Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/).

DIPLOMARBEIT

Die Verteilung des Linearen Energietransfers LET in einem menschlichen Phantom in Neutronenfeldern

Ausgeführt am Atominstitut der Österreichischen Universitäten

unter der Anleitung von Univ. Prof. Dr. DI Vana Norbert

durch

Boris Kostresevic
Treustrasse 32/6
A-1200 Wien

Wien, 2004 _____

Danksagung

Ich möchte mich bei meinen Eltern und meiner ganzen Familie für ihr Vertrauen und ihre Unterstützung, ohne die mein Studium nicht möglich gewesen wäre, ganz herzlich bedanken.

Mein Dank gilt Hrn. Univ. Prof. Dr. DI Vana N. für die Möglichkeit in diesem interessanten Gebiet zu arbeiten, und für seine Betreuung und Hilfestellung während der gesamten Arbeit.

Bedanken möchte ich mich bei Hrn. Ing. Fugger M. und Hrn. Dr. DI Hajek M. für die Ratschläge, die zahlreichen Diskussionen und insbesondere für die unermüdliche und intensive Betreuung bei der Durchführung der zeitaufwendigen Bestrahlungen.

Ferner gilt mein Dank Hrn. Dr. DI Villa M. für die Koordination und die Unterstützung bei der Durchführung der Bestrahlungen am Reaktor.

Weiters bedanke ich mich bei allen Kollegen des Institutes und allen anderen die in irgendeiner Form zum Gelingen dieser Diplomarbeit beitrugen.

INHALTSVERZEICHNIS

I EINLEITUNG 1

II DOSIMETRIE, DOSISKENNGRÖßEN 2

II.1 Aktivität A 2

II.2 Absorbierte Dosis D 3

II.3 Ionendosis J 3

II.4 Dosisäquivalent H 4

II.5 Linearer Energie Transfer LET 4

II.6 Relative biologische Wirksamkeit RBW 6

II.7 Organdosis H_T, Effektive Dosis E 7

II.8 Sekundärteilchengleichgewicht (STG) 7

III THERMOLUMINESZENZ, TL-DOSIMETER 8

III.1 Bändermodell, Haftstellen (traps), Löcher (holes) 8

III.2 Allgemeine Kenngrößen von TL-Dosimetern 9
III.2.1 Dosischarakteristik 10
III.2.2 Empfindlichkeit 11
III.2.3 Energieabhängigkeit, LET-Abhängigkeit 11
III.2.4 Fading 12

III.3 TLD-600 und TLD-700 12

IV WECHSELWIRKUNGEN IONISIERENDER STRAHLUNG MIT MATERIE 14

IV.1 Gammastrahlung 14
IV.1.1 Photoeffekt, Comptoneffekt, Paarbildung 14
IV.1.2 Schwächungs- und Absorptionskoeffizienten 16

IV.2 Kerma 17

IV.3 Neutronenstrahlung 19
IV.3.1 Wechselwirkungen von Neutronen mit Materie 20

V PHANTOME 23

V.1 ICRU-Kugel 24

VI KALIBRIERUNG DER TL-DOSIMETER 26

VI.1 Ausheizen der Dosimeter **26**

VI.2 Gammakalibrierung **26**

VI.3 Flussdichte thermischer Neutronen an der NRA **29**
VI.3.1 Sondenaktivierung 29

VI.4 Neutronen-Kalibrierung **33**

VI.5 HTR Methode, HTR-LET-Kalibrierung **35**

VI.6 Freiluft-Neutronenkalibrierung **36**
VI.6.1 Ergebnis der Freiluftkalibrierung 38

VI.7 LET-Abhängigkeit der Efficiency **40**

VII TL-MESSUNG UND AUSWERTUNG 42

VIII PHANTOMBESTRAHLUNGEN 44

VIII.1 Bestrahlungen an der thermischen Säule **45**
VIII.1.1 Bestrahlung EXP1 46
VIII.1.2 Bestrahlung EXP3 46
VIII.1.3 Bestrahlung EXP4 46
VIII.1.4 Thermischer Neutronenfluss im Phantom 47
VIII.1.5 HTR-Verteilung und gammaäquivalente Dosisleistung im Phantom 50

VIII.2 Bestrahlung EXP2 mit der Pu-Be Quelle **53**
VIII.2.1 Thermischer Neutronenfluss im Phantom 53
VIII.2.2 HTR-Verteilung und gammaäquivalente Dosisleistung im Phantom 56

VIII.3 Bestrahlung EXP5 im Trockenbestrahlungsraum **58**
VIII.3.1 Thermischer Neutronenfluss im Phantom 58
VIII.3.2 HTR-Verteilung und gammaäquivalente Dosisleistung im Phantom 62

IX DOSISBESTIMMUNG UND LET-VERTEILUNG IM PHANTOM 65

IX.1 Bestrahlungen an der thermischen Säule **68**

IX.2 Bestrahlung mit Pu-Be Quelle **73**

IX.3 Bestrahlung im Trockenbestrahlungsraum des Reaktors **77**

IX.4 Eigendosis der Dosimeter **81**

IX.5 Fehlerabschätzung **82**

X ZUSAMMENFASSUNG 84

XI ANHANG 85

ANHANG A **85**

ANHANG B **91**

Abbildungsverzeichnis **95**

Literaturverzeichnis **96**

I Einleitung

Thermolumineszenzdosimeter (TLD) spielen seit geraumer Zeit eine zentrale Rolle in der Dosimetrie ionisierender Strahlung. Auf Grund ihrer kleinen Dimensionen (kleinvolumige, leichte Kristallchips) und der einfachen Handhabung, finden diese passiven Detektoren breite Anwendung in der Medizin, Technik, Orts- und Personendosimetrie von Kerntechnischen Anlagen und in der Weltraumdosimetrie. Da es in den seltensten Fällen möglich ist, „In Vivo" Messungen durchzuführen, bedient man sich menschlicher Phantome um die Dosis im menschlichen Gewebe bei einer Bestrahlung abschätzen zu können. Ihre Zusammensetzung simuliert sehr gut menschliches Weichteilgewebe im Bezug auf relevante strahlenphysikalische Eigenschaften.
Der Zusammenhang zwischen dem Linearen Energie Transfer einer Strahlung mit der Form (Struktur) der Lichtemissionskurve eines TL-Dosimeters wurde bei vielen Arbeiten untersucht. Die am Atominstitut entwickelte HTR-Methode (High Temperature Ratio) zur Auswertung von TL-Messungen erlaubt nicht nur die Bestimmung der absorbierten Energiedosis, sondern auch eine Abschätzung der biologisch relevanten Dosisbeiträge der verschiedenen Komponenten eines gemischten Strahlungsfeldes.
Das Ziel dieser Diplomarbeit war es Energiedosismessungen in einem menschlichen Phantom in Neutronen-Gamma Mischfeldern durchzuführen. Die unterschiedlichen Beiträge zur Gesamtdosis durch thermische Neutronen und schnelle Neutronen, beziehungsweise Gammastrahlung, sollten getrennt bewertet werden. Dazu sollte einerseits der Fluss thermischer Neutronen im Phantom mittels der Pair-Methode festgestellt, und parallel die Verteilung des Linearen Energie Transfers (LET) mittels der HTR-Methode bestimmt werden. Darüber hinaus, sollten Streueffekte von Neutronen an Knochen (simuliert durch einen Streukörper aus Aluminium) qualitativ untersucht werden. Alle Messungen sollten nur mit kommerziell erhältlichen Dosimetern der Typen TLD-600 und TLD-700 (je 50 Stück) vorgenommen werden.

Die Dosimeter, das verwendete Phantom, die ^{137}Cs Gammaquelle samt Bestrahlungsanlage, die ^{239}Pu-^{9}Be Quelle und die TL-Messanlage samt der Auswertesoftware (TLD 98) wurden vom Atominstitut bereitgestellt. Kalibrierbestrahlungen und Phantombestrahlungen wurden auch an der Neutronen Radiographieanlage (NRA) an der thermischen Säule und im Trockenbestrahlungsraum des Reaktors (Typ Triga Mark II) am Atominstitut vorgenommen. Das Literaturverzeichnis am Ende dieser Diplomarbeit enthält Werke aus denen relevante Graphiken, Tabellen und Daten übernommen wurden (im Text mit Referenznummern versehen), und auch weiterführende Literatur die als Informationsquelle verwendet wurde.

II Dosimetrie, Dosiskenngrößen

Der Strahlenschutz hat die Aufgabe die Strahlenbelastung für den Menschen zu überwachen und sie zu limitieren. Um gesundheitliche Gefährdung und mögliche Schäden bestmöglich zu verhindern gilt das „ALARA"-Prinzip[14] (as low as reasonably achievable) für die Strahlenexponierung beim Umgang mit natürlichen oder künstlichen Quellen ionisierender Strahlung.
Ionisierende Strahlung wird eingeteilt in:

-*direkt ionisierend* = geladene Teilchen (Elektronen, Protonen, Alphateilchen) deren Energie ausreicht um Atome durch Stöße oder Coulombkräfte zu ionisieren

-*indirekt ionisierend* = Gammastrahlung (Photonen) und ungeladene Teilchen (Neutronen), die direkt ionisierende Sekundärteilchen freisetzen, oder Kernprozesse initiieren können

Beim Nachweis ionisierender Strahlung wird zwischen 3 physikalischen Messaufgaben unterschieden[14]:

- die Bestimmung der Intensität der Quelle, Messung der Aktivität einer Substanz
- die Dosisbestimmung, d.h. die von der Strahlung auf das Gewebe übertragene Energie
- die Energiebestimmung der einzelnen Teilchen oder Quanten, Radionuklidunterscheidung

Diese Messaufgaben lassen sich in präventive Messungen und Kontrollmessungen einteilen (Ortsdosismessungen und Personendosimetrie), und bedienen sich mehrerer Kenngrößen für die quantitative oder qualitative Bestimmung und Beschreibung der unterschiedlichen Wechselwirkungen der Strahlung mit der Materie.

Viele für den Strahlenschutz relevanten Größen, wie die biologisch relevante Dosis oder die Personendosis, sind messtechnisch nicht direkt erfassbar, und müssen aus den messbaren Größen berechnet werden.
Im folgenden werden die grundlegenden dosimetrischen Größen, deren Definitionen und Einheiten angeführt.

II.1 Aktivität A

Die Aktivität A einer Quelle ist die Zahl der radioaktiven Zerfälle pro Sekunde, mit der SI-Einheit 1 [s^{-1}] (Becquerel Bq)

Daraus lässt sich auch der Teilchenfluss einer Quelle, die Zahl von Teilchen die in ein Medium eintreten, definieren. Der Teilchenfluss einer Punktquelle ist die Anzahl von Teilchen die im Abstand r die Fläche einer Kugel mit dem gleichen Radius r pro Sekunde passieren.

$$\Phi\ [\text{Teilchenzahl} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}] = A \cdot f_i / 4\pi r^2 \qquad \textit{(Gleichung 2.1)}$$

f_i Wahrscheinlichkeit für eine Zerfallsart

II.2 Absorbierte Dosis D

Beim Durchgang von ionisierender Strahlung durch Materie wird die Strahlungsenergie durch verschiedene Wechselwirkungsprozesse übertragen. Die *Energiebilanz*[8] für ein beliebiges Volumen ist

$$E_E - E_A - E_R = E_D \qquad \textit{(Gleichung 2.2)}$$

E_E kinetische Energie aller direkt oder indirekt ionisierenden Teilchen, die in das Volumen V eintreten

E_A kinetische Energie aller direkt oder indirekt ionisierenden Teilchen, die aus dem Volumen V austreten

E_R Energieäquivalent der Erhöhung der Ruhemasse, wenn Kernprozesse im Volumen V stattgefunden haben

E_D netto auf das Volumen übertragene Energie

E_E und E_A enthalten also auch die Energie von freigesetzten Sekundärteilchen, die in das Volumen eintreten oder dieses verlassen, wobei Bremsstrahlungsverluste auch berücksichtigt werden müssen.

Die Absorbierte Energiedosis D ist die auf ein Material mit (homogener) Masse Δm übertragene Strahlungsenergie ΔE_D,

$$D = \Delta E_D \div \Delta m = \Delta E_D \div (\rho \cdot \Delta V) \qquad \textit{(Gleichung 2.3)}$$

SI-Einheit ist Gray: 1 [Gy] = 1 [J/kg]

Eine Energiedosis von 50 mGy würde im menschlichen Körper, bei vollständiger Umwandlung in Wärme, eine Temperaturerhöhung von 10^{-5} °C verursachen. Deshalb ist die Energiedosis im menschlichen Körper messtechnisch kaum direkt erfassbar.

II.3 Ionendosis J

Ionendosis J beschreibt die ionisierende Eigenschaft der Strahlung wobei meistens als Vergleichsmedium die Luft der Masse m dient, in der Ionen mit einer elektrischen Ladung q gebildet werden,

$$J = \Delta q \div \Delta m \qquad \textit{(Gleichung 2.4)}$$

SI-Einheit ist Coulomb pro Kilogramm Luft 1 [C/kg] = $2{,}58 \cdot 10^4$ [R] Röntgen (1C = 1A · 1s)

Bei vielen Messsystemen ist die Ionendosis die primäre Messgröße, die dann auf die Energiedosis im Material umgerechnet werden muss.

Für Luft und Photonenstrahlung folgt aus der Energie E_L, die für die Erzeugung von einem Ladungsträgerpaar (Elementarladung $e = 1{,}602177 \cdot 10^{-19}$ C) notwendig ist:

$$D_{Luft} = J \cdot E_L \div e \qquad \textit{(Gleichung 2.5)}$$

Die Berechnung der absorbierten Dosis erfolgt dann unter Berücksichtigung der Massenenergieabsorptionskoeffizienten, die im Kapitel III erläutert werden

$$D_X = \left\{ (\mu/\rho)_X \div (\mu/\rho)_L \right\} \cdot D_L \qquad \textit{(Gleichung 2.6)}$$

$D_{X,L}$ absorbierte Dosis im Material X, Luft L

$(\mu/\rho)_{X,L}$ Massenenergieabsorptionskoeffizienten vom Material X und Luft L

II.4 Dosisäquivalent H

Die absorbierte Dosis ist definitionsgemäß unabhängig von der Strahlenart und liefert daher keine Aussagen über die biologische Wirksamkeit der absorbierten Strahlung. Schon frühe strahlenbiologische Untersuchungen bewiesen aber eindeutig einen Zusammenhang von biologischen Effekten mit der Art und Energie der ionisierenden Strahlung. Gleiche Energiedosis, verursacht durch verschiedene Strahlen, führt zu verschieden starken Effekten im Gewebe. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurde der Begriff des Dosisäquivalents eingeführt. Dosisäquivalent H_R ist das Produkt der absorbierten Dosis und einem dimensionslosen Qualitätsfaktor Q_R, der ein Maß für die biologische Wirksamkeit der Strahlungsart R ist

$$H_R = \Sigma_R D \cdot Q_R \qquad \textit{(Gleichung 2.7)}$$

SI-Einheit ist Sievert: 1 [Sv] = 1 [J/kg· Q]

Ortsdosisgrößen dienen zur Charakterisierung der Strahlenexponierung in einem Phantom das dem menschlichen Körper entspricht. Personendosisgrößen dienen dazu, Schätzwerte zum Vergleich mit festgelegten Limitgrößen zu liefern. Zwei spezifische Äquivalentdosisgrößen wurden von der ICRP (International Commission on Radiation Protection) definiert, die *Umgebungsäquivalentdosis* und die *Personenäquivalentdosis*. Im Kapitel über Phantome werden diese zwei Dosisgrößen näher erläutert.

Der Qualitätsfaktor Q einer Strahlungsart und die damit korrelierte *Relative Biologische Wirksamkeit* (RBW) ist abhängig vom Linearen Energie Transfer dieser Strahlung.

II.5 Linearer Energie Transfer LET

Linearer Energie Transfer beschreibt die Energiedichteverteilung bedingt durch geladene Teilchen auf und in unmittelbarer Umgebung ihrer Bahn durch das Material. Der LET geladener Teilchen in einem Medium ist der Quotient aus dem mittleren Energieverlust dE, den das Teilchen durch Stöße erleidet, bei denen der Energieverlust kleiner ist als eine vorgegebene Energie Δ, und dem dabei zurückgelegten Weg des Teilchens dx[5].

$$(LET)_\Delta = (dE / dx)_\Delta \qquad \textit{(Gleichung 2.8)}$$

Die SI-Einheit ist [J/m], aber die am häufigsten verwendete Einheit ist [keV/µm]. Die Energiegrenze Δ wird vereinbarungsgemäß in eV angegeben. Da der LET laut Definition auf

Stoßwechselwirkungen beschränkt ist, werden keine Energieabgaben durch Strahlungsbremsung des Teilchens berücksichtigt.
Direkt oder indirekt ionisierende Strahlung setzt bei Wechselwirkungen mit Materie geladene Sekundärteilchen frei. Die Art der freigesetzten Teilchen und ihre Reichweite hängen von der spektralen Zusammensetzung des primären Feldes und der Ordnungszahl Z des Targetmaterials ab. Der LET einer Strahlungsart ist demzufolge keine Konstante, er ändert sich mit der Reichweite des Teilchens im Material. Er ist nicht dem totalen Bremsvermögen S (Stopping Power, zusammengesetzt aus Stoßbremsvermögen und Strahlungsbremsvermögen, $S = S_{kol} + S_{str} = dE/dx$)[1] eines Materials für ionisierende Teilchen gleichzusetzen, obwohl die Definition identisch ist. Für $\Delta \rightarrow \infty$ geht der LET aber in das Stoßbremsvermögen S_{kol} über ($LET_\infty = S_{kol}$). Man unterscheidet zwischen locker ionisierender ($LET_\infty < 3{,}5$ keV/µm) und dicht ionisierender ($LET_\infty > 3{,}5$ keV/µm) Strahlung. Elektronen und hochenergetische Protonen zählen zu locker ionisierender Strahlung, da ihre Wechselwirkungen mit dem Material gleichmäßig über das bestrahlte Volumen verteilt sind. Schwere geladene Teilchen wie Alphateilchen, HCP (High Charged Particles) und Deuteronen zählen zu dicht ionisierender Strahlung. Bei ihnen befinden sich die Ionisationsereignisse in sehr kleinen Volumina unmittelbar um die Bahn des Teilchens.

Über die zurückgelegte Weglänge nimmt die kinetische Energie des geladenen Partikels durch Abbremsung auf Grund von Wechselwirkungen mit den Atomen des Materials ab. Die auf das Material übertragene Energie und die Anzahl der erzeugten Ladungen pro Wegstrecke (=LET) nehmen mit steigender Eindringtiefe zu. Sehr häufig findet die höchste Energieübertragung auf ein Materialatom am Ende der Teilchenbahn statt. Ab einer Tiefe R, die ihre mittlere Reichweite im Absorber darstellt, besitzen die Teilchen nur mehr Restenergien die zu Anregungen aber keinen Ionisationen mehr führen. Der Bragg-Peak, Abbildung 2a, stellt die maximale Energieübertragung pro Weglänge zum Ende der Teilchenbahn dar.

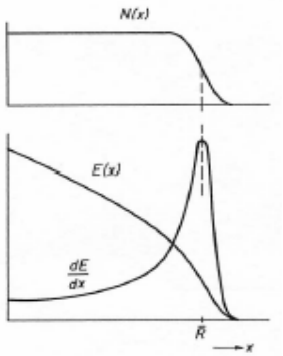


Abbildung 2a: Bragg-Peak des LET, Energie E und Anzahl N der Teilchen, mittlere Reichweite R

Die Breite des Bragg-Peaks hängt von der Anzahl der eintretenden Teilchen und der Breite ihrer Energieverteilung ab.
Praktische Anwendung findet die Zunahme der Energieabgabe am Ende der Teilchenbahn beispielsweise in der Medizin. Mit hochenergetischen Teilchen können hohe Energiedosen in ein Zielvolumen in größeren Tiefen geliefert, die Dosis auf dem Weg durch den Körper (durch gesundes Gewebe) aber gleichzeitig so klein wie möglich gehalten werden.
Der Zusammenhang zwischen dem LET der absorbierten Strahlung (in Wasser) und dem Qualitätsfaktor Q wurde von der International Comission on Radiological Protection (ICRP) festgelegt um die Wirkungen der unterschiedlichen Strahlenarten bewerten zu können. Dieser Zusammenhang wird in der Tabelle 2.1 und der Abbildung 2b dargestellt.

LET keV/µm in Wasser	Q nach ICRP-60
LET < 10	1
10 < LET <100	(0,32 · LET) – 2,2
LET > 100	$300 / \sqrt{LET}$

LET keV/µm in Wasser	Q nach ICRP-26
LET ≤ 3,5	1
7	2
23	5
53	10
175	20

Tabelle 2.1: Qualitätsfaktoren als Funktion von LET nach ICRP-60[4] und ICRP-26[5]

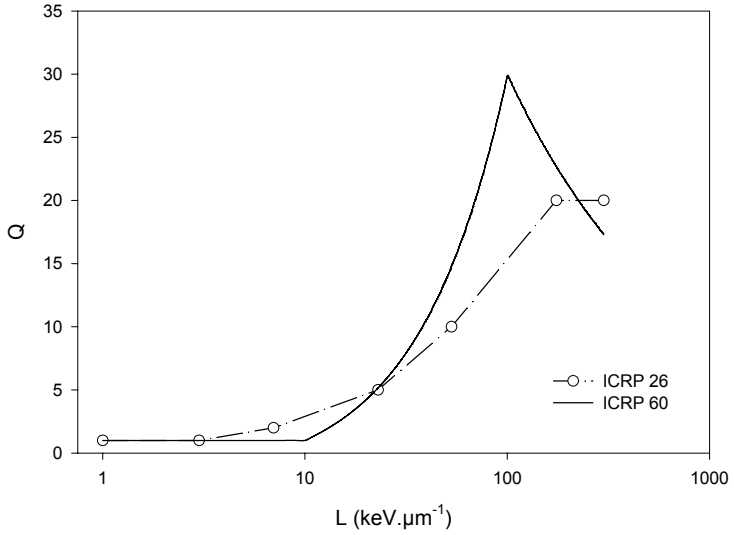


Abbildung 2b: Q(LET) nach ICRP-60 und ICRP-26

II.6 Relative biologische Wirksamkeit RBW

RBW ist definiert als das Verhältnis von biologischen Effekten, die durch Absorption einer Dosis D einer bestimmten Strahlenart R induziert werden, zu jenen, die nach Absorption der gleichen Dosis bei einer Bestrahlung mit einer Referenzstrahlung auftreten (RBW = D_R / D_{Ref}). Meistens wird eine Niedrig-LET-Strahlung wie Röntgenstrahlung oder ^{60}Co Gammastrahlung (1,17 und 1,33 MeV) als Referenzstrahlung eingesetzt.
Die biologische Wirksamkeit einer Strahlenart wird in der Strahlenbiologie anhand von Zellschädigungen eingestuft. Dabei unterscheidet man zwischen stochastischen und deterministischen Strahlenwirkungen. Deterministische Wirkungen sind mit einem Zellschaden oder Zelltod verbunden und sind an definierte Schwellwerte für das Eintreten dieser Effekte gekoppelt. Stochastische Wirkungen werden durch Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Strahleneffekten beschrieben. Der Schweregrad dieser Effekte hängt aber nicht von der Energiedosis ab.

Die Wahl und genaue Angabe der Referenzstrahlung ist zur Bewertung von RBW Faktoren von großer Bedeutung. So ist beispielsweise $RBW_{250keV} \approx 2\ RBW_{Co\text{-}60}$[1] für stochastische Schäden. Im Allgemeinen gilt, dass Hoch-LET-Strahlung um bis zu 10-fach höhere biologische Wirksamkeit als Niedrig-LET-Strahlung besitzt.

II.7 Organdosis H_T, Effektive Dosis E

Organdosis H_T und Effektive Dosis E werden unter Verwendung von Qualitätsfaktoren Q_R für Strahlung R und verschiedenen Wichtungsfaktoren w_T für unterschiedliche Gewebsarten berechnet. Sie sind ein Maß für die stochastischen Strahlenrisiken für die betroffenen Organe und Gewebe.

$$E = \Sigma_T\, w_T\, \Sigma_R\, Q_R \cdot D \qquad \textit{(Gleichung 2.9)}$$

Einige Organwichtungsfaktoren w_T sind in der Tabelle 2.2 angeführt.

Gewebe/Organ	w_T
Knochenmark	0,12
Lunge	0,12
Haut	0,01
Leber	0,05
Hoden	0,20

Tabelle 2.2: w_T für verschiedene Gewebsarten

II.8 Sekundärteilchengleichgewicht (STG)

Eine wichtige Voraussetzung zur Messung der absorbierten Dosis ist, dass die gesamte auf das Volumen V übertragene Energie ΔE_D der tatsächlich absorbierten Energie ΔE_{abs} gleich ist ($\Delta E_D = \Delta E_{abs}$).
Dies ist erfüllt wenn die Anzahl und Energien der in das Volumen eintretenden Sekundärteilchen gleich der Anzahl und Energien der aus dem Volumen austretenden Sekundärteilchen sind = *Sekundärteilchengleichgewicht*.
Im Kapitel 4 wird das STG ausführlicher behandelt. Für γ-Strahlung mit Energien bis 3 MeV herrscht STG dann, wenn die Reichweite der Sekundärteilchen ca. 1/10 der Halbwertsschicht (Schichtdicke die einen Intensitätsabfall der γ-Strahlung um 50% bewirkt) beträgt.

III Thermolumineszenz, TL-Dosimeter

Thermolumineszenz ist die thermisch angeregte Lichtemission eines Isolators oder Halbleiters nach vorhergehender Absorption von Energie. Die Bedingung, dass eine Energieaufnahme vor der thermischen Anregung stattfindet, unterscheidet die Thermolumineszenz von der Planck'schen Strahlung (Schwarzkörperstrahlung) die immer beim Erwärmen eines Festkörpers entsteht.
Die Anregung kann auf verschiedenen Wegen erfolgen z.B. durch Licht = Photolumineszenz, chemische Reaktionen = Chemolumineszenz, ionisierende Strahlung = Radiolumineszenz.
Die Intensität der Lichtemission ist charakteristisch für die Substanz. In einem gewissen Dosisbereich ist sie proportional der in der Substanz absorbierten Energie. Erhitzt man ein vorher bestrahltes TL-Material erhält man einen für die Substanz und die Bestrahlungsbedingungen charakteristischen Lumineszenzverlauf als Funktion der Temperatur, genannt *TL-Glowkurve*, Abbildung 3a.

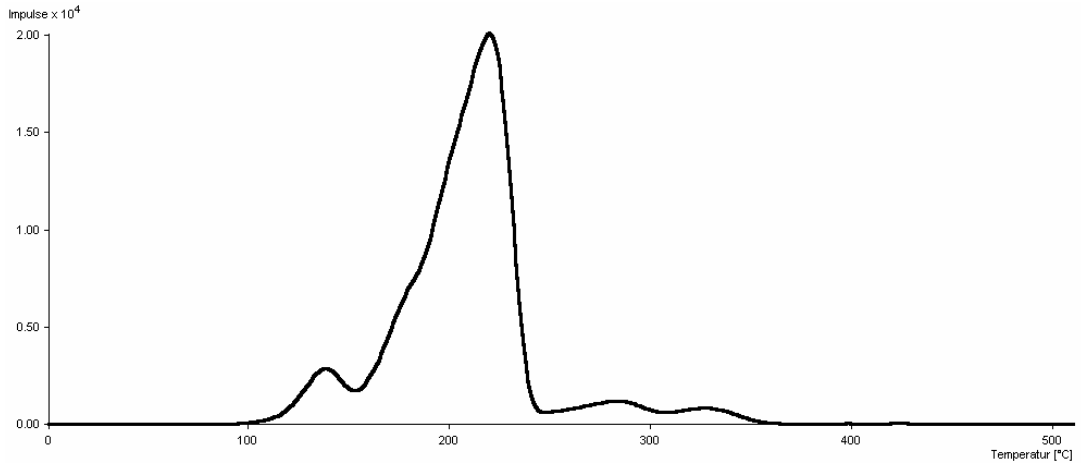


Abbildung 3a: Typische Glowkurve von LiF:Mg,Ti (TLD-700 Gammakalibrierbestrahlung)

Der Entstehungsmechanismus der Thermolumineszenz ist sehr komplex und wird von mehreren Modellen qualitativ und quantitativ beschrieben. Für detaillierte Diskussion der verschiedenen Modelle siehe[3].
Mit einigen einfachen Überlegungen soll hier das grundlegende Prinzip diskutiert werden.

III.1 Bändermodell, Haftstellen (traps), Löcher (holes)

In einem Festkörper (Isolator) sind bei niederen Temperaturen alle Elektronen fest an die Atome gebunden. Im Energiebändermodell wird dies durch ein voll besetztes Valenzband und ein leeres Leitungsband dargestellt. Die Bandlücke (verbotene Zone) dazwischen können Elektronen nur durch Anregung überwinden.

Betrachtet man ein Kristallgitter, so erkennt man innerhalb der regelmäßigen Struktur verschiedene Fehlstellen z.B. lineare Defekte (Versetzungen) oder Verunreinigungen durch Fremdatome, -Ione oder Moleküle. Diese „Defekte" erzeugen mögliche Energieniveaus in der verbotenen Zone und wirken als *Haftstellen* (traps) für die Elektronen im Kristallgitter. Analog

dazu werden Lumineszenz-Zentren erzeugt in denen Defektelektronen (Löcher = holes) gebunden werden können.

Werden Gitter-Atome durch ionisierende Strahlung angeregt, wechseln die Elektronen vom Grundzustand in einen höheren Energiezustand (vom Valenz- ins Leitungsband). Die Rückkehr in den Grundzustand erfolgt nach einer für diese Atome charakteristischen Zeitspanne unter Aussendung von Strahlung. Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit werden aber Ladungsträger auch in den Energieniveaus in der Bandlücke gelagert.

In den Haftstellen in der verbotenen Zone werden die Elektronen, in Lumineszenzzentren die Löcher gelagert. Bei entsprechend „tiefen" Traps erfolgt die Rekombination der Elektronen mit den Löchern in den Lumineszenzzentren erst nach einer energetisch ausreichenden thermischen Anregung. Dieses einfache Bändermodell für die Entstehung der Thermolumineszenz ist in Abbildung 3b[8] dargestellt.

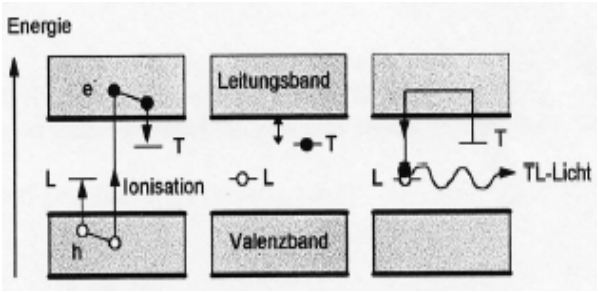


Abbildung 3b: TL-Mechanismus (von Links nach Rechts): Bestrahlung, Speicherung und Ausheizen

III.2 Allgemeine Kenngrößen von TL-Dosimetern

Bei vielen TL-Materialien sind Traps und Lumineszenzzentren in Form von Gitterdefekten oder Fremdatomen natürlich vorhanden. Manche Fehler entstehen auch erst bei der Wechselwirkung mit ionisierender Strahlung. Bei TL-Dosimetermaterialien werden durch gezielten Einbau von Fremdatomen künstliche Traps oder Lumineszenzzentren erzeugt, und so die TL-Eigenschaften verstärkt und optimiert.

Die Messaufgaben der Dosimetrie resultieren in verschiedenen Kriterien bzgl. Auflösung der Dosisverteilung, Empfindlichkeit, Dimension, und Handhabung die von den verwendeten Dosimeter erfüllt werden müssen.

Thermolumineszenzdosimeter (TLD) eignen sich hervorragend für den Einsatz in der Personendosimetrie da ihre effektiven Ordnungszahlen (Kernladungszahlen) Z_{eff} annähernd die Werte von verschiedenen Gewebsarten haben. Somit sind die strahlenphysikalischen Eigenschaften der TLDs für Photonenstrahlung in einem ausgedehnten Energiebereich gewebeäquivalent. Auf Grund der Unterschiede in der Massendichte gilt diese Gewebeäquivalenz allerdings im allgemeinen nicht für Teilchenstrahlung.
Verschiedene Dosimetertypen sind in Pulverform, als Einkristalle oder Kristall-Chips erhältlich. Die Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die gebräuchlichsten Dosimetermaterialien und ihre Eigenschaften. Die angeführten Werte für die Empfindlichkeit sind aus [12] übernommen worden.

TL-Substanz: Aktivator (kommerzielle Bezeichnung)	$T_{Hauptpeak}$ in °C	Z_{eff}	**linearer Bereich des Hauptpeaks** in Gy	**Empfindlichkeit** auf LiF:Mg,Ti bezogen
LiF:Mg,Ti (TLD-100)	210	8,14	$5 \cdot 10^{-5}$ bis 10	1
^{6}LiF:Mg,Ti (TLD-600)	210	8,14	$5 \cdot 10^{-5}$ bis 10	1
^{7}LiF:Mg,Ti (TLD-700)	210	8,14	$5 \cdot 10^{-5}$ bis 10	1
LiF:Mg,Cu,P	232	8,14	$1 \cdot 10^{-6}$ bis 10	25
CaF_2:Dy (TLD-200)	200	16,3	$1 \cdot 10^{-5}$ bis 10	16
CaF_2:Mn (TLD-400)	300	16,3	$1 \cdot 10^{-5}$ bis 10	10

Tabelle 3.1: Einige TL-Dosimetertypen und ihre Eigenschaften

III.2.1 Dosischarakteristik

Die Beziehung zwischen der vom TLD absorbierten Dosis D und der Intensität der Lichtemission ist durch die TL-Ausbeute Y_{TL} definiert

$$Y_{TL} = E_{TL} / m \cdot D \qquad \textit{(Gleichung 3.1)}$$

E_{TL} ist die als Licht emittierte Energiemenge, m ist die Masse des Detektormaterials.
Y_{TL} ist abhängig von der absorbierten Dosis, dem Dosimetermaterial und dem Hauptpeak (Maximalwert) der Glowkurve.
Für die Intensität der Thermolumineszenz des Hauptpeaks ergibt sich die Beziehung

$$I = Y_{TL} \cdot D \cdot const \qquad \textit{(Gleichung 3.2)}$$

die als *Dosischarakteristik* bezeichnet wird.

TLDs haben eine lineare Dosischarakteristik für einen Peak über einen Energiebereich von µGy bis ca 10 Gy. Bei höheren Dosen zeigt sich ein Abweichen von der Linearität. Dieses linear-supralinear-sublineares Verhalten ist in der Abbildung 3c[8] dargestellt.

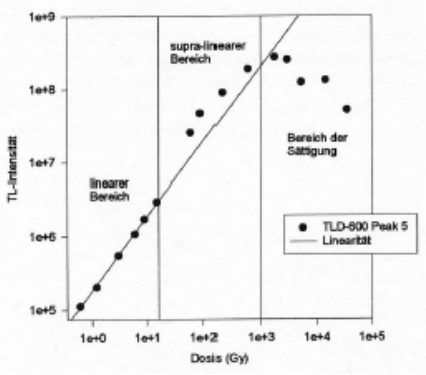


Abbildung 3c: Peak 5-Dosischarakteristik von TLD-600 nach ^{90}Sr -^{90}Y Beta-Bestrahlung

Der lineare Bereich gebräuchlicher TLDs ist in der Tabelle 3.1 angegeben.

III.2.2 Empfindlichkeit

Die untere Nachweisgrenze, d.h die minimale Dosis die mit einem TLD gemessen werden kann ist vom Hintergrundrauschen des Photomultipliers und von parasitären TL-Signalen (z.B. auf Grund von nicht ausreichender Reinheit der Stickstoffatmosphäre in der Messapparatur) abhängig. Die Empfindlichkeit der Dosimeter hängt auch von der thermischen Behandlung (Heizrate, Abkühlrate), der radiativen Vorgeschichte und der Handhabung (mechanische Schäden, Verschmutzung) ab. Die auf LiF:Mg,Ti bezogene relative Empfindlichkeit der TL-Dosimeter Materialien ist ebenfalls in der Tabelle 3.1 angegeben.

III.2.3 Energieabhängigkeit, LET-Abhängigkeit

Die Intensität der Thermolumineszenz eines TLDs ist proportional zur absorbierten Energie. Diese hängt bei allen Wechselwirkungen mit Energieübertragung von Photonen auf Materie vorwiegend vom Energieabsorptionskoeffizienten μ des TLD Materials ab. Das Ansprechverhalten der Dosimeter unterscheidet sich deutlich für Photonen-, ß-, α-, Neutronenstrahlung und schwere Ionen (HCP).
Die Abhängigkeit der TL-Efficiency vom LET wurde in mehreren Arbeiten untersucht[8],[10].
Materialspezifische Faktoren wurden von Horowitz et al[31] untersucht mit dem Ergebnis, dass die Konzentration der Aktivatoren und Verunreinigungen das LET-empfindliche Verhalten beeinflusst. Bei zusätzlichen Experimenten (auch am Atominstitut) wurde auch eine Abhängigkeit von der thermischen Behandlung der Dosimeter (Aufheiz- und Abkühlrate beim Auswerten und Ausheizen) und auch von der Atmosphäre beim Auswerten (Stickstoff) festgestellt.

III.2.4 Fading

Die Intensität des TL-Signals kann durch mehrere Einflüsse geschwächt werden („Fading“) und zu einem falschen Ergebnis bei der Auswertung führen.

$$p = S \cdot \exp(-E / kT) \qquad \textit{(Gleichung 3.3)}$$

p Entkommwahrscheinlichkeit
S Frequenzfaktor, charakteristisch für einen Haftstellentyp
E Bindungsenergie des Teilchens an die Haftstelle
k Boltzmannkonstante,
T absolute Temperatur

Die Tiefe der Haftstellen bestimmt die Menge der darin gespeicherten Elektronen, und die notwendige Energie zur Leerung dieser Haftstelle. Da es, mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, noch vor der Auswertung zur Freisetzung der Ladungsträger aus manchen Traps auch bei Raumtemperatur kommt (thermisches fading), werden in der Dosimetrie nur TL-Materialien verwendet deren Glowkurven den Hauptpeak zwischen 200°C und 250°C haben. Um das relativ starke Fading der Niedertemperatur-Peaks zu umgehen, kann man bei der Auswertung die Dosimeter vortempern (vorheizen z.B auf 100°C) um die instabilen Haftstellen zu entleeren und danach nur das Signal der stabileren Zentren (fading des Hauptpeaks nur ca 5% pro Jahr) [8],[32] zu messen.
Lichtexposition kann auch zur Entleerung von manchen Traps führen, weshalb TL-Dosimeter soweit wie möglich im Dunklen gelagert werden sollten. Im gesamten Verlauf der vorliegenden Arbeit wurden die TLD’s immer in Dosimeter-Mäppchen verwahrt.

