

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE

FZR-360

November 2002

ISSN 1437-322X

Archiv-Ex.:



Ingrid Stephan und Bertram Böhmer

**Neutronendosimetrie im
Bestrahlungsprogramm Rheinsberg II**

Herausgeber:
Forschungszentrum Rossendorf e.V.
Postfach 51 01 19
D-01314 Dresden
Telefon +49 351 26 00
Telefax +49 351 2 69 04 61
<http://www.fz-rossendorf.de/>

Als Manuskript gedruckt
Alle Rechte beim Herausgeber

FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF



WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE

FZR-360

November 2002

Ingrid Stephan und Bertram Böhmer

**Neutronendosimetrie im
Bestrahlungsprogramm Rheinsberg II**

Zusammenfassung

In einem mehrjährigen umfangreichen Bestrahlungsprogramm wurden in den Bestrahlungskanälen des Reaktors WWER-2 des KKW Rheinsberg Druckbehälterstahlproben bestrahlt. Das Programm diente der Erweiterung der Datenbasis zur Bewertung der Strahlenversprödung von Reaktordruckbehälterstählen. Zur Ermittlung der Neutronenbelastung wurden die Bestrahlungskapseln mit Neutronenaktivierungsdetektoren bestückt. Der Bericht enthält die Beschreibung des Typs, des Aufbaues und der Zusammensetzung der Neutronenfluenzmonitore, ihre Anordnung im jeweiligen Experiment sowie die Auswerteprozedur nach der Bestrahlung und gibt eine zusammenfassende Übersicht über die gemessenen und spektrumsjustierten Neutronenfluenzen für alle 8 Einzelexperimente des Bestrahlungsprogrammes Rheinsberg II. Die Ergebnisse der neutronendosimetrischen Messungen sind konsistent mit den Ergebnissen der Neutronenfeldrechnungen und ergeben in Verbindung mit diesen zuverlässige Daten über die Neutronenbelastung der in den Bestrahlungsexperimenten exponierten Materialproben.

Abstract

Specimens made from reactor pressure vessel steels have been irradiated in the radiation channels of the VVER-2 reactor of NPP Rheinsberg in the frame of a long-termed irradiation programme. The programme has focussed on the enlargement of the data base for evaluation of the radiation embrittlement of the reactor pressure vessel. The irradiation capsules were equipped with neutron activation detectors in order to measure the neutron exposure in the irradiation positions.

The report describes the type, the design and the chemical composition of the neutron dosimeters, the arrangement in each experiment, the evaluation procedure after irradiation and summarizes the measured and adjusted neutron fluences for each of the 8 experiments of the irradiation programme Rheinsberg II. The results of the experimental neutron dosimetry confirm the results of the neutron calculation. On this base well-proved data of the neutron exposure are established for the materials irradiated in the irradiation programme Rheinsberg II.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Bestrahlungsmöglichkeiten des WWER-2	2
3. Neutronendosimetrie	3
3.1 Neutronenmonitore	3
3.2 Einsatztechnologie	4
3.3 Reaktionsraten	4
3.4 Justierung der Neutronenspektren	6
4. Ergebnisse der neutronendosimetrischen Messungen	6
5. Schlussbetrachtung	7
6. Literatur	8
Tabellen, Abbildungen	10

Neutronendosimetrie im Bestrahlungsprogramm Rheinsberg II

I. Stephan, B. Böhmer

1. Einleitung

Die Sicherheit des Reaktordruckbehälters gegen einen katastrophalen spröden Bruch ist während der gesamten Betriebszeit eines Reaktors zu gewährleisten und nachzuweisen. Infolgedessen muss die durch Neutronenstrahlung verursachte Versprödung des Druckbehälterwerkstoffes bekannt sein und in Rechnung gesetzt werden. Üblicherweise dienen dazu anlagenspezifische Überwachungsprogramme, in denen artgleiches Material vorausseilend im Reaktor bestrahlt wird. Darüber hinaus gibt es vielfältige internationale Aktivitäten, mit gezielten Experimenten die Wirkung der wichtigsten Einflussparameter auf das Materialverhalten unter Bestrahlung zu erfassen und so die Voraussetzung zu schaffen, belastbare Vorhersagen geben zu können.

Das Institut für Sicherheitsforschung nimmt an derartigen Arbeiten teil. Fokussiert auf Druckbehälterstähle der WWER-Reaktorbaulinien wurde bereits von der Vorläufereinrichtung, dem ZfK Rossendorf, ein umfangreiches Bestrahlungsexperiment im Prototypreaktor WWER-2 des KKW Rheinsberg (Bestrahlungsprogramm Rheinsberg I) gestartet [1]. In diesem Programm wurden, wie üblich, zur Bestimmung der erreichten Neutronenfluenzen die Bestrahlungskassetten mit Neutronenfluenzmonitoren bestückt, die nach Abschluß der Bestrahlung bei Demontage der Bestrahlungskassetten gewonnen und ausgewertet werden konnten.

Das Bestrahlungsprogramm Rheinsberg bestand aus zwei Teilprogrammen. Das Programm Rheinsberg I war ein bilaterales Programm der wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit zwischen der Sowjetunion und der DDR auf dem Gebiet der Kernenergie. In diesem Programm wurden vorwiegend Neutronenfluenzmonitore aus dem RRC Kurchatov-Institut Moskau eingesetzt. Das Bestrahlungsprogramm Rheinsberg II war ein nationales Programm, dessen Konzept vom ZfK Rossendorf entwickelt wurde. Vom ZfK wurden auch die Bestrahlungskassetten gebaut und mit Neutronenfluenzmonitoren eigener Entwicklung bestückt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der neutronendosimetrischen Messungen im Bestrahlungsprogramm Rheinsberg II zusammenfassend dargestellt. Neben der experimentellen Bestimmung der Neutronenfeldparameter wurden die Parameter auch auf der Grundlage transporttheoretischer Berechnungen mit der Monte-Carlo-Methode ermittelt [2,3]. Damit ergibt sich zum einen eine unmittelbare Vergleichsmöglichkeit zwischen experimenteller und theoretisch bestimmter Neutronenbelastung. Zum anderen können mit Hilfe der theoretisch ermittelten Eingangsspektren und der Methode der Spektrumsjustierung aus den gemessenen Reaktionsraten zuverlässige experimentelle Neutronenfluenzen und dpa- Werte bestimmt werden. Damit erhält die neutronendosimetrische Belastungscharakterisierung der Bestrahlungsproben eine hohe Qualität. Die Einbeziehung der Spektrumsjustierung wird in diesem Bericht ebenfalls dargestellt.

Neutronenfeldparameter für das Bestrahlungsprogramm Rheinsberg I sind in [2 - 5] angegeben. Die Auswertung der Neutronenfluenzmonitore zu diesem Programm erfolgte ebenfalls im Forschungszentrum Rossendorf. Die Ergebnisse sind in [3] dargestellt.

2. Die Bestrahlungsmöglichkeiten des WWER-2

Am 09. 05.1966 ging als erstes Kernkraftwerk der DDR in Rheinsberg ein WWER-Prototypreaktor mit einer elektrischen Leistung von 65 MW in Betrieb. Dieser als WWER-2 bezeichnete Reaktor wurde nach 24 Betriebsjahren am 01. 06.1990 endgültig abgeschaltet. Der Reaktor war seiner Bestimmung gemäß als Prototyp mit einer Vielzahl von Bestrahlungskanälen ausgerüstet, um Versuchsprogramme zur Untersuchung des Betriebsverhaltens von Reaktoren oder der Strahlenwirkung auf Komponenten und Materialien durchführen zu können.

Im Kern des WWER-2 waren 151 Arbeits- bzw. Regelkassetten der WWER-typischen Sechseckstruktur untergebracht. Zwischen Brennelementgitter und Druckbehälter waren zwei unterschiedliche Typen von Bestrahlungskanälen angeordnet

- großkalibrige Targetkanäle am Rand der Spaltzone innerhalb des Kassettenkorbes
- kleinkalibrige Bestrahlungskanäle zwischen Schacht und thermischem Schild (Surveillance-Kanäle)

Abb. 1 gibt die Anordnung im Kernquerschnitt wieder. Die 6 Targetkanäle besitzen einen Außendurchmesser von 109 mm und einen Innendurchmesser von 103 mm, sind allerdings nur über einen Stutzen des lichten Durchmessers von 98 mm zugänglich. Die 24 paarig angeordneten Surveillance-Kanäle verfügen über einen Innendurchmesser von 33 mm bei einer Wandstärke des Kanals von 2.5 mm.

Aufgrund ihrer Entfernung zur Spaltzonenmitte unterscheiden sich die Neutronenflussparameter beider Kanaltypen sowohl in ihren Absolutwerten als auch im radialen Verlauf.

Für das Forschungsprogramm zur Materialbestrahlung sind besonders die Parameter der schnellen Neutronenflussdichte von Interesse. Zur Groborientierung kann man annehmen, dass die Neutronenflussdichte im Energiegebiet $E > 1 \text{ MeV}$ für die Targetkanäle im Bereich von $(1 - 4) \cdot 10^{12} \text{ n/cm}^2\text{s}$ und für die Surveillancekanäle zwischen $(1 - 3) \cdot 10^{11} \text{ n/cm}^2\text{s}$ lag. Bei der Anordnung des Untersuchungsmaterials musste dem jeweiligen radialen Flussdichteverlauf Rechnung getragen werden (Abb. 2). Besonders im kernnahen Bereich war ein starker radialer Flussgradient zu beachten.

Der berechnete axiale Gradient der Neutronenfluenz in einem Targetkanal ist für verschiedene Höhenschichten in Abb. 3 dargestellt. Man erkennt, dass sich die Fluenzen für die in einem Targetkanal bestrahlten Proben um einem Faktor 2 - 3 voneinander unterscheiden können. Die Abbildung zeigt aber auch, dass der axiale Gradient im Bereich von $\pm 400 \text{ mm}$ um die Spaltzonenmitte (Höhenkoordinate der Spaltzonenmitte = 125 cm) vernachlässigbar ist.

Dieser Bereich wurde für die Bestrahlungsexperimente genutzt.

Das Bestrahlungsprogramm Rheinsberg II wurde im Zeitraum 1982 - 1990 durchgeführt. Es umfasste insgesamt 8 Experimente (RH 1 - RH 8), die vorwiegend einen in zwei Fällen auch mehrere Reaktorzyklen umfassten. Für 2 Experimente war der Targetkanal 6 gewählt worden, die 6 anderen Experimente nutzten jeweils mehrere Surveillance-Kanäle. Eine Übersicht über die einzelnen Experimente gibt Tab. 1.

Einzelheiten zu den bestrahlten Materialien, Probentypen etc. sind in [1] beschrieben.

