive Erhitzung der Grundplatte und des Stäbchens in einem Quarzrohr, das mit einem Hochvakuum-Pumpstand in Verbindung stand. Nach dem Evakuieren und Entgasen konnte während des Lötens mit dieser Anlage ein Druck von 5×10^{-5} Torr aufrecht erhalten werden.

Eine Oxidation der Probe und der Grundplatte trat nicht ein. Nach dem Abkühlen auf Zimmertemperatur unter Hochvakuum konnten die beiden zusammengelöteten Teile dem Quarzrohr blank entnommen werden. Wenn die genannten Bedingungen eingehalten wurden, fielen alle Lötungen einwandfrei aus. Die dünne Nickelschicht an den Endflächen des Stäbchens wurde beim Erhitzen entgast und gleichzeitig mit der Niob-Uran-Legierung durch Diffusion porenfrei verbunden.

Die Befestigungsmuffe (8) wurde ebenfalls aus einem 18/8 Cr-Ni-Rundstahl gedreht. Die Zentralbohrung für das Mantelthermoelement muß genau dem jeweiligen Thermoelementmantel-Durchmesser angepaßt werden. Eine gleichmäßig enge Passung muß in diesem Fall verlangt werden, damit beim Elektronenstrahlschweißen die aufgebrachte Energie über den inneren Mantel gleichmäßig abgeführt wird und sich dadurch eine einwandfreie Rundnaht ausbildet. Die Wandstärke des Mantelthermoelementes an dem verdickten Ende beträgt etwa 0.3 mm. Mit einem normalen Schweißverfahren (Argon-arc) war eine gasdichte Schweißverbindung zwischen Muffe und Mantelthermoelement ohne Durchbrennen des Mantels nicht mit Sicherheit durchzuführen. Für die vorhandene Elektronenstrahlschweißanlage wurde deshalb eine Vorrichtung gebaut, mit der das 5 m lange Mantelthermoelement im aufgewickelten Zustand so eingespannt und gedreht werden kann, daß sich das Ende des Thermoelementes mit der aufgepaßten Muffe genau unter dem Elektronenstrahl befindet und in dieser Lage dann auch die Feinschweißung durchzuführen ist.

Ein Schliffbild (Bild 3), auf dem die Schweißnähte deutlich zu erkennen sind, zeigt deutlich, daß der Thermoelementmantel beim Elektronenstrahlschweißen bis etwa zur Hälfte aufgeschmolzen wurde und mit der Muffe eine feste und gasdichte Schweißverbindung entstanden ist. Bei den Elektronenstrahlschweißungen ist besonders darauf zu achten, daß die Einzelteile vor dem Einpassen und Montieren sehr gut von Fett- und Ölspuren gereinigt werden, damit beim plötzlichen Erhitzen und Aufschmelzen im Hochvakuum keine Gase entstehen können, die dann häufig die Ursache von undichten Stellen bzw. porösen Schweißnähten sind.

Das rohrförmige Zwischenstück (4) besteht ebenfalls aus einer 18/8 Cr-Ni-Legierung und dient als Abstandshalter zwischen Grundplatte und Muffe mit dem angeschweißten Mantelthermoelement. Sowohl an der Grundplatte als auch an der Muffe wird das Zwischenstück durch Punktschweißen befestigt und auf diese Weise gegen Verdrehen geschützt. Durch die beiden großen Ausnehmungen (Fenster) können die an das Niob-Uran-Stäbchen angeschweißten dünnen Thermoelement-Drähte mit dem dickeren des Mantelthermoelementes durch Punktschweißen verbunden werden, ohne daß auf die dünnen Drähte ein Zug oder Druck ausgeübt wird. Diese Arbeit erfordert eine gewisse Geschicklichkeit bei der Vorbereitung der Schweißstelle (Bild 4).

Das Mantelthermoelement (9), (10) der Fa. Philips besitzt einen Mantel aus rostfreiem Stahl (18/8 Cr-Ni-Stahl). Auf einer Länge von 4,95 m hat dieser einen Außendurchmesser von etwa 2 mm. An einem Ende ist das Kabel auf einer Länge von 50 mm etwas dicker (3 mm \emptyset) gehalten, damit man dort die Befestigungsmuffe ohne Verletzung des Mantels leichter anschweißen bzw. druck- und gasdicht mit ihm verbinden kann. Die inneren Thermoelementdrähte haben einen Durchmesser von 0,4 mm. Für den einen Schenkel werden Rein-Nickel, für den anderen eine Spezial-Nickel-Chrom-Legierung verwendet. Die Isolationsmasse ist MgO-Pulver. Vor dem Elektronenstrahlschweißen wird die Bohrung der Muffe genau auf den Außendurchmesser des Mantels abgestimmt und so fest eingepaßt, daß kein Spalt zwischen Mantel und Muffe verbleibt.

Das als Gehäuse dienende Kühlrippenrohr (5) wurde aus einem vollen 18/8 Cr-Ni-Rundstab gefräst und gedreht. Es dient gleichzeitig als Gehäuse, Wärmetauscher und Zentriervorrichtung im Instrumentenrohr.



Bild 3 Mikroskopisches Gefügebild (V = 200x) einer Elektronenstrahl-Schweißnaht: Befestigungsmuffe - Mantel - thermoelement

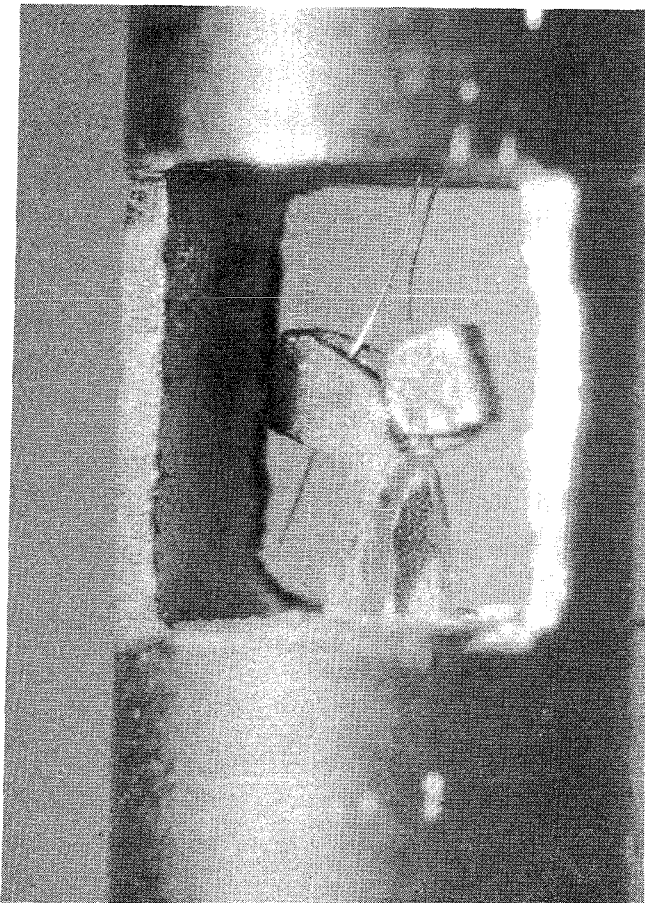


Bild 4
Vergrößerte Abbildung (V = 65x)
einer Verbindungsstelle zwischen
den dünnen Thermoelementdrähten
und den dicken Mantelthermoelement-
drähten

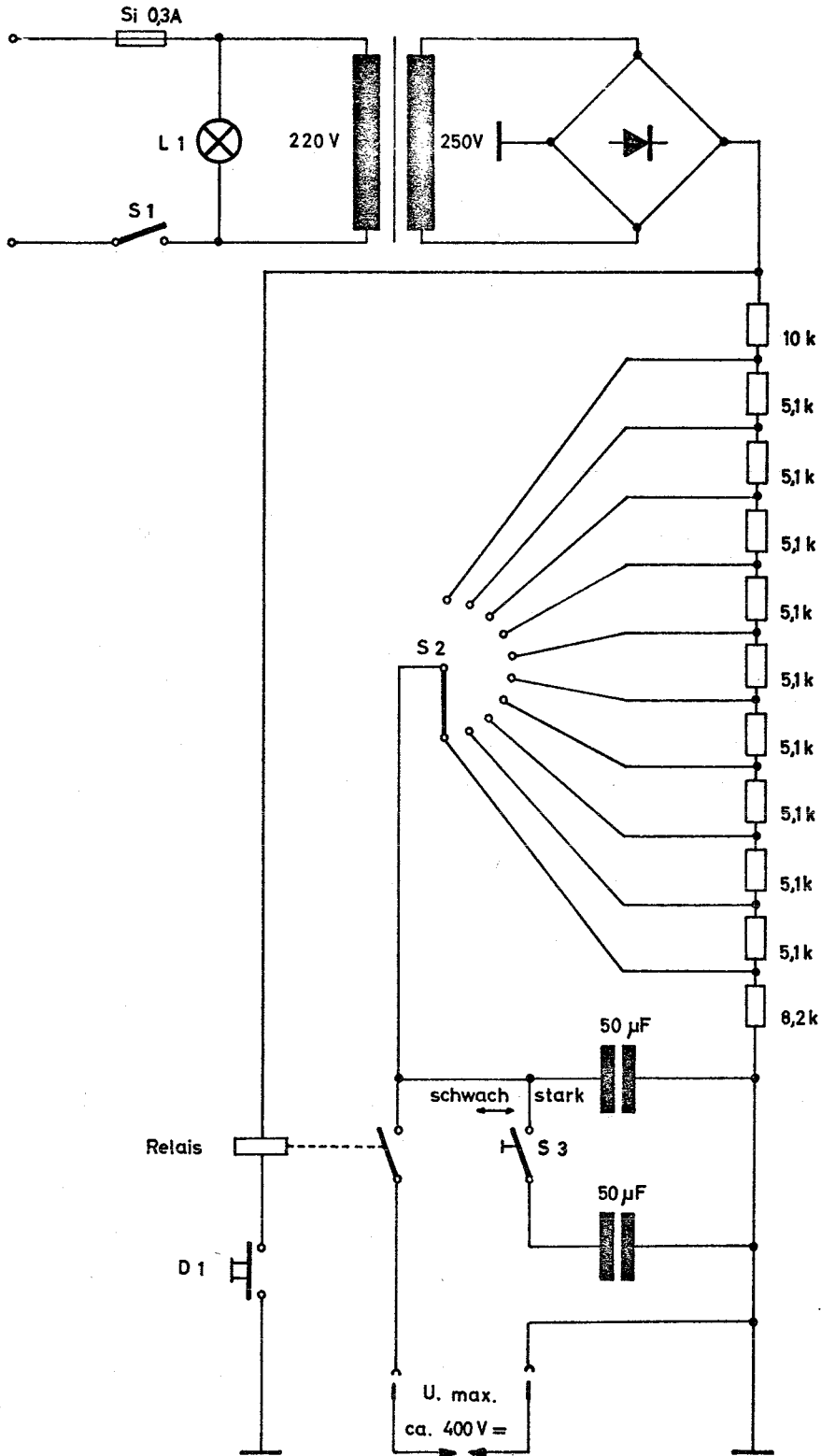
Der Keramikring (6) besteht aus Al_2O_3 . Er isoliert die SEP elektrisch gegenüber dem Instrumentenrohr. Er wird mechanisch gehalten durch angedrehte Anschläge an den Kühlrippen und durch den aufgeschrumpften 18/8-Stahlring (7).

Mit Hilfe der Stiftschraube (12) werden die im Instrumentenrohr verdreh- und verschiebbaren SEP's fixiert.

2. 2. 3. Anschweißen der Thermoelementdrähte an das Niob-Uran-Stäbchen und Zusammenbau der Sonde

Schon bei Beginn der Planung der Energiesonde war klar, daß das am schwierigsten zu lösende Problem das sichere und feste Anschweißen der nur 50 - 25 μm dicken Drähte an das 3 mm starke Niob-Uran-Stäbchen sein würde. Industriefirmen für Feinschweißtechnik konnten nur Geräte anbieten, bei denen die Drähte zuerst mit einem bestimmten Druck an eine Grundplatte angepreßt und dann in dieser Lage verschweißt werden. Da eine derartige Verfahrenstechnik für unseren speziellen Fall nicht in Frage kam, mußte eine geeignete Schweißapparatur entwickelt werden (Abb. 5).