III.3 TLD-600 und TLD-700

Bei dieser Diplomarbeit wurden nur kommerziell erhältliche TLD-600 und TLD-700 Dosimeter verwendet. Der Grund für die Wahl der TL-Dosimeter liegt im deutlich unterschiedlichen Wirkungsquerschnitt für thermische Neutronen. Das Ansprechvermögen für γ-Strahlung ist fast identisch, was die Gamma-Kalibrierung und Selektion der Dosimeter wesentlich erleichtert. Diese Charakteristik ermöglicht selektive Dosimetrie in Mischfeldern. Die Wechselwirkungen des Dosimetermaterials mit Photonen- und Neutronenstrahlung und die dazugehörigen Wirkungsquerschnitte werden im Kapitel 4 behandelt.
Die ausgeprägte unterschiedliche Empfindlichkeit von TLD-600 und TLD-700 gegenüber thermischen Neutronen wird in der *Pair-Methode* bei Messungen in Mischfeldern ausgenützt. Werden beide Dosimetertypen einem gemischten Strahlungsfeld ausgesetzt, erhält man aus der Thermolumineszenz eines TLD-600/TLD-700 Paares durch einfache Subtraktion den Anteil von thermischen Neutronen.

$$R_{600}^{n+} = R_{600}^{n} + kR_{700}^{n+} \qquad \textit{(Gleichung 3.4)}$$

R_{600}^{n+} TLD-600 Gesamtsignal (n_{th}, n_f, β, γ, HCP)
R_{600}^{n} TLD-600 Signal durch thermische Neutronen
kR_{700}^{n+} TLD-700 Gesamtsignal (n_f, β, γ, HCP)

k ist ein Proportionalitätsfaktor für die Gammaempfindlichkeit der Dosimetertypen.

Die verwendete Dosimetercharge war vom März 2003 (Datum der Lieferung, Hersteller Harshaw), die je 50 Stück TLD-600 und TLD-700 Dosimeter waren ganz neu, d.h. nie vorher verwendet. Die Zusammensetzung der Kristall-Chips mit den Ausmaßen 6,4 x 6,4 x 0,89 mm war laut Hersteller:

TLD-600 :	^{6}Li	95,62%,	^{7}Li	4,38%
TLD-700 :	^{6}Li	0,7%,	^{7}Li	99,30%

IV Wechselwirkungen ionisierender Strahlung mit Materie

Strahlung in Form von emittierten Teilchen oder elektromagnetischen Wellen besitzt physikalische Eigenschaften wie Masse, Impuls, Ladung und Energie. Diese beeinflussen die Art der Wechselwirkung mit einem Material. Der Mechanismus der Wechselwirkung von ionisierender Strahlung mit Materie ist entscheidend für die Energieübertragung. Genaue Kenntnis der verschiedenen Arten von Wechselwirkungen und deren physikalischen Prinzipien, stellt die wichtigste Voraussetzung bei der Wahl von geeigneten Detektorsystemen und Abschirmung der jeweiligen Strahlenart dar.
Geladene Teilchen verlieren ihre kinetische Energie im Coulombfeld von Atomen und bei Stoßionisationen, Neutronen und Photonen übertragen Energie hauptsächlich bei Stößen und durch Absorption. Im Folgenden werden die grundlegenden Mechanismen der verschiedenen Wechselwirkungen diskutiert.

IV.1 Gammastrahlung

Photonenstrahlung aus angeregten Atomkernen wird als Gammastrahlung bezeichnet (im Unterschied dazu entsteht Röntgenstrahlung in der Atomhülle). Photonen besitzen keine Ruhemasse und keine Ladung, bewegen sich immer mit Lichtgeschwindigkeit und weisen parallel Wellen- und Teilcheneigenschaften bei Wechselwirkung mit Materie auf. Die Energie eines Photons ist abhängig von seiner Frequenz ν

$$E = h \cdot \nu = p/c = (h \cdot c) / \lambda \qquad \textit{(Gleichung 4.1)}$$

λ Wellenlänge in m
p Impuls
c Lichtgeschwindigkeit, $c = 2{,}99792458 \cdot 10^{8}$ m/s
h Planck'sches Wirkungsquant, $h = 6{,}6260755 \cdot 10^{-34}$ J · s

Grundsätzlich kann man zwischen Schwächung (Reduzierung der Photonenzahl) und Energieumwandlung (Photonenenergie wird in kinetische Energie von geladenen Teilchen im Material umgewandelt) unterscheiden. Die Art der Energieübertragung ist abhängig von der Energie der Photonen.

Bei Wechselwirkungen mit der Atomhülle spielen der *Photoeffekt*, die *Comptonstreuung* und die *Paarbildung* die Hauptrolle.

IV.1.1 Photoeffekt, Comptoneffekt, Paarbildung

Der Photoeffekt findet an den Elektronen der inneren Schalen statt und ist die dominante Wechselwirkung bei niederenergetischen Photonen mit $(h \cdot \nu) < 0{,}05$ MeV. Dabei wird das Photon vollständig absorbiert. Die Photonenergie muss größer sein als die Bindungsenergie E_B des Elektrons in der Schale. Somit ist die kinetische Energie des freigesetzten Elektrons

$$E_{kin} = (h \cdot \nu) - E_B \qquad \textit{(Gleichung 4.2)}$$

Als Folge der Ionisierung des Atoms in einer inneren Schale entsteht charakteristische Röntgenstrahlung beim Auffüllen der Leerstelle durch Elektronen aus äußeren Schalen. Eine schematische Darstellung des Photoeffektes ist in der Abbildung 4a gegeben.

Der Compton-Effekt, Abbildung 4b, ist eine Wechselwirkung der Photonen im Energiebereich von 0,5 bis 1 MeV mit lose gebundenen Elektronen der äußersten Schalen. Ähnlich zum elastischen Stoß zweier Billardkugeln wird ein Teil der Photonenenergie auf das Elektron als kinetische Energie übertragen. Das gestreute Photon erfährt auf Grund vom Energieverlust eine Wellenlängenänderung, die eine Abhängigkeit vom Streuwinkel θ aufweist.

$$\lambda' - \lambda = (h/m_0 \cdot c) \cdot (1 - \cos\theta) \qquad \textit{(Gleichung 4.3)}$$

Der erste Klammerterm wird als Compton-Wellenlänge bezeichnet und hat den Wert $2{,}4264 \cdot 10^{-12}$ m.

Die Paarbildung kann erst bei Wechselwirkung mit Photonen mit
$E > 1{,}022$ MeV stattfinden. Dabei wird im starken Coulombfeld des Atomkerns die Photonenenergie in ein Elektron-Positron-Paar umgewandelt (materialisiert). Die kinetische Energie des Paares ist

$$E_{kin} = (h \cdot \nu) - 1{,}022 \text{ MeV} \qquad \textit{(Gleichung 4.4)}$$

Die Paarbildung, dargestellt in Abbildung 4c, ist begleitet von anschließender Vernichtung (Annihilation) des Positrons durch Rekombination mit einem Elektron. Dabei entstehen zwei Photonen mit je 0,511 MeV. Somit deponiert ein hochenergetisches Photon seine anfängliche kinetische Energie in mehreren Schritten im Material.

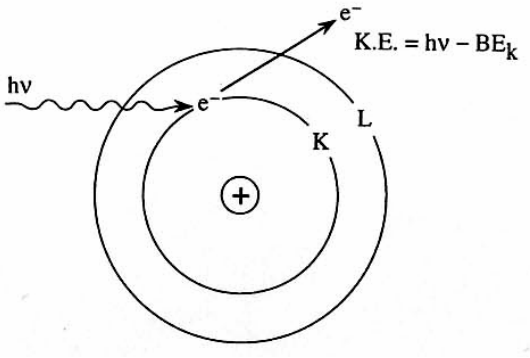


Abbildung 4a: Photoeffekt, Schalen K und L, BEK ist Bindungsenergie in Schale K

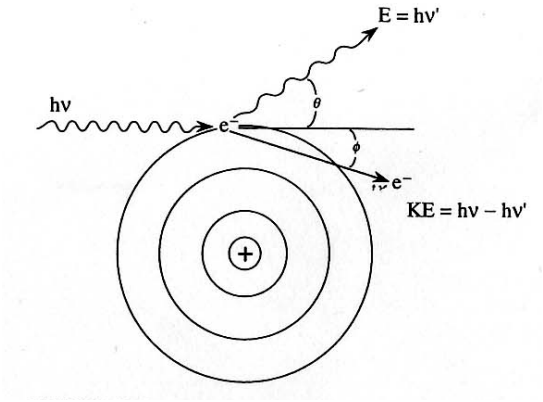


Abbildung 4b: Compton-Effekt

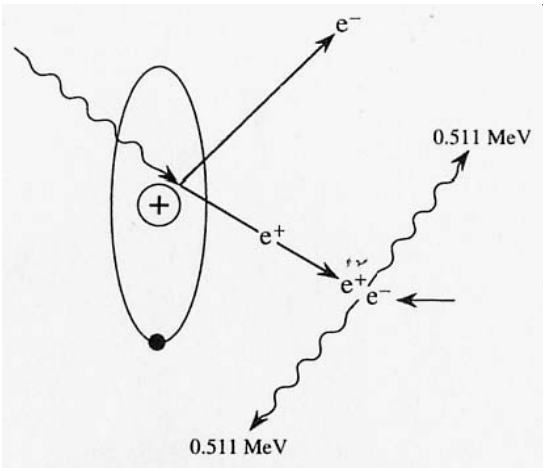


Abbildung 4c: Paarbildung und Positron-Annihilation

Wechselwirkungen von Photonen mit Atomkernen können zu Emissionen von Nukleonen (Protonen, Neutronen) führen. Die Schwellenenergie für die Überwindung der Bindungsenergie des Nukleons im Kern liegt bei den meisten Kernen in der Größenordnung von etwa 10 MeV.

IV.1.2 Schwächungs- und Absorptionskoeffizienten

Allgemein gilt für die Schwächung eines Photonenstrahls der Intensität I durch einen Absorber der Dicke x

$$-(dI/dx) = \mu \cdot I \qquad \textit{(Gleichung 4.5)}$$

Daraus folgt, dass die Intensität des Strahls in Abhängigkeit von der Absorberdicke x eine exponentiell abfallende Funktion ist.

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \qquad \textit{(Gleichung 4.6)}$$

I Intensität des Photonenstrahls abhängig von Absorbertiefe
I_0 Intensität des einfallenden Photonenstrahls
μ Schwächungskoeffizient

Der Schwächungskoeffizient μ setzt sich aus einzelnen Koeffizienten, τ für Photo-, σ für Compton- und κ für den Paarbildungseffekt zusammen, die einzelne Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten der jeweiligen Wechselwirkungsart beschreiben.

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \qquad \textit{(Gleichung 4.7)}$$

Obwohl die einzelnen Prozesse alle abhängig von Energie der Photonen, Ordnungszahl, Masse und Dichte des Absorbermaterials sind, ist ihre Summe, der (totale) Schwächungskoeffizient μ charakteristisch für das Material.

Energieabsorption im Material (Gewebe) wird mittels Energieabsorptionskoeffizienten $\mu_{en} \leq \mu$ bestimmt. Ein Teil der Photonenenergie wird als Folge der verschiedenen Wechselwirkungen aus dem betrachteten Volumen transportiert (z.B. nach der Positron-Annihilation verlassen zwei 0,511 MeV Photonen das Volumen, Compton gestreute Photonen die weiter nicht im Volumen Wechselwirken, oder Bremsstrahlungsverluste von Elektronen) und trägt somit nicht zur E_{abs} bei.

IV.2 Kerma

Trifft ein einfallendes Photon (oder Teilchen) auf ein Atom verläuft die Energieabsorption im Gewebe in zwei Schritten. Zuerst wird die Photonenenergie teilweise oder zur Gänze an ein Elektron am Ort der primären Wechselwirkung übertragen.
Zur Beschreibung des Energietransfers bedient man sich der Energietransferkoeffizienten μ_{tr}

$$\mu_{tr} = \mu_{en} / (1-g) \qquad \textit{(Gleichung 4.8)}$$

wobei g die Energieverluste auf Grund von Kernprozessen beschreibt. Die Summe der kinetischen Anfangsenergien aller freigesetzten Elektronen (oder anderen geladenen Sekundärteilchen) wird als KERMA (Kinetic Energy Released in MAtter) bezeichnet. Der zweite Schritt, die Absorption der Dosis, findet erst entlang der gesamten Länge der Elektronbahnen (Reichweite R_e) im Gewebe dahinter statt, wie in Abbildung 4d[2] illustriert wird. In einem großen Energiebereich (bis ca 1,5 MeV) sind die Werte von μ_{tr} und μ_{en} praktisch identisch da Kernprozesse vernachlässigbar sind. Somit kann die absorbierte Energie der Kerma (transferierte Energie) in sehr guter Näherung gleichgesetzt werden.

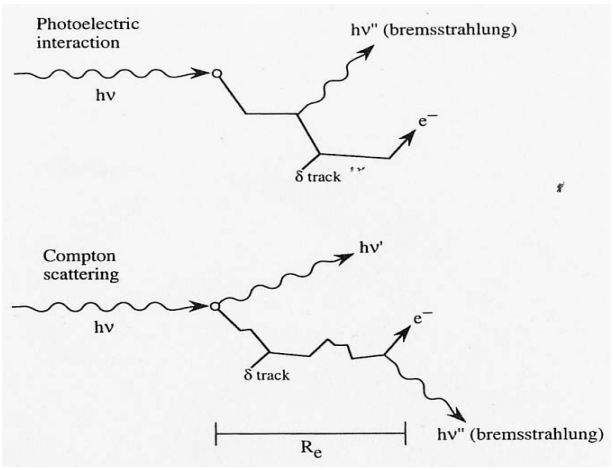


Abbildung 4d: Photonenenergie wird auf ein Elektron übertragen welches diese auf seiner gesamten Bahn in die Umgebung abgibt

Betrachtet man den idealisierten Fall bei dem es keine Energieverluste der Photonenstrahlung im Medium gibt, erhält man die absorbierte Dosis, ab einer Tiefe R im Gewebe, direkt aus der Kerma da Sekundärteilchengleichgewicht herrscht. Gleich viele Elektronen treten in und verlassen ein beliebiges Volumen. Bis zur Tiefe R (im Build up Region) steigt die absorbierte Dosis von Null am Ort der primären Wechselwirkung der Photonen mit Gewebe bis zu einem Maximalwert. Bei idealisierten Bedingungen und STG kann man also die absorbierte Dosis im Gewebe der Kerma, der Energieübertragung bei der primären Wechselwirkung von einem Photon mit einem Gewebsatom, gleichsetzen, Abbildung 4e[2].

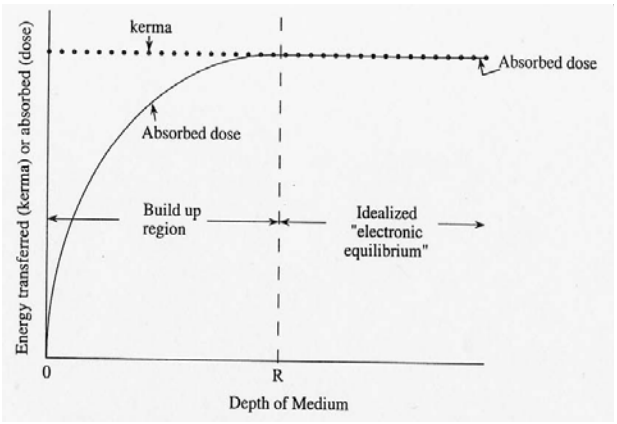


Abbildung 4e: Kerma und Absorbierte Dosis im idealisierten Fall

Im realen Medium jedoch wird Photonenstrahlung abgeschwächt, weshalb das STG nicht den idealen Wert erreicht. Dadurch weisen Kerma und absorbierte Dosis einen Abfall (in Korrelation zur exponentiellen Abschwächung der primären Strahlung) mit steigender Tiefe auf, Abbildung 4f[2]. Die absorbierte Dosis steigt im Build up Region, danach ist sie etwas höher als Kerma. Der Grund dafür sind Elektronen die in weniger tief liegenden Schichten freigesetzt werden.

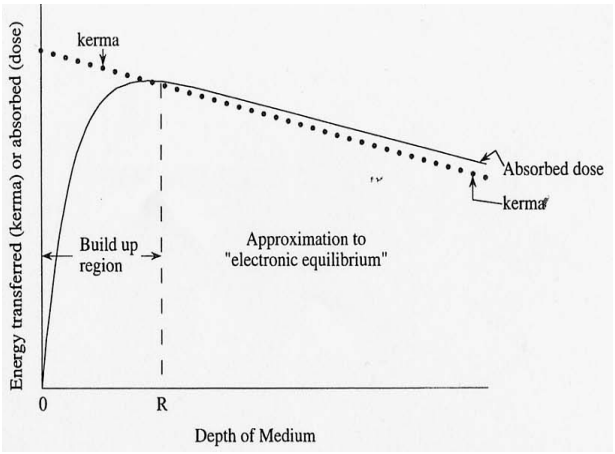


Abbildung 4f: KERMA und Absorbierte Dosis im realen Medium

Im Allgemeinen wird Kerma als eine ausreichend gute Näherung für die Bestimmung der absorbierten Dosis verwendet, vor allem für Photonen bis 5 MeV. Alle relevanten Werte für μ_{tr}, μ_{en}, E_{tr}, E_{abs} und (1-g) in Abhängigkeit von Energie der einfallenden Photonen kann man entsprechenden Tabellen[2] entnehmen.

IV.3 Neutronenstrahlung

Neutronen sind ungeladene Teilchen der Masse m = 1,6749286 $\cdot 10^{-27}$kg. Da sie keine Ladung besitzen sind Stöße ihre hauptsächliche Wechselwirkungsart. Nach Energie eingeteilt unterscheidet man:

- kalte (T< 20°C) E < 0,0253 eV
- thermische (n_{th}) E = 0,0253 eV
- epithermische E = 0,0253 bis ca. 0,5 eV
- langsame E = 0,5 bis 100 eV
- schnelle (n_f) E = 100 eV bis 20 MeV
- relativistische E > 20 MeV

Neutronen verschiedener Energien werden in Kernreaktoren, Teilchenbeschleunigern, durch (γ,n)-, (α,n)- und (d,n)-Reaktionen und auch durch spontane Kernfission (^{252}Cf) erzeugt.
Beim Durchgang durch Materie verlieren Neutronen solange ihre kinetische Energie, bis sie im energetischen Gleichgewicht mit den Atomen des Materials sind. Durch Stöße und Streuung werden sie in Energiebereiche thermalisiert in denen Einfangreaktionen stattfinden können.
Ein Feld aus thermischen Neutronen ist im allgemeinen Fall bei T = 20°C (293,15 K) eine spektrale Verteilung um die wahrscheinlichste Energie von E_0 = 0,0253 eV mit der wahrscheinlichsten Neutronengeschwindigkeit von v_0= 2200 m/s.

IV.3.1 Wechselwirkungen von Neutronen mit Materie

Bei der Beschreibung der Wechselwirkungen von Neutronenstrahlung mit Materie sind zwei Faktoren entscheidend, der *Wechselwirkungsquerschnitt* σ für eine Reaktion und die Energie, die von Neutronen dabei transferiert wird. Der Wechselwirkungsquerschnitt σ ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit des Zustandekommens einer spezifischen Reaktion. Der totale Wirkungsquerschnitt ist die Summe aller Partialquerschnitte für verschiedene Kernreaktionen. Er ist abhängig von der Energie der Neutronen und vom absorbierenden Medium. Die SI-Einheit ist Barn, 1 b = 10^{-28} m² = 10^{-24} cm².
Experimentell bestimmte Kernradien mittelschwerer Kerne betragen etwa r = $5 \cdot 10^{-15}$ m, ihre geometrischen Querschnittsflächen somit F = $\pi \cdot r^2 \approx 10^{-28}$ m².

Folgende Wechselwirkungsarten bestimmen die Reaktionen des Materials mit Neutronenstrahlen:

- *elastische Streuung*
- *inelastische Streuung*
- *Einfangreaktionen*
- *Induzierte Spaltung und Spallation*

Atomkerne können thermische und epithermische Neutronen einfangen wobei es zur Erzeugung von neuen und angeregten Kernen kommt (Aktivierung des Targetmaterials). Der Wirkungsquerschnitt für Einfangreaktionen σ_a weist für viele Materialien eine 1/v Abhängigkeit über große Energiebereiche auf (Neutronengeschwindigkeit v ist proportional zu $\sqrt{E}$). Manche Materialien haben für einzelne schmale Energiebereiche sehr stark ausgeprägte Resonanzen. In der Abbildung 4g[2] ist ein Vergleich vom totalen Wirkungsquerschnitt von Cadmium (Cd) mit Bor (B) dargestellt.

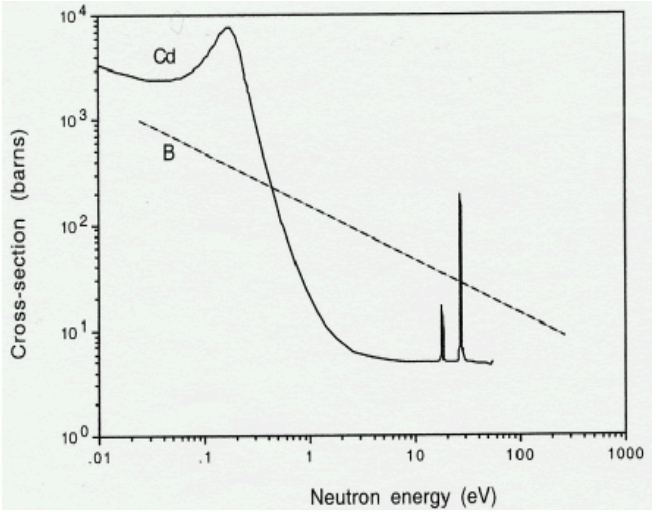


Abbildung 4g: σ für Cadmium und Bor

Im niedrigen Energiebereich von etwa 0,25 eV bis 10 eV gilt beim Cadmium die 1/v Abhängigkeit, die dann durch vielfältige Resonanzen abgelöst wird.

Für Neutronenenergien oberhalb der Resonanzen verändert sich der Wirkungsquerschnitt bis in den MeV Bereich nur mehr geringfügig.
Als Folge von Einfangreaktionen werden entweder Gammastrahlung (= thermischer Einfang) oder hochenergetische schwere Teilchen und Ionen aus den neuen Kernen emittiert. Einige Einfangreaktionen, gekennzeichnet durch den Klammerausdruck T(n,x)E mit Targetkern T, Ausgangskern E und Reaktionsprodukt x aus emittierten Teilchen oder Strahlung, werden im folgenden angeführt:

$^{59}Co\ (n,\gamma)\ ^{60}Co,\qquad ^{16}O\ (n,p)\ ^{16}N, ^{14}N\ \ (n,p)\ ^{14}C,\qquad ^{10}B\ (n,\alpha)\ ^{7}Li,$

$^{235}U\ (n,2n)\ ^{140}Xe + ^{91}Rb + ^{3}H$

Auf Grund ihrer Isotopenverhältnisse haben TLD-600 und TLD-700 stark unterschiedliche Wirkungsquerschnitte σ_a für Einfangreaktionen.
Der Wirkungsquerschnitt σ_a der Reaktion $^{6}Li\ (n_{th},\alpha)^{3}H$ erreicht im thermischen Bereich den Maximalwert von $\sigma_a \approx 941$ b. Dabei werden ein 2,07 MeV Alphateilchen und ein 2,74 MeV Tritiumkern erzeugt. Mit steigender Energie nimmt σ_a ab und elastische Stöße mit ^{6}Li- oder F-Kernen werden die dominante Wechselwirkung, allerdings mit sehr geringem Wirkungsquerschnitt .
^{7}Li hat einen fast gleichbleibenden Wirkungsquerschnitt für Neutronen bis zu einer Schwellenenergie von ca. 200 keV, der auch im gesamten Verlauf geringer ist als jener der TLD-600. Der thermische Einfangquerschnitt beträgt $\sigma_a \approx 0{,}0454$ b[1]. Die Wirkungsquerschnitte von ^{6}Li und ^{7}Li sind in der Abbildung 4h[9] dargestellt.

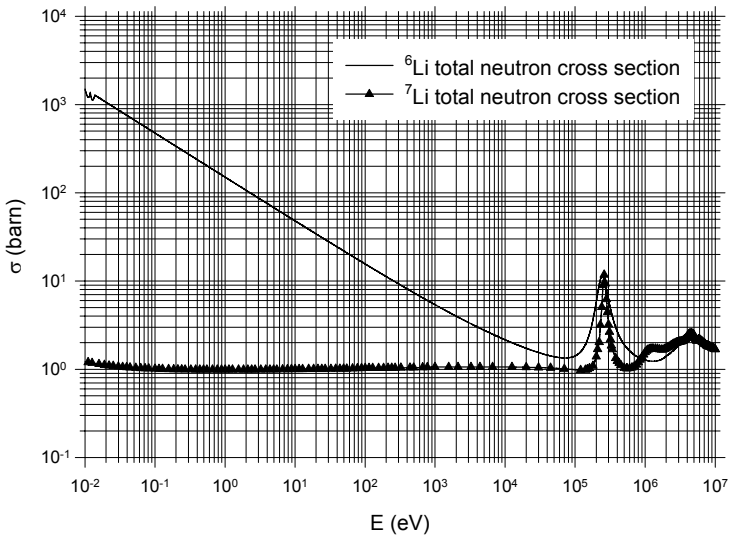


Abbildung 4h: σ von ^{6}Li und ^{7}Li

Durch den um etwa 5 Größenordnungen höheren Wirkungsquerschnitt von ^{6}Li im thermischen Bereich sind TLD-600 besonders für den Nachweis von thermischen Neutronen geeignet, während TLD-700 für thermische Neutronen praktisch blind sind. In Energiebereichen von schnellen Neutronen ist der Wirkungsquerschnitt für beide Substanzen fast identisch. Darauf beruht auch die bereits erwähnte Pair-Methode für die Bestimmung der absorbierten Dosis durch thermische Neutronen.

Inelastische Streuung erzeugt angeregte Kerne die ihre überschüssige Energie in Form von prompter Gammastrahlung emittieren. Diese Art der Wechselwirkung, gekennzeichnet als (n,nγ)-Reaktion, ist nur mit schnellen Neutronen und hauptsächlich schwereren Kernen (Materialien mit hohem Z) möglich. Bei Feldern mit hohem Anteil an schnellen Neutronen ist immer eine erhebliche Gammakomponente bei der Bestimmung der Energiedosis vorhanden. Im Gewebe beispielsweise ist ein Beitrag zur Dosis durch die folgende Reaktion möglich:

$$^{14}N\ (n,n\gamma)^{14}N \text{ mit } E\gamma \approx 10 \text{ Mev.}$$

Elastische Streuung liefert hauptsächlich bei Materialien mit niedrigem Z wie Wasserstoff den Hauptbeitrag zur Moderation von schnellen Neutronen. Auf Grund ihrer fast identischen Masse sind Protonen (folglich auch alle leichten Kerne) ideale elastische Stoßpartner für Neutronen. Dabei geben schnelle Neutronen einen Teil ihrer kinetischen Energie an die Atomkerne ab, die Rückstöße erleiden. Durchschnittlich werden 50% der Neutronenenergie bei elastischen Stößen an die Protonen abgegeben, wobei völlige (100%) Energieabgabe möglich ist (analog zum Stoss zweier Billardkugeln).

Menschliches Gewebe besteht zu einem überwiegenden Teil aus Wasserstoff und ist somit ein hervorragender Moderator für schnelle und epithermische Neutronen. Dadurch ist die elastische Streuung die dominante Wechselwirkung der Neutronen mit Gewebe. Rund 85% der Energiedosis auf Grund der primären Kollision von schnellen Neutronen mit Gewebe stammen aus elastischer Streuung an Wasserstoffatomen (Zellwasser), die mit hoher Energieübertragung auf Protonen kurzer Reichweite verbunden ist. Neutroneneinfang an Sauerstoff-, Kohlenstoff- und Stickstoffatomen im Gewebe verursacht vor allem eine hohe Photonenbelastung.

V Phantome

In-Vivo Messungen können nur in den seltensten Fällen bei der Bestimmung der vom menschlichen Körper absorbierten Dosis angewandt werden. Um die bei einer Strahlenexposition vom Gewebe absorbierte Dosis mit ausreichender Genauigkeit bestimmen zu können, verwendet man Phantome, die dem menschlichen Körper in Form, Aufbau und strahlenphysikalischen Eigenschaften sehr ähnlich sind. Photonwechselwirkungen stehen alle im Zusammenhang mit dem Z_{eff} des Materials, und werden mit Hilfe von Massenschwächungs- und Absorptionskoeffizienten beschrieben. *Gewebeäquivalenz* des Phantommaterials für Photonenstrahlung ist deshalb eine essentielle Eigenschaft. Allerdings ist sie auf Grund verschiedener Teilchenmassen und Ladungen für Teilchenstrahlung nicht unbedingt erfüllt. Ein Vergleich der Eigenschaften verschiedener Gewebsarten und Phantommaterialien [12] wird in der Tabelle 5.1 gegeben.

Material	**Dichte ρ** g/cm³	**Z_{eff}**	**μ/ρ** bezogen auf Muskeln für E=10 keV	**μ/ρ** bezogen auf Muskeln für E=100 keV	**μ/ρ** bezogen auf Muskeln für E=1 MeV
Muskel	1,06	7,63	1	1	1
Knochen	1,85	13,6	5,3	1,096	1,037
Fett	0,92	6,39	0,567	1,001	1,006
Aluminium	2,7	13	4,876	1,006	0,877
PMMA	1,19	6,56	0,624	0,969	0,981
Polyethylen	0,95	5,53	0,388	1,015	1,037
Wasser	1	7,52	0,991	1,002	1,009
Luft	0,001205	7,64	0,952	0,904	0,908
LiF	2,635	8,14	1,134	0,851	0,841

Tabelle 5.1: Verschiedene Gewebe und gewebsäquivalente Materialien

Phantome erlauben präzise Aussagen über die Abhängigkeit der Dosis von den Bestrahlungsbedingungen, von verschiedenen Strahlenarten, von der Bestrahlungsgeometrie (Ausrichtung des Phantoms im Strahlungsfeld) und von Streueffekten durch Simulation von Knochen. Dadurch wird eine bessere Abschätzung der biologischen Auswirkung einer Strahlenexposition ermöglicht. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Phantom verwendet, das dem standardisierten ICRP Referenzphantom (im Folgenden beschrieben) nachempfunden ist.

V.1 ICRU-Kugel

Die ICRU-Kugel dient seit 1985 als das Referenzphantom für die Bestimmung der folgenden Dosisgrößen:

~ Ortsdosis - *Umgebungsäquivalentdosis H*(d) in einem Punkt im Strahlungsfeld ist das Dosisäquivalent dieser Strahlung in der ICRU-Kugel in der Tiefe d, für durchdringende Strahlung H*(10) in 10 mm Tiefe, für nichtdurchdringende Strahlung H*(0,07) für Haut und H*(3) für die Augenlinse.* Diese Dosisgröße stellt einen konservativen Schätzwert für die Effektivedosis E dar [E ≤ H*(10)].

~ Personendosis – *Personenäquivalentdosis $H_p(d)$ ist das Dosisäquivalent im Gewebe (soft tissue) in der Tiefe d hinter einem Punkt an der Körperoberfläche (Position des Dosimeters)*, *$H_p(10)$, $H_p(0,07)$ und $H_p(3)$*

Die ICRU-Kugel hat einen Durchmesser von 30 cm und besteht aus 76,2% Sauerstoff (O), 11,1% Kohlenstoff (C), 10,1% Wasserstoff (H) und 2,6% Stickstoff (N). Sie ist weichteilgewebeäquivalent mit einer Dichte von 1g/cm³.

Das in der vorliegenden Arbeit verwendete Phantom, Abbildung 5a, wurde in [12] konstruiert. In seiner Form und Dimension ist es der ICRU-Kugel nachempfunden (sphärisch, Durchmesser 30 cm). Das Material des Phantoms ist Polyethylen dessen strahlenphysikalischen Eigenschaften in der Tabelle 5.1 aufgelistet sind.

Drei Kanäle, *x*-, *y*- und *z*-Kanal, verlaufen in rechten Winkeln zueinander durch den Kugelmittelpunkt und erstrecken sich über den gesamten Durchmesser der Kugel. Zwei weitere Kanäle von 12 cm Tiefe befinden sich auf gegenüberliegenden Seiten des Phantoms, sodass sie mit den durchgehenden Kanälen einen Winkel von $\pi/4$ einschließen.
Ein zusätzlicher Kanal („Streukörperkanal“) verläuft parallel im radialen Abstand von 5cm zum *z*-Kanal, wobei dieser mit keinem der anderen Kanäle interferiert. Alle Kanäle weisen einen Durchmesser von 26 mm auf.
Um die bei einer Messung mit Dosimetern nicht bestückten Kanäle schließen zu können, sind Dummys verschiedener Längen aus Polyethylen vorhanden. Die Dosimeter können in Einschubteilen aus Plexiglas (PMMA) und Polyethylen positioniert werden. Der Abstand zwischen den Positionen im Einschubteil kann mit Füllteilen (Inlets) verschiedener Größen aus dem jeweiligen Material gefüllt werden. Detaillierte Informationen zur Länge und Stückzahlen der verschieden Einschubteile und Dummys und ausführliche Beschreibung der Äquivalenz von Plexiglas und Polyethylen für Gammastrahlung sind in [12] verfügbar. Ob und in welchem Ausmaß die unterschiedlichen Dichten und Z_{eff} Werte dieser Materialien einen Einfluss auf Dosismessungen bei Neutronenstrahlung ausüben, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.
Ein Einschubteil aus Aluminium kann bei Messungen als Streukörper eingesetzt werden. Um den geringfügigen Unterschied im Z_{eff} vom Aluminium zu Knochen zu kompensieren, ist der Aluminiumstreukörper mit einer Hohlbohrung versehen. In der vorliegenden Arbeit wurde die Streuung von Neutronen an Knochen, simuliert durch diesen Streukörper, bei einer Bestrahlung qualitativ untersucht.

Abbildung 5a: Das verwendete Phantom mit Einschubteilen für Dosimeter in x-, y- und z-Kanal, Dummy im π/4-Kanal und Aluminiumrohr im Streukörperkanal

Unterhalb vom Phantom ist in der Abbildung eine weiße, schalenförmige Kunststoffauflage erkennbar. Diese wurde bei allen Phantombestrahlungen verwendet, weshalb ihre Zusammensetzung nicht Berücksichtigt wird (relative Effekte glich für alle Bestrahlungen).

VI Kalibrierung der TL-Dosimeter

Im Rahmen dieser Arbeit sollte die Dosis und LET-Verteilung im Phantom in Neutronen-Gamma Mischfeldern mittels der HTR-Methode ermittelt werden. Dazu war es notwendig die verwendeten Dosimeter für Gamma und Neutronenstrahlung zu kalibrieren, und einen Zusammenhang zwischen LET und der Hochtemperaturlichtemission zu definieren. Eine Gamma-Kalibrierung, die Bestimmung der Flussdichte thermischer Neutronen an der Bestrahlungsposition der Radiographieanlage, und anschließend die Neutronenkalibrierung an dieser Position wurden durchgeführt. Der HTR-LET Zusammenhang wurde für die verwendete Dosimetercharge nicht neu bestimmt, sondern aus [10] übernommen. Im folgenden werden die einzelnen Bereiche betreffend die Behandlung und Vorbereitung der TLDs für die Kalibrierungen und Phantomexpositionen detailliert beschrieben.

VI.1 Ausheizen der Dosimeter

Vor jeder Bestrahlung wurden die TL-Dosimeter ausgeheizt und auf Raumtemperatur abgekühlt. Dabei wurde besonders darauf geachtet, dass reproduzierbare Aufheiz- und Abkühlraten das Ansprechvermögen der TLDs nicht negativ beeinflussen. Deswegen wurde eine konstante Prozedur beim Ausheizen, dem Löschen der gespeicherten Information (Nullsetzung der Dosimeter), eingehalten:

- der Ofen im Dosimetrielabor des Atominstituts wurde mindestens 90 Minuten auf 400°C (673K) vorgeheizt um eine konstante und homogene Temperaturverteilung in der Heizkammer zu gewährleisten. Es wurde immer der gleiche Ofen zum Ausheizen verwendet.

- die TLDs wurden auf einer Quarzglasplatte angeordnet und auf dieser erst nach dem Vorheizen in den Ofen gelegt.

- das Ausheizen bei 400°C (673K) dauerte immer 1 Stunde

- danach wurde der Ofen abgeschaltet und die TLDs auf der Quarzglasplatte im Inneren des geschlossenen Ofens bis zum nächsten Tag mindestens 20 Stunden abgekühlt

- nach dem Abkühlen auf Zimmertemperatur wurden die TLDs immer in Mäppchen bis zur Phantombestückung aufbewahrt.

Durch genaue Einhaltung dieses Ausheizvorgangs konnten Veränderungen des Ansprechvermögens der TLDs vermieden werden.

VI.2 Gammakalibrierung

Die am Atominstitut der Österreichischen Universitäten installierte ^{137}Cs Gammaquelle hatte am 25.10.2000 eine Aktivität von A = 20.64 ± 0.62 GBq. Unter Berücksichtigung der Halbwertszeit von $T_{1/2}$ = 30,1 Jahren ergab dies eine Dosisleistung von 131,1 µGy/h in 3m Entfernung für den Beginn der Kalibrierbestrahlungen am 24.04.2003, im Rahmen einer (dieser Diplomarbeit vorausgehenden) Projektarbeit aus Dosimetrie[33].

Die Quelle befindet sich in einem Abschirmungsbehälter aus Blei, der an der Vorderseite eine zentrale Strahlaustrittsöffnung hat. Der Shutter der Öffnung ist mit einem verriegelbaren Sperrmechanismus gesichert, der am hinteren Ende der Abschirmung angebracht ist.
Die Position der Dosimeter im Strahlungsfeld wird mit Hilfe einer Metallschiene mit Abstandsskalierung, und einem darauf verschiebbaren Bestrahlungsschirm aus Kunststoff im Aluminiumrahmen bestimmt. Das Zentrum des Bestrahlungsschirms ist auf die Höhe des Zentrums der Strahlaustrittsöffnung ausgerichtet. Die experimentelle Bestimmung des homogenen Bereichs des Strahlkegels ist in [12]beschrieben.

Es wurden 4 γ-Kalibrierbestrahlungen (KG1, KG2, KG3, KG4) mit der ^{137}Cs-Quelle vor der Neutronen-Kalibrierung durchgeführt. Dosimetermäppchen mit je 50 TLDs eines Typs wurden am Bestrahlungsschirm mit eingezeichneten Ringen der Radien r = 5, 10 und 15 cm, zentral positioniert um eine gleichmäßige Exposition im homogenen Teil des Strahlkegels zu gewährleisten. Der Bestrahlungsschirm war in einer Entfernung von 3m von der Abschirmungskapsel (Quelle). Die Bestrahlungsgeometrie wird in Abbildung 6a dargestellt.