3. Neutronendosimetrie

Zur Diagnostik der Eigenschaftsänderungen des zu untersuchenden Materials ist eine möglichst exakte Bestimmung der Neutronenfluenzen erforderlich. Neben der theoretischen Bestimmung des Neutronenfeldes am Bestrahlungsort [2,3,10] hat sich der Einsatz von Aktivierungsdetektoren unmittelbar in den Bestrahlungskapseln der Materialproben bewährt.

3.1 Neutronenfluenzmonitore

In unseren Untersuchungsprogrammen fanden ausschließlich Monitore Verwendung, die über (n, γ)-, (n,p)-, (n, α)- oder (n,n⁻)-Reaktionen Aktivierungsprodukte liefern, die gammaspektrometrisch auswertbar sind. Spaltdetektoren wurden aus Genehmigungsgründen nicht verwendet.

Der Vorteil dieser Detektoren sind:

- Erfassung zeitlicher Unstetigkeiten im Leistungsbetrieb,
- geringer Raumbedarf und damit geringe Störung des Neutronenfeldes am Messort,
- relative Unempfindlichkeit gegenüber der Reaktortemperatur (ca. 300 °C) und Drücken (15 MPa),
- geringe Empfindlichkeit gegen Störstrahlung,
- einfache gammaspektrometrische Messung der Detektornuklide,
- anwendbar in weitem Bereich der Neutronenflussdichte (10^{10} - 10^{14} n/cm²s).

Wie Abb. 4 zeigt, wird die Verlagerungsschädigung im Eisen als Basiselement des Reaktordruckbehältermaterials vor allem durch Neutronen im Energiebereich 0.1 ... 10 MeV hervorgerufen. Deshalb muss das Hauptaugenmerk auf den Einsatz von Aktivierungsdetektoren gelegt werden, die dieses Energiegebiet erfassen. Die Ansprechfunktionen der üblichen Aktivierungsdetektoren für den Energiebereich schneller Neutronen ist in Abb. 4 wiedergegeben. Man erkennt, dass nur der Einsatz von Niob dieser Anforderung gerecht wird.

Da in der DDR dieses Material nicht in der notwendigen Reinheit zur Verfügung stand, konnte erst ab Experiment RH 6 der Niobmonitor im Rheinsberger Bestrahlungsprogramm eingesetzt werden. In Zusammenarbeit mit dem Zentralinstitut für Festkörperphysik und Werkstoffforschung (ZFW) Dresden war es gelungen, die Tantalverunreinigungen im technischen Niob durch Schmelzflusselektrolyse auf < 2 ppm zu reduzieren und so ein verwendbares Material zu erzeugen. Es wurde als Folie von 0.020 mm Dicke hergestellt und eingesetzt.

Die Auswahl der einzelnen Aktivierungsdetektoren erfolgte unter der Annahme, dass die Messung der Detektoraktivitäten unmittelbar nach Bestrahlungsende erfolgen kann. Aus verschiedenen Gründen erfolgte die Messung jedoch zum Teil wesentlich später. Dadurch waren nicht mehr in jedem Fall alle Detektoren auswertbar.

Alle eingesetzten Detektormaterialien entstammten eigener Konzeption, wurden größtenteils im ZFW Dresden erschmolzen, umgeformt und besitzen entsprechende Reinheitszertifikate des Amtes für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung der DDR.

Tabelle 2 gibt eine Übersicht über alle in den einzelnen Experimenten eingesetzten Aktivierungsdetektoren. Ihre Charakteristik (Zusammensetzung, Geometrie, Nachweisreaktionen) sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

3.2 Einsatztechnologie

Detaillierte Beschreibungen der Konstruktionen zur Probenhalterung in den Bestrahlungskanälen sind in [1,11,12,16] enthalten. Es wurden 3 Typen verwendet. Für die Experimente RH 1, 3, 4 und 5 sind in den Surveillancekanälen konische Beilagen zur Aufnahme sowohl der Neutronenflussmonitore, als auch der Temperaturindikatoren eingesetzt worden (Abb. 5). Diese Beilagen sind zur Reduzierung des radioaktiven Abfalls aus AlMgSi gefertigt. Die Bohrung zur Unterbringung der Neutronenflussmonitore hatten einen Durchmesser von 5 mm und eine Länge von 26 mm. Daraus resultierten die Anforderungen an die Gestaltung der einzelnen Aktivierungsdetektoren und deren Umhüllung, die dann in der Gesamtheit den Neutronenflussmonitor bilden.

Als Einzelsonden kamen entweder Drahtstücke oder Scheibensonden mit entsprechendem Durchmesser zum Einsatz (Tab. 3). Eine Quarzglasampulle mit niedrigem Natriumgehalt wurde als Hülle gewählt. Die Glasummantelung gestattete eine schnelle und kontaminationsfreie Wiedergewinnung der Aktivierungsdetektoren nach der Bestrahlung.

In den Experimenten RH 6 und RH 8 wurde die Gestaltung der ebenfalls aus AlMgSi gefertigten Beilagen geändert (Abb. 6) und die Bohrung zur Aufnahme auf 3,5 mm reduziert. Diese Konstruktion erwies sich vor allem für die Wiedergewinnung der Monitore (35 von 36 bzw. 49 von 50) als außerordentlich geeignet.

Darüber hinaus waren die Quarzglasampullen zur Stabilisierung der Niob-Aktivierungsdetektoren unter Argon abgeschmolzen worden.

Die zur Fluenzbestimmung in den Targetkanälen (RH 2 und RH 7) eingesetzten Monitore befinden sich in gesonderten Kapseln auf Zwischenpositionen. Sie sind im RH 2 azimuthal in allen 8 Etagen auf 5 Positionen (Abb. 7) und im RH 7 jeweils in einer corenahen und einer corefernen Position (Abb. 8) angeordnet. Durch diese Positionierung konnte so der Flussgradienten gut erfasst werden.

3.3 Bestimmung der Aktivitäten und Reaktionsraten

Zur Registrierung der Photoübergänge der einzelnen Messnuklide (Tab. 3) wurde ein Reinstgermaniumdetektor des Typs EGSP-2000-20-R (Fa. Eurisys Measures) in Verbindung mit einem NTA-2048-Vielkanalanalysator verwendet. Die Bestimmung der absoluten Detektoreffektivität erfolgte mit DKD-zertifizierten Standardquellen.

Aus den gemessenen Gammaspektren wurden unter Verwendung von Standardverfahren die Peakinhalte P der Photoübergänge (Tab. 3) ermittelt. Die Reaktionsrate R pro Kern eines Nuklids ergibt sich dann aus

$$R = \frac{P}{N \cdot \epsilon_{\text{abs}} \cdot \epsilon_{\text{rel}} \cdot s \cdot \gamma \cdot t_{\text{meff}}} \cdot \frac{e^{\lambda_a t_a}}{(1 - e^{-\lambda_b t_b})} \cdot \frac{\lambda t_m}{(1 - e^{-\lambda t_m})} \cdot F \quad (1)$$

- N - Anzahl der Atome des Nuklids in der Probe
- ϵ_{abs} - absolute Effektivität des Ge-Detektors
- ϵ_{rel} - relative Effektivität des Ge-Detektors
- S - Selbstabsorptionsfaktor für γ -Strahlung im Aktivierungsdetektor
- γ - Emissionswahrscheinlichkeit des γ -Überganges

$t_{m \text{ eff}}$	-	effektive Messzeit
λ	-	Zerfallskonstante des Messnuklids
t_a	-	Abklingzeit vom Bestrahlungsende bis zum Messzeitpunkt
t_b	-	Bestrahlungszeit
t_m	-	Messzeit
F	-	Faktor der Reaktorgeschichte

Die Anzahl der Kerne des Nuklids N erhält man aus

$$N = K \cdot G \cdot M \cdot L/A \quad (2)$$

K	-	Isotopenanteil des Nuklids im Element
G	-	Massenanteil des Elements in der Probe
L	-	Loschmidtzahl
A	-	Atomgewicht
M	-	Probenmasse

Der Faktor F berücksichtigt die reale Bestrahlungsgeschichte (Volleistung, Leistungseinsenkungen, Abschaltungen). Dabei wird die Gesamteinsetzzeit t_b in n -Intervalle eingeteilt, die durch die relative Reaktorleistung im i -ten Zeitintervall p_i/p_o charakterisiert sind, wobei p_o die Nennleistung des Reaktors und p_i die mittlere Reaktorleistung im i -ten Zeitintervall sind. Für die Abschaltzeiten resultiert $p = 0$. Somit ergibt sich für F

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{p_o} (1 - e^{-\lambda \Delta t_i}) e^{-\lambda(t_b - t_i)}}{1 - e^{-\lambda t_b}} \quad (3)$$

Δt_i	-	Dauer des i -ten Zeitintervalls
t_i	-	Zeitpunkt am Ende des i -ten Intervalls $t_i = \sum_{k=1}^i \Delta t_k$
t_b	-	Bestrahlungszeit $t_b = \sum_{k=1}^n \Delta t_k$

Die Korrektur durch die Selbstabschirmung der γ -Strahlung in der Probe liegt aufgrund der geringen Abmessungen der eingesetzten Aktivierungsdetektoren nahezu bei 1,0.

Eine Ausnahme stellt der Nb-Detektor dar. Das Reaktionsprodukt ^{93m}Nb wird über die X-Rays 16,6 und 18,8 keV ausgewertet und bedarf auch bei 20 μm Sondendicke einer Korrektur. Im Vorfeld dieser Experimente wurden diese Faktoren experimentell und theoretisch zu 0,83 und 0,86 bestimmt. Bei einigen Rheinsberger Experimenten sind die Nb-Detektoren zum Vergleich aufgelöst und als Dünnschichtprobe gemessen worden. Der Massenanteil in der Lösung wurde dabei mit ICP-Spektrometrie ermittelt. Beide Verfahren lieferten im Rahmen der Messfehler übereinstimmende Ergebnisse, so dass an den experimentell gewonnenen Schwächungsfaktoren keine Korrekturen vorgenommen werden mussten.

3.4 Justierung der Neutronenspektren

Für die Bestimmung der gewünschten Integrale des Neutronenfluenzspektrums, wie $\phi_{E>0.1 \text{ MeV}}$, $\phi_{E>0.5 \text{ MeV}}$ und $\phi_{E>1.0 \text{ MeV}}$, sowie die Anzahl der Atomverlagerungen/Atom (dpa) wurde die Methode der Spektrumsjustierung eingesetzt. Diese setzt voraus, dass ein absolut oder relativ normiertes Eingangsspektrum bekannt ist, welches mit Hilfe der gemessenen Reaktionsraten justiert wird. Für die vorliegende Aufgabe wurden die Spektrumsjustierungs-codes COSA1 [13], COSA2 [14] und COSA3 [17] genutzt.

