

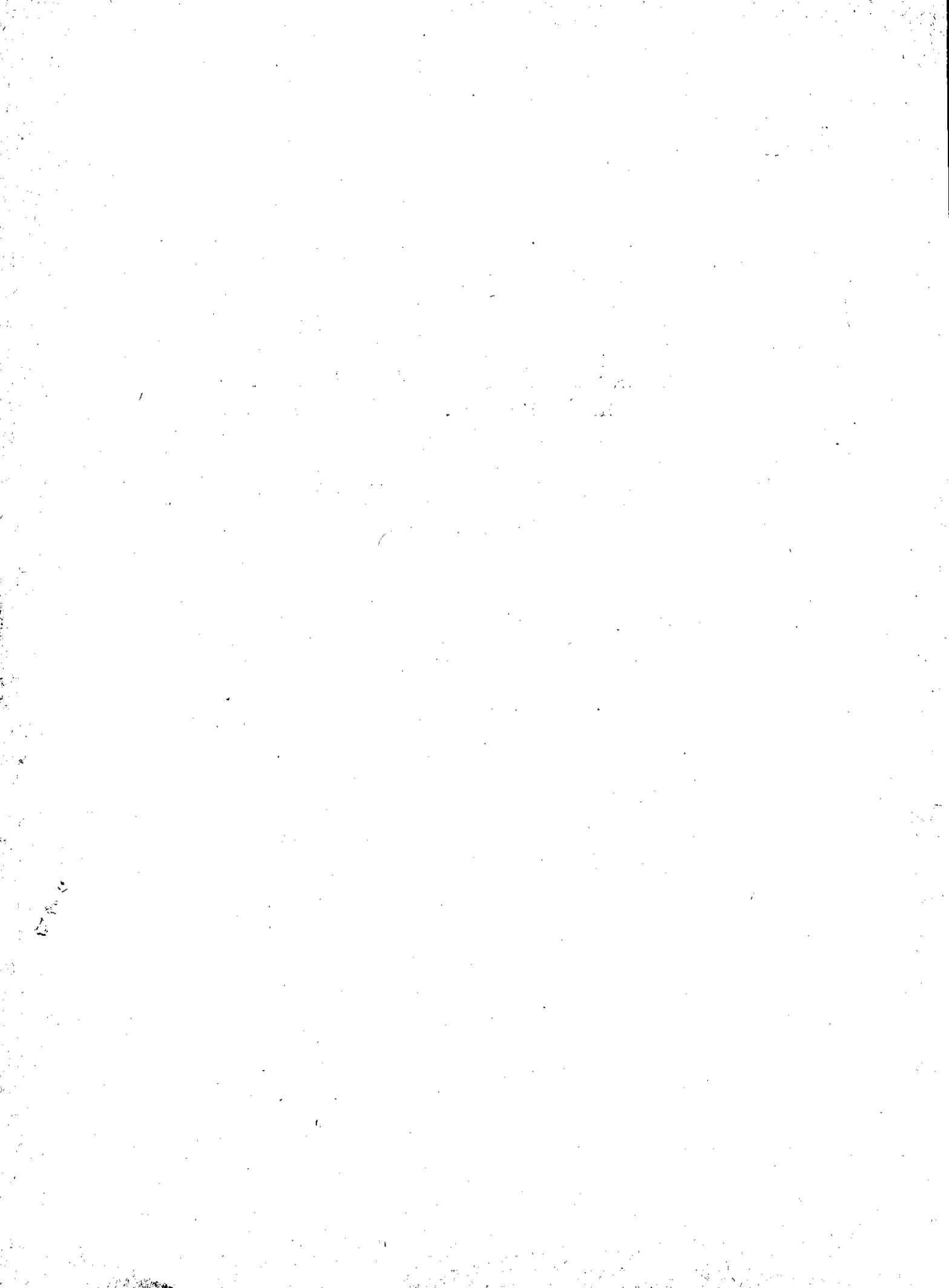
Interner Bericht  
DESY D3/17  
November 1974

**DESY-Bibliothek**  
7. FEB. 1975

Neutronendosimetrie mit Festkörperdosimetern -  
Vergleich verschiedener Meßverfahren

von

K. Amsinck



Interner Bericht

DESY D3/17

November 1974

Neutronendosimetrie mit Festkörperdosimetern - Vergleich  
verschiedener Meßverfahren

von

K. Amsinck

Zusammenfassung:

Zur Anwendung am Elektronenbeschleuniger werden drei Verfahren der Neutronendosimetrie mit Festkörperdosimetern überprüft: Kernspurfilm, Moderatoren mit Aktivierungs-sonde (Tantal) und Moderatoren mit Thermolumineszenzdosimetern. Die Bestimmung der Eichkonstanten sowie Vor- und Nachteile werden diskutiert und das letztgenannte Meßverfahren zum künftigen Gebrauch bei DESY ausgewählt.