Abbildung 6a: ^{137}Cs-Quelle im Abschirmungsbehälter, Abstandsskalierung auf Metallschiene, Bestrahlungsschirm mit TLD-Mäppchen

Die Bestrahlungsdauer und die Kalibrierungsdosis betrugen:

KG1:	TLD-600	66,83 h	D = 66,83 h . 131,1 µGy/h = 8,76 mGy
	TLD-700	72,66 h	D = 72,66 h . 131,1 µGy/h = 9,53 mGy
KG2:	TLD-600	69,25 h	D = 69,25 h . 131,1 µGy/h = 9,08 mGy
	TLD-700	74,50 h	D = 74,50 h . 131,1 µGy/h = 9,77 mGy

KG3: TLD-600 68,75 h D = 68,75 h . 131,1 µGy/h = 9,01 mGy
TLD-700 68,75 h D = 68,75 h . 131,1 µGy/h = 9,01 mGy

KG4: TLD-600 93,33 h D = 93,33 h . 131,1 µGy/h = 12,24 mGy
TLD-700 93,33 h D = 93,33 h . 131,1 µGy/h = 12,24 mGy

Die Auswertung erfolgte bei allen Kalibrierungen frühestens 20h nach Beendigung der Bestrahlung. Somit konnte mit hoher Wahrscheinlichkeit die Einstellung des Gleichgewichts nach den unmittelbaren Rekombinationsprozessen im LiF erreicht werden. Weiters konnte damit sichergestellt werden, dass bei allen Messreihen die thermischen Fadingverluste die gleiche Größenordnung haben.
Alle γ-Kalibrierfaktoren der einzelnen Chips und für gesamte Dosimeterchargen sind in den Tabellen A1 und A2 im Anhang A angegeben.
Die Berechnung der γ-Kalibrierfaktoren (γ-Kalfak) für die einzelnen TLD Chips erfolgte nach der Formel:

γ-Kalfak = Intensität Peak 5 / applizierte Dosis = [Cts] / [mGy]

Eine zusätzliche γ-Bestrahlung (KG5) wurde im Anschluss an die Neutronen-Kalibrierung vorgenommen. Dadurch sollte die γ-Empfindlichkeit der Dosimeter auf Veränderungen auf Grund der Neutronenbestrahlungen überprüft werden. Die Bestrahlungsgeometrie war identisch mit den vier vorangegangenen Gamma-Bestrahlungen. Die Bestrahlungsdauer und die berechnete applizierte Dosis bei dieser Kalibrierung betrugen:

KG5: TLD-600 69,92 h D = 69,92 h . 131,1 µGy/h = 9,17 mGy
TLD-700 69,92 h D = 69,92 h . 131,1 µGy/h = 9,17 mGy

Bei dieser Bestrahlung bestimmte γ-Kalfak Werte waren bei beiden Dosimetertypen 10-13% kleiner als bei den ersten vier Kalibrierungen. Dies deutete auf einen systematischen Fehler bei dieser Messreihe hin, der mit Hilfe einer Referenzgruppe korrigiert wurde. Diese Referenzgruppe bestand aus je 5 Dosimetern beider Typen, die in den ersten zwei Gammakalibrierungen das konstanteste Verhalten gezeigt haben. Die Abweichung des Kalibrierfaktors jedes Dosimeters dieser Referenzgruppe bei der fünften Bestrahlung von ihrem Kalfak-Mittelwert der vier vorangegangenen Bestrahlungen wurde ermittelt. Durch Mittelwertbildung dieser einzelnen Abweichungen ergaben sich folgende Korrekturfaktoren:

für TLD-600 +10,18% und für TLD-700 +12,71%.

Der Vergleich der Messdaten dieser Bestrahlung für die zwei Dosimetertypen legte den Schluss nahe, dass eine Veränderung der γ-Empfindlichkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden konnte. Ein möglicher Effekt wäre im Allgemeinen für etwas höhere Neutronenflussdichten (ab ca. 10^8 n/cm²s, somit um den Faktor 10^3 höher als der Fluss an der Radiographieanlage wie später beschrieben wird) zu erwarten gewesen[22],[31]. Zusätzlich sollte ein solcher Effekt bei TLD 600 und TLD700 auf Grund ihrer unterschiedlichen Empfindlichkeiten für thermische Neutronen in verschiedenen Größenordnungen auftreten. Da aber beide Dosimetertypen tendenziell das gleiche Verhalten aufwiesen, wurden γ-Kalfak5-Werte mit der beschriebenen Korrektur ermittelt.

Die Gammaempfindlichkeit der TLD-600 Charge ergab 96,42% des Wertes der TLD-700 Charge. Die entsprechende Korrektur wurde bei der Auswertung der Phantombestrahlungen berücksichtigt.
In der Abbildung 6b ist ein sehr geringer Unterschied in der Glowkurvenstruktur von TLD-600 und TLD-700 für Gammastrahlung ersichtlich. Die Kurven sind auf die Höhe des Peak 5 (220°C) normiert.

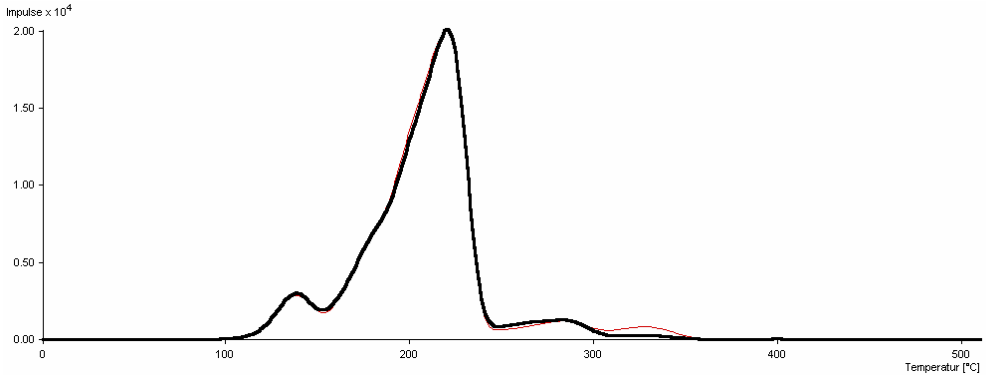


Abbildung 6b: Glowkurven von einem TLD-600 und einem TLD-700 Chip nach der Kalibrierung KG4 mit ^{137}Cs, normiert auf Peak 5 Höhe

Die Bedeutung der Hochtemperaturemission (HTE) wird später im Unterkapitel über den HTR-LET Zusammenhang behandelt.

VI.3 Flussdichte thermischer Neutronen an der NRA

Neutronenkalibrierbestrahlungen wurden an der Neutronenradiographieanlage (NRA) durchgeführt. Die Anlage ist an der thermischen Säule des Reaktors positioniert, und ist in der Standardkonfiguration mit einem Kollimator, der vom Reaktorkern durch die ganze Graphitwand führt, ausgestattet. Damit besteht das Neutronenfeld an der Bestrahlungsposition auch aus einem Anteil von schnellen Neutronen. Wird der Kollimator durch einen ganzen Graphitziegel ersetzt, kann man ein sauberes thermisches Neutronenfeld erwarten. Die Bestrahlungsposition besteht aus einem drehbaren Probenhalter aus Aluminium, der sich im Zentrum des Neutronenstrahls (Kollimatordurchmesser 8 cm) befindet. Eine schematische Darstellung der Radiographieanlage und des Reaktors ist im Anhang B verfügbar.
Für beide Konfigurationen wurde der Fluss thermischer Neutronen mittels Goldaktivierungsanalyse bestimmt. Detaillierte Informationen bezüglich aller Faktoren, die bei dieser Vorgangsweise berücksichtigt werden müssen, sind in [15] vorhanden. Hier sollen nur die Grundlagen der vorgenommenen Flussbestimmung erläutert werden.

VI.3.1 Sondenaktivierung

Die Goldaktivierungsanalyse beruht auf dem Prinzip der Aktivierung einer Sonde in einem Neutronenfeld. Aus der induzierten Radioaktivität der Sonde kann auf die Eigenschaften des Feldes geschlossen werden. Treffen Neutronen auf eine hinreichend dünne („ideale“) Schicht

von Goldatomen, kann die Schwächung des Flusses vernachlässigt werden. Die Aktivierung C in einer Goldfolie bekannter Dicke d (ermittelbar aus Fläche F, Masse m und Dichte ρ) ist dann proportional der Flussdichte Φ der thermischen Neutronen pro Zeiteinheit und cm², und der Anzahl N der Goldatome pro cm³.

$$C = \sigma_a \cdot \Phi \cdot N \cdot d \qquad \textit{(Gleichung 6.1)}$$

σ_a Aktivierungsquerschnitt

Gemäß dem Zerfallsgesetz nimmt die Aktivität der Sonde ab, und die Zahl der vorhandenen radioaktiven Kerne B ändert sich entsprechend der Gleichung

$$dB(t)/dt = C \cdot F - \lambda \cdot B(t) \;\Rightarrow\; A(t) = \lambda \cdot B(t) \qquad \textit{(Gleichung 6.2)}$$

λ Zerfallskonstante
F Fläche der Sonde (Folie)
A(t) Aktivität = Zahl der pro Zeiteinheit zerfallenden Kerne

Durch Integration nach der Aktivierungszeit t_1 erhält man

$$A = A_\infty (1 - e^{-\lambda t_1}) \qquad \textit{(Gleichung 6.3)}$$
$$A_\infty = C \cdot F$$

Es ist daraus erkennbar, dass nach einer langen Bestrahlungsdauer ($t_1 \to \infty$) die Aktivität einen Sättigungswert A_∞ erreicht. Für den Zeitraum zwischen dem Ende der Bestrahlung und dem Beginn der Messung der Aktivität ist eine Korrektur für den dazwischenliegenden Zerfall (Abklingzeit t_2) notwendig.

$$A = A_\infty (1 - e^{-\lambda t_1}) \cdot e^{-\lambda t_2} \qquad \textit{(Gleichung 6.4)}$$

Um nur die Aktivierung durch thermische Neutronen zu messen, ist es nötig die Cadmium-Differenzmethode anzuwenden. In der Abbildung 6c[15] ist ersichtlich, dass Cadmium fast alle Neutronen im thermischen Bereich und darüber hinaus bis ungefähr 0,4 eV absorbiert. Gold, im Gegensatz dazu, hat im thermischen Bereich einen um etwa 10^2 kleineren Wirkungsquerschnitt der dann für schnelle Neutronen stark ansteigt (mit deutlichen Resonanzen). Dadurch wird eine mit Cadmium bedeckte Goldfolie nur von Neutronen über der „Cadmium-Abschneideenergie“ aktiviert, während eine unbedeckte Goldfolie Wechselwirkungen mit allen Neutronen erfährt. Bildet man die Differenz der gemessenen Aktivierung von einer unbedeckten und einer gleichzeitig bestrahlten und mit Cadmium bedeckten Folie, erhält man den Messwert für die Aktivierung, die nur durch thermische Neutronen entstanden ist. Der Unterschied in der effektiven Cd-Abschneideenergie und der Energie der thermischen Neutronen (0,0253 eV) wird im Korrekturfaktor F_{Cd} berücksichtigt.

$$C_{th} = C_t - F_{Cd} \cdot C_{Cd} \qquad \textit{(Gleichung 6.5)}$$

C_t Aktivierung der unbedeckten Sonde
C_{Cd} Aktivierung der Cd-bedeckten Sonde

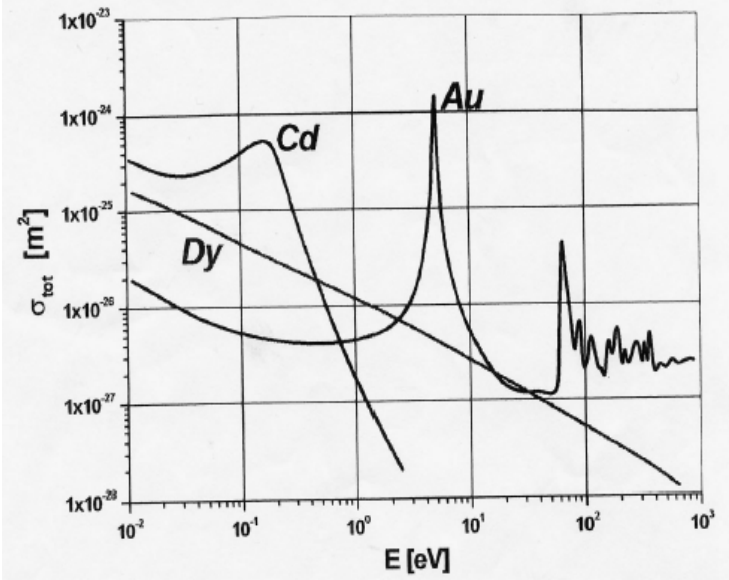


Abbildung 6c: Wirkungsquerschnitte von Cadmium Cd und Gold Au für Neutronen der Energie eV

Die Reaktion der Goldatome mit Neutronen ist

$$^{197}Au + n \rightarrow {}^{198}Au \rightarrow \beta^- (T_{1/2} = 2{,}7 \text{ Tage}) \rightarrow {}^{198}Hg$$

Die Messung der Aktivität wird mittels eines 4π-β-Zählers durchgeführt. Die Formel für die Flussbestimmung unter Berücksichtigung sämtlicher Faktoren (Effizienz des 4π-β-Zählers, Neutronenselbstabschirmfaktor der Folie etc.) ist im Anhang B angegeben.

Vier Bestrahlungen (2 mit Kollimatorkonfiguration, 2 mit Graphitwandkonfiguration) mit drei unterschiedlichen Goldfolien (A, B, C) wurden durchgeführt. Die Folien waren in der Bestrahlungsposition (Abbildung im Anhang B) auf einem Aluminiumträger angebracht, Abbildung 6d.

Abbildung 6d: Goldfolien B mit Cadmiumabdeckung auf Aluminiumträger

Die Bestrahlungsdauer war über einen Zeitraum von etwa 6,5 Stunden in Abhängigkeit vom Reaktorbetrieb (in der Regel von ca. 9h bis 15:45h), die Reaktorleistung war immer konstant 250 kW. Folien A wurden an beiden Konfigurationen bestrahlt. Zwischen diesen zwei Aktivierungszyklen lagen 20 Tage (7-8 Halbwertszeiten von ^{198}Au) um den Folien genügend Zeit zum Abklingen zu geben.

Die Messungen der Aktivität mit dem 4π-β-Zähler verliefen ohne Schwierigkeiten. Die Messdauer war immer 60 Sekunden. Pro Folie wurde die Aktivität 10 mal hintereinander gemessen. Leerwertmessungen wurden wiederholt vorgenommen. Für die Werte von t_2 wurde immer der Mittelwert der Zeit zwischen Beginn und Ende der Aktivitätsmessung der jeweiligen Folie eingesetzt. Alle Messwerte für jede einzelne Folie und für die Leermessungen wurden gemittelt. Der daraus berechnete Fluss thermischer Neutronen an der Bestrahlungsposition der Radiographieanlage ist für einzelne Folien und als Mittelwert für die zwei Konfigurationen der thermischen Säule in der Tabelle 6.1 angegeben.

Folien	Konfiguration therm. Säule	therm. Fluss n/cm²s	
A			
6 Stück	ganzer Ziegel	*0.264 * E5*	Brutto-Messwert
m = 0.0078g		*0.277 * E5*	Effektiv-Messwert
r = 0.25cm			
F = 0.196cm²	Kollimator	1.604 * E5	Brutto-Messwert
		*1.619 * E5*	Effektiv-Messwert
B			
4 Stück	ganzer Ziegel	*0.320 * E5*	Brutto-Messwert
m = 0.234g		*0.325 * E5*	Effektiv-Messwert
r = 0.8cm			
F = 2.01cm²			
C			
4 Stück	Kollimator	*1.491 * E5*	Brutto-Messwert
m = 0.193g		*1.492 * E5*	Effektiv-Messwert
r = 0.8cm			
F = 2.01cm²			
MW A-B	ganzer Ziegel	*0.292 * E5*	Brutto-Messwert
		0.301 * E5	Effektiv-Messwert
MW A-C	Kollimator	1.548 * E5	Brutto-Messwert
		1.555 * E5	Effektiv-Messwert

Tabelle 6.1: Fluss thermischer Neutronen an der Bestrahlungsposition der Radiographieanlage

Bruttomesswerte sind gemessene Counts ohne Abzug des Leerwerts des 4π-β-Zählers. Die berechneten Flussdichten für die zwei Konfigurationen der thermischen Säule korrelieren sehr gut mit den Werten die von der Radiographiearbeitsgruppe [34] bei allen Arbeiten laufend eingesetzt werden.

VI.4 Neutronen-Kalibrierung

Neutronenstrahlung wird als indirekt ionisierende Strahlung über ihre Wechselwirkungsprodukte nachgewiesen. Thermische Neutronen werden in TLD-600 durch die $^{6}Li\ (n_{th},\alpha)^{3}H$ Reaktion detektiert. Der Messeffekt wird primär durch das 2.07 MeV Hoch-LET-Alphateilchen hervorgerufen. Tritium, auf den 2,74 MeV Energie übertragen werden, ist ein β^--Strahler (E = 0,018 MeV) mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2}$ = 12,35 Jahren. Bei hohen Neutronenflüssen kann sich, wie bereits erwähnt, eine Änderung der γ-Empfindlichkeit der Dosimeter ergeben. Zusätzlich ist der Tritiumeffekt für die Backgroundemission der Dosimeter zu berücksichtigen, da sich durch die Betastrahlung allmählich eine Eigendosis aufbauen kann. Werden die Dosimeter längere Zeit nach einer stärkeren Neutronenbestrahlung und darauffolgender Auswertung gelagert, kann die Eigendosis einen

erhöhten Background (Nullwert) liefern. Somit empfiehlt es sich die Zeitabstände zwischen Ausheizen und Bestrahlung, und Bestrahlung und Auswertung so kurz wie möglich zu halten.
Schnelle Neutronen werden mit TLD-700 über Sekundärprotonen nachgewiesen. Um eine Eindeutige spektrale Aufspaltung in einem Neutronenfeld zu erreichen, bedarf es jedoch mehrerer Messsysteme und genauer Kalibrierungen für die nach oben offenen Energiebereiche. Mit passiven Systemen, beispielsweise Bonnerkugeln verschiedener Radien, können Neutronen über große Energiebereiche auf Grund verschieden starker Moderation unterschieden werden.
Um die Dosimeter für den Einsatz in der Pair Methode vorzubereiten, wurden sie an der Bestrahlungsposition der Neutronenradiographieanlage kalibriert. Ein kleines Dosimetermäppchen (24 Dosimeterplätze) war am selben Aluminiumträger wie bei der Neutronenflussbestimmung im Zentrum der Bestrahlungsposition angebracht. Auf Grund des kleinen Durchmessers der Strahlöffnung konnten nicht alle 50 TLDs gleichzeitig im großen Mäppchen wie bei der Gammakalibrierung bestrahlt werden.
In Gruppen zu 20, 20 und 10 Chips wurden TLD-600 jeweils 2 min, und TLD-700 jeweils 10 min (bei gleicher Reaktorleistung von 250 kW für beide Konfigurationen der thermischen Säule) vier Bestrahlungen ausgesetzt (KN1, KN2, KN3, KN4).
Die TL-Signale der TLD-600 Chips (Peak 5 Höhe abzüglich des Mittelwerts der Peak 5 Höhen der TLD-700, Berücksichtigung der leicht unterschiedlichen Gammaempfindlichkeit) wurden dann in Relation zum Fluss thermischer Neutronen zu Kalibrierfaktoren wie folgt verarbeitet:

$$n_{th}\text{-Kalfak} = \text{Counts} / \text{Fluss} = [\text{Cts}] / [\text{n/cm}^2]$$

Die n_{th}-Kalfak Werte aus der Bestrahlung KN3 im reinen thermischen Feld (Graphitwandkonfiguration) wurden später für die Flussbestimmungen thermischer Neutronen im Phantom herangezogen. Die Werte aus den Bestrahlungen KN1 und KN2 mit der Kollimatorkonfiguration (thermische und schnelle Neutronen) dienten nur als Vergleich. Dieser lieferte eine Abweichung der Werte von maximal 8% für alle TLD-600 Chips. Dies erlaubt die Schlussfolgerung, dass man bei zukünftigen Neutronenkalibrierungen von TLD-600 bei Bedarf auch mit der Kollimatorkonfiguration zufriedenstellende Ergebnisse erwarten darf. Alle Messwerte und n_{th}-Kalibrierfaktoren sind in den Tabellen A3 und A4 im Anhang A angeführt. Ein Vergleich der Glowkurven von TLD-600 und TLD-700 in Abbildung 6e illustriert die unterschiedlichen Empfindlichkeiten dieser Dosimetertypen gegenüber Neutronen.

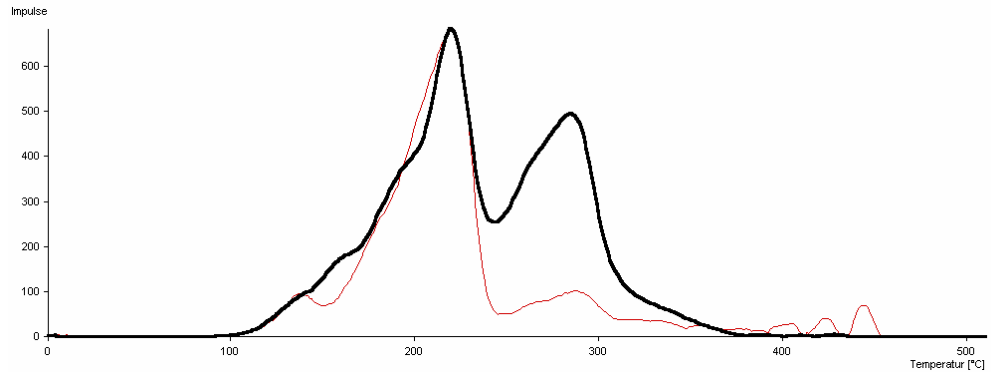


Abbildung 6e: Glowkurven von TLD-600 und TLD-700 nach der Bestrahlung KN3, normiert auf Peak 5 Höhe

Bei TLD-700 erkennt man keinen wesentlichen Unterschied in der Struktur der Glowkurve im Vergleich zur Gammabestrahlung (Abbildung 6b). Lediglich der Bereich der HTE scheint etwas erhöht zu sein.

Bei TLD-600 erkennt man im Niedertemperaturbereich die Konturen der Peaks 2, 3 und 4 und die HTE ist deutlich ausgeprägt. Diesen Unterschied in der Empfindlichkeit der zwei Dosimetertypen gegenüber thermischen Neutronen macht sich die Pair-Methode zu Nutze. Der Zusammenhang der Hochtemperaturemission mit dem LET der Strahlung wird im folgenden Unterkapitel erläutert.

VI.5 HTR Methode, HTR-LET-Kalibrierung

Die am Atominstitut entwickelte HTR-Methode (High Temperature Ratio) ermöglicht Aussagen über den LET einer Strahlungsart. Die absorbierte Energiedosis wird bei TLD-600 und TLD-700 aus der Höhe des Peak 5 gewonnen. Dieser Wert sagt allerdings nichts über die Qualität der Strahlungsart und ihre biologische Wirksamkeit aus. Vergleicht man den relativen Anstieg der Hochtemperaturemission (HTE-Integral im Bereich von 245°C - 310°C) einer Strahlenart bei Normierung der Glowkurve auf den Peak 5 einer Referenzstrahlung, kann man Rückschlüsse auf den LET dieser Strahlung ziehen. Der HTR-LET Zusammenhang wurde in einigen Arbeiten am Atominstitut[8],[10] untersucht. Dies erfordert eine Vielzahl aufwendiger Kalibrierbestrahlungen mit verschiedenen Strahlenarten, die in der vorliegenden Arbeit für die verwendete Dosimetercharge nicht durchgeführt worden sind. Die HTR-LET-Kalibrierung wurde aus [10] übernommen. In der Abbildung 6f[10] ist dieser Zusammenhang nur für TLD-700 dargestellt, da nur mit diesem Dosimetertyp die LET Verteilung bei den Phantomexpositionen, Kapitel 8, bestimmt wird.

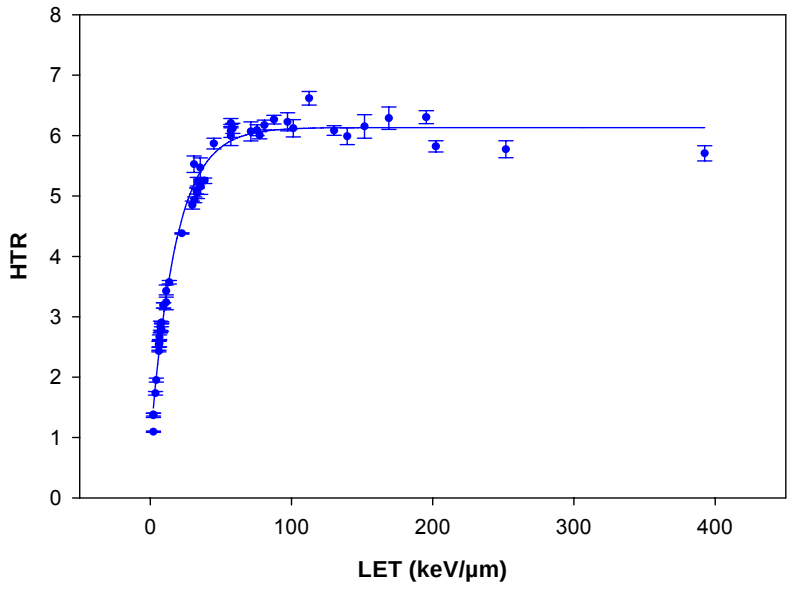


Abbildung 6f: HTR-LET Zusammenhang für TLD-700

Die Fit-Funktion[10] („Best Fit“) zur Verbindung der Messpunkte dieser HTR-LET-Kalibrierung ist

$$\mathrm{LET} = -\frac{1}{c} \cdot \ln\left[1 - \left(\frac{\mathrm{HTR} - a}{b}\right)\right] \qquad \textit{(Gleichung 6.6)}$$

Die Fit-Parameter a, b und c unterscheiden sich für TLD-600 und TLD-700, da der HTR nicht nur vom LET, sondern auch von der Art der Teilchen abhängt. Zur Berechnung des mittleren LET im Phantom werden die Folgenden Parameter[10] eingesetzt:

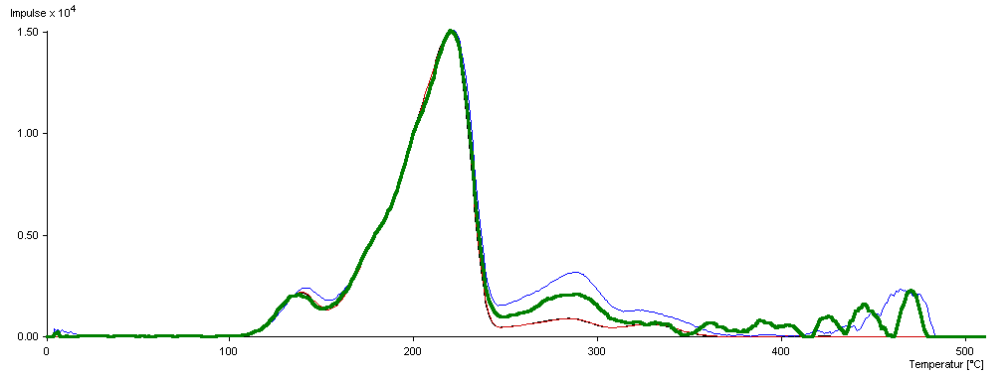
Parameter	TLD-700
a	0,8874
b	5,244
c	0,05541

Tabelle 6.2: Fit-Parameter für die HTR-LET Funktion

In der abgebildeten Kurve erkennt man ein Verhalten abweichend von der Linearität für HTR Werte ab 5,5 (LET ≈ 50 keV/µm), und darunter einen annähernd linearen HTR-LET Zusammenhang.
Als Referenzstrahlung wurde in dieser Arbeit, wie schon im Unterkapitel über Gammakalibrierung beschrieben, ^{137}Cs Gammastrahlung der Energie E = 662 keV verwendet. Zur Bestimmung des HTR bei Phantomexpositionen wurden die TLD-700 Glowkurven der Bestrahlung KG4 als Referenzkurven eingesetzt.
Auf Grund der (n_{th},α)–Reaktion im ^{6}Li ist eine HTR Auswertung der TLD-600 Glowkurven nach Bestrahlung mit Neutronen nicht zielführend. Hoch-LET-Alphateilchen verursachen einen derart dominanten HTE Effekt, dass Beiträge anderer Strahlenarten völlig überdeckt sind und eine Bestimmung des zugehörigen LET nicht möglich ist.

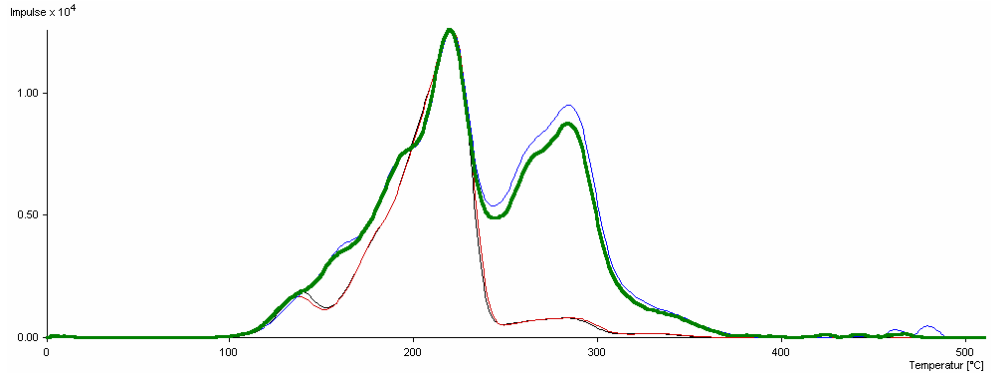
VI.6 Freiluft-Neutronenkalibrierung

In reinen thermischen Feldern wird mit TLD-700 kein Messeffekt durch Neutronen, sondern nur durch Gammastrahlung erzielt. Deshalb war es zu erwarten, dass die Hochtemperaturemission (HTE) der TLD-700 nach der Neutronenkalibrierung KN3 (Graphitwandkonfiguration) keine Erhöhung zur Gammakalibrierung KG4 aufweisen sollte (ein Messeffekt nur durch Gammastrahlung des Reaktors). Dies hat sich jedoch nicht bestätigt.
In den Abbildungen 6g und 6h wird die Erhöhung der HTE beider Dosimetertypen (jeweils ein Chip stellvertretend für die gesamte Charge) bei KN1 und KN3 dargestellt.



— ***Gammabestrahlung KG4***
— ***thermisches Neutronenfeld (Graphitwand) KN3***
— ***„schnelles“ Neutronenfeld (Kollimator) KN1***

Abbildung 6g: TLD-700 HTR-Vergleich von Gamma- und Neutronenbestrahlung



— ***Gammabestrahlung KG4***
— ***thermisches Neutronenfeld (Graphitwand) KN3***
— ***„schnelles“ Neutronenfeld (Kollimator) KN1***

Abbildung 6h: TLD-600 HTR-Vergleich von Gamma- und Neutronenbestrahlung

Die schwarzen Glowkurven, die in beiden Abbildungen fast deckungsgleich mit den roten Kurven von KG4 sind, stammen von der Bestrahlung KG3. Die grüne Glowkurve (KN3) ist im Bereich der Hochtemperatur deutlich erhöht relativ zur roten (und schwarzen) Glowkurve der Gammabestrahlung KG4 (und KG3) . Dieses Ergebnis für die TLD-700 deutete auf einen Beitrag einer Strahlung mit LET > LET von ^{137}Cs Gammastrahlung hin. Ausgehend von der Annahme, dass das Neutronenfeld rein thermisch ist, kann ein Beitrag durch schnelle Neutronen ausgeschlossen werden. Unbekannte Strahlungskomponenten konnten somit entweder als Sekundärstrahlung im Dosimetermäppchen oder durch Aktivierung des Aluminiumträgers und der Umgebung der Bestrahlungsposition entstanden sein. Um diesen Effekt zu untersuchen, wurde eine weitere Neutronenkalibrierung vorgenommen.

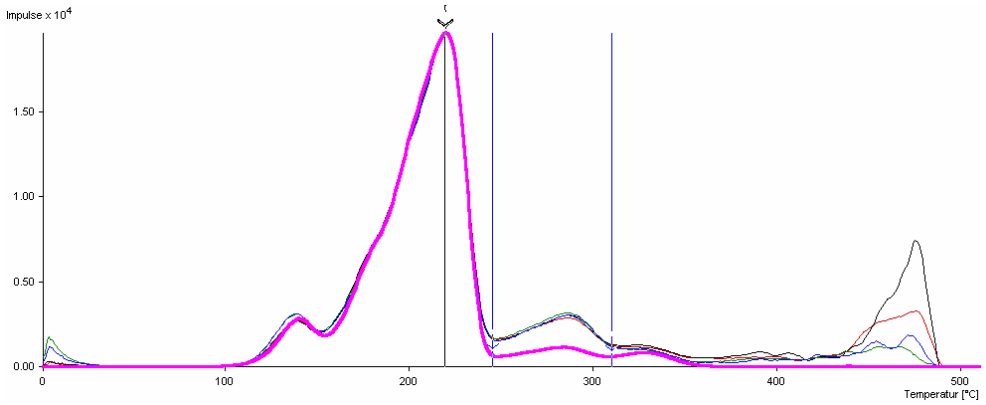
Die Freiluftkalibrierung KN4 wurde an der gleichen Bestrahlungsposition und bei gleicher Reaktorleistung von 250kW und Bestrahlungszeit (TLD-600 t=2 min, TLD-700 t=10 min) mit ganzem Graphitziegel in der Wand der thermischen Säule durchgeführt. Das kleine Dosimetermäppchen war auf einer Schnur in der gleichen Position wie vorher auf dem Aluminiumträger im Neutronenstrahl „Freiluft“ aufgehängt. Chips 1-30 beider Dosimetertypen

wurden mit offenem, 31-50 mit geschlossenem Mäppchen bestrahlt. Das offene Mäppchen war an der Vorderseite mit einer hauchdünnen Kunststofffolie bedeckt um die Chips im Mäppchen zu fixieren. Die chemische Zusammensetzung der Folie war nicht bekannt, allerdings wurden mit dieser Folie mehrmals frühere Freiluftkalibrierungen im Rahmen verschiedener Arbeiten durchgeführt. Somit konnten die Messergebnisse dieser Kalibrierung mit früheren Messreihen verglichen werden.
Die Lichtmessung wurde für alle Chips ohne Filter durchgeführt. Somit war diese Kalibrierbestrahlung in allen Details bezüglich Dosimetervorbereitung, Bestrahlungszeit und TL-Messung identisch mit den anderen Neutronenkalibrierungen (KN1, KN2, KN3).
Im Folgenden werden die Messwerte (Tabellen A3 und A4 im Anhang A) dieser Bestrahlungsreihe diskutiert.

VI.6.1 Ergebnis der Freiluftkalibrierung

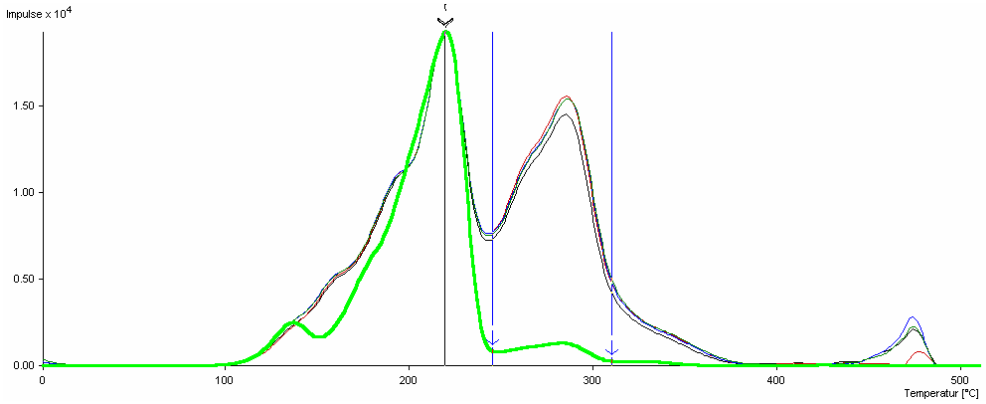
Die Signalausbeute (Peak 5 Höhe) beider TLD-600 „Blöcke“ bei KN4 war im Mittel um 30% höher als bei KN3. Bei TLD-700 betrug sie für Chips 1-30 – 4%, und für Chips 31-50 +15% des Mittelwertes von KN3. Der große Unterschied vor allem bei TLD-600 kann nur teilweise auf mögliche kleinere Schwankungen in der Reaktorleistung zurückgeführt werden, und ist in dieser Größenordnung überraschend.
Mittelwertskurven der vierten γ-Kalibrierung (KG4), der dritten (KN3) und dieser Neutronenkalibrierung (KN4) für die Dosimeterblöcke 1-30 und 31-50 wurden gebildet und zur HTR-Auswertung herangezogen. Alle Kurven wurden schließlich auf die Mittewertskurve von KG4 der Chips 31-50 normiert und der HTE-Bereich von 245°C bis 310°C verglichen.

Die Auswertung lieferte den Beweis, dass Aluminium keinen Einfluss auf die Glowkurvenstruktur und das Integral der Hochtemperaturemission hat. Abbildungen 6i und 6j belegen eindeutig, dass der HTR Vergleich für Dosimeter im geschlossenen Mäppchen (Chips 31-50) annähernd gleiche Werte für KN3 (mit Al) und KN4 (ohne Al) lieferte. Die Werte der HTE Integrale der Kurven *KN4_T7_31-50* und *KN3_T7_31-50* unterscheiden sich für TLD-700 um 0,4%, die analogen Kurven der TLD-600 um 0,6%. Dies erlaubte zusätzlich einen Vergleich der Messdaten mit früheren Kalibrierungen an der Radiographieanlage, da bei diesen ebenfalls ein Aluminiumträger ein Bestandteil der Kalibriergeometrie war.
Für Dosimeter im offenen Mäppchen (Chips 1-30) ergab sich für TLD-700 ein um 7,4% und für TLD-600 ein um 7,1% höherer Mittelwert im Vergleich zu KN3. Somit konnte man einen Beitrag einer Sekundärstrahlung als Folge von Materialaktivierung im Mäppchen ebenfalls ausschließen.