Durch eine fein regelbare, gesteuerte Kondensatorentladung sollte es grundsätzlich möglich sein, auch sehr dünne Drähte an ein dickeres Stäbchen anzuschweißen. Vorversuche mit verschiedenen dicken Drähten aus Nickel, Chrom-Nickel und Platin zeigten, daß man mit dieser Verfahrenstechnik auch dünnste Drähte, ohne einen Druck auf sie auszuüben, an einen stabförmigen Körper fest anschweißen kann. Dabei wird der dünne Draht entweder unter einem Mikroskop mit einem Mikro-Manipulator (Fa. Leitz, Wetzlar) oder mit einem feinen Halter, an dem das anzuschweißende Drahtstück durch Weichlöten befestigt ist, mit der Stirnfläche des Stäbchens nur leicht in Berührung gebracht. Schaltet man jetzt über einen Druckknopf-Schalter ein Steuerrelais ein, das dann wiederum über ein Schaltelement den Hauptstromkreis schließt, so entladen sich die jeweils parallel geschalteten Kondensatoren schlagartig über den dünnen Draht und die geerdete dickere Probe; Spannungsspitzen bis max. 400 V können dabei auftreten. Die Stelle, die den höchsten Kontaktübergangswiderstand besitzt, d. h. die Berührungsstelle zwischen Draht und Probenoberfläche, erhitzt sich am stärksten. Dabei schmilzt der dünne Draht an der Spitze kurzzeitig auf



Teil	Stück	Benennung					Werkstoff	Abmessung		Zeichngs. Nr. Norm				Bemerkung
Oberflächenzeichen	~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freimaßtoleranz	bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000		
Rauhtiefe max. in µ	1000	40	10	4	1,6		± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2		
19	Tag	Name		Werkstoff		Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947				Zugeh. Zeichng.				
gez.	08. 7. 69	J. Wiedmer								Ersatz für				
gepr.										Ersetzt durch				
ges.										Zeichnungs Nr.				
Maßstab		Benennung						Schweißgerät Kondensatorentladung U _s		Abb. 5				

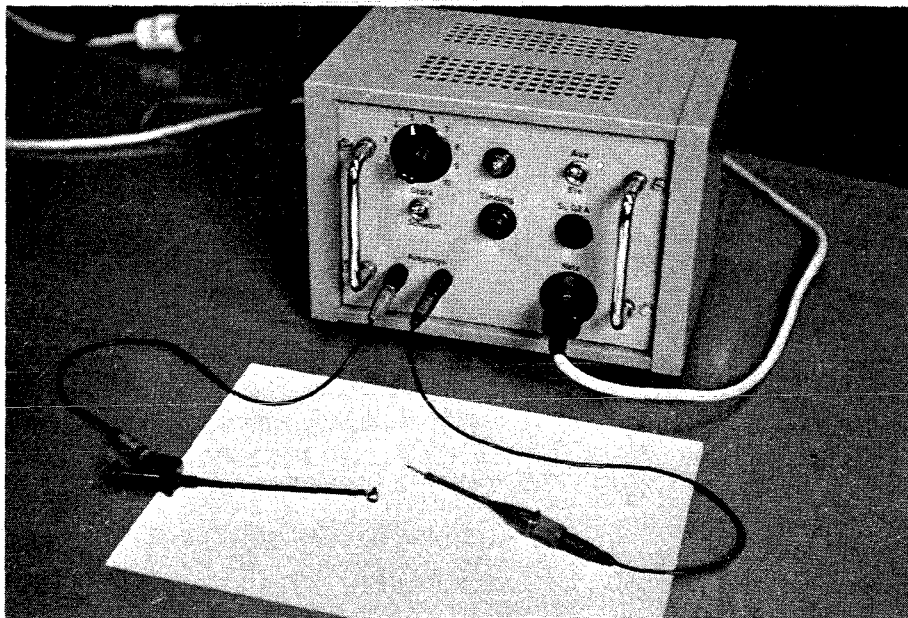


Bild 6 Schweißapparatur für Feinstdrähte mit gesteuerter
Kondensatorentladung

und verbindet sich gleichzeitig mit der Unterlage.

Zum Anschweißen schaltet man immer nur so viele Kondensatoren parallel, daß der dünne Draht bei der Entladung gerade nicht zerstäubt, jedoch sicher anschweißt. Den Schaltplan eines für diese Zwecke speziell gebauten Schweißgerätes mit Kondensatorentladung zeigt das Bild 6.

Mit dieser Schweißapparatur wurden nach kurzer Erprobungs- und Einarbeitungszeit sämtliche Feinstdrähte an die Niob-Uran-Stäbchen fehlerfrei angeschweißt. Dabei zeigte sich, daß durch eine dünne Nickelschicht auf der Stirnfläche des Stäbchens das Anschweißen der Drähte sehr erleichtert bzw. die Ausschußquote dadurch stark verringert wird.

Zuerst wurden nur kurze, gerade Drahtstücke an der Stäbchenoberfläche angeschweißt. Nachdem aber diese bei einem plötzlichen Erhitzen und Ausdehnen der äußeren Sondenfassung infolge von Zug- oder Biegespannungen leicht abrissen, wurde der feine Draht im Mittelstück zu einer federnden Wendel geformt. So kann dieser jetzt elastisch alle Längenveränderungen ausgleichen, ohne abzureißen.

2. 2. 4. Zusammenbau der SEP

Den Zusammenbau der Einzelteile führt man in folgenden Schritten durch, nachdem die Teile, wie beschrieben, vorher fertig bearbeitet sowie zur Montage vorbereitet und überprüft wurden: (Bild 6)

Auf die Grundplatte (1) mit dem in Hochvakuum eingelöteten Niob-Uran-Stäbchen (2), an dem die beiden dünnen Thermoelementdrähte schon fertig angeschweißt sind, steckt man zunächst das rohrförmige Zwischenstück (4); durch Punktschweißen wird es mit der Grundplatte fest verbunden bzw. gleichzeitig dadurch gegen Verdrehen gesichert. In das andere offene Ende des rohrförmigen Zwischenstückes (4) wird die Befestigungsmuffe (8) mit dem gasdicht angeschweißten 5 m langen Mantelthermoelement (9), (10) gesteckt und ebenfalls durch Punktschweißen verbunden bzw. gegen Verdrehen gesichert. Durch die beiden Ausnehmungen (Fenster) muß man jetzt nacheinander die zueinander passenden dünnen Thermoelementdrähte in die breit gehämmerten Enden

(Ösen) der dickeren Thermoelementdrähte mit einer Pinzette einführen und diese durch Flachdrücken der Ösen einklemmen und festhalten. Mit einer kleinen Punktschweißmaschine wird schließlich eine dauerhafte und sichere Verbindung zwischen dem feinen und dem dickeren Thermoelementdraht hergestellt. Nach Beendigung dieser Montagezwischenarbeiten überprüft man schon jetzt die Funktion und das richtige Arbeiten des Thermoelementes, indem man die Grundplatte z. B. mit einem LötKolben kurz erwärmt und dabei die Thermospannung an den freien Schenkeln am Ende des Mantelthermoelementes mißt. Ist diese Überprüfung zufriedenstellend ausgefallen, so kann man das Kühlrippenrohr (5) über das Zwischenstück (4) mit den beiden Fenstern schieben und die Sonde für die Schlußschweißung in Heliumatmosphäre vorbereiten.

Da der innere Raum der Sonde mit dem Niob-Uran-Stäbchen mit Helium gefüllt sein sollte, konnten die beiden letzten Rundnähte nicht wie bei der Muffenschweißung mit dem Elektronenstrahlschweißverfahren gasdicht verschweißt werden. Es kam daher für diese Schweißung nur das Heli-arc oder das Plasmaschweißverfahren in Frage. Die sichereren und gleichmäßigeren Ergebnisse erhielten wir mit dem Plasmaschweißen, das in der Hauptwerkstatt neuerdings zum Schweißen dünnwandiger Rohre und Bleche eingesetzt wird. Die Schlußschweißungen wurden daher dort mit bestem Erfolg und ohne Ausschuß durchgeführt. Vorversuche hatten übrigens gezeigt, daß der Hülsenraum nach diesem Verfahren ausreichend mit Helium gefüllt wird; die feinen Thermoelementdrähte oxidierten auch nach einer 24stündigen Glühung der geschlossenen Kapsel bei 800°C nicht; nach dem Wiederöffnen verschiedener Hülsen waren die Thermoelementdrähte immer blank geblieben.

Nach dem Verschweißen der äußeren Gehäuseteile werden die SEP's paarweise zu SEP assemblies zusammengebaut.

Dabei werden zuerst zwei Sonden mit Keramik- und Halteringen versehen. Danach wird das freie Ende des Thermoelementkabels der einen SEP durch den Keramikring der anderen geführt.

Beide Kabel werden auf die erforderliche Länge von 4,25 m gekürzt und mit zweipoligen Thermoelement-Steckern versehen.

Damit ist es möglich, die SEP's ohne Schwierigkeiten mit Hilfe entsprechender Gegenstecker an die elektrische Durchführung im unteren Teil des Instrumentenrohres anzuschließen.

Die Höhenposition des SEP assembly im Instrumentenrohr ist so gewählt, daß sich eine Sonde 2" über, die andere 2" unter core-Mitte befindet.

2. 2. 5. Endprüfung

Neben den laufenden Kontrollen während des Zusammenbaues werden nach Fertigstellung der SEP zwei Dinge eingehend geprüft: Dichtheit und thermoelektrische Funktion.

Bei der Dichtheitsprüfung wird die SEP in einen evakuierbaren Behälter gebracht, welcher mit einem Helium-Lecksuchgerät in Verbindung steht. Wird beim Evakuieren kein Helium gefunden, kann die Dichtheit aller Schweißnähte als sicher angenommen werden.

Zur Überprüfung der thermoelektrischen Funktion der SEP wird diese mehrmals über verschiedene Zeitspannen hinweg erhitzt und die abgegebene Thermospannung sowie An- und Abstieg derselben mit Hilfe elektrischer Meßgeräte kontrolliert.

Eine Vergleichsmessung zwischen einem NiCr-Ni-Eichelement und einer SEP ist in Abb. 7 aufgezeichnet.

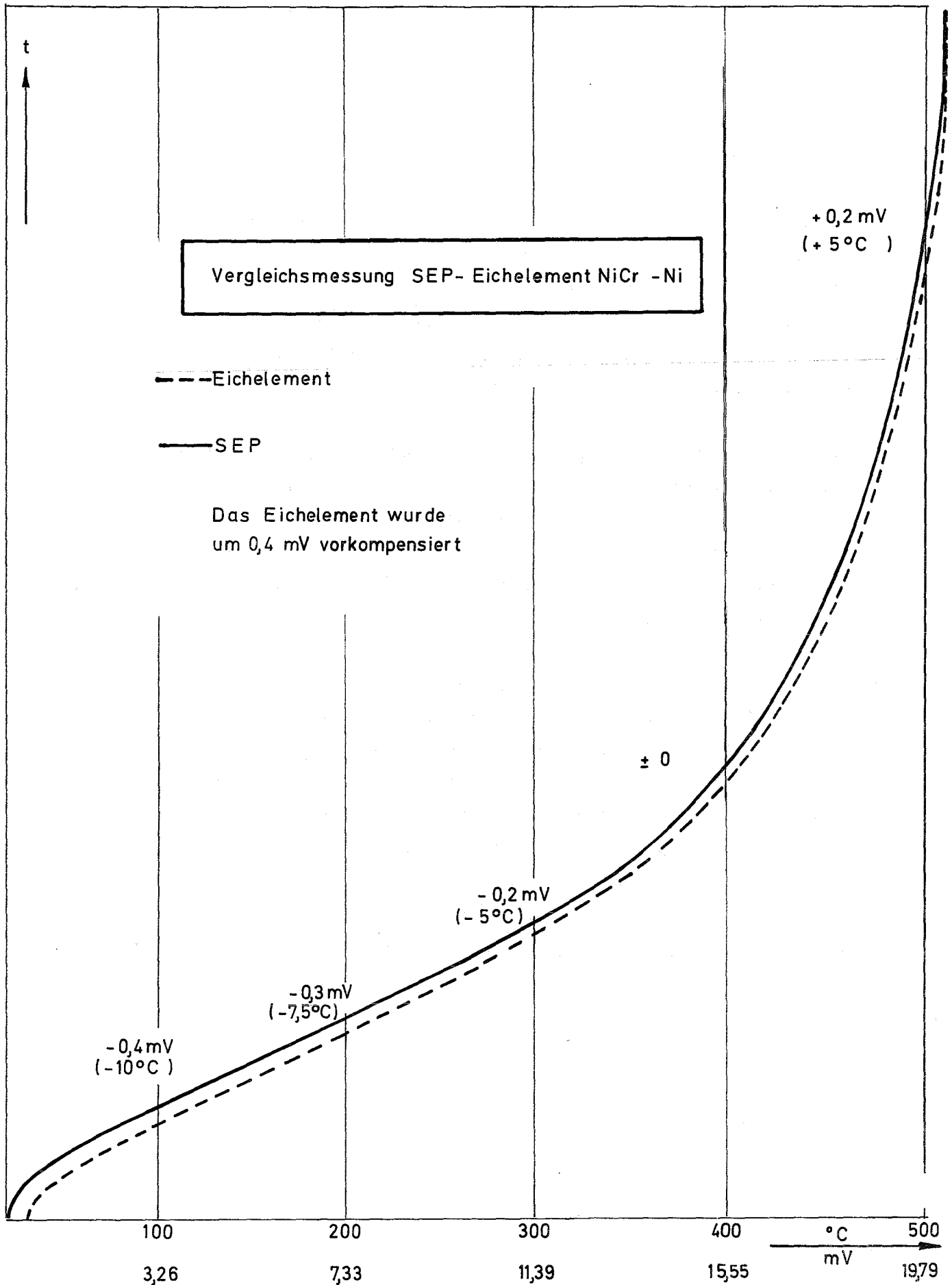


Abb. 7

3. Erprobung der SEP

3. 1. Erprobung im Zyklotron

Der Einsatz der Energy Probe am SEFOR ist primär bei den Exkursions-Experimenten (3) vorgesehen. Hierbei wird die Reaktorleistung impulsförmig auf sehr hohe Werte gebracht; typisch ist - ausgehend von z. B. 10 MW Dauerleistung - eine Exkursion auf 10^5 MW innerhalb von 20...50 msec. Die Energy Probe soll nun die während der Exkursion freigesetzte Energie, d. h. das zeitliche Integral der Leistung erfassen. Dazu werden folgende Forderungen aufgestellt:

