



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

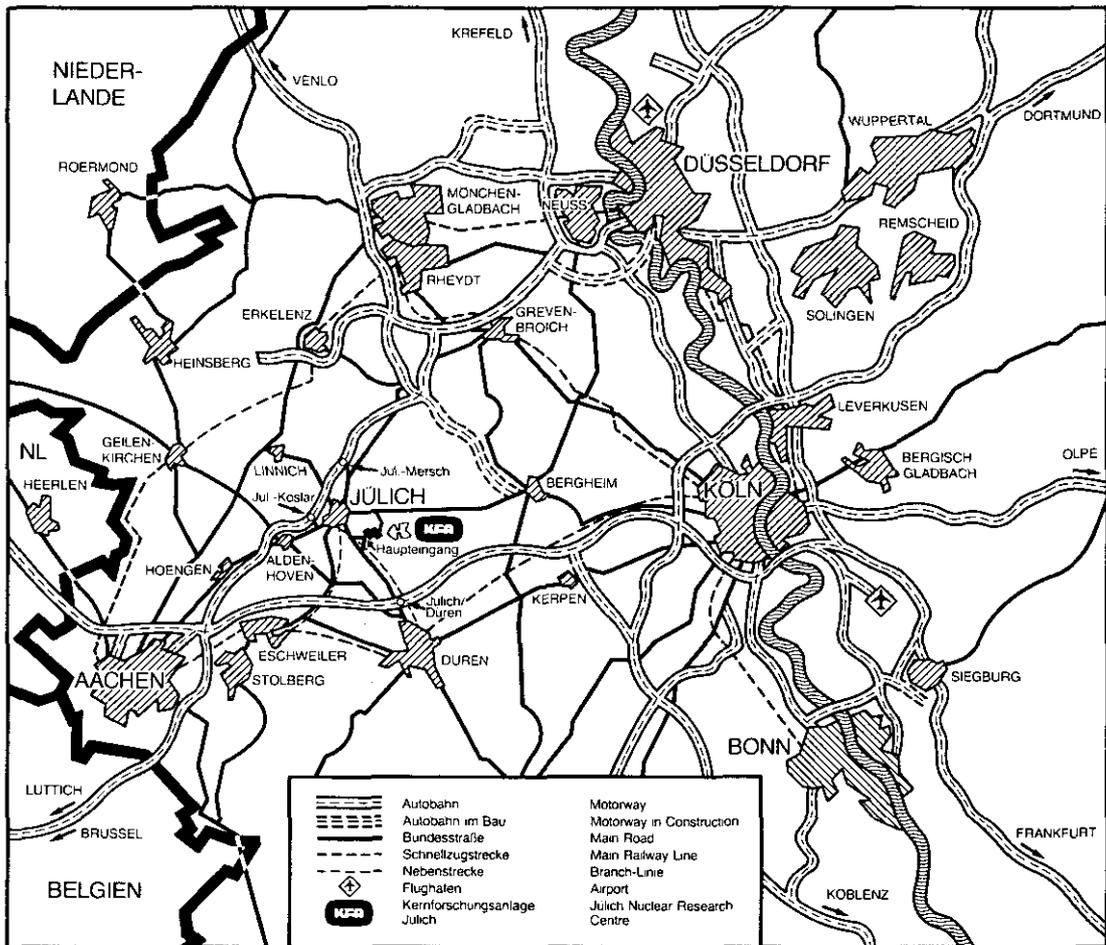
Institut für Reaktorwerkstoffe / Heiße Zellen

Lagerverhalten abgebrannter HTR-Brennelemente in Transport- und Lagerbehältern aus Sphäroguß

von

R. Duwe
H. Müller

Jül - Spez - 254
Mai 1984
ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 254
 Institut für Reaktorwerkstoffe / Heiße Zellen Jül-Spez-254

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH
 Postfach 19 13 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)
 Telefon: 02461/610 · Telex: 833566-0 kf d

**Lagerverhalten
abgebrannter HTR-Brennelemente
in Transport- und Lagerbehältern
aus Sphäroguß**

von

R. Duwe
H. Müller



Die Arbeiten, über die hier berichtet wird, werden durchgeführt
im Rahmen des

Zusammenarbeitsvertrages vom 27. 8. 1982 zwischen KFA Jülich und
DWK Hannover

über

Durchführung eines Meßprogramms an Lager- und Transportbehälter-
Prototypen für abgebrannte AVR-Brennelemente.

Die Arbeiten gehören zum Programm des HBK Projektes - Hochtemperatur-
reaktor-Brennstoffkreislauf - in der Entwicklungsgemeinschaft HTR.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
 - 1.1 Lagerkonzept, Demonstrationstest
 - 1.2 Beschreibung der Lagerbehälter

2. Beladung
 - 2.1 Charakterisierung der Brennelemente
 - Bestimmung des Abbrandes
 - Nachwärmeleistung, Spaltprodukt nuklide
 - Kernbrennstoff-Inventar
 - 2.2 Beschreibung der AVR-TL-Kannen
 - 2.3 Gamma-Strahlenfeld der ungeschirmten AVR-TL-Kannen
 - 2.4 Beladevorgang und Transport
 - 2.5 Lecktest

3. Messungen und Ergebnisse
 - 3.1 Temperatur
 - 3.1.1 Instrumentierung
 - 3.1.2 Meß- und Registriergeräte
 - 3.1.3 Datenausgabe und -Reduzierung
 - 3.1.4 Meßergebnisse
 - 3.1.5 Aufteilung von ΔT
 - 3.1.6 Vergleich der Ergebnisse mit Erwartungswerten
 - 3.1.7 Extrapolation auf kürzere Abklingzeiten
 - 3.2 Freisetzung gasförmiger Aktivität
 - 3.2.1 Freisetzung aus dem Brennelement in das Kannenleervolumen
 - 3.2.2 Freisetzung aus den Kannen in den Behälter
 - 3.2.3 Freisetzung aus dem Behälter nach außen
 - 3.3 Gamma-Dosisleistung außerhalb der Behälter
 - 3.4 Neutronen-Dosisleistung

1. Einleitung

In den Heißen Zellen der KFA wird in Zusammenarbeit mit der DWK ein Demonstrationstest mit angeschlossenem Meßprogramm an zwei mit AVR-Brennelementen beladenen Sphäroguß-Behältern durchgeführt. An den Arbeiten in der KFA sind beteiligt das Institut für Reaktorwerkstoffe (IRW), Anlagenplanung und Bautechnik (AP), Technische Dienste - Dekontamination (TD-DE) sowie das Projekt Hochtemperatur-Brennstoffkreislauf (HBK).

1.1 Lagerkonzept, Demonstrationstest

Ziel des Meßprogramms ist es, experimentelle Daten zur Verifizierung von Auslegungsdaten für Behälter zur Lagerung von AVR- und THTR-Brennelementen sowie für ein späteres Genehmigungsverfahren eines Behälterlagers auf der Basis des von DWK entwickelten Lagerkonzeptes /1/ zu ermitteln und bereitzustellen.

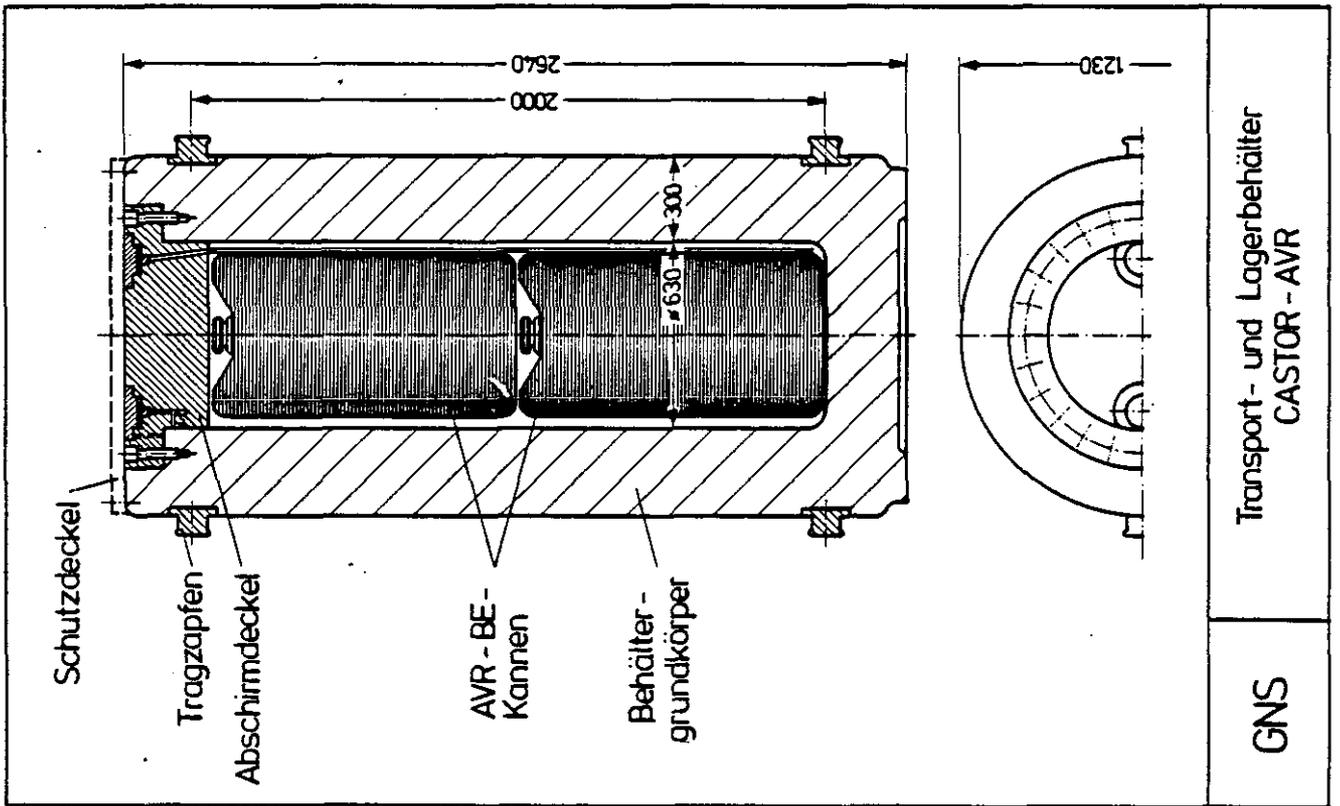
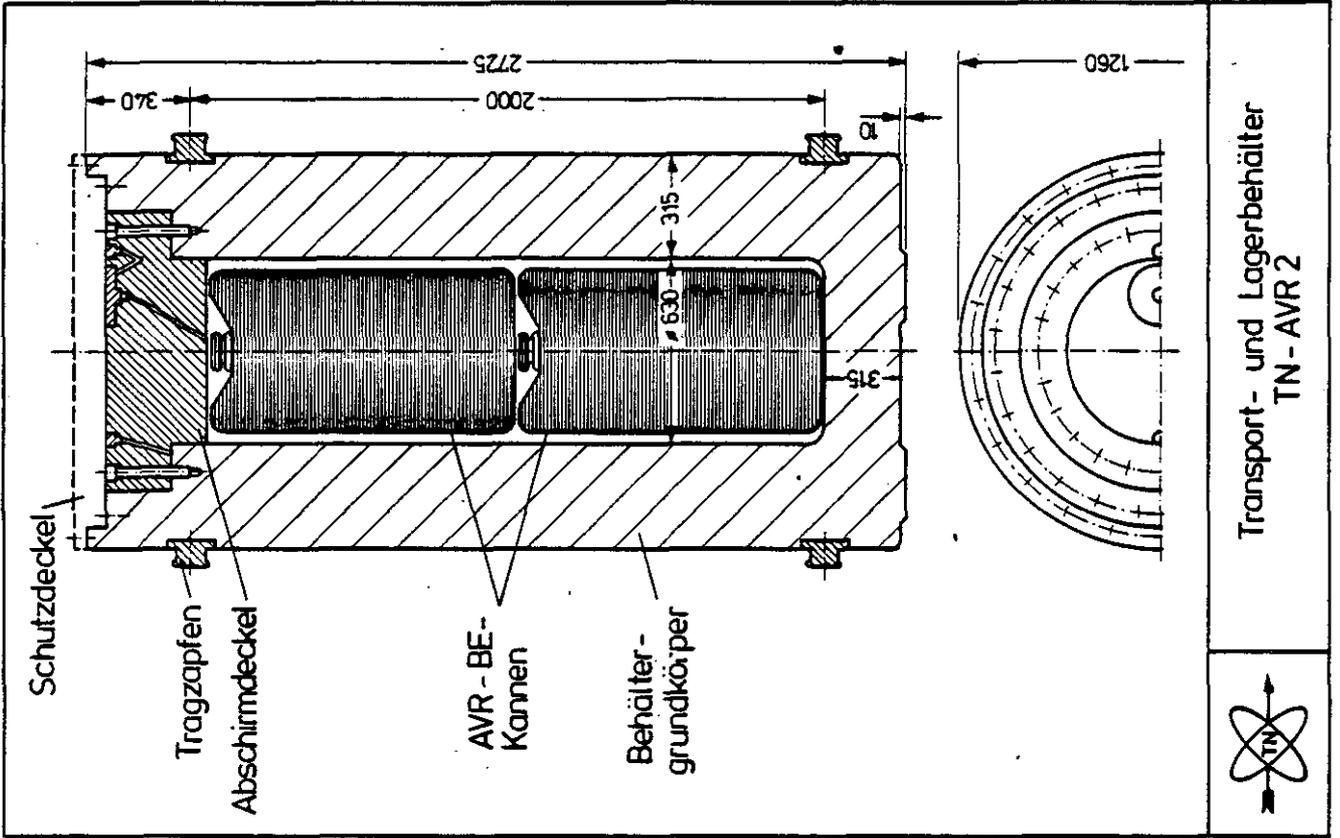
Außerdem sollen Betriebserfahrungen mit der Be- und Entladung der Behälter sowie deren Wartung gewonnen werden.

Im Einklang mit den Überlegungen der Arbeitsgemeinschaft HTR-Zwischenlager (ARGE-HTR-ZL) soll mit dem Meßprogramm ein möglichst einfaches wirtschaftliches Lagergebäude, bestehend aus genehmigter Trockenlagerkanne und Abschirmbehälter mit voll wirksamen Rückhalte- und Sicherheitseigenschaften für die längerfristige Lagerung getestet werden.

1.2 Beschreibung der Lagerbehälter

Zur Durchführung des Meßprogramms wurden der von der Fa. GNS konzipierte Behälter CASTOR-AVR und der von der Fa. TN konzipierte Behälter TN-AVR 2 benutzt.

In den Abbildungen 1 und 2 ist jeweils ein Schnitt durch die Behälter CASTOR-AVR (Abb. 1) und TN-AVR (Abb. 2) dargestellt. Die Behälter sind prinzipiell gleich aufgebaut. Lediglich das Deckeldichtungssystem und die Installation von Meßprogrammkomponenten weisen geringe Unterschiede auf.



Die Behälter bestehen aus einem dickwandigen, hohlzylindrischen Behälterkörper aus Gußeisen mit Kugelgraphit (Werkstoff: GGG 40) mit angegossenem Boden und einem aus dem gleichen Werkstoff hergestellten Abschirmdeckel. Die Dichte des Materials beträgt $7,2 \text{ g/cm}^3$. Die Abmessungen der Behälter sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Der Innenraum des Behälters, in den 2 AVR-Trockenlagerkannen übereinanderstehend eingebracht werden können, wird durch einen abgestuften, eingelassenen Abschirmdeckel verschlossen. Dieser Deckel wird mittels 24 Schrauben fest mit dem Behälterkörper verschraubt. Der Abschirmdeckel und der Behälterkörper haben bei beiden Behältern die Funktion der Strahlenabschirmung und - zusätzlich zur Trockenlagerkanne - des sicheren Aktivitätseinschlusses.

Zur Handhabung der Behälter befinden sich in der Nähe des Deckels und des Bodens jeweils zwei Tragzapfen, die auch zur Auflage und Befestigung der Behälter in einer Transport- und Lagerpalette dienen. Abb. 3 und 4 zeigen die Behälter nach der Aufstellung in den Heißen Zellen.

Zum Anheben und Absetzen werden die Behälter mitsamt der Palette an den Tragzapfen gegriffen. Hierzu werden für einen form- und kraftschlüssigen Anschlag Laschen an die Tragzapfen gehängt, die gegen Lösen gesichert sind. Die Laschen werden mittels Schäkkel an verspleißten Seilen befestigt.

Alle Lastaufnahmeeinrichtungen (Tragzapfen, Tragösen, Laschen, Schäkkel und Seile) sind entsprechend den zusätzlichen Anforderungen der KTA-Regel 3902 ausgelegt.

Der Abschirmdeckel des Behälters CASTOR-AVR hat insgesamt drei Dichtungen. Zwei Dichtungen liegen in einer horizontal angeordneten Nut (Metalldichtung und Elastomerdichtung), eine weitere Elastomerdichtung befindet sich in einer radialen Umfangsnut des leicht kegelförmigen Deckelsitzes. Durch die Kombination aus Elastomerdichtungen mit einer Metalldichtung wird eine diversitäre Dichtungsfunktion im Deckelbereich erreicht, deren Dichtheit durch eine in die Dichtungszwischenräume führende, außen mit einem Deckel dicht verschlossene Bohrung, z.B. mit einem He-Lecktest, überprüft werden kann.

	CASTOR-AVR	TN-AVR 2
Beladung	2 AVR-TL-Kannen mit je 950 BE	2 AVR-TL-Kannen mit je 950 BE
Abmessungen		
- Außendurchmesser	1230 mm	1260 mm
- Schachtdurchmesser	630 mm	630 mm
- Gesamtlänge (ohne Schutzdeckel)	2640 mm	2725 mm
- nutzbare Schachtlänge	2020 mm	2030 mm
Wanddicken		
- Deckel	270 mm	310 mm
- Boden	315 mm	315 mm
- Mantel	300 mm	315 mm
Tragzapfenmittenabstand	2000 mm	2000 mm
Leergewicht	18250 kg	19700 kg

Tabelle 1:

Behälterdaten



Abb. 3: Behälter CASTOR-AVR am Aufstellungsort in den
Grossen Heissen Zellen



Abb. 4: Behälter TN-AVR 2 am Aufstellungsort in den
Grossen Heissen Zellen

Der beim CASTOR-AVR eingesetzte Metalledichtungstyp wird auch bei allen übrigen CASTOR-Behältern zur Lagerung von LWR-Brennstoff eingesetzt. Die Metalledichtung besteht aus einer O-Ring-förmigen Spiralfeder (Edelstahl) mit einer Ummantelung aus einem Material mit geringer Fließgrenze (z.B. Aluminium). Das Dichtungsprinzip beruht auf der plastischen Deformation der äußeren Ummantelung und der elastischen Rückstellung des Federkerns. Durch den Einsatz dieses Dichtungstyps wird eine hohe Behälterdichtigkeit (Leckrate höchstens 10^{-7} mbar l/s (bei Helium)) erreicht.

Der Abschirmdeckel des Behälters TN-AVR 2 wird durch eine Doppel-O-Ring-Metalledichtung abgedichtet.

An der Deckelinnenseite befindet sich außen eine umlaufende Nut, die die Metalledichtung aufnimmt. Die verwendeten Metalledichtungen bestehen ebenfalls aus einer ringförmigen Spiralfeder mit Metallummantelung und beruhen auf dem gleichen Dichtungsprinzip. Die Dichtungen beim Behälter TN-AVR 2 gewährleisten ebenfalls eine Leckrate von höchstens 10^{-7} mbar l/s.

Der Deckelflansch ist an einer Stelle so durchgebohrt, daß die Bohrung bis zwischen die beiden Metalledichtungen reicht. Die Bohrung wird zur Überprüfung der Dichtheit der Dichtung verwendet. An der Deckelaußenseite ist die Bohrung mit einem Stopfen gasdicht verschlossen.

2. Beladung

2.1 Charakterisierung der Brennelemente

Für die Beladung wurden insgesamt 3.800 Brennelemente bereitgestellt, die etwa 14 Monate vor der Beladung des Behälters (Juli bis Oktober 1981) dem AVR entnommen worden waren. 200 weitere Brennelemente aus dem gleichen Kollektiv wurden zu Vergleichszwecken im Wasserbecken der HZ eingelagert.

Die Bestrahlung der Brennelemente war bis 14 Monate vor Coreaustritt für etwa 2 Jahre (von Mai 1978 bis Mai 1980) wegen eines Lecks im Dampferzeuger des AVR unterbrochen worden. Dies ist von Einfluß auf das Inventar an Spaltprodukten mittlerer Halbwertszeit, insbesondere Cs 134 mit 2,1 Jahren Halbwertszeit. Deren Inventar ist niedriger als bei ununterbrochen bestrahlten Brennelementen gleichen Abbrandes, was sich auf die Gamma-Quellstärke und damit auf die Dosisleistung als Funktion von Abbrand und Abklingzeit auswirkt.

Die Brennelemente wurden in der Zeit von 31.8. bis 12.10.1982 in der Sortieranlage der Heißen Zellen sortiert. Dabei ergaben sich 40 Kannen mit je 50 BE vom Typ gepreßt oxidisch (GO) und 44 Kannen mit je 50 BE vom Typ gepreßt carbidisch (GK). Aus diesen wurde die Beladung ausgewählt. Den Rest bildeten BE anderer Typen. Nach der Sortierung wurde zur Bestimmung des mittleren Abbrandes an jeder Kanne die Dosisleistung in fester Geometrie (in 1,12 m Abstand, gegeben durch örtliche Bedingungen) gemessen.

Bestimmung des Abbrandes

Die Bestimmung des Abbrandes an einzelnen Brennelementen durch gammaspektrometrische Messung des Cs 137-Inventars ist zu aufwendig, um sie an 3.800 BE durchzuführen. Deshalb wurde der mittlere Abbrand von jeweils 50 Brennelementen in einer AVR-Kanne durch Messung der Dosisleistung \dot{D}_K in fester Geometrie für alle 80 Kannen der Beladung und der Vergleichsbrennelemente durchgeführt. Diese Messung wurde in zwei Schritten an die gammaspektrometrische Abbrandbestimmung am Einzelbrennelement angeschlossen. Im ersten Schritt wurde für 4 Kannen an jedem einzelnen BE die Dosisleistung \dot{d}_i im Abstand $r_o = 23,6$ cm (örtliche Bedingung) gemessen, aus den je 50 Werten der Mittelwert gebildet und dieser mit der Dosisleistung der Kannen \dot{D}_K , jeweils in 1,12 m Abstand, verglichen. Es ergab sich $\dot{d}_i(r_o) = 0,47 \dot{D}_K$.

Damit kann für jede gemessene Kanne der Mittelwert der Dosisleistung eines Brennelements im Abstand r angegeben werden:

$$\overline{\dot{d}(r)} = \left(\frac{23,6 \text{ cm}}{r} \right)^2 \cdot 0,47 \dot{D}_K$$

Im zweiten Schritt wurden an 21 einzelnen BE sowohl die Dosisleistung $\dot{d}_i(t)$ als auch der Abbrand gamma-spektrometrisch bestimmt. Daraus ergab sich die Kalibrierkurve $a_i = f(\dot{d}_i(t))$.

Die Reproduzierbarkeit der Dosisleistungsmessung an einzelnen Brennelementen mit einem digital anzeigenden Gerät wurde durch Mehrfachmessung am gleichen Brennelement nach zwischenzeitlichem Drehen überprüft. Die Standardabweichung war kleiner als 2 %.

Dieses Verfahren ist für Abklingzeiten über 6 Monate deshalb möglich, weil dann die Gammaquellstärke eine monoton steigende Funktion des Abbrandes ist, da die relativ langlebigen Nuklide Cs 134 und Cs 137 den überwiegenden Beitrag zur Gammastrahlung liefern. Für ein Kollektiv von Brennelementen ungefähr gleicher Bestrahlungsgeschichte kann angenommen werden, daß diese Funktion für alle BE gleich ist; zumindest sollte dies im Mittel über 50 Brennelemente einer Kanne gelten.

Das Ergebnis dieser Messungen ist in den Tabellen 2 bis 5 angegeben.

In Abb. 5 ist die Häufigkeitsverteilung der Mittelwerte von je 50 BE, in Abb. 6 die Häufigkeitsverteilung des Abbrandes von je 100 Einzelbrennelementen dargestellt. Man erkennt, daß der Abbrand der Einzelbrennelemente eine sehr breite Verteilungskurve hat.