Diese beruhen auf der verallgemeinerten Methode der kleinsten Quadrate und unterscheiden sich in ihren Möglichkeiten zur Berücksichtigung der Kovarianzdaten (Fehler und Fehlerkorrelationen) der Eingangsgrößen. Während COSA1 nur die Kovarianzdaten der Messgrößen und des Eingangsspektrums (in Gruppendarstellung) berücksichtigte, wurden bei COSA2 auch die Kovarianzdaten der zur Berechnung der Reaktionsraten benötigten Wirkungsquerschnitte in die Justierung einbezogen.

COSA3 ermöglicht zusätzlich die Berücksichtigung von Korrelationen zwischen verschiedenen Messpositionen und die Einbeziehung von Positionen ohne Messwerte in die Justierung. Der Vorteil des angewendeten Verfahrens gegenüber den älteren "Entfaltungsmethoden" liegt in der statistisch exakten Bestimmung justierter Gruppenspektren einschließlich ihrer Kovarianzdaten. Mit Hilfe dieser Daten ist dann die Bestimmung der Erwartungswerte und Standardabweichungen der Fluenzintegrale und dpa-Werte möglich.

Die erforderlichen Eingangsspektren wurden Rechnungen von Barz et al. [2,3] und Pulz [10] entnommen. Die Kovarianzen dieser Spektren wurden mit einfachen Modellen und aus Kovarianzdaten abgeschätzt, die für vergleichbare Reaktoren ermittelt worden waren. Die Wirkungsquerschnitte der Aktivierungsreaktionen und deren Kovarianzen wurden aus Daten des International Reactor Dosimetry File IRDF-90 [18], wie in [3] beschrieben, in der benötigten Gruppendarstellung berechnet. Die Kovarianzdaten der Reaktionsraten wurden ausgehend von den einzelnen Fehlerkomponenten der Aktivitätsmessungen und den bei der Ableitung der Reaktionsraten aus den Aktivitäten entstehenden Fehlern bestimmt [3].

4. Ergebnisse der neutronendosimetrischen Messung

Die mit Hilfe der Spektrumsjustierungsprogramme COSA1, COSA2 und COSA3 aus den gemessenen Reaktionsraten erhaltenen Neutronenflussdichten, Fluenzen und dpa-Werte sind in den Tabellen 4 - 11 für die verschiedenen Bestrahlungsexperimente zusammengestellt. Durch die Justierung konnten die Fehler um etwa den Faktor 2 reduziert werden. Die Zuverlässigkeit des Endergebnisses hängt im Wesentlichen davon ab, wie viele Detektoren mit unterschiedlichen Ansprechfunktionen zur Verfügung standen. Die in einigen Fällen nicht berechneten Flussdichten wurden aus dem Bezug zu Ergebnissen der gleichen Kanäle in anderen Experimenten ermittelt.

Die Höhenkoordinaten beziehen sich auf die Unterkante Spaltzone. Die Höhe von 1250 mm entspricht somit der Spaltzonenmitte.

Es zeigt sich, dass die paarweise angeordneten Surveillancekanäle, wie erwartet, auch nahezu identische Flusswerte besitzen (in Einheiten von $10^{11} \text{ n/cm}^2\text{s}$ - K 5/6 ~ 1.3 , K 7/8 ~ 1.0 , K 9/10 ~ 1.8 , K 11/12 ~ 1.4 , K 17/18 ~ 1.6 , K 19/20 ~ 1.4).

Unterschiede in der Beladungscharakteristik des Reaktorkerns führen zu Unterschieden in der azimuthalen Verteilung der Flussdichte, die ca. 60 % betragen können. Für

die Experimente RH 3 und RH 4 ist auch die thermische Neutronenflussdichte und für RH 3 die Härte des thermischen Spektrums mit ausgewertet worden. Diese Ergebnisse sind Orientierungswerte, die aus der ^{60}Co -Aktivität mit einem mittleren thermischen Querschnitt gewonnen wurden. Die Relativverläufe zwischen thermischen und schnellen Flussanteilen unterscheiden sich, so dass man nicht in jedem Fall unmittelbar aus der schnellen Neutronenflussdichte auf den thermischen Anteil schließen kann.

Die neutronendosimetrische Auswertung umfasst für das Bestrahlungsprogramm Rheinsberg II einen Bereich der Neutronenflussdichte

$$\begin{aligned} &\text{von } 1.2 - 4.2 \cdot 10^{11} \text{ n/cm}^2\text{s für } E > 0.5 \text{ MeV} \\ &\text{von } 0.9 - 3.4 \cdot 10^{11} \text{ n/cm}^2\text{s für } E > 1.0 \text{ MeV} \end{aligned}$$

bzw. der Neutronenfluenzen

$$\begin{aligned} &\text{von } 0.22 - 13 \cdot 10^{19} \text{ n/cm}^2 \text{ für } E > 0.5 \text{ MeV} \\ &\text{von } 0.15 - 10 \cdot 10^{19} \text{ n/cm}^2 \text{ für } E > 1.0 \text{ MeV.} \end{aligned}$$

Innerhalb einer Kapsel im Targetkanal wurden im Experiment RH 2 Unterschiede bis zu einem Faktor 2.8 gemessen. Damit bestätigen die dosimetrischen Messungen die Ergebnisse der Neutronenfeldrechnungen. Für die Surveillancekanäle liefert die Neutronendosimetrie keine Hinweise auf den radialen Flussgradienten, da die Kapseln in diesem Falle jeweils nur mit einem Monitor pro Höhenschicht bestückt waren.

5. Schlussbetrachtung

Die in den Bestrahlungskanälen des WWER-2 Rheinsberg im Rahmen des Bestrahlungsprogrammes Rheinsberg II durchgeführten neutronendosimetrischen Messungen sind umfassend dargestellt. Sie zeigen die Leistungsfähigkeit und die Grenzen der experimentellen Methoden. Da die Kenntnis des Neutronenflusses > 0.5 MeV von besonderem Interesse für das Phänomen der Neutronenbestrahlung ist, wurden Aktivierungsdetektoren ausgewählt deren Ansprechfunktionen für dieses Energiegebiet signifikant sind. Die Zusammensetzung der Aktivierungsdetektoren und deren mengenmäßige Kombination wurde den Bestrahlungsbedingungen angepasst.

Besonders geeignet für die Belange der Reaktordosimetrie ist der Einsatz von Niob als Detektor, da die Endprodukte aus den beiden Nachweisreaktionen $^{93}\text{Nb}(n,\gamma)^{94}\text{Nb}$ und $^{93}\text{Nb}(n,n')^{93m}\text{Nb}$ langlebig sind und den gesamten Energiebereich der Strahlenschädigungen erfassen können.

Der Einsatz anderer Aktivierungsdetektoren für den thermischen und epithermischen Bereich (Ag, Co) und das schnelle Energiegebiet (Fe, Ti, Ni, Cu) sind zur Erzielung einer hohen Genauigkeit des justierten Spektrums empfehlenswert. Die Zuverlässigkeit des Endergebnisses hängt davon ab, wie viele Detektoren mit unterschiedlichen Ansprechfunktionen zur Verfügung standen.

Vergleiche zwischen Monte-Carlo-Rechnungen und den entsprechenden experimentellen Ergebnissen zeigen deren Konsistenz. In jedem Fall ist die Unsicherheit der angegebenen Fluenzparameter $\leq 20\%$. Damit werden brauchbare Belastungsparameter zur Bewertung der strahlenbedingten Eigenschaftsänderung der Bestrahlungsproben zur Verfügung gestellt. Bei einer Spannweite von $0.22 - 13 \cdot 10^{19} \text{ n/cm}^2$ [$E > 0.5 \text{ MeV}$] lässt sich mit den 8 Experimenten des Bestrahlungsprogrammes

Rheinsberg II der Bestrahlungseinfluss auf das Materialverhalten in einem weiten Fluenzbereich abschätzen.

6. Literatur

- [1] K. Popp, H.-P. Schützler, H.-W. Viehrig, H.-C. Mehner, I. Stephan, H. Patze, H. Gottschalk, Bestrahlungsexperimente zur Untersuchung der Neutronenversprödung von Reaktordruckbehälterstählen, ZfK-679, September 1989
- [2] H.-U. Barz, J. Konheiser, Fluenzberechnungen für das Bestrahlungsprogramm Rheinsberg von Materialproben im Rheinsberger Reaktor im Zeitraum 1984 - 1988, Forschungszentrum Rossendorf, FZR-51, August 1994
- [3] H.-U. Barz, B. Böhmer, J. Konheiser, I. Stephan, Ermittlung der Neutronendosis von bestrahlten WWER-Reaktordruckbehältermaterialien, Forschungszentrum Rossendorf, FZR-87, Juni 1995
- [4] H.-W. Viehrig, H.-U. Barz, J. Böhmert, B. Böhmer, Consideration of Neutron Flux Gradients for Sophisticated Evaluation of Irradiation Experiments, presented at the IAEA Specialist's Meeting on Irradiation Effects and Mitigation, Vladimir, Russia, 15-19 September, 1997, IWG-LMNPP-97/2, Vienna 1997, p.230
- [5] H.-W. Viehrig, J. Böhmert, H. Richter, Common German/Russian Irradiation Experiment at Rheinsberg NPP - Results of the Mechanical Testing, Proceedings of the IAEA Specialist's Meeting, Madrid, Spain, 26 - 29 April 1999, IWG-LMNPP-99/2, p. 271
- [6] H.-C. Mehner, B. Böhmer, U. Hagemann, K. Popp, H.-P. Schützler, I. Stephan, Neutronendosimetrische Überwachung der Bestrahlung von Reaktordruckbehälterstahlproben, Kernenergie 32 (1989) 4, 149-154
- [7] I. Stephan, B. Böhmer, Bestimmung der Neutronenbelastung von Reaktorwerkstoffen in den Experimenten RH-5 und RH-6, Forschungszentrum Rossendorf, FZR/FWSM - 05/2000, interner Bericht
- [8] I. Stephan, B. Böhmer, Bestimmung der Neutronenbelastung von Reaktorwerkstoffen im Experiment RH-8, Forschungszentrum Rossendorf, FZR/FWSM - 07/2001, interner Bericht
- [9] I. Stephan, Bestrahlungsexperiment RH 7 im Bestrahlungsprogramm Rheinsberg II - Neutronendosimetrische Auswertung -, Forschungszentrum Rossendorf, FZR/FWSM - 07/2001, interner Bericht
- [10] E. Pulz, Berechnung der spektralen Neutronenflussdichte in radialer Richtung für die Reaktoren vom Typ WWER - 2 (Rheinsberg) und WWER - 440 (Nord I und II), KKAB-98-79-0