## Inhalt:

1. Einleitung
  
2. Kernspurfilm als Dosimeter
  - 2.1 Methode
  - 2.2 Eichung
  - 2.3 Fehler
  - 2.4 Kleinste nachweisbare Dosis
  
3. Moderator dosimeter: Tantal-Detektor
  - 3.1 Der Moderator
  - 3.2 Meßmethode
  - 3.3 Meßapparatur
  - 3.4 Eichung
  - 3.5 Kleinste nachweisbare Dosis
  
4. Moderator dosimeter:  $^6\text{LiF}$  /  $^7\text{LiF}$ -Detektor
  - 4.1 Meßmethode
  - 4.2 Eichung
  - 4.3 Kleinste nachweisbare Dosis
  
5. Vergleich der Meßmethoden

## 1. Einleitung

Am Elektronenbeschleuniger rührt die Dosis in zugänglichen Gebieten vor allem von der elektromagnetischen Strahlungskomponente her. Die Strahlungsüberwachung wird mit Ionisationskammern durchgeführt. Bei Verwendung der Ionisationskammern mit Wasserstofffüllung ist eine Überwachung der zusätzlich auftretenden Neutronenkomponente möglich. Jedoch sind die Kammern selbst bei reiner Wasserstofffüllung bezüglich der Neutronenkomponente nicht rem-äquivalent und außerdem relativ unempfindlich. Da die Neutronenkomponente am Elektronenbeschleuniger keine große Rolle spielt, beschränkt man sich auf die Registrierung durch Festkörperdosimeter, und mißt die elektromagnetische Komponente mit den empfindlichen Argonkammern. Ein Strahlungsalarm durch eine zu hohe Neutronendosis ist damit nicht möglich.

Festkörperdosimeter sind im allgemeinen einfache Geräte. Sie sind leicht zu duplizieren, und es ergeben sich bezüglich des duty-cycle (z.B. einmaliger Puls am Speicherring) keine Probleme.

Die genaue Bestimmung der Neutronendosis ist immer schwierig, da die Methode stark vom jeweiligen anzutreffenden Spektrum abhängig ist. Man wird stets mit Fehlern bis zu 50% rechnen müssen. Auch die hier zu beschreibenden Methoden sind nicht genauer.

Die Gegenüberstellung dreier näher untersuchter Methoden, nämlich die Neutronendosimetrie durch kernspurfilm, durch Moderatoren mit Tantal-detektor, und durch Moderatoren mit TLD-(Thermolumineszenz-Dosimeter)-Detektoren, soll nun Aufschluß darüber geben, welche die bessere ist, und künftig bei DESY eingesetzt werden soll.

## 2. Kernspurfilm als Dosimeter

### 2.1 Methode

Der Nachweis von Neutronen durch Kernspurfilm ist die älteste Methode. Sie ist gleichzeitig bis heute die einzige Meßmethode, die in der Personendosimetrie Anwendung findet. (Lit.1)

Schnelle Neutronen lassen sich in der photographischen Emulsion über die elastische Streuung an Wasserstoffkernen nachweisen. Die Rückstoßprotonen ionisieren längs ihres Weges und erzeugen innerhalb der Emulsion ein latentes Bild, welches nach dem Entwickeln als Kernspur sichtbar wird.

Die Länge der Kernspur ist gleichzeitig eine Funktion des Streuwinkels und der Energie der Neutronen. Die Spurenlänge soll uns hier bei der routinemäßigen Auswertung der Filme nicht weiter interessieren. Von Interesse sind nur die Anzahl der Spuren pro Gesichtsfeld.

Aus der Spurendichte kann über einen noch zu diskutierenden Eichfaktor, ermittelt aus einem ähnlichen aber bekannten Spektrum, auf die Fluenz und die Äquivalentdosis der schnellen Neutronen geschlossen werden. Als Spurendichte ist nach Vereinbarung immer die Anzahl der unter dem Mikroskop gezählten Spuren pro 75 Gesichtsfelder (G.F.) gemeint.

Es sei noch zu erwähnen, daß bei dieser Methode die gleichen Kernspurfilm verwendet werden, die auch bei der Personendosimetrie in den Plaketten enthalten sind. Der Preis für einen vakuumverpackten Kernspurfilm beträgt z.Zeit DM 2.50.

### 2.2 Eichung

Über eine experimentelle Eichung mit Neutronen bekannter Energieverteilung kann einer Neutronenfluenz eine bestimmte Kernspurdichte zugeordnet werden (Eichfaktor). Voraussetzung für eine Eichung ist demnach ein geeignetes

Neutronenfeld, das dem am Beschleuniger anzutreffenden Riesenresonanzspektrum ähnlich ist (Abb.1, siehe Lit.2). Hierzu eignet sich das Neutronenspektrum einer AmBe-Quelle, das ebenfalls in Abb.1 eingezeichnet ist (Lit.3). AmBe hat ein Spektrum, das, wie die Riesenresonanzneutronen, im MeV-Bereich liegt. Die mittlere Energie, bezogen auf die Dosis, beträgt nach Nachtigall (Lit.11) 4,7 MeV, die der Riesenresonanzneutronen 3,5 MeV.

In der Umgebung des Elektronenbeschleunigers kann das Neutronenspektrum sehr unterschiedlich sein. Tatsächlich sind in den meisten Fällen ganz andere Energieverteilungen vorherrschend. Durch eine Abschirmung der Neutronenquelle sowie durch Rückstreuung der Neutronen an den Wänden und der Luft wird außerdem der Energiebereich des ursprünglichen Spektrums verändert. Daher haben wir den Eichfaktor für verschiedene Neutronenfelder bestimmt.

Bei der Bestrahlung mit AmBe-Neutronen (AmBe-Quelle, Ausbeute:  $10^6$  n/s), wurde ein Ort gewählt, der möglichst weit entfernt vom Beschleuniger liegt und den Neutronen eine möglichst geringe Rückstreuung durch Boden und Wände möglich macht. Diese Bedingungen sind im Tragluftzelt hinreichend erfüllt. Die Eichung wurde dort über dem Boden auf einer Galerie durchgeführt. Die Filme wurden 2 Wochen bestrahlt, so daß ca. 2 Spuren/G.F. (1 G.F. =  $20,1 \mu\text{m}^2$  bei  $10^3$ -facher Vergrößerung) zu rechnen war. Zur Vermeidung des lästigen Gamma-Untergrundes wurde die Quelle mit 4 mm Blei abgeschirmt.