Nachwärmeleistung, Spaltprodukt nuklide

Die Nachwärmeleistung der AVR-BE ist als Funktion des Abbrandes und der Abklingzeit berechnet worden. Dabei wurde ein gleichbleibender mittlerer Neutronenfluß von $1,0 \cdot 10^{14} / \text{cm}^2 \text{ s}$ angenommen, wobei folgende Abbrände und mittlere BE-Leistungen in der angegebenen Vollastzeit erreicht wurden /2/:

% fima	5	10	15
Vollast-Jahre	0,87	2,3	4,7
mittl. BE- leistung /W	778	605	435

Dosisleistung der 50 BE-Kanne (R/H)	Dosisleistung BE Mittelwert (R/H)	Abbrand BE Mittelwert (% FIMA)
68.3	30.7	11.9
73.7	33.2	13.5
65.3	29.4	11.1
65.2	29.3	11.0
62.2	28.0	10.2
65.2	29.3	11.0
73.5	33.1	13.4
67.3	30.3	11.6
73.1	32.9	13.3
67.3	30.3	11.6
67.6	30.4	11.7
72.6	32.7	13.2
67.6	30.4	11.7
73.7	33.2	13.5
63.6	28.6	10.6
80.0	36.0	14.9
70.9	31.9	12.7
71.4	32.1	12.8
75.5	34.0	14.0

DURCHSCHNITTLICHER ABBRAND : 12.3

Tabelle 2:

Zuordnung der Dosisleistungswerte zum Abbrand für die TL-Kanne 1
in TN-AVR 2 Brennelement-Typ AVR-GO. 405 Tage nach Core-Austritt

Dosisleistung der 50 BE-Kanne (R/H)	Dosisleistung BE Mittelwert (R/H)	Abbrand BE Mittelwert (% FIMA)
96.7	43.5	18.1
89.3	40.2	16.7
81.3	36.6	15.2
82.7	37.2	15.4
95.6	43.0	17.9
82.1	36.9	15.3
87.1	39.2	16.3
78.5	35.3	14.7
89.1	40.1	16.6
88.2	39.7	16.5
93.6	42.1	17.5
87.5	39.4	16.3
95.4	42.9	17.8
81.2	36.5	15.2
86.2	38.8	16.1
87.1	39.2	16.3
76.3	34.3	14.2
91.6	41.2	17.1
93.4	42.0	17.4

DURCHSCHNITTLICHER ABBRAND : 16.3

Tabelle 3:

Zuordnung der Dosisleistungswerte zum Abbrand für die TL-Kanne 2
in TN-AVR 2 Brennelement-Typ: AVR-GK. 405 Tage nach Core-Austritt

Dosisleistung der 50 BE-Kanne (R/H)	Dosisleistung BE Mittelwert (R/H)	Abbrand BE Mittelwert (% FIMA)
73.1	32.9	13.3
77.2	34.7	14.4
75.0	33.7	13.9
73.6	33.1	13.5
74.6	33.6	13.7
74.3	33.4	13.7
71.1	32.0	12.7
74.1	33.3	13.6
75.6	34.0	14.1
70.0	31.5	12.4
75.2	33.8	13.9
74.4	33.5	13.7
78.5	35.3	14.7
78.5	35.3	14.7
69.4	31.2	12.2
82.3	37.0	15.4
76.7	34.5	14.3
73.0	32.8	13.3
66.6	30.0	11.4

DURCHSCHNITTLICHER ABBRAND : 13.6

Tabelle 4:

Zuordnung der Dosisleistungswerte zum Abbrand für die TL-Kanne 3
in CASTOR-AVR Brennelement-Typ: AVR-GO. 405 Tage nach Core-Austritt

Dosisleistung der 50 BE-Kanne (R/H)	Dosisleistung BE Mittelwert (R/H)	Abbrand BE Mittelwert (% FIMA)
79.2	35.6	14.8
88.0	39.6	16.4
77.6	34.9	14.5
86.8	39.1	16.2
76.8	34.6	14.3
89.8	40.4	16.8
86.2	38.8	16.1
81.2	36.5	15.2
92.2	41.5	17.2
82.4	37.1	15.4
84.3	37.9	15.7
91.9	41.4	17.2
80.5	36.2	15.0
87.6	39.4	16.4
94.5	42.5	17.6
89.8	40.4	16.8
89.6	40.3	16.7
89.7	40.4	16.7
91.5	41.2	17.1

DURCHSCHNITTLICHER ABBRAND : 16.1

Tabelle 5:

Zuordnung der Dosisleistungswerte zum Abbrand für die TL-Kanne 4
in CASTOR-AVR Brennelement-Typ: AVR-GK. 405 Tage nach Core-Austritt

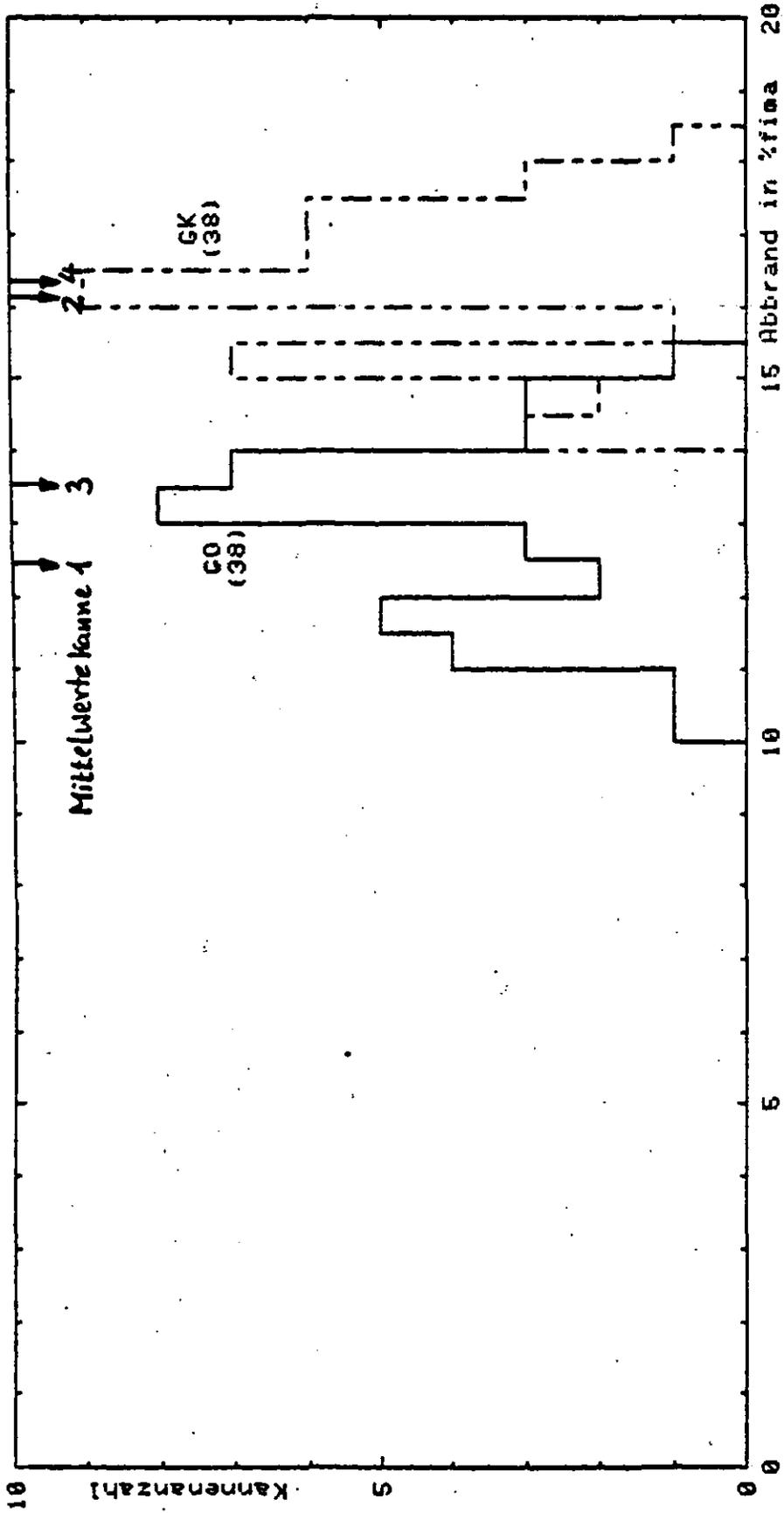


Abb. 5: Häufigkeitsverteilung des mittleren Abbrandes der Brennelemente pro Kanne
Entnahme Juli bis Oktober 1981

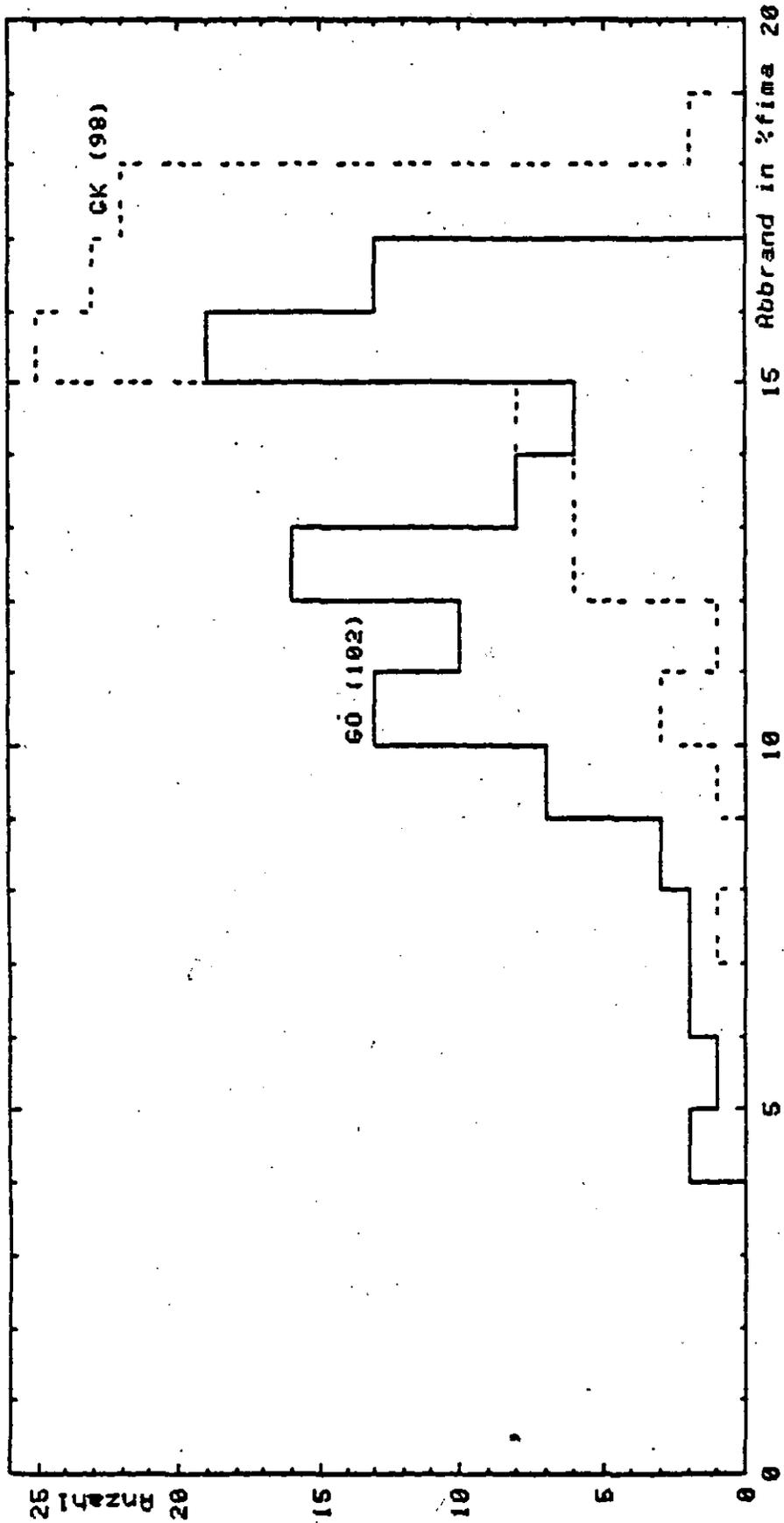


Abb. 6: Häufigkeitsverteilung des Abbrandes von AVR-Brennelementen
Entnahme August 1981

Kalorimetrische Messungen der Nachwärmeleistung an einzelnen AVR-BE mit verschiedenen Abbränden und Abklingzeiten stimmten mit den Rechenergebnissen mit Ausnahme der Werte bei 150 d Abklingzeit gut überein /4/.

Für Abklingzeiten über 1 Jahr sind in /3/ - ausgehend von den in /2/ angegebenen Werten - Näherungen angegeben, mit denen Nachwärmeleistung, Aktivität und Gamma-Leistung interpoliert werden können und aus denen zu erkennen ist, welche Spaltprodukt nuklide wesentliche Beiträge liefern. Für die Gamma-Leistung sind dies für 1 Jahr Abklingzeit und 15 % fima Ba 137m als Tochter von Cs 137, Cs 134 und Pr 144 als Tochter von Ce 144, für die Nachwärmeleistung Sr 90, Y 90, Cs 134, Cs 137 und Pr 144 (siehe Tab. 6).

Für die gemessenen mittleren Abbrände ergeben sich die in Tab. 7 angegebenen Nachwärmeleistungen. Die Abhängigkeit von der Abklingzeit ist für den Bereich von 150 d bis 3 a in Abb. 7 nach /2/ und /3/ angegeben.

Kernbrennstoff-Inventar

Das Kernbrennstoff-Inventar ist von AVR /2/ als Funktion des Abbrandes berechnet worden. Für die gemessenen Abbrände ergeben sich danach für die TL-Kannen die in Tab. 8 als "Rechenwerte" angegebenen Werte.

2.2 Beschreibung der AVR-TL-Kannen

Die AVR-Trockenlagerkanne kann mit 950 Kugelbrennelementen befüllt werden. Sie wird eingesetzt bei der Entsorgung des AVR. In den Heißen Zellen der KFA befindet sich eine BE-Sortier- und -Befüllstation, in der aus AVR-Kannen mit 50 BE, die im Wasserbecken zwischengelagert werden, Brennelemente in AVR-TL-Kannen umgeladen und in das AVR-Trockenlager der TD-DE (Technische Dienste - Dekontamination) transportiert werden.

Abb. 8 zeigt einen Querschnitt durch die AVR-TL-Kanne sowie deren Verschlussstopfen. Die wichtigsten Daten sind in Tab. 9 aufgeführt.

Das Leervolumen der Kanne beträgt 220 l, mit 950 BE befüllt bleibt ein Leervolumen von 113 l.

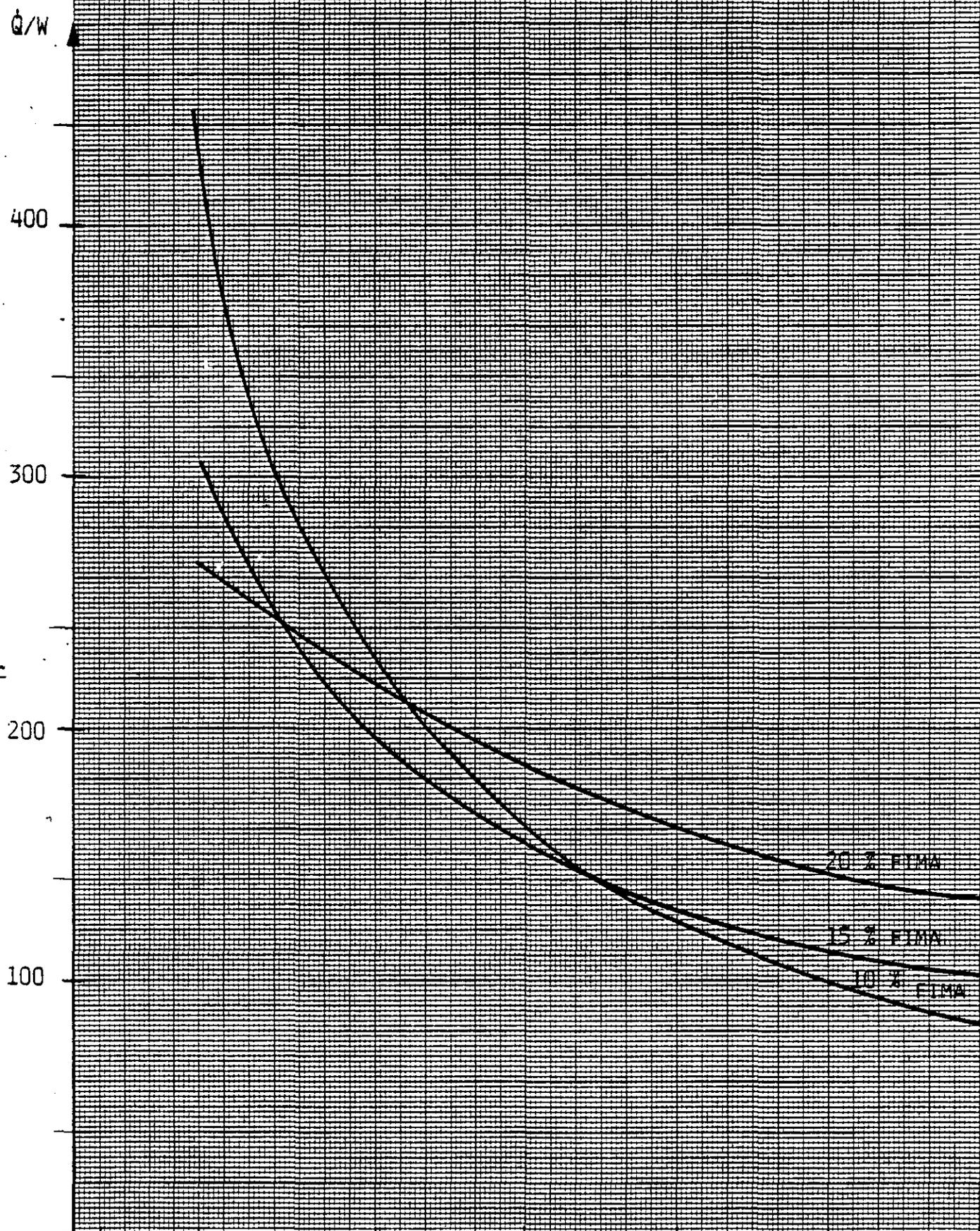
Das Kannermaterial ist Edelstahl, die Stopfendichtung besteht aus Elastomer, für den eine Strahlenbeständigkeit von 10^4 Rad angegeben wird.

Nuklid	Halbwerts- zeit	Aktivität/Ci	$E_{ges} / \frac{mW}{BE}$	$E_g / \frac{mW}{BE}$	$E_{\beta} / \frac{mW}{BE}$
Sr 90	28 a	2,5	3,28	0,03	3,25
Y 90	(64 h)	2,5	14,75	0,37	14,4
Cs 137	30 a	2,5	4,10	0,05	4,05
Ba 137m	(2,6 min)	2,4	9,46	9,6	0
Cs 134	2,1 a	2,6	27,5	24,3	3,2
Ru/Rh 106	368 d	0,43	5,1	0,8	4,2
Ce 144	284 d	4,15	3,4	0,75	2,7
Pr 144	(17,3 min)	4,15	32,1	2,0	30,1
Summe		21,7	99,7	37,8	61,9
Gesamt		24,1	103	40,2	65
Rest		2,4	3,3	2,4	3,1

Tabelle 6: Beitrag langlebiger Spaltprodukte zur Aktivität sowie zur Beta- und Gammaenergie eines AVR-BE nach /2/ und /3/, Abbrand 15 % fima, Abklingzeit 1 Jahr

Kanne	BE- Typ	Position	\bar{D}_k	/R/h	Abbrand Z fima	Nachwärme W 1.11.82	Aktivität/Ci 1.11.82	im Kontakt	Dosisleistung / R/h 1 m 2 m	Meßdatum
1	GO	TN unten	69,7		12,3	93,0	22900	5850	450 135	15.12.82
2	GK	TN oben	87,5		16,3	89,3	20500	7590	590 190	15.12.82
TN						182,3	43400			
3	GO	Castor unten	74,4		13,6	91,0	21750	6000	380 140	5.11.82
4	GK	Castor oben	86,3		16,1	88,4	20500	7500	420 185	5.11.82
Castor						179,4	42250			

Tabelle 7: Zusammenstellung der ermittelten Daten für die 4 AVR-TL-Kannen und deren Positionen



30 d 150 d 1 1.5 2 2.5 3
 1.5.81 1.6.82 1.11.82 1.6.83 1.11.83 T/A

Abb. 7) Nachwärmeleistung von 1980-88 mit einem Abbrand von 10, 15 und 20 % Fima nach (2) und (3) als Funktion der Abklingzeit.

Kanne	Buchwerte			Rechenwerte aus Abbrand			Thorium
	U 233	U 235	U 236 U _{ges}	U 233	U 235	U 236 U _{ges}	
1	87,99	123,52	133 403,43	80,8	209,0	125,1 475	4560
2	87,92	123,51	133 403,32	92,6	66,7	138,6 360	4560
TN	175,91	247,03	266 806,75	173,4	275,7	263,7 835	9120
3	87,60	123,51	133 403,02	86,0	149,2	130,0 424	4560
4	88,0	123,49	133 403,43	92,3	69,6	136,0 356	4560
Castor	175,60	247,00	266 806,45	178,6	218,8	266,0 780	9120
Gesamt	351,51	494,03	532 1613,20	352,0	494,5	529,6 1615	18240

Tabelle 8: Schwermetallinventar der 4 Kannen in g

Buchwerte wie in Spaltstoffbuchführung angegeben

Rechenwerte aus von AVR erstelltem Diagramm anhand des Abbrandes ermittelt

und in der Gesamtsumme an die Buchwerte angepaßt (U 235 x 1,112; U ges x 1,032)

Inhalt	max. 1000 AVR-Brennelemente
Außendurchmesser:	559 mm
Höhe:	1000 mm
Wandstärke:	
- Mantelbereich	6,3 mm
- Deckel/Boden	13 mm
Gewicht:	
- leer	150 kg
- gefüllt	350 kg
Werkstoff:	Edelstahl Nr. 1.4541
max. Leckrate:	10^{-4} mbar l/s

Tabelle 9:

Daten der AVR-Trockenlagerkanne

Mit diesem Verschlusssystem wurden im "Kaltversuch" Leckraten von kleiner als 10^{-6} mbar l/s gemessen. Spezifiziert ist eine Leckrate von $\leq 10^{-4}$ mbar l/s für die Kannen.

2.3 Gamma-Strahlenfeld der unabgeschirmten AVR-TL-Kannen

An den vier befüllten AVR-TL-Kannen wurde nach dem Transport in die Heißen Abfallzellen der TD-DE, in denen sich das AVR-Trockenlager befindet, in Zusammenarbeit mit TD-DE das Strahlungsfeld dieser unabgeschirmten Kannen an der Oberfläche sowie in 1 m und in 2 m Entfernung vermessen.

Für die Messungen wurde ein geeichtes Dosisleistungsmeßgerät der Firma Berthold benutzt (TOL-E).

Die Ermittlung der Meßwerte an der Kannenoberfläche erfolgte bei drehender Kanne.

Die Werte sind in Abb. 9 aufgeführt.

Die Kannen 2 und 4 mit AVR-GK-BE haben eine höhere Dosisleistung als die Kannen 1 und 3 mit AVR-GO-BE. Aufgrund des höheren Abbrandes der GK-BE ist das Cs 137- und Cs 134-Inventar höher, was die höhere Dosisleistung verständlich macht.

2.4 Beladevorgang und Transport

Die Beladung der beiden für das Meßprogramm vorgesehenen Behälter erfolgte in der Be- und Entladezelle der Abfallzellenanlage. Außer Anschlagmittel für die vorhandenen Hebezeuge (50 t-Hallenkran, Faßgreifer) waren keine zusätzlichen Hilfsmittel erforderlich.

Eine schematische Darstellung der Beladung ist in Abb. 10, 11 und 12 dargestellt.