KG4_T7_01-30, Integral HTE (245°C bis 310°C) = 56254
KG4_T7_31-50, Integral HTE (245°C bis 310°C) = 56560, Integral Peak 5 = 19653
KN3_T7_01-30, Integral HTE (245°C bis 310°C) = 142882 → HTR=2,54
KN3_T7_31-50, Integral HTE (245°C bis 310°C) = 145422 → HTR=2,57
KN4_T7_01-30, Integral HTE (245°C bis 310°C) = 153444 → HTR=2,73
KN4_T7_31-50, Integral HTE (245°C bis 310°C) = 146053 → HTR=2,58

Abbildung 6i: TLD-700 Mittelwertskurven für KG4, KN3 und KN4 normiert auf Peak 5 von KG4_T7_31-50



KG4_T6_01-30, Integral HTE (245°C bis 310°C) = 61731
KG4_T6_31-50, Integral HTE (245°C bis 310°C) = 62378, Integral Peak 5 = 19301
KN3_T6_01-30, Integral HTE (245°C bis 310°C) = 695195
KN3_T6_31-50, Integral HTE (245°C bis 310°C) = 749414
KN4_T6_01-30, Integral HTE (245°C bis 310°C) = 744846
KN4_T6_31-50, Integral HTE (245°C bis 310°C) = 745159

Abbildung 6j: TLD-600 Mittelwertskurven für KG4, KN3 und KN4 normiert auf Peak 5 von KG4_T6_31-50

Die Kurven KG4_T7_01-30 und KG4_T6_01-30 (beide braun) sind in den Abbildungen kaum zu erkennen da sie unter den hervorgehobenen Kurven KG4_T7_31-50, respektive KG4_T6_31-50 liegen. Die zugehörigen HTE-Integralwerte sind aber zwecks HTR-Vergleichs angegeben.
Zusätzlich konnte ein möglicher Chargeneffekt überprüft werden. Dafür wurden je 6 Chips der beiden Dosimetertypen einer anderen Charge des gleichen Herstellers als Referenzgruppe eingesetzt. Die Messwerte dieser Charge lieferten bei beiden

Dosimetertypen das gleiche Ergebnis mit teilweise etwas stärker ausgeprägtem HTR Effekt. Dadurch war eine Fehldotierung der in dieser Arbeit verwendeten Dosimetercharge als Ursache des Effekts auszuschließen. Diese Referenzgruppe hatte außerdem wiederholt einen ähnlichen HTR Effekt bei früheren Bestrahlungen an der Radiographieposition aufgewiesen[28].
Da mit TLD-700 kein Messeffekt durch thermische Neutronen zustande kommen sollte, deutet die für beide Dosimetertypen fast identische Zunahme des HTR beim offenen Mäppchen auf einen Effekt durch unbekannte Strahlungskomponenten im Spektrum der thermischen Säule hin. Die Abdeckung des Mäppchens stellte offensichtlich eine gewisse Abschirmung gegen solche Komponenten des gemischten Strahlungsfeldes mit höherem LET dar. Die Vermutung, dass es sich um einen Beitrag aus dem primären Feld des Reaktors handelt, wird auch durch das Ergebnis der Referenzgruppe und früherer Messungen[17] (bei unterschiedlichen Geometrien) bekräftigt. Durch welche Strahlungsart sich der beschriebene Effekt eingestellt hat wurde nicht weiter untersucht. Bei späteren Phantombestrahlungen an der thermischen Säule sollte der Ursprung dieser Strahlung festgestellt werden (primäres Spektrum des Reaktors oder Umgebung der Bestrahlungsposition der Radiographieanlage).

Der HTR Mittelwert dieser Strahlung (2,605) entspricht LET ≈ 7keV/µm. Der Einfluss auf die Ergebnisse der LET Bestimmung bei den Phantomexpositionen und der diesbezügliche Fehlerrahmen konnten nicht genau bestimmt werden, wie im folgenden Unterkapitel begründet wird. Der überraschend große Unterschied der TL-Ausbeute von TLD-600 bei KN3 und KN4 bewirkte auch einen Unterschied der Kalibrierfaktoren aus diesen zwei Bestrahlungen. Abweichungen bis zu 25% bei einzelnen Chips wurden registriert. Da die Kalibrierbedingungen auf Grund der untersuchten Effekte nicht identisch waren, werden später zur Neutronenflussbestimmung im Phantom die Kalibrierfaktoren aus der Bestrahlung KN3 eingesetzt.

VI.7 LET-Abhängigkeit der Efficiency

Analog zur Energieabhängigkeit weisen TL Dosimeter auch eine LET-Abhängigkeit der Efficiency auf. Für die verwendete Dosimetercharge wurde diese nicht bestimmt, sondern analog zum HTR-LET Zusammenhang aus [10] entnommen.
Da eine HTR-Auswertung der Phantombestrahlungen nur mit TLD-700 Chips durchgeführt wurde, ist hier nur das LET-abhängige Verhalten der Efficiency für diesen Dosimetertyp in Abbildung 6k[10] angegeben.
Die obere Kurve (dunkelblau) stellt das Verhalten der HTE-Efficiency, die untere (hellblau) das Verhalten der Peak 5-Efficiency von TLD-700 bei Messungen mit verschiedenen Strahlenarten (Ionen) dar. Beide Kurven stellen die „Best Fit“-Funktion dar.

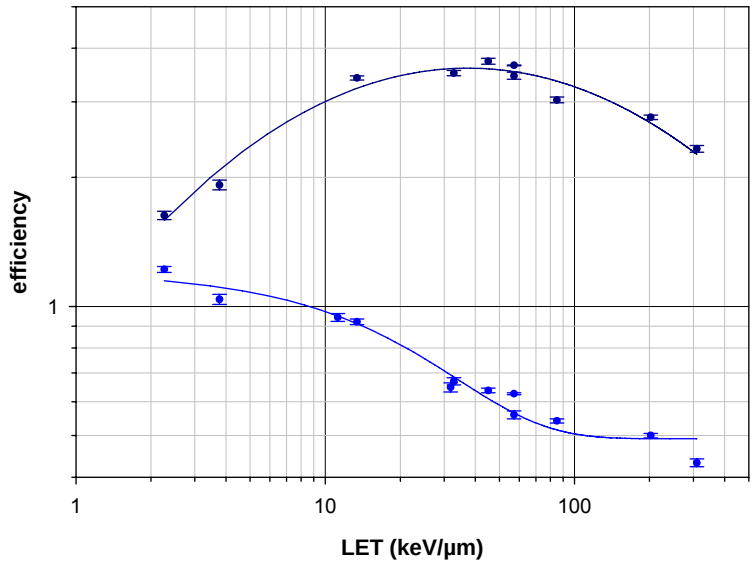


Abbildung 6k: LET-abhängige Efficiency von TLD-700 für Peak 5 und HTE-Peaks

Die LET-Efficiency der HTE von TLD-700 nach [10] ist in der Tabelle 6.3 aufgelistet.

LET in H_20 (keV/µm)	Efficiency HTE TLD 700	Efficiency Peak 5 TLD 700
2.26	1.63	1.22
3.76	1.92	1.04
13.41	3.41	0.92
32.83	3.50	0.67
45.08	3.73	0.63
57.18	3.45	0.56
85	3.03	0.54
202.2	2.76	0.50
309.6	2.33	0.43

Tabelle 6.3: LET-Efficiency der HTE von TLD-700

Aus der Kurve und der Tabelle ist ersichtlich, dass die LET-Efficiency der Hochtemperaturemission bis zum Bereich von LET ≈ 50 keV/µm rasch ansteigt, um danach wieder abzunehmen. Die Efficiency des Hauptpeaks verringert sich mit steigendem LET bis zum Bereich von LET ≈ 100 keV/µm. Die LET-Efficiency der HTE für die, in der vorliegenden Arbeit verwendeten TLD-700, lässt sich für eine Strahlung mit LET ≈ 7 keV/µm auf etwa 2,7 abschätzen. Da die Strahlungsart aber nicht bekannt ist, kann kein genauer Wert angegeben werden. Dies erschwert die Abschätzung des Fehlerrahmens für die LET-Bestimmung bei späteren Phantombestrahlungen. Die LET-Efficiency des Hauptpeaks in diesem Bereich ist praktisch eins. Dadurch sind die Berechnungen der gammaäquivalenten Dosisleistung und der absorbierten Dosis im Phantom mit keinem diesbezüglichen Fehler behaftet.

VII TL-Messung und Auswertung

Alle Messungen der TL-Kurven sämtlicher Kalibrier- und Phantombestrahlungen wurden im TL-Labor des Atominstituts der österreichischen Universitäten mittels der TL-DAT II Anlage durchgeführt. Datenverarbeitung und Auswertung erfolgte mittels der „TLD 98“ Software.

Die Anlage besteht aus einer Heizkammer, einem Photomultiplier und einem PC über den alle Messungen gesteuert, und Auswertungen durchgeführt werden können. In der Abbildung 7a[9] sind eine allgemeine schematische Darstellung einer TL-Auswerteanlage und ein Foto der TL-DAT II Anlage dargestellt.

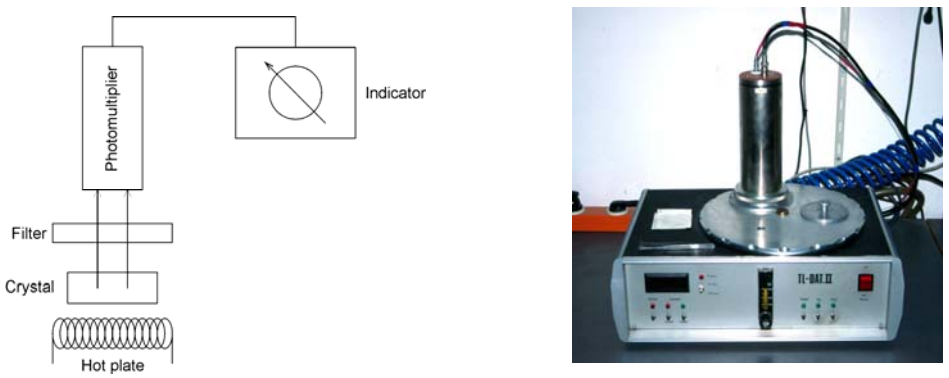


Abbildung 7a: TL-Auswerteanlage- schematische Darstellung, verwendete TL-DAT II Anlage

Mittels angeschlossener Vakuumpumpe wird die Kammer mit dem Heizelement vor jeder Messung evakuiert und danach mit Stickstoff gespült. Die Stickstoffatmosphäre spielt eine essentielle Rolle für die Aufnahme der Glowkurven. Insbesondere im Hochtemperaturbereich können erhöhte parasitäre Emissionen in Folge ungenügender Stickstoffatmosphäre zur Verfälschung der Messwerte führen, und eine HTR-Auswertung unmöglich machen.

Vor jeder Messreihe wurde das Ansprechvermögen des Photomultipliers überprüft. Dazu wurde ein von Ing. Fugger konstruierter Lichtstandard (Natururanfolie in einem Kunststoffszintillator gekapselt, 10 mm x 10 mm) verwendet. Dabei erwies sich die Photomultiplierempfindlichkeit als äußerst stabil gegenüber Schwankungen, sodass keine diesbezügliche Korrektur der Messwerte vorgenommen werden musste. Die Abweichungen der Lichtstandardmesswerte vom Mittelwert der über mehrere Monate standardmäßig durchgeführten Überprüfungen der Anlage war insignifikant ($< 0{,}2\%$), und wurde deswegen nicht in den Ergebnissen der Phantomexpositionen berücksichtigt.
Zusätzlich wurde am Beginn jeder Messreihe immer eine Leermessung durchgeführt, um die Funktion der Heizplatte und des Photomultipliers zu überprüfen.
Bei einzelnen Messungen der Emission von TLD-600 wurde ein Graufilter verwendet, der die Intensität der Photonenemission um den Faktor 20,3 reduziert. Somit war keine Korrektur für die Totzeit des Photomultipliers (ab ca. $24 \cdot 10^3$ Counts) notwendig. Die entsprechende Multiplikation der Messwerte wurde in den Ergebnistabellen berücksichtigt.

Alle Messungen verliefen ohne Fehlfunktionen der Anlage und mögliche Beeinträchtigung der erhaltenen Messwerte. Die Backgroundemission wurde immer nur beim ersten Chip gemessen. Der Background selbst jedoch wurde durch die Auswertesoftware „TLD 98“ mittels einer mathematischen „Fitting“-Prozedur im Temperaturbereich der

Schwarzkörperstrahlung berechnet. Die Auswertung der Glowkurven war dadurch in keiner Weise beeinträchtigt, und der zeitliche Aufwand bei der Kurvenaufnahme konnte beträchtlich reduziert werden.
Die Auswertung der Glowkurven mittels der Software verlief problemlos. Jede aufgenommene Kurve wurde backgroundbereinigt, geglättet (21 Punkte) und der Hauptpeak (Peak 5) auf 220°C verschoben. Nur bei wenigen Chips erwies sich das voreingestellte Intervall der Background-Fitting-Funktion von 380°C - 440°C als nicht gut genug. Mit kleinen Korrekturen dieses Temperaturbereichs (es wurde immer zu niedrigeren Temperaturen hin verschoben) konnten zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden.
Zur HTR Auswertung wurde das Integral der Lichtemission im Temperaturbereich von 245°C bis 310°C gewählt. Die Wahl der unteren Grenze ist durch den eindeutigen Wendepunkt der Gammaglowkurve am „hinteren“ Rand des Hauptpeaks bestimmt. Die obere Grenze wurde so gewählt, dass der gesamte Bereich des Peak 6 eingeschlossen ist. Alle Kurven wurden auf Peak 5 der Glowkurve der vierten Gammakalibrierung des jeweiligen Chips normiert. Phantombestrahlungen wurden an der thermischen Säule und im Trockenbestrahlungsraum des Reaktors und mittels einer Pu-Be Quelle am Atominstitut durchgeführt. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Phantomexpositionen beschrieben und die zusammengefassten Messwerte der Tiefendosis- und LET-Verteilung angeführt.

VIII Phantombestrahlungen

Drei Phantomexpositionen wurden an der thermischen Säule (EXP1, EXP3, EXP4), eine im Trockenbestrahlungsraum des Reaktors (EXP5) und eine mit einer Pu-Be Quelle (EXP2) durchgeführt. Entscheidend für die Wahl der Dosimeterpositionen im Phantom war die Zusammensetzung des Neutronenfeldes. Der Einfluss des Streukörpers auf die Dosisverteilung wurde bei der Bestrahlung im Trockenbestrahlungsraum untersucht. Die Ausrichtung des Phantoms zum Strahlungsfeld (Quelle) war, sofern sie nicht anders beschrieben wird, entsprechend der Abbildung 8a[12]

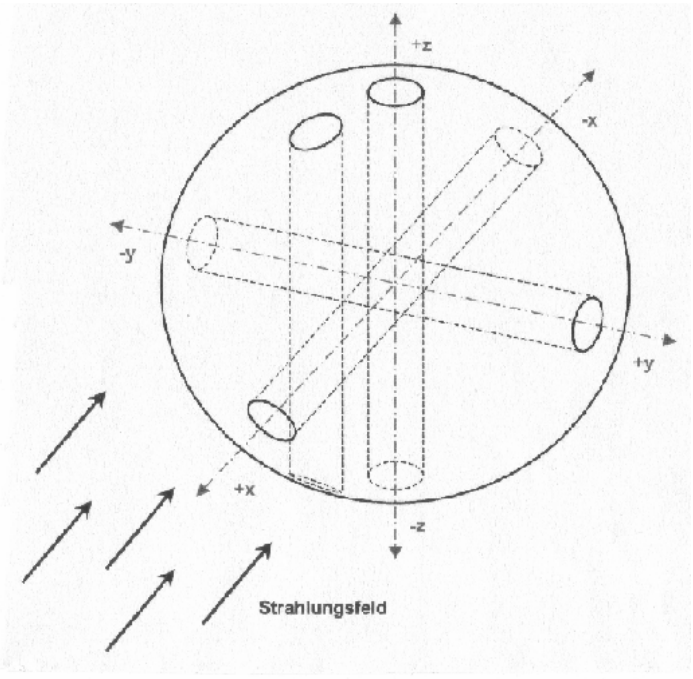


Abbildung 8a: Ausrichtung des Phantoms im Strahlungsfeld

Die Bezeichnung der Dosimeterpositionen in den Kanälen war vom Kugelrand aus betrachtet:

- im X-Kanal (parallel zur Strahlrichtung) X-01 (=H*10) bis X-20
- im Y-Kanal (normal zur Strahlrichtung) YL-01 bis YL-08 im -Y-Kanal = Y-Links
  YR-01 bis YR-08 im +Y-Kanal = Y-Rechts
- im Z-Kanal (normal zur Strahlrichtung) ZO-01 bis ZO-07 im +Z-Kanal = Z-Oben
  ZU-01 bis ZU-07 im -Z-Kanal = Z-Unten

Jeder Position wurde ein Paar von TLD-600 und TLD-700 zugewiesen. Diese Chippaare wurden immer nur auf ihrer Position eingesetzt, sofern diese bei der jeweiligen Bestrahlung

besetzt war. Die Zusammenfassung der Positionen und ihnen zugewiesene Dosimeterpaare befindet sich in der Tabelle A5 im Anhang A.
Im Folgenden werden die Bestrahlungsbedingungen und Bezeichnungen für die verschiedenen Expositionen, und die Faktoren, die bei der Wahl der zu bestückenden Dosimeterpositionen berücksichtigt wurden, beschrieben.

VIII.1 Bestrahlungen an der thermischen Säule

Die Bestrahlungsposition der Radiographieanlage war auf Grund der Dimension der Kugel ungeeignet. Der kleine Durchmesser des Kollimators (relativ zum Kugeldurchmesser) hätte weiters kein homogenes Strahlungsfeld für die gesamte Kugeloberfläche bewirkt. Deshalb wurden die Bestrahlungen des Phantoms direkt an der Graphitwand der thermischen Säule vorgenommen. Das Phantom war zur Gänze im reinen thermischen Feld unterhalb des Kollimators auf einer Kunststoffauflage auf einem Arbeitstisch aus Metal positioniert, Abbildung 8b. Der Abstand des Phantoms zur Graphitwand war etwa 25 cm. Dahinter wurde die äußere Wand der thermischen Säule (Beton), an der die Radiographieanlage sich befindet, zugemacht. Dadurch war ein gewisser Rückstreueffekt zu erwarten. Welche Größenordnung ein möglicher Streueffekt durch den Tisch hatte wurde nicht untersucht, da er für alle drei Bestrahlungen gleich war.

Abbildung 8b: Bestrahlungsgeometrie an der thermischen Säule

Hauptaugenmerk bei diesen drei Messreihen lag auf der Verteilung der Tiefendosis durch thermische Neutronen, und auf dem Effekt der Ausrichtung der Dosimeter zum primären Strahl. Ebenfalls untersucht wurde die Abschwächung des thermischen Strahls im Dosimeterstapel. Mittels HTR-Methode für die TLD-700 wurde die LET-Verteilung im Phantom bestimmt. Gleichzeitig sollte das Spektrum direkt an der Graphitwand auf die Strahlungskomponente mit deutlich höherem LET als Gammastrahlung, die bei der Neutronenkalibrierung festgestellt worden ist, überprüft werden.

Die Bestrahlungszeit für alle drei Expositionen war t = 1h bei einer Reaktorleistung von 2,5 kW. Im Folgenden werden die besetzten Dosimeterpositionen und die Ausrichtung der Chips zum äußeren Feld beschrieben.

VIII.1.1 Bestrahlung EXP1

Im X-Kanal waren alle 20 Positionen besetzt, um einerseits die Abschirmung des thermischen Neutronenstrahls durch die vordersten Chips, und andererseits den Rückstreueffekt durch die Betonwand zu prüfen. Im Y-Kanal waren auf beiden Seiten ebenfalls alle acht Positionen mit Dosimeterpaaren bestückt. Der Z-Kanal und der Streukörperkanal waren mit Dummys ausgefüllt. Alle Dosimeter waren parallel zur Tangentialfläche am Eingang des jeweiligen Kanals (Kugeloberfläche) ausgerichtet. Somit waren die Dosimeter im X-Kanal mit der Hauptfläche, die im Y-Kanal mit der schmalen Seitenfläche dem äußeren Strahl zugewandt. Die erste Position im X-Kanal, X-01, repräsentiert die in der Dosimetrie relevante Größe H*10.
Bei der TL-Messung wurde für TLD-600 Chips der Positionen X-01 bis X-06 und aller Y-Kanal Positionen der Graufilter verwendet. Die Lichtmessung der anderen TLD-600 und aller TLD-700 Chips erfolgte ohne Filter.

VIII.1.2 Bestrahlung EXP3

Im X-Kanal waren die Positionen X-04 bis X-13 und X-16 bis X-19 mit Dosimetern gleich wie bei EXP1 bestückt. Der Abschirmungseffekt durch das vorderste Dosimeter konnte somit in einer anderen Tiefe zu EXP1 verglichen, und auch die Absorption thermischer Neutronen durch das Phantom untersucht werden. Im Y-Kanal sollte der Einfluss der Ausrichtung der Chips zum einfallenden Neutronenstrahl überprüft werden. Dazu wurden die Chips auf jeweils 5 Positionen in Y-Links und Y-Rechts im 90° Winkel zur Tangentialfläche des Kanaleingangs platziert. Dadurch war ihre Hauptfläche dem äußeren Strahl zugewandt.
Die TL-Messung erfolgte für TLD-600 Chips der Positionen X-04 bis X-10 und aller YL- und YR-Positionen mit Filter, für alle anderen Chips ohne Filter.

VIII.1.3 Bestrahlung EXP4

Bei dieser Bestrahlung wurde die Kugel um den Winkel π um die Y-Achse (Kanal) gedreht, sodass der Z-Kanal und der Streukörperkanal parallel zur Strahlrichtung waren. Sie stellten somit die Kanäle X respektive X' dar. Dosimeterpositionen wurden so gewählt, dass man in diesen parallel verlaufenden Kanälen auf Positionen vergleichbarer (fast gleicher) Tiefe gleichzeitig die Abschirmung im Stapel und den Effekt der Dosimeterausrichtung untersuchen konnte. Im X-Kanal waren die Positionen X-08, X-09, X-10, X-15, X-17 und X-18 bestückt. Um die gleichwertigen Positionen bezüglich der Tiefe („Dicke" des Kugelmaterials davor) im X'-Kanal zu ermitteln, wurde der radiale Abstand von 5 cm berücksichtigt. Es ergaben sich 5 Positionen, gekennzeichnet als X'-08, X'-09, X'-10, X'-15 und X'-17. Diese wurden mit Chips die den Positionen X-01 bis X-05 zugewiesen waren bestückt. Zusätzlich waren die Dosimeter im X'-Kanal um den Winkel von 90° relativ zu den Chips im X-Kanal gedreht. Somit hatte der erste TLD-600 Chip im X'-Kanal (und alle dahinterliegenden) im Vergleich

zum ersten Chip im X-Kanal (und allen dahinterliegenden) nur 1/7 der Auftrittsfläche dem äußeren Strahl zugewandt.
Im Y-Kanal wurden die Chips auf 5 symmetrischen Positionen (beispielsweise YL-01 und YR-01 usw.) ebenfalls im Winkel von 90° relativ zueinander eingesetzt. Dabei markieren die Tiefenangaben immer den „vorderen“ Chiprand von der Kugeloberfläche aus betrachtet. Dadurch boten die Dosimeter von gleichwertigen Positionen bezüglich Y- und X-Tiefe wieder um den Faktor 7 unterschiedliche Auftrittsflächen für den einfallenden Strahl thermischer Neutronen.
Die TL-Messung wurde für alle TLD-600 Chips mit, für alle TLD-700 Chips ohne Filter durchgeführt.

VIII.1.4 Thermischer Neutronenfluss im Phantom

Eine Zusammenfassung der bestückten Dosimeterpositionen, der zugehörigen Tiefenangaben und aller Messwerte der Bestrahlungsreihen an der thermischen Säule ist in den Tabellen 8.1 und 8.2 veranschaulicht.
Es ist eindeutig ein starker Neutronenabschirmungseffekt durch das erste TLD-600 Dosimeter im X-Kanal feststellbar. Die Abnahme des thermischen Flusses in die Tiefe zeigt für alle drei Bestrahlungen einen fast identischen Verlauf, obwohl sich das erste Dosimeter des Stapels in verschiedenen Tiefen befunden hat. Der gemessene Fluss im zweiten Dosimeter im Stapel beträgt für alle Bestrahlungen ca. 57%, im dritten Chip ca. 36%, und im vierten ca. 22% des Wertes im ersten Dosimeter. Der starke Abschirmungseffekt führt dazu, dass in thermischen Neutronenfeldern ein aussagekräftiger Wert für den Fluss am besten mit dem ersten TLD-600 Chip im Stapel angegeben werden kann. Alle gemessenen Flusswerte in den Dosimetern dahinter hängen in großem Maß von der Anzahl der davor liegenden Chips ab. Für alle Messwerte hinter dem ersten Chip müsste also eine Korrektur entsprechend dem Abschirmungseffekt berücksichtigt werden.
Um die Absorption thermischer Neutronen in Abhängigkeit von Kugeltiefe zu untersuchen, können somit nur die Werte des jeweils ersten Chips im X-Kanal der drei Bestrahlungen herangezogen werden. Aus den Ergebnissen lässt sich eine annähernd exponentielle Flussabnahme im Phantom herleiten. Der Fluss in 10 mm Tiefe (X-01) bei EXP1 fällt bei EXP3 auf einen Wert von ca. 30% im ersten Chip (X-04) in 46 mm Tiefe ab, und weiter auf ca. 0,05% in 94 mm Tiefe (X-08) bei EXP4. Eine Reihe von Messungen mit kleineren Intervallen der ansteigenden X-Tiefe für den ersten Chip würde es ermöglichen das Absorptionsverhalten des Kugelmaterials für thermische Neutronen genauer zu definieren.
Die Ausrichtung der eingesetzten Dosimeter zum äußeren Strahl hat keinen Einfluss auf die Messungen im Inneren. Vergleicht man die gemessenen Flusswerte an symmetrischen Positionen im Y-Kanal und an korrespondierenden Positionen im X- und X’-Kanal, erkennt man keinen Zusammenhang mit der um den Faktor 7 unterschiedlichen Auftrittsfläche der Chips relativ zum äußeren Neutronenstrahl. Beispielsweise sind die Absolutwerte im Y-Kanal bei EXP3 sogar etwas geringer als bei EXP1, obwohl hier die Dosimeter mit der Hauptfläche dem äußeren Feld zugewandt waren. Zusätzlich weist die Flussabnahme im Y-Kanal und im X’-Kanal die gleiche Größenordnung und den gleichen Verlauf wie im X-Kanal auf. Dabei war es auf Grund der Dimensionen der Füllteile (Dummy-Füllteile sind auf die Breite der Nut in den Einschubteilen = Breite der Dosimeter angepasst) kaum möglich einen geometrisch identischen Schatteneffekt hervorzurufen wie im X-Kanal. Trotzdem korreliert die Abnahme des thermischen Flusses sehr gut mit dem Verlauf im X-Kanal. Im Y-Kanal ist sie darüber hinaus auch bei EXP4 symmetrisch, trotz der unterschiedlichen Dosimeterausrichtung auf korrelierenden Positionen. Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass im Phantom das Feld keine definierte Ausrichtung hat, und die Bewegung der thermischen Neutronen äußerst diffus ist.

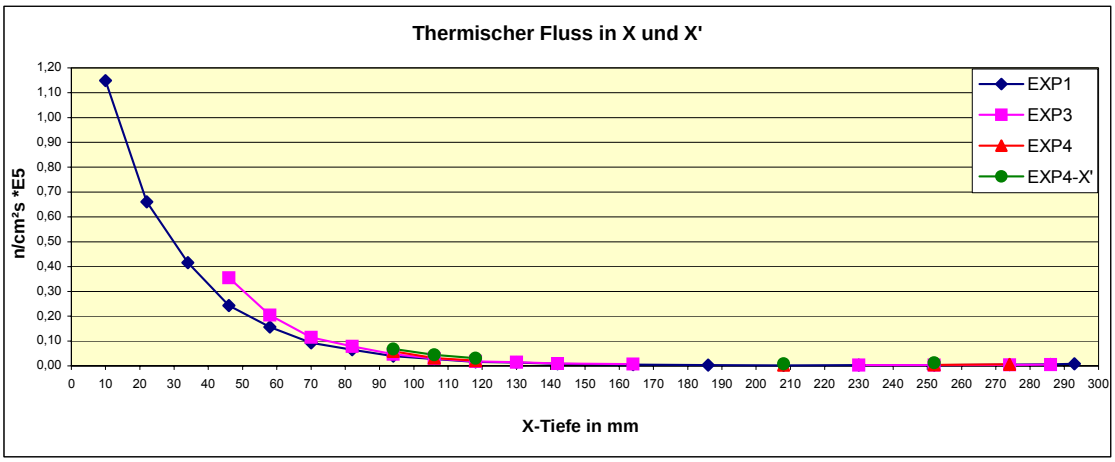
Erwartungsgemäß konnte ein Rückstreueffekt durch die Betonwand der thermischen Säule festgestellt werden. Bereits ab der Position X-16 (230 mm Tiefe) ist ein deutlicher Anstieg der Flusswerte bei EXP1 zu bemerken. Der thermische Fluss an der letzten Position (X-20, 293 mm Tiefe) beträgt das dreifache des Wertes an der Position X-15 (208 mm Tiefe), und ist fast gleich hoch wie in der Tiefe von 142 mm (nahe dem Phantommittelpunkt). Der Rückstreueffekt ist auch bei EXP3 und EXP4 erkennbar, obwohl hier nur wenige der hinteren X-Positionen mit Dosimetern bestückt wurden. Die Absolutwerte des thermischen Flusses auf gleichen X-Positionen dieser drei Bestrahlungen unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Anzahl der davor befindlichen Dosimeter (Abschirmungseffekt).

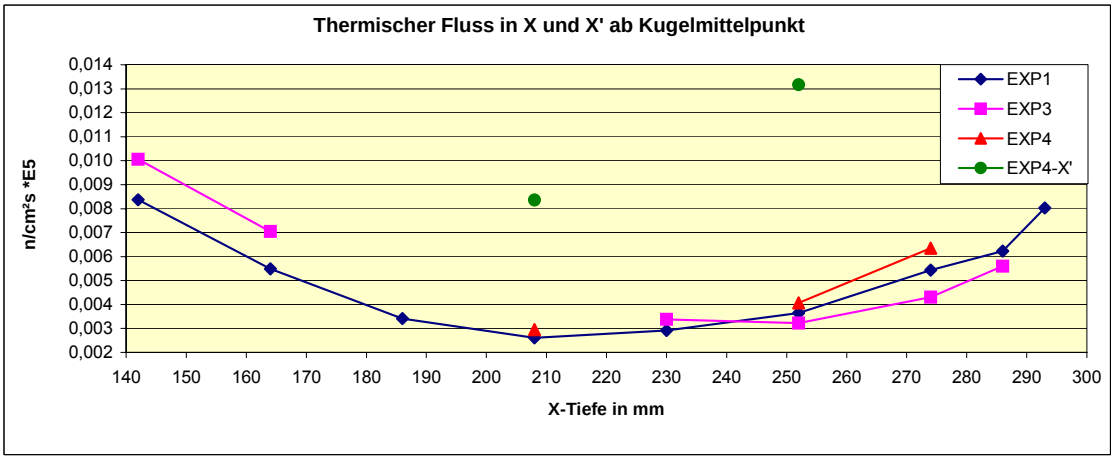
Position Nr.	X-Tiefe mm	EXP1 n/cm²s · E5	% von X.01	EXP3 n/cm²s · E5	% von X.01	EXP4 n/cm²s · E5	% von X.01	EXP4 X' n/cm²s · E5	% von X.01
X-T600.01	10	1,1494	100,00%						
X-T600.02	22	0,6609	57,50%						
X-T600.03	34	0,4151	36,12%						
X-T600.04	46	0,2433	21,17%	0,3549	100,00%				
X-T600.05	58	0,1564	13,61%	0,2050	57,75%				
X-T600.06	70	0,0928	8,08%	0,1151	32,43%				
X-T600.07	82	0,0647	5,63%	0,0788	22,22%				
X-T600.08	94	0,0395	3,44%	0,0466	13,14%	0,0583	100%	0,0678	100,00%
X-T600.09	106	0,0275	2,40%	0,0297	8,38%	0,0317	54%	0,0451	66,51%
X-T600.10	118	0,0164	1,43%	0,0183	5,15%	0,0209	36%	0,0311	45,90%
X-T600.11	130	0,0134	1,16%	0,0149	4,20%				
X-T600.12	142	0,0084	0,73%	0,0101	2,84%				
X-T600.13	164	0,0055	0,48%	0,0070	1,98%				
X-T600.14	186	0,0034	0,30%						
X-T600.15	208	0,0026	0,23%			0,0030	5%	0,0084	12,34%
X-T600.16	230	0,0029	0,25%	0,0034	0,95%				
X-T600.17	252	0,0036	0,32%	0,0032	0,91%	0,0041	7%	0,0132	19,45%
X-T600.18	274	0,0054	0,47%	0,0043	1,21%	0,0063	11%		
X-T600.19	286	0,0062	0,54%	0,0056	1,58%				
X-T600.20	293	0,0080	0,70%						

Position Nr.	Y-Tiefe mm	EXP1 n/cm²s · E5	% von Y.01	Y-Tiefe mm	EXP3 n/cm²s · E5	% von Y.01	Y-Tiefe mm	EXP4 n/cm²s · E5	% von Y.01
YL-T600.01	10	0,1960	100%	18-24.5	0,1499	100%	18	0,1674	100%
YL-T600.02	32	0,0886	45%	44.5-51	0,0633	42%	40-46,5	0,0699	42%
YL-T600.03	54	0,0459	23%	81-87.5	0,0232	16%	66,5	0,0355	21%
YL-T600.04	76	0,0227	12%	107.5-114	0,0136	9%	88,5-95	0,0197	12%
YL-T600.05	88	0,0177	9%	119-125.5	0,0085	6%	115	0,0121	7%
YL-T600.06	100	0,0125	6%						
YL-T600.07	112	0,0101	5%						
YL-T600.08	124	0,0084	4%						
YR-T600.01	10	0,2029	100%	18-24.5	0,1939	100%	18-24.5	0,1947	100%
YR-T600.02	32	0,0925	46%	44.5-51	0,0763	39%	40	0,0894	46%
YR-T600.03	54	0,0451	22%	81-87.5	0,0262	14%	66,5-73	0,0393	20%
YR-T600.04	76	0,0224	11%	107.5-114	0,0120	6%	88,5	0,0209	11%
YR-T600.05	88	0,0151	7%	119-125.5	0,0127	7%	113,5-120	0,0138	7%
YR-T600.06	100	0,0113	6%						
YR-T600.07	112	0,0095	5%						
YR-T600.08	124	0,0086	4%						

Tabelle 8.1: Fluss thermischer Neutronen im Phantom bei EXP1, EXP3 und EXP4

In den Abbildungen 8c und 8d ist die Flussverteilung thermischer Neutronen im Phantom graphisch dargestellt.





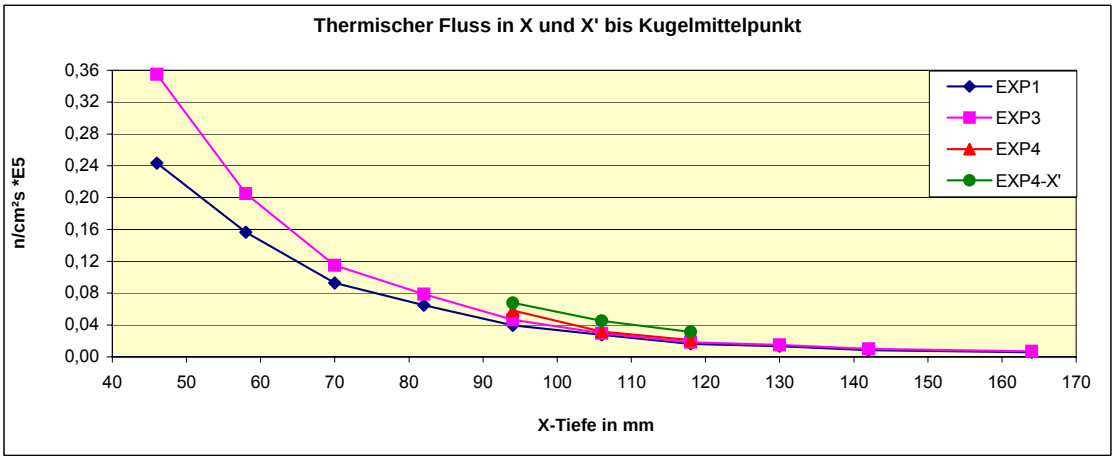


Abbildung 8c: Thermischer Fluss im X und X'-Kanal des Phantoms bei EXP1, EXP3 und EXP4

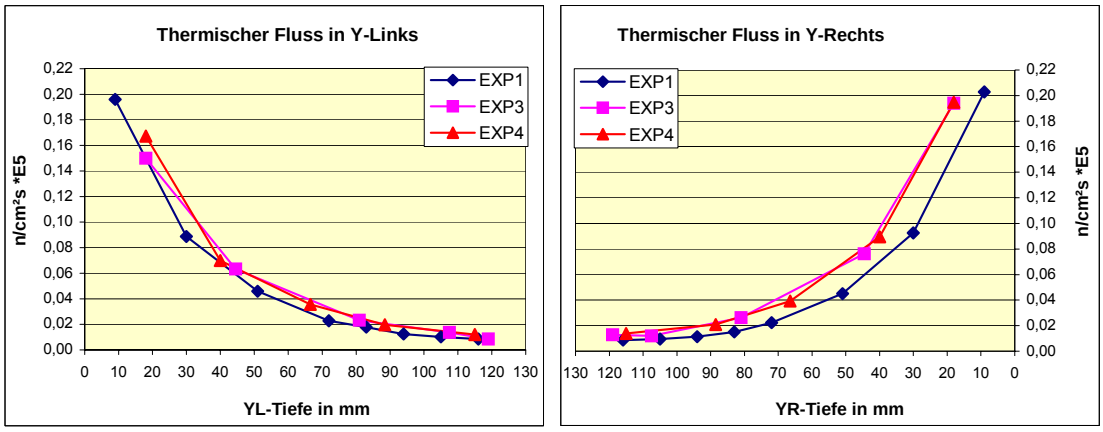


Abbildung 8d: Thermischer Fluss im Y-Kanal bei EXP1, EXP3 und EXP4

VIII.1.5 HTR-Verteilung und gammaäquivalente Dosisleistung im Phantom

Wie schon im Unterkapitel über die Freiluftkalibrierung erwähnt, sollte das Spektrum an der thermischen Säule auf Strahlungskomponenten mit LET > LET von ^{137}Cs Referenzstrahlung untersucht werden. In der Tabelle 8.2 sind alle Ergebnisse der HTR-Auswertung mittels TLD-700 zusammengefasst. Die Messwerte im X-Kanal unterstützen die Vermutung, dass die unbekannte Strahlung ihren Ursprung hauptsächlich im Reaktorkern und nicht in der Umgebung der Bestrahlungsposition der Radiographieanlage hat. Besonders bei der Bestrahlung EXP1 wurden hohe HTR-Werte festgestellt, die weit in die Phantomtiefe reichen. Ausgehend von 5,63 auf der Position H*(10), fällt der HTR-Wert langsam auf 1,50 in ca. 100 mm Tiefe ab. Erst ab dem Kugelmittelpunkt schwächt der HTR auf annähernd gammaäquivalente Werte ab. Der Anfangswert in X-01 beweist, dass es sich um eine Strahlung handelt deren mittlerer LET in X-01 anhand der HTR-LET-Kurve in Abbildung 6f auf über 42 keV/µm abgeschätzt werden kann. An der Probenposition der Radiographieanlage, ungefähr 1m von der Graphitwand der thermischen Säule entfernt, bewirkte primär diese Strahlung den HTR-Beitrag bei der Neutronenkalibrierung der TLD-700 Charge. Man kann mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit einen Effekt durch schnelle Neutronen an der thermischen Säule ausschließen. Eine Identifizierung der betreffenden Strahlungskomponenten ist allerdings mit der Pair Methode allein nicht möglich.
Alle festgestellten HTR-Werte im Phantom sind in hohem Maße auf diese unbekannte Strahlung zurückzuführen.