Das Ergebnis des Bestrahlungsversuches mit AmBe-Neutronen ergab für 1 Spur pro 75 G.F. =  $6,9 \pm 0,2$  mrem und stimmt mit dem bisher bei D3 verwendeten Eichfaktor von  $6,3 \pm 0,3$  mrem für 1 Spur pro 75 G.F. gut überein. Hierbei verwendeten wir einen Fluenz-Dosis-Umrechnungsfaktor von  $1 \text{ mrem/h} = 7,82 \text{ n/cm}^2 \text{ s}$  für AmBe-Neutronen (Lit.11).

Außer einer Eichung mit einer AmBe-Quelle wurden mehrere Bestrahlungen an verschiedenen Orten in der nächsten Umgebung des Beschleunigers durchgeführt (s. dazu auch Abb.2) Zur Bestimmung der Dosis wurde ein Neutronen-

meßgerät vom Typ AE 2202(Lit.4), verwendet. Der Moderator des Neutronenmeßgerätes, an dessen Außenseite jeweils 5 Filme angebracht waren, diente gleichzeitig als Phantom.

Die Ergebnisse der Bestrahlungsversuche sind in der Tabelle 1 zusammengestellt. Auf den ersten Blick ist zwischen den einzelnen Meßergebnissen kein Zusammenhang ersichtlich.

Neutronenquelle	Bestrahlungsort	Spuren (75G.F.)mrem	mrem(75G.F.) Spuren
AmBe	Tragluftzelt	0,144	6,9
Beschleunigerneutronen	Pos.1 5cm Bleiabschirmung	0,084	11,8
	Pos.2 " "	0,072	13,7
	Pos.3 20cm Schwerbeton	0,204	4,9
	Pos.4 (Ringdecke)	0,476	2,1
	Pos.5 (Ladeluke) } Halle 2	0,500	2,0
Neutronen von Hallenexperiment	Pos.6 (über Gebiet Str.24)	0,107	9,3

Tabelle1: Experimentell gefundene Eichkonstanten für AmBe-Neutronen, Neutronen aus dem Beschleunigerraum und Neutronen aus den Experimentierhallen. Positionen 1 bis 3 sind in Abb.2 eingezeichnet

Fassen wir die gefundenen Eichwerte unter einem anderen Gesichtspunkt zusammen, z.B. unter der Berücksichtigung der Abschirmwände, die die Neutronen bis zum Bestrahlungsort durchdringen müssen, so ergibt sich bei zunehmender Abschirmung zwischen Quelle und Bestrahlungsort eine wachsende Empfindlichkeit (s. Tabelle2).

Gehen wir davon aus, daß die mittlere Energie der Neutronen im Beschleunigerraum bei 0,5 bis 1 MeV liegt, so bleibt ein großer Neutronenanteil unberücksichtigt, weil die untere Nachweisgrenze des bestrahlten Kernspurfilmes bei diesem Wert liegt.(s. Kap.2.4). Durch Rückstreuung der

Abschirmung		Spuren (75 G.F.) mrem		
		Neutr. im Ring	Neutr. in den Experimentierhallen	AmBe-Quelle
Keine Abschirmung	Pos. 1 2	0,078		
" "	Pos. 6		0,107	
" "				0,144
20 cm Schwerbeton	Pos. 3	0,204		
ca. 1m Schwerbeton	Pos. 4+5	0,488		

Tabelle 2: Nach Ordnen der Empfindlichkeitswerte nach zunehmender Abschirmung ist eine Zunahme der Empfindlichkeit des Kernspurfilmes erkennbar.

Neutronen an den Betonwänden im Beschleunigerraum wird dieser Effekt noch verstärkt, da sich die Energieverteilung noch weiter nach kleineren Energien verschiebt. Eine zu kleineren Energien steigende Empfindlichkeit des Kernspurfilmes wegen des steigenden Streuwirkungsquerschnittes vermag den Schwelleffekt nicht zu kompensieren. Offenbar wird der niederenergetische Anteil der Neutronen durch die Abschirmung weggefiltert.

Zur Abschätzung dieser Annahme wurden zusätzlich 100 Protonenspuren einer Filmgruppe pro Bestrahlungstyp auf deren projizierte Länge untersucht. Durch Aufteilung der ausgemessenen Spurenängen in mehrere Gruppen ergaben sich die in Abb. 5 abgebildeten Kurven, die die Annahme bestätigen.

Eine Festlegung der Eichkonstanten ist deshalb ein Kompromiß. Für die Ortsdosisbestimmung sollte deshalb der Mittelwert der gefundenen Eichwerte als Eichkonstante benutzt werden. Der Einfachheit halber ist die Eichkonstante von AmBe-Neutronen zu verwenden, da diese kaum merklich vom Mittelwert abweicht. Andere Autoren (Lit. 5) verwenden den gleichen Wert.

Da bei der Ortsdosisbestimmung die Neutronen in den Experimentierhallen die wohl wichtigste Komponente darstellen, denn die meisten Personen halten sich dort auf, kann mit guter Näherung bezüglich der unterschiedlichen Neutronenspektren eine Genauigkeit der Meßmethode von  $\pm 50\%$  angenommen werden.

### 2.3 Fehler

Zur Auswertung der Kernspurfilmse sei zu erwähnen, daß der beim Auszählen der Protonenspuren unvermeidliche Fehler von ca. 5% gegenüber der Ungenauigkeit der Meßmethode zu vernachlässigen ist. Bei Auszählen der Protonenspuren durch verschiedene Personen ist jedoch ein Fehler von 15% möglich, da die Entscheidung, ob eine Anhäufung von geschwärzten Stellen eine kleine Spur darstellt, individuell verschieden ist.