- [11] H.-P.Schützler, Bestrahlungsexperimente im Reaktor WWER-2 Rheinsberg/ Dokumentation I: Experimente RH 1, RH 2, RH 3, ZfK Rossendorf 1984, interner Bericht
- [12] H.-P. Schützler, H.-W. Viehrig, K. Popp, Bestrahlungsexperimente im Reaktor WWER-2 Rheinsberg/Dokumentation II: Experimente RH 4, RH 5, RH 6 und RH 7, ZfK - KBC 1/1988, interner Bericht
- [13] B. Böhmer, COSA 1 - Ein Spektrumsjustierungsprogramm zur Auswertung von Aktivierungsexperimenten auf der Basis der verallgemeinerten Methode der kleinsten Quadrate, ZfK Rossendorf RPT - 5/87, interner Bericht
- [14] B. Böhmer, COSA 2 - Ein Spektrumsjustierungsprogramm zur Auswertung von Aktivierungsexperimenten auf der Basis der verallgemeinerten Methode der kleinsten Quadrate, ZfK-735, Januar 1991
- [15] H. C. Mehner, B. Böhmer, U. Hagemann, I. Stephan, Neutronendosimetrie an der WWER-440-Druckbehälteraußenwand, ZfK-623, Juli 1987
- [16] I. Stephan, H. P.Schützler, H.-W. Viehrig, W.-D. Leonhardt, Beschreibung des Experimentes RH 8, FZR/FWSM - 02/2002, interner Bericht
- [17] B. Böhmer, G. I. Borodkin, G. N. Manturov, Improved Covariance Analysis and Spectrum Adjustment for VVER-1000 Pressure Vessel Fluences, Proceedings of the 10th International Symposium on Reactor Dosimetry, Sept. 12-17,1999, Osaka, Japan, ASTM STP 1398
- [18] N. P. Kocherov, P. K. McLaughlin, The International Reactor Dosimetry File (IRDF-90), Report IAEA-NDS-141, Rev.2, IAEA, Vienna, October 1993

Tabelle 1: Experimente im Rahmen des Bestrahlungsprogrammes Rheinsberg II

Experiment	Einsatzort	Bestrahlungszeitraum	effektive Vollleistungstage	effektive Bestrahlungszeit s
RH 1	S 11, 12, 19, 20	15.7.83 - 29.2.84	206	1.78 + E7
RH 2	T 6	19.9.84 - 6.7.85	268	2.36 + E7
RH 3	S 10, 11, 12	19.9.84 - 6.7.85	268	2.36 + E7
RH 4	S 10, 11, 12	19.8.85 - 5.3.86	194	1.66 + E7
RH 5	S 10, 11	6.10.87 - 1.6.90	792	6.84 + E7
RH 6	S 5, 6, 7, 8	6.10.87 - 1.6.90	792	6.84 + E7
RH 7	T 6	6.10.87 - 19.8.88	297	2.56 + E7
RH 8	S 9, 17, 18, 21, 22	5.11.89 - 1.6.90	199	1.72 + E7

Tabelle 2: Übersicht über die Anzahl und die Art der verwendeten Neutronenflussdetektoren

Experiment	Anzahl d. eingesetzten Monitore	Anzahl d. ausgesetzten Monitore	Bestückung		Aktivierungselemente						
					Fe	Co	Nb	Ti	Ni	Cu	Ag
RH 1	31	27	6 kompl.	25 x Fe	a	c		g	h	j	
RH 2	40	38	40 kompl.		a	d		g	i	j	k
RH 3	22	10	10 kompl.	10xFe+Co	a	d		g	i	j	k
RH 4	24	24	10 kompl.	14xFe+Co	a	d		g	i		K
RH 5	20	8		20xFe+Co	a	d					
RH 6	36	35	36 kompl.		b + l	e	f	b	b		K
RH 7	16	13	16 kompl.		b	e	f	b	b		K
RH 8	50	49	50 kompl.		b + l	e	f	b	B+i		K

a, b ... l – Code für die Ausführung gemäß Tabelle 3

Tabelle 3: Charakteristik der Aktivierungsdetektoren

Detektor	Massenanteil	Geometrie	Reaktion
a - Eisen	99.9 %	Draht Ø 0.5 mm	$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$
b - Schwellwertsonde	97.5 % Ti 2.12 % Fe 0.5 % Ni	Sonde d -1 mm verschiedene Durchmesser	$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$ $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$
c - Kobaltlegierung	0.5 % in Al	Draht Ø 0.5 mm	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$
d - Kobaltlegierung	0.093 % in Al	Draht Ø 0.5 mm	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$
e - Kobaltlegierung	0.67 % in Al	Scheibensonde d - 0.14 mm ver- schiedene Durchmesser	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$
f - Niob	100 %	Scheibensonde d - 0.02 mm verschiedene Durchmesser	$^{93}\text{Nb}(n,n')^{93m}\text{Nb}$ $^{93}\text{Nb}(n,\gamma)^{94}\text{Nb}$
g - Titan	99.96 %	Scheibensonde d - 0.025 mm verschiedene Durchmesser	$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$
h - Mehrkomponen- tensonde	82.12 % Ni 2.62 % W 0.3 % Mn 0.3 % Au	Draht Ø 0.8 mm	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ $^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}$ $^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$ $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$
i - Mehrkomponen- tensonde	81.63 % Ni 15.16 % Mo 2.62 % W 0.26 % Mn 0.31 % Au	Scheibensonde d - 1 mm verschiedene Durchmesser	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$ $^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}$ $^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$ $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$
j - Kupfer	99.999 %	Zylinder Ø 4 mm Höhe 8 mm	$^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$
k - Silberlegierung	0.8 % in Al	Scheibensonde d - 0.12 mm verschiedene Durchmesser	$^{109}\text{Ag}(n,\gamma)^{110m}\text{Ag}$
l - Eisen	100 %	Scheibensonde d - 0.08 mm verschiedene Durchmesser	$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$

mit - d - ist die Dicke eines Aktivierungsdetektors bezeichnet

Tabelle 4: Spektrumsjustierte Werte der Neutronenflussdichte, der Neutronenfluenz und der Verlagerungsschädigung (dpa) für das Bestrahlungsexperiment RH 1

Kapsel	Bestrahl. Kanal	Höhe über Spaltz. UK mm	Fluss (E>0.5MeV) $10^{11} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Fluenz (E>0.5MeV) $10^{18} \text{ n cm}^{-2}$	Fluss (E>1.0MeV) $10^{11} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Fluenz (E>1.0MeV) $10^{18} \text{ n cm}^{-2}$	dpa 10^{-3} reaction/atom
42	S 11	1400	2.29	4.07	1.61	2.86	4.34
44		1130	1.72	3.05	1.21	2.15	3.26
45		990	2.23	3.96	1.57	2.79	4.23
46		850	2.35	4.17	1.65	2.93	4.44
47		710	2.15	3.82	1.51	2.68	4.07
48	S 12	1600	1.65	2.93	1.16	2.06	3.13
49		1470	2.22	3.94	1.56	2.77	4.21
50		1330	1.68	2.98	1.18	2.10	3.18
69		1190	2.04	3.62	1.43	2.54	3.77
52		920	1.94	3.45	1.36	2.42	3.66
53		790	2.15	3.82	1.51	2.68	4.07
54	S 19	650	2.01	3.57	1.41	2.50	3.81
55		1600	1.37	2.43	0.96	1.70	2.59
56		1470	1.81	3.21	1.27	2.26	3.43
57		1330	1.61	2.86	1.13	1.95	3.05
70		1190	1.78	3.16	1.25	2.22	3.29
58		1060	1.64	2.91	1.15	2.04	3.10
59		920	1.51	2.68	1.06	1.88	2.85
60		790	1.48	2.63	1.04	1.85	2.80
61	S 20	650	1.96	3.48	1.38	2.46	3.71
62		1600	1.57	2.79	1.10	1.95	2.91
63		1470	1.76	3.13	1.24	2.20	3.27
64		1330	1.99	3.53	1.40	2.49	3.69
71		1190	1.82	3.23	1.28	2.27	3.37
65		1060	1.78	3.16	1.25	2.22	3.29
66		920	1.75	3.11	1.23	2.18	3.24
67	790	2.05	3.64	1.44	2.55	3.79	

Tabelle 5: Spektrumsjustierte Werte der Neutronenflussdichte, der Neutronenfluenz und der Verlagerungsschädigung (dpa) für das Bestrahlungsexperiment RH 2

Etage	Kanal	Höhe über Spaltz.UK mm	Fluss (E>0.5 MeV) $10^{12} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Fluenz (E>0.5 MeV) $10^{19} \text{ n cm}^{-2}$	Fluss (E>1.0 MeV) $10^{12} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Fluenz (E>1.0 MeV) $10^{19} \text{ n cm}^{-2}$	dpa reaction/atom 10^{-3}
E1-B	TK 6	1610	2.99	7.06	2.12	5.00	72.04
E1-C		1610	1.76	4.15	1.23	2.90	41.77
E1-D		1610	2.36	5.56	1.67	3.93	56.28
E2-A		1510	5.05	11.92	3.62	8.55	122.02
E2-B		1510	3.10	7.31	2.19	5.18	74.55
E2-C		1510	1.81	4.26	1.27	2.99	42.99
E2-D		1510	2.36	5.56	1.67	3.93	56.41
E2-E		1510	4.54	10.72	3.25	7.66	109.36
E3-A		1405	5.60	13.21	4.02	9.48	134.50
E3-B		1405	3.44	8.11	2.44	5.76	82.03
E3-C		1405	2.06	4.85	1.44	3.40	48.56
E3-D		1405	2.56	6.03	1.80	4.25	60.94
E3-E		1405	4.97	11.74	3.54	8.36	119.29
E4-A		1305	4.55	10.73	3.27	7.73	110.35
E4-B		1305	2.80	6.61	2.00	4.71	67.57
E4-C		1305	1.89	4.47	1.33	3.14	44.82
E4-D		1305	2.44	5.77	1.73	4.09	58.37
E4-E		1305	4.34	10.25	3.11	7.34	104.78
E5-A		1205	4.90	11.56	3.53	8.34	118.81
E5-B		1205	3.53	8.33	2.52	5.94	84.76
E5-C		1205	2.28	5.39	1.61	3.79	54.31
E5-D		1205	3.16	7.46	2.24	5.29	75.28
E5-E		1205	5.38	12.70	3.85	9.09	129.01
E6-A		1105	5.70	13.46	4.10	9.68	137.22
E6-B		1105	3.22	7.59	2.28	5.39	77.20
E6-C		1105	2.01	4.75	1.41	3.32	47.85
E6-D		1105	2.83	6.69	2.00	4.72	67.55
E6-E		1105	5.46	12.88	3.91	9.23	130.68
E7-A		1000	5.45	12.87	3.93	9.27	131.80
E7-B		1000	3.33	7.85	2.32	5.48	78.30
E7-C		1000	2.08	4.92	1.39	3.27	46.90
E7-D		1000	2.71	6.39	2.01	4.75	67.76
E7-E	1000	4.90	11.57	3.94	9.29	131.20	
E8-A	900	5.42	12.78	3.44	8.11	115.63	
E8-B	900	3.33	7.85	2.16	5.10	73.37	
E8-C	900	2.08	4.92	1.47	3.47	49.65	
E8-D	900	2.71	6.39	2.07	4.88	69.55	
E8-E	900	4.90	11.57	3.81	8.99	127.57	