- a) Die Ansprechzeitkonstante τ_A soll genügend kurz sein, um den zeitlichen Energieverlauf aufzulösen; für die vorgesehene Anwendung wurde deshalb verlangt, $\tau_A \leq 1$ msec zu erreichen. Die Ansprechzeitkonstante ist im wesentlichen durch die Wärmetransportzeit vom Spaltmaterial zur Lötstelle des Thermoelements gegeben, wobei die Nickelschicht zwischen Spaltmaterial und Thermoelement eine weitere Rolle spielt.
- b) Die Integrationszeitkonstante τ_B muß genügend lang sein, um den Verlauf der Leistungsfreisetzung während der Exkursion mit möglichst geringer Verfälschung wiederzugeben. Die Integrationszeitkonstante ist im wesentlichen durch die Wärmeableitung von der Probe über den Boden und die Kühlrippen zum Kühlmedium gegeben. D. h. also, es soll z. B. während einer 20 msec-Exkursion die Wärmeableit- (oder Integrations) - Zeitkonstante etwa 10 mal größer sein, so daß während der Exkursion die freigesetzte Energie praktisch noch nicht abfließt. Die folgende Abbildung zeigt für den idealisierten Fall eines Rechteckleistungssprunges das gewünschte Verhalten der Probe, das vereinfacht durch

$$\delta(t) \approx (1 - e^{-\frac{t}{\tau_A}}) e^{-\frac{t}{\tau_B}} \int L dt$$

beschrieben werden kann.

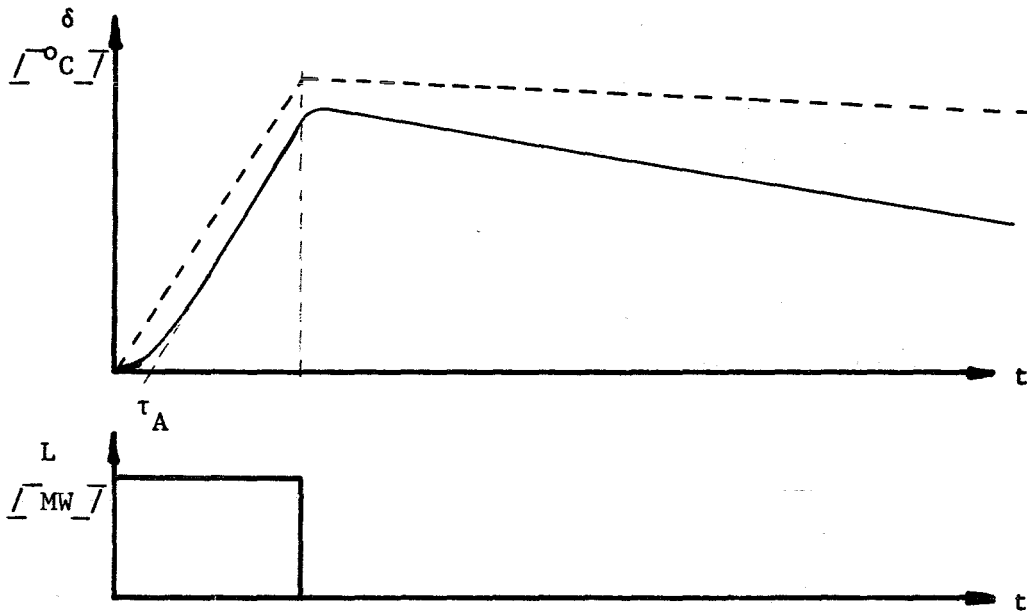


Abb. 8

- - - ideale Temperaturmessung mit $\tau_A = 0$, τ_B sehr groß

_____ praktisch erreichbarer Verlauf mit $\tau_A > 0$, $\tau_B \gg \tau_A$

3. 1. 1. Versuchsdurchführung

Zur Untersuchung des Zeitverhaltens der SEP waren Versuche erforderlich, bei denen kurzzeitig hohe Energiedichten in der Probe entstehen. Dazu wäre ein Reaktor oder Beschleuniger mit einem Fluß von $\phi \approx 10^{16} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ erforderlich gewesen.

Die zweite Möglichkeit bestand darin, die Probe mit d^{++} -Teilchen im Karlsruher Zyklotron zu beschießen.

Hierzu wurde ein SEP-Prototyp ohne äußere Umhüllung auf einen wassergekühlten Kupferblock montiert. Diese Anordnung, einschließlich einer vakuumdichten Durchführung für die Thermoelementableitung, wurde im internen Strahlengang des Zyklotrons montiert.

Die prinzipielle Anordnung zeigt Bild 9:

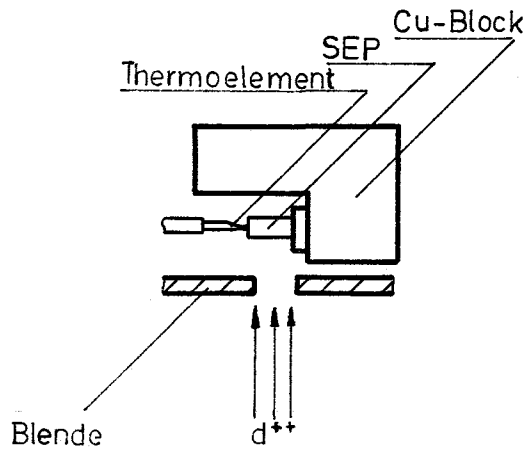


Bild 9

Eine Blende schützt die empfindliche Thermoelement-Lötstelle vor dem direkten d^{++} -Strahl. Die Blende ist so eingestellt, daß der Strahl etwa 1/10 mm vor der Lötstelle abgeschnitten wird.

Die Reichweite geladener Teilchen in Materie hängt von der Teilchenenergie und der Dichte der absorbierenden Substanz ab. Die Bragg-Kurve ergibt für Deuteronen als Geschoß und Uran als Absorber bei einer Eindringtiefe von 2,5 mm (also dem Durchmesser des Prototyps) eine notwendige Strahlenergie von 50 MeV.

Mit 50 MeV - d^{++} wurden eine Reihe von Tests gefahren und dabei folgende Parameter variiert:

Impulslänge: von 1 bis 100 msec

Impulsstrom: von 1 bis 100 μ A

Proben-Material: Uran/Niob und Edelstahl

Die Oszillographen-Aufnahme der registrierten Temperaturen beim Pulsen zeigen qualitativ den erwarteten Verlauf.

Die untere Kurve stellt den d^{++} -Impuls dar, die obere Kurve den Temperaturanstieg in der Probe.

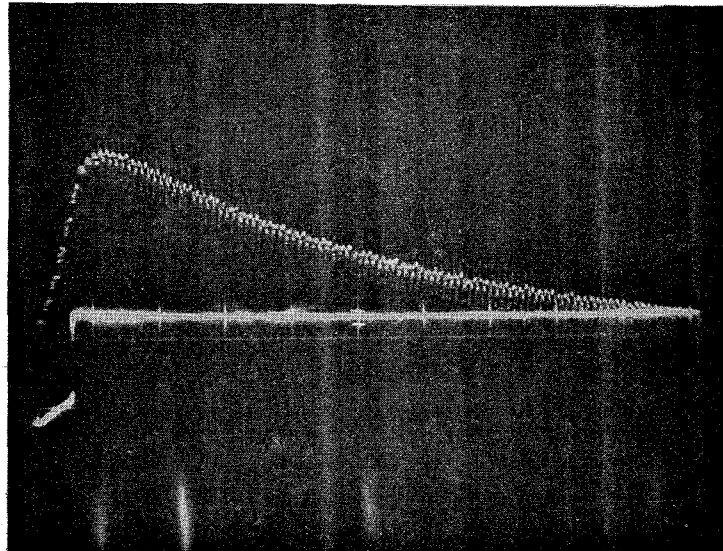


Fig. 10 : Edelstahlprobe bestrahlt mit 50 MeV - d^{++}
Impulslänge 100 msec
x - Achse: 200 msec/cm
y - Achse: 1 mV/cm

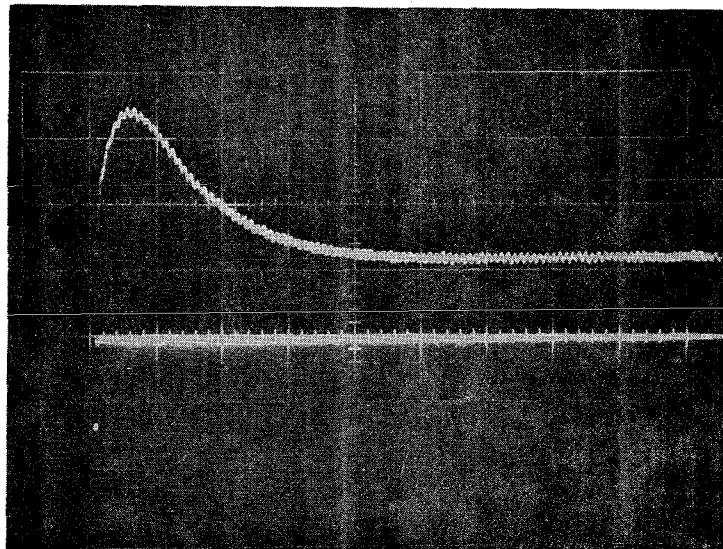


Fig. 11 : Nb-U-Probe bestrahlt mit 50 MeV - d^{++}
Impulslänge 2 msec
x - Achse: 200 msec/cm
y - Achse: 100 μ V/cm

Die Auswertung ergibt für die Wärmeableit-Zeitkonstante (=Integrationszeitkonstante

	für Edelstahl	$\tau_B = 0,7 \text{ sec}$
	für U/Niob	$\tau_B = 0,35 \text{ sec}$

Die Ansprechzeitkonstante τ_A konnte mit diesen Tests nicht ermittelt werden. Die zum Schutz des Thermoelements vor dem direkten d^{++} -Strahl vorgenommene Abschattung von ca. 1/10 mm vor der Lötstelle ergibt natürlich eine größere Ansprechzeitkonstante, als dieses bei vollständiger Bestrahlung der Probekörper der Fall wäre. Man erkennt, daß das Maximum der gemessenen Temperatur nicht mit dem Ende des d^{++} -Impulses erreicht ist, sondern etwa 100 msec später.

3. 2. SEP-Testversuche am Forschungsreaktor München (FRM)

3. 2. 1. Zweck und Aufgabe der Versuche

In diesem Kapitel werden die zwei Versuche, welche am FRM durchgeführt wurden, beschrieben und diskutiert. Diese Versuche waren die erste nukleare Erprobung der SEFOR ENERGY PROBE.

Die endgültige Erprobung der SEP wird beim Einsatz im SEFOR erfolgen.

Die Experimente in München hatten zwei Aufgaben:

- a) es sollte bewiesen werden, daß die SEP in einem Neutronenfeld reagiert, d. h. einen Temperaturanstieg anzeigt,
- b) das Verhalten der SEP in einem sich ändernden Neutronenfeld sollte untersucht werden.

In beiden Versuchen wurden sowohl das statische, als auch das dynamische Verhalten untersucht.