Die Behälter wurden liegend auf einer zum Behälter gehörenden Palette in die Verladehalle der Abfallzellen (HAZ) angeliefert. Die für die Beladung durchgeführten Handhabungsvorgänge sind nachfolgend aufgeführt:

- Der Behälter samt Palette (Gewicht < 25 t) wurde mit dem 50 t-Hallenkran gegriffen und auf einen Tafelwagen umgesetzt.
- Der Tafelwagen wurde in die Be- und Entladezelle gefahren.

DOSISLEISTUNG (R/H)

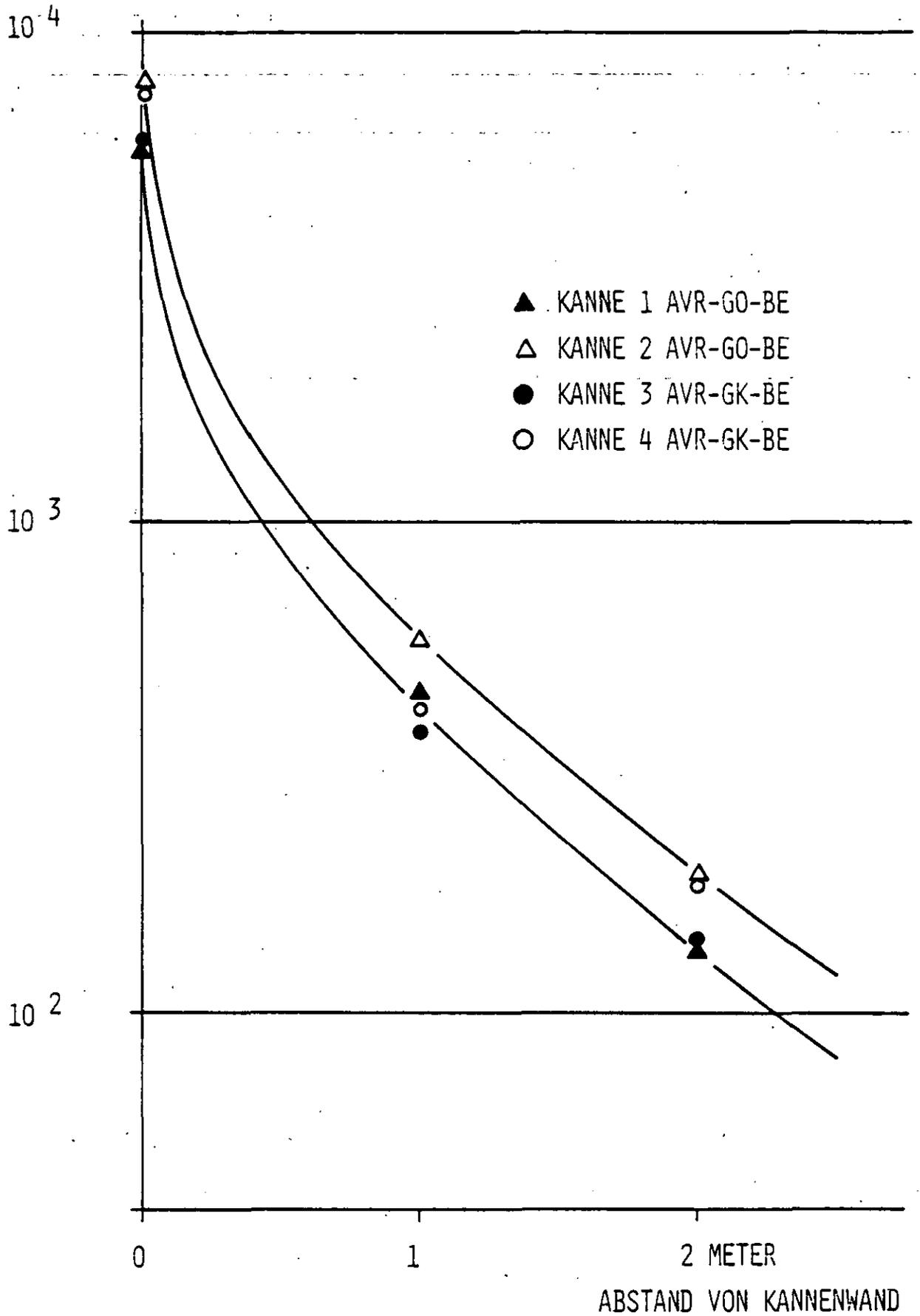


ABB. 9: DOSISLEISTUNG VON AVR-TROCKENLAGER-KANNEN
ABKLINGZEIT DER BE: 14 MONATE

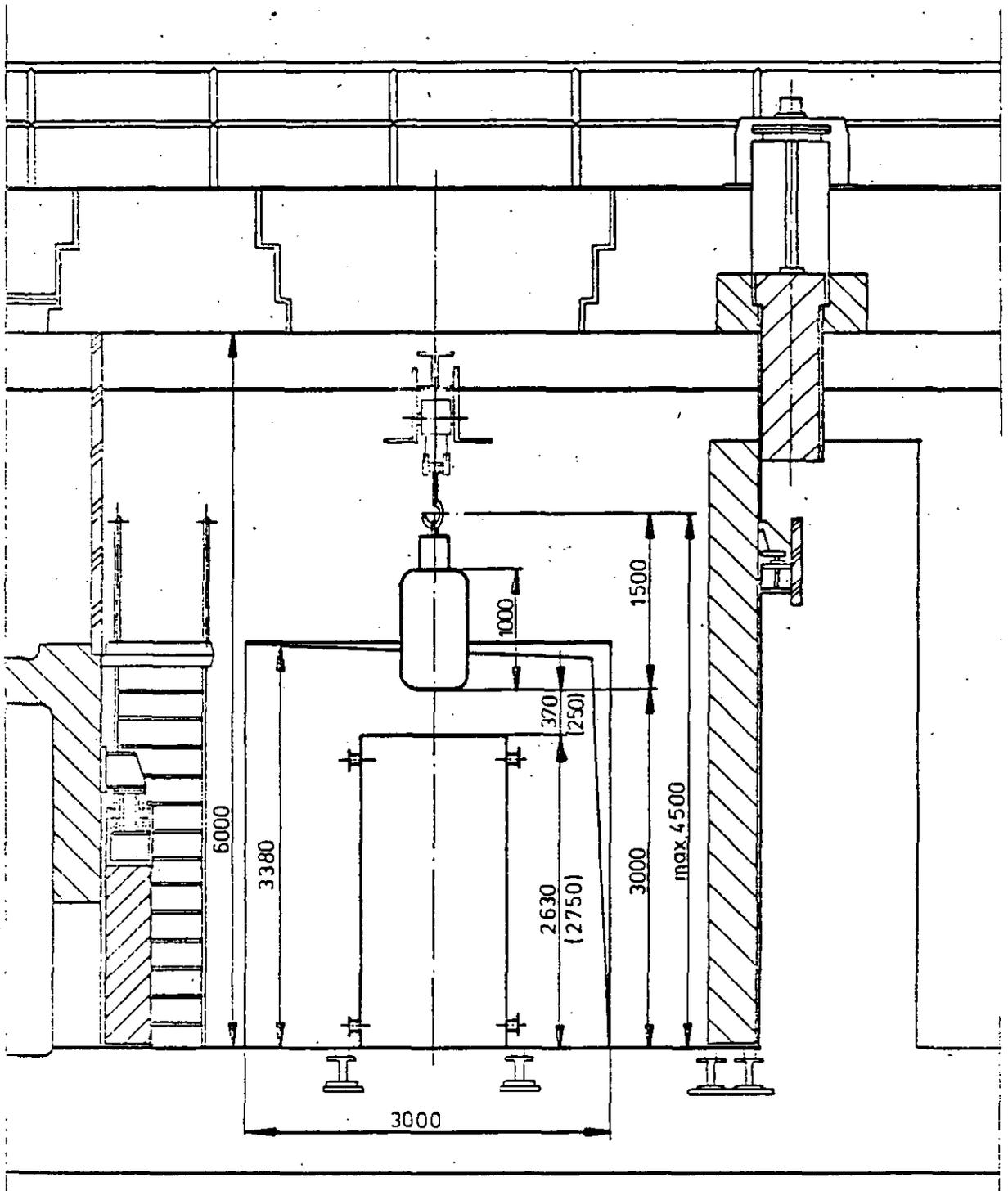
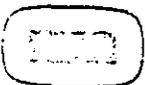


Abb. 10: Beladeskizze

(Maße für TN-AVR 2 in Klammern)



AP

Belademaße
für CASTOR-AVR und TN-AVR 2
in der BEZ

2.9.1981

578-3.10-724/4

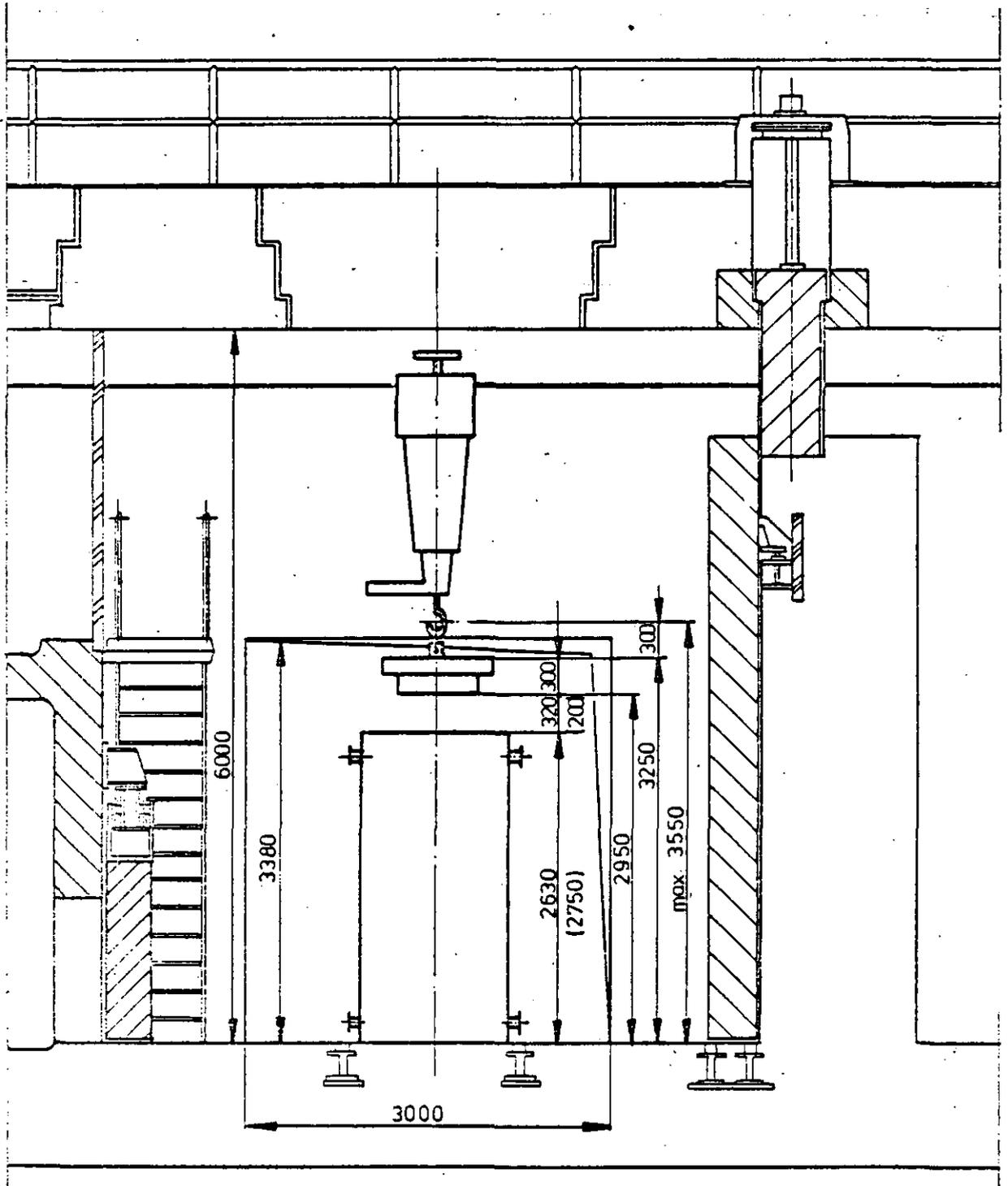
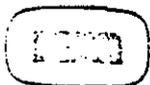


Abb. 11: Beladeskizze

(Maße für TN - AVR2 in Klammern)



AP

Handhabung der Deckel
von CASTOR-AVR und TN-AVR2
in der BEZ

1.9.1981

578-310-725/4

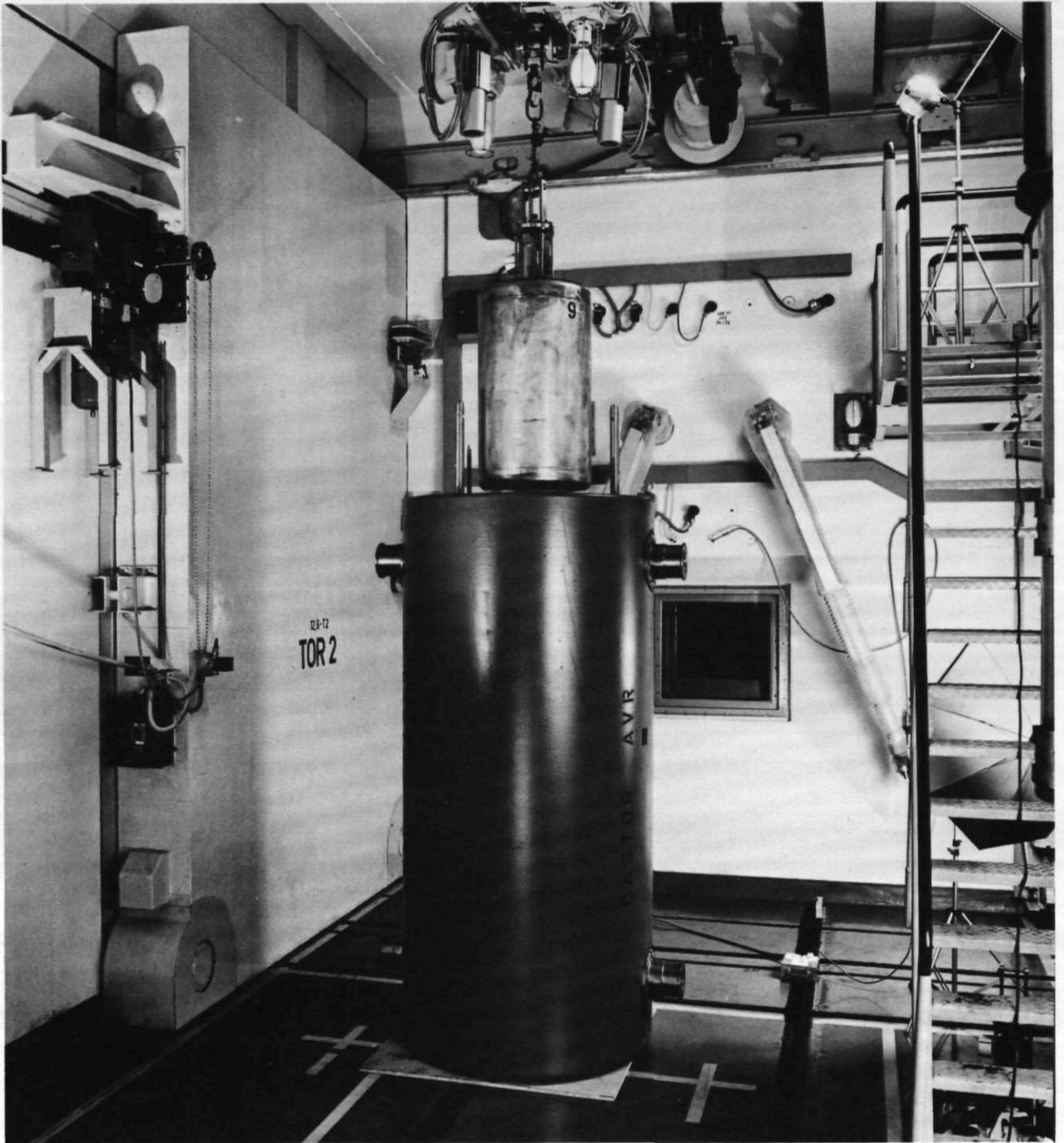


Abb. 12: Beladevorgang in der Be- und Entladezelle der Heissen Abfallzellen der KFA

- Der zweigeteilte Deckenstopfen der Be- und Entladezelle wurde mit dem 50 t-Hallenkran gezogen und auf dem Zellendach abgesetzt.
- Die Befestigung des Behälters in der Palette wurde am oberen Behälterende gelöst. An die oberen Tragzapfen des Behälters wurden Anschlagmittel befestigt und der Behälter mit dem Hallenkran durch die freie Öffnung in der Zellendecke von 2,5 m x 3 m aufgerichtet und nach Lösen der Befestigung am unteren Behälterende aus der Palette gehoben. Bei diesem Handhabungsvorgang waren die Palette und der Tafelwagen gegen ein Verschieben gesichert.
- Der Tafelwagen wurde mit der Palette aus der Be- und Entladezelle herausgezogen und der Behälter auf dem Zellenboden abgesetzt.
- Der Deckenstopfen wurde mittels Hallenkran wieder eingesetzt.
- Die Schrauben am Behälterdeckel wurden gelöst und der Deckel mit dem Faßgreifer abgehoben. Hierzu wurde in den Behälterdeckel eine Tragöse eingeschraubt und fest mit dem Haken des Faßgreifers verbunden. Ein Verdrehen des Behälterdeckels beim Handhaben war daher ausgeschlossen.
- Die vorbereiteten Trockenlagerkannen wurden nacheinander in die Be- und Entladezelle geschleust und mittels eines Zusatzhebezeuges mit einem Spezialgreifer im Behälter abgesetzt.
- Der Behälterdeckel wurde mit dem Faßgreifer wieder aufgesetzt. Das exakte Einsetzen des Deckels wurde durch eine Markierung und durch Führungsbolzen ermöglicht.
- Danach konnte die Zelle wieder geöffnet und zum Verschrauben des Behälterdeckels wieder betreten werden.
- Die Behälter wurden auf ihren Paletten wieder horizontal montiert zum Aufstellungsort in die heißen Zellen transportiert und dort hintereinander aufgestellt (siehe Abb. 3 und 4). Der Abstand voneinander beträgt 48 cm, der Abstand vom Boden 38 cm bzw. 91 cm.

Aus Tab. 10 ist die Zuordnung bzw. Position der AVR-TL-Kannen in den Lagerbehältern zu entnehmen.

Kannen-Nr.	BE-Typ	Behälter	Position
1	AVR-GO	TN	unten
2	-GK	TN	oben
3	-GO	GNS	unten
4	-GK	GNS	oben

Tabelle 10:

Position der AVR-TL-Kannen in den Lagerbehältern

2.5 Lecktest

Die Dichtheit der Behälter wurde nach der Beladung durch einen He-Lecktest überprüft. Die Messungen wurden unter Aufsicht des TÜV Rheinland in liegender Position der Behälter durchgeführt.

Als Ergebnis der Dichtheitsprüfungen am AVR-CASTOR-Behälter ergab sich eine He-Leckrate von etwa 10^{-4} mbar l/s. Die spezifizierte He-Leckrate von $\leq 10^{-7}$ mbar l/s wurde nicht erreicht, weil die mit Harz vergossenen speziellen Behälterdeckeldurchführungen der zum Meßprogramm gehörenden Temperaturmeßstellen eine Leckrate von etwa 10^{-4} mbar l/s hatten.

Für das Verschlußdeckelsystem wurde eine Leckrate von $< 10^{-9}$ mbar l/s ermittelt.

Die Dichtheitsprüfung des TN-AVR 2-Behälters entsprach der spezifizierten Dichtheit von $\leq 10^{-7}$ mbar l/s, wobei für die zum Meßprogramm gehörende Meßleitungsdurchführung eine Leckrate von $< 4 \cdot 10^{-8}$ mbar l/s gemessen wurde, der gleiche Wert auch für den Behälterdeckelverschluß.

3. Messungen und Ergebnisse

3.1 Temperatur

3.1.1 Instrumentierung

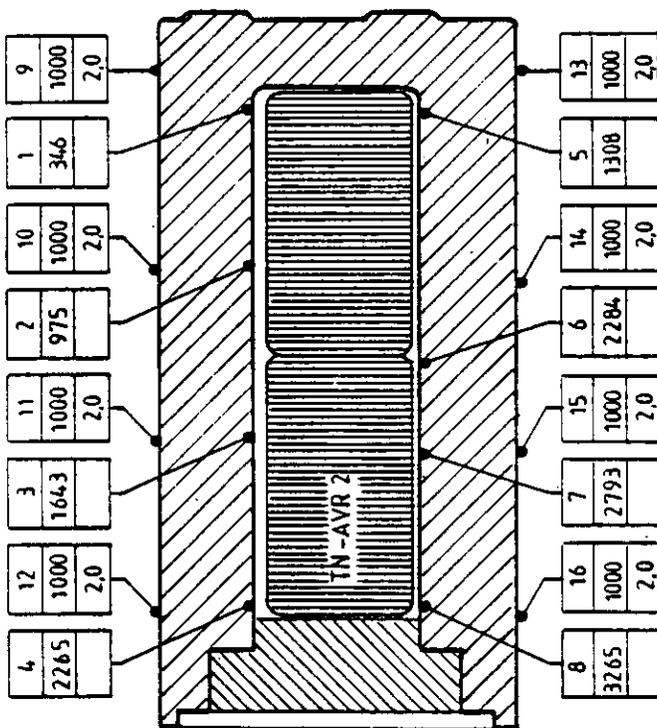
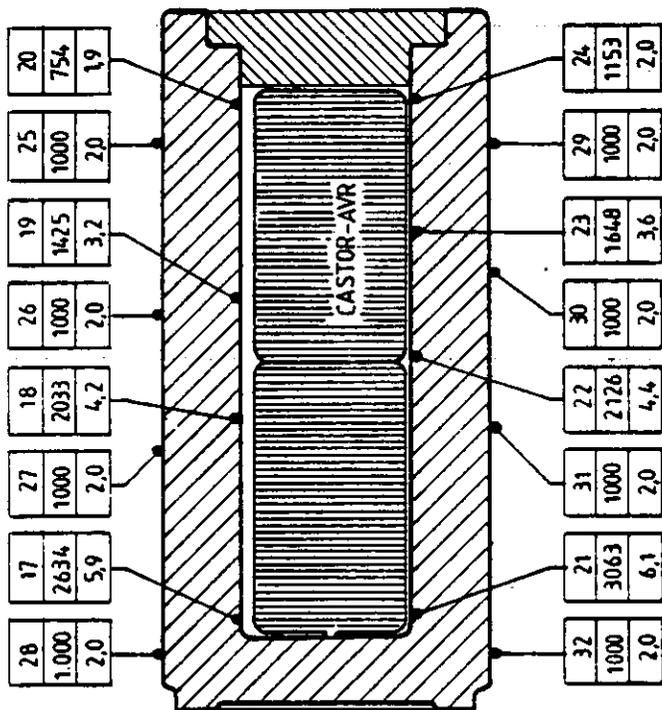
Zur Messung der inneren und äußeren Oberflächentemperaturen sind die Behälter jeweils mit 16 Mantel-Widerstands-Thermometern PT-100 in Vier-Leiterschaltung bestückt. Die einzelnen Meßpositionen sind im Meßstellenschema (Abb. 13) dargestellt. Die Mantel-Widerstands-Thermometer sind in der inneren Oberfläche der Behälter in Nuten verlegt, um sie vor mechanischer Beanspruchung beim Beladen mit den Brennelementkannen zu schützen.

Im Behälter CASTOR-AVR sind die Meßstellen der Widerstands-Thermometer in Kabelschuhen aus Kupfer eingelötet, die in den Nuten mit Schrauben befestigt sind und mit der inneren Oberfläche des Behälters bündig abschließen. Die Leitungen werden durch den Behälterdeckel nach außen geführt. Die Durchführung der Leitungen ist gasdicht verschlossen.

Im Behälter TN-AVR 2 sind die Meßstellen in den Nuten der inneren Oberfläche mit hitzebeständigem, anorganischem Kitt fixiert. Die Verbindung nach außen erfolgt hier über eine Durchführung in unmittelbarer Nähe des Behälterbodens, die gasdicht verschlossen ist.