Tabelle 6: Spektrumsjustierte Werte der neutronenflussdichte, der Neutronenfluenz und der Verlagerungsschädigung (dpa) für das Bestrahlungsprogramm RH 3

Kapsel Nr.	Bestr. kanal	Höhe über Spaltz. UK mm	therm.Fluss 10^{11} $n\ cm^{-2}\ s^{-1}$	Spekt. härte α	Fluss * (E>0.5 MeV) 10^{11} $n\ cm^{-2}\ s^{-1}$	Fluenz * (E>0.5MeV) 10^{18} $n\ cm^{-2}$	Fluss (E>1MeV) 10^{11} $n\ cm^{-2}\ s^{-1}$	Fluenz (E>1MeV) 10^{18} $n\ cm^{-2}$	dpa 10^{-4} reaction/ atom
123	S 10	1250	2.40	0.142	3.67	6.09	1.87	4.41	82.20
114	S 11	1469	3.09	0.095	2.99	4.96	1.52	3.59	66.46
116		1177	2.67	0.104	3.00	4.98	1.52	3.59	67.81
118		885	2.68	0.104	3.01	5.00	1.55	3.66	68.90
119		739	1.71	0.136	2.54	4.22	1.30	3.07	57.70
127		S 12	1688	2.23	0.097	2.22	3.86	1.19	2.81
128	S 12	1542	2.55	0.094	2.56	4.25	1.31	3.09	58.51
129		1396	2.53	0.098	2.70	4.48	1.38	3.26	60.70
130		958	2.57	0.097	2.69	4.46	1.37	3.23	60.84
131		812	2.43	0.098	2.72	4.51	1.41	3.33	58.27

* Die Energiegrenze < 0,5 MeV wurde nicht gerechnet, die Werte wurden auf RH 4 bezogen.

Tabelle 7: Spektrumsjustierte Werte der Neutronenflussdichte, der Neutronenfluenz und der Verlagerungsschädigung (dpa) für das Bestrahlungsprogramm RH 4

Kapsel	Bestr. kanal	Höhe üb. UK Spaltz. mm	therm.Fluss $10^{11} \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$	Fluss (E>0.5 MeV) $10^{11} \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$	Fluenz (E>0.5 MeV) 10^{18} ncm^{-2}	Fluss (E>1 MeV) $10^{11} \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$	Fluenz (E>1 MeV) $10^{18} \text{ n cm}^{-2}$	dpa 10^3 reaction/atom
132	S 11	1740	1.21	1.90	3.15	1.42	2.36	6.02
133		1600	2.47	1.91	3.17	1.40	2.32	6.09
134		1460	2.26	1.85	3.07	1.34	2.22	5.87
135		1320	2.34	2.32	3.85	1.68	2.78	7.34
136		1110	2.30	2.33	3.86	1.67	2.76	7.31
137		970	2.23	2.08	3.45	1.52	2.52	6.57
138		830	2.58	2.14	3.55	1.57	2.61	6.84
139		690	2.42	2.23	3.70	1.60	2.65	7.02
140		S 12	1740	1.49	1.59	2.64	1.19	1.97
141	1600		2.36	1.87	3.10	1.37	2.27	5.96
142	1460		2.40	2.15	3.56	1.59	2.63	6.88
143	1320		1.44	1.65	2.75	1.20	1.99	5.32
144	1110		2.27	1.73	2.87	1.24	2.05	5.52
145	970		2.42	2.01	3.33	1.48	2.45	6.42
146	830		2.41	2.26	3.75	1.67	2.77	7.22
147	690		2.32	1.85	3.07	1.35	2.24	5.89
148	S 10	1740	2.07	2.17	3.60	1.62	2.68	6.96
149		1600	2.98	2.19	3.63	1.59	2.64	6.97
150		1460	3.30	2.57	4.26	1.88	3.11	8.18
151		1320	2.16	1.97	3.27	1.44	2.38	6.22
152		1110	3.17	2.60	4.31	1.89	3.11	8.23
153		970	3.43	2.45	4.06	1.77	2.94	7.77
154		830	3.56	1.43	2.37	0.991	1.64	4.49
155		690	3.28	1.32	2.19	0.915	1.52	4.15

Tabelle 8: Spektrumsjustierte Werte der Neutronenflussdichte, der Neutronenfluenz und der Verlagerungsschädigung (dpa) für das Bestrahlungsexperiment RH 5

Kapsel	Bestr.-kanal	Höhe über Spaltz.UK mm	Fluss (E>0.5 MeV) $10^{11} \text{ n cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	Fluenz (E > 0.5MeV) $10^{18} \text{ n cm}^{-2}$	Fluss (E>1.0 MeV) $10^{11} \text{ n cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	Fluenz (E > 1.0 MeV) $10^{18} \text{ n cm}^{-2}$	dpa 10^{-3} reaction/atom
158	S 11	1520	1.78	12.16	1.24	8.48	12.06
159		1385	2.07	14.19	1.45	9.90	14.07
160		1250	1.99	13.59	1.39	9.48	13.47
162		980	1.93	13.17	1.34	9.19	13.06
163		845	1.98	13.53	1.38	9.43	13.42
173		S 10	1320	2.01	13.74	1.40	9.58
175	1045		2.07	14.14	1.44	9.86	14.02
176	910		2.04	13.93	1.42	9.71	13.81

Tabelle 9: Spektrumsjustierte Werte der Neutronenflussdichte, der Neutronenfluenz und der Verlagerungsschädigung (dpa) für das Bestrahlungsexperiment RH 6

Kapsel	Bestr. kanal	Höhe über Spaltz. UK mm	Fluss (E>0.5 MeV) $10^{11} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Fluenz (E > 0.5 MeV) $10^{18} \text{ n cm}^{-2}$	Fluss (E>1.0 MeV) $10^{11} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Fluenz (E > 1.0 MeV) $10^{18} \text{ n cm}^{-2}$	dpa 10^{-3} reaction/atom
1	S 8	1780	1.32	9.01	0.91	6.20	8.69
3		1515	1.29	8.85	0.90	6.16	8.74
4		1382.5	1.18	8.05	0.82	5.61	7.98
5		1250	1.68	11.48	1.15	7.88	10.84
6		1117.5	1.34	9.14	0.93	6.37	9.06
9		720	1.53	10.45	1.05	7.15	9.95
10	S 7	1780	1.39	9.53	0.97	6.64	9.45
11		1647.5	1.58	10.78	1.10	7.49	10.60
12		1515	1.51	10.36	1.06	7.22	10.27
13		1382.5	1.63	11.15	1.13	7.72	10.90
14		1250	1.49	10.22	1.04	7.12	10.13
15		1117.5	1.56	10.65	1.07	7.34	10.29
16		985	1.50	10.24	1.04	7.14	10.16
17		852.5	1.58	10.79	1.09	7.44	10.44
18		720	1.31	8.94	0.91	6.24	8.87
19	S 6	1780	1.56	10.68	1.09	7.45	10.59
21		1515	1.94	13.27	1.34	9.20	13.00
22		1382.5	1.86	12.70	1.30	8.86	12.59
23		1250	1.93	13.23	1.34	9.19	13.00
24		1117.5	1.86	12.71	1.30	8.86	12.60
25		985	1.96	13.43	1.36	9.31	13.15
26		852.5	1.78	12.15	1.24	8.47	12.05
27		720	1.85	12.67	1.29	8.81	12.48
28	S 5	1780	1.55	10.57	1.08	7.37	10.48
29		1647.5	1.72	11.77	1.19	8.15	11.49
30		1515	1.58	10.79	1.10	7.53	10.70
31		1382.5	1.84	12.60	1.27	8.67	12.12
32		1250	1.63	11.12	1.13	7.76	11.03
34		985	1.69	11.57	1.18	8.07	11.47
35		852.5	1.85	12.63	1.28	8.76	12.39
36		720	1.56	10.64	1.08	7.42	10.55

Tabelle 10: Spektrumsjustierte Werte der Neutronenflussdichte, der Neutronenfluenz und der Verlagerungsschädigung (dpa) für das Bestrahlungsexperiment RH 7

Materialposition	Etage	Kanal	Höhe über UK Spaltzone mm	Fluss (E>0.5 MeV) $10^{12} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Fluenz (E>0.5 MeV) $10^{19} \text{ n cm}^{-2}$	Fluss (E>1.0 MeV) $10^{12} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Fluenz (E>1.0 MeV) $10^{19} \text{ n cm}^{-2}$	dpa reaction/ato 10^{-3}
I	1 corenah	T 6	1527 -1765	4.75	12.15	3.39	8.67	125.8
II	1 corefern		1527- 1765	2.80	7.18	2.00	5.12	73.5
III	2 corenah		1262 -1500	5.38	13.77	3.84	9.82	142.5
IV	2 corefern		1262 -1500	3.00	7.69	2.14	5.49	78.7
V	3 corenah		1000 -1235	5.44	13.94	3.90	9.98	144.3
VI	3 corefern		1000 -1235	3.14	8.05	2.25	5.77	82.4
VII	4 corenah		732 - 970	4.88	12.49	3.49	8.94	129.2
VIII	4 corefern		732 - 970	3.12	7.98	2.23	5.70	81.9

Tabelle 11: Spektrumsjustierte Werte der Neutronenflussdichte, der Neutronenfluenz und der Verlagerungsschädigung (dpa) für das Bestrahlungsexperiment RH 8