3. 2. 2. Beschreibung der Versuchseinrichtungen

Die für die Konstruktion der Versuchseinrichtung ausschlaggebende Forderung war die Größe der Freigabezeit $t_F \leq 1$ msec. In dieser Zeit sollte eine Cd-Abschirmung den in der SEP befindlichen UNb-Zylinder freigeben und so dem n-Fluß des FRM-cores aussetzen.

Als mit verhältnismäßig einfachen Mitteln zu verwirklichende Lösung bot sich ein ringförmiger Schlitzverschluß nach Fig. 12 an.

Die SEP (1) ist dabei auf einen Cu-Fuß (2) aufgelötet. Die Zugfeder (6) zieht über die Spannhülse (5) und den Al-Stützring (4) den Cd-Zylinder (3) nach unten.

Beim Versuch wird durch einen durch die Spannhülse (5) geführten Stahldraht (16)

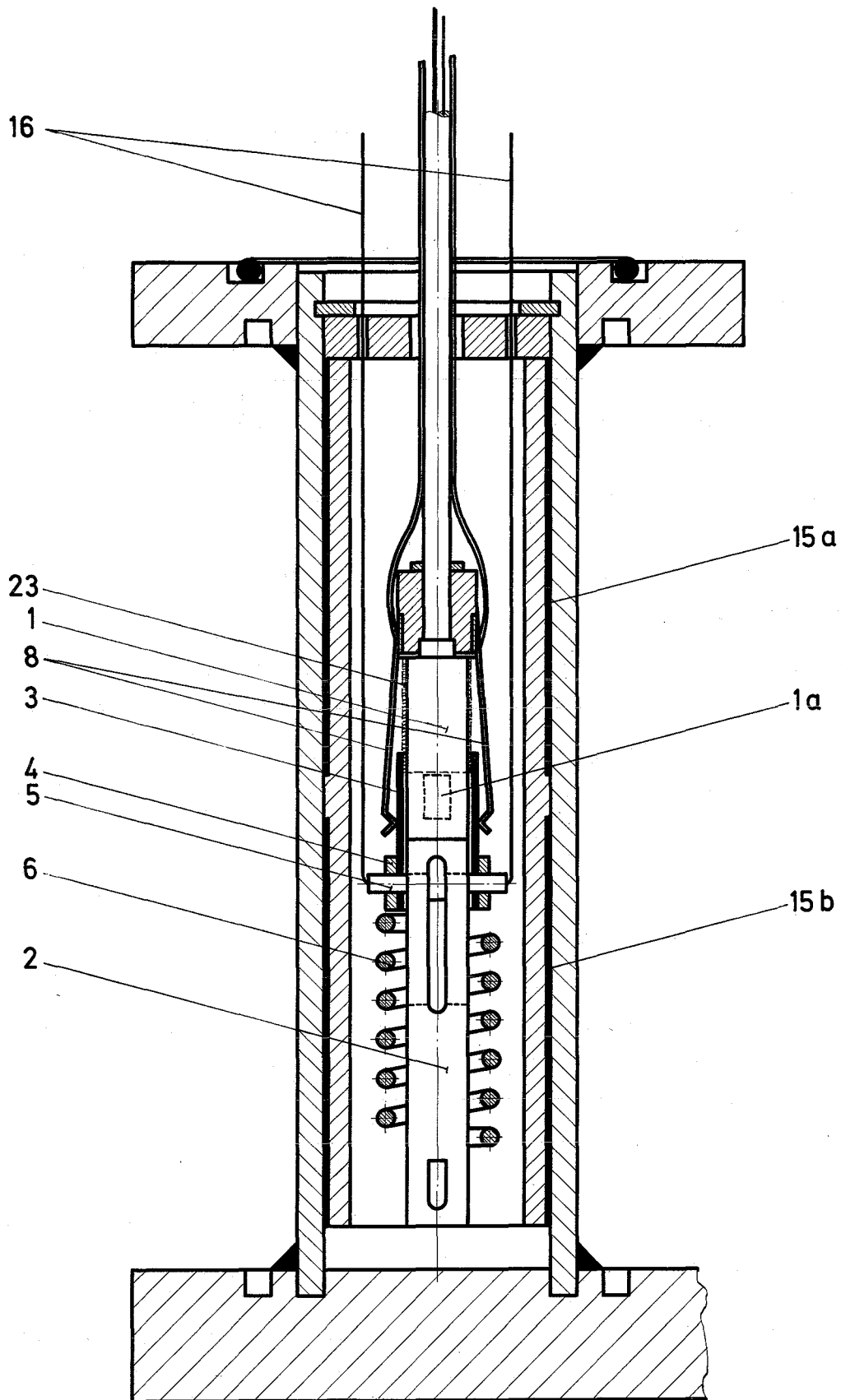


Fig. 12 SEP - Testrohr
M 2:1

von 0,3 mm Durchmesser der Cd-Zylinder (3) nach oben gezogen, so daß er den UNb-Zylinder (1a) innerhalb der SEP abdeckt, die Feder (6) wird gespannt. Den feststehenden Ringspalt des Verschlusses bildeten beim 1. FRM-Experiment die beiden Cd-Mäntel (15 a) und (15 b). Beim 2. FRM-Experiment wurde anstelle dieser beiden äußeren Cd-Teile eine Cd-Abschirmung (23) direkt auf das SEP-Gehäuse aufgelötet, um die durch die Teile (15 a) und (15 b) bewirkte Flußdepression zu beseitigen (Abb. 1, gestrichelt gezeichnet).

Beim Durchschneiden des Stahldrahtes (16) am oberen Ende der Versuchseinrichtung zieht die Feder (6) die Abschirmhülse nach unten, die Probe wird freigegeben.

Zur Triggerung des benötigten Oszillografen und zur Signalisierung von Beginn und Ende der Probenfreigabe dienten zwei Kontaktfedern (8) in Verbindung mit Kontaktstreifen auf dem Cd-Zylinder.

Nach optimaler Auslegung aller zu beschleunigenden Teile ergab sich rechnerisch eine Freigabezeit von $t_F = 0,5$ msec.

Die aus den Vorversuchen ermittelte tatsächliche Freigabezeit lag zwischen 0,28 msec und 0,38 msec.

Die Gestaltung der Kontaktfedern und der zugehörigen Kontaktstreifen machte umfangreiche Vorversuche erforderlich, um bei der auftretenden Relativgeschwindigkeit von ca. 10 m/sec eine ausreichende Kontaktgabe zu erzielen. Dies wurde erreicht durch Reduzierung der federnden Massen auf ein Minimum (Federabmessungen: $0,1 \times 1 \times 6$ mm) und treppenförmig ausgebildete Kontaktstreifen.

Die gesamte SEP-Testeinrichtung war bei beiden FRM-Versuchen im Fuße eines ca. 10 m langen Al-Rohrgestänges nach Abb. 13 untergebracht, während Thermoelementleitung, Triggerkabel, Zugdraht und Füllschlauch am oberen Rohrende herausgeführt wurden. (Vor dem Einsetzen in das Reaktorbecken wurde das Rohrsystem jeweils mit CO_2 gefüllt, um zu verhindern, daß aktivierte Luft aus den oberen Öffnungen austreten konnte.)

Nach Beendigung jeder Experimentserie wurden die Leitungen und Drähte abgeschnit-

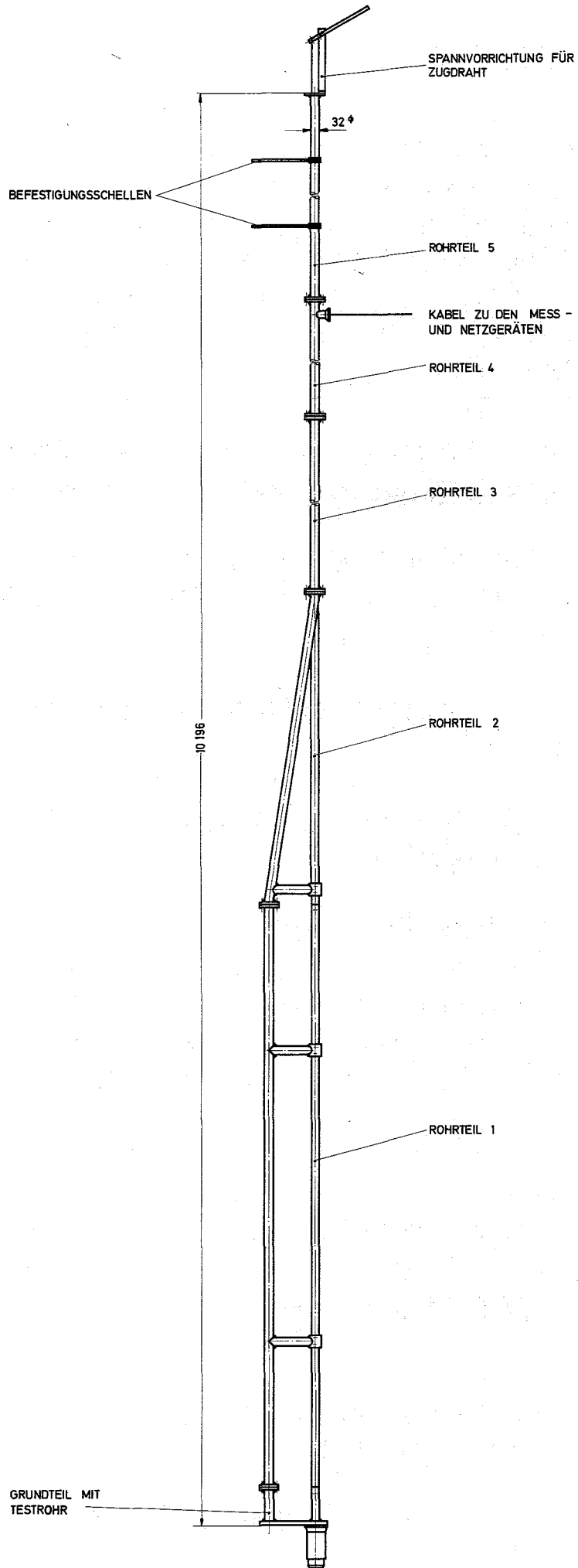


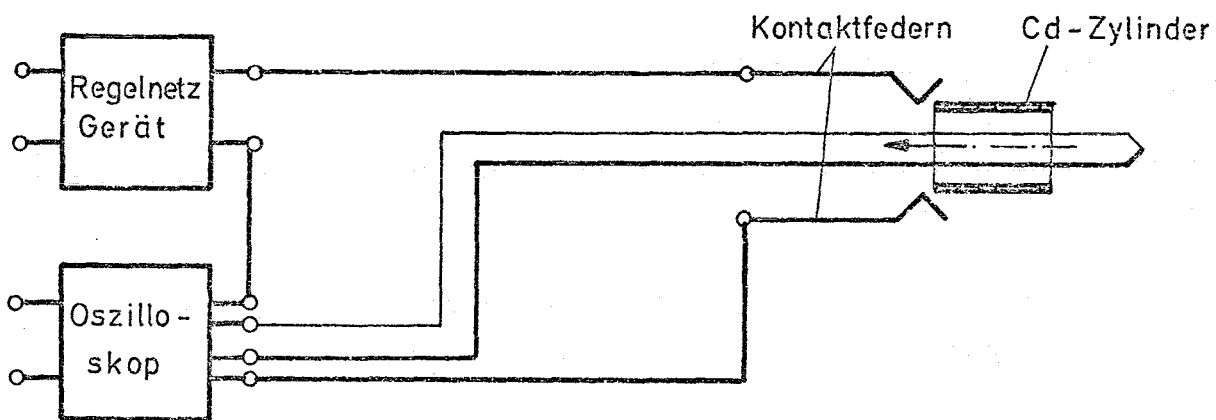
Abb.13

ten, die Öffnungen blindgeflanscht und das Rohr im Abklingbecken des FRM abgestellt.

3. 2. 3. 1. Versuchsdurchführung am 12.11.68

Das Rohrsystem wurde im Reaktorgebäude zusammengesetzt und die Testeinrichtung eingebaut. Ein Blindversuch bestätigte die Funktion der Triggerkontakte und des Schlitzverschlusses.

Nach Füllung des Rohres mit CO_2 wurde das System im Abklingbecken eingesetzt und an Oszillograf und Netzgerät angeschlossen.



Bei Annäherung des Systems an das core bei freigegebener SEP erhöhte sich die Thermospannung um $\Delta U \approx 0,8 \text{ mV}$ entsprechend 20°C .

Nach Befestigung des Rohres in der vorgesehenen Position (310) wurden insgesamt 9 Versuche durchgeführt. Wie erwartet, war die Cd-Hülse danach durch Stauchung unbrauchbar.

