



Technische Universität Wien
Atominstitut der Österreichischen Universitäten
*Vienna University of Technology
Atomic Institute of the Austrian Universities*
www.ati.ac.at Stadionallee 2, 1020 Wien, Austria



NEUTRONENDOSIMETRIE MIT BUBBLE- DETEKTOREN

F. Smecka & M. Hajek

AIAU 27607

März 2007

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Theoretische Grundlagen.....	3
2.1	Dosimetrie.....	3
2.1.1	Energiedosis.....	3
2.1.2	Äquivalentdosis.....	3
2.2	Neutronenstrahlung.....	3
2.3	Bubble-Detektoren.....	4
2.3.1	Grundlagen.....	4
2.3.2	Bauformen.....	6
3	Kalibrierung der Bubble-Detektoren.....	7
3.1	Verwendete Detektoren.....	7
3.2	Anleitung zur Verwendung der Detektoren.....	7
3.3	Versuchsaufbau und Durchführung.....	8
3.4	Ergebnisse.....	9
3.4.1	Niedrigere Empfindlichkeit.....	9
3.4.2	Höhere Empfindlichkeit.....	10
4	Bestrahlung mit dem TRIGA Mark-II Reaktor.....	11
4.1	Versuchsaufbau.....	11
4.2	Ergebnis.....	12
5	Zusammenfassung.....	13
6	Projektmanagement und Kostenabschätzung.....	14
6.1	Zeitlicher Ablauf.....	14
6.1.1	Arbeitspakete und Ablauf.....	14
6.2	Kostenabschätzung.....	14
7	Anhang.....	15
7.1	Abbildungsverzeichnis.....	15
7.2	Referenzen.....	15

1 Einleitung

Bubble-Detektoren dienen zur Personendosimetrie von Neutronenstrahlung.

In dieser Projektarbeit sollen 11 Bubble-Detektoren der Firma Bubble Technology Industries mit verschiedenen Empfindlichkeiten überprüft werden.

Dazu werden die einzelnen Dosimeter einem definierten Neutronenstrahlungsfeld ausgesetzt, danach ausgewertet und das Ergebnis mit dem Kalibrierfaktor laut Herstellerangaben verglichen.

Abschließend wird noch eine Bestrahlung am TRIGA Mark-II Reaktor bei unterschiedlichen Leistungen im Trockenbestrahlungsraum durchgeführt und das Ergebnis bewertet.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Dosimetrie

2.1.1 Energiedosis

Die Energiedosis (D) ist der Erwartungswert der pro Masseneinheit absorbierten Strahlungsenergie in Materie.

Einheit: 1 J/kg = 1 Gy

Alte Einheit: 100 rad = 1 J/kg = 1 Gy

2.1.2 Äquivalentdosis

Die Äquivalentdosis (H) ist das Produkt aus der Energiedosis und einem Strahlungswichtungsfaktor (w_R), der die biologische Wirkung verschiedener Strahlenarten einfließen lässt.

$$H = D \cdot w_R$$

Einheit: 1 Sv = 1 Gy · w_R

Strahlenart	Strahlungswichtungsfaktor
Röntgen-, Gamma- und Betastrahlung	$w_R = 1$
thermische Neutronen	$w_R = 5$
schnelle Neutronen	$w_R = 10$ bis 20
Protonen, $E > 2$ MeV	$w_R = 5$
Alphastrahlung, schwere Ionen	$w_R = 20$

2.2 Neutronenstrahlung

Neutronenstrahlung besteht aus ungeladenen Teilchen (Masse: $1,67482 \cdot 10^{-27}$ kg) und wird zur Gruppe der ionisierenden Strahlung gezählt.

Neutronen entstehen bei der Spontanspaltung von sehr schweren Elementen (z.B.: Uran 235), in den oberen Luftschichten der Atmosphäre beim Zusammenstoß

kosmischer Partikel mit den Luftmolekülen und aus menschlich geschaffenen Quellen (z.B.: Kernreaktoren, Plutonium-Beryllium-Quellen).

Neutronenstrahlung lässt sich wie folgt einteilen:

Typ	Kinetische Energie
kalte Neutronen	< 2 meV
thermische Neutronen	< 100 meV
epithermische Neutronen	< 1 eV
mittelschnelle Neutronen	0,5 eV...200 keV
schnelle Neutronen	200 keV...20 MeV
relativistische Neutronen	> 20 MeV

Bei dieser Einteilung ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Energiegrenzen willkürlich festgelegt sind und in der Literatur unterschiedliche Werte zu finden sind.

2.3 Bubble-Detektoren

2.3.1 Grundlagen

Bubble-Detektoren verwenden überhitzte Flüssigkeiten. Zum Einsatz kommen in einem Polymer oder wasserhaltigem Gel eingelagerte Halogenkohlenwasserstoffen (z.B.: $C_2Cl_2F_4$, C_3F_8 , C_2ClF_5) und/oder Kohlenwasserstofftröpfchen.