Kapsel-Nr.	Bestr. kanal	Höhe über Spaltz. UK mm	Fluss ($E > 0.5$ MeV) $10^{11} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Fluenz ($E > 0.5$ MeV) $10^{18} \text{ n cm}^{-2}$	Fluss ($E > 1.0$ MeV) $10^{11} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Fluenz $E > 1$ MeV $10^{18} \text{ n cm}^{-2}$	dpa 10^{-3} reaction/atom
37	S 9	1871	1.62	2.78	1.14	1.96	2.81
38		1733	1.82	3.13	1.25	2.15	2.99
40		1457	2.44	4.19	1.68	2.89	4.04
41		1319	2.58	4.44	1.80	3.10	4.40
42		1181	2.74	4.71	1.88	3.24	4.52
43		1043	2.72	4.68	1.87	3.21	4.48
44		905	2.55	4.39	1.74	3.06	4.35
45		767	2.50	4.30	1.72	2.95	4.12
46		629	2.31	3.97	1.58	2.71	3.76
47		S 17	1871	1.84	3.16	1.29	2.22
48	1733		1.77	3.05	1.22	2.13	3.02
49	1595		2.39	4.11	1.64	2.82	3.93
50	1457		2.34	4.02	1.63	2.80	3.99
51	1319		2.58	4.43	1.76	3.03	4.20
52	1181		2.60	4.48	1.81	3.11	4.41
53	1043		2.65	4.56	1.84	3.16	4.46
54	905		2.31	3.98	1.60	2.76	3.88
55	767		2.06	3.55	1.44	2.47	3.52
56	629		2.26	3.88	1.55	2.67	3.73
57	S 18	1871	1.98	3.40	1.36	2.34	3.28
58		1733	2.05	3.53	1.42	2.45	3.46
59		1595	2.11	3.63	1.47	2.52	3.57
60		1457	2.40	4.13	1.66	2.86	4.01
61		1319	2.38	4.10	1.66	2.85	4.05
62		1181	2.62	4.50	1.79	3.08	4.28
63		1043	2.38	4.09	1.63	2.81	3.92
64		905	1.99	3.42	1.39	2.39	3.39
65		767	2.41	4.14	1.65	2.84	3.96
66		629	2.51	4.32	1.72	2.96	4.14
67	S 21	1802	3.10	5.33	1.47	2.53	3.60
68		1664	3.40	5.84	1.22	2.71	3.77
69		1526	3.49	6.02	1.64	2.82	3.96
70		1388	3.90	6.53	1.78	3.07	4.31
70 A		1388	4.42	7.60	2.06	3.54	4.93
71		1250	4.12	7.09	1.93	3.32	4.64
72		1112	4.59	7.89	2.13	3.67	5.11
72 A		1112	4.11	7.07	1.93	3.32	4.66
73		974	3.38	5.82	1.61	2.77	3.93
74		836	3.65	6.28	1.69	2.91	4.05
75	698	4.22	7.25	1.97	3.39	4.74	
76	S 22	1802	2.91	5.02	1.38	2.37	3.36
77		1664	3.04	5.23	1.45	2.50	3.58
78		1526	3.67	6.31	1.72	2.96	4.16
79		1388	3.59	6.17	1.67	2.88	4.02
80		1250	3.62	6.23	1.68	2.89	4.01
81		1112	3.66	6.30	1.75	3.01	4.31
82		974	3.62	6.23	1.70	2.92	4.11
83		836	4.01	6.89	1.88	3.24	4.57
84		698	3.49	6.00	1.65	2.83	3.98

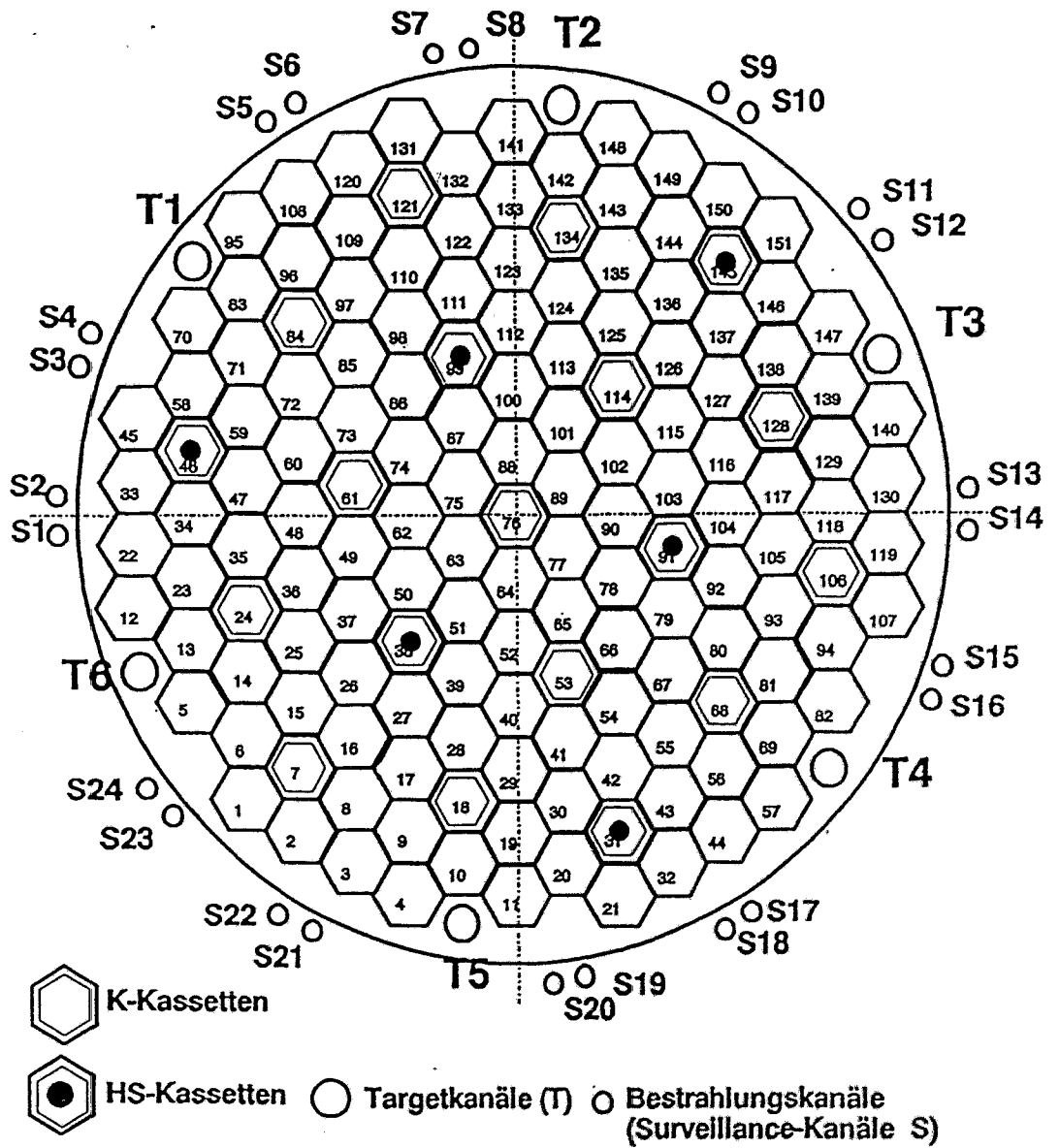


Abb. 1 Bestrahlungspositionen im WWER-2 Rheinsberg

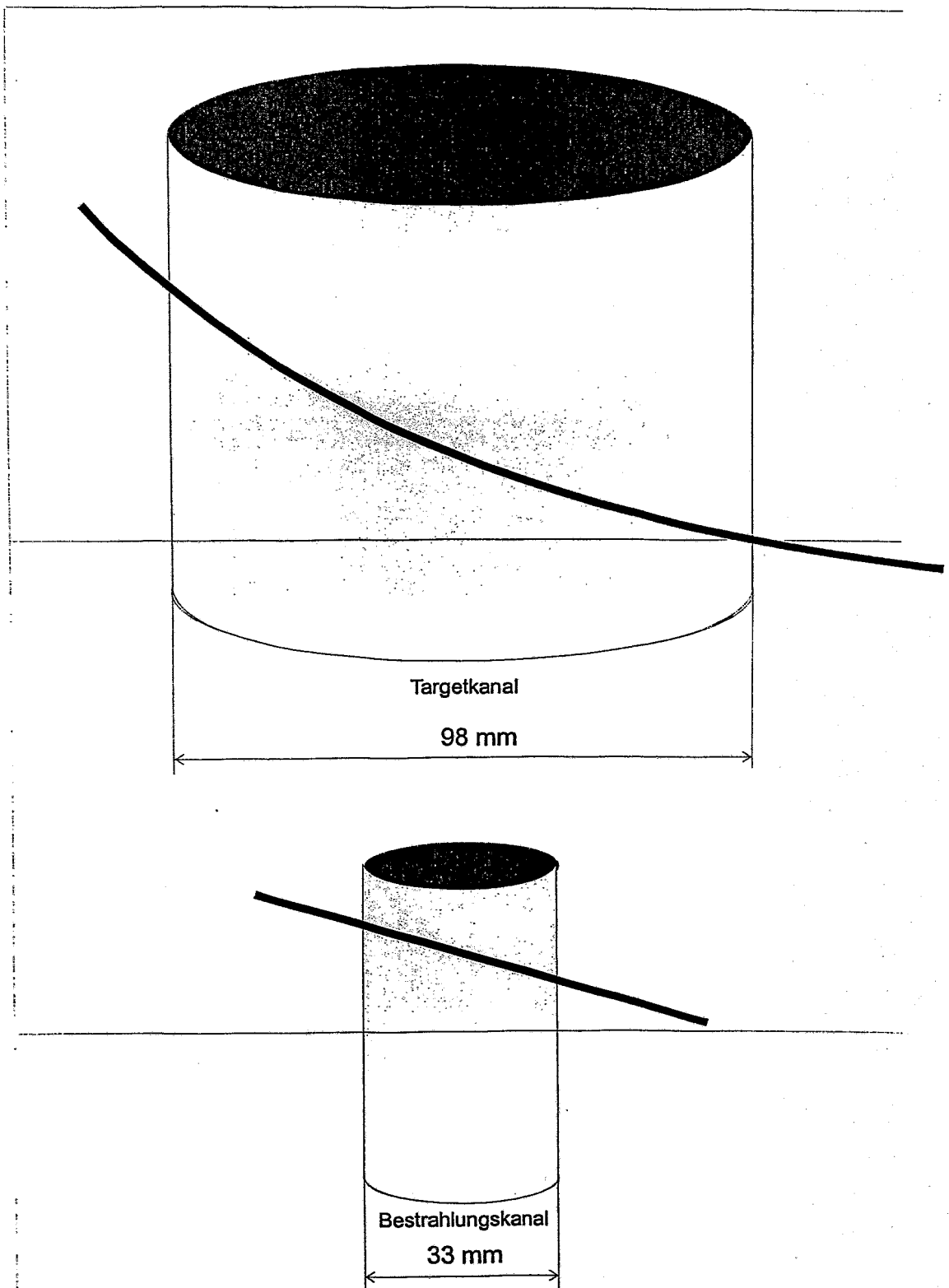
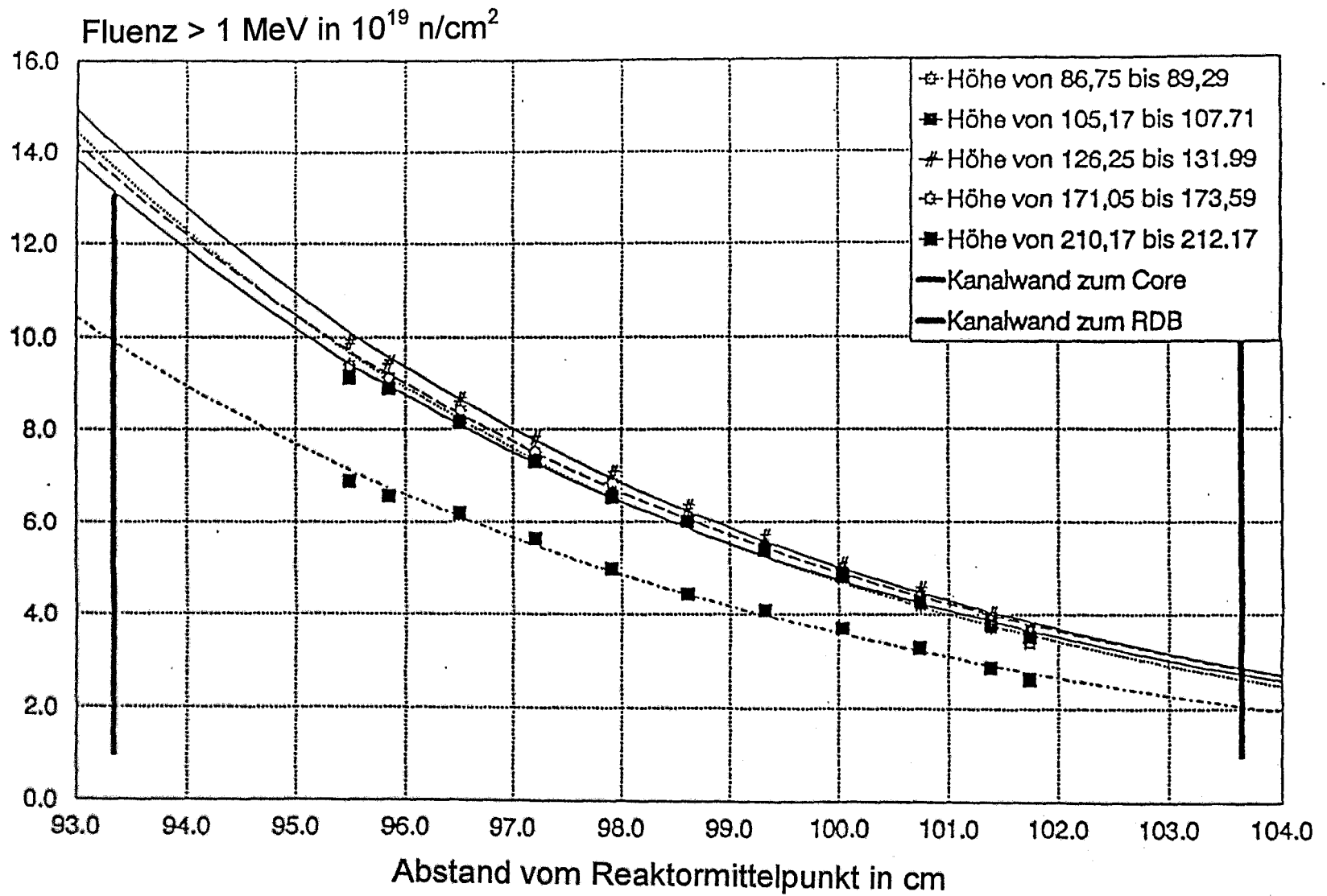