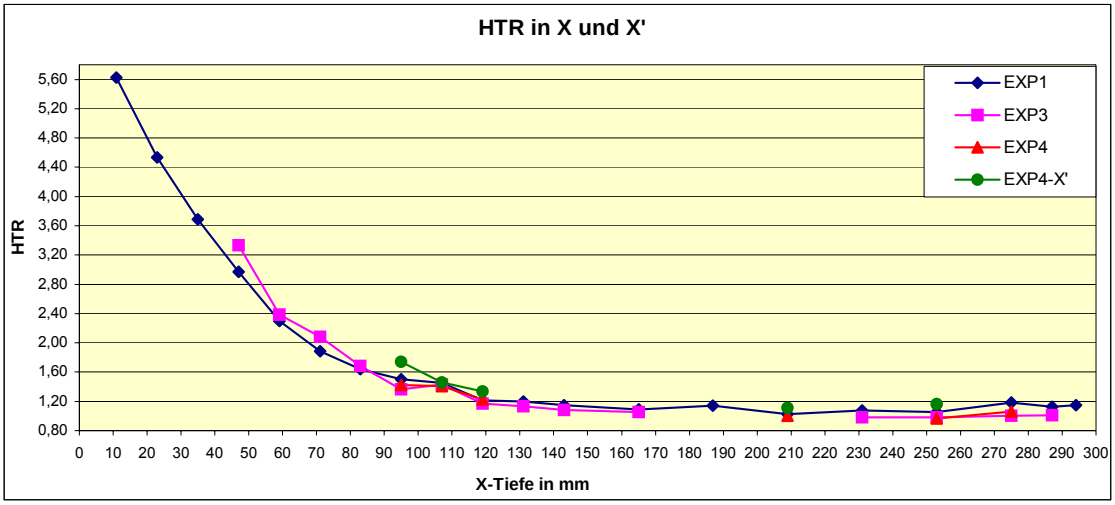
Position Nr.	X-Tiefe	EXP1	HTR	EXP3	HTR	EXP4	HTR	EXP4 X'	HTR

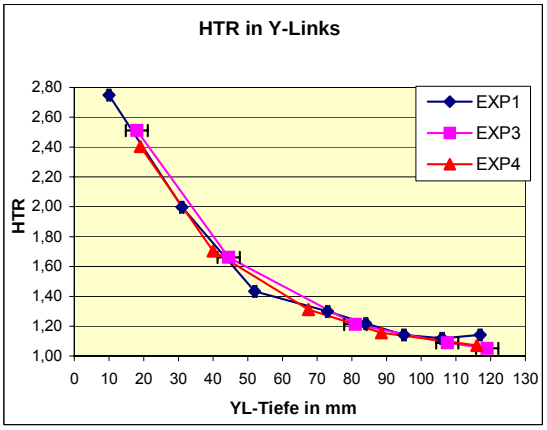
	mm	mGy/h		mGy/h		mGy/h		mGy/h	
X-T700.01	11	5,433	5,63						
X-T700.02	23	4,081	4,53						
X-T700.03	35	3,406	3,69						
X-T700.04	47	2,913	2,97	3,581	3,33				
X-T700.05	59	2,643	2,30	3,045	2,39				
X-T700.06	71	2,437	1,89	2,676	2,08				
X-T700.07	83	2,237	1,64	2,658	1,69				
X-T700.08	95	2,041	1,50	2,420	1,36	2,504	1,419	2,776	1,738
X-T700.09	107	1,914	1,45	2,216	1,43	2,349	1,411	2,340	1,456
X-T700.10	119	1,859	1,21	2,112	1,17	2,216	1,224	2,351	1,333
X-T700.11	131	1,689	1,20	2,114	1,13				
X-T700.12	143	1,654	1,14	1,959	1,08				
X-T700.13	165	1,610	1,09	1,841	1,05				
X-T700.14	187	1,483	1,14						
X-T700.15	209	1,380	1,03			1,715	1,006	1,805	1,11
X-T700.16	231	1,326	1,08	1,602	0,98				
X-T700.17	253	1,278	1,06	1,578	0,98	1,592	0,963	1,632	1,162
X-T700.18	275	1,190	1,18	1,511	1,00	1,495	1,062		
X-T700.19	287	1,194	1,13	1,470	1,01				
X-T700.20	294	1,167	1,14						

Position Nr.	Y-Tiefe mm	EXP1 mGy/h	HTR	Y-Tiefe mm	EXP3 mGy/h	HTR	Y-Tiefe mm	EXP4 mGy/h	HTR
YL-T700.01	11	2,296	2,75	18-24.5	2,565	2,51	19	2,507	2,40
YL-T700.02	33	1,964	2,00	44.5-51	2,260	1,66	40-46,5	2,276	1,70
YL-T700.03	55	2,131	1,43	81-87.5	2,502	1,21	67,5	2,529	1,31
YL-T700.04	77	1,752	1,30	107.5-114	2,074	1,09	88,5-95	2,114	1,16
YL-T700.05	89	1,705	1,22	119-125.5	2,093	1,05	116	2,026	1,07
YL-T700.06	101	1,725	1,14						
YL-T700.07	113	1,658	1,12						
YL-T700.08	125	1,657	1,14						
YR-T700.01	11	2,273	2,71	18-24.5	2,854	2,78	18-24.5	2,589	2,55
YR-T700.02	33	1,949	2,11	44.5-51	2,451	1,76	41	2,418	1,89
YR-T700.03	55	1,708	1,52	81-87.5	2,118	1,25	66,5-73	2,525	1,32
YR-T700.04	77	1,747	1,27	107.5-114	2,160	1,09	89,5	2,167	1,20
YR-T700.05	89	1,654	1,22	119-125.5	2,033	1,10	113,5-120	2,056	1,09
YR-T700.06	101	1,682	1,18						
YR-T700.07	113	1,632	1,11						
YR-T700.08	125	1,580	1,10						

Tabelle 8.2: HTR-Verteilung im Phantom bei EXP1, EXP3 und EXP4

Die Verteilungen des HTR im Phantom bei den drei Bestrahlungen an der thermischen Säule sind in der Abbildung 8e dargestellt. Die gammaäquivalente Dosisleistung wird in diesen Abbildungen nicht dargestellt. Die Werte werden aber später bei der LET-Verteilung und Dosisberechnungen eingesetzt und diese auch graphisch veranschaulicht.





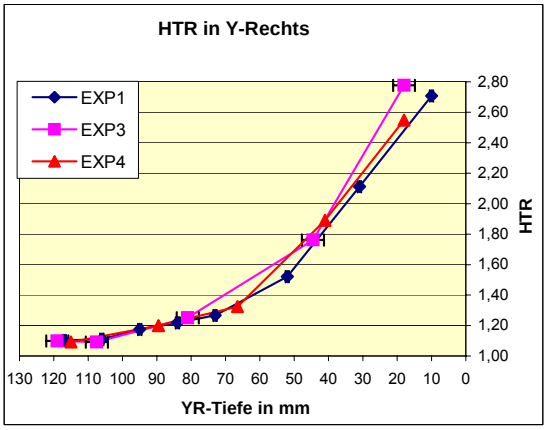


Abbildung 8e: HTR bei EXP1, EXP3 und EXP4

VIII.2 Bestrahlung EXP2 mit der Pu-Be Quelle

Die Bestrahlung EXP2 wurde mit der $^{239}Pu^{9}Be$ Quelle des Atominstituts durchgeführt.
Ein Alphateilchen des ^{239}Pu-Zerfalls trifft auf einen ^{9}Be-Kern um Neutronen in der Reaktion $^{9}Be\ (\alpha,n)\ ^{12}C$ zu erzeugen.
Der Neutronenfluss der Quelle im Abstand von r = 1m wird in [11] mit $\varphi \approx 50$ n/cm²s angegeben, die Energie der Neutronen im Bereich von 1 MeV bis 10 MeV. Um die Moderation schneller Neutronen im Phantom zu untersuchen, waren alle 20 Positionen im X-Kanal und jeweils alle 8 Positionen in den Y-Kanälen bestückt. Der Z-Kanal und der Streukörperkanal waren mit Dummys ausgefüllt. Das Phantom war auf der Kunststoffauflage auf einem Dreibein (Höhe ca. 1m) im Abstand von r = 1m von der Quelle positioniert. Die Quelle wurde mittels einer Schnur auf einem an der Decke montierten Seilzug aus dem Abschirmungsbehälter gezogen, und auf die Höhe des Phantommittelpunktes ausgerichtet („aufgehängt"). Da es sich um eine „Punktquelle" (4π-Strahlrichtung) handelt, war das Phantom einem homogenen Strahlungsfeld ausgesetzt. Streueffekte durch die Wände und verschiedene Gegenstände im Bestrahlungsraum waren wieder zu erwarten.
Die Bestrahlungszeit betrug t = 65,5h. Graufilter wurde bei der TL-Messung nur für den TLD-600 Chip der Position X.01 zur Signalhöhenkontrolle verwendet.
In den Tabellen 8.3 und 8.4 sind die gesammelten Ergebnisse dieser Bestrahlung aufgelistet.

VIII.2.1 Thermischer Neutronenfluss im Phantom

Auffällig ist der starke Anstieg des thermischen Flusses (um 76%) im X-Kanal bis in eine Phantomtiefe von ungefähr 5 cm relativ zum Wert für H*(10). Dieses Ergebnis lässt berechtigte Zweifel aufkommen, ob die Bestimmung der absorbierten Dosis durch thermische Neutronen bei Mischfeldern mit Komponenten schneller Neutronen aus der Größe H*(10) allein zielführend ist. Wie weit der thermische Flussaufbau in die Gewebstiefe reicht ist primär von der Energie der Teilchen abhängig. Bei Feldern unbekannter spektraler Zusammensetzung kann somit die absorbierte Dosis in tieferliegenden Schichten durch die Bestimmung und Angabe der Größe H*(10) unterbewertet werden. Zusätzlich ist die Größenordnung der dabei entstehenden Fehler kaum abschätzbar.

In der X-Tiefe von ca. 210 mm beträgt der thermische Fluss noch immer 30% des Maximalwertes $\Phi_{max} \approx 65$ n/cm²s. Die Übereinstimmung des Maximalwertes mit dem angegeben Fluss der Quelle ist sehr gut. Die langsame Abnahme des thermischen Flusses mit steigender X-Tiefe stellt die moderierenden Eigenschaften des Phantoms für hochenergetische Neutronen gut dar. Die Rate der Flussabnahme verringert sich geringfügig im Bereich der Positionen X-16 bis X-18. Dies kann teilweise auf Streueffekte, verursacht durch die Wände und Gegenstände im Bestrahlungsraum zurückgeführt werden. Im Y-Kanal jedoch geben die Messwerte keinen Hinweis auf Streueffekte in der Umgebung des Phantoms. Die vom erkennbaren Verlauf abweichenden Werte vor allem in X-07 und X-16 können somit auch als Folge von statistischen Schwankungen gedeutet werden.

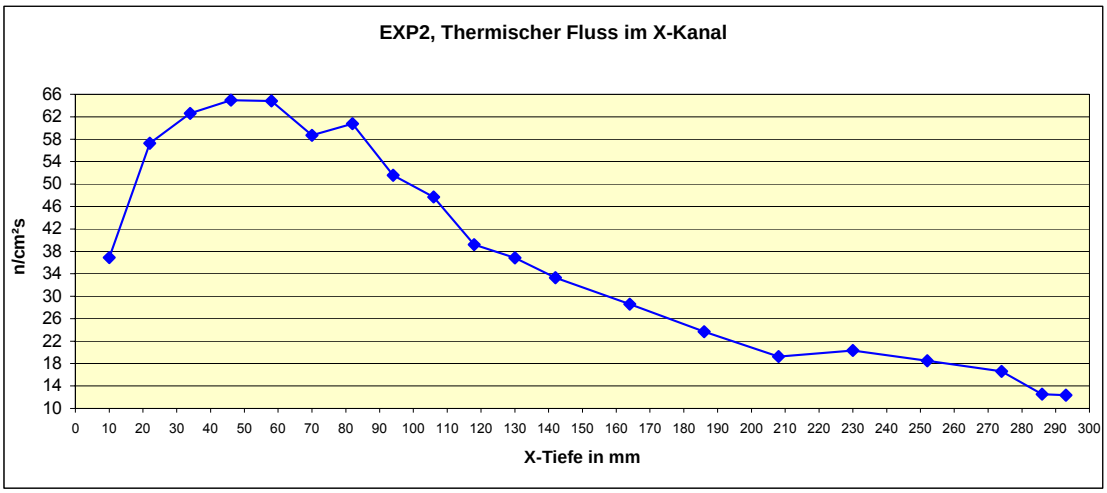
Position Nr.	Tiefe in mm	EXP2 n/cm²s	% von X.01
X-EX2-T600.01	10	*36,89*	100,00%

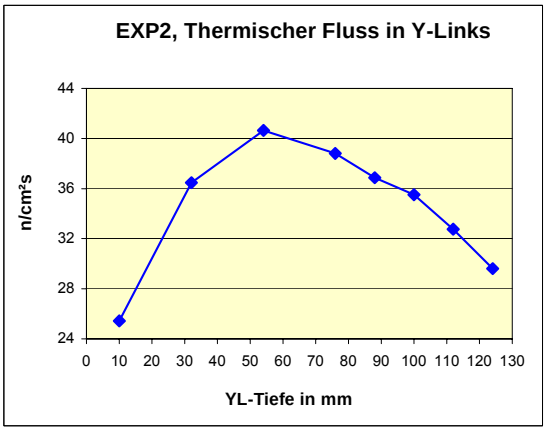
X-EX2-T600.02	22	***57,29***	155,30%
X-EX2-T600.03	34	***62,59***	169,67%
X-EX2-T600.04	46	***64,94***	176,04%
X-EX2-T600.05	58	***64,80***	175,67%
X-EX2-T600.06	70	***58,67***	159,04%
X-EX2-T600.07	82	***60,78***	164,76%
X-EX2-T600.08	94	***51,55***	139,75%
X-EX2-T600.09	106	***47,71***	129,35%
X-EX2-T600.10	118	***39,18***	106,22%
X-EX2-T600.11	130	***36,85***	99,89%
X-EX2-T600.12	142	***33,32***	90,32%
X-EX2-T600.13	164	***28,58***	77,49%
X-EX2-T600.14	186	***23,68***	64,20%
X-EX2-T600.15	208	***19,23***	52,12%
X-EX2-T600.16	230	***20,34***	55,15%
X-EX2-T600.17	252	***18,50***	50,16%
X-EX2-T600.18	274	***16,59***	44,97%
X-EX2-T600.19	286	***12,54***	33,99%
X-EX2-T600.20	293	***12,36***	33,50%

Position Nr.	Tiefe in mm	EXP2 n/cm²s	% von Y.01
YL-EX2-T600.01	10	***25,45***	100,00%
YL-EX2-T600.02	32	***36,46***	143,28%
YL-EX2-T600.03	54	***40,64***	159,69%
YL-EX2-T600.04	76	***38,80***	152,48%
YL-EX2-T600.05	88	***36,87***	144,88%
YL-EX2-T600.06	100	***35,51***	139,52%
YL-EX2-T600.07	112	***32,77***	128,76%
YL-EX2-T600.08	124	***29,61***	116,37%
YR-EX2-T600.01	10	***30,03***	100,00%
YR-EX2-T600.02	32	***36,40***	121,22%
YR-EX2-T600.03	54	***40,34***	134,36%
YR-EX2-T600.04	76	***35,46***	118,09%
YR-EX2-T600.05	88	***36,53***	121,66%
YR-EX2-T600.06	100	***33,48***	111,50%
YR-EX2-T600.07	112	***32,91***	109,59%
YR-EX2-T600.08	124	***27,00***	89,93%

Tabelle 8.3: Fluss thermischer Neutronen im Phantom bei EXP2

Der Fluss thermischer Neutronen im Phantom ist in der Abbildung 8f dargestellt.





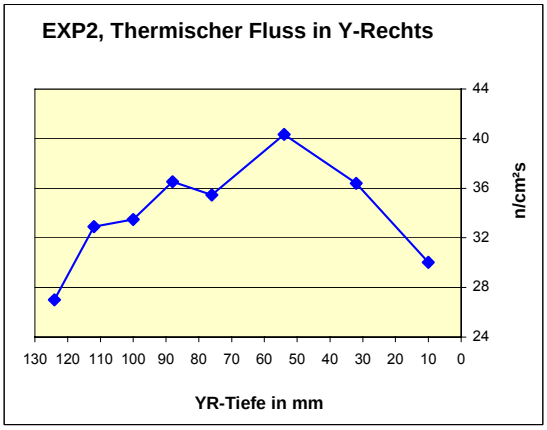


Abbildung 8f: Thermischer Fluss im Phantom bei EXP2

VIII.2.2 HTR-Verteilung und gammaäquivalente Dosisleistung im Phantom

Position Nr.	Tiefe in mm	EXP2 µGy/h	EXP2 HTR
X-EX2-T700.01	11	4,19	3,82
X-EX2-T700.02	23	4,30	4,17
X-EX2-T700.03	35	4,54	4,47
X-EX2-T700.04	47	5,31	3,95
X-EX2-T700.05	59	4,33	4,35
X-EX2-T700.06	71	4,40	4,24
X-EX2-T700.07	83	4,05	4,09
X-EX2-T700.08	95	3,80	3,82
X-EX2-T700.09	107	3,45	4,34
X-EX2-T700.10	119	3,18	3,44
X-EX2-T700.11	131	3,20	3,32
X-EX2-T700.12	143	2,97	3,72
X-EX2-T700.13	165	2,91	3,61
X-EX2-T700.14	187	2,49	2,66
X-EX2-T700.15	209	2,27	2,65
X-EX2-T700.16	231	2,08	2,71
X-EX2-T700.17	253	1,86	2,56
X-EX2-T700.18	275	1,85	2,41
X-EX2-T700.19	287	1,63	1,98
X-EX2-T700.20	294	1,59	1,95

Position Nr.	Tiefe in mm	EXP2 µGy/h	EXP2 HTR
YL-EX2-T700.01	11	2,98	3,44
YL-EX2-T700.02	33	3,13	3,78
YL-EX2-T700.03	55	4,00	3,72
YL-EX2-T700.04	77	3,21	3,57
YL-EX2-T700.05	89	3,11	3,15
YL-EX2-T700.06	101	3,12	3,46
YL-EX2-T700.07	113	2,96	3,30
YL-EX2-T700.08	125	2,99	3,45
YR-EX2-T700.01	11	2,89	3,26
YR-EX2-T700.02	33	3,15	3,87
YR-EX2-T700.03	55	3,17	3,98
YR-EX2-T700.04	77	3,04	3,67
YR-EX2-T700.05	89	2,90	3,79
YR-EX2-T700.06	101	2,98	3,47
YR-EX2-T700.07	113	2,76	3,34
YR-EX2-T700.08	125	2,78	3,48

Tabelle 8.4: HTR-Verteilung im Phantom bei EXP2

Hohe HTR-Werte sind im gesamten Phantom festzustellen. Erst ab einer Tiefe von 120 mm im X-Kanal nimmt der HTR auf unter 3,5 ab. In den Schlusspositionen beträgt er immer noch ca. 2, und liegt damit deutlich über gammaäquivalenten Werten. Der LET der Strahlung im Phantom kann folglich im Bereich zwischen 21 keV/µm (für HTR von 4,5) und 5 keV/µm (für HTR von 2) in guter Schätzung angenommen werden.
Das Spektrum der Pu-Be Quelle ist hinsichtlich der Art und Energien der Emission weitgehend bekannt. Dadurch waren hohe HTR-Werte im Phantom zu erwarten. Der HTR-Verlauf entspricht der Moderation schneller Neutronen im Phantom. Ein deutlicher Aufbaueffekt in den ersten Positionen ist erkennbar. Sekundärprotonen mit steigendem LET erzeugen den HTR-Anstieg auf 4,47 in X-03. Mit steigender Tiefe verringert sich allmählich die Energie der Neutronen, und in Folge die auf Protonen übertragene kinetische Energie. Abnehmende Protonenenergien reduzieren den HTR-Effekt. Die Kurve weist zwar mehrere vom erkennbaren HTR-Verlauf abweichende Werte auf, die jedoch aus statistischen

Schwankungen resultieren. Lediglich die Werte im Bereich von X-15 bis X-18 können teilweise auf die oben erwähnten Streueffekte zurückzuführen sein.
Der Verlauf der gammaäquivalenten Dosisleistung ist konform mit der Moderation schneller Neutronen mit steigender Phantomtiefe. Lediglich die Messwerte in X-04 und YL-03 weisen starke Abweichungen auf, die wiederum von statistischen Schwankungen herrühren.
Die Verläufe des HTR und der gammaäquivalenten Dosisleistung im Phantom bei der Bestrahlung mit der Pu-Be Quelle sind in der Abbildung 8g dargestellt. Da die Zahlenwerte für die Dosisleistung und den HTR gleich sind, gilt die verwendete Achsenskalierung für beide Kurven.

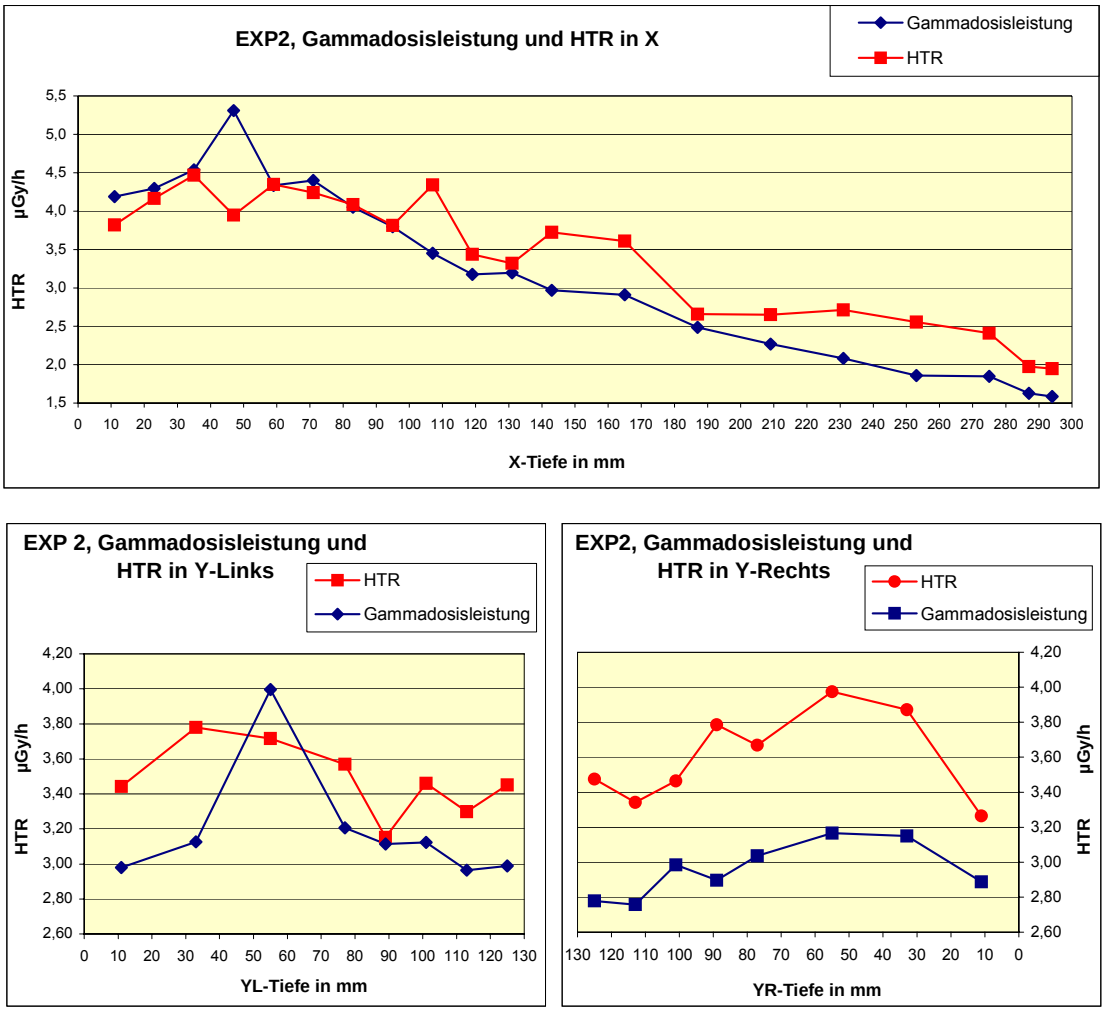


Abbildung 8g: HTR-Verlauf im Phantom bei EXP2

VIII.3 Bestrahlung EXP5 im Trockenbestrahlungsraum

Der Einfluss des Streukörpers und die Moderation schneller Neutronen im Phantom sollte bei der Bestrahlung EXP5 im Trockenbestrahlungsraum (eine schematische Darstellung des Reaktors ist im Anhang B) untersucht werden. Das Phantom war auf der Kunststoffauflage im Liftschacht des Probentransportsystems vor dem Strahlshutter positioniert. Auf dem Gerüst des Liftschachts ist ein Kunststoffrahmen vor der Bestrahlungsposition fix montiert, dessen Dimension kleiner als der Durchmesser des Phantoms ist. Somit war die Kugel im Strahlquerschnitt teilweise abgeschirmt, vor allem für thermische Neutronen. Der Neutronenstrahl an der Bestrahlungsposition enthält außer thermischen auch schnelle Neutronen der Energien von 0,01 MeV bis etwa 10 MeV. Der thermische Fluss auf der Bestrahlungsposition wird in [9] mit etwa $2 \cdot 10^3$ n/cm²s, der Fluss schneller Neutronen in der Größenordnung von 10^5 n/cm²s angegeben. Das Phantom war so ausgerichtet, dass der Streukörperkanal sich von der Strahlöffnung aus betrachtet rechts befand (hinter Y-Rechts). Die Wände im Trockenbestrahlungsraum sind durch Paraffinziegeln abgeschirmt womit kein Rückstreueffekt zu erwarten war. Die Bestrahlungszeit betrug t=1h bei einer Reaktorleistung von 2,5 kW.
Bei der Glowkurvenaufnahme der TLD-600 Chips aller X-Kanal Positionen und der Position YL-01 wurde der Graufilter eingesetzt. In den Tabellen 8.5 und 8.6 sind die Messergebnisse dieser Bestrahlung zusammengefasst.

VIII.3.1 Thermischer Neutronenfluss im Phantom

Die Messwerte im ZO-Kanal bestätigen die Vermutung, dass die Kugel durch den Kunststoffrahmen teilweise abgeschirmt war. Der Flussverlauf ist atypisch im Vergleich zu allen anderen Bestrahlungen. Besonders auffällig ist der Anstieg in den ersten drei Chips. Der Messeffekt auf diesen Positionen wurde mit hoher Wahrscheinlichkeit nur durch schnelle Neutronen, die im Phantom moderiert wurden, hervorgerufen. Die thermische Komponente des einfallenden Strahls wurde größtenteils bereits im Kunststoffrahmen vor dem Phantom absorbiert. Dadurch ergibt sich ein um einen Faktor 4,6 (3,3) und 7,5 kleinerer Fluss in der Position ZO-01 im Vergleich zu gleichwertigen Positionen YL-01
(YR-01) respektive ZU-01. Nur in der Umgebung des Kugelmittelpunktes korrelieren die Flusswerte in ZO sehr gut mit denen in vergleichbaren Positionen von YL/YR und ZU.

Position Nr.	X-Tiefe mm	EXP5 n/cm²s · E5	% von X.01
X-EX5-T600.01	10	*0,0914*	100,00%
X-EX5-T600.02	22	*0,0950*	103,92%
X-EX5-T600.03	34	*0,0954*	104,38%
X-EX5-T600.04	46	*0,0822*	89,86%
X-EX5-T600.05	58	*0,0718*	78,53%
X-EX5-T600.06	70	*0,0604*	66,08%
X-EX5-T600.07	82	*0,0512*	55,98%
X-EX5-T600.08	94	*0,0399*	43,67%
X-EX5-T600.09	106	*0,0311*	34,05%
X-EX5-T600.10	118	*0,0248*	27,11%
X-EX5-T600.11	130	*0,0198*	21,71%
X-EX5-T600.12	142	*0,0175*	19,11%
X-EX5-T600.13	164	*0,0126*	13,73%
X-EX5-T600.14	186	*0,0090*	9,89%
X-EX5-T600.15	208	*0,0061*	6,62%
X-EX5-T600.16	230	*0,0046*	4,99%
X-EX5-T600.17	252	*0,0032*	3,50%
X-EX5-T600.18	274	*0,0023*	2,49%
X-EX5-T600.19	286	*0,0014*	1,51%
X-EX5-T600.20	293	*0,0010*	1,04%

Position Nr.	Y-Tiefe mm	EXP5 n/cm²s · E5	% von Y.01
YL-EX5-T600.01	10	*0,0140*	100,00%
YL-EX5-T600.02	32	*0,0214*	153,65%
YL-EX5-T600.03	54	*0,0243*	174,23%
YL-EX5-T600.04	76	*0,0220*	157,49%
YL-EX5-T600.05	88	*0,0183*	131,38%
YL-EX5-T600.06	100	*0,0186*	133,31%
YL-EX5-T600.07	112	*0,0173*	124,06%
YL-EX5-T600.08	124	*0,0149*	106,92%
YR-EX5-T600.01	10	*0,0100*	100,00%
YR-EX5-T600.02	32	*0,0167*	167,01%
YR-EX5-T600.03	54	*0,0187*	188,01%
YR-EX5-T600.04	76	*0,0175*	175,88%
YR-EX5-T600.05	88	*0,0182*	182,08%
YR-EX5-T600.06	10	*0,0160*	160,25%
YR-EX5-T600.07	112	*0,0152*	152,58%
YR-EX5-T600.08	124	*0,0146*	146,65%

Position Nr.	Z-Tiefe mm	EXP5 n/cm²s · E5	% von Z.01
ZU-EX5-T600.01	10	*0,0225*	100,00%
ZU-EX5-T600.02	32	*0,0250*	110,76%
ZU-EX5-T600.03	54	*0,0237*	105,31%
ZU-EX5-T600.04	76	*0,0224*	99,41%
ZU-EX5-T600.05	88	*0,0215*	95,35%
ZU-EX5-T600.06	100	*0,0179*	79,28%
ZU-EX5-T600.07	122	*0,0187*	83,13%
ZO-EX5-T600.01	10	*0,0030*	100,00%
ZO-EX5-T600.02	32	*0,0074*	244,95%
ZO-EX5-T600.03	54	*0,0107*	352,63%
ZO-EX5-T600.04	76	*0,0125*	411,85%
ZO-EX5-T600.05	88	*0,0136*	447,69%
ZO-EX5-T600.06	100	*0,0142*	469,26%
ZO-EX5-T600.07	122	*0,0155*	510,33%

Tabelle 8.5: Fluss thermischer Neutronen im Phantom bei EXP5

Der Flussverlauf im X-Kanal unterstützt die in EXP2 aufgetretene Frage nach der Relevanz der Größe H*(10) bei Messungen in Strahlungsfeldern mit schnellen Neutronen. Da der Maximalwert von 9540 n/cm²s erst in X-03 (34mm Tiefe) auftritt, erscheint die Angabe des

Messwertes in 10 mm Tiefe als relevante Größe zur Bestimmung der absorbierten Dosis durch thermische Neutronen als nicht sinnvoll.
Die Größenordnung des Maximalwertes im Phantom ist konform mit der Angabe des Neutronenflusses an der Bestrahlungsposition. Die stetige Flussabnahme mit steigender X-Tiefe stellt die Moderation schneller Neutronen im Polyethylen gut dar. Der thermische Fluss im Phantom wird nach dem anfänglichen moderaten Anstieg rasch reduziert (steilere Kurve als bei EXP2), und beträgt im letzten Dosimeter (X-20, 293mm) nur mehr 1% des höchsten Wertes. Es ist erwartungsgemäß keine Rückstreuung durch die Wände zu bemerken.
Im Y-Kanal weist der Fluss thermischer Neutronen auf beiden Seiten einen durchaus gleichwertigen Verlauf auf. Allerdings betragen die Unterschiede der Messwerte auf symmetrischen Positionen bis zu 29%. Dies ist höchstwahrscheinlich wieder auf den Kunststoffrahmen zurückzuführen, der vom Strahl aus betrachtet den oberen und teilweise den rechten Kugelrand abschirmte. Statistische Schwankungen spielen jedoch auch eine Rolle, da alle gemessenen Werte immer nur von einem Chip stammen. Sehr gut korrelieren die Werte im gesamten Y-Kanal und ZU. Lediglich die Position YL(YR)-01 weist einen deutlich niedrigeren Wert als ZU-01 auf. Die Ursache dafür kann mit hoher Wahrscheinlichkeit hauptsächlich in moderierenden Eigenschaften der Kunststoffauflage unter dem Phantom gefunden werden. Der untere Rand des Phantoms (somit auch die Position ZU-01) war durch die Schalenförmige Auflage bedeckt, und war dem zufolge einem teilweise moderierten Strahl ausgesetzt.
Der Streukörper hat keinen Effekt auf die thermische Flussverteilung im Phantom. Die Messwerte in X-14 und YR-08 (dem Streukörperkanal am Nähesten von allen X- und YR-Positionen) und in allen Z-Positionen liefern keinen Hinweis auf Streueffekte. Der Flussverlauf wurde in keinem Kanal vom Aluminiumrohr beeinflusst. Dieses Ergebnis ist jedoch nicht überraschend, da schon bei der Neutronenkalibrierung kein Einfluss von Aluminium auf den thermischen Fluss nachzuweisen war, und auch die Phantombestrahlungen an der thermischen Säule gezeigt haben, dass die Bewegung der thermischen Neutronen im Phantom diffus ist. Streuung von schnellen Neutronen kann ebenfalls nicht verifiziert werden, wie im folgenden Unterkapitel über die HTR-Verteilung beschrieben wird. Die thermischen Flussverläufe im Phantom bei EXP5 werden in der Abbildung 8h graphisch veranschaulicht.

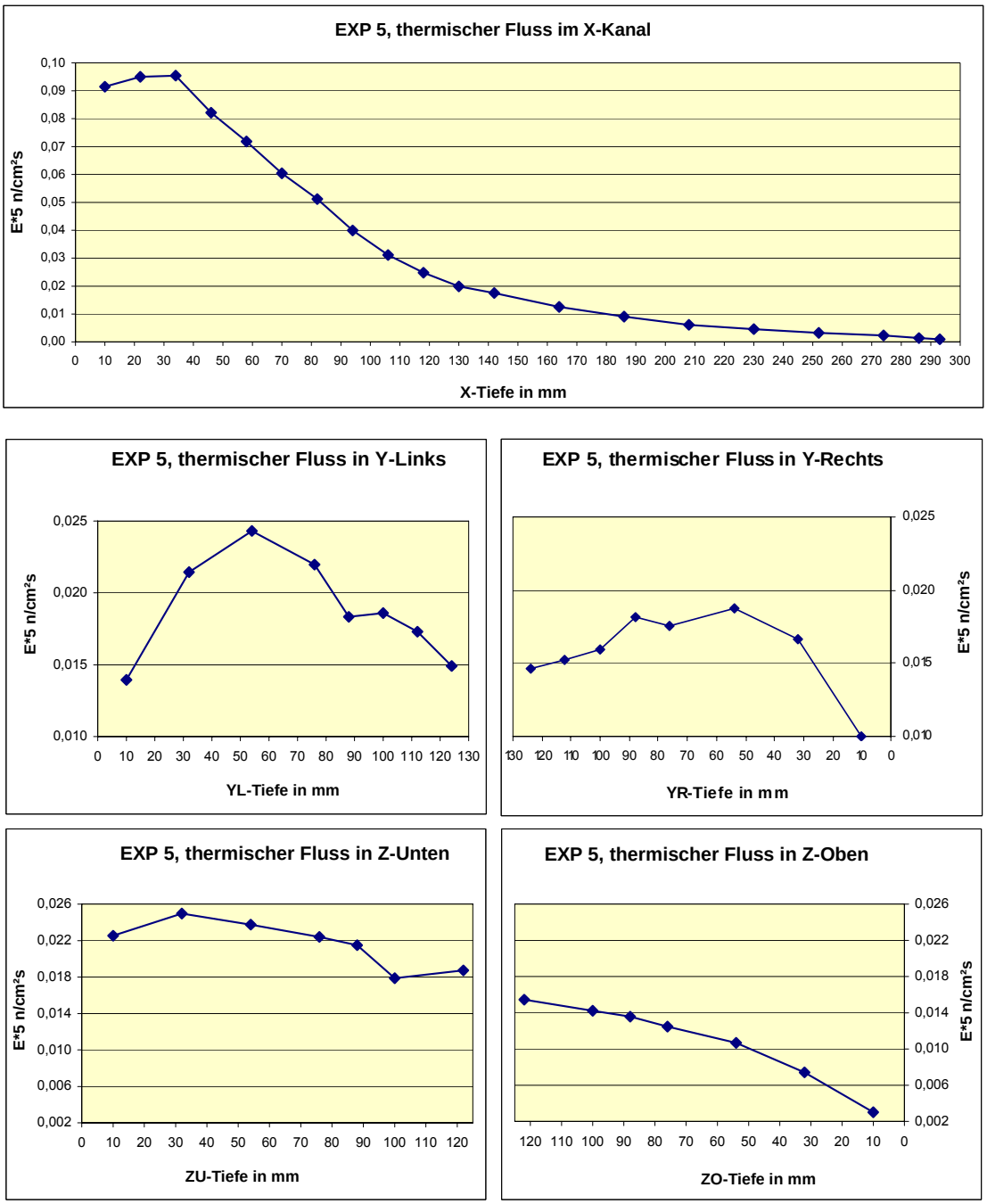


Abbildung 8h: Thermischer Fluss im Phantom bei EXP5

VIII.3.2 HTR-Verteilung und gammaäquivalente Dosisleistung im Phantom

Position Nr.	X-Tiefe in mm	EXP5 mGy/h	EXP5 HTR
X-EX5-T700.01	11	0,90	3,35
X-EX5-T700.02	23	0,82	3,52
X-EX5-T700.03	35	0,82	3,28
X-EX5-T700.04	47	0,75	3,02
X-EX5-T700.05	59	0,71	3,16
X-EX5-T700.06	71	0,70	3,11
X-EX5-T700.07	83	0,64	2,84
X-EX5-T700.08	95	0,57	2,44
X-EX5-T700.09	107	0,50	2,60
X-EX5-T700.10	119	0,48	1,84
X-EX5-T700.11	131	0,43	1,74
X-EX5-T700.12	143	0,41	1,70
X-EX5-T700.13	165	0,38	1,46
X-EX5-T700.14	187	0,36	1,15
X-EX5-T700.15	209	0,30	0,99
X-EX5-T700.16	231	0,27	0,89
X-EX5-T700.17	253	0,24	0,81
X-EX5-T700.18	275	0,22	0,78
X-EX5-T700.19	287	0,20	0,75
X-EX5-T700.20	294	0,19	0,70

Position Nr.	Y-Tiefe mm	EXP5 mGy/h	EXP5 HTR
YL-EX5-T700.01	11	0,49	1,62
YL-EX5-T700.02	33	0,46	2,01
YL-EX5-T700.03	55	0,56	2,04
YL-EX5-T700.04	77	0,46	1,79
YL-EX5-T700.05	89	0,45	1,72
YL-EX5-T700.06	101	0,46	1,65
YL-EX5-T700.07	113	0,45	1,70
YL-EX5-T700.08	125	0,43	1,83
YR-EX5-T700.01	11	0,44	1,27
YR-EX5-T700.02	33	0,43	1,79
YR-EX5-T700.03	55	0,42	1,81
YR-EX5-T700.04	77	0,42	1,70
YR-EX5-T700.05	89	0,42	1,71
YR-EX5-T700.06	101	0,44	1,79
YR-EX5-T700.07	113	0,43	1,58
YR-EX5-T700.08	125	0,43	1,57

Position Nr.	Z-Tiefe mm	EXP5 mGy/h	EXP5 HTR
ZU-EX5-T700.01	11	0,53	1,78
ZU-EX5-T700.02	33	0,59	2,03
ZU-EX5-T700.03	55	0,56	1,85
ZU-EX5-T700.04	77	0,54	1,77
ZU-EX5-T700.05	89	0,49	1,62
ZU-EX5-T700.06	101	0,49	1,59
ZU-EX5-T700.07	123	0,45	1,78
ZO-EX5-T700.01	11	0,19	1,40
ZO-EX5-T700.02	33	0,30	1,30
ZO-EX5-T700.03	55	0,40	1,42
ZO-EX5-T700.04	77	0,39	1,39
ZO-EX5-T700.05	89	0,41	1,72
ZO-EX5-T700.06	101	0,42	1,64
ZO-EX5-T700.07	123	0,44	1,51

Tabelle 8.6: HTR-Verteilung im Phantom bei EXP5

Aus den TLD-700 Messwerten der ersten zwei Positionen in ZO folgt nochmals die Bestätigung, dass der Liftschacht mit dem Kunststoffrahmen das Phantom teilweise abgeschirmt hat. Die gammaäquivalente Dosisleistung korreliert sonst im gesamten Verlauf im Z-Kanal hervorragend mit dem Y-Kanal, und entspricht auch den Werten im X-Kanal in der Nähe des Kugelmittelpunktes. So ergibt sich eine Fläche „konstanter" Dosisleistung von 0,46 ± 0,06 mGy/h im Phantom in der Y-Z-Ebene. Die teilweise größeren Unterschiede der Werte sind größtenteils auf statistische Schwankungen zurückzuführen, da die Auswertung in jeder Position nur auf dem Messwert eines einzigen Dosimeters beruht. Auf Grund unterschiedlicher Materialdicken vor dieser Fläche konstanter Dosisleistung (vom Kugelrand zum Kugelmittelpunkt) ist dieses Ergebnis überraschend.
Der stetigen Abnahme der gammaäquivalenten Dosisleistung im X-Kanal und der äußerst symmetrischen HTR-Verteilung in den Kanälen Y und Z kann entnommen werden, dass der Streukörper auch für schnelle Neutronen und Gammastrahlung keinen messbaren Streueffekt verursacht hat. Ausgehend vom Einstellen der Y-Z-Ebenen konstanter Dosisleistung wäre im X-Kanal eine deutliche Abweichung (am wahrscheinlichsten in der Umgebung von X-14) im Verlauf zu erwarten. Eine solche Abweichung konnte jedoch nicht festgestellt werden. Auch die HTR-Verteilung in den Kanälen Y und Z weist einen nur geringfügig veränderlichen Verlauf auf, der keinen Anhaltspunkt für einen Streueffekt bietet. Nur die schon erwähnte Abschirmung durch den Kunststoffrahmen wird anhand der HTR-Werte in YR-01 und ZO nochmals erkennbar.
Im X-Kanal entspricht der HTR-Verlauf der Moderation schneller Neutronen. Mit ansteigender X-Tiefe nehmen die Anzahl und Energien der schnellen Neutronen ab, somit auch die Energien und LET der Sekundärprotonen.
Ähnlich den drei Bestrahlungen an der thermischen Säule, zeigen sich im X-Kanal relativ hohe HTR-Werte im vorderen Bereich des Phantoms, die weit in die Tiefe reichen. Der mittlere LET des Strahlungsfeldes in den ersten X-Positionen kann auf LET > 10 keV/µm (HTR > 3) abgeschätzt werden. Er nimmt so wie in EXP1 langsam mit der Tiefe ab, um erst ab dem Bereich der Position X-14 (187 mm) gammaähnliche Größenordnung zu erreichen. Ein Messeffekt durch die unbekannte Strahlungskomponente, die bei der Neutronenkalibrierung detektiert worden ist und einen hohen HTR-Beitrag bei EXP1 und EXP3 geliefert hat, ist auch bei EXP5 anzunehmen. Deshalb kann der Beitrag zum mittleren LET durch schnelle Neutronen nicht eindeutig quantifiziert werden.
Alle Verläufe des HTR und der gammaäquivalenten Dosisleistung bei EXP5 sind in der Abbildung 8i dargestellt. Wiederum gilt für beide Kurven die gleiche Achsenskalierung.