Überhitzte Emulsionen funktionieren ähnlich wie Blasenammern. Bei Teilchenbeschuss geht die Emulsion in kleinen Bereichen vom flüssigen in den gasförmigen Zustand über und kleine Bläschen (englisch: Bubbles) bilden sich.

Um keine Bläschenbildung vor der tatsächlichen Bestrahlung zu erhalten ist es notwendig, das Gel in besonders glatten Behältern aufzubewahren und dadurch die Formation von Keimzellen zu verhindern, die den Übergang in den gasförmigen Zustand ermöglichen. Zudem sollte die Differenz zwischen Einsatztemperatur und Siedetemperatur möglichst gering sein.

Die Emulsionsmatrix sollte chemisch stabil, von konstanter Dichte und gleicher Viskosität in allen Raumbereichen sein.

Bei der Bubble-Erzeugung gibt es einen kritischen Radius (R_c), ab dem sich Bubbles in den sichtbaren Bereich ausdehnen (darunter bilden sich keine sichtbaren Bubbles). Hier ist zu berücksichtigen, dass sich zuerst Bubbles im Nanometerbereich bilden und erst im nächsten Schritt (sehr kurzer Zeitabstand) unter bestimmten Bedingungen zu einer mit dem freien Auge sichtbaren Größe expandieren. Dieser kritische Radius hängt von der Oberflächenspannung (σ) der Flüssigkeit und dem Druckunterschied ($p'' - p'$) zwischen innerhalb und außerhalb der Blase ab.

$$R_c = \frac{2\sigma}{(p'' - p')}$$

Die maximale Größe der Bubbles wird durch die freie Oberflächenenergie, die gegen den Druck verrichtete Arbeit und die Energie die vom auftreffenden Teilchen an die Flüssigkeit abgeben wird, bestimmt.

Zudem hängt die Bubble- Bildung von der Temperatur am Einsatzort ab (siehe Abbildung 2-1), dieser Effekt muss bei der Auswertung berücksichtigt und korrigiert werden.

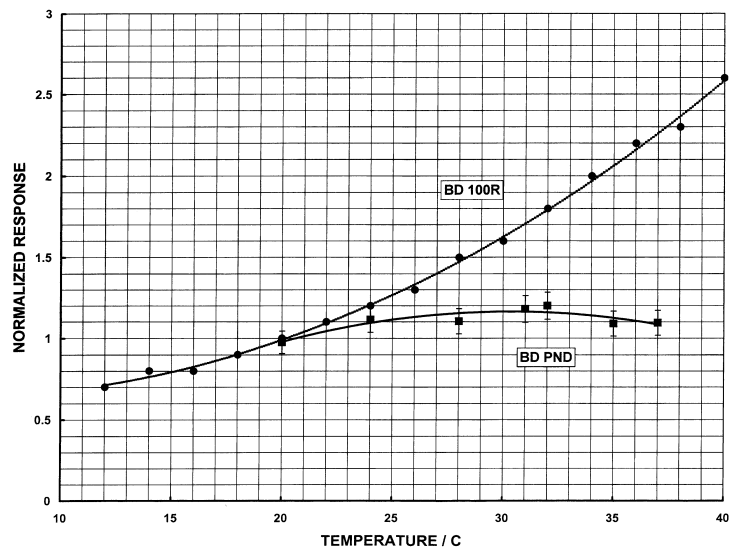


Abbildung 2-1 Temperature response curves of the BD-100R and BD-PND detector types
 [Ing, H. Neutron Measurements Using Bubble Detectors – Terrestrial and Space. Radiat. Meas. 33(3), 275-286 (2001)]

Durch geeignete Zusammensetzung der Emulsion wird es möglich, nahezu nur Neutronen nachzuweisen und den Bubble-Detektor gegenüber anderen Strahlungsarten (zum Beispiel Gammastrahlung) unempfindlich zu machen.

Das Detektoransprechvermögen entspricht ziemlich über den ganzen Neutronenenergieverlauf dem Konversionsfaktor von der Neutronenflussdichte zur Umgebungsäquivalentdosis $H^*(10)$, sodass eine energieabhängige Bestimmung von $H^*(10)$ ermöglicht wird.