3. 2. 3. 2. Versuchsdurchführung am 4.6.69

Vor dem zweiten Experiment mit veränderten Cd-Anordnungen mußten die alte Test-

einrichtung aus- und die neue eingebaut werden. Nach erneuter Füllung des Rohres mit CO_2 und Blindversuch wurde das System eingesetzt. Da die örtliche Tieftemperatur-Bestrahlungsanlage an das core herangefahren war, mußte das Rohr senkrecht von oben in seine Position gebracht werden. Dies geschah wieder mit freigegebener SEP, so daß der Temperaturanstieg am Oszillografen verfolgt werden konnte.

Die Thermospannung betrug bei freigegebener SEP 4,5 mV entsprechend 110°C , bei abgeschirmter SEP 0,25 mV entsprechend einem ΔT von $6,25^\circ\text{C}$. (Luft: $22,9^\circ\text{C}$, Wasser: $28,7^\circ\text{C}$ = Thermometermessungen). Es wurden insgesamt 13 Versuche gefahren, von denen jedoch 7 infolge Ausfalls des Regelnetzgerätes und später auch des Oszillografen keine brauchbaren Ergebnisse erbrachten.

3. 2. 4. Ergebnisse beider Versuche

Typische Ergebnisse des ersten Versuches sind in den Abb. 14 und 15 und 16 dargestellt.

Klar zu erkennen sind eine hohe Störfrequenz am Anfang des Freigabevorganges und eine 50-Hz-Überlagerung des gesamten Ablaufes.

Erkennbar ist jedoch auch, daß die überlagerte Temperaturkurve ansteigt und die SEP somit auf das sich ändernde Neutronenfeld richtig reagiert.

Bei dem Versuch, durch Dehnung der Zeitachse den Verlauf des Temperaturtransienten besser erkennen zu können, ergab sich Bild 16. Auch hier ist eine klare Deutung des Vorganges nicht möglich. Bei noch größerer Dehnung der Zeitskala ($t = 0,2 \text{ msec/cm}$) wurde das Bild völlig unübersichtlich.

Aus diesen Ergebnissen resultierten zwei Schlußfolgerungen:

- a) das Nutzsinal mußte durch Erzielung eines höheren Neutronenflusses an der SEP verstärkt werden,
- b) die Störungen sollten durch elektrische Filterung gedämpft werden.

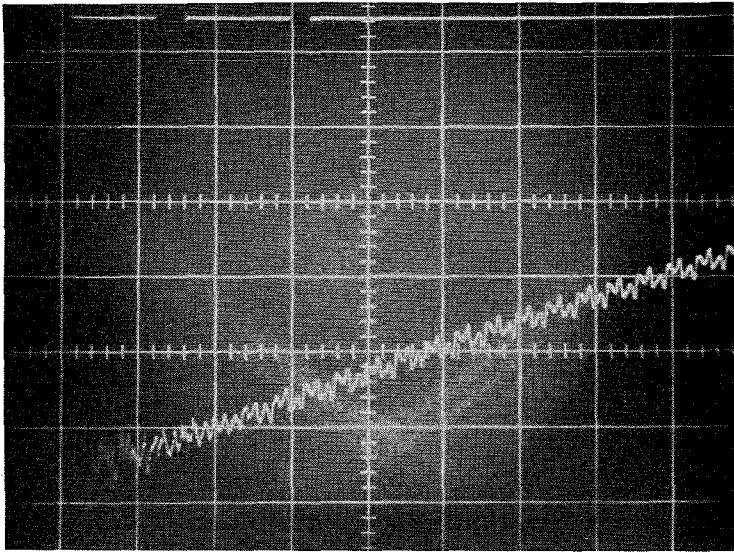


Bild 14

$$t_{\text{trig}} = 0,2 \text{ msec / cm}$$

$$t_{\text{Th}} = 0,05 \text{ sec / cm}$$

$$U_{\text{Th}} = 50 \text{ } \mu\text{V / cm}$$

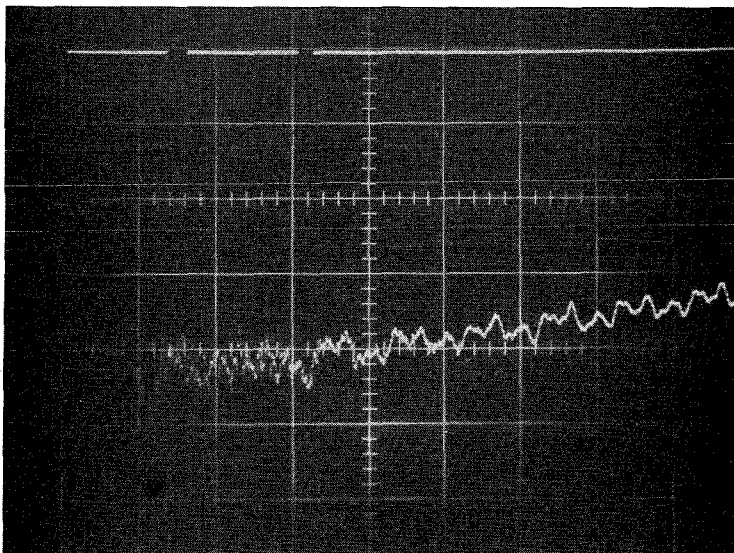


Bild 15

$$t_{\text{trig}} = 0,2 \text{ msec / cm}$$

$$t_{\text{Th}} = 20 \text{ msec / cm}$$

$$U_{\text{Th}} = 50 \text{ } \mu\text{V / cm}$$

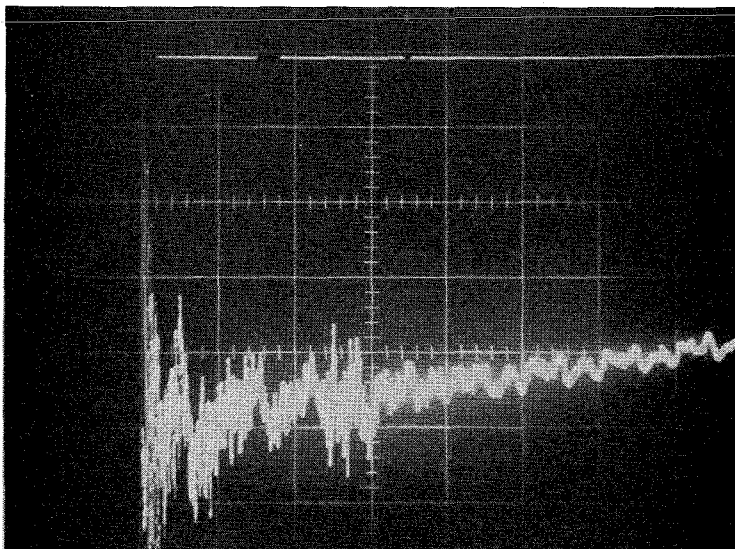


Bild 16

$$t_{\text{trig}} = 0,2 \text{ msec / cm}$$

$$t_{\text{Th}} = 20 \text{ msec / cm}$$

$$U_{\text{Th}} = 50 \text{ } \mu\text{V / cm}$$

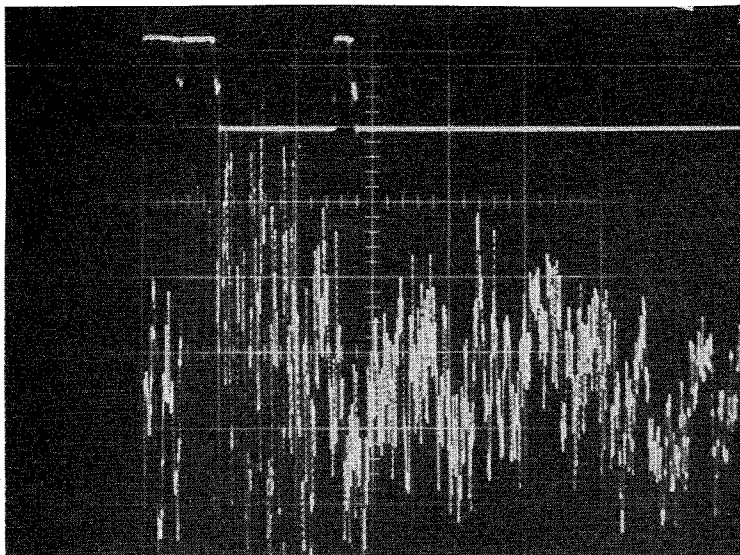


Bild 17

$$t_{\text{trig}} = 0,2 \text{ msec / cm}$$

$$t_{\text{Th}} = 2 \text{ msec / cm}$$

$$U_{\text{Th}} = 50 \text{ } \mu\text{V / cm}$$

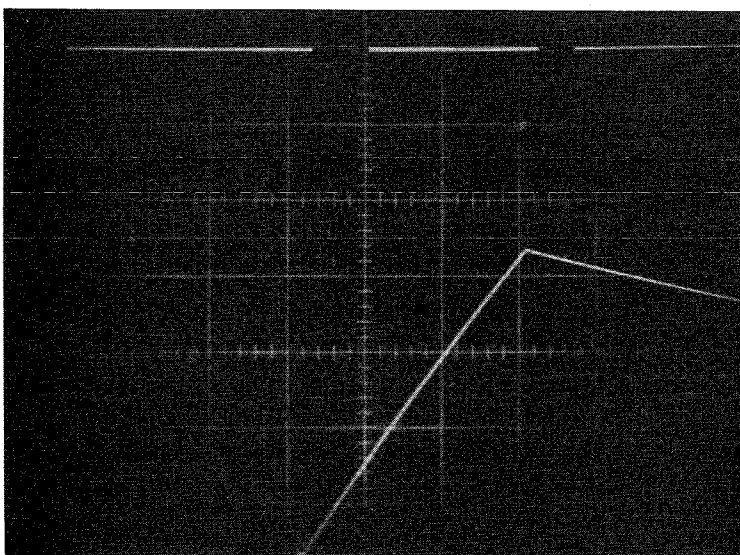


Bild 18

$$t_{\text{trig}} = 0,1 \text{ msec / cm}$$

$$t_{\text{Th}} = 0,1 \text{ msec / cm}$$

$$U_{\text{Th}} = 1 \text{ mV / cm}$$

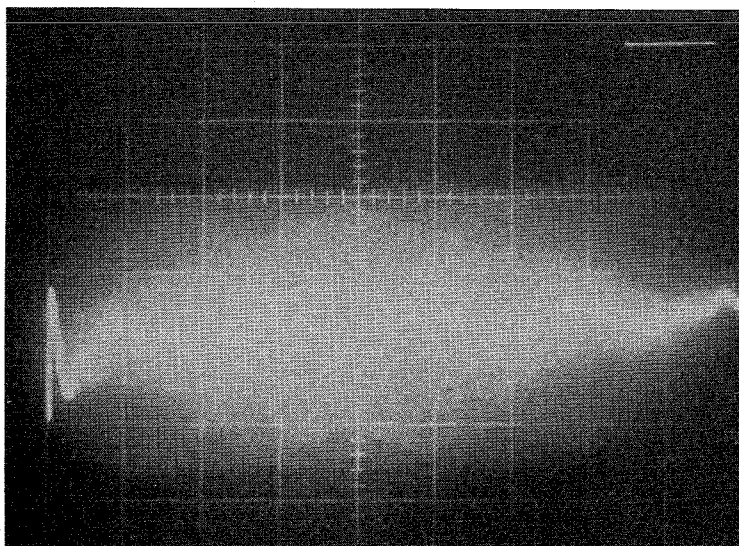


Bild 19

$$t_{\text{trig}} = 0,1 \text{ msec / cm}$$

$$t_{\text{Th}} = 0,1 \text{ msec / cm}$$

$$U_{\text{Th}} = 0,2 \text{ mV / cm}$$

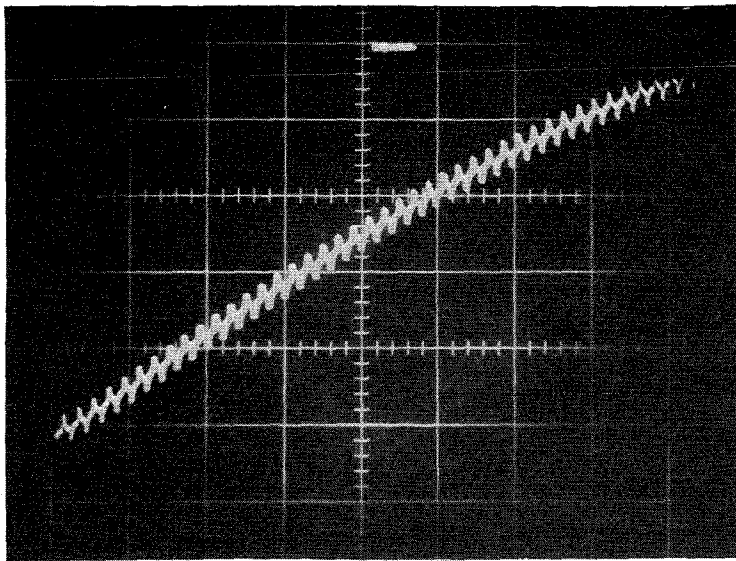


Bild 20

$$t_{\text{trig}} = 0,1 \text{ msec / cm}$$

$$t_{\text{Th}} = 0,1 \text{ sec / cm}$$

$$U_{\text{Th}} = 0,2 \text{ mV / cm}$$

Tatsächlich ergaben sich mit der geänderten Anordnung der Cd-Teile im 2. Versuch bessere Ergebnisse.