An der Außenseite der Behälter werden die Meßstellen mittels Klemmstücken aus Messing an die Oberfläche gepreßt. Für einen optimalen Wärmeübergang von der Behälteroberfläche auf die Widerstands-Thermometer sorgt zusätzlich Wärmeleitpaste.

Zur Messung der Temperatur der die Behälter anströmenden Umgebungsluft ist unter jedem Behälter im Abstand von ca. 30 cm ein Widerstands-Thermometer angebracht.



34	1000	2,0
----	------	-----

Raumtemperatur

33	1000	2,0
----	------	-----

Raumtemperatur

Legende

- Pos.-Nr. im Behälter
- Leitungslänge (mm)
- Leitungswiderstand (Ω)

Datum		14. 3. 83
Name		M. Gra.
Maßstab		
Meßstellenschema		CASTOR AVR
Temperaturmessung		TN-AVR 2

Abb. 13: Meßstellenschema Temperaturmessung CASTOR-AVR- und TN-AVR 2-Behälter

Die Meßgenauigkeit aller Widerstands-Thermometer beträgt $\pm 0,1$ K.

Außer der Temperatur wird der Druck im Behälter-Leervolumen sowie der Druck außerhalb der Behälter gemessen. Die Ablesegenauigkeit der Druckanzeige beträgt 1 mbar. Die Drucksonden sind für Experimente zur Ermittlung von Leckraten der Behälterdichtung bzw. der eingesetzten Kannen geeignet.

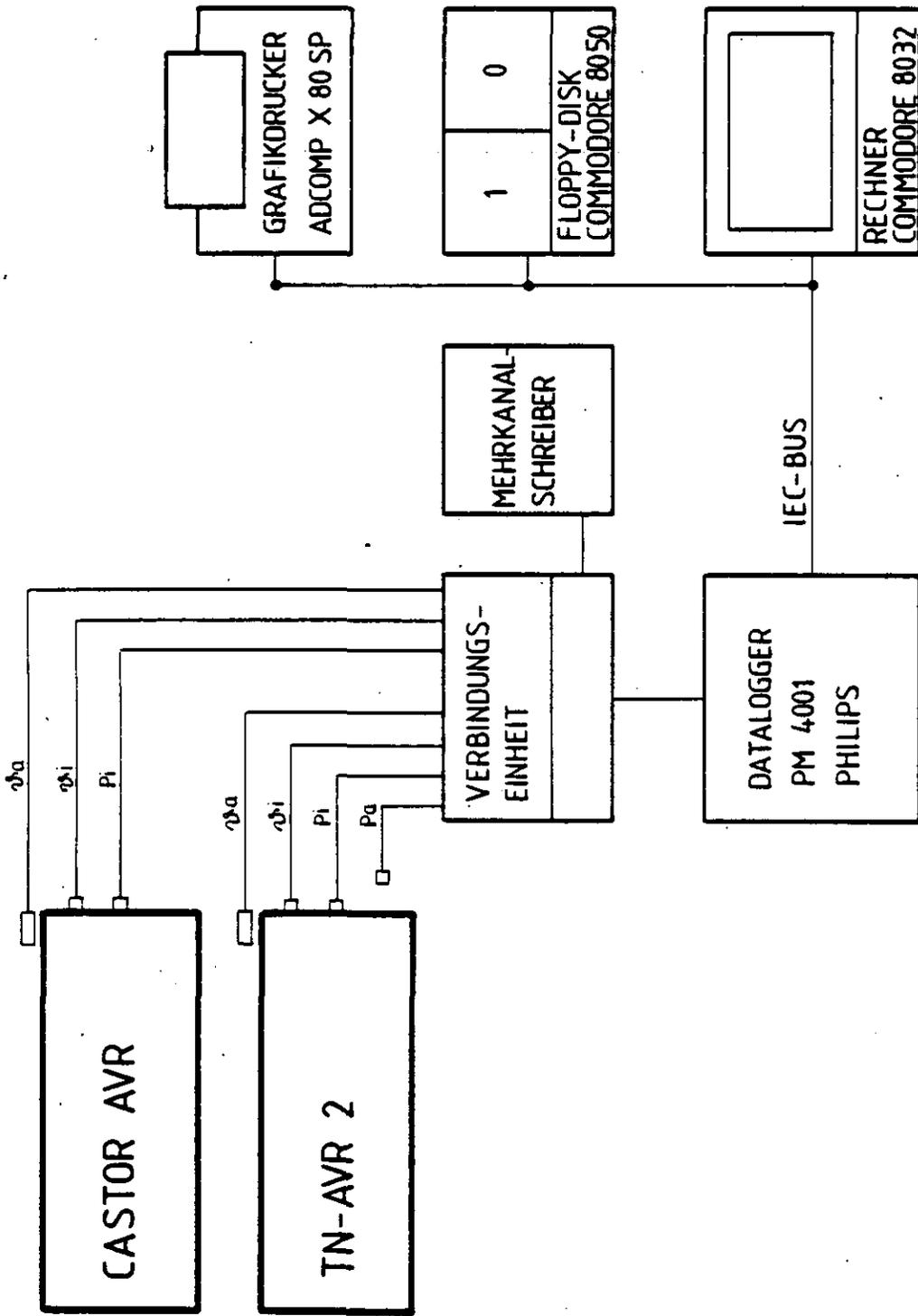
3.1.2. Meß- und Registriergeräte

Die von den Behältern kommenden Meßleitungen sind in einer Verbindungseinheit zusammengeführt (Abb. 14). Dort können die Meßsignale der Temperaturfühler und der Druckmeßdosen abgegriffen und von einem Mehrkanalschreiber kontinuierlich mitgeschrieben werden. Alle Meßsignale (34 Widerstands-Thermometer, 3 Drucksensoren) werden von einem Datenerfassungssystem (Datalogger PHILIPS PM 4001) in regelmäßigen, wählbaren Intervallen abgefragt und durch einen angeschlossenen Rechner (COMMODORE 8032) weiterverarbeitet.

Der Rechner führt über eine Eich-tabelle die Korrektur der Temperaturwerte ($^{\circ}\text{C}$) durch und rechnet die vom Datalogger ermittelten Spannungen in Druckwerte (mbar) um. Aus mehreren Meßwerten werden Mittelwerte berechnet und zu vorgegebenen Zeiten vom Rechner gesteuert über einen Graphik-Drucker (ADCOMP X 80 SP) ausgegeben. Die im System enthaltene Floppy-Disk mit zwei Laufwerken dient zur Programmspeicherung.

3.1.3 Datenausgabe und Datenreduzierung

Nachdem zunächst einmal täglich aus 12 Messungen Mittelwerte gebildet worden waren, wurden ab 3.5.83 4 x täglich (2.00, 8.00, 14.00, 20.00) Mittelwerte aus je 24 Messungen gebildet und ausgedruckt, um die Tag-Nacht-Schwankungen der Temperatur zu erfassen.



MFO	Datum	14. 3. 83
	Name	M. G. G.
	Abt.	
Blockschaltbild		CASTOR AVR
Temperaturmessung		TN-AVR 2

Abb. 14: Blockschaltbild der Temperaturmessanlage

Abb. 15 zeigt ein Beispiel eines solchen Ausdruckes. Im unteren Teil des Ausdruckes sind die Temperaturdifferenzen ΔT_w zwischen Innen- und Außenseite der Behälterwand und ΔT_a zwischen Außenseite und Lufttemperatur unter dem Behälter angegeben. In den letzten beiden Zeilen sind zur weiteren Datenreduzierung für jeden Behälter die Mittelwerte aus allen angegebenen Temperaturdifferenzen ΔT_w und aus den relevanten Temperaturdifferenzen ΔT_a angegeben. Als nicht relevant wurden dabei die Werte eingestuft und in den Mittelwert nicht einbezogen, bei denen entweder wegen Ausfall der Meßsonde ein Wert Null ist (Pos. 1/9 und 24/29 in Abb. 13) oder bei denen offensichtlich wegen mangelnden Wärmekontaktes zur inneren Oberfläche des Behälters ein Wert zwischen der Wandtemperatur und der Lufttemperatur im Inneren des Behälters angezeigt wird (Pos. 18/27, 21/32 und 22/31 in Abb. 13). Die relevanten Mittelwerte werden zur Beurteilung der Zeitabhängigkeit benutzt (Abschnitt 3.1.4.2).

3.1.4 Meßergebnisse

Die Behälter wurden am Aufstellungsort in den Heissen Zellen horizontal in ihren Transportgestellen gelagert. Die sich dabei ergebenden Temperaturfelder an den Behältern erreichten etwa 2 Tage nach der Aufstellung am endgültigen Lagerort ungefähr konstante Werte.

Nach einer mehrere Wochen dauernden Ermittlung der Schwankungen der Meßwerte und der daraus resultierenden zweckmäßigsten Wahl der Meß- und Ausdruck-Intervalle wurde Anfang Mai 1983 die endgültige, in 3.1.3 angegebene Meßfolge festgelegt und danach mit wenigen, durch Geräteausfälle bedingten Unterbrechungen fortlaufend durchgeführt.

Dabei ergab sich unter anderem, daß - obwohl die Meßunsicherheit der einzelnen Temperaturmessung $\pm 0,1$ K und die der Druckmessung $\pm 0,1$ mbar betrug - bei den aus 24 Meßwerten gebildeten Mittelwerten die Dezimalen 0,01 K und 0,1 mbar in vielen Fällen für Relativwerte noch Aussagekraft haben. Diese Dezimale wurde deshalb mit ausgedruckt (Abb. 15).

MESSPROTOKOLL VOM
UHRZEIT

11-03-84
20.00.00

ANZAHL DER MESSUNGEN PRO AUSGABE 24

TEMPERATUREN AM BEHAELTER IN GRAD CELCIUS +/-0.1

19.60	19.70	19.80	19.80	20.17	20.00	20.00	20.00
19.70	19.74	20.10	0.00	20.30	20.60	20.21	20.01
TN AVR-2				CASTOR AVR			
19.80	19.95	20.10	19.99	20.50	20.83	20.20	0.00
19.57	19.80	19.94	19.80	19.80	20.20	20.10	19.87

UNTER BEHAELTER

18.59 18.80

BEHAELTERINNENDRUCK IN MILLIBAR

945.0 971.9

AUSSENDRUCK IN MILLIBAR 1013.4

TEMPERATURDIFFERENZEN

1.00	1.11	1.21	1.20	1.50	1.41	1.40	1.41
.10	.03	.30	0.00	.12	.60	.22	.01
TN AVR-2				CASTOR AVR			
.22	.15	.15	.19	.70	.60	.10	0.00
.98	1.21	1.35	1.20	1.20	1.60	1.50	1.20

MITTELWERTE DER TEMPERATURDIFFERENZEN

WAND .14 .11
UMGEBUNG 1.16 1.42

Abb. 15: Beispiel für ein Meßprotokoll

3.1.4.1 Räumliche Temperaturverteilung

Wie aufgrund des Wärmeflusses von innen nach außen zu erwarten ist, ergibt sich ein Temperaturgefälle von höheren Temperaturen im Inneren des Behälters zu tieferen Temperaturen an der Außenoberfläche des Behälters und zu noch tieferen Temperaturen in der umgebenden Luft. In Tabelle 12 und in Abb. 16 sind die Temperaturdifferenzen ΔT_w zwischen Innen- und Außenoberfläche des Behälters und die Temperaturdifferenzen ΔT_a zwischen Außenoberfläche und Raumluft für die verschiedenen Meßorte, gemittelt aus drei typischen Ausdrucken vom 13.5.1983, angegeben. Man erkennt in Abb. 16 für beide Behälter etwa gleiche Verteilungen. ΔT_w schwankt um einen Wert von 0,2 K, ΔT_a zeigt einen systematischen Verlauf um etwa 1 K, wobei an der Unterseite der Behälter ein Maximum bei etwa 1,15 K liegt, an der Oberseite der Behälter der höchste Wert von etwa 1,0 K auf den einander zugewandten Seiten der Behälter liegt. Beim Behälter CASTOR-AVR fallen für ΔT_w drei Werte für alle Meßzeiten aus diesem Schema heraus, was, wie schon unter 3.1.3 erläutert, durch mangelnden Wärmekontakt mit der Innenwand zu erklären ist.

3.1.4.2 Zeitabhängigkeit des Temperaturfeldes

Zeitliche Änderungen des Temperaturfeldes sind aus zwei Gründen zu erwarten. Erstens führt die stetige Abnahme der Nachwärmeleistung zu einer langsamen Abnahme der Temperaturdifferenzen, zweitens führen die täglichen Schwankungen der Temperatur der umgebenden Luft, denen die Temperatur der Behälterwand mit einer gewissen Zeitverzögerung folgt, zu Schwankungen, die sich besonders stark auf ΔT_a , wesentlich schwächer auf ΔT_w auswirken. Die erstgenannte langsame Änderung ist interessant, einmal, um den erwarteten Einfluß der Abnahme der Nachwärmeleistung zu bestätigen, zum anderen, um die Meßergebnisse zu kürzeren Abklingzeiten hin extrapolieren zu können. Die zweitgenannten kurzfristigen Schwankungen sind wesentlich stärker als die langfristige Änderung und erschweren daher deren Erkennung. Um diese Änderungen

Zeit	Datum	T/°C	100 x $\Delta T/K$	100 x $\Delta T_m/K$	f = 0,82			f = 0,84			f = 0,86		
					100 x			100 x			100 x		
					S	R	\bar{R}	S	R	\bar{R}	S	R	\bar{R}
2	5.9.83	24 14		70	- 14	84		- 14	84		- 15	85	
8		24 14	0	72	- 11	83	84	- 12	84	84	- 13	85	85
14		23 94	- 20	92	9	83		9	84		8	84	
20		24 01	+ 7	85	1	84		0	84		0	85	
2	6.9.83	23 36	- 75	143	60	83		60	83		60	83	
8		22 97	- 39	165	84	81	82	86	82	81	88	83	79
14		23 58	+ 61	99	14	85		19	80		24	75	
20		23 91	+ 33	61	- 19	80		- 17	78		- 15	76	
2	7.9.83	23 40	- 51	112	31	81		33	79		35	77	
8		22 90	- 50	153	71	82	82	73	80	79	76	77	76
14		23 07	+ 17	125	43	82		47	79		50	75	
20		23 41	+ 34	86	4	82		7	79		11	75	
2	8.9.83	22 62	- 79	159	76	83		80	79		83	76	
8		22 48	- 24	160	74	86	85	81	81	81	84	76	76
14		23 10	+ 62	90	4	86		9	81		15	75	
20		23 72	+ 62	34	- 52	86		- 48	83		- 45	79	
2	9.9.83	23 74	- 2	39	- 45	84		- 42	82		- 40	79	
8		23 89	+ 15	34	- 50	84	82	- 49	83	82	- 48	82	82
14		23 81	- 8	48	- 34	82		- 34	82		- 34	82	
20		23 94	+ 13	41	- 40	81		- 41	82		- 42	83	
2	10.9.83	23 98	- 4	45	- 36	81		- 38	82		- 39	84	
8		23 98	0	51	- 30	81	79	- 32	83	82	- 34	85	84
14		23 92	- 6	60	- 19	79		- 22	82		- 24	84	
20		23 85	- 7	67	- 9	76		- 12	76		- 14	81	
2	11.9.83	23 41	- 44	111	32	79		31	81		29	82	
8		22 98	- 43	147	65	82	81	65	82	81	65	82	80
14		22 88	- 10	144	63	81		64	80		65	79	
20		22 99	+ 11	124	41	83		43	80		46	78	
2	12.9.83	22 77	- 22	137	54	83		57	80		60	77	
8		22 57	- 20	146	62	84	83	66	80	79	70	76	76
14		22 65	+ 8	127	44	83		49	78		53	74	
20		22 62	- 3	123	39	84		44	79		48	75	
2	13.9.83	22 40	- 22	138	52	86		57	81		62	76	
8		22 27	- 13	141	54	87	87	59	82	82	65	76	76
14		22 39	+ 12	120	33	87		39	81		45	75	
20		22 64	+ 25	93	5	88		10	83		15	78	
2	14.9.83	22 50	- 14	95	17	78		22	74		26	69	
8		22 72	+ 22	78	- 6	84	84	- 2	80	81	2	76	78
14		23 01	+ 29	56	- 31	87		- 28	84		- 25	81	
20		23 19	+ 18	46	- 42	88		- 40	86		- 38	84	
2	15.9.83	22 98	- 21	72	- 15	87		- 14	86		- 13	85	
8		22 89	- 9	81	- 5	86	84	- 4	85	84	- 3	84	84
14		23 39	+ 50	33	- 49	82		- 49	82		- 49	82	
20		23 36	- 3	46	- 37	83		- 38	84		- 39	85	

Tabelle 11:

Beispiel der gemessenen Temperaturen und der berechneten Korrekturen für den Zeitraum vom 5.9. bis 15.9.1983

		TN AVR 2				CASTOR AVR			
oben	a) 13.5.83	71	84	88	89	107	103	99	93
	b) 5.1.84	57	73	69	74	74	90	87	83
	$\frac{100 \cdot b}{a} \%$	80	87	78	83	88	87	88	89
unten	a) 13.5.83	74	107	117	97	80	123	114	85
	b) 5.1.84	58	85	94	74	67	109	103	73
	$\frac{100 \cdot b}{a} \%$	78	79	80	76	84	89	90	86

Tabelle 12:

Temperatur-Differenzen zwischen Außenwand und Raumluft mit 100 multipliziert am 13. 5. 1983 (Abklingzeit 1,95 Jahre) und am 5. 1. 1984 (Abklingzeit 2,62 Jahre) sowie das Verhältnis beider Werte.

Der Mittelwert der Verhältnisse beträgt 84 % mit einer Standardabweichung von 4,7 %. Das Verhältnis der berechneten Nachwärmeleistungen für diese Abklingzeiten bei 15 % Abbrand beträgt 83 % (Abb. 7).

systematisch zu erfassen, wurden zunächst, wie in 3.1.3 beschrieben, räumliche Mittelwerte gebildet, um für jedes Meßintervall je Behälter zwei typische Mittelwerte $\overline{\Delta T_{\alpha}}$ und $\overline{\Delta T_w}$ zu erhalten. Als Beispiel sind in Tab. 11 für den Zeitraum vom 5.9.83 bis 15.9.83 diese Mittelwerte zusammen mit den gemessenen Temperaturen der Raumluft aufgeführt. Man erkennt eine deutliche Korrelation zwischen Änderungen der Raumtemperatur und ΔT_{α} .

Wie in Abschnitt 3.1.5 näher erläutert wird, ist es möglich $\overline{\Delta T_{\alpha}}$ jeweils für ein Meßintervall N aufzuteilen in einen langsam veränderlichen Anteil R_N und einen von den täglichen Schwankungen der Lufttemperatur abhängigen Anteil S_N

$$\overline{\Delta T_{\alpha N}} = R_N + S_N$$

Dies wurde für die Meßwerte am Behälter TN AVR 2 durchgeführt. Die Ergebnisse für R_N sind in Tab. 11 eingetragen, wobei zusätzlich über die 4 Werte eines Tages gemittelt wurde. In Abb. 17 sind die Werte $\overline{R_N}$ für die Zeit vom 3.5.83 bis 12.1.85 (etwa 250 Tage) zusammen mit den Tagesmittelwerten der Raumlufttemperatur aufgetragen.

Man erkennt dort die langfristige abnehmende Tendenz von R sowie eine starke Korrelation zwischen der restlichen Schwankung von R und den Schwankungen der Raumtemperatur. Die nach der Methode der kleinsten Quadrate ermittelte mittlere Gerade für diesen Zeitraum hat die Gleichung

$$R = 0,899 \text{ K} - 8,37 \cdot 10^{-4} \frac{\text{K}}{\text{d}} \cdot t$$

Die Beispiele in Tab. 12 und Abb. 16 für die räumliche Verteilung sind so ausgewählt, daß die Temperaturkorrektur S_N vernachlässigbar klein ist und R_N etwa auf der gemittelten Geraden liegt. Ein zweiter Zeitraum, der diese Bedingungen erfüllt, wurde für den 5.1.84 ausgesucht. Die räumliche Temperaturverteilung für diesen Zeitraum wurde ebenfalls in Tab. 12 eingetragen und für jeden Meßort das prozentuale Verhältnis beider Werte bestimmt. Man erkennt, daß die Temperaturdifferenzen in 0,67 Jahren im Mittel auf 84 % mit einer Standardabweichung von 4,7 % abgenommen haben.

TEMPERATURDIFFERENZEN

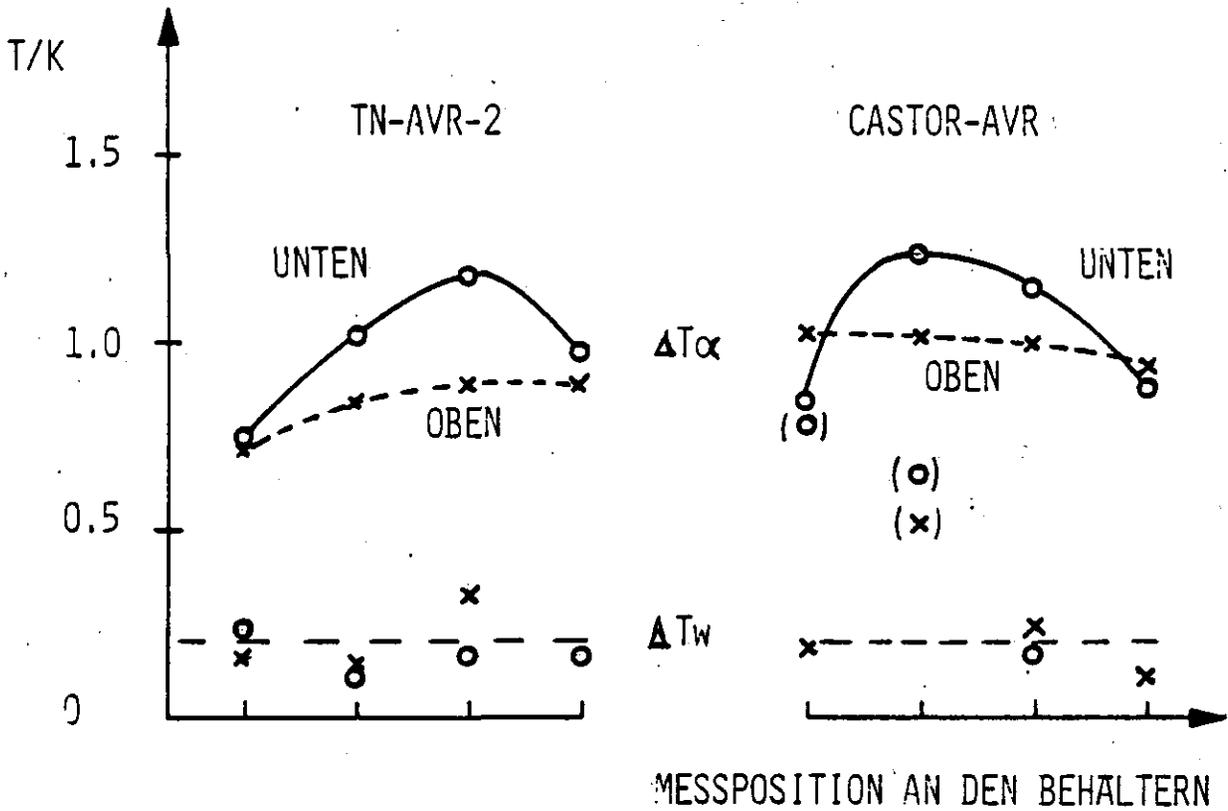


Abb. 16: Temperatur-Differenzen zwischen außenwand und Raumluft (ΔT_{α}) und zwischen Innen- und Außenoberfläche (ΔT_w). Die Werte sind Mittelwerte aus 72 Messungen am 13.5.1983 (Abklingzeit 1,95 Jahre), vergleiche auch Tab. 12.