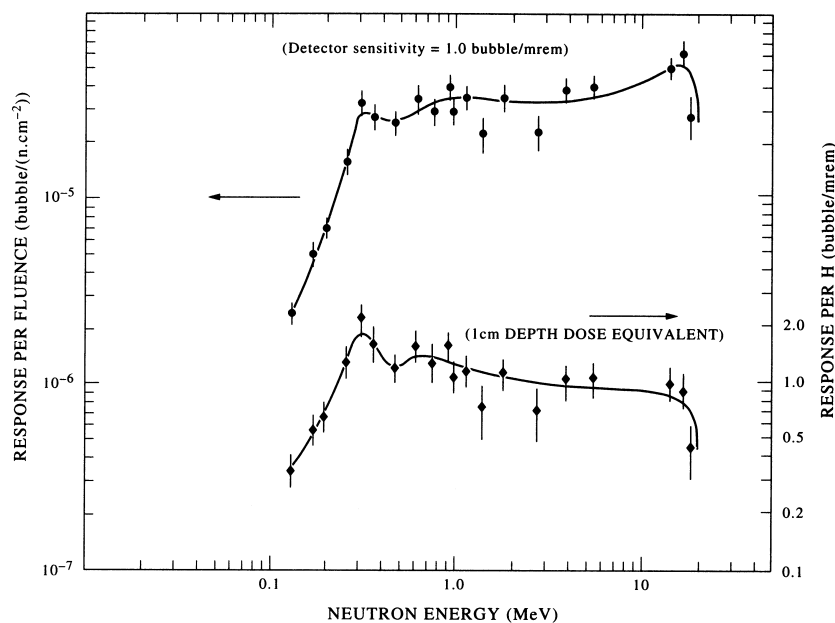


Abbildung 2-2 Energy response of the BD-100R/BD-PND type bubble detectors
 [Ing, H. Neutron Measurements Using Bubble Detectors – Terrestrial and Space. Radiat. Meas. 33(3), 275-286 (2001)]

2.3.2 Bauformen

Auf dem Markt befinden sich viele unterschiedlich Bauformen der Bubbledetektoren, die sich in aktive und passive Systeme einteilen lassen.

Die aktiven Systeme nehmen die Entstehung der Bubbles akustisch wahr und geben den Wert sofort an eine Anzeige weiter.

Die passiven Systeme müssen nach der Bestrahlung händisch (in dieser Projektarbeit verwendetes System) oder mittels eines optischen Scanners ausgezählt werden.

Eine andere Möglichkeit ist, die Volumszunahme der Flüssigkeit (durch die Bläschen) sichtbar zu machen.

Es ist möglich die Dosimeter öfters zu verwenden (durch erneute Kompression der überhitzten Flüssigkeit), dabei ist aber zu beachten, dass es nach einiger Zeit zu Alterungs-Effekten kommen kann.

3 Kalibrierung der Bubble-Detektoren

3.1 Verwendete Detektoren

Die hier verwendeten Detektoren stammen von der Firma Bubble Technology Industries mit folgenden Empfindlichkeiten:

Dosimeter Nummer	Empfindlichkeit [Bubbles/ μ Sv]
236163	2,0
236067	2,0
236086	2,1
236111	2,1
236028	2,3
236054	2,3
237845	3,4
238374	3,3
237814	3,2
237589	3,2
237800	3,1



Abbildung 3-1 Bubble-Detektor mit Schutzhülle

3.2 Anleitung zur Verwendung der Detektoren

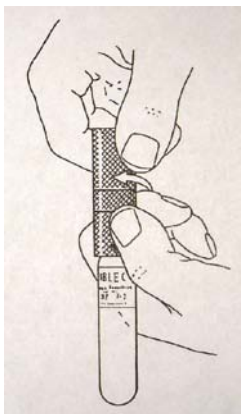


Abbildung 3-2 Anleitung Detektor

Um den Detektor in Funktion zu setzen, wird einfach die obere Kappe aufgeschraubt (siehe Abbildung 3-4), nach der Bestrahlung wird nach etwa einer Stunde ausgezählt. In dem man die Verschlusskappe wieder voll zuschraubt, setzt man den Detektor wieder auf Null, wobei zu beachten ist, dass dieser Vorgang bis zu 24 Stunden dauern kann.

Nach dem Zurücksetzen ist er wieder zu verwenden, die Lebensdauer beträgt nach Herstellerangaben zirka 2 Jahre.

3.3 Versuchsaufbau und Durchführung

Die Detektoren wurden im Abstand von 1,5 Meter von der Plutonium- Beryllium- Neutronenquelle (in einem Meter Entfernung ca. 70 $\mu\text{Sv/h}$; folglich bei 1,5 Meter 31,11 $\mu\text{Sv/h}$; in Abbildung 3-1 als grauer Zylinder am Seil sichtbar) in einem eigens angefertigtem Styrodurblock (siehe rosa Block Abbildung 3-1) aufgestellt und je nach Empfindlichkeit ungefähr so lange bestrahlt, bis cirka 40-50 Bubbles sichtbar wurden.