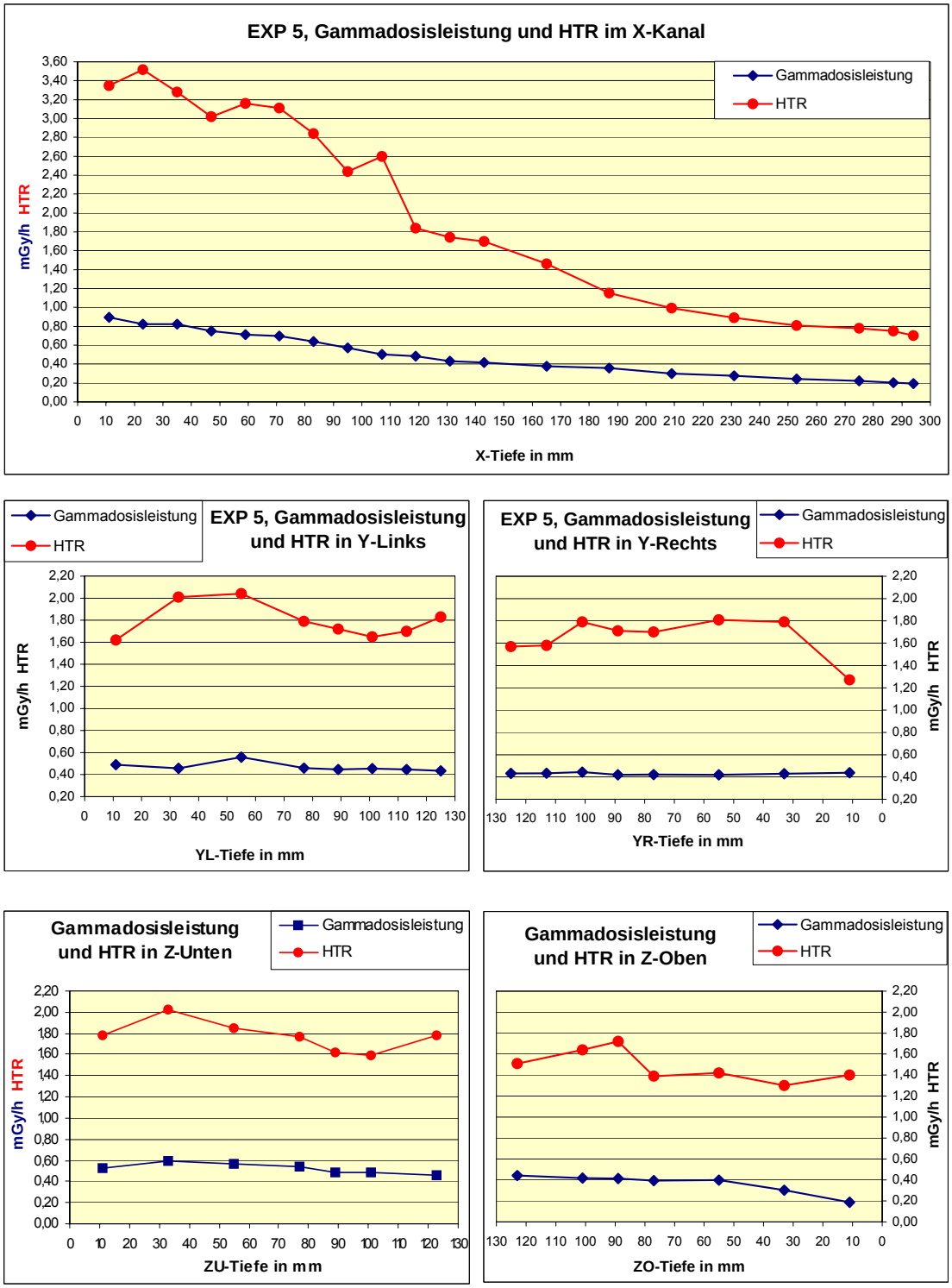


Abbildung 8i: HTR bei EXP5

IX Dosisbestimmung und LET-Verteilung im Phantom

Die Berechnung der Energiedosisverteilung erfolgte aus den Messwerten von beiden Dosimetertypen. Mittels Konversionsfaktoren aus den Tabellen 9.1 und 9.2 wurde der aus TLD-600 Signalen und Kalibrierfaktoren in KN4 berechnete thermische Neutronenfluss Φ in Energiedosis D und Dosisäquivalent (ambient dose equivalent) H*(10) umgerechnet. Diese Größen repräsentieren den Dosisbeitrag durch thermische Neutronen. Die Berechnung der aufgelisteten Konversionsfaktoren ist in [9] detailliert beschrieben.

E_n (MeV)	D/Φ (pGy.cm^2)	E_n (MeV)	D/Φ (pGy.cm^2)	E_n (MeV)	D/Φ (pGy.cm^2)
7.94E-9	5.16	2.00E-5	5.97	5.01E-2	7.06
1.26E-8	5.17	3.16E-5	5.95	7.94E-2	7.94
2.00E-8	5.18	5.01E-5	5.93	1.26E-1	9.39
3.16E-8	5.20	7.94E-5	5.90	2.00E-1	11.47
5.01E-8	5.24	1.26E-4	5.82	3.16E-1	14.50
7.94E-8	5.29	2.00E-4	5.69	5.01E-1	19.05
1.26E-7	5.37	3.16E-4	5.56	7.94E-1	24.56
2.00E-7	5.50	5.01E-4	5.42	1.26E+0	32.29
3.16E-7	5.71	7.94E-4	5.28	2.00E+0	37.99
5.01E-7	6.03	1.26E-3	5.21	3.16E+0	45.43
7.94E-7	6.14	2.00E-3	5.14	5.01E+0	56.53
1.26E-6	6.17	3.16E-3	5.10	7.94E+0	62.13
2.00E-6	6.14	5.01E-3	5.07	1.26E+1	71.87
3.16E-6	6.11	7.94E-3	5.04	2.00E+1	91.09
5.01E-6	6.06	1.26E-2	5.34	3.16E+1	95.27
7.94E-6	6.03	2.00E-2	5.78	5.01E+1	99.49
1.26E-5	6.00	3.16E-2	6.40	7.94E+1	107.3

Tabelle 9.1: Konversionsfaktoren D/Φ in Abhängigkeit von Neutronenenergie

E_n (MeV)	$H^*(10)/\Phi$ (pSv.cm^2)	E_n (MeV)	$H^*(10)/\Phi$ (pSv.cm^2)	E_n (MeV)	$H^*(10)/\Phi$ (pSv.cm^2)
1.00E-9	6.6	7.00E-2	60.0	1.60E+1	555
1.00E-8	9.0	1.00E-1	88.0	1.80E+1	570
2.53E-8	10.6	1.50E-1	132	2.01E+1	600
1.00E-7	12.9	2.00E-1	170	3.00E+1	515
2.00E-7	13.5	3.00E-1	233	5.00E+1	400
5.00E-7	13.6	5.00E-1	322	7.50E+1	330
1.00E-6	13.3	7.00E-1	375	1.00E+2	285
2.00E-6	12.9	9.00E-1	400	1.25E+2	260
5.00E-6	12.0	1.00E+0	416	1.50E+2	245
1.00E-5	11.3	1.20E+0	425	1.75E+2	250
2.00E-5	10.6	2.00E+0	420	2.01E+2	260
5.00E-5	9.9	3.00E+0	412	3.00E+2	306
1.00E-4	9.4	4.00E+0	408	4.00E+2	349
2.00E-4	8.9	5.00E+0	405	5.00E+2	420
5.00E-4	8.3	6.00E+0	400	6.00E+2	487
1.00E-3	7.9	7.00E+0	405	8.00E+2	580
2.00E-3	7.7	8.00E+0	409	1.00E+3	647
5.00E-3	8.0	9.00E+0	420	1.50E+3	733
1.00E-2	10.5	1.00E+1	440	2.00E+3	789
2.00E-2	16.6	1.20E+1	480	3.00E+3	862
3.00E-2	23.7	1.40E+1	520	4.00E+3	915
5.00E-2	41.1	1.50E+1	540	5.00E+3	951

Tabelle 9.2: Konversionsfaktoren H(10)/Φ in Abhängigkeit von Neutronenenergie*

Der Messeffekt in TLD-600 wird hauptsächlich durch thermische Neutronen im Energiebereich um E ≈ 0,0253 eV = $2{,}53 \cdot 10^{-8}$ MeV hervorgerufen. Um den Beitrag der epithermischen Neutronen zu berücksichtigen, wurde bei der Berechnung der Energiedosis D der mittlere Konversionsfaktor von $D/\Phi = 5{,}21$, für Energien von $2 \cdot 10^{-8}$ bis $5{,}01 \cdot 10^{-8}$ MeV, eingesetzt. Eine Mittelung über den gesamten epithermischen Energiebereich bis $5 \cdot 10^{-7}$ MeV würde mit hoher Wahrscheinlichkeit zur Überbewertung des Beitrags epithermischer Neutronen führen, da der Einfangsquerschnitt von ^{6}Li im epithermischen Bereich um den Faktor 10 niedriger ist als im thermischen. Bei der Berechnung der Umgebungsäquivalentdosis H*(10) wurde ausschließlich der Konversionsfaktor für thermische Neutronen von 10,6 eingesetzt. Die Ergebnisse werden im Folgenden als Umgebungsäquivalentdosisleistung H*(10)' pro Stunde angegeben. Dadurch wird der Vergleich der Dosisbeiträge der verschiedenen Strahlungskomponenten für die unterschiedlichen Bestrahlungszeiten und unterschiedliche Zusammensetzung der gemischten Strahlungsfelder erleichtert.
In der Abbildung 9a[9] sind die Konversionsfaktoren D/Φ und $H^*(10)/\Phi$ graphisch dargestellt.

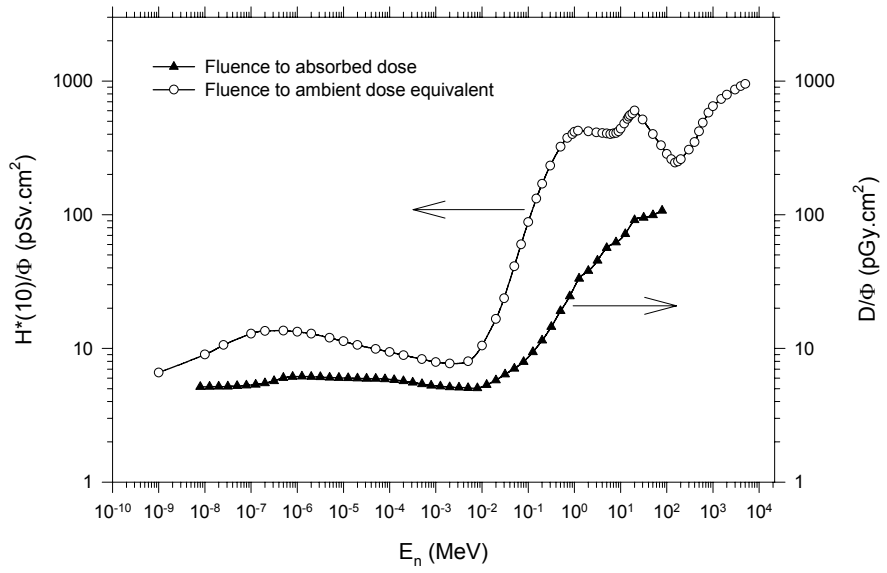


Abbildung 9a: Konversionsfaktoren in Abhängigkeit von der Neutronenenergie

Aus der Höhe des Hauptpeaks von TLD-700 wurde die gammaäquivalente Neutronenenergiedosis D (Tabellen 8.2, 8.4 und 8.6) unter Verwendung der Gamma-Kalibrierfaktoren berechnet. Dieser Wert repräsentiert den Dosisbeitrag durch schnelle Neutronen und Gammastrahlung. Die Bestimmung des mittleren LET des Strahlungsfeldes im Phantom wurde anhand der HTR-LET Funktion von T. Berger, beschrieben im Kapitel 6, durchgeführt. Die zugehörigen Qualitätsfaktoren Q(LET) wurden entsprechend den Empfehlungen der ICRP 26 und 60 (Tabelle 2.1) bestimmt, und zur Berechnung des Dosisäquivalents H (als Äquivalentdosisleistung H' pro Stunde in den Ergebnistabellen angegeben) in Gleichung 2.7 eingesetzt. Auffällig ist die unterschiedliche Bewertung der Strahlenqualität insbesondere im Bereich bis LET ≈15 keV/µm, die teilweise in großen Unterschieden der berechneten Äquivalentdosisleistung resultiert. Strahlenbiologische Untersuchungen haben schon mehrfach die Empfehlung der ICRP 60 für den Bereich bis LET = 10 keV/µm als ungenau, und nicht der tatsächlichen relativen biologischen Relevanz der Low-LET Strahlung entsprechend, bewiesen. Für Q(LET) nach ICRP 26 wurden die Werte Stufenförmig bestimmt und nicht anhand der linearen Funktionen zwischen den einzelnen Bereichen, z.B für LET = 15 keV/µm $<$ 23 keV/µm $\Rightarrow$ Q = 5. Dies führt bei manchen Messwerten sicherlich zu einer Überbewertung der Strahlenqualität.
In den Ergebnistabellen entsprechen die Tiefenangaben der tatsächlichen Phantomtiefe im jeweiligen Kanal. In Klammern werden auch die Anfangs- und Endwerte der Tiefe, die in den Graphiken zur Achsenskalierung verwendet werden, angegeben. Negative Tiefe bedeutet von der Quelle aus betrachtet (in Strahlrichtung):

- im X-Kanal vom vorderen Kugelrand bis Kugelmittelpunkt
- im Y-Kanal YL
- im Z-Kanal ZU.

IX.1 Bestrahlungen an der thermischen Säule

In den Tabellen 9.3 und 9.4 sind die Messergebnisse der Bestrahlungsreihe EXP1, in Tabellen 9.5 und 9.6 die Ergebnisse von EXP3 aufgelistet. Da bei EXP4 nur wenige Dosimeterpositionen besetzt waren und das Hauptaugenmerk bei dieser Bestrahlung auf dem Einfluss der Dosimeterausrichtung lag, werden diese Messwerte hier nicht berücksichtigt.

Position Nr.	Tiefe in mm	n/cm²s · E5	H*(10)' mSv/h	D' mGy/h
X-EX1-T600.01	10 (-140)	1,1494	***4,385***	***2,150***
X-EX1-T600.02	22	0,6609	***2,524***	***1,235***
X-EX1-T600.03	34	0,4151	***1,584***	***0,774***
X-EX1-T600.04	46	0,2433	***0,929***	***0,454***
X-EX1-T600.05	58	0,1564	***0,598***	***0,292***
X-EX1-T600.06	70	0,0928	***0,353***	***0,173***
X-EX1-T600.07	82	0,0647	***0,248***	***0,122***
X-EX1-T600.08	94	0,0395	***0,151***	***0,072***
X-EX1-T600.09	106	0,0275	***0,104***	***0,050***
X-EX1-T600.10	118	0,0164	***0,061***	***0,032***
X-EX1-T600.11	130	0,0134	***0,050***	***0,025***
X-EX1-T600.12	142	0,0084	***0,032***	***0,014***
X-EX1-T600.13	164	0,0055	***0,021***	***0,011***
X-EX1-T600.14	186	0,0034	***0,014***	***0,007***
X-EX1-T600.15	208	0,0026	***0,011***	***0,004***
X-EX1-T600.16	230	0,0029	***0,011***	***0,007***
X-EX1-T600.17	252	0,0036	***0,014***	***0,007***
X-EX1-T600.18	274	0,0054	***0,021***	***0,011***
X-EX1-T600.19	286	0,0062	***0,025***	***0,011***
X-EX1-T600.20	293 (143)	0,0080	***0,032***	***0,014***
YL-EX1-T600.01	10 (-140)	0,1960	***0,749***	***0,367***
YL-EX1-T600.02	32	0,0886	***0,338***	***0,166***
YL-EX1-T600.03	54	0,0459	***0,176***	***0,086***
YL-EX1-T600.04	76	0,0227	***0,086***	***0,043***
YL-EX1-T600.05	88	0,0177	***0,068***	***0,032***
YL-EX1-T600.06	100	0,0125	***0,047***	***0,022***
YL-EX1-T600.07	112	0,0101	***0,040***	***0,018***
YL-EX1-T600.08	124 (-26)	0,0084	***0,032***	***0,014***
YR-EX1-T600.01	10 (140)	0,2029	***0,774***	***0,378***
YR-EX1-T600.02	32	0,0925	***0,353***	***0,173***
YR-EX1-T600.03	54	0,0451	***0,173***	***0,083***
YR-EX1-T600.04	76	0,0224	***0,086***	***0,043***
YR-EX1-T600.05	88	0,0151	***0,058***	***0,029***
YR-EX1-T600.06	100	0,0113	***0,043***	***0,022***
YR-EX1-T600.07	112	0,0095	***0,036***	***0,018***
YR-EX1-T600.08	124 (26)	0,0086	***0,032***	***0,014***

Tabelle 9.3: EXP1, Energiedosisleistung D' und Umgebungsäquivalentdosisleistung H(10)' durch thermische Neutronen*

Position Nr.	Tiefe in mm	mGy/h	HTR	LET keV/µm	Q ICRP60	H'_{60} mSv/h	Q ICRP26	H'_{26} mSv/h
X-EX1-T700.01	11 (-139)	**5,43**	5,63	**42,29**	11,3	***61,58***	10	***54,33***
X-EX1-T700.02	23	**4,08**	4,53	**21,44**	4,7	***19,02***	5	***20,41***
X-EX1-T700.03	35	**3,41**	3,69	**13,78**	2,2	***7,53***	5	***17,03***
X-EX1-T700.04	47	**2,91**	2,97	**9,13**	1	***2,91***	5	***14,56***
X-EX1-T700.05	59	**2,64**	2,30	**5,65**	1	***2,64***	2	***5,29***
X-EX1-T700.06	71	**2,44**	1,89	**3,83**	1	***2,44***	2	***4,87***
X-EX1-T700.07	83	**2,24**	1,64	**2,80**	1	***2,24***	1	***2,24***
X-EX1-T700.08	95	**2,04**	1,50	**2,25**	1	***2,04***	1	***2,04***
X-EX1-T700.09	107	**1,91**	1,45	**2,04**	1	***1,91***	1	***1,91***
X-EX1-T700.10	119	**1,86**	1,21	**1,16**	1	***1,86***	1	***1,86***
X-EX1-T700.11	131	**1,69**	1,20	**1,11**	1	***1,69***	1	***1,69***
X-EX1-T700.12	143	**1,65**	1,14	**0,91**	1	***1,65***	1	***1,65***
X-EX1-T700.13	165	**1,61**	1,09	**0,70**	1	***1,61***	1	***1,61***
X-EX1-T700.14	187	**1,48**	1,14	**0,89**	1	***1,48***	1	***1,48***
X-EX1-T700.15	209	**1,38**	1,03	**0,48**	1	***1,38***	1	***1,38***
X-EX1-T700.16	231	**1,33**	1,08	**0,66**	1	***1,33***	1	***1,33***
X-EX1-T700.17	253	**1,28**	1,06	**0,59**	1	***1,28***	1	***1,28***
X-EX1-T700.18	275	**1,19**	1,18	**1,05**	1	***1,19***	1	***1,19***
X-EX1-T700.19	287	**1,19**	1,13	**0,85**	1	***1,19***	1	***1,19***
X-EX1-T700.20	294 (144)	**1,17**	1,14	**0,91**	1	***1,17***	1	***1,17***
YL-EX1-T700.01	11 (-139)	**2,30**	2,75	**7,92**	1	***2,30***	5	***11,48***
YL-EX1-T700.02	33	**1,96**	2,00	**4,29**	1	***1,96***	2	***3,93***
YL-EX1-T700.03	55	**2,13**	1,43	**1,99**	1	***2,13***	1	***2,13***
YL-EX1-T700.04	77	**1,75**	1,30	**1,47**	1	***1,75***	1	***1,75***
YL-EX1-T700.05	89	**1,70**	1,22	**1,18**	1	***1,70***	1	***1,70***
YL-EX1-T700.06	101	**1,72**	1,14	**0,89**	1	***1,72***	1	***1,72***
YL-EX1-T700.07	113	**1,66**	1,12	**0,82**	1	***1,66***	1	***1,66***
YL-EX1-T700.08	125 (-25)	**1,66**	1,14	**0,90**	1	***1,66***	1	***1,66***
YR-EX1-T700.01	11 (139)	**2,27**	2,71	**7,70**	1	***2,27***	5	***11,37***
YR-EX1-T700.02	33	**1,95**	2,11	**4,80**	1	***1,95***	2	***3,90***
YR-EX1-T700.03	55	**1,71**	1,52	**2,33**	1	***1,71***	1	***1,71***
YR-EX1-T700.04	77	**1,75**	1,27	**1,35**	1	***1,75***	1	***1,75***
YR-EX1-T700.05	89	**1,65**	1,22	**1,18**	1	***1,65***	1	***1,65***
YR-EX1-T700.06	101	**1,68**	1,18	**1,02**	1	***1,68***	1	***1,68***
YR-EX1-T700.07	113	**1,63**	1,11	**0,79**	1	***1,63***	1	***1,63***
YR-EX1-T700.08	125 (25)	**1,58**	1,10	**0,76**	1	***1,58***	1	***1,58***

Tabelle 9.4: EXP1, LET, Q(LET) und Äquivalentdosisleistung H'

Absorbierte Energiedosis und Umgebungsäquivalentdosis H*(10) durch thermische Neutronen verteilen sich im Phantom in Abhängigkeit von der Tiefe. Der Maximalwert in EXP1 und EXP3 ist analog zum thermischen Fluss jeweils im ersten Dosimeter festzustellen. Bei EXP1 stellt dies die tatsächliche Größe H*(10) dar. Die Umgebungsäquivalentdosis von H*(10) = 4,385 mSv (Bestrahlungsdauer 1h) entspricht dem gemessenen Fluss in der Größenordnung von 10^5 n/cm²s, der sehr gut mit Ergebnissen von ähnlichen Messungen [9] korreliert.

Position Nr.	Tiefe in mm	n/cm²s · E5	H*(10)' mSv/h	D' mGy/h
X-EX3-T600.04	46 (-104)	0,3549	*1,354*	*0,666*
X-EX3-T600.05	58	0,2050	*0,781*	*0,385*
X-EX3-T600.06	70	0,1151	*0,439*	*0,216*
X-EX3-T600.07	82	0,0788	*0,302*	*0,148*
X-EX3-T600.08	94	0,0466	*0,176*	*0,086*
X-EX3-T600.09	106	0,0297	*0,115*	*0,054*
X-EX3-T600.10	118	0,0183	*0,068*	*0,036*
X-EX3-T600.11	130	0,0149	*0,058*	*0,029*
X-EX3-T600.12	142	0,0101	*0,040*	*0,018*
X-EX3-T600.13	164	0,0070	*0,025*	*0,014*
X-EX3-T600.16	230	0,0034	*0,014*	*0,007*
X-EX3-T600.17	252	0,0032	*0,011*	*0,007*
X-EX3-T600.18	274	0,0043	*0,018*	*0,007*
X-EX3-T600.19	286 (136)	0,0056	*0,022*	*0,011*
YL-EX3-T600.01	18-24.5 (-129)	0,1499	*0,572*	*0,281*
YL-EX3-T600.02	44.5-51	0,0633	*0,241*	*0,119*
YL-EX3-T600.03	81-87.5	0,0232	*0,090*	*0,043*
YL-EX3-T600.04	107.5-114	0,0136	*0,050*	*0,025*
YL-EX3-T600.05	119-125.5 (-28)	0,0085	*0,032*	*0,014*
YR-EX3-T600.01	18-24.5 (129)	0,1939	*0,742*	*0,364*
YR-EX3-T600.02	44.5-51	0,0763	*0,292*	*0,144*
YR-EX3-T600.03	81-87.5	0,0262	*0,101*	*0,050*
YR-EX3-T600.04	107.5-114	0,0120	*0,047*	*0,022*
YR-EX3-T600.05	119-125.5 (28)	0,0127	*0,047*	*0,025*

Tabelle 9.5: EXP3, Energiedosisleistung D' und Umgebungsäquivalentdosisleistung H(10)' durch thermische Neutronen*

Position Nr.	Tiefe mm	mGy/h	HTR	LET keV/µm	Q ICRP60	H'_{60} mSv/h	Q ICRP26	H'_{26} mSv/h
X-EX3-T700.04	47 (-103)	**3,58**	3,33	**11,32**	1,4	***5,09***	5	***17,90***
X-EX3-T700.05	59	**3,05**	2,39	**6,07**	1,0	***3,05***	2	***6,09***
X-EX3-T700.06	71	**2,68**	2,08	**4,66**	1,0	***2,68***	2	***5,35***
X-EX3-T700.07	83	**2,66**	1,69	**2,98**	1,0	***2,66***	1	***2,66***
X-EX3-T700.08	95	**2,42**	1,36	**1,71**	1,0	***2,42***	1	***2,42***
X-EX3-T700.09	107	**2,22**	1,43	**1,98**	1,0	***2,22***	1	***2,22***
X-EX3-T700.10	119	**2,11**	1,17	**1,00**	1,0	***2,11***	1	***2,11***
X-EX3-T700.11	131	**2,11**	1,13	**0,86**	1,0	***2,11***	1	***2,11***
X-EX3-T700.12	143	**1,96**	1,08	**0,68**	1,0	***1,96***	1	***1,96***
X-EX3-T700.13	165	**1,84**	1,05	**0,58**	1,0	***1,84***	1	***1,84***
X-EX3-T700.16	231	**1,60**	0,98	**0,33**	1,0	***1,60***	1	***1,60***
X-EX3-T700.17	253	**1,58**	0,98	**0,33**	1,0	***1,58***	1	***1,58***
X-EX3-T700.18	275	**1,51**	1,00	**0,40**	1,0	***1,51***	1	***1,51***
X-EX3-T700.19	287 (137)	**1,47**	1,01	**0,42**	1,0	***1,47***	1	***1,47***
YL-EX3-T700.01	21 (-129)	**2,57**	2,51	**6,69**	1,0	***2,57***	2	***5,13***
YL-EX3-T700.02	47	**2,26**	1,66	**2,88**	1,0	***2,26***	1	***2,26***
YL-EX3-T700.03	84	**2,50**	1,21	**1,15**	1,0	***2,50***	1	***2,50***
YL-EX3-T700.04	111	**2,07**	1,09	**0,71**	1,0	***2,07***	1	***2,07***
YL-EX3-T700.05	122 (-28)	**2,09**	1,05	**0,57**	1,0	***2,09***	1	***2,09***
YR-EX3-T700.01	21 (129)	**2,85**	2,78	**8,06**	1,0	***2,85***	2	***5,71***
YR-EX3-T700.02	47	**2,45**	1,76	**3,29**	1,0	***2,45***	1	***2,45***
YR-EX3-T700.03	84	**2,12**	1,25	**1,30**	1,0	***2,12***	1	***2,12***
YR-EX3-T700.04	111	**2,16**	1,09	**0,72**	1,0	***2,16***	1	***2,16***
YR-EX3-T700.05	122 (28)	**2,03**	1,10	**0,74**	1,0	***2,03***	1	***2,03***

Tabelle 9.6: EXP3, LET, Q(LET) und Äquivalentdosislistung H'

Der Hauptbeitrag zur Energiedosis und Äquivalentdosis im Phantom wird durch Gammastrahlung und die unbekannte(n) Strahlungsfeldkomponente(n) geliefert. Hohe LET Werte und die daraus resultierenden Qualitätsfaktoren führen zu einer Äquivalentdosisleistung im Bereich von einigen mSv/h, die in vorderen X-Positionen bei EXP1 sehr hohe zweistellige Werte erreicht. Insbesondere nach Bestimmung von Q(LET) nach ICRP 26 wird die Äquivalentdosisleistung in größeren Phantomtiefen deutlich höher eingestuft als mit Q(LET) nach ICRP 60.
Ein Beitrag durch schnelle Neutronen kann in der verwendeten Bestrahlungsgeometrie an der thermischen Säule (Phantom zur Gänze unterhalb des Kollimators, Abbildung 8b) ausgeschlossen werden. In den Abbildungen 9b und 9c sind die Dosisverläufe bei EXP1 dargestellt.

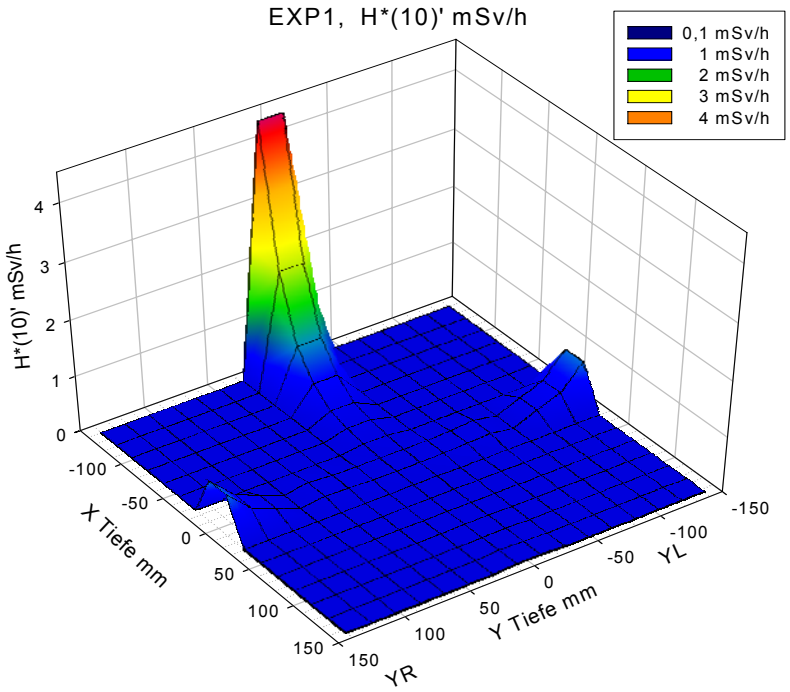


Abbildung 9b: EXP1,Umgebungsäquivalentdosisleistung H(10)' durch thermische Neutronen*

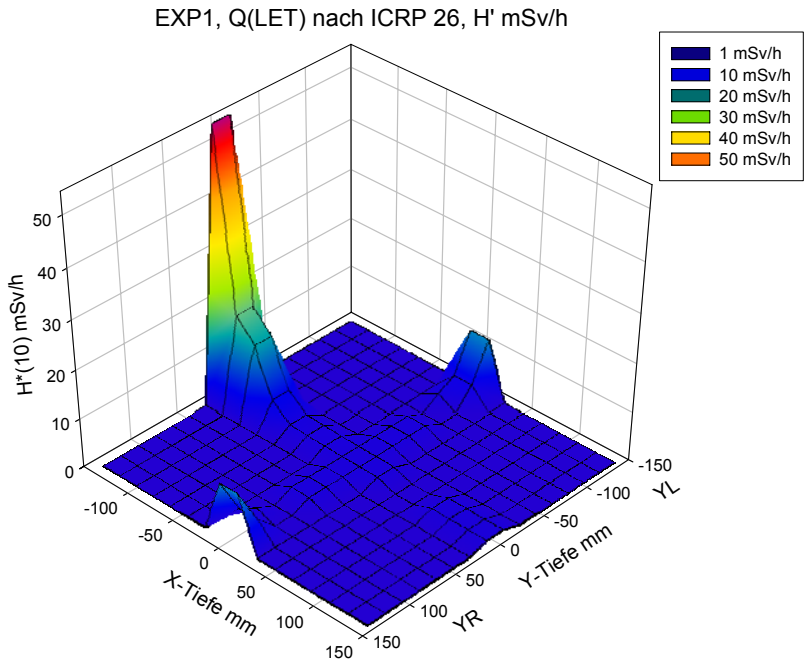


Abbildung 9c: EXP1, Äquivalentdosisleistung H' durch Gammastrahlung und unbekannte Strahlungskomponenten

IX.2 Bestrahlung mit Pu-Be Quelle

Alle berechneten LET- und Dosiswerte nach der Bestrahlung mit der ^{239}Pu-^{9}Be sind in den Tabellen 9.7 und 9.8 aufgelistet.

Position Nr.	Tiefe in mm	n/cm²s	H*(10)' µSv /h	D' µGy/h
X-EX2-T600.01	10 (-140)	36,888	1,41	0,69
X-EX2-T600.02	22	57,286	2,19	1,07
X-EX2-T600.03	34	62,589	2,39	1,17
X-EX2-T600.04	46	64,939	2,48	1,22
X-EX2-T600.05	58	64,802	2,47	1,22
X-EX2-T600.06	70	58,666	2,24	1,10
X-EX2-T600.07	82	60,775	2,32	1,14
X-EX2-T600.08	94	51,550	1,97	0,97
X-EX2-T600.09	106	47,715	1,82	0,89
X-EX2-T600.10	118	39,184	1,50	0,73
X-EX2-T600.11	130	36,848	1,41	0,69
X-EX2-T600.12	142	33,317	1,27	0,62
X-EX2-T600.13	164	28,583	1,09	0,54
X-EX2-T600.14	186	23,683	0,90	0,44
X-EX2-T600.15	208	19,227	0,73	0,36
X-EX2-T600.16	230	20,345	0,78	0,38
X-EX2-T600.17	252	18,502	0,71	0,35
X-EX2-T600.18	274	16,589	0,63	0,31
X-EX2-T600.19	286	12,538	0,48	0,24
X-EX2-T600.20	293 (143)	12,356	0,47	0,23
YL-EX2-T600.01	10 (-140)	25,448	0,97	0,48
YL-EX2-T600.02	32	36,462	1,39	0,68
YL-EX2-T600.03	54	40,639	1,55	0,76
YL-EX2-T600.04	76	38,803	1,48	0,73
YL-EX2-T600.05	88	36,870	1,41	0,69
YL-EX2-T600.06	100	35,507	1,36	0,67
YL-EX2-T600.07	112	32,767	1,25	0,61
YL-EX2-T600.08	124 (-26)	29,613	1,13	0,56
YR-EX2-T600.01	10 (140)	30,026	1,15	0,56
YR-EX2-T600.02	32	36,398	1,39	0,68
YR-EX2-T600.03	54	40,343	1,54	0,76
YR-EX2-T600.04	76	35,457	1,35	0,67
YR-EX2-T600.05	88	36,529	1,39	0,69
YR-EX2-T600.06	100	33,479	1,28	0,63
YR-EX2-T600.07	112	32,906	1,26	0,62
YR-EX2-T600.08	124 (26)	27,003	1,03	0,51

Tabelle 9.7: EXP2, Energiedosisleistung D' und Umgebungsäquivalentdosisleistung H(10)' durch thermische Neutronen*

Die Umgebungsäquivalentdosisleistung H*(10)' durch thermische Neutronen bleibt auf Grund der Flusswerte von 12-65 n/cm²s unter 2,5 µSv/h. Ihr Verlauf ist in der Abbildung 9d dargestellt.