ZULUFT-TEMPERATUR

GEMITTELTE TEMPERATURDIFFERENZEN

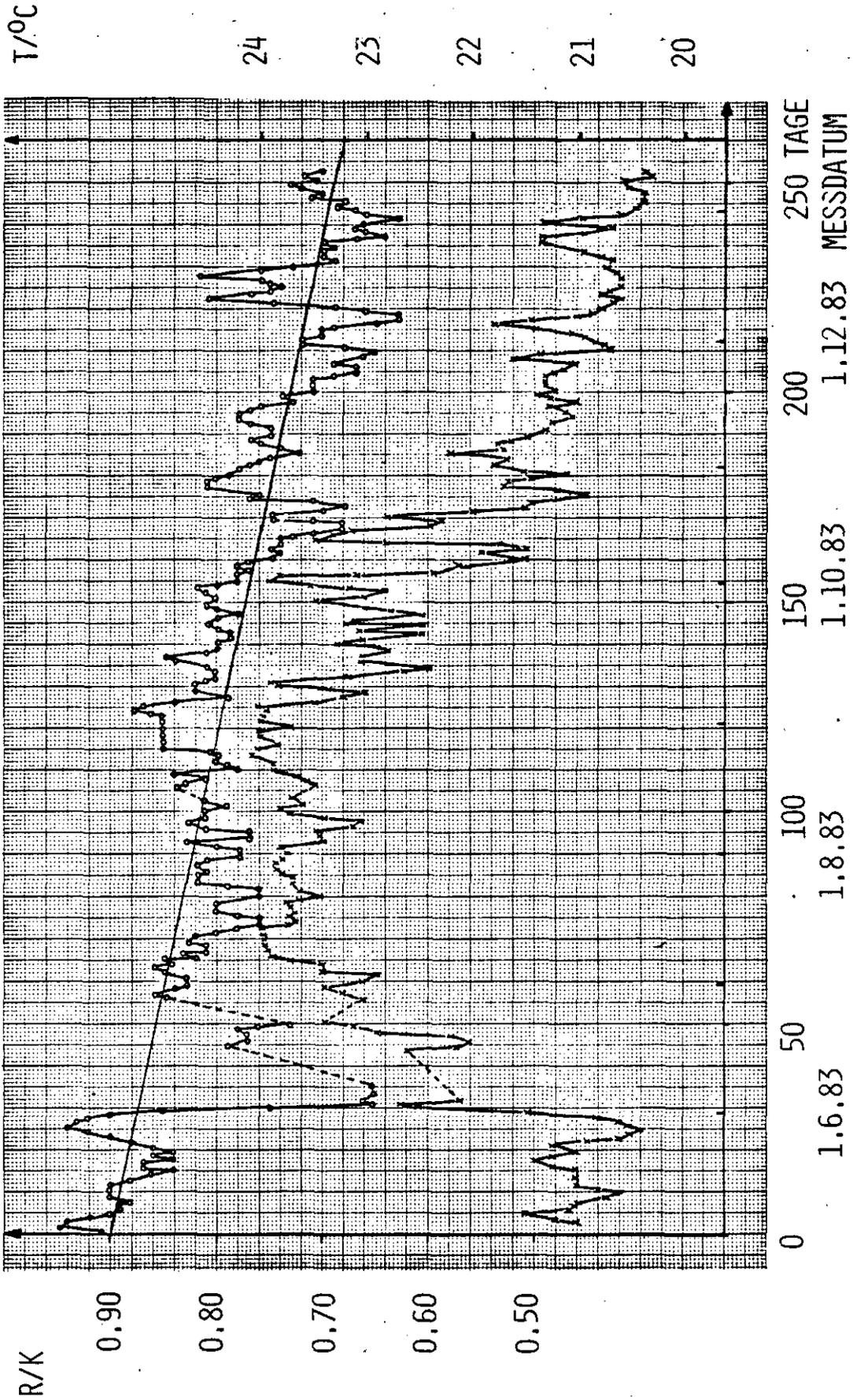


Abb. 17: Korrigierte Temperaturdifferenz R zwischen Außenwand und Raumluft und die Raumlufttemperatur T (Mittelwert über Meßorte am TN AVR 2) als Funktion der Abklingzeit, beginnend bei einer Abklingzeit von 1,92 Jahren. Die Werte sind jeweils über einen Tag gemittelt. Die nach der Methode der kleinsten Quadrate ermittelte mittlere Gerade ist eingezeichnet.

3.1.4.3 Wärmeabfuhr und zeitliche Schwankung der Raumtemperatur

Für die Interpretation der gefundenen Temperaturdifferenzen sind die Art der Wärmeabfuhr vom Lagerort (die Strömungsverhältnisse an den Behältern) und die zeitliche Schwankung der Raumtemperatur wichtig. Deshalb werden die entsprechenden Meßergebnisse hier erläutert.

Wärmeabfuhr vom Lagerort

Der Raum, in dem die Trockenlager-Behälter aufgestellt sind, wird mit etwa 5 Luftwechseln je Stunde durchlüftet. Dadurch treten in der Umgebung der Behälter turbulente Strömungen mit Geschwindigkeiten bis zu 1 m/s auf. Unter dem Behälter CASTOR-AVR steht die Luft dagegen - wegen der seitlich geschlossenen Palette - verhältnismäßig ruhig. Während einer Lüftungsabschaltung am 30.12.1982 wurde mit Strömungsprüfröhrchen das Konvektions-Strömungsfeld an den Behältern beobachtet. Die höchsten Geschwindigkeiten wurden seitlich der Behälter gefunden und betragen etwa 0,2 m/s..

Bei eingeschalteter Lüftung kann im allgemeinen der Konvektionseinfluß gegenüber der Zwangsführung der Luft durch die Lüftungsöffnungen vernachlässigt werden. Eine Ausnahme bildet der Luftraum unter dem Behälter CASTOR-AVR, wo die Zwangsführung der Luft durch das Lagergestell wesentlich behindert wird.

Schwankungen der Raumlufthtemperatur

Die über die Meßintervalle von je 6 Stunden gemittelten Raumlufthtemperaturen (gemessen 30 cm unter den Behältern) zeigen eine tägliche und eine jahreszeitliche Schwankung. Sie ist bedingt durch die entsprechenden wesentlich stärkeren Schwankungen der Außentemperaturen, die durch die Konditionierung der Zuluft nicht vollständig ausgeglichen wird.

Bei der täglichen Schwankung liegen in den Meßintervallen 8 bis 14 Uhr und 20 bis 2 Uhr die Temperaturwerte bei den Tagesmittelwerten, im Meßintervall 14 bis 20 Uhr darüber, im Meßintervall 2 bis 8 Uhr entsprechend darunter. Vereinzelt traten stärkere Schwankungen und Temperatursprünge auf, wie z.B. Ende Mai 1983 und im Oktober 1983. Die jahreszeitliche Schwankung ist aus Abb. 16 zu ersehen. Von Juni bis September lagen die mittleren Tagestemperaturen zwischen 23°C und 24°C, von Oktober bis Mai zwischen 20,5°C und 21,5°C.

3.1.5 Aufteilung der gemessenen Temperaturdifferenz $\overline{\Delta T_\alpha}$

Um die Abhängigkeit der Nachwärmeleistung \dot{Q} von der Zeit und ihren Einfluß auf ΔT_α zu beurteilen, war es erforderlich, ΔT_α aufzuteilen in einen langsam veränderlichen Anteil $R(\dot{Q})$ und einen von der Änderung der Lufttemperatur abhängigen Anteil $S(T(t))$. Es ist wichtig, die Zeitabhängigkeit von \dot{Q} auch auf diese Weise experimentell nachzuweisen, um die Berechtigung der Extrapolation der Temperaturwerte zu kleineren Abklingzeiten zu belegen. Die Aufteilung wird im folgenden abgeleitet.

Die Temperatur der Außenluft sei $T(t)$, die der Behälteroberfläche, gemittelt über alle Meßorte seit $\overline{T_w}(t)$. Die Differenz $\overline{\Delta T_\alpha} = \overline{T_w} - T$ ist proportional dem Wärmestrom von der Behälteroberfläche in die Luft.

Im stationären Zustand, d.h. bei konstanter Lufttemperatur T ist

$$(1) \quad \dot{Q} = \alpha F \overline{\Delta T_\alpha}$$

$$(2) \quad \overline{\Delta T_\alpha} = R = \frac{\dot{Q}}{\alpha F}$$

Dabei sind

- F Außenoberfläche des Behälters (12,6 m²)
- α Wärmeübergangszahl (7 bis 12 W/m² K)
- \dot{Q} Nachwärmeleistung der Brennelementbeladung
- R hängt nur über \dot{Q} von der Zeit ab.

Bei variabler Lufttemperatur gleicht sich die Temperatur des Behälters an diese an, jedoch wegen der Wärmekapazität Q_0 des Behälters mit einer gewissen Zeitverzögerung. Dadurch entsteht eine Temperaturdifferenz $S = T_w - T$, auch wenn $\dot{Q} = 0$ ist. Nehmen wir zunächst $\dot{Q} = 0$ an, so gilt für den Ausgleichsvorgang: Die Änderungsrate des Wärmehaltes ist gleich dem Wärmestrom durch die Behälteroberfläche. Nehmen wir außerdem als Näherung an, daß der Temperatúrausgleich innerhalb des Behälters unendlich schnell vor sich geht, so ist die Behältertemperatur an allen Stellen gleich T_w , der Wärmehalt ist $T_w Q_0$ und

$$(3) \quad \alpha F S = - Q_0 \dot{T}_w, \quad \dot{T}_w = - c (T_w - T) \text{ mit}$$

$$(4) \quad c = \frac{\alpha F}{Q_0}$$

und

$$\dot{S} = - c S - \dot{T}$$

mit der Lösung

$$(5) \quad S(t) = S(t_0) e^{-c(t-t_0)} - \int_{t_0}^t \dot{T}(\tau) e^{-c(t-\tau)} d\tau$$

Die Berechtigung der Näherung (unendlich schneller Temperatúrausgleich in der Behälterwand) läßt sich beurteilen anhand der Zeitkonstanten für den Temperatúrausgleich in der Wand:

$$t_w = \frac{d^2}{m} = \frac{(0,3 \text{ m})^2}{0,030 \text{ m}^2/\text{h}} = 3 \text{ h}$$

und der für den Temperatúrausgleich zwischen Behälter und Luft nach Gleichung (5) und (4)

$$t_\alpha = \frac{Q_0}{\alpha F} = \frac{12,3 \cdot 10^6 \text{ WS/K}}{12,6 \text{ m}^2 \cdot 8,2 \text{ W/m}^2\text{K}} = 33,1 \text{ h}$$

Das bedeutet, der Temperatúrausgleich innerhalb der Wand geschieht 11 mal so schnell wie der zwischen Behälter und Luft.

Ist $\dot{Q} = 0$, so überlagern sich wegen der Linearität der Wärmeleitungsgleichung beide Temperaturfelder (Gleichung 2 und 5) additiv, und es gilt

$$(6) \quad \Delta T_\alpha = R + S$$

Da als Meßwerte die Mittelwerte über Meßintervalle der Dauer $t = 6 \text{ h}$ vorliegen, werden die Werte $S_N = S(N \Delta t)$ berechnet. Für sie gilt nach Gleichung (5)

$$(7) \quad S_{N+1} = e^{-c \Delta t} \left(S_N - \int_0^{\Delta t} T(N \Delta t + x) e^{-cx} dx \right)$$

Setzt man im Integral für e^{-cx} näherungsweise $e^{-\frac{c \Delta t}{2}}$, so ergibt das Integral $e^{-\frac{c \Delta t}{2}} [T(N+1) \Delta t - T(N \Delta t)]$.

Daraus ergibt sich für S_N die Rekursionsformel

$$(8) \quad S_{N+1} = f \cdot S_N - f^* (T_{N+1} - T_N)$$

$$\text{mit } f = e^{-c \Delta t} \quad \text{und} \quad f^* = e^{-\frac{c \Delta t}{2}}$$

und daraus durch schrittweisen Schluß von S_0

$$(9) \quad S_N = f^N \cdot S_0 + f^* \sum_{n=1}^{n=N} (T_N - T_{N-1}) f^{(N-n)}$$

Dabei ist T_N die Lufttemperatur am Ende des N ten Meßintervalls.

Der Näherungsschritt von Gleichung (7) nach Gleichung (8) ist zulässig für genügend kleine $c \Delta t$. Messungen ergaben bei der gewählten Intervalldauer $\Delta t = 6$ h, $c \cdot \Delta t = 0,174$ und damit $t_{\infty} = \frac{1}{c} = 34,5$ h.

Mit Hilfe der Rekursionsformel lassen sich aus den gemessenen T_N bei bekanntem f und bekanntem S_0 die S_N berechnen. Führt man die Berechnung mit verschiedenen f aus, so läßt sich der Wert für f ermitteln, für den R bei starken und mehrere Tage dauernden Wechseln der Lufttemperatur am besten konstant bleibt. Dies wurde für den Behälter TN AVR 2 durchgeführt und ergab einen besten Wert von $f = 0,84$. Für die Werte $f = 0,82$ und $f = 0,86$ ergaben sich deutlich stärkere Schwankungen von R (siehe Tab. 11).

Bei der im Lagerversuch vorliegenden geringen Nachwärmeleistung

($\dot{Q} \approx 110$ W, $R \approx 0,8$ K) kam es in einigen Fällen vor, daß die Korrektur S größer war als R , so daß die Behälterwand kälter als die Außenluft war.

Beispiele für die Rechenergebnisse sind in Tab. 11 enthalten. Ohne die Korrektur S wäre ein Erkennen der Zeitabhängigkeit von R und damit von \dot{Q} nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich gewesen.

Daß bei der Auswertung nach Gleichung (8) für T_N jeweils der Mittelwert der Lufttemperatur über das N te Meßintervall statt des Wertes am Ende des N ten Meßintervalls benutzt wurde, da nur dieser ausgedruckt war, hat geringe Bedeutung, da für die Ermittlung des besten Wertes für f bei längerzeitigen Temperaturschwankungen das erste Glied ($S_N \cdot f$) den Ausschlag gab.

3.1.6 Vergleich der gemessenen Temperaturdifferenzen mit Erwartungswerten

Erwartungswerte für ΔT_{α} und ΔT_w lassen sich unter vereinfachenden Annahmen berechnen. Außerdem lassen sich Zeitkonstanten für die verschiedenen Ausgleichsvorgänge angeben. Dazu werden die folgenden Größen benutzt:

Außenoberfläche	$F = 10,2 \text{ m}^2 + 2,4 \text{ m}^2 = 12,6 \text{ m}^2$
Innenoberfläche	$F_{\text{innen}} = 3,9 \text{ m}^2 + 0,6 \text{ m}^2 = 4,5 \text{ m}^2$
Mittelwert	$\bar{F} = 0,5 (F + F_{\text{innen}}) = 8,5 \text{ m}^2$
Dicke	$d = 0,30 \text{ m}$
Nachwärmeleistung	$\dot{Q}(t) = 132 \text{ W}$ (nach ORIGEN berechneter Wert für 15 % fima und 2 Jahre Abklingzeit (1.6.1983))

Behältermaterial:

Wärmeleitfähigkeit	= 35 W/mK
Wärmeübergangszahl	= 8,2 W/m ² K [*])
Dichte	= 7,8 g/cm ³
Spezifische Wärmekapazität	$C_p = 540 \text{ Ws/kg} \cdot \text{K}$
Temperaturleitfähigkeit	$m = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{h}$

*) Nach Buderus, Handbuch für Heizungs- und Klimatechnik, 32. Ausgabe 1975, S. 101 für Wandflächen innen bei natürlicher Luftbewegung.

Wärmekapazität Q_o

$$\text{CASTOR-AVR} \quad Q_o = 11 \cdot 10^6 \text{ Ws/K}$$

$$\text{TN AVR 2} \quad Q_o = 12,3 \cdot 10^6 \text{ Ws/K}$$

wobei der Inhalt einschließlich Kannen mit $0,4 \cdot 10^6 \text{ Ws/K}$ mit enthalten ist.

Für die Temperaturdifferenz R zwischen Außenwand und Luftraum bei konstanter Lufttemperatur ergibt sich

$$(10) \quad R = \frac{\dot{Q}}{\alpha F} = 1,29 \text{ K}$$

Für ΔT_w ergibt sich näherungsweise (ebene Platte der Dicke $0,30 \text{ m}$ und der Fläche \bar{F})

$$\Delta T_w = 1,33 \text{ K}$$

Für den Temperatenausgleich in der Wand gilt (Näherung für ebene Platte)

$$(11) \quad \tau_w = \frac{x^2}{m} = \frac{d^2}{m} = 3 \text{ h}$$

Für den Temperatenausgleich zwischen Außenluft und Behälter gilt, wie in Abschnitt 3.1.5 abgeleitet

$$(12) \quad \tau_\alpha = \frac{Q_o}{\alpha F} = 33,1 \text{ h}$$

Eliminiert man aus den Gleichungen (10) und (12) αF , so folgt

$$(13) \quad \dot{Q} = \frac{R Q_o}{\tau_\alpha} = 93 \text{ W}$$

Eine von der Zentralabteilung Allgemeine Technologie der KFA durchgeführte Berechnung der Temperaturverteilung in Behälter und Kannen ergibt bei einer angenommenen Nachwärmeleistung von 245 W eine maximale

Temperatur der Brennelemente von 47 K über der äußeren Lufttemperatur. Für andere Nachwärmeleistungen bzw. Abklingzeiten ergeben sich daraus die in Tab. 11 angegebenen Werte.

Ein Vergleich der gemessenen Werte mit genannten Erwartungswerten ergibt

- Die Ortsabhängigkeit von ΔT_{α} in Tab. 12 zeigt erwartungsgemäß unten etwas höhere Werte als oben wegen der unten aufliegenden Brennelementkannen und in der Mitte etwas höhere Werte als an Deckel und Boden wegen des dort etwas höheren Wärmestroms.
- Die Zeitabhängigkeit der bezüglich des Temperaturwechsels der Lufttemperatur korrigierten räumlichen Mittelwerte von $\Delta T_{\alpha}(R(t))$ zeigt Proportionalität zur nach ORIGEN berechneten Nachwärmeleistung. Dies berechtigt zur Extrapolation auf kürzere Abklingzeiten (siehe Abschnitt 3.1.7).
- Aus Zeitkonstante t_{α} , die die besten Korrekturwerte für die Temperaturschwankungen der Luft ergibt, folgt nach Gleichung (13) ein um 30 % niedrigerer Wert für die Nachwärmeleistung \dot{Q} als die nach ORIGEN berechneten Werte. Das gleiche ergibt sich unabhängig davon, wenn man \dot{Q} nach Gleichung (10) aus R und dem Literaturwert von $1/2$ berechnet. Eine gegenüber AVR-Brennelementen "normaler" Bestrahlungsgeschichte verminderte Nachwärmeleistung läßt sich qualitativ erklären durch die etwa 2-jährige Betriebsunterbrechung des AVR, die etwa 2 Jahre vor dem Bestrahlungsende der Behälterbeladung endete. Dadurch wird der Beitrag von Cs 134 zu \dot{Q} , der nach 2 Jahren Abklingzeit etwa 30 % beträgt, wesentlich reduziert (siehe auch Abschnitt 2.1 und Tab. 6).
- Die Werte für ΔT_w stimmen innerhalb der Meßgenauigkeit gut mit dem erwarteten Mittelwert von 1,33 K überein. Ein systematischer Einfluß der Schwankung der Außentemperatur wurde nicht beobachtet. Dies war bei Mittelwerten über 6 h auch nicht zu erwarten, da die Zeitkonstante für Temperatúrausgleich in der Wand nur 3 h beträgt.

3.1.7 Extrapolation auf kürzere Abklingzeiten

Nimmt man an, daß R proportional \dot{Q} ist und nimmt die Werte für \dot{Q} aus Abb. 7 für 15 % fima als richtig an, so ergeben sich die in Tab. 13 eingetragenen Werte. Bezieht man diese Werte auf den Wert für 712 Tage Abklingzeit, so ergeben sich die in Tab. 13 angegebenen Prozentsätze und Temperaturdifferenzen R .

Der Vergleich der für 712 Tage und 956 Tage Abklingzeit aus der gemittelten Geraden entnommenen (Abb. 17) Werte für R ergibt eine Abnahme auf 77 %, für die in Tab. 12 ermittelten Werte eine Abnahme auf 84 % und für die aus den berechneten Nachwärmeleistungen ermittelten Werte eine Abnahme auf 83 %. Aufgrund dieser relativ guten Übereinstimmung scheint es berechtigt, die Werte für R auf Abklingzeiten von 150 d zu extrapolieren. Das Ergebnis ist in Tab. 13 eingetragen, für R ergibt sich für 150 d Abklingzeit eine Temperaturerhöhung der Behälteroberfläche gegenüber der Raumluft von 2,07 K. Für längere Abklingzeiten (1.6.84 und 5.1.85) sind die Werte aus Tab. 13 zu entnehmen.

Datum	Abklingzeit (Tage)	\dot{Q} (Watt)	$\frac{100 \dot{Q}}{132 \text{ W}}$	R (K) extrapoliert	R (K) gemessen	$T_{\text{max}} - T_R$
1.11.82	150	305	231	2,07	-	67
1. 2.83	240	245	186	1,66	-	47
13. 5.83	712	132	100	0,89	0,894	25
5. 1.84	956	110	83	0,75	0,695	21
1. 6.84	1095	100	76	0,68	-	19
5. 1.85	1321	87	66	0,59	-	17

Tabelle 13:

Vergleich und Extrapolation der Meßwerte für die gemittelte Temperaturdifferenz R und die berechneten Werte für die Nachwärmeleistung \dot{Q}

3.2 Freisetzung gasförmiger Aktivität

Die gemessene Aktivitätskonzentration im Leervolumen erlaubt eine qualitative Aussage über die Barrierewirkung der Kannen mit Deckeldichtung. Für diese ist eine Leckrate von $\leq 10^{-4}$ mbar l/s spezifiziert. Sie gibt ferner einen Hinweis, ob es sinnvoll ist, den Zwischenbereich im Deckel auf Gasaktivität zu prüfen.

Für eine quantitative Aussage über die Barrierewirkung der Kannen ist die Kenntnis der Aktivitätskonzentration im Gasraum der Kannen erforderlich, ferner ist dazu wahrscheinlich eine Variation der Druckdifferenz zwischen Kanneninnenraum und Leervolumen des Behälters notwendig. Dies ist durch Einstellung eines gewünschten Luftdruckes im Leervolumen möglich.

Die Aktivitätskonzentration im Gasraum der eingesetzten AVR-TL-Kannen konnte nicht gemessen werden, da dieser nicht zugänglich ist. Jedoch wird im begleitenden Meßprogramm zum AVR-Trockenlager an zwei mit Ventilen versehenen Kannen mit vergleichbarer Beladung diese Messung durchgeführt, so daß Erwartungswerte für die hier eingesetzten AVR-TL-Kannen abgeleitet werden können.

Messungen und Ergebnisse an den Ventilkannen werden im Abschnitt 3.2.1 beschrieben.

3.2.1 Freisetzung aus den BE in das Kannenleervolumen

Das Leervolumen einer mit 950 BE gefüllten AVR-TL-Kanne beträgt etwa 113 l.

Während der Lagerzeit setzen die BE gasförmige Aktivität in dieses Leervolumen frei, wobei Kr 85 und H 3 den maßgeblichen Anteil bilden.

Das Kr 85 stammt zum einen aus der herstellungsbedingten Brennstoffkontamination des BE-Matrixmaterials, zum anderen aus Brennstoffteilchen mit defekten Beschichtungen. Der bei weitem größte Teil des Kryptons (≥ 99 % von ca. 0,3 Ci/BE) befindet sich in den intakten Brennstoffteilchen und trägt zur Freisetzung nicht bei.

Das H 3 entsteht in den beschichteten Brennstoffteilchen durch ternäre Spaltung, wobei für U 235 eine Spaltausbeute von etwa $1 \cdot 10^{-4}$ H 3-Atome/Spaltung angenommen wird. Bei intakter Beschichtung kann dieser Tritiumanteil nicht freigesetzt werden. Außerhalb der Brennstoffteilchen entsteht H 3 durch (n, p)-Reaktion des He 3-Isotops im Kühlgas. Durch Adsorptionsvorgänge kann dieser H 3-Anteil an der Oberfläche des Matrixmaterials gebunden werden. Durch (n, α)-Reaktion des Li 6 als Verunreinigung im Brennelement- und Reaktorgraphit sowie durch eine (n, α)-Reaktion des B 10 in Steuerstäben und abbrennbaren Giften entsteht weiteres H 3, welches im Matrixmaterial gebunden wird. Messungen zeigen, daß auf Grund dieser Reaktionen im Matrixgraphit hochabgebrannter BE etwa 50 mCi/BE H 3 akkumuliert wird. Da der in den Brennstoffteilchen durch ternäre Spaltung entstehende Anteil demgegenüber klein ist (~ 10 mCi), ist die Freisetzung aus einzelnen beschädigten Brennstoffteilchen zu vernachlässigen.