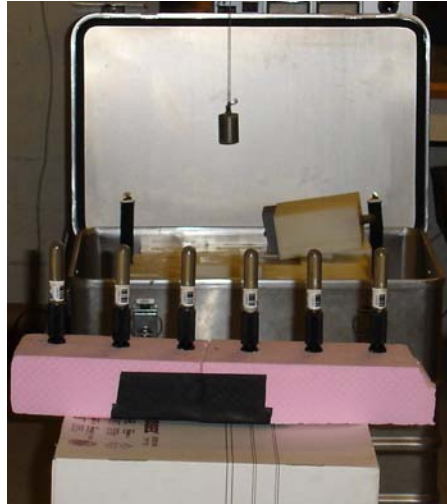


Abbildung 3-3 Versuchsaufbau

Nach der Bestrahlung musste eine Zeit gewartet werden, weil die Bubbles erst nach einiger Zeit ihre endgültige Größe erreichen (siehe Abbildung 3-2).



Abbildung 3-4 Detektor mit Bubbles

In Folge wurden die Bubbles händisch unter der zu Hilfenahme eines Papierstreifens ausgezählt.

Um statistisch relevante Werte zu erhalten, ist jeder Bubble-Detektor mindestens 5-mal bestrahlt und ausgezählt worden.

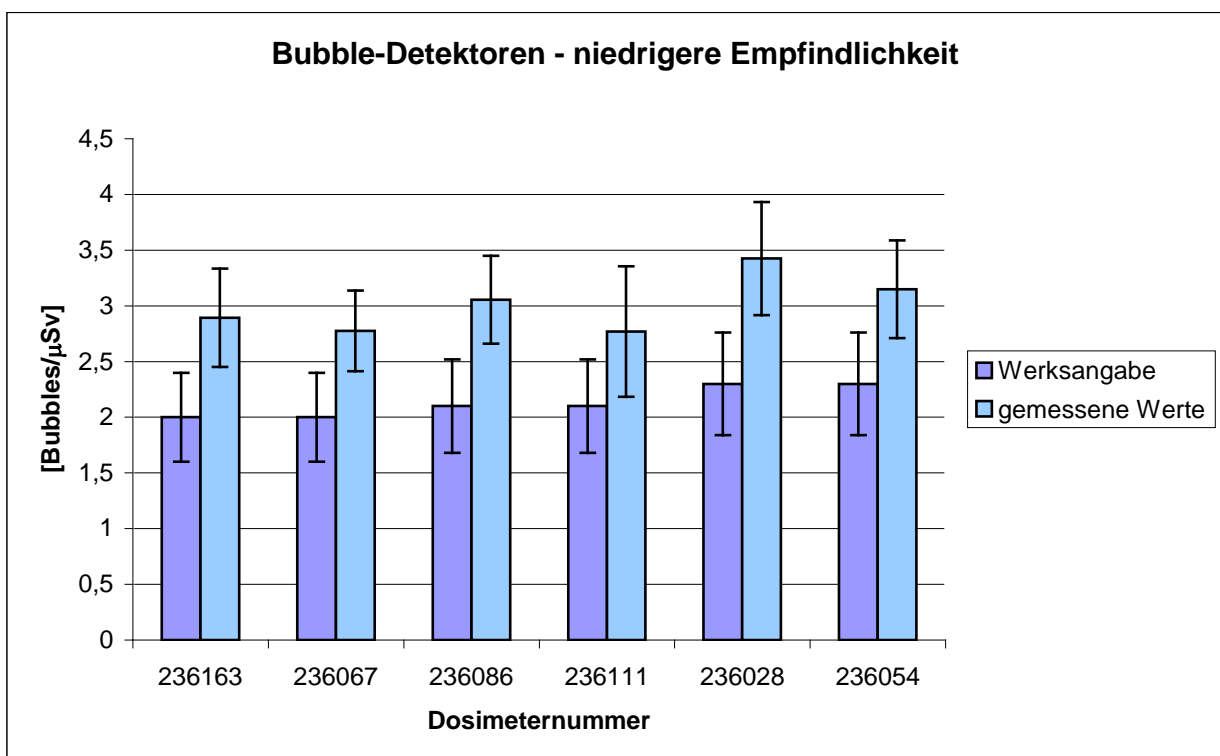
3.4 Ergebnisse

Die Messwerte wurden auf 20°C korrigiert, da es im Kalibrierraum bei der Bestrahlung mit Neutronen nur 19°C hatte. Die Standardabweichung (Stabw.) wurde für einen Vertrauensbereich von 68% berechnet (d.h. +/- σ).

Die ermittelten Ergebnisse weichen, wie man in den Tabellen sehen kann, teilweise von den Herstellerangaben ab. Der Hersteller gibt an, dass die angegebenden Werte einen Schwankungsbereich von +/- 20 % haben, bei wenigen Bubbles (unter 100) kann die Abweichung noch größer sein, da die Detektion der Neutronen auch wieder statistischen Faktoren unterliegt.