Da die Kernspurfilmse normalerweise etwa einen Monat bei unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen bis 70% relativer Luftfeuchtigkeit im Gelände und in den Hallen gelagert werden, wurde die wichtige Beziehung zwischen Latentbildschwund (Fading) und Luftfeuchtigkeit näher untersucht.

Vakuumverpackte Filme, wie sie auch bei den Plaketten verwendet werden, wurden zunächst mit Neutronen einer AmBe-Quelle bestrahlt. Ein Film wurde sofort nach Bestrahlungsende entwickelt. Die übrigen Filme wurden in Exikatoren über ausgeheizten Kieselgel (trockene Luft) und gesättigter Kochsalzlösung (75% relative Luftfeuchtigkeit) bei Zimmertemperatur gelagert und zu unterschiedlichen Zeiten unter konstanten Bedingungen entwickelt. Dabei ergab sich, wie Abb.4 zeigt, eine Kernspurabnahme, die in beiden Fällen keinen linearen Verlauf zeigt; die Abnahme der zählbaren Spuren nimmt zunächst langsamer, dann schneller zu, weil die Spuren der dicht ionisierenden Protonen auch bei Abnahme der Korndichte in der Spur zunächst noch erkennbar bleiben, bis sie beim Erreichen eines Grenzwertes schnell unter die Erkennbarkeitsschwelle absinken. Die Funktion wird dadurch unlinear.

Offensichtlich kann der durch Fadingeinflüsse bedingte Fehler trotz der in polyäthylen eingeschweißten Filme beträchtlich sein. Bei trockener Luft sind nach etwa 4 Wochen nur noch 50% der ursprünglich vorhandenen Spuren erkennbar. Bei 75% relativer Luftfeuchtigkeit ist der Latentbildschwund allerdings größer als bei trockener Luft. Man sieht hier deutlich, daß die äußere Luftfeuchtigkeit bei den eingeschweißten Filmen einen kaum merklichen Einfluß auf das Fading hat.

entfernt man jedoch die Verpackung des vorher bestrahlten Filmes und setzt ihn einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75% aus, wie das in einem weiteren Versuch geschehen ist, so ergab sich nach einer Woche Lagerzeit ein Latentbildschwund von 100%. Ähnliche Untersuchungen wurden von anderen Autoren (Lit.6) durchgeführt. Sie kamen zu denselben Ergebnissen.

Eine Verringerung des Latentbildschwundes läßt sich jedoch durch längeres Entwickeln erreichen. Untersucht wurde dieser Effekt (s. Tabelle 3) an Filmen, bei denen gleich ein Film nach der Bestrahlung mit AmBe-Neutronen entwickelt wurde, der restliche Teil jedoch 4 Wochen bis zur Entwicklung bei 75% relativer Luftfeuchtigkeit gelagert wurde.

Entwicklungszeit in min.	5	7,5	10	12,5	15
Lagerzeit bei 75% rel. Feuchte in Wochen	Spuren pro G.F.				
0	5,75 100%	6,20 108%	6,24 109%	5,90 102%	5,64 98%
4	3,01 52%	3,06 53%	4,44 77%	4,58 80%	3,97 69%

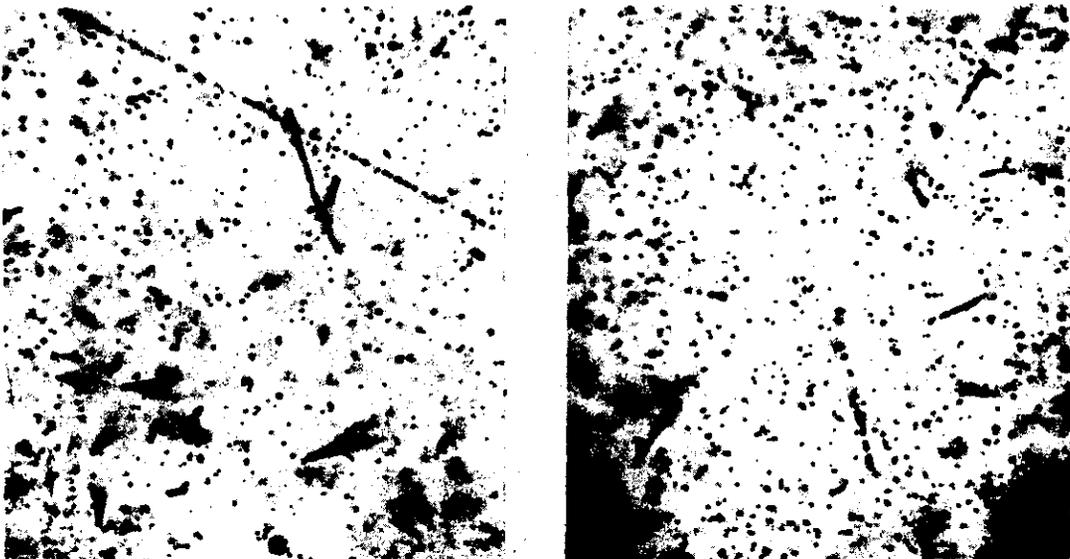
Tabelle 3: Spurendichte als Funktion des Fadingeffektes und der Entwicklungszeit (Lit.7).

Wie aus der Tabelle 3 zu entnehmen ist, betragen die jeweiligen Entwicklungszeiten 5; 7,5; 10; 12,5 und 15 Minuten. Bei sofortiger Entwicklung (keine Lagerzeit) ergibt sich bei einer längeren Entwicklungszeit innerhalb der Fehler keine Verbesserung der Empfindlichkeit. Bei einer Lagerzeit von 4 Wochen und einem Fading von ca. 50% der ursprünglich vorhandenen Spuren pro Gesichtsfeld ist eine Verlängerung der Entwicklungszeit auf 10 bis 12,5 Minuten durchaus sinnvoll.