Auf Bild 19 und Bild 20 ist zwar noch die 50-Hz-Störfrequenz zu erkennen, das Nutzs-
signal ist jedoch eindeutig größer geworden, vergleicht man Bild 14 und Bild 20.

Bild 19 zeigt, daß die Temperaturanstiegskurve aus zwei Teilen besteht, einem An-
fangstransienten und einer stetigen Steigung am Ende. Die Abb. 18 und 20 sind
praktisch Vergrößerungen dieser beiden Kurventeile.

Abb. 18 zeigt einen ungewöhnlichen Verlauf. Trotzdem kann diese Kurve als Wieder-
gabe des thermischen Transienten angesehen werden.

Als Erklärungen hierzu mögen folgende Überlegungen dienen:

Rührte die aufgezeichnete Kurve von einer durch die Versuchseinrichtung selbst
hervorgerufenen elektromagnetischen Störung her, welche in der Bewegungsphase ei-
nes Freigabevorganges u. U. erzeugt werden könnte, so müßte diese Störung auch auf
allen Bildern, die unter denselben elektrischen und mechanischen Bedingungen wäh-
rend der Erprobung der Einrichtung außerhalb des Reaktors durchgeführt wurden, auf-
getreten sein. Dies war aber zu keiner Zeit der Fall.

Wäre es eine vom veränderten Neutronenfluß verursachte "Störung", so fehlte die
Erklärung, wie eine Spannung zwischen zwei Thermodrähten erzeugt werden kann, wel-
che symmetrisch im Neutronenfeld liegen.

Nimmt man an, daß Abb. 18 einen echten thermischen Transienten wiedergibt, so kann
man diesen folgendermaßen deuten:

- a) die Probe reagiert auf einen nuklearen Transienten mit einer Verzögerung von
0,3 msec,
- b) die Temperatur steigt unter adiabatischen Bedingungen an
- c) nach weiteren 0,3 msec macht sich die Wärmeleitfähigkeit des Probenbodens be-
merkbar, die Temperatur an der Meßstelle fällt ab. Dieser Abfall darf dann je-

doch nicht linear erfolgen, eine genaue Auswertung von Bild 18 bestätigt dies.

Abb. 19 erlaubt es, das Phänomen weiter zu verfolgen:

nach weniger als 4 msec ist der steile Temperaturanstieg beendet, von da an wird der weitere Kurvenverlauf von der Bilanz zwischen Wärmeerzeugung und Wärmeabfuhr bestimmt bis hin zu einem Plateau, welches nach mehr als 1 sec erreicht wird, wie Abb. 20 zeigt.

In dieser Phase beträgt der mittlere Temperaturanstieg $31^{\circ}\text{C}/\text{sec}$.

Zusammengefaßt ergeben sich aus den Bildern 18, 19 und 20 für den Temperaturtransienten:

die zeitliche Ableitung des aufsteigenden Kurventeils ist konstant und beträgt $3,5 \cdot 10^5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sec}$.

Die Ableitung des abfallenden Teils beträgt zu Anfang $5 \cdot 10^4 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sec}$.

3. 2. 5. Schlußfolgerungen

Die SEFOR ENERGY PROBE zeigt bei Zugrundelegen der vorher angestellten Überlegungen folgende Eigenschaften:

- a) eine Ansprechverzögerung von ca. $3 \cdot 10^{-4} \text{ sec}$,
- b) die Fähigkeit, einer Leistungsexkursion innerhalb einer Zeit von $3 \cdot 10^{-4} \text{ sec}$ adiabatisch zu folgen.

Die Eigenschaft (b) gewährleistet eine genaue Abbildung des Integrals der Leistung einer treppenförmigen Exkursion für die erste halbe Millisekunde. Da das Phänomen in den ersten 0,3 msec adiabatisch erscheint, kann man annehmen, daß jeder Transient genau integriert wird.

Es erscheint erforderlich, die Zeit von 0,3 msec nach höheren Werten zu verschie-

ben. Durch konstruktive Änderung der Probe, z. B. einen längeren UNb-Zylinder, ließe sich eine längere adiabatische Phase erreichen.

Diese Schlußfolgerung ist jedoch, wie erwähnt, von der Richtigkeit der obigen Annahmen abhängig.

Daher sollten zuerst die Ergebnisse des Einsatzes der SEP am SEFOR abgewartet werden.

4. Meßgenauigkeit der SEFOR ENERGY PROBES

Bei Messungen mit der SEFOR Energiesonde gibt es zwei wesentliche Fehlerquellen. Die erste beruht auf der Erwärmung der UNb-Probe durch γ -Strahlung, die zweite beruht auf der konstruktiven Auslegung der Energiesonde und der damit gekoppelten Thermodynamik. Diese (systematischen) Fehler können je nach der Betriebsweise der SEP verschieden sein. Im folgenden werden daher zwei Fehlergruppen unterschieden, die statischen und die dynamischen Fehler.

Zu den statischen Fehlern gehören:

- Fehler durch Erwärmung der SEP infolge γ -Strahlung,
- Fehler aufgrund der zwischen der UNb-Probe und dem Thermoelement befindlichen Nickelschicht,
- Fehler durch die Wärmeableitung in den Thermoelementdrähten.

Bei den dynamischen Fehlern treten grundsätzlich die gleichen Fehler wie im stationären Fall auf. Sie können jedoch unterschiedlich groß sein. Deshalb werden die genannten Fehler getrennt untersucht. Im dynamischen Fall spielt zusätzlich der

- Fehler durch die veränderliche spezifische Wärme der UNb-Legierung eine Rolle.

Die darüberhinaus auftretenden statistischen Fehler in der Thermospannungsmessung bzw. Fehler aufgrund anderer Thermoelement-Eigenschaften sollen im folgen-

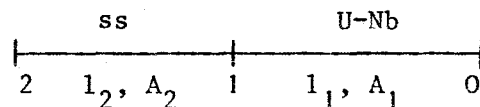
den nicht untersucht werden, da sie nicht SEP-spezifisch sind.

4. 1. Fehler bei der Messung im stationären Zustand

4. 1. 1. Fehler durch Aufheizung durch γ -Strahlung

Das an der UNb-Probe angebrachte Thermoelement mißt nicht nur die Temperatur, welche von dem Neutronenfluß herrührt, sondern auch die, die durch Aufheizung des Brennstoffes und des Gehäusebodens durch γ -Strahlung erzeugt wird.

Der Sinn der Energiesonde ist jedoch allein, die Temperatur, die durch die Spaltneutronen erzeugt wird, zu messen. Um die Störung durch γ -Aufheizung abzuschätzen, wurde der Rechnung folgende eindimensionale Geometrie zugrunde gelegt.



Es bedeuten l die Länge und A den Querschnitt des betrachteten Wärmetransportweges. Die Temperaturerhöhung durch γ -Strahlung wurde dadurch bestimmt, daß zunächst nur ein stationärer Neutronenfluß angenommen wurde. In einem zweiten Schritt wurden Neutronen und γ -Strahlung zusammen berücksichtigt und somit der Anteil durch γ -Strahlung aus der Differenz ermittelt.

Es gelten die folgenden Gleichungen

$$\text{in der UNb-Zone} \quad \frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{w_1}{k_1} \quad (2)$$

$$\text{in der Stahl-Zone} \quad \frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (3)$$

wobei T die Temperatur, w die Dichte der Wärmequelle, k die Wärmeleitfähigkeit ist. Bei dieser Definition ist $w_1 = \frac{q}{l_1 \cdot A_1}$, q die Gesamtleistung, l_1 die Länge

und A_1 der Querschnitt des U-Nb-Teils der Sonde. Die Gleichungen sind zu lösen mit den folgenden Randbedingungen:

Kein Wärmefluß durch Punkt o (s. Skizze) und in Punkt 2 eine bekannte Temperatur T_2 .

Die Lösung der Gleichungen (1) und (2) führt unter Beachtung der Randbedingungen auf

$$T_o - T_2 = \frac{w_1}{2k_1} l_1^2 + \frac{w_1 l_1 l_2}{k_2} \cdot \frac{A_1}{A_2} = w_1 l_1 \left[\frac{l_1}{2k_1} + \frac{l_2}{k_2} \frac{A_1}{A_2} \right] \quad (4)$$

Gleichung (4) gibt die Temperaturdifferenz zwischen Punkt o und Punkt 2, d. h. zwischen dem Anbringungsort des Thermoelements und der Außenfläche des Gehäusebodens an.

Führt man die Rechnung unter der Annahme einer Aufheizung durch γ -Strahlung in beiden Zonen und durch Neutronen in der UNb-Zone durch, so ergibt sich unter Verwendung der Gleichungen (2), (3) bzw. (4) und entsprechender Anwendung der Randbedingungen der Ausdruck

$$T_o - T_2 = \frac{w_1}{2k_1} l_1^2 - \frac{w_2 l_2^2}{2k_2} + \frac{l_2}{k_2} \left[\frac{w_1 l_1 A_1}{A_2} + w_2 l_2 \right] \quad (5)$$

Aus den Gleichungen (4) und (5) läßt sich dann der absolute und relative Fehler, der durch γ -Aufheizung entsteht, berechnen, wenn die Temperatur in Punkt 2 der Probe als konstant angenommen wird.

Numerisches Beispiel:

$$q_{ln} = 4.2 \text{ Watt} \quad w_{ln} = \frac{4.2}{0.07 \cdot 0.5} = 120 \text{ Watt cm}^{-3}$$

$$q_{l\gamma} = 1.91 \cdot 10^{-2} \text{ Watt} \quad w_{ln+\gamma} = \frac{4.22}{0.035} = 120.6 \text{ Watt cm}^{-3}$$

$$l = 0.5 \text{ cm}$$

$$k_1 = 0.06 \text{ cal} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{°K}^{-1} = 0.25 \text{ Watt cm}^{-1} \cdot \text{°K}^{-1}$$

$$\begin{aligned} A_1 &= 0.07 \text{ cm}^2 \\ q_{2\gamma} &= 3.35 \cdot 10^{-2} \text{ Watt} \quad w_{2\gamma} = \frac{3.35 \cdot 10^{-2}}{0.062} = 0.54 \text{ Watt cm}^{-3} \\ l_2 &= 0.45 \text{ cm} \\ k_2 &= 11 \text{ B hr}^{-1} \text{ ft}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{F}^{-1} = 0,19 \text{ Watt cm}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{K}^{-1} \\ A_2 &= 0.1 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Ohne γ -Aufheizung ergibt sich für die Temperaturdifferenz

$$T_o - T_2 = 159.48^\circ\text{C}$$

mit γ -Aufheizung ergibt sich

$$T_o - T_2 = 160.63^\circ\text{C}$$

Damit ist die Abweichung der gemessenen Temperatur von der wahren Temperatur der UNb-Probe, die infolge Aufheizung durch γ -Strahlung entsteht, 1.15°C . Das entspricht einem relativen Fehler von

$$\epsilon_{R\gamma} = 0.0072.$$

4. 1. 2. Fehler aufgrund der Nickelschicht

Zwischen dem Thermoelement und dem UNb-Zylinder befindet sich eine dünne Nickelschicht, die eine feste Verbindung zwischen beiden herstellt. Diese Nickelschicht verursacht einen Fehler in der Temperaturmessung, da durch Wärmeleitung eine Temperaturdifferenz ΔT_{Ni} zwischen Thermoelement und UNb-Zylinder auftritt. Da die Dicke der Nickelschicht bei der Herstellung einzelner SEP's schwanken kann, wird die folgende Abschätzung mit einem nach oben abgerundeten Wert der Schichtdicke l durchgeführt.