3.4.1 Niedrigere Empfindlichkeit

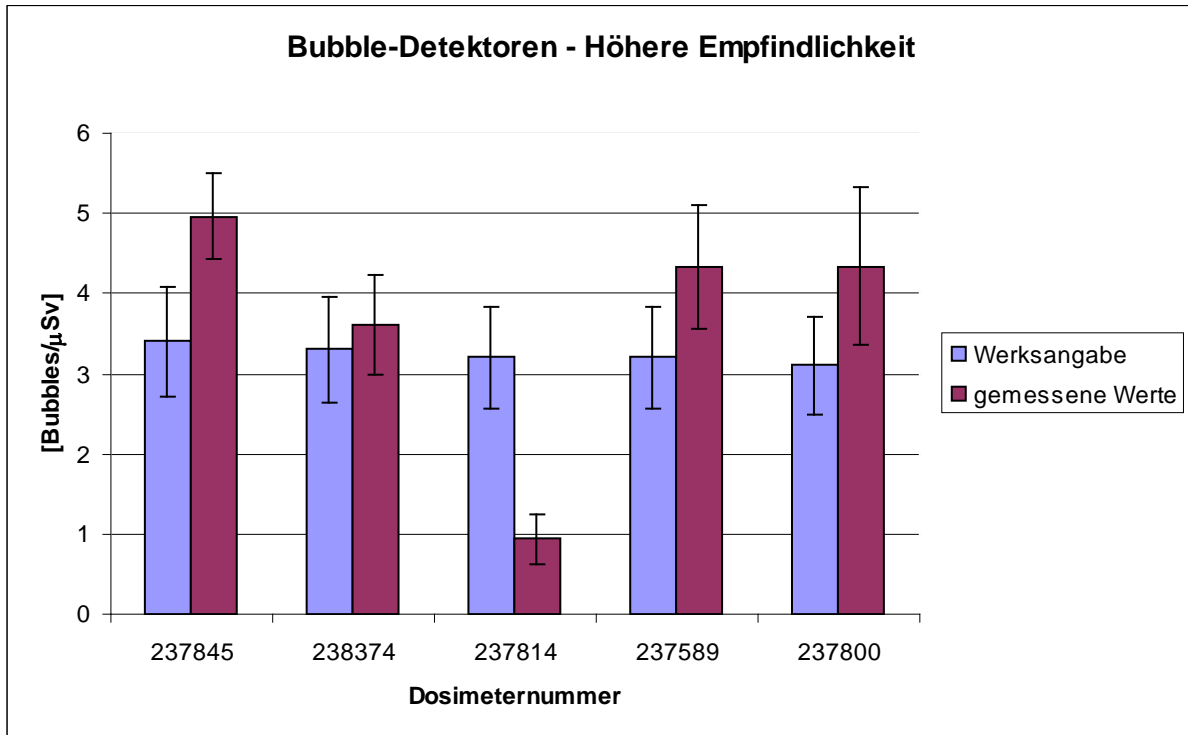
niedrigere Empf.	Werksangabe Dosimeter Nr. [Bubbles/ μ Sv]	Messungen							Mittelwert	Stabw. (+/-)	
		1	2	3	4	5	6	7			
	236163	2	2,5	2,4	3,6	2,5	2,9	3,3	3,1	2,9	0,44
	236067	2	2,5	2,7	3,4	2,5	3,0	2,5	3,0	2,8	0,36
	236086	2,1	3,0	3,0	3,1	2,7	2,9	2,8	3,9	3,1	0,39
	236111	2,1	2,9	2,3	3,3	2,7	1,7	3,4	3,1	2,8	0,59
	236028	2,3	3,0	3,0	2,8	4,2	3,5	3,6	3,8	3,4	0,51
	236054	2,3	2,9	2,8	2,6	3,4	3,0	3,4	3,9	3,1	0,44



Wie man in der Tabelle erkennen kann liegen die gemessenen Werte teilweise im Schwankungsbereich der Herstellerangabe, teilweise aber auch darüber. Tendenziell haben die Detektoren aber eine leicht höhere Empfindlichkeit, als der Hersteller angibt.