Abb. 2 Radiale Neutronenflussverläufe an den Bestrahlungspositionen für die Target- und Bestrahlungskanäle

Abb. 3

Axiale Fluenzverteilung eines Targetkanals



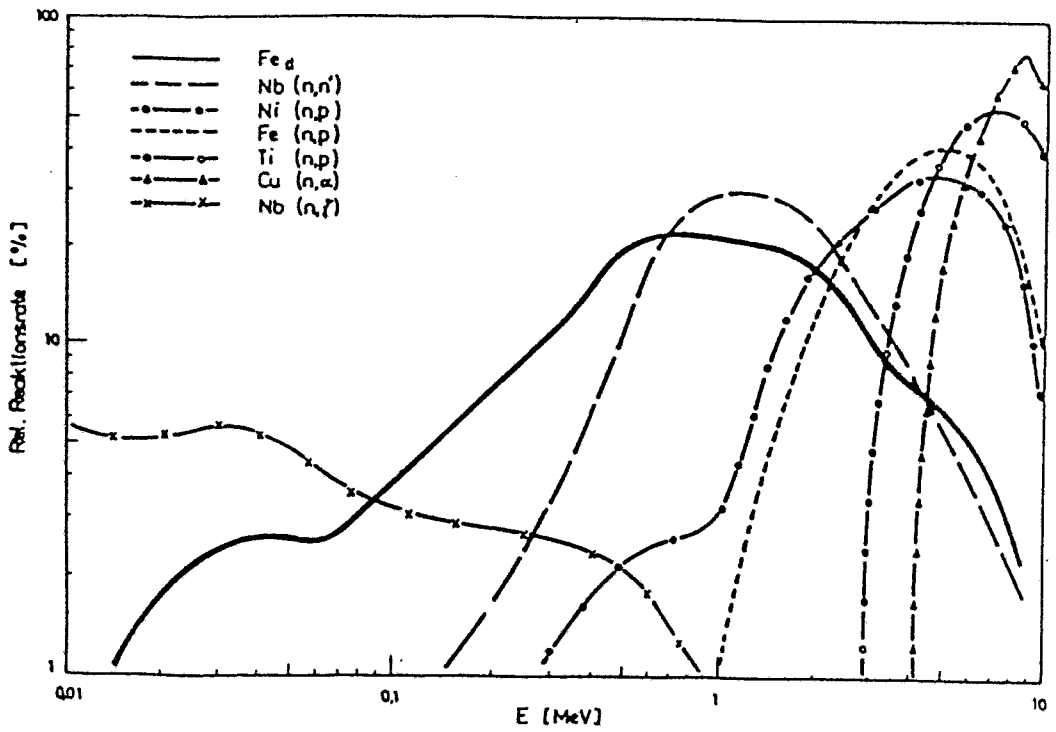


Abb. 4 Ansprechfunktion von Aktivierungsdetektoren und der Verlagerungsschädigung von Eisen Fe_d [15]

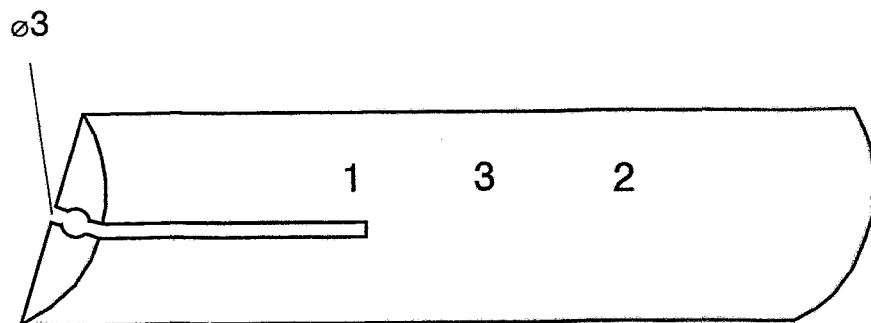
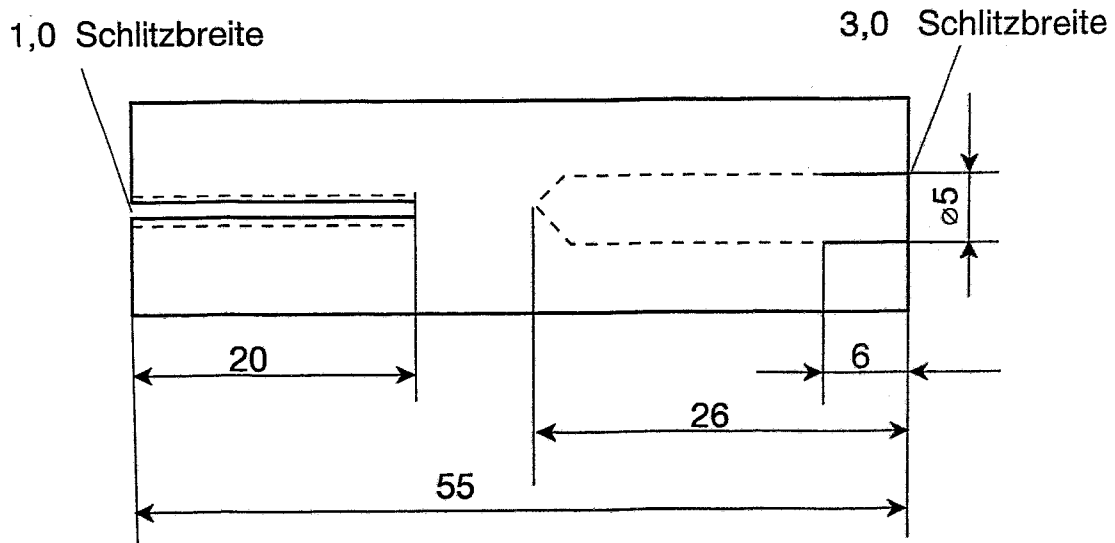
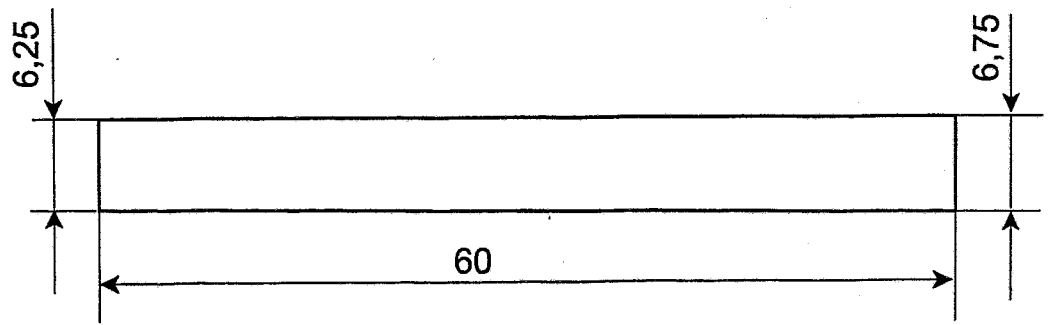