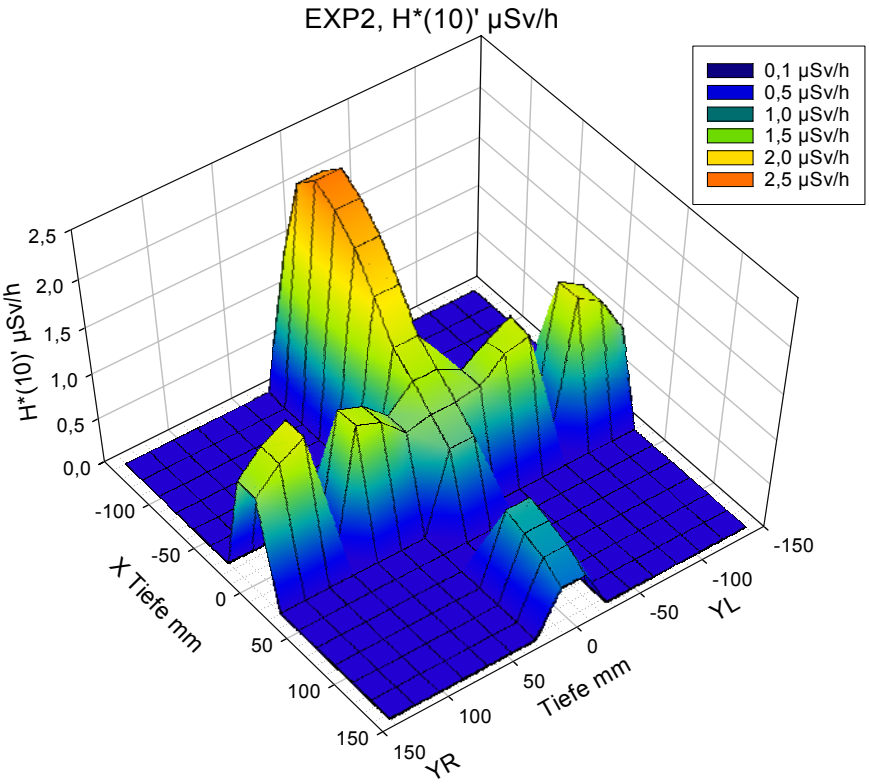


Abbildung 9d: EXP2, Umgebungsäquivalentdosisleistung H(10)' durch thermische Neutronen*

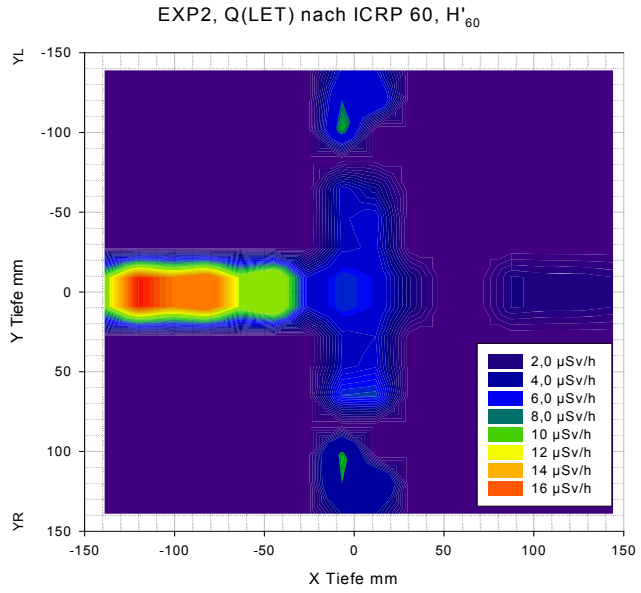
Der Maximalwert der Umgebungsäquivalentdosis (Position X-04) beträgt, unter Berücksichtigung der gesamten Bestrahlungsdauer von 65,5h, H*(10) = 162,44 µSv. Durch Moderation hochenergetischer Neutronen, die teilweise durch Streueffekte auch von der „Rückseite“ in das Phantom eindringen, ergibt sich in großen X-Tiefen noch ein signifikanter Beitrag zur Dosis durch thermische Neutronen. Im Y-Kanal ist die Dosisverteilung sehr symmetrisch und entspricht auch den moderierenden Eigenschaften des Phantommaterials. Die “Unterbrechung“ im Verlauf in der graphischen Darstellung ist nur eine Folge von fehlenden Messdaten, da in diesen Tiefen (76-88 mm) keine Dosimeterpositionen waren.

Der Hauptbeitrag zur absorbierten Dosis wird durch schnelle Neutronen und Gammastrahlung verursacht. Er ist vor allem in den vorderen Positionen im X-Kanal um etwa eine Größenordnung höher.

Position Nr.	Tiefe mm	µGy/h	HTR	LET keV/µm	Q ICRP60	H'_{60} µSv/h	Q ICRP26	H'_{26} µSv/h
X-EX2-T700.01	11 (-139)	**4,19**	3,82	**14,78**	2,5	***10,60***	5	***20,94***
X-EX2-T700.02	23	**4,30**	4,17	**17,72**	3,5	***14,91***	5	***21,48***
X-EX2-T700.03	35	**4,54**	4,47	**20,72**	4,4	***20,12***	5	***22,70***
X-EX2-T700.04	47	**5,31**	3,95	**15,81**	2,9	***15,19***	5	***26,56***
X-EX2-T700.05	59	**4,33**	4,35	**19,47**	4,0	***17,46***	5	***21,67***
X-EX2-T700.06	71	**4,40**	4,24	**18,43**	3,7	***16,27***	5	***22,00***
X-EX2-T700.07	83	**4,05**	4,09	**17,00**	3,2	***13,13***	5	***20,27***
X-EX2-T700.08	95	**3,80**	3,82	**14,75**	2,5	***9,56***	5	***18,98***
X-EX2-T700.09	107	**3,45**	4,34	**19,40**	4,0	***13,84***	5	***17,26***
X-EX2-T700.10	119	**3,18**	3,44	**12,02**	1,6	***5,23***	5	***15,88***
X-EX2-T700.11	131	**3,20**	3,32	**11,24**	1,4	***4,47***	5	***15,99***
X-EX2-T700.12	143	**2,97**	3,72	**14,05**	2,3	***6,81***	5	***14,84***
X-EX2-T700.13	165	**2,91**	3,61	**13,22**	2,0	***5,91***	5	***14,55***
X-EX2-T700.14	187	**2,49**	2,66	**7,44**	1	***2,49***	5	***12,43***
X-EX2-T700.15	209	**2,27**	2,65	**7,40**	1	***2,27***	5	***11,34***
X-EX2-T700.16	231	**2,08**	2,71	**7,73**	1	***2,08***	5	***10,41***
X-EX2-T700.17	253	**1,86**	2,56	**6,91**	1	***1,86***	2	***3,72***
X-EX2-T700.18	275	**1,85**	2,41	**6,19**	1	***1,85***	2	***3,70***
X-EX2-T700.19	287	**1,63**	1,98	**4,19**	1	***1,63***	2	***3,25***
X-EX2-T700.20	294 (144)	**1,59**	1,95	**4,07**	1	***1,59***	2	***3,17***
YL-EX2-T700.01	11 (-139)	**2,98**	3,44	**12,05**	1,7	***4,94***	5	***14,90***
YL-EX2-T700.02	33	**3,13**	3,78	**14,48**	2,4	***7,60***	5	***15,63***
YL-EX2-T700.03	55	**4,00**	3,72	**13,99**	2,3	***9,10***	5	***19,98***
YL-EX2-T700.04	77	**3,21**	3,57	**12,92**	1,9	***6,21***	5	***16,03***
YL-EX2-T700.05	89	**3,11**	3,15	**10,20**	1,1	***3,32***	5	***15,57***
YL-EX2-T700.06	101	**3,12**	3,46	**12,18**	1,7	***5,30***	5	***15,61***
YL-EX2-T700.07	113	**2,96**	3,30	**11,11**	1,4	***4,02***	5	***14,82***
YL-EX2-T700.08	125 (-25)	**2,99**	3,45	**12,12**	1,7	***5,01***	5	***14,94***
YR-EX2-T700.01	11 (139)	**2,89**	3,26	**10,89**	1,3	***3,72***	5	***14,44***
YR-EX2-T700.02	33	**3,15**	3,87	**15,20**	2,7	***8,39***	5	***15,75***
YR-EX2-T700.03	55	**3,17**	3,98	**16,04**	2,9	***9,28***	5	***15,83***
YR-EX2-T700.04	77	**3,04**	3,67	**13,64**	2,2	***6,57***	5	***15,18***
YR-EX2-T700.05	89	**2,90**	3,79	**14,51**	2,4	***7,08***	5	***14,48***
YR-EX2-T700.06	101	**2,98**	3,47	**12,21**	1,7	***5,09***	5	***14,92***
YR-EX2-T700.07	113	**2,76**	3,34	**11,39**	1,4	***3,99***	5	***13,79***
YR-EX2-T700.08	125 (25)	**2,78**	3,48	**12,27**	1,7	***4,80***	5	***13,89***

Tabelle 9.8: EXP2, LET, Q(LET) und Äquivalentdosisleistung H'

Die Äquivalentdosisleistung ist auf Grund zweistelliger LET Werte im Großteil der Kugel im Bereich von 10-25 µSv/h bei Bewertung der Strahlenqualität nach ICRP 26. Bei Anwendung von ICRP 60 ergeben sich deutliche Unterschiede, die bei einzelnen Positionen sogar 500% betragen. Dieser Unterschied wird in der Abbildung 9e vor allem im Y-Kanal sehr deutlich. Die „Unterbrechung" der Verteilung im Y-Kanal ist analog zur Abbildung 9d nur eine Folge von fehlenden Messwerten in diesen Tiefen.



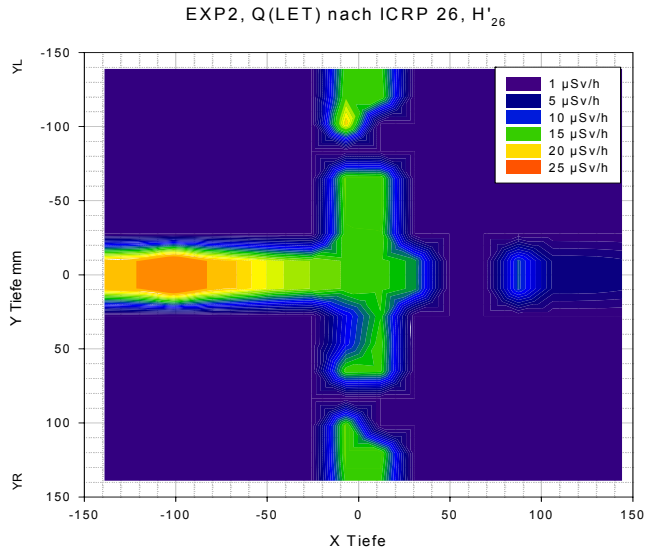


Abbildung 9e: EXP2, Äquivalentdosisleistung H' durch schnelle Neutronen und Gammastrahlung

IX.3 Bestrahlung im Trockenbestrahlungsraum des Reaktors

Position Nr.	Tiefe in mm	n/cm²s · E5	H*(10)' mSv/h	D' mGy/h
X-EX5-T600.01	10 (-140)	0,0914	*0,349*	*0,171*
X-EX5-T600.02	22	0,0950	*0,363*	*0,177*
X-EX5-T600.03	34	0,0954	*0,364*	*0,178*
X-EX5-T600.04	46	0,0822	*0,314*	*0,153*
X-EX5-T600.05	58	0,0718	*0,274*	*0,134*
X-EX5-T600.06	70	0,0604	*0,230*	*0,113*
X-EX5-T600.07	82	0,0512	*0,195*	*0,096*
X-EX5-T600.08	94	0,0399	*0,152*	*0,075*
X-EX5-T600.09	106	0,0311	*0,119*	*0,058*
X-EX5-T600.10	118	0,0248	*0,095*	*0,046*
X-EX5-T600.11	130	0,0198	*0,076*	*0,037*
X-EX5-T600.12	142	0,0175	*0,067*	*0,033*
X-EX5-T600.13	164	0,0126	*0,048*	*0,023*
X-EX5-T600.14	186	0,0090	*0,035*	*0,017*
X-EX5-T600.15	208	0,0061	*0,023*	*0,011*
X-EX5-T600.16	230	0,0046	*0,017*	*0,009*
X-EX5-T600.17	252	0,0032	*0,012*	*0,006*
X-EX5-T600.18	274	0,0023	*0,009*	*0,004*
X-EX5-T600.19	286	0,0014	*0,005*	*0,003*
X-EX5-T600.20	293 (143)	0,0010	*0,004*	*0,002*
YL-EX5-T600.01	10 (-140)	0,0140	*0,053*	*0,026*
YL-EX5-T600.02	32	0,0214	*0,082*	*0,040*
YL-EX5-T600.03	54	0,0243	*0,093*	*0,045*
YL-EX5-T600.04	76	0,0220	*0,084*	*0,041*
YL-EX5-T600.05	88	0,0183	*0,070*	*0,034*
YL-EX5-T600.06	100	0,0186	*0,071*	*0,035*
YL-EX5-T600.07	112	0,0173	*0,066*	*0,032*
YL-EX5-T600.08	124 (-26)	0,0149	*0,057*	*0,028*
YR-EX5-T600.01	10 (140)	0,0100	*0,038*	*0,019*
YR-EX5-T600.02	32	0,0167	*0,064*	*0,031*
YR-EX5-T600.03	54	0,0187	*0,072*	*0,035*
YR-EX5-T600.04	76	0,0175	*0,067*	*0,033*
YR-EX5-T600.05	88	0,0182	*0,069*	*0,034*
YR-EX5-T600.06	100	0,0160	*0,061*	*0,030*
YR-EX5-T600.07	112	0,0152	*0,058*	*0,028*
YR-EX5-T600.08	124 (26)	0,0146	*0,056*	*0,027*
ZU-EX5-T600.01	10 (-140)	0,0225	*0,086*	*0,042*
ZU-EX5-T600.02	32	0,0250	*0,095*	*0,047*
ZU-EX5-T600.03	54	0,0237	*0,091*	*0,044*
ZU-EX5-T600.04	76	0,0224	*0,086*	*0,042*
ZU-EX5-T600.05	88	0,0215	*0,082*	*0,040*
ZU-EX5-T600.06	100	0,0179	*0,068*	*0,034*
ZU-EX5-T600.07	122 (28)	0,0187	*0,072*	*0,035*
ZO-EX5-T600.01	10 (140)	0,0030	*0,016*	*0,006*
ZO-EX5-T600.02	32	0,0074	*0,028*	*0,014*
ZO-EX5-T600.03	54	0,0107	*0,041*	*0,020*
ZO-EX5-T600.04	76	0,0125	*0,048*	*0,023*
ZO-EX5-T600.05	88	0,0136	*0,052*	*0,025*
ZO-EX5-T600.06	100	0,0142	*0,054*	*0,027*
ZO-EX5-T600.07	122 (28)	0,0155	*0,059*	*0,029*

Tabelle 9.9: EXP5, Energiedosisleistung D' und Umgebungsäquivalentdosisleistung H(10) durch thermische Neutronen*

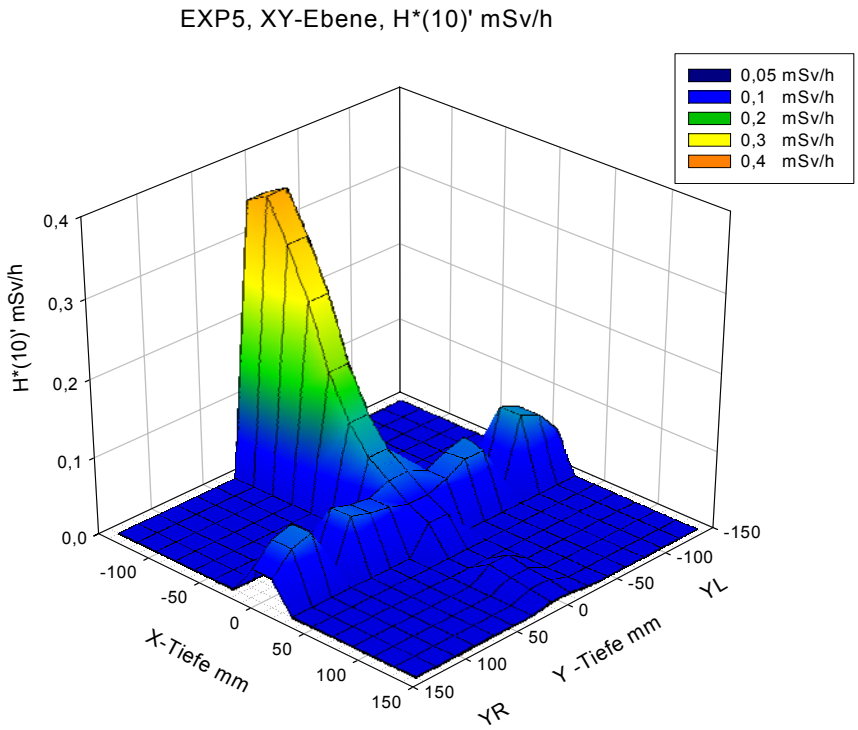


Abbildung 9f: EXP5, XY-Ebene, Umgebungsäquivalentdosisleistung H(10)' durch thermische Neutronen*

Der Verlauf der Umgebungsäquivalentdosis durch thermische Neutronen in der Abbildung 9f illustriert die moderierenden Eigenschaften des Phantoms für schnelle Neutronen. Der Maximalwert (Position X-03) nach der Bestrahlungsdauer von 1h beträgt 0,364 mSv. Da es keine Rückstreueffekte im Trockenbestrahlungsraum gibt (Parafinziegeln schirmen die Wände ab), ist ein Dosisbeitrag durch thermische Neutronen in großen X-Tiefen kaum vorhanden. Bereits im Bereich der Kugelmitte und im gesamten Y-Kanal nehmen die Werte etwa eine Zehnerpotenz ab im Vergleich zur vorderen Phantomhälfte.

Analog zu allen anderen Bestrahlungsreihen wird der Hauptbeitrag zur Dosis von schnellen Neutronen und Gammastrahlung produziert. In der Y-Z Ebene mit annähernd konstanter Dosisleistung kommen die Unterschiede in den ICRP Empfehlungen nicht zum Tragen, da sich alle LET Werte unter 2 keV/µm befinden. Im X-Kanal jedoch sind wieder große Unterschiede der berechneten Äquivalentdosisleistung bis in eine Tiefe von etwa 100 mm festzustellen.

Position Nr.	Tiefe mm	mGy/h	HTR	LET keV/µm	Q ICRP60	H'_{60} mSv/h	Q ICRP26	H'_{26} mSv/h
X-EX5-T700.01	11 (-139)	**0,90**	3,35	**11,44**	1,5	***1,31***	5	***4,48***
X-EX5-T700.02	23	**0,82**	3,52	**12,58**	1,8	***1,50***	5	***4,11***
X-EX5-T700.03	35	**0,82**	3,28	**11,00**	1,3	***1,09***	5	***4,12***
X-EX5-T700.04	47	**0,75**	3,02	**9,42**	1,0	***0,75***	5	***3,74***
X-EX5-T700.05	59	**0,71**	3,16	**10,25**	1,1	***0,77***	5	***3,56***
X-EX5-T700.06	71	**0,70**	3,11	**9,95**	1,0	***0,70***	5	***3,49***
X-EX5-T700.07	83	**0,64**	2,84	**8,41**	1,0	***0,64***	5	***3,19***
X-EX5-T700.08	95	**0,57**	2,44	**6,34**	1,0	***0,57***	2	***1,14***
X-EX5-T700.09	107	**0,50**	2,60	**7,14**	1,0	***0,50***	2	***1,01***
X-EX5-T700.10	119	**0,48**	1,84	**3,62**	1,0	***0,48***	2	***0,97***
X-EX5-T700.11	131	**0,43**	1,74	**3,20**	1,0	***0,43***	1	***0,43***
X-EX5-T700.12	143	**0,41**	1,70	**3,04**	1,0	***0,41***	1	***0,41***
X-EX5-T700.13	165	**0,38**	1,46	**2,09**	1,0	***0,38***	1	***0,38***
X-EX5-T700.14	187	**0,36**	1,15	**0,93**	1,0	***0,36***	1	***0,36***
X-EX5-T700.15	209	**0,30**	1,00	**0,39**	1,0	***0,30***	1	***0,30***
X-EX5-T700.16	231	**0,27**	1,00	**0,39**	1,0	***0,27***	1	***0,27***
X-EX5-T700.17	253	**0,24**	1,00	**0,39**	1,0	***0,24***	1	***0,24***
X-EX5-T700.18	275	**0,22**	1,00	**0,39**	1,0	***0,22***	1	***0,22***
X-EX5-T700.19	287	**0,20**	1,00	**0,39**	1,0	***0,20***	1	***0,20***
X-EX5-T700.20	294 (144)	**0,19**	1,00	**0,39**	1,0	***0,19***	1	***0,19***
YL-EX5-T700.01	11 (-139)	**0,49**	1,62	**2,72**	1,0	***0,49***	1	***0,49***
YL-EX5-T700.02	33	**0,46**	2,01	**4,35**	1,0	***0,46***	2	***0,92***
YL-EX5-T700.03	55	**0,56**	2,04	**4,48**	1,0	***0,56***	2	***1,12***
YL-EX5-T700.04	77	**0,46**	1,79	**3,41**	1,0	***0,46***	1	***0,46***
YL-EX5-T700.05	89	**0,45**	1,72	**3,12**	1,0	***0,45***	1	***0,45***
YL-EX5-T700.06	101	**0,46**	1,65	**2,84**	1,0	***0,46***	1	***0,46***
YL-EX5-T700.07	113	**0,45**	1,70	**3,04**	1,0	***0,45***	1	***0,45***
YL-EX5-T700.08	125 (-25)	**0,43**	1,83	**3,58**	1,0	***0,43***	1	***0,43***
YR-EX5-T700.01	11 (139)	**0,44**	1,27	**1,37**	1,0	***0,44***	1	***0,44***
YR-EX5-T700.02	33	**0,43**	1,79	**3,41**	1,0	***0,43***	1	***0,43***
YR-EX5-T700.03	55	**0,42**	1,81	**3,49**	1,0	***0,42***	1	***0,42***
YR-EX5-T700.04	77	**0,42**	1,70	**3,04**	1,0	***0,42***	1	***0,42***
YR-EX5-T700.05	89	**0,42**	1,71	**3,08**	1,0	***0,42***	1	***0,42***
YR-EX5-T700.06	101	**0,44**	1,79	**3,41**	1,0	***0,44***	1	***0,44***
YR-EX5-T700.07	113	**0,43**	1,58	**2,56**	1,0	***0,43***	1	***0,43***
YR-EX5-T700.08	125 (25)	**0,43**	1,57	**2,52**	1,0	***0,43***	1	***0,43***
ZU-EX5-T700.01	11 (-139)	**0,53**	1,40	**3,37**	1,0	***0,53***	1	***0,53***
ZU-EX5-T700.02	33	**0,59**	1,30	**4,44**	1,0	***0,59***	2	***1,18***
ZU-EX5-T700.03	55	**0,56**	1,42	**3,66**	1,0	***0,56***	2	***1,12***
ZU-EX5-T700.04	77	**0,54**	1,39	**3,33**	1,0	***0,54***	1	***0,54***
ZU-EX5-T700.05	89	**0,49**	1,72	**2,72**	1,0	***0,49***	1	***0,49***
ZU-EX5-T700.06	101	**0,49**	1,64	**2,60**	1,0	***0,49***	1	***0,49***
ZU-EX5-T700.07	123 (-27)	**0,45**	1,51	**3,37**	1,0	***0,45***	1	***0,45***
ZO-EX5-T700.01	11 (139)	**0,19**	1,40	**1,86**	1,0	***0,19***	1	***0,19***
ZO-EX5-T700.02	33	**0,30**	1,30	**1,48**	1,0	***0,30***	1	***0,30***
ZO-EX5-T700.03	55	**0,40**	1,42	**1,93**	1,0	***0,40***	1	***0,40***
ZO-EX5-T700.04	77	**0,39**	1,39	**1,82**	1,0	***0,39***	1	***0,39***
ZO-EX5-T700.05	89	**0,41**	1,72	**3,12**	1,0	***0,41***	1	***0,41***
ZO-EX5-T700.06	101	**0,42**	1,64	**2,80**	1,0	***0,42***	1	***0,42***
ZO-EX5-T700.07	123 (27)	**0,44**	1,51	**2,28**	1,0	***0,44***	1	***0,44***

Tabelle 9.10: EXP5, LET, Q(LET) und Äquivalentdosisleistung H'

In den Abbildungen 9g und 9h sind die Verteilungen der Äquivalentdosisleistung (Q nach ICRP 26) durch schnelle Neutronen (und Gammastrahlung) im X-Y und Y-Z Kugelquerschnitt dargestellt.

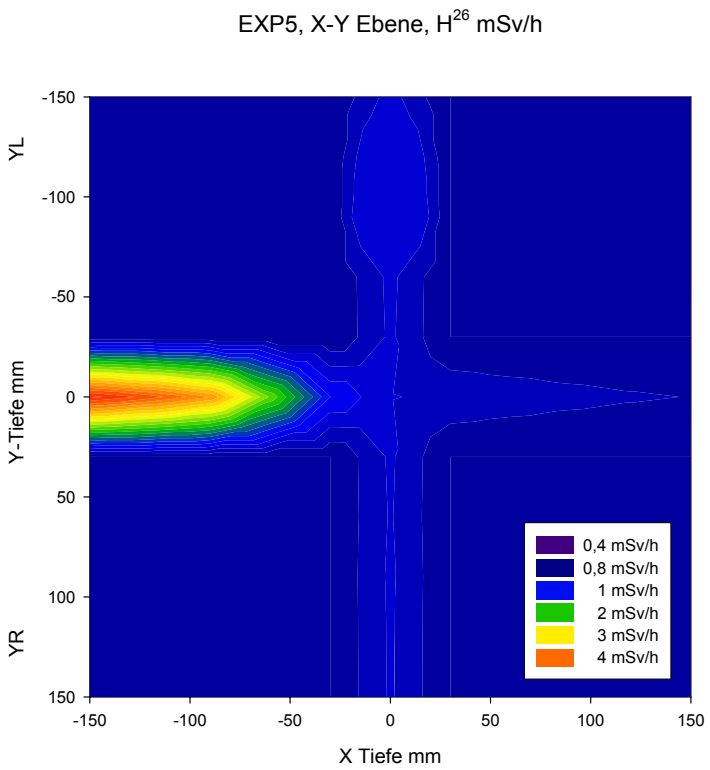


Abbildung 9g: EXP5, X-Y-Ebene, Äquivalentdosisleistung H'$_{26}$ durch schnelle Neutronen und Gammastrahlung

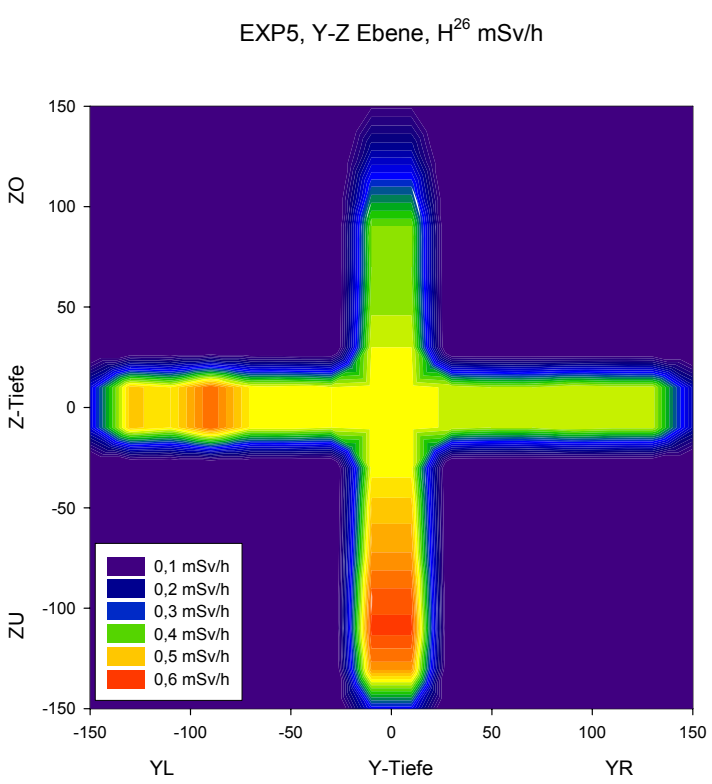


Abbildung 9h: EXP5, Y-Z Ebene, Äquivalentdosisleistung H'_{26} durch schnelle Neutronen und Gammastrahlung

Vor allem in der Abbildung 9h wird die Abschirmung des Phantoms durch den Kunststoffrahmen am Liftschacht im Trockenbestrahlungsraum nochmals deutlich.

IX.4 Eigendosis der Dosimeter

Wie bereits im Kapitel IV schon erläutert wurde, können TLD-600 durch die Einlagerung von Tritium und die daraus resultierende Betabestrahlung eine Eigendosis aufbauen. Deshalb wurde etwa 6 Wochen nach der letzten Phantomexposition eine Kontrollmessung mit 15 Dosimetern dieses Typs vorgenommen. Nach der letzten Bestrahlung und Auswertung wurden die Chips ausgeheizt und im Mäppchen gelagert. Ausgewählt wurden TLD-600 Chips die bei allen (oder fast allen) Phantomexpositionen eingesetzt wurden (z.B. der Position X-08 zugewiesenes Dosimeter). Zusätzlich wurde zum Vergleich die Eigendosis von 5 TLD-700 Chips überprüft. Alle Messungen der Lichtemission wurden ohne Graufilter durchgeführt. Die Messwerte der Eigenaktivität sind in der Tabelle 9.11 aufgelistet.

Chip Nr.	Counts	Gamma Kalfak	Eigendosis mGy
T600.01	122	1598,33	**0,076**
T600.02	133	1571,54	**0,085**
T600.03	131	1560,90	**0,084**
T600.04	118	1557,71	**0,076**
T600.05	113	1523,07	**0,074**
T600.06	145	1589,50	**0,091**
T600.07	133	1615,22	**0,082**
T600.08	137	1632,07	**0,084**
T600.09	144	1622,32	**0,089**
T600.10	133	1549,23	**0,086**
T600.11	134	1592,44	**0,084**
T600.12	128	1547,08	**0,083**
T600.13	139	1615,76	**0,086**
T600.14	150	1679,20	**0,089**
T600.15	139	1682,15	**0,083**
T700.01	140	1596,37	**0,088**
T700.02	137	1716,34	**0,080**
T700.03	143	1685,23	**0,085**
T700.04	138	1660,01	**0,083**
T700.05	146	1636,32	**0,089**
MW	135,15		***0,084***
STABW	9,42		0,005
STABW in %	7%		5%

Tabelle 9.11: Eigenaktivität der Dosimeter 6 Wochen nach der letzten Phantombestrahlung

Alle Dosimeter (TLD-600 und TLD-700) wiesen annähernd die gleiche Eigenaktivität auf. Die mittlere Energiedosis kann mittels Gammakalibrierfaktoren (für jeden einzelnen Chip) mit beiden Dosimetertypen zu 0,084 ± 0,005 mGy berechnet werden. Da TLD-700 keinen Tritiumeffekt aufweisen können, stellt dies die Umweltdosis im betreffenden Zeitraum von 6 Wochen im TL-Labor dar. Auf Grund der sehr guten Übereinstimmung der Messergebnisse der zwei Dosimetertypen und der Tatsache, dass die Zeitabstände zwischen den Phantomexpositionen immer deutlich kürzer als 6 Wochen waren, konnte man einen Dosisaufbau als Folge von eingelagertem Tritium vernachlässigen. Damit war keine diesbezügliche Korrektur der Ergebnisse der Dosisbestimmung notwendig.

IX.5 Fehlerabschätzung

Bei der Durchführung der Bestrahlungen, der Mess- und Auswerteprozedur sowie bei der Handhabung der Dosimeter wurde besonderer Wert auf die Vermeidung von nicht reproduzierbaren Abläufen gelegt. Jeder Messzyklus, vom Ausheizen der Dosimeter, bis hin zur TL-Auswertung wurde nach dem gleichen Muster und vergleichbarem zeitlichen Rahmen absolviert. Dadurch konnte man erwarten, dass der Rahmen der systematischen Fehler von Messreihe zu Messreihe gleichbleibende Größenordnung aufweisen sollte. Somit kann der Fehlerrahmen auf etwa 10% abgeschätzt werden. Dies wird besonders durch die Ergebnisse der 5 Gammakalibrierungen unterstrichen.

Einzelkalibrierung der Dosimeter und Verwendung der Chip-Kalibrierfaktoren bei den Flussbestimmungen und Dosisberechnungen kann den Fehler nochmals auf etwa 5% reduzieren.
Schwankungen der Messwerte im Phantom, die auf manchen benachbarten oder symmetrischen Positionen festzustellen waren, bewegen sich größtenteils auch in diesem Rahmen, vorausgesetzt es gibt keine anderen störenden Einflüsse (z.B. Kunststoffrahmen bei EXP5). Jedoch sind alle Fluss- und Dosisangaben das Resultat eines einzelnen Messwertes (eines einzelnen Dosimeters), da in den Positionen jeweils nur ein Paar von TLD-600/700 eingesetzt war. Nachdem Mittelwerte der Signale von mehreren Dosimetern auf einer (gleicher) Position nicht verfügbar sind, ist die genaue Eingrenzung des Fehlers erschwert. Dadurch ist in den Graphiken im Kapitel VIII nur die Position der Dosimeter, also ihre Tiefe in Abhängigkeit von ihrer Ausrichtung und ihrer Dicke, mit einer definierten Unsicherheit versehen (Y-Kanal bei EXP3, siehe Abbildung 8e). Entsprechende Fehlerbalken (horizontal) sind eingezeichnet.
Ungünstig auf die Fehlerabschätzung wirkt sich auch das Ergebnis der Freiluft-Neutronenkalibrierung (KN4) aus. Der große Unterschied in der Signalausbeute der gesamten TLD-600 Charge bei KN4 und KN3 ist äußerst überraschend. Er hat auch einen großen Unterschied in den Neutronenkalibrierfaktoren zur Folge, der für manche Dosimeter 25% übersteigt. Deshalb wurde von einer Mittelwertbildung der N-Kalfak Abstand genommen. Ein anderer Wert des Kalibrierfaktors verändert zwar die Absolutwerte der berechneten Dosis, an der Verteilung im Phantom hat dies qualitativ keine Auswirkungen. Jedoch ist zu bedenken, dass die diesbezügliche Abweichung der berechneten Fluss-, LET- und Dosiswerte von den angegebenen Ergebnissen im Durchschnitt etwa 15-20% beträgt. Solcherart unterschiedliche Messergebnisse können nur schwer zu einem Wert, der dem wahren Wert am nähesten kommt, zusammengefasst werden. Der Fehlerrahmen bei derartiger Mittelwertbildung wäre höchstwahrscheinlich deutlich über 10%, und dadurch eher unzufriedenstellend.

Im Allgemeinen korrelieren alle Messwerte sehr gut mit den Ergebnissen anderer Arbeiten mit ähnlichen Messungen, die am Atominstitut der österreichischen Universitäten in der Vergangenheit durchgeführt worden sind. Damit kann der Fehlerrahmen in der gleichen Größenordnung von etwa 5-8% angenommen werden.

X Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Verteilung des Linearen Energie Transfers und der Energiedosis in einem menschlichen Phantom in Neutronen-Gamma Mischfeldern mit Hilfe von Thermolumineszenzdetektoren gemessen. Dabei wurden die Pair-Methode und die HTR-Methode verwendet, die es ermöglichen unterschiedliche Beiträge der thermischen Neutronen, und schnellen Neutronen und Gammastrahlung in einem Messvorgang voneinander getrennt zu bestimmen.

Für die Gammakalibrierung der Dosimeter der Typen TLD-600 und TLD-700 wurden 5 Bestrahlungen mit der 662 keV Gammastrahlung der ^{137}Cs Quelle durchgeführt. Die Gammakalibrierfaktoren stellten den Zusammenhang zwischen der applizierten Dosis und dem gemessenen TL-Signal dar. Die Werte korrelieren sehr gut mit den Kalibrierfaktoren, erhalten bei anderen Arbeiten am Atominstitut, die unter vergleichbaren Bedingungen mit diesen zwei Dosimetertypen des gleichen Herstellers durchgeführt wurden.

Zur Neutronenkalibrierung wurden die Dosimeter vier mal an der Neutronenradiographie-anlage (NRA) bestrahlt. Vorher wurde der thermische Neutronenfluss an der Bestrahlungsposition mittels Goldfolienaktivierung bestimmt. Der gemessene Fluss betrug $0{,}301 \cdot 10^5$ n/cm²s bei der Konfiguration der thermischen Säule mit ganzem Graphitziegel und $1{,}555 \cdot 10^5$ n/cm²s mit dem Kollimator. Diese Werte stimmen mit allen früheren Flussmessungen an dieser Position und mit den Werten, die in allen Arbeiten der Radiographiearbeitsgruppe laufend eingesetzt werden, sehr gut überein.

Die Neutronenkalibrierfaktoren für TLD-600 stellten den Zusammenhang zwischen dem thermischen Fluss und dem gemessenen TL-Signal dar.

Der Zusammenhang zwischen dem LET einer Strahlungsart und dem dadurch entstehenden HTR Effekt bei TLD-700 wurde anhand der Kalibrierfunktion von T. Berger bestimmt.

Bei der Neutronenkalibrierung (Graphitwandkonfiguration, rein thermisches Neutronenfeld angenommen) wurden auch Strahlungskomponenten mit LET $\approx$ 7keV/µm $>$ LET von Gammastrahlung gemessen. Dieser Effekt trat wiederholt bei früheren Messungen an der thermischen Säule auf. Um welche Strahlungsart es sich dabei handelt, wurde nicht untersucht. Dadurch war die Efficiency der Dosimeter für diese Strahlung und deren LET nicht bekannt. Somit ist nicht auszuschließen, dass der Fehlerrahmen bei der Bestimmung der LET Verteilung im Phantom 20% übersteigt. Genaue Kenntnis dieser Strahlungskomponenten wäre für zukünftige dosimetrische Arbeiten, die auf der HTR Methode basieren, wünschenswert.

Fünf Phantomexpositionen wurden in drei verschiedenen Neutronenfeldern durchgeführt. Mittels der Pair-Methode wurde aus den TL-Signalen die Energiedosis durch thermische Neutronen und die gammaäquivalente Energiedosis (durch schnelle Neutronen und Gammastrahlung) bestimmt. Mit Hilfe von entsprechenden Konversionsfaktoren wurde der thermische Fluss in Umgebungsäquivalentdosis umgerechnet. Alle gemessenen Flusswerte stimmen gut mit den Angaben der verschiedenen Neutronenflüsse auf den unterschiedlichen Bestrahlungspositionen am Reaktor und der Pu-Be Quelle überein.

Die LET Werte der Strahlung im Phantom wurden in entsprechende Qualitätsfaktoren nach ICRP Empfehlungen umgewandelt, und damit die Bestimmung der Umgebungsäquivalentdosisleistung durch schnelle Neutronen und Gammastrahlung durchgeführt.

Alle ermittelten Dosiswerte korrelieren gut mit den Ergebnissen von vergleichbaren Messungen am Atominstitut.