3.4.2 Höhere Empfindlichkeit

höhere Empf.	Werksangabe [Bubbles/ μ Sv]	Messungen					Mittelwert	Stabw. (+/-)
		1	2	3	4	5		
237845	3,4	5,2	5,1	4,7	5,7	4,2	5,0	0,54
238374	3,3	4,1	3,8	3,1	2,8	4,2	3,6	0,62
237814	3,2	1,5	1,0	0,7	0,7	0,8	0,9	0,31
237589	3,2	4,7	5,5	4,0	3,8	3,7	4,3	0,77
237800	3,1	5,6	5,1	3,1	4,0	4,0	4,3	0,99



Das Dosimeter mit der Nummer 237814 zeigt extrem andere Werte, es ist anzunehmen, dass dieses vom Hersteller mit einer anderen Gelmatrix als angegeben befüllt wurde. Ansonsten liegen die gemessenen Ergebnisse größtenteils im Schwankungsbereich der Herstellerangaben.

4 Bestrahlung mit dem TRIGA Mark-II Reaktor

4.1 Versuchsaufbau

Die Bestrahlungen wurden am TRIGA Mark-II Reaktor im Trockenbestrahlungsraum bei unterschiedlichen Leistungen vorgenommen (siehe Abbildung 4-1 ; Irradiation Room).

Mittels eines kleinen Aufzuges wurde immer ein Detektor von der Plattform in dem Neutronenstrahl befördert und nach 30 Sekunden wieder hinauf transportiert.

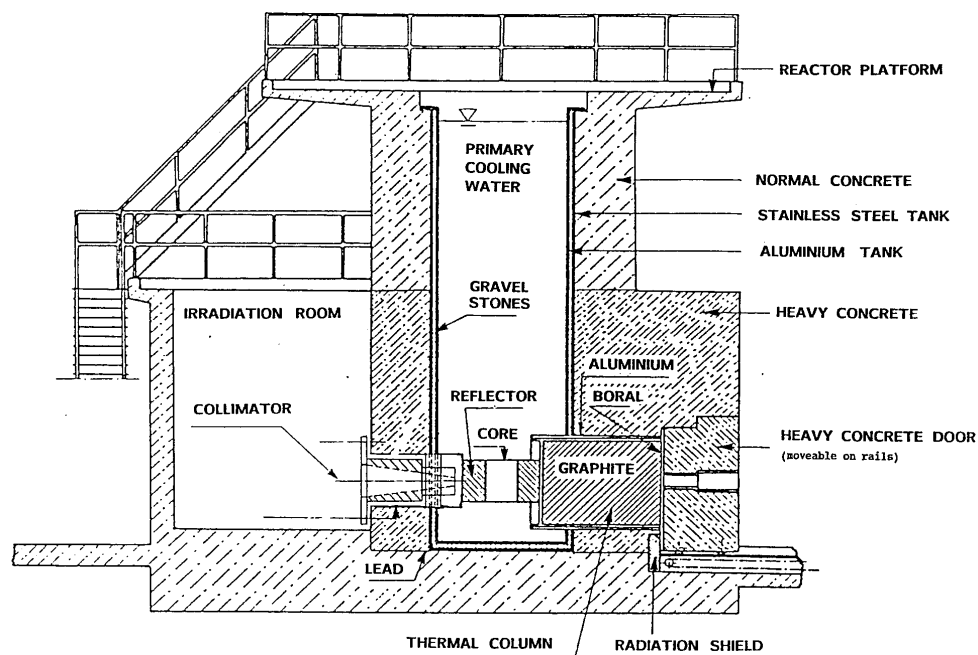


Abbildung 4-1 cross section of the TRIGA Mark-II reactor at the Atomic Institute of the Austrian Universities [Villa, M. Private communication (2001)]

Im Trockenbestrahlungsraum liegt folgendes Spektrum vor:

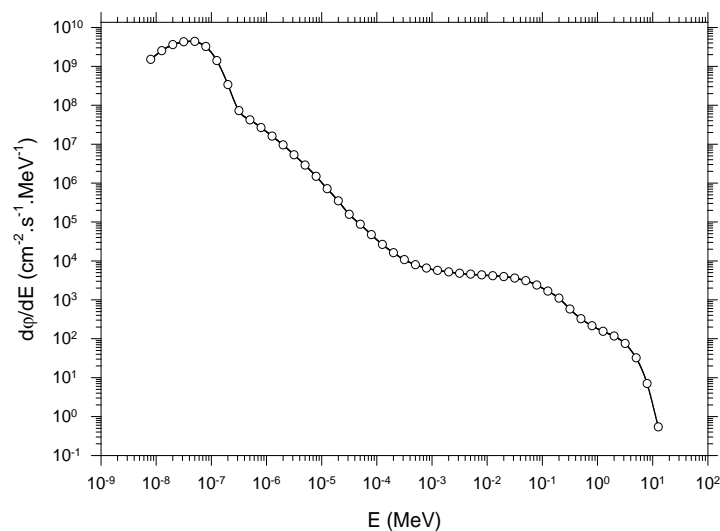


Abbildung 4-2 Differential neutron spectrum measured at the neutron radiography station in the irradiation room of the TRIGA Mark-II research reactor with open cadmium-shutter