Die Temperaturänderung ergibt sich aus dem Fourier'schen Gesetz

$$\Delta T = q \frac{l}{Ak} .$$

$$\text{Mit } l = 2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$$

$$A = 0.07 \text{ cm}^2$$

$$q = 2 \cdot 10^{-3} \text{ cal sec}^{-1} \text{ als abgeschätzter Wärmefluß durch die Nickelschicht}$$

$$k = 0.14 \text{ cal sec}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{°K}^{-1}$$

ergibt sich

$$\Delta T_{\text{Ni}} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ °C.}$$

Dieser Wert liegt weit unter der Meßgenauigkeit der Thermoelemente und ist vernachlässigbar.

4. 1. 3. Fehler durch die Wärmeableitung in den Thermoelementdrähten

Die Thermoelementdrähte können Wärme von der UNb-Probe wegführen und dadurch eine Fehlmessung der SEP-Temperatur bewirken. Um diesen Fehler zu berechnen, wird folgendes Modell zugrundegelegt:

Wir bezeichnen im eindimensionalen Modell die Nickelschicht mit dem Index 1 und das Thermoelement mit dem Index 2, wobei der Nullpunkt im Berührungspunkt beider Materialien liege. Dann gilt

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{d} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

mit $d = \frac{k}{c\rho}$ und $k =$ Wärmeleitfähigkeit

$\rho =$ Dichte

$c =$ spezifische Wärme

wegen $d_2 = \frac{k_2}{\rho_2 \cdot c_2}$ für das Thermoelement

und $d_1 = \frac{k_1}{\rho_1 \cdot c_1}$ für die Nickelschicht

folgt als Lösung obiger Gleichung (6)

$$T_2(x,t) = \frac{K_1 d_1 \frac{1}{2} T}{K_1 d_1 \frac{1}{2} + K_2 d_2 \frac{1}{2}} \cdot \phi \left(\frac{x}{\sqrt{d_2 t}} \right)$$

für die orts- und zeitabhängige Temperatur im Thermoelement. ϕ ist hierbei das Gauß'sche Fehlerintegral. Für den speziellen stationären Fall $T_2(0, \infty)$ ergibt sich

$$T_2(0, \infty) = \frac{K_1 d_1 \frac{1}{2} T}{K_1 d_1 \frac{1}{2} + K_2 d_2 \frac{1}{2}}$$

Mit $\frac{T-T_2}{T}$ erhält man den relativen Fehler. Ein numerisches Beispiel ergibt unter Verwendung folgender Materialwerte

$$k_1 = 0.14 \text{ cal sec}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$$

$$d_1 = 0.12 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$$

$$k_2 = \frac{0.14}{1800} \text{ cal sec}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1} \quad (\text{Der Faktor } \frac{1}{1800} \text{ berücksichtigt das Querschnittsverhältnis zwischen Nickelschicht und Thermoelement-Drähten})$$

$$d_2 = 0.12 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$$

einen Wert

$$\frac{T-T_2}{T} = 5,5 \cdot 10^{-4}$$

Damit ist auch dieser Fehler vernachlässigbar.

4. 2. Fehler bei der Messung im dynamischen Fall

4. 2. 1. Fehler durch Aufheizung durch γ -Strahlung

Im Leistungstransienten ist der Neutronenfluß am Ort der Uran-Niob-Probe der Leistung proportional. Das gilt nicht für den γ -Fluß, da neben den prompten

γ -Strahlen die γ -Strahlen der Spaltprodukte wirksam sind.

Unter der Annahme, daß sich die Reaktorleistung um den Faktor a ändert, erhält man für die in der Probe während eines Transienten erzeugte Gesamtleistung

$$R^+ = a R_n + a (R_{\gamma t} - R_{\gamma f}) + R_{\gamma f}$$

wobei R_n = Leistung durch Neutronenfluß
 $R_{\gamma t}$ = Leistung durch γ -Aufheizung im stationären Fall
 $R_{\gamma f}$ = Leistung durch γ -Strahlen der Spaltprodukte

ist. Mit $R = R_n + R_{\gamma t}$ bezeichnen wir die in der Probe stationär erzeugte Gesamtleistung. Es ergibt sich für das Verhältnis

$$\frac{R'}{R} = \frac{a(R_n + R_{\gamma t}) + (1-a)R_{\gamma f}}{R_n + R_{\gamma t}} = a + (1-a) \frac{R_{\gamma f}}{R_n + R_{\gamma t}} = a - \Delta a \frac{R_{\gamma f}}{R_n + R_{\gamma t}}$$

ein Wert, der sicherlich kleiner als a ist.

Der relative Fehler, verursacht durch die γ -Quanten der Spaltprodukte ist deshalb

$$\epsilon = \frac{a - \Delta a \frac{R_{\gamma f}}{R_n + R_{\gamma t}}}{a} = \left(1 - \frac{\Delta a}{a}\right) \frac{R_{\gamma f}}{R_n + R_{\gamma t}}$$

Er hängt also stark von a ab. Für das in Kap. 4.1.1. genannte Zahlenbeispiel mit $R_n = 4,2$ Watt, $R_{\gamma t} = 1,9 \cdot 10^{-2}$ Watt und $R_{\gamma f} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ Watt folgt

$$\frac{R_{\gamma f}}{R_n + R_{\gamma t}} = 3,6 \cdot 10^{-4}$$

d. h. der Fehler ist sicher kleiner als $3,6 \cdot 10^{-4}$ und damit vernachlässigbar.

4. 2. 2. Fehler durch die veränderliche spezifische Wärme der UNb-Legierung

Die spezifische Wärme von Uran-Metall zeigt mit ansteigender Temperatur zwei Phasensprünge (Abb. 21), während die spezifische Wärme von Niob eine glatte Funktion ist. Da aber Uran nur mit wenigen Atom-Prozent in der Legierung vorliegt, folgt die spezifische Wärme überwiegend einer Niob-abhängigen Temperaturfunktion der Form

$$c_{\text{UNb}} = 10^{-5} T + 0,056 \text{ cal g}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$$

Wenn $Q(t)$ die während des Transienten in der Energiesonde erzeugte Leistung und V das Brennstoffvolumen ist, dann gilt für eine adiabatische Temperaturänderung

$$T^+(t) = \frac{Q(t)}{V\rho c(T)}$$

mit ρ = Dichte und c = spezifische Wärme der Legierung. Bei Annahme einer konstanten spezifischen Wärme gilt

$$T(t) = \frac{Q(t)}{V\rho c_0}$$

Die relative Abweichung der Temperaturanzeige für eine bei einer bestimmten Temperatur geeichte Energiesonde wird damit

$$\epsilon = \frac{T(t) - T^+(t)}{T(t)} = \frac{c(T) - c_0}{c(T)}$$

Numerisches Beispiel:

Für ein $c_0 = 0,062 \text{ cal g}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$ (entsprechend 300°C) ergibt sich die Funktion

$$\epsilon(T) = \frac{T - 5,7 \cdot 10^2}{T + 5,6 \cdot 10^3}$$

die in Abbildung 22 aufgetragen ist. Diese Funktion besagt, daß je nach der Größe des adiabatischen Temperatursprungs, Abweichungen der Anzeige vom wirklichen Wert der Temperatur bis zu einigen Prozent auftreten können, wenn eine konstante spezifische Wärme zugrundegelegt wird. Es ist daher wichtig, daß der Zusammenhang