XI Anhang

ANHANG A

Tabelle A1 Gammakalibrierfaktoren TLD-600 86

Tabelle A2 Gammakalibrierfaktoren TLD-700 87

Tabelle A3 Neutronenkalibrierfaktoren TLD-600 88

Tabelle A4 Neutronenkalibrierung TLD-700
89

Tabelle A5 Dosimeterpositionen und zugewiesene TLD-Chip Nr. 90

TLD-600 Chip Nr.	kalfak1	kalfak2	kalfak3	kalfak4	**MW Chip kalfak 1-4**	kalfak5	Kalfak 5 Ref.korr.	**MW Chip kalfak 1-5**
T600.01	1675,91	1737,67	1397,45	1611,85	**1605,72**	1443,95	1590,94	***1598,33***
T600.02	1625,80	1592,40	1440,73	1611,11	**1567,51**	1429,99	1575,56	***1571,54***
T600.03	1607,53	1644,60	1375,69	1598,45	**1556,57**	1420,61	1565,23	***1560,90***
T600.04	1673,17	1684,14	1310,32	1547,06	**1553,67**	1417,45	1561,74	***1557,71***
T600.05	1608,11	1681,72	1364,82	1571,32	**1556,49**	1352,02	1489,65	***1523,07***
T600.06	1655,71	1644,16	1327,30	1621,24	**1562,10**	1467,50	1616,89	***1589,50***
T600.07	1599,54	1604,85	1455,16	1656,70	**1579,06**	1498,80	1651,38	***1615,22***
T600.08	1645,66	1635,90	1479,47	1652,53	**1603,39**	1507,31	1660,75	***1632,07***
T600.09	1595,55	1568,06	1547,17	1724,75	**1608,88**	1484,62	1635,76	***1622,32***
T600.10	1610,27	1619,38	1335,96	1580,31	**1536,48**	1417,67	1561,98	***1549,23***
T600.11	1680,14	1643,28	1312,10	1593,55	**1557,27**	1475,79	1626,03	***1591,65***
T600.12	1563,81	1625,22	1355,05	1635,29	**1544,84**	1446,56	1593,83	***1569,33***
T600.13	1613,24	1635,02	1391,23	1631,45	**1567,74**	1467,72	1617,13	***1592,44***
T600.14	1654,68	1599,45	1379,80	1597,79	**1557,93**	1400,44	1543,00	***1550,47***
T600.15	1578,08	1584,69	1385,35	1609,15	**1539,32**	1454,74	1602,84	***1571,08***
T600.16	1628,88	1579,85	1374,25	1583,82	**1541,70**	1411,01	1554,66	***1548,18***
T600.17	1599,89	1597,03	1378,58	1586,68	**1540,54**	1398,15	1540,48	***1540,51***
T600.18	1641,10	1626,54	1360,49	1606,13	**1558,56**	1468,81	1618,34	***1588,45***
T600.19	1630,59	1543,50	1431,08	1621,57	**1556,69**	1468,70	1618,22	***1587,45***
T600.20	1596,46	1622,91	1388,01	1658,01	**1566,35**	1418,87	1563,31	***1564,83***
T600.21	1621,80	1578,30	1301,89	1593,55	**1523,89**	1428,24	1573,64	***1548,76***
T600.22	1596,46	1630,40	1343,29	1629,58	**1549,93**	1458,45	1606,92	***1578,43***
T600.23	1556,74	1576,21	1336,51	1620,92	**1522,59**	1392,48	1534,23	***1528,41***
T600.24	1584,36	1593,61	1339,29	1554,41	**1517,92**	1414,83	1558,86	***1538,39***
T600.25	1616,10	1638,22	1344,28	1644,69	**1560,82**	1437,30	1583,61	***1572,22***
T600.26	1702,85	1649,23	1572,81	1595,75	**1630,16**	1409,49	1552,97	***1591,57***
T600.27	1622,60	1608,81	1629,30	1635,13	**1623,96**	1443,51	1590,46	***1607,21***
T600.28	1632,88	1605,18	1534,07	1567,57	**1584,92**	1369,79	1509,24	***1547,08***
T600.29	1727,28	1722,69	1555,38	1591,99	**1649,34**	1377,21	1517,41	***1583,37***
T600.30	1603,54	1603,52	1555,94	1647,47	**1602,62**	1478,41	1628,91	***1615,76***
T600.31	1622,60	1665,64	1538,85	1581,29	**1602,09**	1413,96	1557,90	***1580,00***
T600.32	1610,73	1620,93	1516,87	1600,49	**1587,25**	1399,35	1541,80	***1564,53***
T600.33	1732,08	1708,37	1499,00	1570,75	**1627,55**	1330,64	1466,10	***1546,83***
T600.34	1592,58	1622,36	1562,38	1606,78	**1596,02**	1347,11	1484,25	***1540,13***
T600.35	1734,25	1722,58	1566,48	1597,71	**1655,25**	1352,02	1489,65	***1572,45***
T600.36	1614,38	1604,74	1572,03	1557,84	**1587,25**	1416,90	1561,14	***1574,20***
T600.37	1768,72	1873,90	1543,29	1516,01	**1675,48**	1406,87	1550,09	***1612,78***
T600.38	1711,19	1766,08	1547,28	1542,48	**1641,76**	1420,17	1564,75	***1603,25***
T600.39	1889,84	1748,68	1561,60	1588,32	**1697,11**	1403,71	1546,61	***1621,86***
T600.40	1574,54	1576,76	1483,46	1566,42	**1550,30**	1413,52	1557,42	***1553,86***
T600.41	1590,75	1672,47	1593,78	1597,55	**1613,64**	1469,68	1619,30	***1616,47***
T600.42	1575,91	1600,00	1754,83	1742,08	**1668,20**	1534,02	1690,19	***1679,20***
T600.43	1661,76	1604,85	1689,57	1764,30	**1680,12**	1528,57	1684,18	***1682,15***
T600.44	1621,58	1507,38	1539,73	1565,20	**1558,47**	1417,01	1561,26	***1559,87***
T600.45	1690,53	1599,12	1480,36	1567,81	**1584,45**	1416,79	1561,02	***1572,74***
T600.46	1731,51	1612,44	1446,39	1487,50	**1569,46**	1345,26	1482,20	***1525,83***
T600.47	1664,84	1612,67	1531,41	1571,08	**1595,00**	1404,80	1547,81	***1571,40***
T600.48	1602,17	1641,41	1565,26	1608,17	**1604,25**	1467,18	1616,53	***1610,39***
T600.49	1603,77	1717,84	1580,69	1606,13	**1627,11**	1382,12	1522,81	***1574,96***
T600.50	1634,70	1634,69	1587,24	1652,94	**1627,39**	1427,04	1572,32	***1599,86***
Charge-Kalfak	1639,54	1635,79	1469,27	1605,41	**1587,50**	1427,14	1572,43	***1579,96***
STABW	61,08	62,84	109,57	49,90	43,83	45,79	50,45	34,33
STABW in %	4%	4%	7%	3%	3%	3%	3%	2%
Dosis in mGy	8,76	9,08	9,01	12,24		9,17		

Tabelle A1: Gamma-Kalibrierfaktoren TLD-600

TLD-700	kalfak1	kalfak2	kalfak3	kalfak4	**MW Chip**	kalfak5	Kalfak5	**MW Chip**

Chip Nr.					**Kalfak 1-4**		Ref.korr.	**Kalfak 1-5**
T700.01	1607,03	1642,68	1676,58	1644,53	**1642,70**	1375,25	1550,04	***1596,37***
T700.02	1702,10	1697,03	1655,38	1654,82	**1677,33**	1415,49	1595,39	***1636,36***
T700.03	1666,00	1707,27	1643,84	1697,22	**1678,58**	1500,22	1690,90	***1684,74***
T700.04	1686,46	1771,65	1608,66	1720,42	**1696,80**	1540,13	1735,88	***1716,34***
T700.05	1514,59	1558,55	1653,39	1736,44	**1615,74**	1615,16	1820,44	***1718,09***
T700.06	1638,30	1721,80	1645,62	1637,50	**1660,80**	1498,47	1688,93	***1674,87***
T700.07	1603,88	1655,68	1713,21	1705,15	**1669,48**	1533,04	1727,89	***1698,69***
T700.08	1620,78	1643,81	1693,34	1645,67	**1650,90**	1472,85	1660,04	***1655,47***
T700.09	1572,19	1624,87	1757,05	1767,73	**1680,46**	1501,64	1692,49	***1686,48***
T700.10	1591,19	1653,94	1699,11	1698,94	**1660,79**	1527,37	1721,50	***1691,15***
T700.11	1683,63	1722,21	1681,02	1751,55	**1709,60**	1424,54	1605,60	***1657,60***
T700.12	1731,48	1766,43	1684,79	1703,19	**1721,47**	1463,03	1648,98	***1685,23***
T700.13	1754,88	1791,50	1691,68	1669,20	**1726,81**	1402,73	1581,01	***1653,91***
T700.14	1730,22	1716,99	1715,98	1625,57	**1697,19**	1477,86	1665,70	***1681,45***
T700.15	1684,68	1698,16	1713,21	1640,36	**1684,10**	1458,12	1643,45	***1663,78***
T700.16	1675,76	1732,55	1735,07	1857,43	**1750,20**	1507,09	1698,64	***1724,42***
T700.17	1685,94	1693,24	1746,61	1702,53	**1707,08**	1538,82	1734,41	***1720,74***
T700.18	1720,57	1746,78	1713,54	1703,10	**1721,00**	1510,58	1702,57	***1711,78***
T700.19	1659,39	1506,86	1704,33	1713,07	**1645,91**	1479,72	1667,79	***1656,85***
T700.20	1730,85	1552,00	1735,41	1661,36	**1669,90**	1530,86	1725,43	***1697,67***
T700.21	1674,50	1601,43	1641,95	1600,49	**1629,59**	1393,24	1570,32	***1599,96***
T700.22	1636,10	1524,67	1616,32	1611,44	**1597,13**	1406,11	1584,82	***1590,98***
T700.23	1709,23	1577,89	1719,31	1608,74	**1653,79**	1424,32	1605,35	***1629,57***
T700.24	1718,78	1597,75	1632,85	1630,07	**1644,86**	1403,82	1582,24	***1613,55***
T700.25	1735,57	1640,43	1665,15	1651,14	**1673,07**	1430,97	1612,85	***1642,96***
T700.26	1547,43	1429,17	1711,99	1655,47	**1586,02**	1531,95	1726,66	***1656,34***
T700.27	1669,67	1551,18	1673,70	1702,86	**1649,35**	1439,04	1621,94	***1635,65***
T700.28	1688,88	1590,07	1663,49	1671,81	**1653,56**	1592,15	1794,51	***1724,04***
T700.29	1770,30	1624,77	1665,70	1646,65	**1676,86**	1459,11	1644,56	***1660,71***
T700.30	1759,92	1627,53	1658,49	1647,06	**1673,25**	1461,07	1646,77	***1660,01***
T700.31	1711,65	1599,39	1684,02	1580,23	**1643,82**	1445,15	1628,83	***1636,32***
T700.32	1677,23	1583,42	1688,35	1616,18	**1641,29**	1428,46	1610,02	***1625,66***
T700.33	1629,70	1467,76	1601,33	1518,95	**1554,44**	1417,12	1597,24	***1575,84***
T700.34	1584,05	1498,16	1591,01	1527,78	**1550,25**	1355,73	1528,04	***1539,14***
T700.35	1560,02	1483,11	1553,05	1565,03	**1540,30**	1366,09	1539,71	***1540,01***
T700.36	1753,41	1678,10	1567,81	1575,00	**1643,58**	1353,22	1525,21	***1584,40***
T700.37	1641,55	1593,65	1677,58	1598,86	**1627,91**	1434,35	1616,66	***1622,28***
T700.38	1710,60	1613,20	1656,16	1636,85	**1654,20**	1469,57	1656,36	***1655,28***
T700.39	1559,92	1479,02	1634,74	1603,19	**1569,21**	1421,81	1602,52	***1585,87***
T700.40	1693,28	1529,68	1559,93	1556,94	**1584,96**	1330,86	1500,01	***1542,49***
T700.41	1714,38	1553,43	1690,90	1696,73	**1663,86**	1490,73	1680,20	***1672,03***
T700.42	1714,17	1580,45	1561,04	1590,11	**1611,44**	1394,44	1571,67	***1591,56***
T700.43	1659,29	1556,19	1662,93	1650,82	**1632,31**	1442,31	1625,63	***1628,97***
T700.44	1722,67	1615,86	1599,00	1612,17	**1637,43**	1418,54	1598,83	***1618,13***
T700.45	1627,39	1485,98	1683,57	1682,27	**1619,80**	1477,21	1664,96	***1642,38***
T700.46	1727,28	1613,51	1752,05	1737,34	**1707,55**	1481,79	1670,12	***1688,83***
T700.47	1622,25	1507,57	1696,00	1681,54	**1626,84**	1525,74	1719,66	***1673,25***
T700.48	1676,18	1541,86	1560,93	1520,02	**1574,75**	1411,23	1590,60	***1582,67***
T700.49	1582,37	1472,98	1568,37	1582,27	**1551,50**	1404,58	1583,10	***1567,30***
T700.50	1594,75	1540,94	1602,66	1580,56	**1579,73**	1444,17	1627,72	***1603,72***
Charge MW	1669,90	1611,44	1665,36	1652,32	**1649,76**	1457,90	1643,20	***1646,48***
STABW	61,33	88,82	53,24	66,62	47,82	61,73	69,57	49,48
STABW in %	4%	6%	3%	4%	3%	4%	4%	3%
Dosis in mGy	9,53	9,77	9,01	12,24		9,17		

Tabelle A2: Gamma-Kalibrierfaktoren TLD-700

Chip Nr.	MW n-Kalfak KN1/2 Cts/(n/cm²)	**n-Kalfak KN3** Cts/(n/cm²)	**n-Kalfak KN4** Cts/(n/cm²)	n-Kalfak KN3 % von n-Kalfak4	***MW n-Kalfak 1-4*** Cts/(n/cm²)

T600.01	0,00082	***0,00095***	0,00124	76,83%	**0,00100**
T600.02	0,00083	***0,00099***	0,00126	78,81%	**0,00103**
T600.03	0,00080	***0,00092***	0,00114	81,00%	**0,00095**
T600.04	0,00080	***0,00095***	0,00118	80,81%	**0,00098**
T600.05	0,00082	***0,00096***	0,00119	80,83%	**0,00099**
T600.06	0,00082	***0,00097***	0,00122	79,33%	**0,00100**
T600.07	0,00084	***0,00096***	0,00128	74,37%	**0,00103**
T600.08	0,00081	***0,00096***	0,00122	78,59%	**0,00099**
T600.09	0,00083	***0,00097***	0,00125	77,75%	**0,00102**
T600.10	0,00083	***0,00094***	0,00119	78,82%	**0,00099**
T600.11	0,00078	***0,00089***	0,00125	71,39%	**0,00098**
T600.12	0,00082	***0,00088***	0,00122	71,93%	**0,00097**
T600.13	0,00083	***0,00090***	0,00120	74,52%	**0,00098**
T600.14	0,00082	***0,00086***	0,00115	74,10%	**0,00094**
T600.15	0,00086	***0,00093***	0,00118	78,72%	**0,00099**
T600.16	0,00079	***0,00085***	0,00115	74,07%	**0,00093**
T600.17	0,00079	***0,00087***	0,00121	72,49%	**0,00096**
T600.18	0,00082	***0,00090***	0,00123	73,51%	**0,00098**
T600.19	0,00083	***0,00088***	0,00120	73,48%	**0,00097**
T600.20	0,00085	***0,00094***	0,00123	76,27%	**0,00101**
T600.21	0,00078	***0,00079***	0,00122	64,15%	**0,00093**
T600.22	0,00084	***0,00083***	0,00122	67,58%	**0,00096**
T600.23	0,00081	***0,00083***	0,00119	69,33%	**0,00094**
T600.24	0,00077	***0,00078***	0,00108	71,71%	**0,00088**
T600.25	0,00082	***0,00082***	0,00125	65,31%	**0,00096**
T600.26	0,00082	***0,00080***	0,00122	65,66%	**0,00094**
T600.27	0,00079	***0,00077***	0,00119	65,15%	**0,00092**
T600.28	0,00080	***0,00083***	0,00113	72,86%	**0,00092**
T600.29	0,00081	***0,00081***	0,00117	68,61%	**0,00093**
T600.30	0,00083	***0,00086***	0,00118	72,55%	**0,00096**
T600.31	0,00078	***0,00083***	0,00110	75,78%	**0,00090**
T600.32	0,00078	***0,00080***	0,00108	74,22%	**0,00089**
T600.33	0,00079	***0,00078***	0,00108	72,65%	**0,00088**
T600.34	0,00078	***0,00080***	0,00111	71,98%	**0,00090**
T600.35	0,00082	***0,00084***	0,00111	75,57%	**0,00092**
T600.36	0,00075	***0,00079***	0,00104	75,67%	**0,00086**
T600.37	0,00076	***0,00080***	0,00112	71,20%	**0,00089**
T600.38	0,00081	***0,00079***	0,00106	74,64%	**0,00089**
T600.39	0,00084	***0,00084***	0,00107	78,15%	**0,00091**
T600.40	0,00082	***0,00084***	0,00112	74,85%	**0,00092**
T600.41	0,00082	***0,00084***	0,00102	82,58%	**0,00089**
T600.42	0,00092	***0,00087***	0,00122	71,93%	**0,00100**
T600.43	0,00085	***0,00084***	0,00111	75,96%	**0,00093**
T600.44	0,00086	***0,00084***	0,00105	80,43%	**0,00092**
T600.45	0,00082	***0,00080***	0,00106	76,16%	**0,00089**
T600.46	0,00074	***0,00074***	0,00112	66,33%	**0,00087**
T600.47	0,00082	***0,00081***	0,00109	74,68%	**0,00091**
T600.48	0,00081	***0,00081***	0,00111	72,87%	**0,00091**
T600.49	0,00083	***0,00082***	0,00113	73,04%	**0,00093**
T600.50	0,00086	***0,00085***	0,00104	82,56%	**0,00092**
Charge MW	0,00081	0,00086	0,00116		0,00094
STABW	0,00003	0,00006	0,00007		0,00004
STABW in %	4%	7%	6%		5%
n-fluss n/cm²s	1,555*E5	0.301*E5	0.301*E5		
Konfiguration	Kollimator	Graphitziegel	Graphitziegel		

Tabelle A3: Neutronen-Kalibriefaktoren TLD-600

Chip	KN1 Counts	KN2 Counts	**MW Counts KN1 u. KN2**	KN3 Counts	KN4 Counts	**MW Counts KN3 u. KN4**
T700.01	1497	1735	***1616***	624	594	***609***

T700.02	1593	1733	***1663***	635	619	***627***
T700.03	1575	1721	***1648***	678	615	***646,5***
T700.04	1611	1720	***1665,5***	672	644	***658***
T700.05	1617	1784	***1700,5***	713	612	***662,5***
T700.06	1574	1633	***1603,5***	640	654	***647***
T700.07	1685	1771	***1728***	685	638	***661,5***
T700.08	1616	1676	***1646***	680	646	***663***
T700.09	1705	1782	***1743,5***	673	660	***666,5***
T700.10	1679	1767	***1723***	682	621	***651,5***
T700.11	1739	1679	***1709***	607	657	***632***
T700.12	1722	1736	***1729***	681	664	***672,5***
T700.13	1698	1685	***1691,5***	648	673	***660,5***
T700.14	1741	1688	***1714,5***	643	671	***657***
T700.15	1689	1676	***1682,5***	655	601	***628***
T700.16	1717	1566	***1641,5***	597	654	***625,5***
T700.17	1761	1669	***1715***	631	716	***673,5***
T700.18	1753	1617	***1685***	642	691	***666,5***
T700.19	1694	1627	***1660,5***	642	652	***647***
T700.20	1723	1658	***1690,5***	674	638	***656***
T700.21	1440	1557	***1498,5***	579	572	***575,5***
T700.22	1454	1589	***1521,5***	627	588	***607,5***
T700.23	1462	1606	***1534***	683	599	***641***
T700.24	1466	1604	***1535***	967	545	***756***
T700.25	1503	1592	***1547,5***	624	560	***592***
T700.26	1509	1641	***1575***	594	608	***601***
T700.27	1628	1638	***1633***	619	569	***594***
T700.28	1570	1605	***1587,5***	642	563	***602,5***
T700.29	1517	1657	***1587***	619	603	***611***
T700.30	1582	1676	***1629***	621	576	***598,5***
T700.31	1550	1526	***1538***	584	679	***631,5***
T700.32	1616	1584	***1600***	602	635	***618,5***
T700.33	1599	1530	***1564,5***	583	675	***629***
T700.34	1484	1528	***1506***	573	635	***604***
T700.35	1519	1498	***1508,5***	566	616	***591***
T700.36	1468	1411	***1439,5***	529	685	***607***
T700.37	1633	1479	***1556***	551	683	***617***
T700.38	1599	1502	***1550,5***	569	705	***637***
T700.39	1587	1482	***1534,5***	558	660	***609***
T700.40	1444	1447	***1445,5***	521	622	***571,5***
T700.41	1520	1696	***1608***	620	747	***683,5***
T700.42	1405	1550	***1477,5***	587	697	***642***
T700.43	1556	1703	***1629,5***	636	724	***680***
T700.44	1458	1650	***1554***	596	666	***631***
T700.45	1456	1653	***1554,5***	612	657	***634,5***
T700.46	1533	1589	***1561***	575	703	***639***
T700.47	1597	1709	***1653***	624	664	***644***
T700.48	1350	1531	***1440,5***	562	728	***645***
T700.49	1523	1587	***1555***	574	639	***606,5***
T700.50	1469	1595	***1532***	600	651	***625,5***
MW	1577,72	1626,76	***1602,24***	625,98	643,48	***634,73***
STABW	102,42	89,25	81,68	65,36	46,21	32,25
STABW in %	6,49	5,49	5,10	10,44	7,18	5,08
n-fluss n/cm²s	1,555*10E5	1,555*10E5		0.301*10E5	0.301*10E5	
Konfiguration	Kollimator	Kollimator		Graphitziegel	Graphitziegel	

Tabelle A4: Neutronenkalibrierung, TLD-700 Messwerte

Position	TLD600 Chip Nr.	TLD700 Chip Nr.	n-Kalfak TLD-600 KN3	Gamma Kalfak TLD-700 MW1-5

X1	2	1	0,00099	1596,37
X2	3	4	0,00092	1716,34
X3	6	6	0,00097	1674,87
X4	8	7	0,00096	1698,69
X5	9	8	0,00097	1655,47
X6	10	9	0,00094	1686,48
X7	12	10	0,00088	1691,15
X8	13	12	0,00090	1685,23
X9	14	16	0,00086	1724,42
X10	15	18	0,00093	1711,78
X11	16	19	0,00085	1656,85
X12	17	20	0,00087	1697,67
X13	18	21	0,00090	1599,96
X14	19	22	0,00088	1590,98
X15	20	23	0,00094	1629,57
X16	21	24	0,00079	1613,55
X17	23	25	0,00083	1642,96
X18	24	27	0,00078	1635,65
X19	25	29	0,00082	1660,71
X20	27	28	0,00077	1724,04
YL-01	28	30	0,00083	1660,01
YL-02	30	31	0,00086	1636,32
YL-03	31	32	0,00083	1625,66
YL-04	32	33	0,00080	1575,84
YL-05	36	34	0,00079	1539,14
YL-06	38	35	0,00079	1540,01
YL-07	40	37	0,00084	1622,28
YL-08	41	38	0,00084	1655,28
YR-01	42	39	0,00087	1585,87
YR-02	43	41	0,00084	1672,03
YR-03	44	42	0,00084	1591,56
YR-04	45	43	0,00080	1628,97
YR-05	46	44	0,00074	1618,13
YR-06	47	45	0,00081	1642,38
YR-07	48	46	0,00081	1688,83
YR-08	50	48	0,00085	1582,67
ZU-01	1	3	0,00095	1684,74
ZU-02	4	11	0,00095	1657,60
ZU-03	5	14	0,00096	1681,45
ZU-04	11	15	0,00089	1663,78
ZU-05	26	17	0,00080	1720,74
ZU-06	7	2	0,00096	1636,36
ZU-07	22	5	0,00083	1718,09
ZO-01	29	13	0,00081	1653,91
ZO-02	33	26	0,00078	1656,34
ZO-03	34	36	0,00080	1584,40
ZO-04	35	40	0,00084	1542,49
ZO-05	37	47	0,00080	1673,25
ZO-06	39	49	0,00084	1567,30
ZO-07	49	50	0,00082	1603,72

Tabelle A5: Dosimeterpaare und verwendete Kalibrierfaktoren

ANHANG B

a) Formel zur Berechnung des thermischen Neutronenflusses mit Goldfolienaktivierung 92

b) Schematische Darstellung des Reaktors 93

c) Schematische Darstellung der NRA, Neutronenkalibrierung (Foto) 94

a) Die Formel zur Berechnung des thermischen Flusses aus den Messwerten des 4π-Zählers:

$$\Phi = \frac{2}{R \cdot F \cdot S \cdot \Theta \cdot \mu \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{T_N}{T_O}} \cdot \left(1 - e^{-\lambda t_1}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{A_t \cdot e^{\lambda t_2}}{G} - \frac{F_{Cd} \cdot A_{Cd} \cdot e^{\lambda t'_2}}{G'} \right)$$

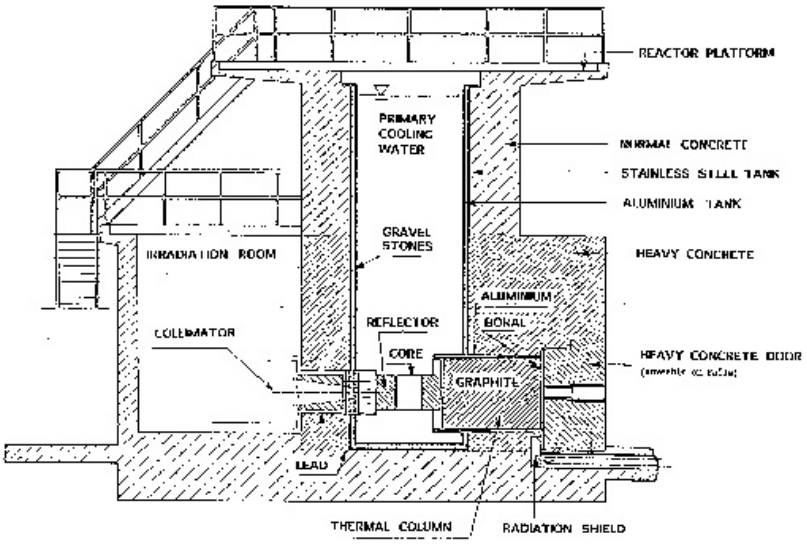
Kommentar [BK1]:

R = 0,98	Efficiency des verwendeten 4π-Detektors
F	Fläche einer Folie in cm²
μ = 0,3 cm²/g	Masseabsorptionskoeffizient von Gold
$\frac{T_N}{T_O}$ = 1,07	T_N Neutronentemperatur, $T_O \approx 293{,}6$ K
t_1	Aktivierungsdauer (gleich für bedeckte und unbedeckte Folie)
t_2	Dauer zwischen Ende der Bestrahlung und Beginn der Aktivitätsmessung für unbedeckte Folien
t'_2	analog für bedeckte Folien
$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = 1{,}7803 \cdot 10^{-4}$ min	Zerfallskonstante
F_{Cd} = 1,22	Cadmium-Korrekturfaktor
$\Theta = \frac{m}{F}$	Flächendichte einer Folie, m Masse der Folie
$G = (2\mu\Theta + 1)^{-1} = 0{,}9766$	Neutronenselbstabschirmfaktor
G’	Neutronenselbstabschirmfaktor für epithermische und schnelle Neutronen, hier wird eingesetzt G’ = G
α = 19,3 cm²/g	Massenabsorptionskoeffizient von Gold für Betastrahlung
$S = \frac{\left(1 - e^{\alpha \cdot \Theta}\right)}{\alpha \cdot \Theta} = 0{,}6968$	Selbstabsorptionsfaktor der Folien für Betastrahlung

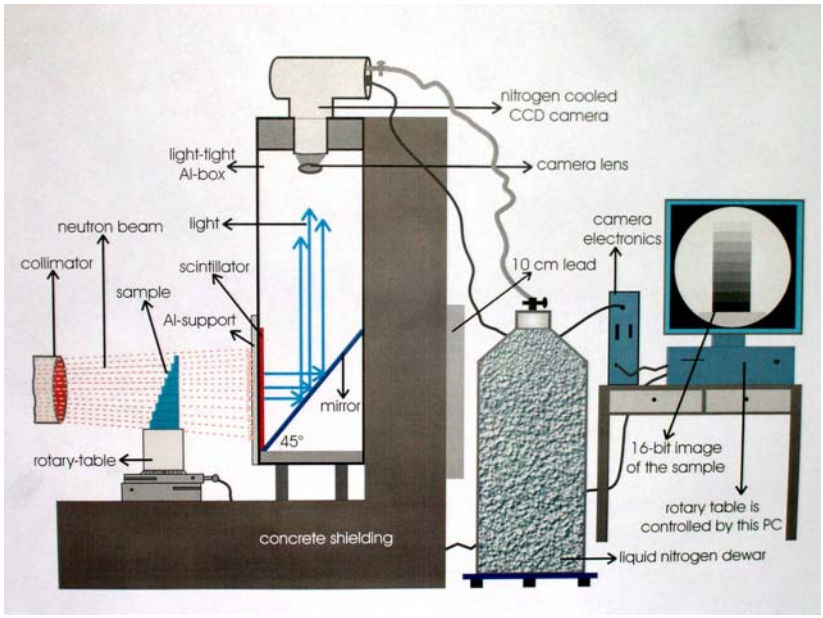
b) Forschungsreaktor Triga Mark II am Atominstitut, vertikale Querschnittsansicht:

- Trockenbestrahlungsraum = Iradiation Room
- thermische Säule = thermal column

- verschiebbare Abschirmungswand der thermischen Säule = heavy concrete door



c) Radiographieanlage (vertikale Querschnittsansicht) NRA, angebracht an der verschiebbaren Abschirmungswand der thermischen Säule:



Neutronenkalibrierung an der Bestrahlungsposition der NRA, Foto aufgenommen während KN3:

- Strahlshutter aus Borcarbid
- höhenverstellbare und drehbare Probenposition (Aluminiumzylinder)
- Aluminiumträger mit Goldfolien auf der Probenposition

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2a: Bragg-Peak des LET 5
Abbildung 2b: Q(LET) nach ICRP 60 und ICRP 26 6
Abbildung 3a: Typische Glowkurve von LiF:Mg,Ti 8
Abbildung 3b: TL-Mechanismus 9
Abbildung 3c: Peak 5-Dosischarakteristik von TLD-600 11
Abbildung 4a: Potoeffekt 15
Abbildung 4b: Comptoneffekt 16
Abbildung 4c: Paarbildung und Positron-Annihilation 16
Abbildung 4d: Energieübertragung von einem Photon auf ein Elektron 18
Abbildung 4e: Kerma im idealisierten Medium 18
Abbildung 4f: Kerma im realen Medium 19
Abbildung 4g: σ von Cadmium und Bor für Neutronen 20
Abbildung 4h: σ von ^{6}Li und ^{7}Li für Neutronen 21
Abbildung 5a: Das verwendete Phantom 25
Abbildung 6a: ^{137}Cs- Bestrahlungsanlage 27
Abbildung 6b: Glowkurven von TLD-600 und TLD-700 nach Gammakalibrierung 29
Abbildung 6c: σ von Cadmium und Gold für Neutronen 31
Abbildung 6d: Goldfolien auf Aluminiumträger 32
Abbildung 6e: Glowkurven von TLD-600 und TLD-700 nach Neutronenbestrahlung 34
Abbildung 6f: HTR-LET Zusammenhang für TLD-700 35
Abbildung 6g: TLD-700 HTR-Vergleich von Gamma- und Neutronenstrahlung 37
Abbildung 6h: TLD-600 HTR-Vergleich von Gamma- und Neutronenstrahlung 37
Abbildung 6i: TLD-700 nach Freiluft-Neutronenkalibrierung 39
Abbildung 6j: TLD-700 nach Freiluft-Neutronenkalibrierung 39
Abbildung 6k: LET-abhängige Efficiency von TLD-700 41
Abbildung 7a: TL-Auswerteanlage 42
Abbildung 8a: Ausrichtung des Phantoms im Strahlungsfeld 44
Abbildung 8b: Bestrahlungsgeometrie an der thermischen Säule 45
Abbildung 8c: Thermischer Fluss im X-Kanal bei EXP1, EXP3, EXP4 49
Abbildung 8d: Thermischer Fluss im Y-Kanal bei EXP1, EXP3, EXP4 50
Abbildung 8e: HTR bei EXP1, EXP3, EXP4 52
Abbildung 8f: Thermischer Fluss bei EXP2 55
Abbildung 8g: HTR bei EXP2 57
Abbildung 8h: Thermischer Fluss bei EXP5 61
Abbildung 8i: HTR bei EXP5 64
Abbildung 9a: Konversionsfaktoren H*(10)/Φ und D/Φ 67
Abbildung 9b: EXP1, H*(10)’ durch thermische Neutronen 72
Abbildung 9c: EXP1, H’ durch Gammastrahlung 72
Abbildung 9d: EXP2, H*(10)’ durch thermische Neutronen 74
Abbildung 9e: EXP2, H’ durch schnelle Neutronen und Gammastrahlung 76
Abbildung 9f: EXP5, XY-Ebene, H*(10)’ durch thermische Neutronen 78
Abbildung 9g: EXP5, XY-Ebene, H’ durch schnelle Neutronen und Gammastrahlung 80
Abbildung 9h: EXP5, YZ-Ebene, H’ durch schnelle Neutronen und Gammastrahlung 81

Literaturverzeichnis

1) Krieger H., Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz, Band 1 Grundlagen, B.G.Teubner Verlag Stuttgart, 1998
2) Martin James E., Physics for Radiation Protection, John Wiley & Sons Inc., 2000
3) Aitken M.J., Thermoluminescence Dating, Academic Press 1985
4) ICRP 60, 1990 Recommendations of the ICRP, Oxford, Pergamon Press, 1991
5) ICRP 26, Recommendations of the ICRP, Pergamon Press 1977
6) ICRU, Linear Energy Transfer, ICRU Report 16, ICRU Publications, Bethesda, MD, 1970
7) ICRU, The Quality Factor in Microdisimetry, ICRU Report 40, ICRU Publications, Bethesda, MD, 1986
8) Schöner W., Die HTR-Methode zur Messung des mittleren LET der Strahlung im Weltraum mit Thermolumineszenz-Dosimetern und ihre mikrodosimetrische Interpretration, Dissertation am Atominstitut der Österreichischen Universitäten, Technische Universität Wien, 1997
9) Hajek M., Applied Neutron Spectrometry, Applications atop High Altitude Mountains and onboard Aircraft, Dissertation am Atominstitut der Österreichischen Universitäten, Technische Universität Wien, 2002
10) Berger T., Dissertation am Atominstitut der Österreichischen Universitäten, Technische Universität Wien
11) Hajek M., Bestimmung der Neutronendossis und des Neutronenspektrums mit einem Bonner-Spektrometer, Diplomarbeit am Atominstitut der Österreichischen Universitäten, Technische Universität Wien, 1999
12) Kronberger M., Bestimmung der biologisch gewichteten Energiedosis in einem menschlichen Phantom, Diplomarbeit am Atominstitut der Österreichischen Universitäten, Technische Universität Wien, 2003
13) Torkzadeh F., Neutronendosimetrie mit Thermolumineszenz-Dosimetern, Diplomarbeit am Atominstitut der Österreichischen Universitäten, Technische Universität Wien, 1994
14) Tschurlovits M., Technischer Strahlenschutz, Skriptum zur Vorlesung, Atominstitut der Österreichischen Universitäten, Technische Universität Wien, 1997
15) Böck H., Villa M., Praktische Übungen am Reaktor, Skriptum, Atominstitut der Österreichischen Universitäten, Technische Universität Wien, 2003
16) Vana N., Berger T., Hajek M., Messung der Tiefenverteilung des LET-Spektrums und der Neutronenkomponente in einem Phantom am Sonnblick, Endbericht, Atominstitut der Österreichischen Universitäten, Technische Universität Wien, 2000
17) Noll M., Anwendung der HTR-Methode in der Strahlenbiologie zur Korrelation mit gentoxischen Parametern und zur Messung der biologisch relevanten Strahlenbelastung in hochfliegenden Flugzeugen, Dissertation am Atominstitut der Österreichischen Universitäten, Technische Universität Wien, 1997
18) Vana N., Schöner W., Fugger M., The LETDependance of LiF:Mg,Ti Dosemeters and ist Application for LET Measurements in Mixed Radiation Fields, Radiation Protection Dosimetry 85, pp 263-266, Nuclear Technology Publishing, 1999
19) Portal G., Review of the PrincipalMaterials Available for Thermoluminescent Dosimetry, Radiation Protection Dosimetry 17, pp 351-357, Nuclear Technology Publishing,1986
20) Douglas J.A., Perks C.A., Cotterill A.D., The Variation with LET of the Responses of TLD-700 and TLD-600 at Temperatures up to 200 8C, Radiation Protection Dosimetry 17, pp 479-482, Nuclear Technology Publishing,1986

21) Gibson J.A.B., The Relative Tissue Kerma Sensitivity of Thermoluminescent Materials to Neutrons, Radiation Protection Dosimetry 15, pp 253-266, Nuclear Technology Publishing,1986
22) Gambarini G., Martini M., Scacco A., Raffaglio C., Sichirollo A.E., Tl Dosimetry in High Fluxes of Thermal Neutrons using Variously Doped LiF and $KMgF_3$, Radiation Protection Dosimetry 70, pp 175-180, Nuclear Technology Publishing,1997
23) Watt D.E., A Unified System of Radiation Bio-Effectiveness and its Consequences in Practical Applications, Radiation Protection Dosimetry 70, pp 529-536, Nuclear Technology Publishing,1997
24) Piters T.M., Dose Response of Thermoluminescence Emission Spectra of LiF:Mg,Ti with different Mg, Ti Impurity Concentrations, Radiation Measurements 24, pp 431-434, 1995
25) McKinla, Thermoluminescence Dosimetry, Adam Hilger Ltd., 1981
26) Vanmarcke H., Baugnet-Mahieu L., Culot J.P., Govaerts P., Holmstock L., Ionising Radiation, Effects of Low Doses, Brusseles, ONDRAF/NIRAS, 1998
27) Konsultation mit Fugger M.
28) Konsultation mit Hajek M.
29) Konsultation mit Villa M.
30) Horowitz Y., et al, Non-universality of TL-LET response in Thermoluminescent LiF: the Effect of Batch Composition, Phys. Med. Biol., 1979
31) UserManual, Harshaw
32) Kostresevic B., Dosimetrie und Strahlenschutz, Projektarbeit am Atominstiut der Österreichischen Universitäten, Technische Universität Wien, 2003
33) Konsultation mit Bastürk
34) Vana N., Strahlenschutz und Dosimetrie, Skriptum zur Vorlesung, Atominstitut der Österreichischen Universitäten, Technische Universität Wien, 1997
35) Vana N., Weltraumdosimetrie, Skriptum zur Vorlesung, Atominstitut der Österreichischen Universitäten, Technische Universität Wien, 2001
36) Vana N., Festkörperdosimetrie, Skriptum zur Vorlesung, Atominstitut der Österreichischen Universitäten, Technische Universität Wien, 1997