Zur routinemäßigen Auswertung der Kernspurfilme soll die Entwicklungszeit deshalb 10 Minuten betragen.

#### 2.4 Kleinste nachweisbare Dosis

Als kleinste noch nachweisbare Dosis ist die resultierende Dosis aus der doppelten Standardabweichung  $2\sigma$  des Untergrundes einer Meßreihe gemeint. Sie ergab für 100 ausgezählte Kernspurfilme bei üblicher Lagerung (Lagerzeit im Mittel 2 Monate) 15 mrem.



Filmschwärzung, hervorgerufen durch Röntgenstrahlung

Da der Film eine gleichzeitige Gammaempfindlichkeit aufweist, welches sich in der Praxis immer als sogenannter Untergrund bez. Schleier einzelner Silberkörner bemerkbar macht, kann aus statistischen Gründen eine zufällige Dreikornspur vorgetäuscht werden. Bei normalem Untergrund ist es daher zweckmäßig nur vier oder mehr aufeinander folgende Silberkörner als Spur zu kennzeichnen. Das entspricht im Mittel einer Neutronenenergie von 0,5 MeV (Lit.8). Die oberen Abbildungen zeigen einen mit Neutronen bestrahlten Film, der zusätzlich mit  $\text{Am}^{241}$  (vorwiegend 60 keV) und mit  $\text{Ra}^{226}$  bestrahlt wurde. Der Rückgang in der Erkennbarkeit der Spuren ist in Tabelle 4 tabelliert. Die starke Schwärzung durch niederenergetische Photonen rührt von dem im Vergleich zu Gewebe sehr hohen Wirkungsquerschnitt für den Photoeffekt bei Silber und Jod her.

Die oben angegebene kleinste nachweisbare Neutronendosis von 15 mrem gilt also nur bei kleinen Gammadosen.

Dosis (rem)	60 keV-Strahlung ( $\text{Am}^{241}$ )	$\text{Ra}^{226}$ - $\gamma$ -Strahlung
0,1	Leicht geschwärzt, Spuren noch gut sichtbar.	
0,2	Stark geschwärzt, nur noch deutliche Spuren sichtbar.	
0,35	Kaum noch Spuren sichtbar.	
1,5		Leicht geschwärzt, kein Einfluß auf Spurenerkennbarkeit.
4		Stark geschwärzt, Spuren schwer erkennbar.
6		Nur noch kräftige Spuren erkennbar.

Tabelle 4: Abhängigkeit der Erkennbarkeit der Spuren von der Gamma-Dosis bei verschiedenen Gammaenergien.

### 3. Moderator dosimeter: Tantal-Detektor

#### 3.1 Der Moderator

In ungerichteten Strahlungsfeldern benutzt man Detektoren, die keine Richtungsabhängigkeit zeigen. Das ist bei einem Meßverfahren der Fall, bei dem ein  ${}^6\text{LiJ}$ -Kristall mit Moderator kugeln verschiedenen Durchmessers aus Polyäthylen benutzt wird (Bonner-Kugeln, Lit.9). Bekanntlich hat keine Kugel ein richtiges rem- bzw. körperäquivalentes Verhalten. Es müssen daher mehrere Kugeln miteinander kombiniert werden. Bei geeigneter Dimensionierung des Moderator materials und speziell gestalteter Zusatzabsorber kann man aber auch erreichen, daß die Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Neutronenenergie angenähert umgekehrt proportional zu der Flußdichte ist, die eine gegebene Äquivalentdosisleistung ergibt. Man kommt dann mit einem Moderator aus (Lit.10).

Zur Ortsdosisüberwachung sind mehrere Moderatoren sehr unbequem und speziell gestaltete Moderatoren zu teuer. Wir begnügen uns daher mit einer Kugel, die im bekannten Neutronenspektrum einer AmBe-Quelle, das ähnlich dem wirklich vorkommenden Spektrum angesehen werden kann (s.Kap.2), geschieht wird.

Der verwendete Moderator ist aus Paraffin, umkleidet mit Kadmiublech, hat Zylinderform mit den Abmessungen  $15 \times 20 \text{ cm}^3$ , in dessen Mitte der Tantal-Detektor ( ${}^{181}\text{Ta}$ -Blech;  $4 \times 4 \times 0,1 \text{ cm}^3$ ) hineingelegt wird.

#### 3.2 Meßmethode

Als integrierende Detektoren sind Aktivierungs sonden üblich, deren Resonanzenergie im thermischen Bereich liegt. Werden diese, umgeben mit einem Moderator, einem schnellen Neutronenfeld ausgesetzt, so werden diese aktiviert. Der Aktivierungsprozeß ist eine  $(n, \gamma)$ -Reaktion. wir verwenden hier Tantal:  ${}^{181}\text{Ta}(n, \gamma){}^{182}\text{Ta}$ , gemessen wird die Gamma-Strahlung, s. Abb.5.