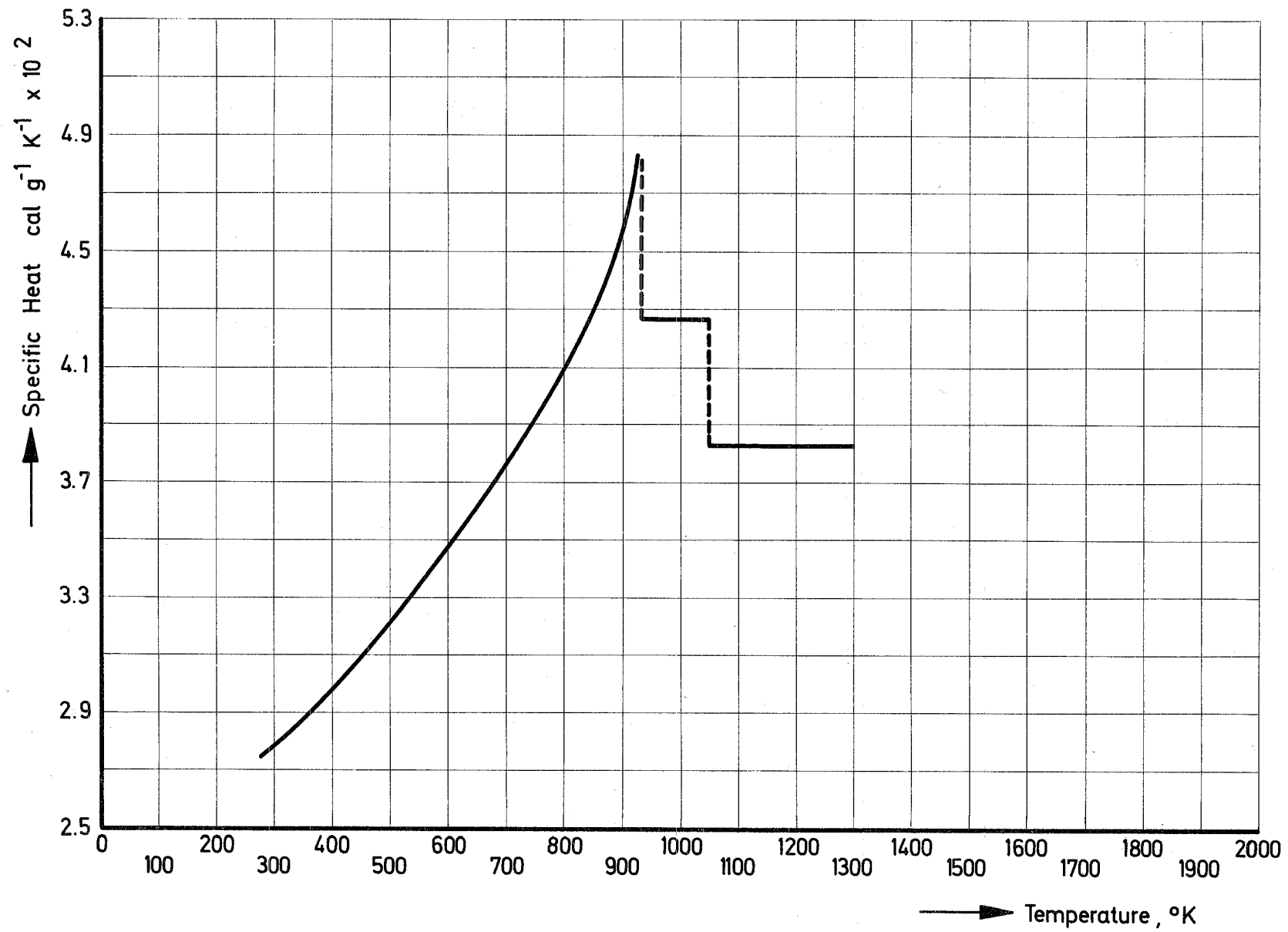


Abb. 21 SPECIFIC HEAT - URANIUM

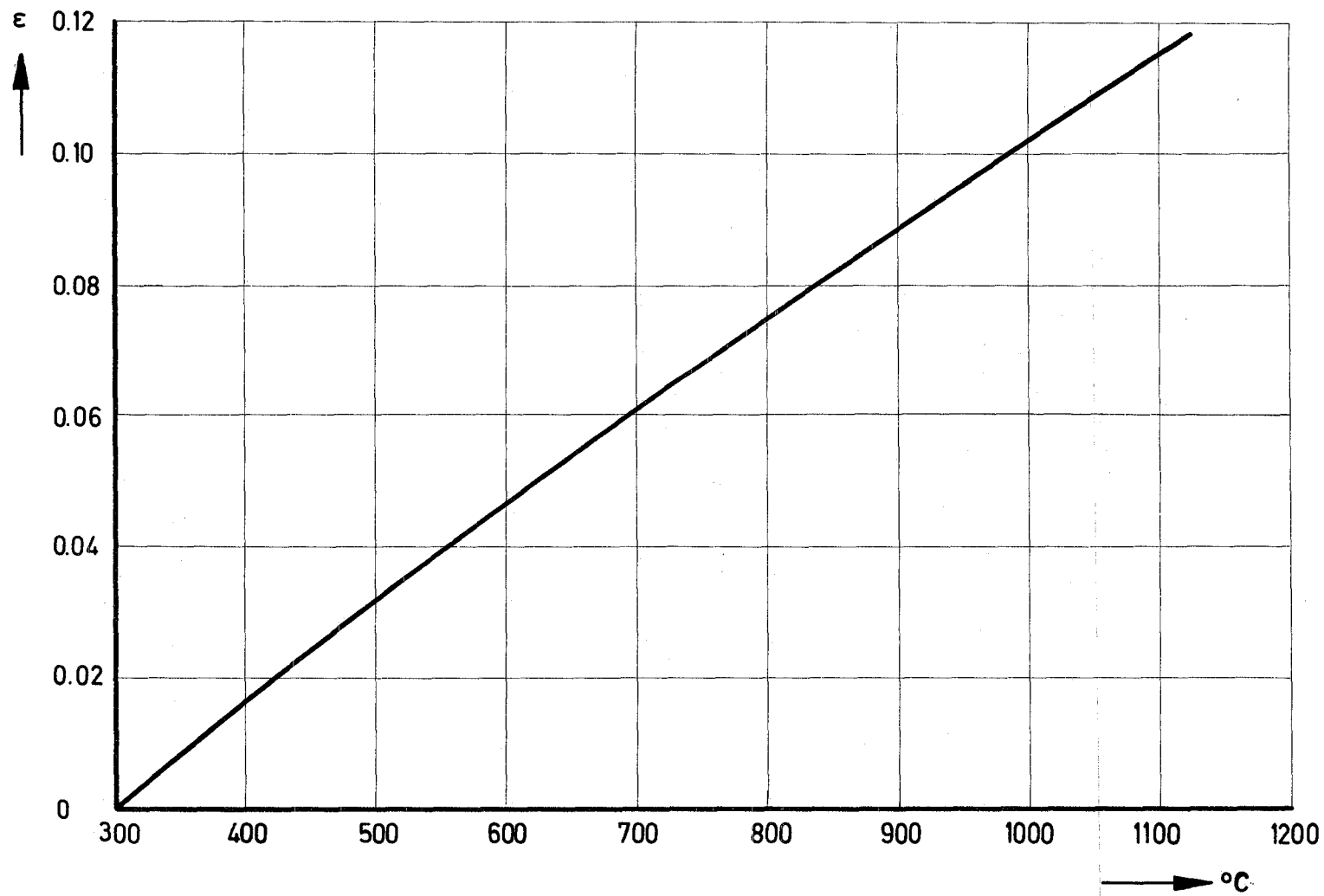


Abb.22 RELATIVE ERROR DUE TO THE U-Nb
VARIABLE SPECIFIC HEAT

zwischen der spezifischen Wärme der UNb-Probe und der Temperatur bei der Auswertung von Leistungstransienten-Messungen mit der SEFOR Energy Probe berücksichtigt wird.

4. 2. 3. Der Einfluß der Ni-Schicht auf die SEP-Ansprechzeit

Um den Kontakt zwischen dem Thermoelement und der Energieprobe zu verbessern, wurde eine Ni-Schicht zwischen Probe und dem Thermoelement vorgeschlagen.

Hierbei entstand nun das Problem, daß die Ni-Schicht merklich die Zeitverzögerung bei der Temperaturmessung beeinflussen könnte.

Um diesen Ni-Schicht-Einfluß zu untersuchen, wurden folgende Annahmen gemacht:

1. Es wurde Plattengeometrie der Schicht angenommen.
2. Die Temperatur $\phi_2(t)$ wurde an der linken Seite der Platte ($x = 1$) stufenweise erhöht; und dann als konstant betrachtet.
An der rechten Seite ($x = 0$) wurde angenommen, daß keine Wärmeabgabe an die Umgebung stattfindet.

Der Temperaturverlauf in der Ni-Platte wird durch die bekannte Wärmeleitungsgleichung beschrieben; sie lautet:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = d \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Hierbei ist:

$$d = \frac{k}{\rho \cdot c} = \text{Temperaturleitfähigkeit}$$

k = Wärmeleitfähigkeit

ρ = Plattendichte

c = spez. Wärme

T = T(x,t) = Temperatur als Funktion von Ort und Zeit.

Die allgemeine Lösung der Wärmeleitungsgleichung lautet für die unter (2) angegebenen Randbedingungen mit der Anfangstemperaturverteilung $f(x)$:

$$T(x,t) = \frac{2}{l} \sum_{n=0}^{\infty} \cdot e^{-\frac{d(2n+1)^2 \pi^2 \cdot t}{4 l^2}} \cos \frac{(2n+1)\pi \cdot x}{2 l} \cdot$$

$$\cdot \left\{ \frac{(2n+1)\pi \cdot d(-1)^n}{2 l} \int_0^t e^{-\frac{d \cdot (2n+1)^2 \pi^2 \cdot t}{4 l^2}} \cdot \phi_2(t) dt + \right.$$

$$\left. + \int_0^1 f(x) \cos \cdot \frac{(2n+1)\pi x}{2 l} dx \right\}$$

Diese Lösung geht für die Anfangstemperaturverteilung $f(x) = 0$, der Anfangstemperatur $\phi_2(t) = a = \text{const.}$ an der Stelle $x = l$ für die Temperatur an der Stelle $x = 0$ über in:

$$T(0,t) = \frac{2}{l} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{d(2n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot t}{4 l^2}} \left\{ \frac{(2n+1)\pi \cdot d(-1)^n}{2 l} \int_0^t e^{-\frac{d(2n+1)^2 \pi^2 \cdot t}{4 l^2}} \cdot a dt \right.$$

Bei der Berechnung der Temperatur wurden die ersten zehn Glieder der Reihe verwendet.

Es wurden für drei verschiedene Zeiten die Temperaturen für drei verschiedene Plattenlängen "l" an der Stelle $x = 0$ nach der letzten Gleichung berechnet, wobei an der Stelle $x = l$ die Temperatur $\phi_2 = a$ konstant gehalten wurde.

Das Ergebnis wurde in Fig. 1 dargestellt.

Hier wurden für die drei verschiedenen Zeiten 10^{-5} , 10^{-4} und 10^{-3} sec als Parameter, auf der Ordinate das Verhältnis der Temperaturen an der Stelle $x = 0$ und $x = l$, nämlich $T(0,t)/\phi_2 = T_{0n}/T_{ln}$ über der Plattenlänge als Abszisse aufgetragen.

Aus dieser Abbildung können folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Eine Ni-Schicht mit einer Dicke von 10^{-3} cm (10μ) erreicht am Ende (rechte Seite) bereits nach 10^{-5} sec 99 % der Ausgangstemperatur (Temperatur der linken Seite).
2. Eine Ni-Schicht mit einer Dicke von $5 \cdot 10^{-3}$ cm (50μ) erreicht auf der rechten Seite nach 10^{-5} sec 5 %, nach 10^{-4} sec bereits aber 84 % der Anfangstemperatur auf der linken Seite.

Da die Ni-Schicht etwa 10μ dick ist, ergibt sich hiermit, daß die auf dieser Schichtdicke beruhende Zeitverzögerung für das Temperatursignal klein ist gegen die im experimentellen SEFOR-Programm vorgesehenen Reaktorperioden.

Zusammenfassung

Die Entwicklung der SEFOR ENERGY PROBES zur Messung von Leistungstransienten im experimentellen Programm des SEFOR (4) wurde 1969 im Kernforschungszentrum Karlsruhe abgeschlossen. "Energy probes" nutzen die direkte Temperaturerhöhung in spaltbarem Material als Folge von Kernspaltungen zur Messung der Leistung oder über die integrale Temperaturänderung zur Messung der Energie in einer Leistungsexkursion aus.

Es wird ein Überblick über die konstruktiven und materialtechnologischen Erfahrungen bei der Entwicklung der SEP gegeben. Ferner wird über die Bestimmung der wichtigen dynamischen Eigenschaften durch Versuche an einem Zyklotron und an einem Forschungsreaktor berichtet. Danach haben die untersuchten SEP's eine Ansprechzeitkonstante, die unter dem geforderten Wert von $\tau_A = 1$ msec liegt und eine Wärmeableitkonstante, die genügend groß ist (ca. 350 msec), so daß die Messung nicht beeinträchtigt wird.

Eine ausführliche Diskussion der systematischen Fehler, die beim stationären und beim dynamischen Betrieb der SEP's auftreten können, wird gegeben.

Schlußbemerkung

Die Autoren möchten an dieser Stelle einer Reihe von Wissenschaftlern und Technikern danken, die an den Entwicklungsarbeiten für die SEP direkt oder indirekt Anteil hatten. Es sind dies insbesondere Dr. Beißwenger von der Firma NUKEM, Dr. Koester vom Forschungsreaktor München (FRM) zusammen mit der Betriebsmannschaft des FRM und Dr. Schatz vom Zyklotron-Laboratorium des Kernforschungszentrums Karlsruhe.

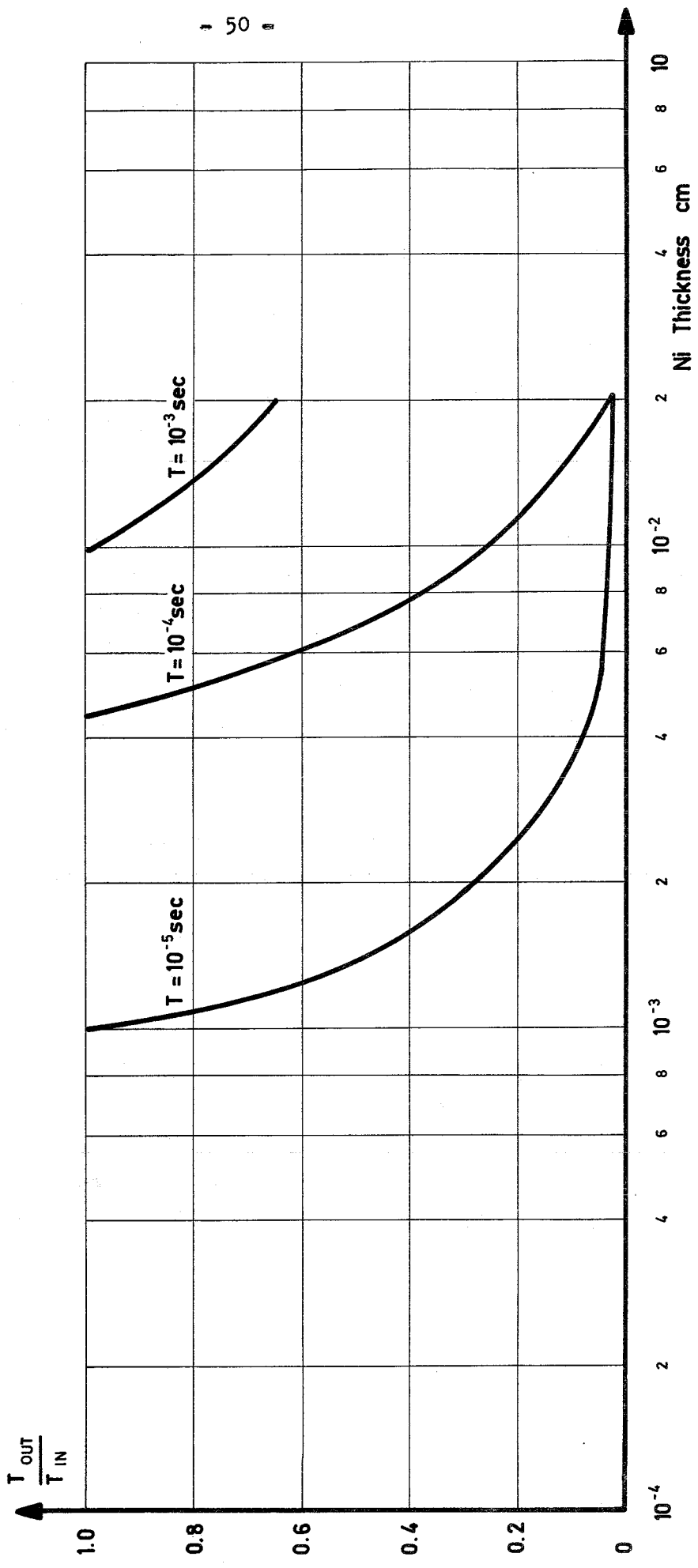


Abb. 23

Literatur

- (1) D.F. Paddleford, A. Weitzberg, J.O. Zane and L.J. Moss (AJ)
"Use of Energy Density Measurements to Calibrate Nuclear Detectors
During the SNAPTRAN- 3 Destructive Experiments"
Trans. ANS Vol. 7, No. 2, p. 384.

- (2) B. Wolfe, et al.
"SEFOR - A Status Report"
ANS National Topical Meeting on Fast Reactor Technology,
Detroit, Michigan, April 26, 1965, ANS-100.

- (3) R.G. Pflasterer, L. Caldarola
"SEFOR Experimental Program Planning"
GEAP-5092 (1966)

- (4) W. Schikarski
"SEFOR - ein internationales Projekt der deutschen Schnellbrüter-
Entwicklung"
Atomwirtschaft, Jahrgang XIV, Nr. 8, August 1969.