4.2 Ergebnis

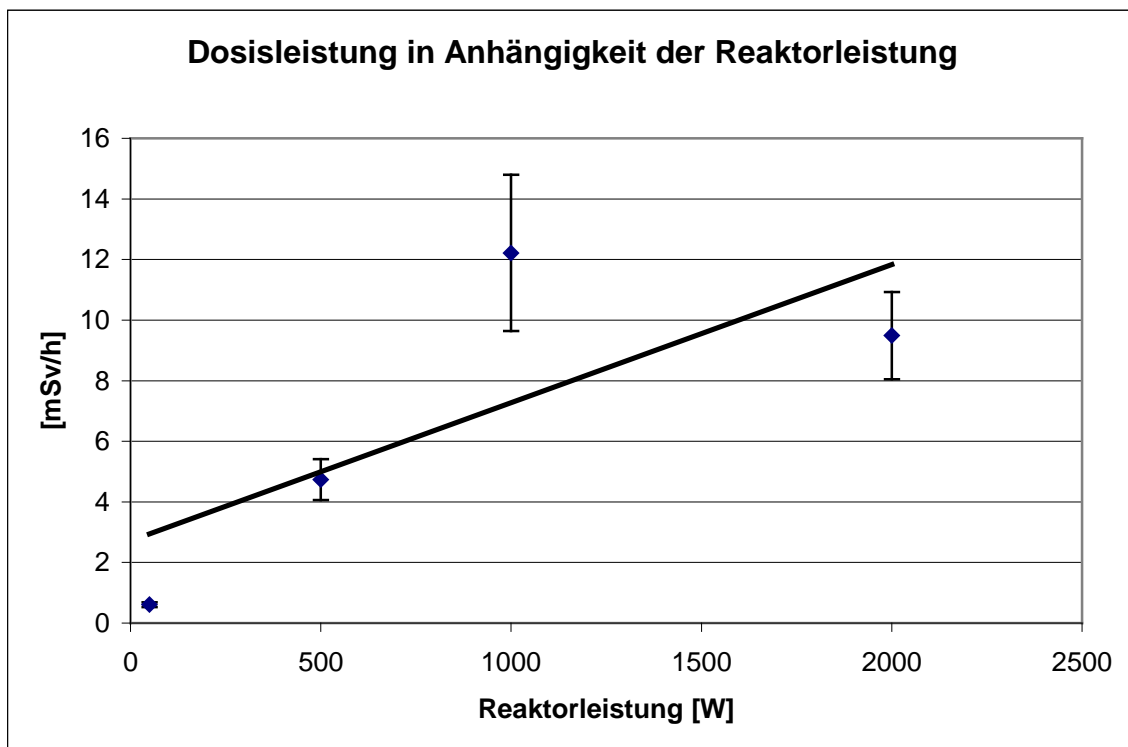
Die Ergebnisse wurden auf eine Temperatur von 20°C zurück gerechnet (siehe Abbildung 2-1) da es in der Reaktorhalle 23 °C hatte.

Dosimeter Nr.	Mittelw.	Stabw. (+/-)	Reaktorl. [W]	Zeit [s]	gezählte B.	Ergebnis	
	[Bubbles/ μSv]					mSv/h	Stabw. (+/-)
236067	2.8	0.36	50	30	2	0.61	0.08
236054	3.1	0.44	500	30	14	4.73	0.67
236111	2.8	0.59	1000	30	40	12.22	2.57
236163	2.9	0.44	2000	30	30	9.49	1.44
237814	0.9	0.31	250000	3	500	490.91	169.09

Auffällig ist, dass die gemessene Dosisleistung bei 1kW größer ist als bei 2 kW, dies kann aber durch statistische Effekte erklärt werden, der Neutronenfuß nimmt nämlich eigentlich mit der Reaktorleistung linear zu.

Bei einer Leistung von 250kW sind die gezählten Bubbles nur ein Schätzwert, da man nur bis zirka 50 Bubbles gut mit dem Auge auszählen kann.

Zusätzlich wurden zu Versuchsanfang noch Messungen mit 5 Watt Leistung (30 Sekunden) durchgeführt, dabei zeigten sich keine Bubbles.



Wie schon zuvor erwähnt sind die Abweichungen bei 1kW/2kW durch statistische Effekte bei der Neutronendetektion im Detektor zu erklären. Die schwarze Gerade zeigt die angenäherte Dosisleistungszunahme bei höherer Reaktorleistung.

5 Zusammenfassung

Bubble-Detektoren sind gut zur Personendosimetrie bei Neutronenstrahlung zu verwenden, da sie sehr einfach in der Handhabung sind und zudem eine zu vergleichbaren Systemen hohe Genauigkeit haben. Sie arbeiten mit einer ungefähren Genauigkeit von $\pm 20\%$.