Um die freigesetzte Gasaktivität in befüllten verschlossenen AVR-TL-Kannen messen zu können, wurden zwei spezielle Kannen mit je zwei Ventilen versehen (Abb. 18). Diese sogenannten Ventilkannen sind bis auf die eingebaute Gasentnahmemöglichkeit baugleich mit den anderen Trockenlagerkannen. Über Steckkupplungen können die Kannen fernbedient an einen Gaskreislauf angeschlossen werden. Zur Messung wird ein Gasaliquot entnommen und darin die Kr 85- und H 3-Aktivität ermittelt.

Es kann angenommen werden, daß die in diesen Ventilkannen ermittelten Gasaktivitäten repräsentativ für die AVR-TL-Kannen sind.

Beladen wurde die eine Ventilkanne mit hochabgebrannten AVR-GO-BE, die andere mit entsprechenden AVR-GK-BE. Über die Ergebnisse an den GO-BE wird im weiteren berichtet; die Messungen an den GK-BE laufen noch. Die Brennelemente hatten bereits eine 4-jährige Lagerzeit in AVR-Kannen zu je 50 Stück im Wasserbecken der HZ hinter sich, bevor sie in die Ventilkanne umgeladen wurden. Die Temperaturen waren in beiden Lagerphasen etwa gleich und lagen bei 25 bis 32°C.



Abb. 18: AVR-TL-Ventilkanne mit aufgesteckten Gasleitungen

Die während der 4-jährigen Lagerzeit freigesetzte Kr 85- und H 3-Aktivität wurde gemessen, indem der Verschlußstopfen der 50 BE AVR-Kannen in eine übergestülpte Gasglocke gezogen wurde, die über eine Spülleitung mit einem Detektorsystem verbunden war. Die aus der geöffneten Kanne entweichende Aktivität wurde registriert und kann somit bei der Ermittlung der Gesamtfreisetzung aus den BE berücksichtigt werden /5/.

Aus Ventilkanne I mit AVR-GO-BE wurden im Jahre 1983 mehrere Gasproben entnommen, so daß die Zunahme der Aktivitätskonzentration über den Zeitraum eines Jahres verfolgt werden kann. Abb. 19 zeigt die zu dem jeweiligen Meßzeitpunkt ermittelte Aktivität im Leervolumen der Kanne. Während Kr 85 einen nahezu konstanten Konzentrationsanstieg zeigt, wird nach etwa 6 Monaten für H 3 keine weitere Aktivitätszunahme im Gas beobachtet, was auf ein Erreichen des Desorptions-Adsorptions-Gleichgewichts innerhalb der Kanne hindeutet, zumal festgestellt wurde, daß das H 3 zum überwiegenden Teil als HTO vorliegt.

Die Gesamtfreisetzung der BE während ihrer Lagerzeit ergibt sich, wenn der in der AVR-TL-Kanne gemessene Anteil addiert wird zu dem Anteil, den die BE während ihrer 4-jährigen Lagerzeit in den AVR-Kannen mit je 50 BE freigesetzt haben. Die Addition der Anteile dürfte für Kr 85 statthaft sein, weil angenommen werden kann, daß die Freisetzung von Kr 85 in beiden Kannentypen unbehindert und gleichartig verlief. Beachtet werden muß, daß bei den Freisetzungsmessungen an den geöffneten AVR-Kannen der während der Meßzeit von den BE-Oberflächen desorbierte Anteil Kr 85 zusätzlich zu dem in der Gasphase befindlichen Teil erfaßt wurde.

Um eine Abschätzung des vom Matrixgraphit desorbierten Anteils zu ermöglichen, wurde die Kr 85-Aufnahme eines unbestrahlten AVR-GO-BE in einem geschlossenen Behälter bei Raumtemperatur gemessen. Das Verteilungsverhältnis für Kr 85 in 1 cm^3 Gas und 1 cm^3 Matrixgraphit betrug dabei 4 : 1.

FREISETZUNG AUS GEÖFFNETEN AVR-KANNEN NACH 4 JAHREN LAGERZEIT
(18 KANNEN MIT JE 50 BRENNELEMENTEN, 900 AVR-GO-BE GESAMT)

	NACH ÖFFNEN INSGESAMT FREI GESETZT:	WÄHREND MESSUNG VON BE-MATRIXGRAFIT DESORBIERT	VERTEILUNGS- VERHÄLTNIS	AUS GASPHASE FREI GESETZT
KR-85	$18 \times 6 \cdot 10^{-5} \text{Ci} = 1.1 \cdot 10^{-3} \text{Ci}$	$2.8 \cdot 10^{-4} \text{Ci}$	1 : 3	$8.2 \cdot 10^{-4} \text{Ci}$
TRITIUM	$18 \times 1 \cdot 10^{-3} \text{Ci} = 1.8 \cdot 10^{-2} \text{Ci}$	$1.7 \cdot 10^{-2} \text{Ci}$	50 : 1	$3.6 \cdot 10^{-4} \text{Ci}$

IN GESCHLOSSENER AVR-TL-KANNE NACH 1 JAHR VORHANDENE AKTIVITÄT (FREI GESETZT AUS 900 AVR-GO-BE)

	AN BE-MATRIXGRAFIT GEBUNDEN	IM GASRAUM
KR-85	$5.3 \cdot 10^{-5} \text{Ci}$	$1.6 \cdot 10^{-4} \text{Ci}$
TRITIUM	$1.5 \cdot 10^{-2} \text{Ci}$	$3.0 \cdot 10^{-4} \text{Ci}$

Tabelle 14:

Bilanz der gasförmigen Aktivität, die an BE-Oberflächen (Matrixgraphit) gebunden ist bzw. im Leervolumen von 50 BE-AVR-Kannen und AVR-TL-Kanne ermittelt wurde. Gemessene Werte sind eingerahmt, alle anderen Werte wurden berechnet.

Für bestrahlte, leicht korrodierte Brennelemente mit erhöhter BET-Oberfläche wird ein etwas höheres Adsorptionsvermögen angenommen, so daß im weiteren mit einem Verteilungsverhältnis von 3 : 1 gerechnet wird. Das heißt, der desorbierbare Anteil aus dem Matrixgraphit trägt mit 25 % zu der Freisetzung bei, wenn gleiche Volumina von Gas und Matrix betrachtet werden.

Für Tritium in der Form von HTO ist der an den BE-Oberflächen adsorbierte Anteil wesentlich größer als der Anteil in der Gasphase. Messungen der Feuchteaufnahme von BE bei Lagerung an feuchter Luft zeigen, daß zwischen 20 und 40 mg H₂O adsorbiert wird, wobei die absolute Luftfeuchte 7 bis 10 g H₂O/m³ Luft betrug. Die Feuchteaufnahme steigt mit zunehmendem Korrosionsgrad der BE, so daß für hochabgebrannte AVR-BE mit einem Korrosionsgrad von 0.3 % ein Verteilungsverhältnis für H₂O über Matrixgraphit von 1 : 50 angenommen wird.

In Analogie zu der Feuchtemessung kann gefolgert werden, daß das 50-fache der Aktivität des in der Kannengasatmosphäre vorhandenen Tritiums von dem volumengleichen Matrixmaterial adsorbiert ist. Beim Öffnen dieser Kannen wird das Desorptions-Adsorptions-Gleichgewicht durch das Ausströmen von Tritium stark gestört; es wird zusätzlich Tritium von den BE-Oberflächen desorbiert, was dann zu einem wesentlichen Teil die Gesamtfreisetzung ausmacht.

Bei der Messung der Tritium-Konzentration in der Ventilkanne wird dagegen von 100 l Gasvolumen lediglich ein Aliquot von 0,3 l entnommen, so daß das Desorptions-Adsorptions-Gleichgewicht nicht gestört wird und nur der Aktivitätsanteil in der Gasphase erfaßt wird.

In Tab. 14 wurde die beim Öffnen von 18 AVR-Kannen (je 50 BE Inhalt) freigesetzte Aktivität gemäß den vorangegangenen Überlegungen aufgeteilt in einen Anteil, der sich während der 4-jährigen Lagerzeit in der Gasphase aufgebaut hat und einen Anteil, der nach Öffnen von den BE-Ober-

flächen desorbieren konnte. Da sowohl in den AVR-Kannen mit 50 BE als auch in der AVR-TL-Kanne mit 900 BE das BE-Volumen etwa gleich groß ist wie das Gasleervolumen, können die Verteilungsverhältnisse für Kr 85 und Tritium in Matrix und Gasphase ohne Volumenkorrektur übernommen werden.

Die an den AVR-Kannen gewonnenen Ergebnisse werden den Meßergebnissen gegenübergestellt, die an den gleichen BE nach Umfüllen in die AVR-TL-Ventilkanne im Laufe eines weiteren Jahres gewonnen wurden:

Ein Vergleich der für Kr 85 ermittelten Werte zeigt, daß sich die Aktivitäten in der Gasphase der AVR-TL-Ventilkanne und in den 18 AVR-Kannen etwa wie die Lagerzeiten der BE in diesen Kannen verhalten. Dieser Sachverhalt ist bei Annahme einer konstanten Freisetzungsrates zu erwarten.

Für Tritium wurden nach 4 bzw. 1 Jahr Lagerzeit nahezu gleiche Aktivitäten ermittelt, wobei H 3 zu über 99 % als HTO vorlag. Wie die Freisetzung von Tritium verläuft, ist noch nicht völlig geklärt. Insbesondere muß die Bindung an das Matrixmaterial noch untersucht werden. Es wird vermutet, daß nur ein Bruchteil des Tritium-Inventars bei niedriger Temperatur freisetzbar ist.

Bei der Ermittlung von Gasaktivitäten in BE-Kannen, die längere Zeit verschlossen gelagert werden, müssen die Aktivitätsabnahme durch radioaktiven Zerfall und die durch Leckage betrachtet werden. Geht man von der AVR-TL-Kannenspezifikation aus, in der als obere Grenze für die Leckrate $1 \cdot 10^{-4}$ mbar·l/s für He angegeben wird, so würde bei Annahme molekularer Strömung durch das Leck Kr 85 mit einer Leckrate von $2 \cdot 10^{-5}$ mbar·l/s und HTO mit einer Leckrate von $5 \cdot 10^{-5}$ mbar·l/s austreten.

Das bedeutet, daß pro Jahr 0,6 % der im Gas vorhandenen Kr 85-Aktivität aus der Kanne freigesetzt würde und 1,4 % HTO.

Die Kr 85- und Tritium-Aktivität nimmt aber um 6 % / Jahr durch Zerfall ab (die Halbwertzeiten sind ähnlich (Kr 85/10.8 a; Tritium/12.3 a)). Die Aktivitätsabnahme durch Zerfall ist damit wesentlich größer als durch Leckage.

3.2.2 Freisetzung aus den Kannen in den Behälter

Gasförmige Aktivität im Leervolumen der Behälter kann nur auftreten, wenn die Lagerkannen nicht vollkommen dicht verschlossen sind oder Tritium durch Permeation die Kannen verläßt. Um die Freisetzung aus den Kannen quantifizieren zu können, wurden die Lagerbehälter mit je zwei Spülröhrchen versehen, durch die dem Behältervolumen (150 l) Gasproben entnommen werden können.

In Abb. 20 ist der schematische Aufbau der Gasentnahme- und Meßapparatur dargestellt. Abb. 21 zeigt die Gasentnahmeapparatur.

Zur Gasentnahme wird ein mit dem Behälter verbundener Spülkreislauf eingeschaltet, wobei eine Pumpe das Behältergas über ein Filter und einen Probenentnahmebehälter mit 100 l/h umwälzt. Der Probenentnahmebehälter wird nach 2 Stunden Umwälzzeit abgenommen und an eine Gasmeßapparatur angeschlossen, wo das Gas auf seinen Kr 85- und H 3-Gehalt analysiert wird. Als Detektor wird dabei ein großvolumiges 3 Kammer- Proportionalzählrohr verwendet.

Da die aliquotierte Gasmenge 300 cm^3 von 150 l Behälterleervolumengas beträgt und die Mindestaktivität im Probenentnahmezylinder $1 \cdot 10^{-10} \text{ Ci}$ für H 3 und Kr. 85 betragen sollte, um eine zuverlässige Messung zu erhalten, liegt die unterste nachweisbare Aktivität im Behälterleervolumen etwa bei $5 \cdot 10^{-8} \text{ Ci}$.

Erste Messungen und Ergebnisse

Die erste Gasmessung an den Behältern wurde am 5. 1. 1983 durchgeführt. Bei dieser Messung wurde die Gasentnahmeapparatur ohne zwischengeschaltetes Filter benutzt. Offensichtlich wurde bei mit festen Spaltprodukten kontaminierter Graphitstaub, der vom Beladevorgang her auf der Kannenoberflächen haftete, in die Meßapparatur gespült.

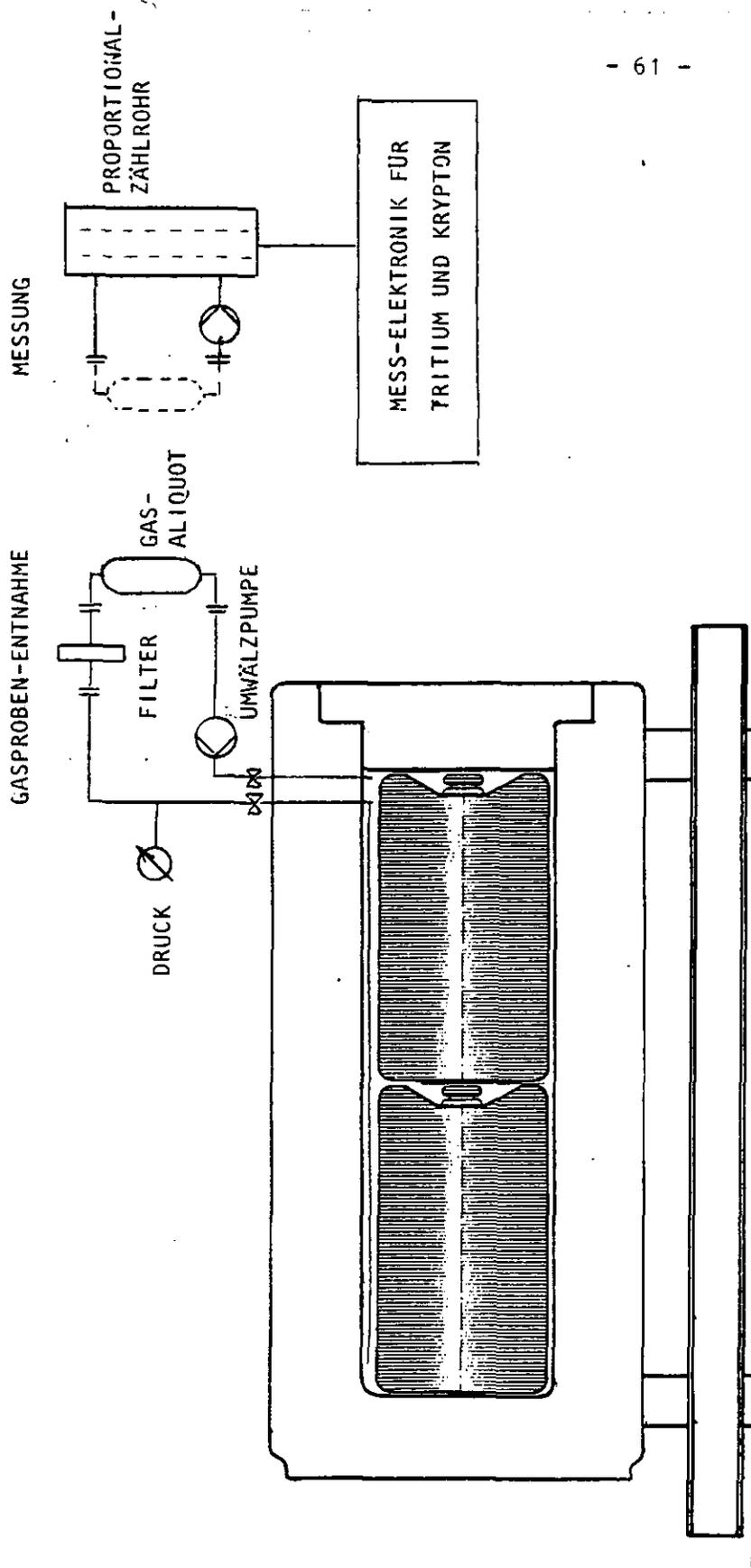


ABB. 20: MESSAPPARATUR ZUR BESTIMMUNG DER TRITIUM- UND KRYPTONAKTIVITÄT IM LEERVOLUMEN DES GUSS-LAGERBEHÄLTERS

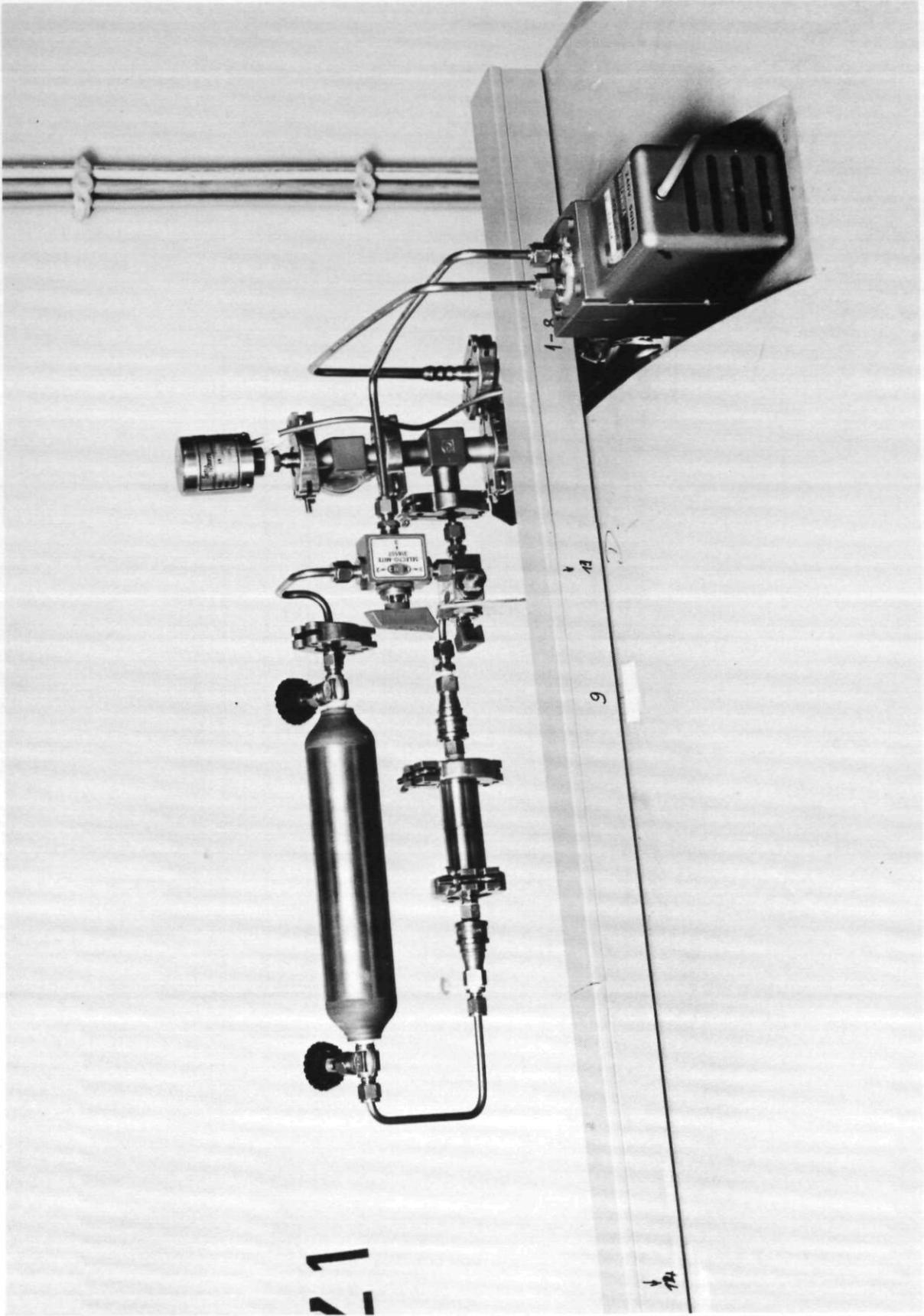


Abb. 21: Gasentnahme-Apparatur

Die Messung mit dem Proportionalzählrohr ergab einen für H 3-Messungen völlig atypischen Zeitverlauf, was auf den Einfluß von kontaminiertem Staub schließen ließ.

Diese Art Meßstörung trat bei beiden Lagerbehältern auf, sehr stark beim TN-AVR 2. Die Gasentnahme wurde umgehend wiederholt, diesmal mit zwischengeschaltetem Papierfilter. Eine gammaspektrometrische Analyse des Filterpapiers ergab Spuren von Cs 137 und Cs 134 im Bereich von $\sim 1 \cdot 10^{-10}$ Ci. Es kann angenommen werden, daß außerdem Sr 90 als Kontamination vorhanden ist.

Die Messung mit dem Proportionalzählrohr zeigte mit Filter einen ungestörten Zeitverlauf, was auf die Wirksamkeit des Filters schließen läßt. Im monatlichen Abstand wurden weitere Messungen in gleicher Art durchgeführt; die Ergebnisse sind in Tab. 15 zusammengestellt.

Bei der Zwischenlagerung im AVR-Trockenlager wurde durch ein dort installiertes Detektorsystem für Kanne 2 eine erhöhte Leckrate festgestellt. Dementsprechend ist die im Behältervolumen des TN-AVR 2 gemessene erhöhte Gasaktivität verständlich. Die Gasaktivität im GNS-CASTOR-AVR-Behälter lag bei Meßbeginn unter der Nachweisgrenze.

Die Kr 85-Aktivität stieg seit der ersten Messung im Januar 1983 nicht meßbar weiter an, die Schwankung der Meßwerte ist meßtechnisch bedingt.

Da bis Juni 1983 keine signifikante Änderung der Aktivitätskonzentration in den Behältern beobachtet wurde, wurden beide Behälter noch einmal mit Raumluft sauber gespült, um die Messungen auf Reproduzierbarkeit zu prüfen. Insbesondere sollte ermittelt werden, ob die Kanne 2 im TN-AVR 2-Behälter z.B. durch Transporterschütterung einen einmaligen Freisetzungstoß in das Leervolumen abgegeben hatte, jetzt aber wieder dicht war, so daß die konstant bleibende Aktivitätskonzentration verständlich wird.

	TN-AVR 2	CASTOR-AVR	TN-AVR 2	CASTOR-AVR
	Krypton 85 / Behälter (Ci / 150 l)		Tritium / Behälter (Ci / 150 l)	
5. 1. 83	$5,6 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$
21. 2. 83	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$
9. 3. 83	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$
12. 4. 83	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$
10. 5. 83	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$
19. 6. 83	$5,4 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$
20. 7. 83	beide Behälter mit Luft leerespült			
8. 9. 83	$6,0 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$(3,5 \cdot 10^{-7})^*$
18. 10. 83	-	-	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$
10. 11. 83	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$5,7 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$
19. 12. 83	$1,4 \cdot 10^{-7}$	-	$(1,1 \cdot 10^{-6})$	-
24. 1. 84	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$5,8 \cdot 10^{-8}$	$(1,2 \cdot 10^{-6})$	$7,1 \cdot 10^{-7}$
8. 3. 84	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$7,2 \cdot 10^{-7}$

* Eingeklammerte Werte sind aufgrund apparativer Schwierigkeiten unsicher.

Tabelle 15:
gemessene Gasaktivität im Leervolumen der Gußbehälter

Die erste Messung nach dem Leerspülen wurde im August 1983 durchgeführt, weitere Messungen bis März 1984 wurden berücksichtigt.

Wie aus Abb. 22 zu entnehmen, wird seitdem ein deutliches Ansteigen der H 3-Konzentration beobachtet und zwar im gleichen Maß für beide Behälter. Es kann vermutet werden, daß H 3-Freisetzung durch Kannendichtungsmaterial Ursache für die beobachtete Freisetzung ist.