Die Halbwertszeit beträgt 115 Tage und war maßgebend für die Auswahl des Detektors. Sie ist groß genug, um eine Bestrahlungsperiode von mindestens 4 Wochen zu gestatten, ohne daß sich eine Abnahme der Information merklich auswirken könnte. Der Preis eines Tantalbleches beträgt zur Zeit ca. DM 15.-.

wenn bei einer Aktivierungssonde die Aktivierungszeit klein ist gegenüber der Halbwertszeit, erhält man aus der Aktivität die Neutronenfluenz und daraus, bei gegebener Neutronenenergie, die Dosis. In unserem Fall ist die Energie nicht bekannt, außerdem können wir den Einfluß des Moderators nicht berechnen. Es ist daher eine Eichkonstante zu bestimmen. Dann erhält man die Dosis aus

$$D = C (n - U) \frac{1}{t_m} \lambda t_1 \frac{e^{\lambda t_2}}{1 - e^{-\lambda t_1}} \quad (\text{rem})$$

$n$  ( $\text{min}^{-1}$ ) = Impulsrate

$U$  ( $\text{min}^{-1}$ ) = Untergrund

$C$  (rem min) = Eichkonstante

$t_m$  (min) = Meßzeit

$t_1$  (min) = Bestrahlungszeit am Aktivierungsort

$t_2$  (min) = Wartezeit zwischen Aktivierung und Auswertung

Eine Ermittlung der Eichkonstanten  $C$  in rem min erfolgt experimentell über Bestrahlungsversuche mit Neutronen aus einer AmBe-Quelle.

### 3.3 Meßapparatur

Die Wahl des zu verwendenden Nachweisgerätes wird durch die zu erwartende Aktivität  $A(t_2)$  der bestrahlten Sonde bestimmt. Da wir es vorwiegend mit kleinen Aktivitäten in der Größenordnung von ca. 30 bis 1500 Imp/min. zu tun haben, muß die Empfindlichkeit des Nachweisgerätes möglichst groß sein.

Die eigens für diesen Zweck konstruierte Meßapparatur (s. Abb. 6), besteht im wesentlichen aus 2 sich gegenüberstehenden Szintillationszählern, NaJ-Kristalle mit den Abmessungen 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub> in x 2 in, in deren Mitte das Tantalblech

geschoben wird, einer Abschirmung aus 16 cm Stahl und einem Antikoinzidenzzähler zur Reduzierung der zusätzlich einwirkenden kosmischen Strahlung.

Die Wahl der Kristallgröße von 2<sup>1/2</sup> in x 2 in, ergibt, abgesehen von einer möglichst guten Abschirmung des Detektors, ein Maximum des Verhältnisses von Empfindlichkeit zu Untergrund bei der obengenannten Größe des Tantalbleches. Die Empfindlichkeit der NaJ-Kristalle wurden aus Lit.12 entnommen.

Vergleichsmessungen mit einer vorhandenen Meßanlage bestückt mit einem 3<sup>1/2</sup> in x 3 in NaJ-Kristall, ergaben für die Eichkonstante zufällig den gleichen Wert (s. Kap.3.4). Eine Verbesserung der Empfindlichkeit war also mit der neuen Apparatur nicht erreicht worden. Es konnte jedoch der Nulleffekt um 30% reduziert werden.

Eine weitere Vergleichsmessung bestand durch die Möglichkeit, aktivierte Tantalbleche mit Hilfe eines 60 cm<sup>3</sup> großen Ge(Li)-Detektors auszumessen. Das mit diesem hochauflösenden Detektor gemessene Spektrum zeigt Abb.7. Obwohl man die 4 stärksten peaks klar vom Untergrund trennen kann, erhält man wegen der viel geringeren Empfindlichkeit des Ge(Li)-Detektors eine kleinste nachweisbare Neutronendosis, die erheblich höher liegt als bei der oben beschriebenen Apparatur.

### 3.4 Eichung

Zunächst wurde eine Eichung mit einer AmBe-Quelle durchgeführt. Die Aktivierung wurde wegen geringer Rückstreuung im Tragluftzelt durchgeführt. Die Eichkonstante ergab einen Wert von  $C \approx 0,094$  rem min. Rechnet man diesen Eichwert mit Hilfe der durch den Moderator gegebenen Empfindlichkeitskurve (Lit.13) von der mittleren Energie der AmBe-Quelle auf etwa 0,5 MeV (mittlere Energie der Neutronen im Beschleuniger (s.Kap.2.2)) um, so erhält man eine Eichkonstante von  $C_1 = 0,037$  rem min.

Die als nächstes mit gleichem Detektor durchgeführten Eichungen mit Neutronen im Synchrotron ergaben für das angetroffene Spektrum im Bereich thermischer Energie bis etwa 10 MeV eine Eichkonstante von  $C_2 = 0,018$  rem min. Es wurden insgesamt 3 Versuche am selben Ort durchgeführt, die Dosis wurde mit einem Rem-Counter vom Typ AE 2202 gemessen. Die Dosisleistung während der Aktivierung war annähernd konstant. Sie betrug im Mittel ca. 50 mrem/h und wurde durch einen Zeitschreiber registriert.

Ahnliche Messungen wurden von Tesch (Lit.14) durchgeführt. Die für den Beschleunigerraum geltende Eichkonstante von  $C_3 = 0,048$  rem min wurde jedoch durch einen Vergleich mit einem anderen Gerät ( mit Moderator nach Leake (Lit.10)) gefunden.

Die starke Streuung dieser Ergebnisse resultiert aus der ungenauen Kenntnis des Neutronenspektrums und der unterschiedlichen Energieabhängigkeit der Vergleichsinstrumente. Bildet man der Einfachheit halber den Mittelwert aus den experimentell ermittelten Eichfaktoren  $C_1$ ,  $C_2$  und  $C_3$ , so kommt dieser der AmBe-Eichung am nächsten. Bei Verwendung eines Eichwertes von  $C = 0,03$  rem min dürfte daher die Dosismessung bis auf den Faktor 1,5 genau sein.