Abb. 5 Beilage zur Aufnahme der Monitore in den Experimenten RH 1, 3, 4 und 5

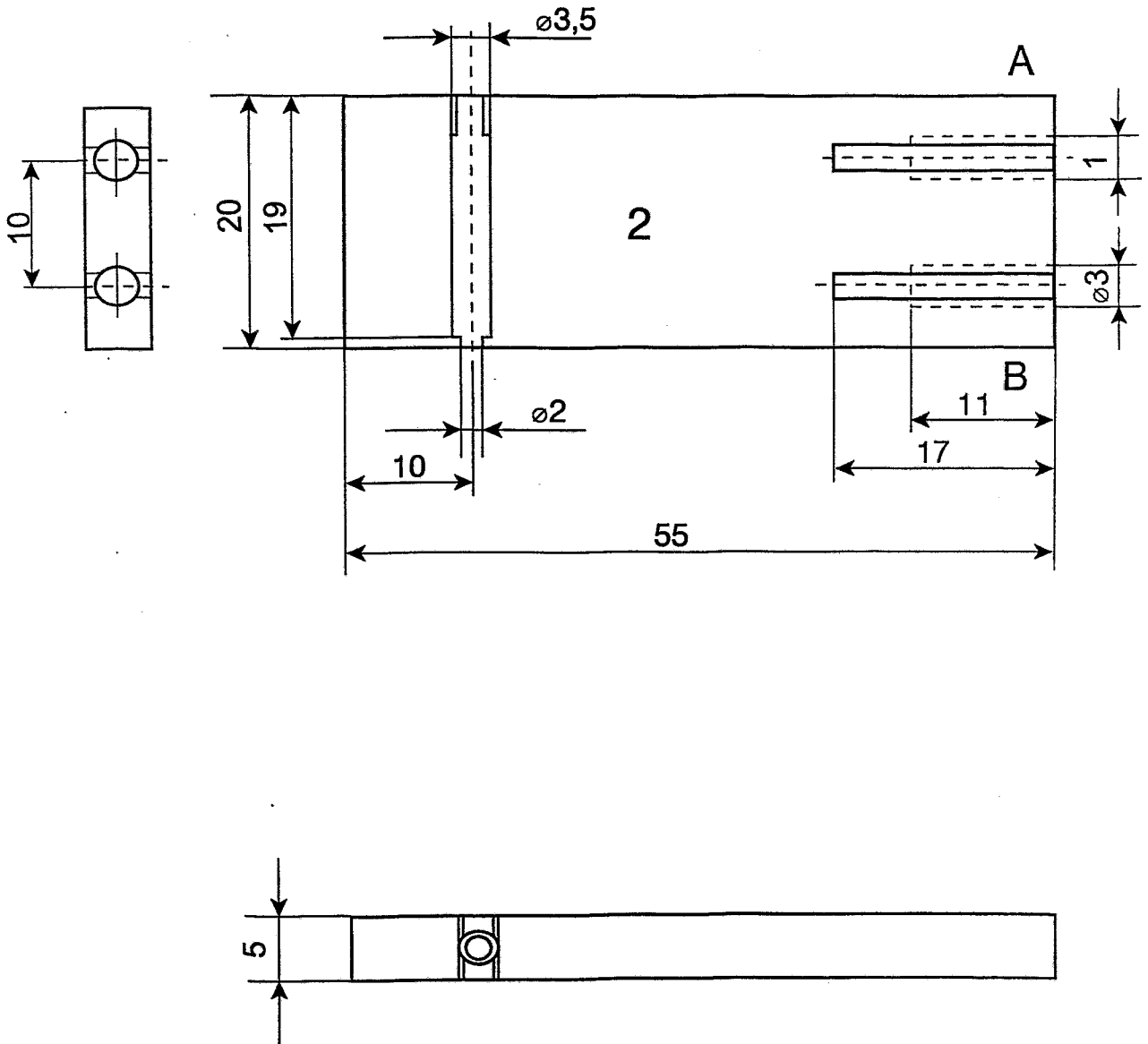
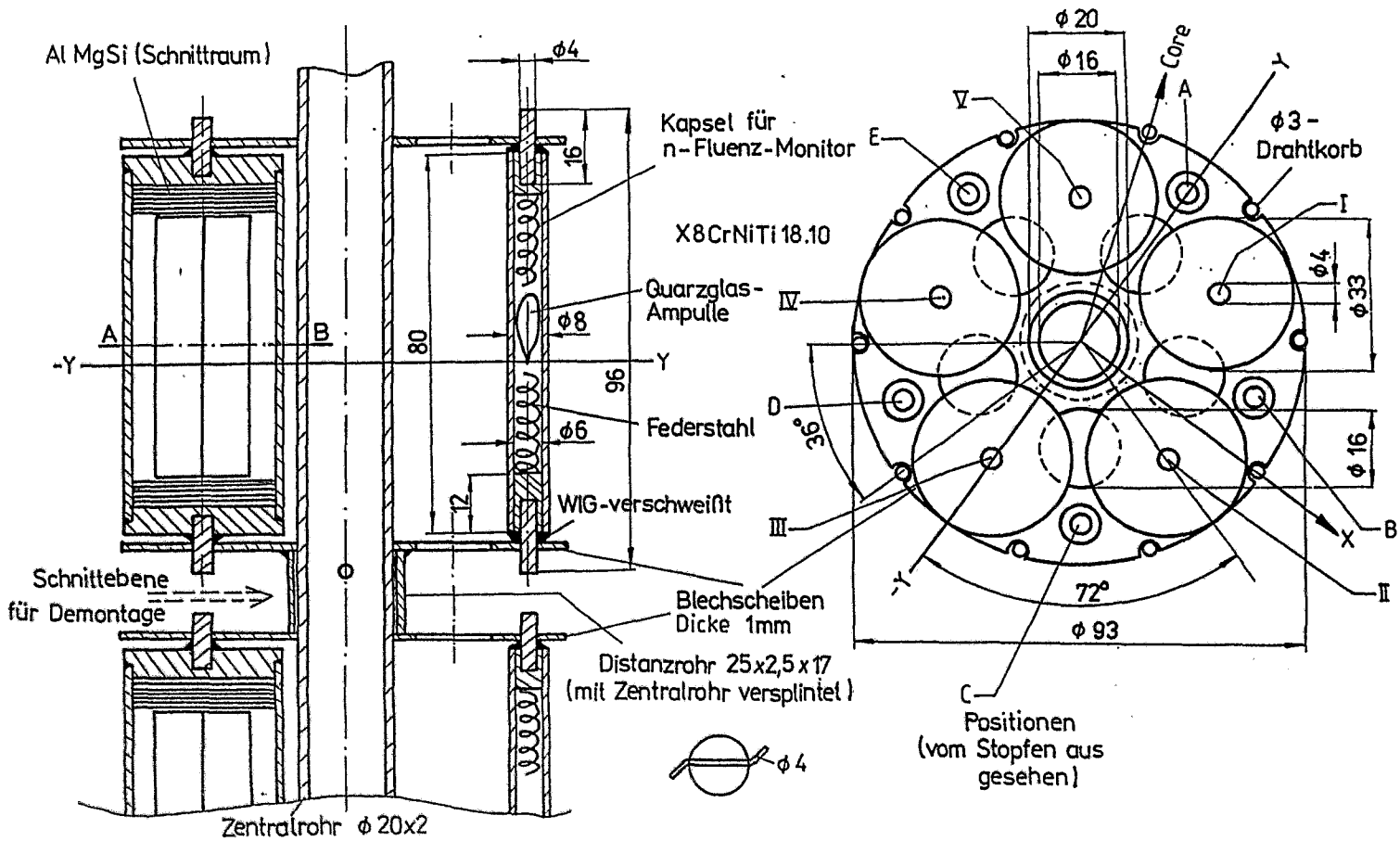
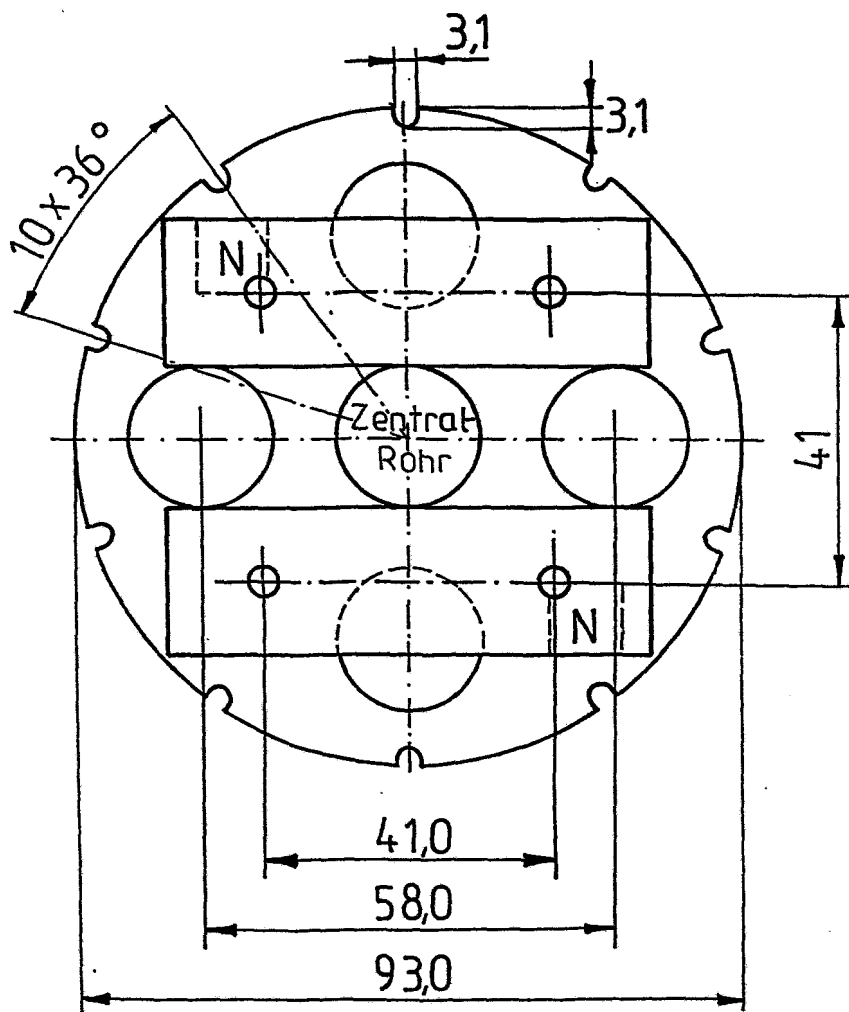


Abb. 6 Beilage zur Aufnahme der Monitore in den Experimenten RH 6, und RH 8

Abb. 7

Anordnung der Monitore im Experiment RH 2





N - Position der Neutronenfluenzmonitore

Material X8 Cr Ni Ti 18.10

Scheiben 1,0 bzw. 1,5 dick

Zentralrohr $\phi 20 \times 2$

Abb. 8

Querschnitt durch eine Bestrahlungskassette im Experiment RH 7 mit den Positionen der Neutronenfluenzmonitore