Das Kr 85 wird im TN-AVR 2 stärker freigesetzt als im CASTOR-GNS; unerklärlich ist, warum dieses Verhalten nicht in den ersten 5 Monaten beobachtet wurde. Insgesamt liegt die Aktivitätskonzentration bisher bei etwa 1 μ Ci im Behältervolumen, was bei einem Kr 85-Inventar von 550 Ci und einem H 3-Inventar von 100 Ci pro Behälter im Hinblick auf sicherheitstechnische Belange eine unbedeutende Menge darstellt.

3.2.3 Freisetzung aus dem Behälter nach außen

Für die Gußlagerbehälter ist eine Heliumleckrate von $\leq 1 \cdot 10^{-7}$ mbar l/s spezifiziert.

Für Kr 85 würde dies bei Annahme molekularer Strömung einer Leckrate von $2 \cdot 10^{-8}$ mbar l/s und für H 3 in Form von HTO einer Leckrate von $5 \cdot 10^{-8}$ mbar l/s entsprechen. Aufgrund der relativ geringen Aktivität im Behälterinneren (etwa 1 μ Ci) kann eine Freisetzung aus den Behältern nicht nachgewiesen werden. Aus diesem Grund wurde versucht, mit den in 3.2.1 und 3.2.2 ermittelten Meßwerten und spezifizierten Behälterdaten die Freisetzung von Kr 85 und H 3 aus den Lagerbehältern abzuschätzen.

In Tab. 16 sind die Formeln für Kr 85 und HTO zusammengestellt, mit denen die Zeitabhängigkeit der Freisetzung aus Kanne und Behälter berechnet wurden. Bei den Lösungen der Differentialgleichungen wurde vereinfachenderweise die Aktivitätsabnahme durch Leckage gegenüber der Abnahme durch Zerfall vernachlässigt, was im vorliegenden Fall zu keiner wesentlichen Ergebnisverfälschung führt.

AKTIVITÄT IM LEERVOLUMEN (CURIE)

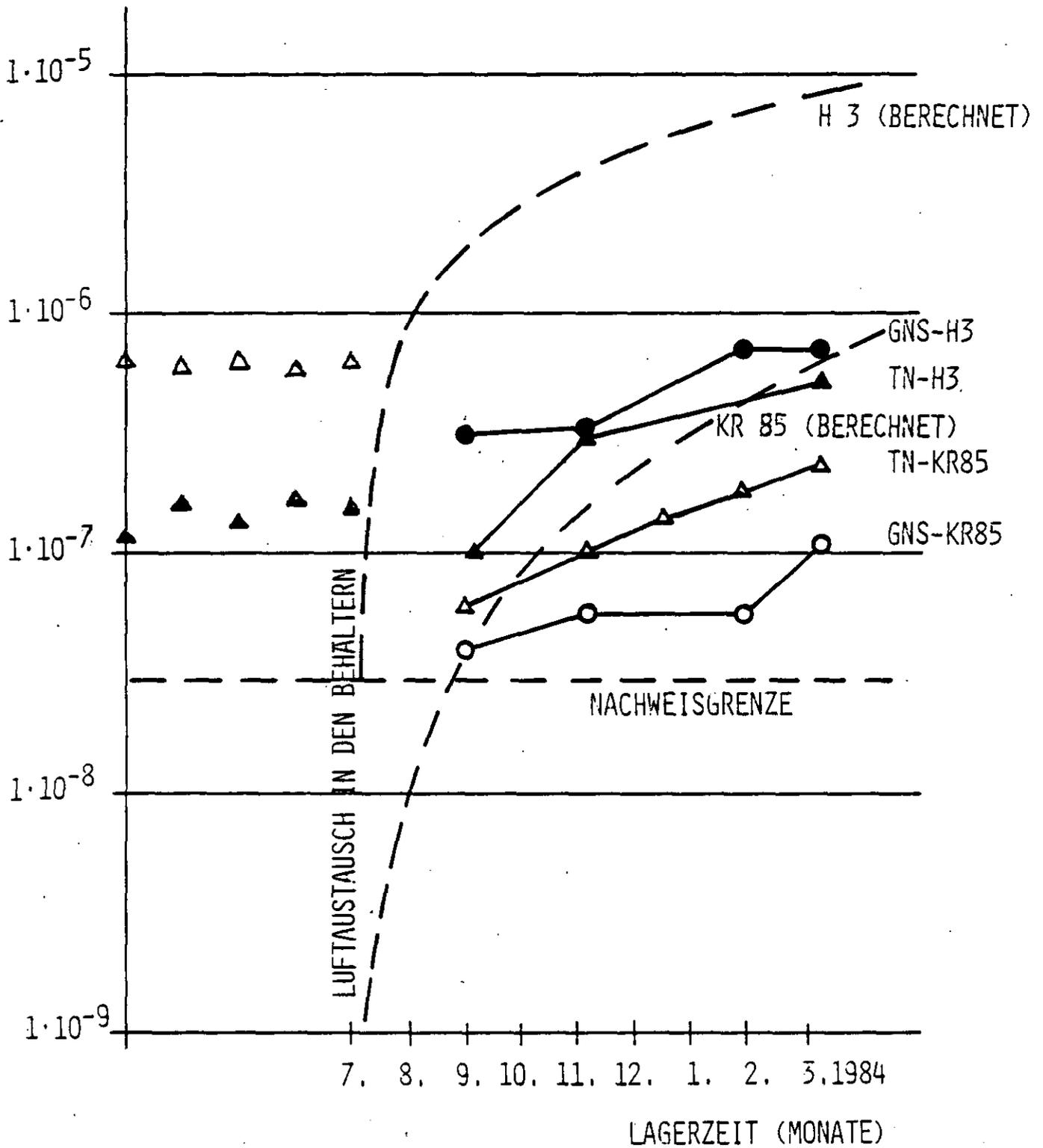


Abb. 22: Gasaktivität im Leervolumen des Gußbehälters

in Kanne

$$\frac{dN_K}{dt} = F_0 \cdot e^{-\lambda t} - N_K(\lambda + L_K)$$

$$N_K(t) = F_0 \cdot t \cdot e^{-\lambda t}$$

$$\frac{dN_K}{dt} = -N_K(\lambda + L_K)$$

$$N_K(t) = N_{K0} \cdot e^{-\lambda t}$$

in Behälter

$$\frac{dN_B}{dt} = N_K(t) \cdot L_K - N_B(\lambda + L_B)$$

$$N_B(t) = \frac{L_K \cdot F_0 \cdot t^2}{2} \cdot e^{-\lambda t}$$

$$\frac{dN_B}{dt} = N_K(t) \cdot L_K - N_B(\lambda + L_B)$$

$$N_B(t) = L_K \cdot N_{K0} \cdot t \cdot e^{-\lambda t}$$

aus Behälter

$$\frac{dN_L}{dt} = N_B(t) \cdot L_B - N_L \lambda$$

$$N_L(t) = \frac{L_K \cdot L_B \cdot F_0 \cdot t^3}{6} \cdot e^{-\lambda t}$$

$$\frac{dN_L}{dt} = N_B(t) \cdot L_B - N_L \lambda$$

$$N_L(t) = \frac{L_K \cdot L_B \cdot N_{K0} \cdot t^2}{2} \cdot e^{-\lambda t}$$

mit N_K = Gasatome im Kannenleervolumen

F_0 = Kr 85-Freisetzungsrate bei Lagerbeginn (Messwert entnommen aus Abb. 13)

N_{K0} = HTO-Atome im Kannenleervolumen bei Lagerbeginn (Messwert siehe Abb. 13)

N_B = Gasatome im Behälterleervolumen

N_L = Gasatome ausserhalb des Behälters

L_K = Leckrate - Kanne (für He - $1 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mbar}}{\text{s}}$)

L_B = Leckrate - Behälter (für He - $1 \cdot 10^{-7} \frac{\text{mbar}}{\text{s}}$)

In Abb. 23 und 24 sind die Zeitverläufe für Kr 85 und H 3 dargestellt. Für Kr 85 wird in den beiden TL-Kannen die maximale Aktivität im Leervolumen nach 15 Lagerjahren erreicht; sie beträgt dann $\sim 1,5$ mCi. Durch Leckage tritt ein Teil dieser Aktivität in das Leervolumen des Behälters und baut sich hier im Lauf von 30 Jahren bis zu einer Aktivität von $2 \cdot 10^{-4}$ Ci auf, vom Behälterleervolumen wiederum erfolgt die Freisetzung in die Umgebung; diese beträgt nach 50 Jahren maximal $1 \cdot 10^{-8}$ Ci.

Für H 3 in Form von HTO ergibt sich ein ähnliches Verhalten. Ausgehend von der Annahme, daß die HTO-Konzentration im Leervolumen der AVR-TL-Lagerkanne nach Einstellen des Desorptions-Adsorptions-Gleichgewichts nicht weiter steigt, sondern nur noch durch Zerfall und Leckage abgebaut wird, baut sich im Behälterleervolumen in 15 Jahren die Aktivität bis auf $8 \cdot 10^{-5}$ Ci auf. Da der Behälter 2 Kannen enthält, liegt die Aktivität im Behältervolumen nach 30 Jahren in Abb. 24 über der in einer Kanne. Die Freisetzung aus dem Behälter liegt bei $1 \cdot 10^{-8}$ Ci (zufällig gleicher Wert wie Kr 85) und wird nach ca. 30 Jahren erreicht.

Ein Vergleich der berechneten Werte für die Aktivität im Leervolumen der Behälter mit den gemessenen (Abb. 22) zeigt, daß durch die Rechnung um den Faktor 10 höhere Werte erzielt werden. Da mit den jeweils maximal zulässigen Leckraten für die Kannenverschlüsse gerechnet wurde, ist dieses Ergebnis verständlich. Es kann davon ausgegangen werden, daß die Leckrate der Kannendichtungen im Bereich von $1 \cdot 10^{-5}$ mbar l/s liegt.

KR 85-AKTIVITÄTSFREISETZUNG

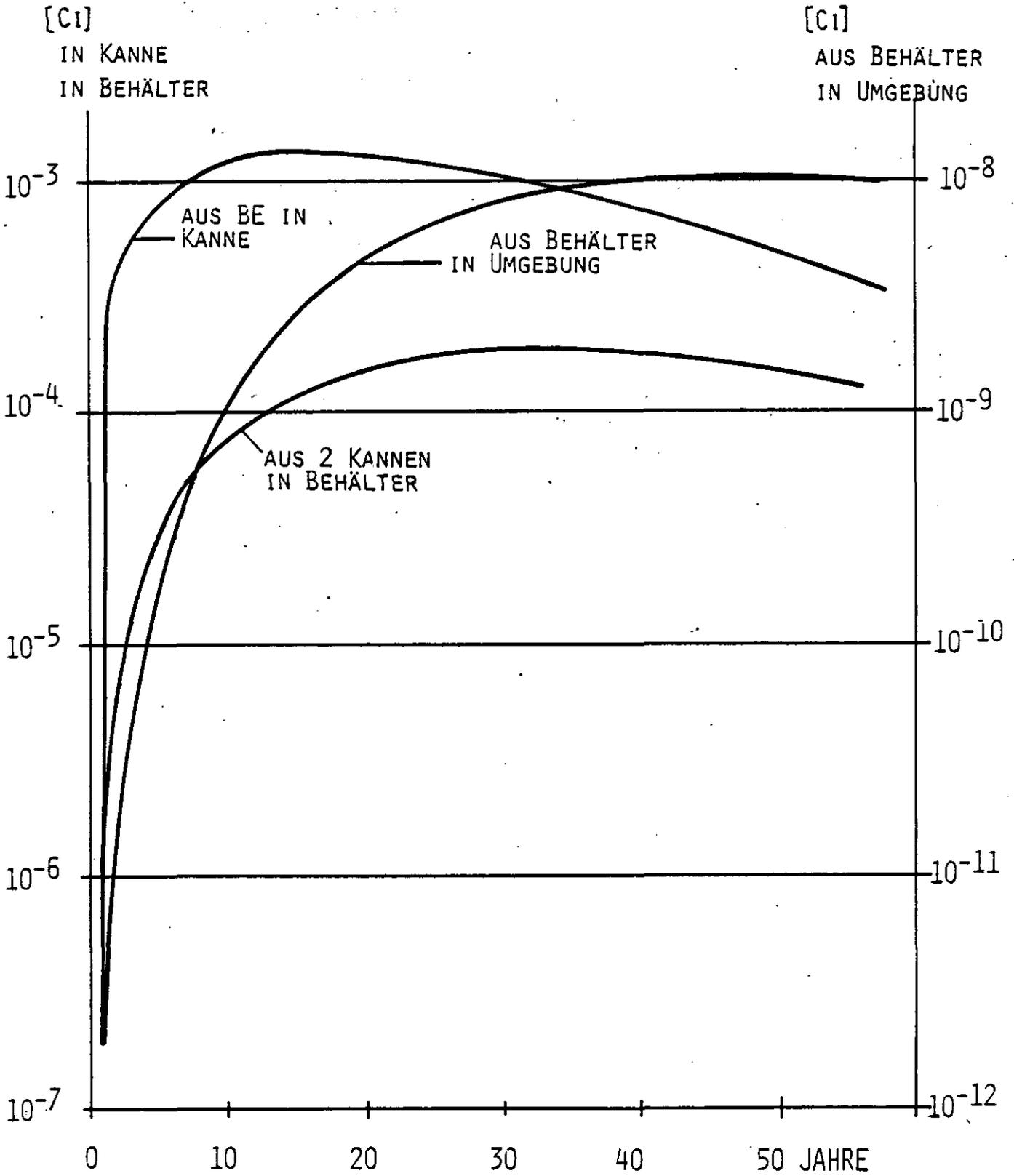


Abb. 23: Zeitverlauf der Freisetzung Kr 85
gerechnet für eine Kannenoberflächentemperatur von 25°C

HTO- AKTIVITÄTSFREISETZUNG

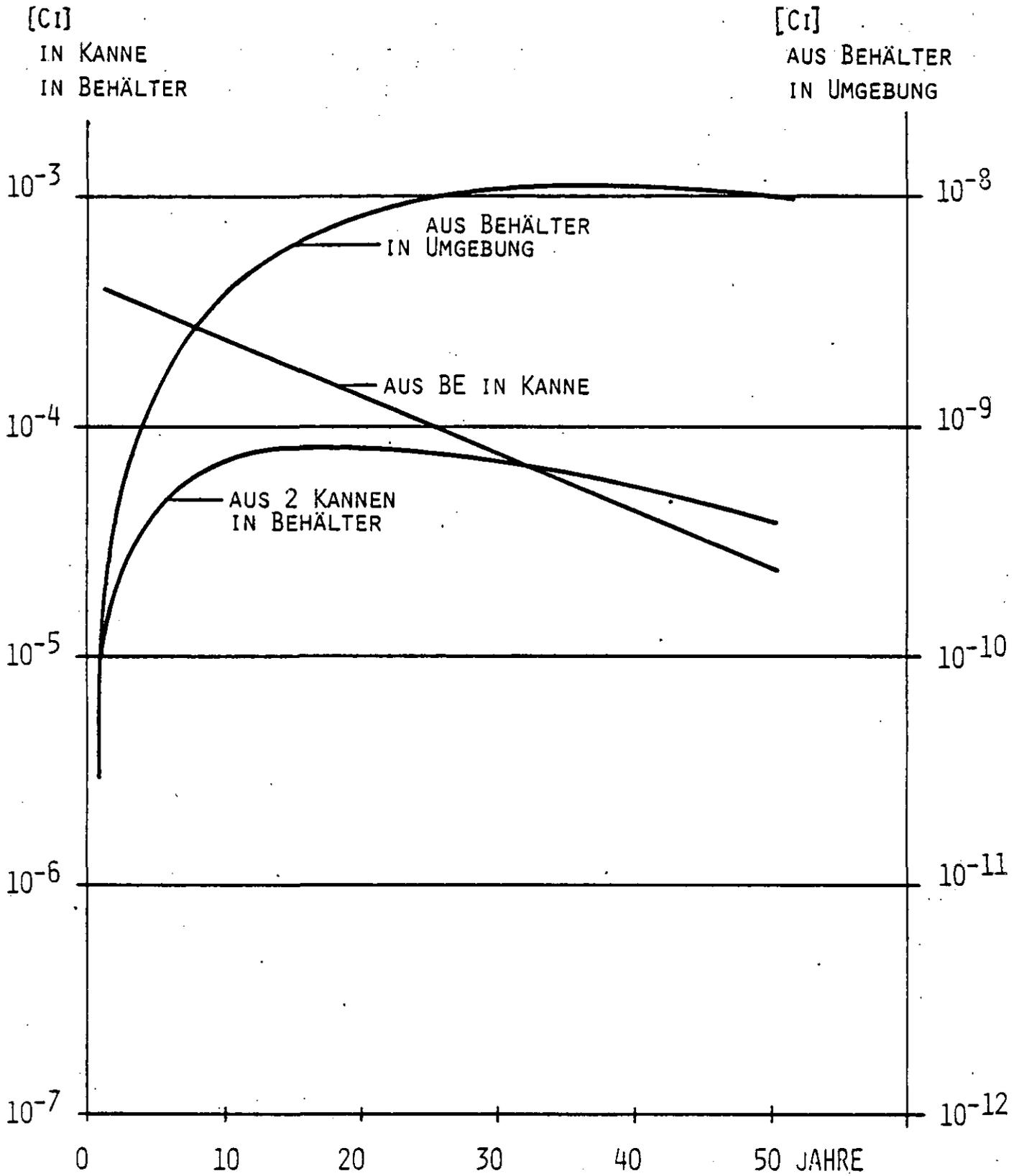


Abb. 24: Zeitverlauf der Freisetzung Tritium
gerechnet für eine Kannenoberflächentemperatur von 25°C

3.3 Gamma-Dosisleistung außerhalb der Behälter

Für die Messung der Gamma-Dosisleistung wurde ein geeichtes Meßgerät der Firma Berthold (LB 1310) verwendet.

Die Werte wurden zum einen entlang der seitlichen Mantellinie der liegenden Behälter ermittelt, wobei die Meßsonde direkt an die Behälteroberfläche angelegt wurde.

In Abb. 25 ist die Dosisleistung in mR/h über der entsprechenden Meßposition aufgetragen.

Es zeigt sich, daß der TN-AVR 2-Behälter aufgrund einer um 1,5 cm dickeren Wand gegenüber dem GNS-CASTOR-Behälter eine deutlich niedrigere Dosisleistung an der Oberfläche hat. In Tab. 17 sind die Abschirmwerte sowie der daraus resultierenden Absorptionskoeffizienten für Sphäroguß aufgeführt.

Der Abschirmfaktor ist dabei der Quotient aus der ohne und mit Abschirmung gemessenen Dosisleistung (\dot{D}_0 , \dot{D}_m), wobei die Dosisleistung ohne Abschirmung in 30 cm Abstand von der AVR-TL-Kanne etwa 2000 R/h beträgt. Der Absorptionskoeffizient μ [cm^{-1}] wurde laut Gleichung $\dot{D}_m = \dot{D}_0 e^{-\mu l}$ berechnet, wobei l die Wandstärke in cm ist.

Es muß darauf hingewiesen werden, daß der angegebene Absorptionskoeffizient nur für das spezielle Gammaspektrum einer HTR-Trockenlagerkanne gilt.

Die Maximalwerte an der Außenfläche treten an der Unterseite des Behälters auf, weil die Kannen hier direkt an der Wand anliegen. Bis zu 14 mR/h wurden gemessen.

Bei einem Kannendurchmesser von 559 mm und einem Behälterinnendurchmesser von 630 mm beträgt der Abstand zwischen Kanne und oberer Behälterinnenfläche 71 mm (TN) bzw. zur Seite 35 mm.

DOSISLEISTUNG (MILLIRÖNTGEN/STUNDE)

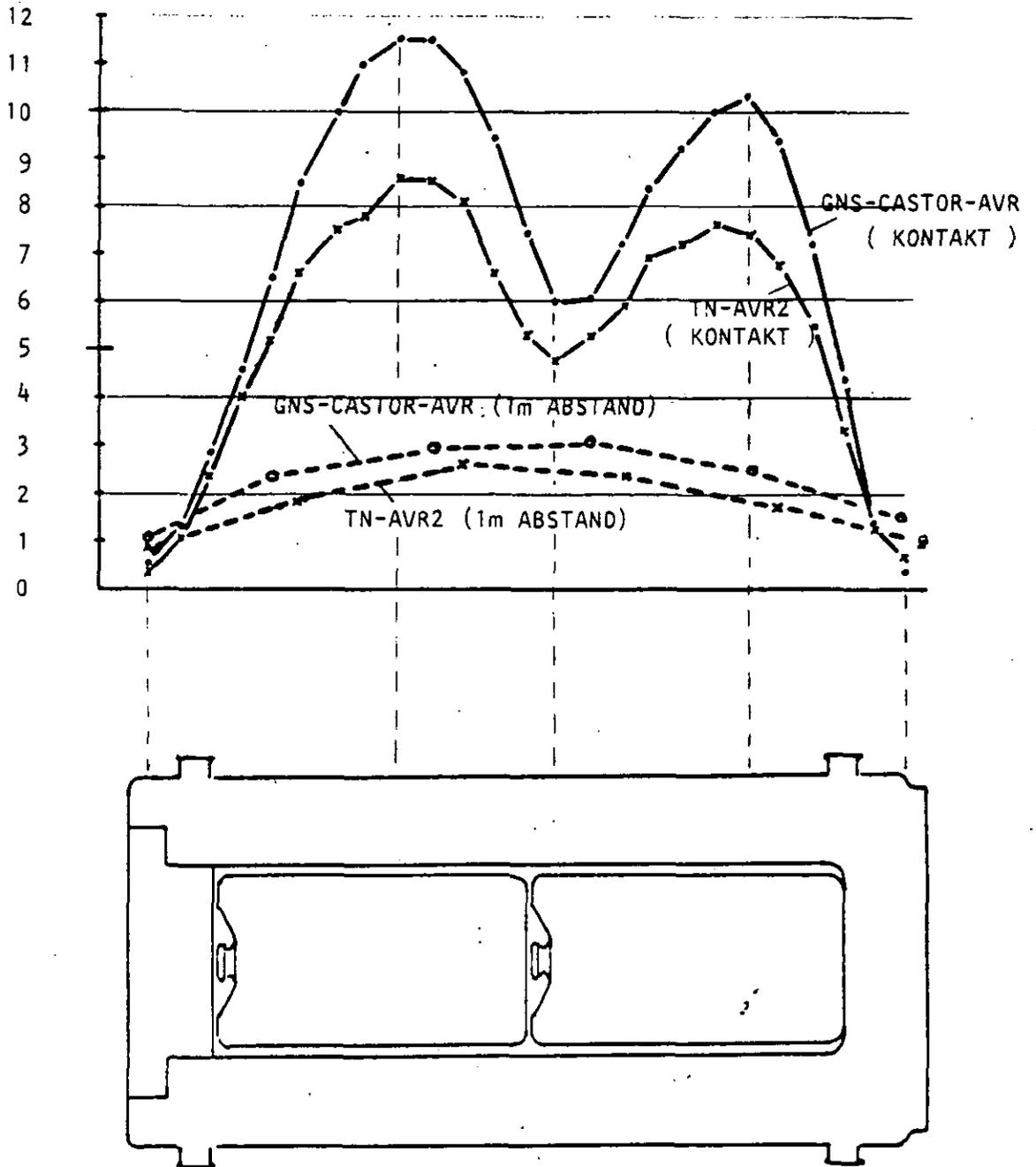


Abb. 25: - DOSISLEISTUNGSVERLAUF ENTLANG DER BEHÄLTERSEITEN
Messung nach 14 Monaten Abklingzeit

	max. Dosisleistung an Behälteroberfläche		Wandstärke	Abschirmfaktor	Absorptionskoeffizient
	ohne Abschirmung	mit Abschirmung			
TN-AVR 2	2000 R/h	9,2 mR/h	31,5 cm	$2,17 \cdot 10^5$	0,390
GNS-CASTOR	2000 R/h	14,5 mR/h	30,0 cm	$1,38 \cdot 10^5$	0,395

Tabelle 17:

gemessene Dosisleistungen an den Behältern

Aus Messungen an AVR-TL-Kannen (siehe Abb. 9) kann entnommen werden, daß die Dosisleistung bei einem um 35 mm vergrößerten Abstand von der Kannenoberfläche um etwa 20 % abfällt. Unter dieser Voraussetzung beträgt die max. Dosisleistung an der seitlichen Innenfläche des TN-AVR 2 etwa 6080 R/h, beim GNS-CASTOR 6000 R/h, also 20 % weniger als an der Unterseite. Die in Abb. 25 dargestellten Dosisleistungswerte der seitlichen Oberfläche liegen dementsprechend um den gleichen Betrag niedriger.