Bei der Kalibrierung der Detektoren wurde festgestellt, dass die Empfindlichkeiten oft recht deutlich von den Herstellerangaben abweichen, demnach sollte man vor dem Einsatz dieses Detektortyps eine Überprüfung der Kalibrierung im Feld einer bekannten Neutronenquelle durchführen.

Weiters ist zu beachten, dass es, wie der Hersteller auch schon angibt, bei geringen Bubble-Anzahlen zu noch größeren Ungenauigkeiten kommen kann. Dieser Effekt machte sich auch bei dem Versuch am TRIGA Mark II Reaktor bemerkbar und führte zu erheblichen Abweichungen.

Sollte eine höhere Genauigkeit erwünscht sein, sollte man ein automatisches Auslesegerät anschaffen, da dieses mehr als 50 Bubbles zählen kann und damit bessere Messergebnisse möglich wären.

6 Projektmanagement und Kostenabschätzung

6.1 Zeitlicher Ablauf

Der Zeitplan wird mittels Aufgabengliederung und einzelner Arbeitspakete (AP) erstellt.

Projektanfang: 19.2.2007

Projektende: 30.3.2007

6.1.1 Arbeitspakete und Ablauf

AP 1: Definition einer Kalibrierungs-Geometrie

AP 2: Literaturstudium

AP 3: Erstkalibrierung der Bubbledetektoren

AP 4: Bestrahlung im Trockenbestrahlungsraum des TRIGA Mark-II Reaktors

AP 5: Dokumentation und Verfassen eines Endberichtes

Die Einteilung erfolgt nach Kalenderwochen des Jahres 2007.

	Woche 8	Woche 9	Woche 10	Woche 11	Woche 12	Woche 13
AP 1						
AP 2						
AP 3						
AP 4						
AP 5						

6.2 Kostenabschätzung

Die Personalkostensätze wurden aus der Tabelle des Wissenschaftsfonds (Stand: Dezember 2006), Kosten für Dosimeter, Zoll- und Einfuhrabgaben wurden aus den zugehörigen Rechnungen entnommen.

Beschreibung	Betrag
10 Stück Bubbledetektoren inkl. Versand und Zoll	€ 1.333,00
160 Mannstunden technischer Assistent	€ 1.536,00
35 Mannstunden Postdoc	€ 600,00
15% Institutsabgabe	€ 560,00
	<u>€ 4.029,00</u>

7 Anhang

7.1 *Abbildungsverzeichnis*

Abbildung 2-1 Temperature response curves of the BD-100R and BD-PND detector types [Ing, H. Neutron Measurements Using Bubble Detectors – Terrestrial and Space. Radiat. Meas. 33(3), 275-286 (2001)]	5
Abbildung 2-2 Energy response of the BD-100R/BD-PND type bubble detectors [Ing, H. Neutron Measurements Using Bubble Detectors – Terrestrial and Space. Radiat. Meas. 33(3), 275-286 (2001)].....	5
Abbildung 3-1 Bubble-Detektor mit Schutzhülle	7
Abbildung 3-2 Anleitung Detektor	7
Abbildung 3-3 Versuchsaufbau.....	8
Abbildung 3-4 Detektor mit Bubbles	8
Abbildung 4-1 cross section of the TRIGA Mark-II reactor at the Atomic Institute of the Austrian Universities [Villa, M. Private communication (2001)].....	11
Abbildung 4-2 Differential neutron spectrum measured at the neutron radiography station in the irradiation room of the TRIGA Mark-II research reactor with open cadmium-shutter ($P_{th} = 1 \text{ kW}_{th}$) [Hajek, M. Applied Neutron Spectrometry. PhD Thesis, Vienna University of Technology (2002)]	11

7.2 *Referenzen*

Francesco d'Errico; Radiation dosimetry and spectrometry with superheated emulsions (May 2001); Department of Therapeutic Radiology, Yale University School of Medicine, 333 Cedar St. HRT-219, New Haven, CT 06510, USA

H. Ing, R. A. Noulty and T. D. McLean; Bubble Detectors-A Maturing Technology (November 1996); Bubble Technology Industries Inc., Highway 17, Chalk River, Ontario, Canada

S. G. Vaijapurkar and R. T. Paturkar; Superheated Liquid Neutron Sensor Based on Polymer Matrix (February 1995); Defence Labortory, Ratanada, Jodhpur-342011, India

<http://de.wikipedia.org/wiki/Neutron>

<http://www.kernenergie-wissen.de/neutronenstrahlung.html>

<http://www.lrst.rwth-aachen.de/vorlesungen.php/de/strahlenschutz>

http://www.kworkquark.net/lexikon/blaskammer/wissensdurst3_text.html