### 3.5 Kleinste nachweisbare Dosis

Wie bereits im Kap.3.3 schon erwähnt wurde, ist die kleinste noch nachweisbare Dosis abhängig von der Empfindlichkeit des Nachweisgerätes. Weiter ist sie festgelegt durch den unvermeidlichen Untergrund des Nachweisgerätes. Dieser wurde mit Hilfe von nichtaktivierten Tantalblechen über 20 Meßreihen (Meßzeit ca. je eine Stunde) ermittelt. Für die kleinste noch nachzuweisende Dosis ergibt sich daraus nach Definition (doppelte Standardabweichung des ermittelten Untergrundes) ein Wert von 70 mrem.

#### 4. Moderatordosimeter: $^6\text{LiF}/^7\text{LiF}$ -Detektor

##### 4.1 Meßmethode

Eine noch nicht alte Methode zur Dosimetrie schneller Neutronen ist mit Hilfe von  $^6\text{LiF}$  und  $^7\text{LiF}$ -Dosimetern möglich (Lit.15). Sie geben nach Bestrahlung von Röntgen-, Gamma- und Teilchenstrahlung Licht ab, wenn man sie erwärmt (Thermolumineszenzdosimeter). Die Lichtintensität ist eine Funktion der Temperatur, die insgesamt abgegebene Lichtmenge ein Maß für die Dosis. Die Ausmessung geschieht mit einem Gerät der Firma Eberline.

Die Dosimeter sind empfindlich gegenüber thermischen Neutronen infolge der Reaktion  $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ . Erhöhte Empfindlichkeit gegenüber thermischen Neutronen erhält man durch Anreicherung (> 95%) des  $^6\text{Li}$  im natürlichen Isotopengemisch des Lithium. Gegenüber thermischen Neutronen praktisch unempfindliches  $^7\text{LiF}$  wird durch Abreicherung des natürlichen Lithium-Isotopengemisches an  $^6\text{Li}$  (< 0,1%) erreicht. Im Handel sind beide Phosphorarten als  $\text{LiF TLD 600}$  ( $^6\text{Li}$  angereichert) und  $\text{LiF TLD 700}$  ( $^6\text{Li}$  abgereichert) von der Firma Harshaw erhältlich. Durch Verwendung eines Doppeldosimeters, bestehend aus einer Kombination von TLD 600 und TLD 700 ist es möglich, in einem Mischstrahlenfeld aus Gammastrahlung und thermischen Neutronen die Äquivalentdosis zu bestimmen. Der Preis eines Doppeldosimeters beträgt zur Zeit DM 24.- .

Eine Äquivalentdosisbestimmung der am Beschleuniger und in den Experimentierhallen überwiegend erzeugten Riesenresonanzneutronen (s. auch Abb.1) erfordert einen geeigneten Moderator, der dafür sorgt, daß sie vorher auf thermische Energie abgebremst werden. Ein solcher Moderator, in dessen Mitte das Dosimeterpaar  $^6\text{LiF}/^7\text{LiF}$  hineingelegt wird, besteht aus Paraffin mit den Abmessungen  $15 \times 20 \text{ cm}^3$ . Der gleiche Moderator wurde bereits beim Tantal-Detektor verwendet.

Die Untersuchung der in Abb. 8 abgebildeten Glow-Kurve wird hier nicht weiter ausgenutzt.

#### 4.2 Eichung

Die Methode unterscheidet sich von der im Kapitel 3 geschilderten Meßmethode nur durch den anderen Detektor für thermische Neutronen; es wird der gleiche Moderator verwendet. Damit gelten alle dort angestellten Überlegungen zur Eichung und zu den systematischen Fehlern auch für dieses Dosismeßverfahren.

Die Eichkonstante wurde also wieder mit einer AmBe-Neutronenquelle bestimmt. Die verwendeten TLD-Dosimeter haben die Abmessungen  $3,2 \times 3,2 \times 0,89 \text{ mm}^3$ . Es zeigte sich, daß diese Moderator- $^6\text{LiF}$ -Methode nicht nur viel empfindlicher ist als die Moderator-Tantal-Methode, sondern sogar empfindlicher als die übliche Gamma-Dosismessung mit normalen LiF-Dosimetern. Das TLD-Auswertegerät wird stets so geeicht, daß die von der Gamma-Dosis 1 mrem herrührende Lichtmenge 1 Impuls ergibt. Die von der Neutronendosis 1 mrem herrührende Lichtmenge des  $^6\text{LiF}$ -Dosimeters gibt dann 2,8 Impulse.

#### 4.3 Kleinste nachweisbare Dosis

Da zur Bestimmung der Neutronendosis in gemischten Strahlungsfeldern immer ein Dosimeterpaar  $^6\text{LiF}/^7\text{LiF}$  erforderlich ist, ergeben sich Fehler, die von den akkumulierten Gamma- und Neutronendosen abhängig sind. Die zu bestimmende Neutronendosis ergibt sich aus der Differenz der gemessenen Zählraten  $Z$  des Dosimeterpaares,

$$D_n = C (\text{mrem/Imp.}) (Z_{^6\text{LiF}} - Z_{^7\text{LiF}})$$

wobei  $C$  die Eichkonstante und  $D_n$  die gesuchte Neutronendosis in mrem ist. Folglich addieren sich auch deren absolute Fehler nach der Formel

$$\frac{\Delta D_n}{D_n} = \frac{C}{D_n} \sqrt{(\Delta Z_{^6\text{LiF}})^2 + (\Delta Z_{^7\text{LiF}})^2}$$

Aus dieser Tatsache ergibt sich, daß in gemischten Strahlungsfeldern mit hoher Gammakomponente die zu messende Neutronenkomponente mit einem größeren Fehler behaftet ist als bei einer kleinen Gammakomponente.