Zusätzlich zu den Oberflächenwerten wurde eine Meßreihe in 1 m Abstand zur seitlichen Mantellinie durchgeführt. Es wurden dabei Maximalwerte von 3,0 mR/h (GNS-CASTOR) beziehungsweise 2,6 mR/h (TN-AVR 2) ermittelt.

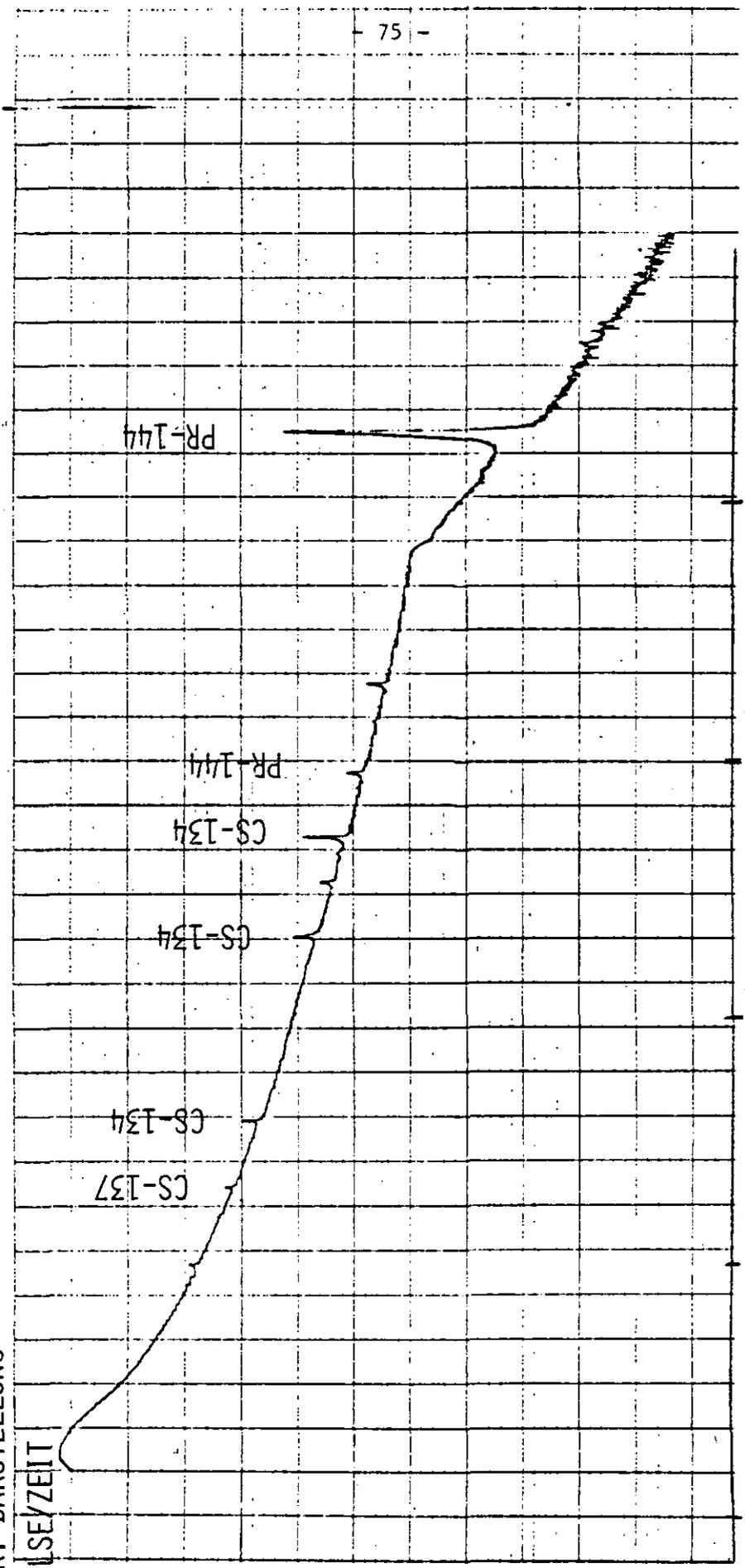
Da das Transportgestell beim GNS-CASTOR für die untere Behälterhälfte eine zusätzliche Abschirmung bildet, wurde bei diesem Behälter die Messung entlang einer oberen Mantellinie durchgeführt und somit eine dem TN-AVR 2 vergleichbare Messung erhalten.

Die Dosisleistung im Deckelbereich der Behälter ergab in 1 m Abstand 1 mR/h für TN-AVR 2 und 2 mR/h für GNS-CASTOR.

Die Messung der Gamma-Dosisleistung wurde im November 1983, also nach 10 Monaten wiederholt. Sie lag etwa 35 % unter den nach der Beladung gemessenen Werten, d.h. die Dosisleistung ist mit einer Halbwertszeit von etwa 450 Tagen abgeklungen. Wie ein im Januar 1983 an der Behälteroberfläche aufgenommenes Gamma-Spektrum zeigt (Abb. 26), stammt die Haupt-Gamma-Aktivität vom Ce 144 mit 289 d und vom Cs 134 mit 2 a Halbwertszeit. Erst nach Abklingen dieser Nuklide kommt Cs 137 mit 30 a Halbwertszeit als Haupt-Gamma-Emitter in Betracht.

LOGAR. DARSTELLUNG

IMPULSE/ZEIT



0.5 1.0 1.5 2.0 MEV ENERGIE

Abb. 26: GAMMA-SPEKTRUM AN DER OBERFLÄCHE EINES GUSSLAGERBEHALTERS MIT 1900 HTR-BE (ABKLINGZ:450 TAGE)

3.4 Neutronen-Dosisleistung

Messungen und Ergebnisse

Ziel der im folgenden beschriebenen Messungen war es, die Neutronendosisleistung und die Neutronenfluenzverteilung entlang einer Mantellinie des Lagerbehälters zu messen. Zusätzlich sollten Werte für den Deckel und Bodenbereich erstellt werden.

Als Meßgerät wurde ein sogenannter "Long-Counter" benutzt, bei dem ein BF_3 -Proportionalzählrohr mit Moderatormaterial zur Messung schneller Neutronen umgeben ist und gegebenenfalls eine Cadmium-Abschirmung für thermische Neutronen benutzt werden kann.

Die Empfindlichkeit betrug 3,3 Impulse/sec für einen Neutronenfluß von $1 \text{ N/cm}^2 \text{ s}$.

Vor dem TN-AVR 2-Behälter wurde ein Gestell mit verfahrbarem Schlitten aufgebaut, so daß der "Long-Counter" entlang der Seitenlinie positioniert und ein "Neutronen-Scan" angefertigt werden konnte.

In Abb. 27 ist der Verlauf des Neutronenflusses entlang des TN-AVR 2-Behälters dargestellt, wobei der "Long-Counter" einen konstanten Abstand von 25 cm zur Behälteroberfläche hatte.

Die Messung zeigt, daß der überwiegende Anteil der Neutronen durch die mit oxidischem Brennstoff beladene AVR-Kanne verursacht wird.

Der im Uran- und Thoriumoxid vorhandene Anteil an O-17 erzeugt durch eine α -n-Reaktion Neutronen, wobei die α -Strahlung vom Zerfall des Pu 238 stammt. Aufgrund fehlenden Sauerstoffs zeigt der carbidische Brennstoff diese Reaktion nicht.

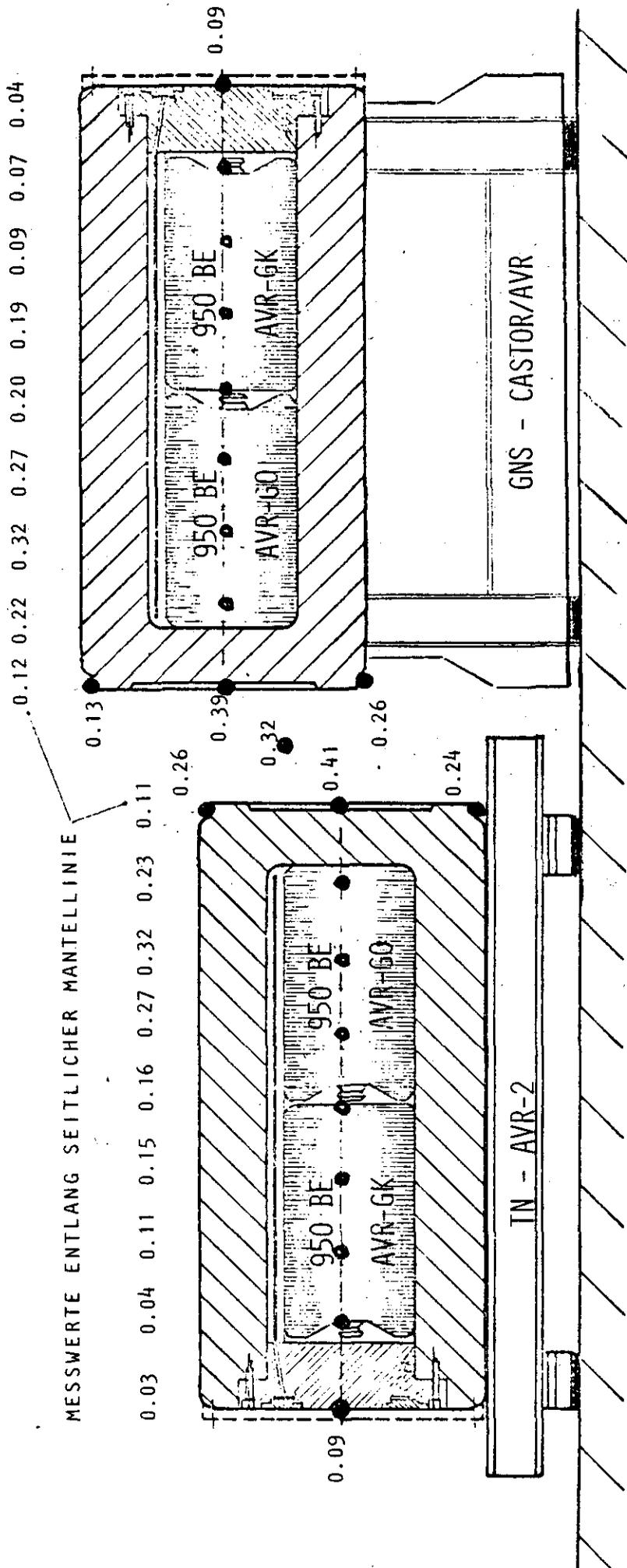


ABB. 27: VERLAUF DER NEUTRONENDOSISLEISTUNG AN DER OBERFLÄCHE VON TRANSPORT-UND LAGERBEHALTER - PROTOTYPEN IN MILLIREM/STUNDE

Um einen Hinweis auf das dabei entstehende Neutronenspektrum an der Oberfläche der Behälter zu bekommen, wurde die Messung mit und ohne Cadmiumabschirmung des Detektors durchgeführt. Es zeigte sich, daß mit Cadmiumabschirmung nur geringfügig weniger gemessen wurde als ohne Cadmium. Dies bedeutet, daß das Spektrum einen geringen Anteil an thermischen Neutronen besitzt, hauptsächlich werden Neutronen höherer Energie emittiert.

Da die Behälter hintereinander mit einem Abstand von 0,5 m aufgestellt sind, wobei die Behälterböden einander zugekehrt sind, findet sicherlich eine gegenseitige Überlappung des Neutronenflusses statt.

Eine Messung bei verändertem Abstand, die im Bereich des höchsten Flusses senkrecht zur seitlichen Mantellinie durchgeführt wurde, zeigte in 2 m Abstand noch 20 % des Oberflächenkontaktwertes (Abb. 28).

Am GNS-CASTOR-AVR-Behälter wurden Stichprobenmessungen mit dem "Long-Counter" durchgeführt, die zu gleichen Ergebnissen wie beim TN-AVR 2-Behälter führten.

In einer weiteren Meßreihe wurde ein sogenannter "REM-Counter" verwendet, bei dem das Neutronenabsorptionsvermögen dem des menschlichen Körpers entspricht.

Dieser Detektor war sehr handlich und eignete sich, außer den Seiten auch Boden und Deckelbereiche der Behälter auszumessen.

In Abb. 29 sind die Dosisleistungswerte in mrem/h an den betreffenden Stellen der Behälteroberflächen angegeben.

Der höchste Wert von 0,4 mrem/h tritt dabei im Bereich der Behälterböden auf, weil hier der Inhalt beider Behälter zum Neutronenfluß beiträgt.

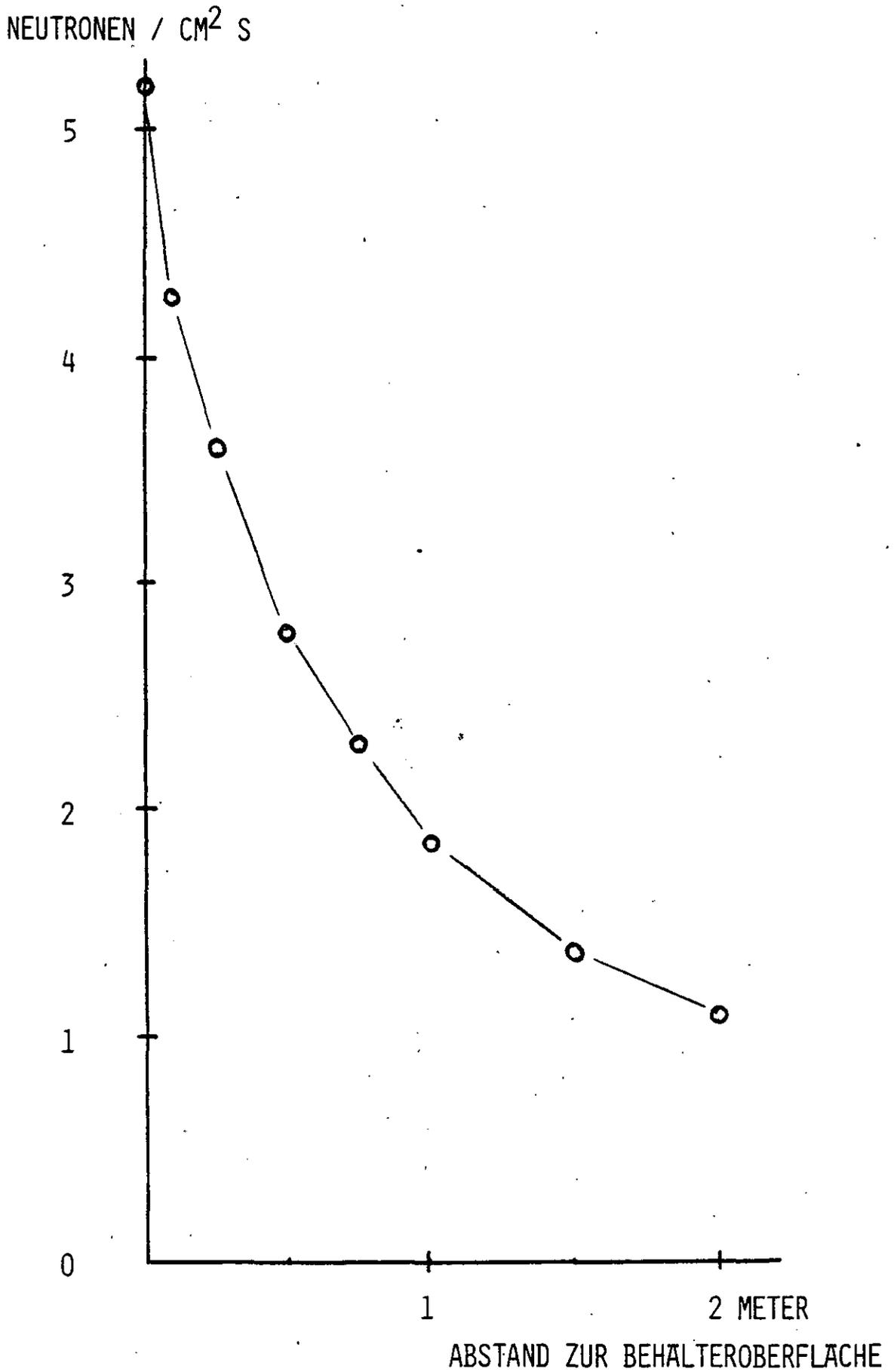


ABB. 28: NEUTRONENFLUSS ALS FUNKTION DES ABSTANDES ZUR BEHÄLTEROBERFLÄCHE

NEUTRONEN/CM² S

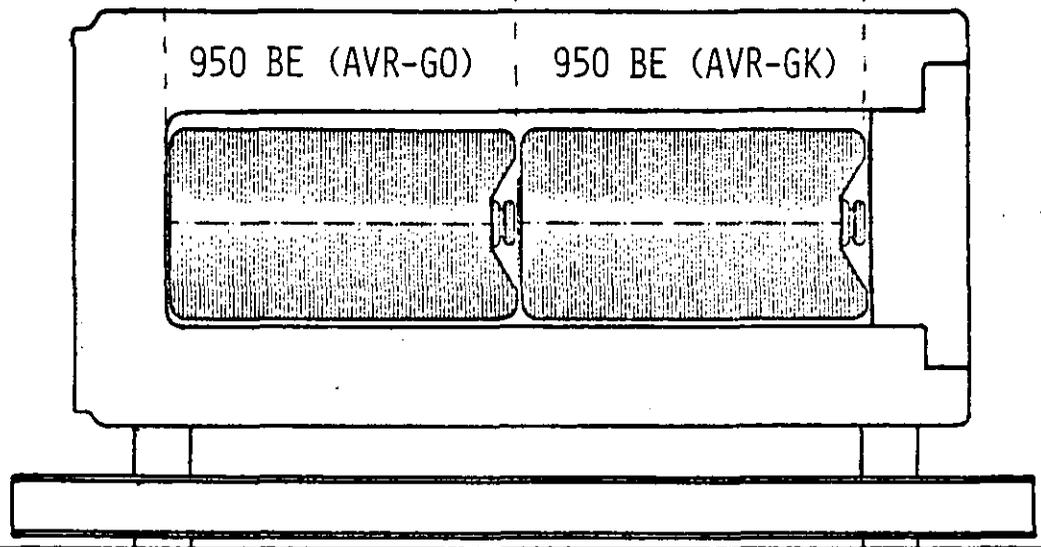
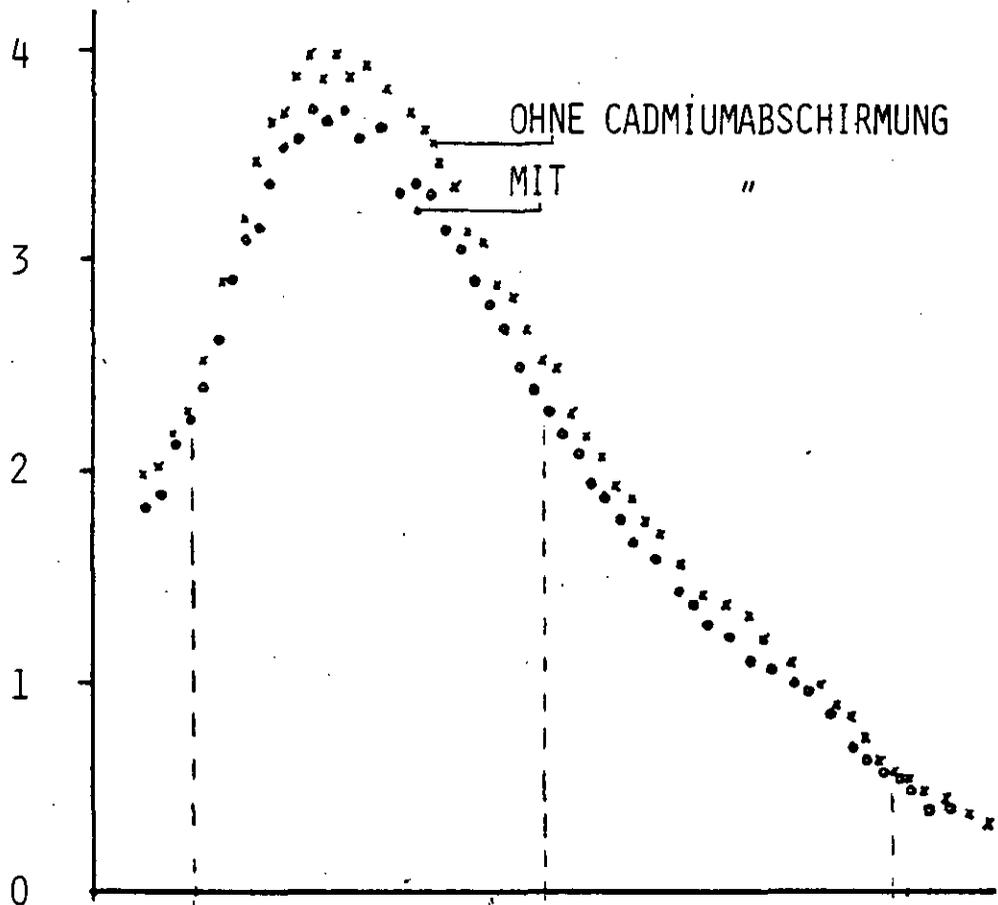


ABB. 29:

VERTEILUNG DES NEUTRONENFLUSSES ENTLANG EINES TRANSPORT- UND LAGERBEHALTER-PROTOTYPEN

Literatur

- /1/ Bericht über das Konzept der trockenen Zwischenlagerung von HTR-Brennelementen
DWK, Oktober 1981
- /2/ V. Maly, R. Wagemann
Daten abgebrannter HTR-Brennelemente
Teil I: Das AVR-Brennelement
AVR, Jülich, August 1977
- /3/ H. Müller
Aktivität, Nachwärmeleistung und Gamma-Anteil der Nachwärmeleistung von AVR-Brennelementen nach langer Kühlzeit
IRW-TN-70/78, Mai 1978
- /4/ R. Engelstädter
Jül-Spez in Vorbereitung
- /5/ R. Duwe, H. Müller
Freisetzung gasförmiger Aktivität aus lagernden AVR-Brennelementen
Jahrestagung Kerntechnik 1981, S. 303, Düsseldorf

An weiteren Unterlagen wurde benutzt:

- IRW-TN-17/83
29.3.83 R. Duwe, R. Engelstädter, W. Kühnlein, H. Müller
Temperaturmessungen an zwei mit bestrahlten HTR-
Brennelementen beladenen Trockenlager-Behältern
- KFA-AP-IB-1/79
Jan 79 R. Engelstädter, H. Klieber, S. Storch
Zwischenlager für abgebrannte AVR-Brennelemente
(AVR-Trockenlager)
- IRW-TN-54/83
16.5.83 R. Duwe, H. Münstermann
Messung der Gasaktivität im Leervolumen beladener
Transport- und Lagerbehälter-Prototypen für HTR-BE
- TÜV-Rheinland T 17.27.2.13
14.1.83 Brock
Prüfbericht
- IRW-TN-145/82
15.12.82 R. Duwe
Dosisleistungsmessungen an 4 AVR-TL-Kannen
- IRW-TN-16/83
25.2.83 R. Duwe, H. Münstermann, F. Hoengen
Dosisleistungsmessung an 2 Trockenlagerbehältern
- IRW-TN-62/83
20.5.83 R. Duwe
Messung der Neutronenstrahlung an einem Lager- und
Transportbehälter für HTR-BE
- IRW-TN-41/78
13.3.78 H. Müller
Planung und Stand der Arbeiten zur Bestimmung der
Nachwärme und Strahlung an HTR-BE
- IRW-TN-4/83
4.1.83 H. Müller, R. Schröder, G. Schürer
Auswahl und Charakterisierung von AVR-Brennelementen
für die Beladung von Prototyp-Behältern für HTR-BE
- IRW-TN-144/78
27.11.78 R. Duwe, E. Völkel, W. Schäfer
Dosisleistungsmessung an einer beladenen ASSE-Kanne
- Anlage II: zum Genehmigungsantrag der ASS-GE vom 28.1.82
- R. Lennartz: Meßprogramm an beladenen Behältern für ausgediente
HTR-BE
- R. Lennartz: Anlage zur Änderungsanzeige 1/82 zur Genehmigung 3/4