Hätten wir kein gemischtes Strahlungsfeld, also keine zusätzliche Gamma-komponente, so wäre nach unserer Definition die doppelte Standardabweichung des Untergrundes des Auswertegerätes die kleinste noch nachweisbare Neutronendosis; dies ist 1 mrem. Anders ist das bei einem Mischstrahlungsfeld mit höherem Gammaanteil. Hier wird der Fehler des Meßergebnisses hauptsächlich durch den absoluten Fehler, der sich aus der Standardabweichung der akkumulierten Gammadosis ergibt, bestimmt. Diese sind in Abb. 9 eingetragen. Läßt man für die Auswertung einen Fehler von maximal 50% zu, so ergibt sich aus den Standardabweichungen des Dosimeterpaares für jede Neutronendosis ein maximal möglicher Gammadosiswert. Die Kurve in der Abb.10 beschreibt die Grenze zwischen den Bereichen in dem bei gemischten Strahlungsfeldern Messungen möglich sind, und in dem die Gammadosis zu hoch ist und infolgedessen der Fehler der Neutronendosis höher als 50% sein würde.

Zu erwähnen ist noch, daß eine Erhöhung der Empfindlichkeit der Meßmethode durch Verwendung mehrerer  ${}^6\text{LiF}$ -Dosimeter in einem Moderator ohne weiteres möglich ist. Wieviel Dosimeter gerade zu verwenden sind, ist eine Ermessensfrage (längere Auswertzeit, zusätzlicher Kostenaufwand), die vom zu untersuchenden Problem abhängt. Zu berücksichtigen ist jedoch ein Effekt, der im ungünstigsten Fall bei Verwendung von mehreren Dosimetern die Empfindlichkeit jedes Dosimeters um maximal 20% reduziert. Liegen alle Dosimeter aus Platzmangel dicht nebeneinander, so ist wegen des großen Wirkungsquerschnittes für thermische Neutronen  $\sigma = 953$  barn die im wesentlichen an der Oberfläche stattfindende Reaktion  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$  nur an den nicht von anderen Dosimetern verdeckten Oberflächen möglich.

Die zeitliche Abnahme der gespeicherten Information (Fading) braucht hier nicht weiter berücksichtigt zu werden. Sie beträgt nach Cameron (Lit.17) innerhalb von 12 Wochen weniger als 5%.

## 5. Vergleich der Meßmethoden

Wie bereits in der Einleitung erwähnt und in den einzelnen Kapiteln ausführlich diskutiert wurde, haben alle drei Methoden den Nachteil, daß ihre Eichungen nicht genauer als 50% sind. Weitere Ergebnisse wie kleinste noch nachweisbare Dosis, Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Augenfällig ist die relativ kleine noch nachzuweisende Dosis von 1 mrem mit Hilfe der LiF-Methode. Ein Vergleich zur Tantal-Methode zeigt außerdem, daß die dort aufgeführten Vor- und Nachteile sich im wesentlichen decken. Eine Ortsdosimetrie mit dem relativ unempfindlichen Tantal-Detektor hätte gegenüber der sehr empfindlichen LiF-Methode damit keine Berechtigung. Schwieriger wird jedoch der Vergleich zur bisher angewandten Kernspurfilm-Methode. Obwohl die kleinste Dosis beim LiF-Dosimeter wesentlich niedriger liegt, der Informationsverlust durch längere Meßzeiten keine praktische Bedeutung hat und die Auswertung sehr einfach gegenüber dem Kernspurfilm ist, hat der Film doch den Vorteil, daß er sehr handlich ist (kein Moderator notwendig) und was besonders vorteilhaft ist, die Information bleibt nach der Auswertung erhalten.

Geht man jedoch davon aus, daß die Dosisleistung in dem größten Teil des zu überwachenden Bereiches (z.B. Überwachungsgebiete) nicht wesentlich über dem natürlichen Untergrund liegt (er beträgt im Mittel 2,5 mrem/Woche), so scheint es zweckmäßig, das Hauptkriterium bei der Auswahl der zur Verfügung stehenden Methoden auf eine möglichst hohe Empfindlichkeit der Methode zu legen. Der Verlust einer Information durch falsches Ausmessen des entsprechenden Dosimeters ist wenig wahrscheinlich. Dann aber ist der Moderator-LiF-Methode gegenüber der Messung mit Kernspurfilm der Vorzug zu geben.

Methode	Kleinste Dosis	Vorteile	Nachteile
Film	15 mrem	billig, klein und handlich, Empfindlich.	Empfindlich erst ab 0,5 MeV, Begrenzte Meßzeit (Fading). Gamma-Empfindlich, Umständliche Auswertung. Eichung ist stark von anzutreffenden Spektrum abhängig.
Mod.-Ta	70 mrem	Gammaunempfindlich. Lange Meßzeit möglich (Monate). Einfache Auswertung.	Unhandlich wegen zusätzlich benötigtem Moderator. Eichung ist stark von anzutreffenden Spektrum abhängig. Detektor nur begrenzt wiederverwendbar.
Mod.-LiF	1 mrem bei $D_f = 0$ bei $D_f > 0$ s. Afb. 11	Sehr empfindlich. Lange Meßzeit möglich (Monate) (Fadingeffekt hat keine Bedeutung). Schnelle und einfache Auswertung. Detektor wiederverwendbar.	Gammaunempfindlich, jedoch kann dieser Nachteil durch die Differenzmethode weitgehend ausgeschaltet werden. Unhandlich wegen zusätzlich benötigtem Moderator. Eichung ist stark von anzutreffenden Spektrum abhängig.

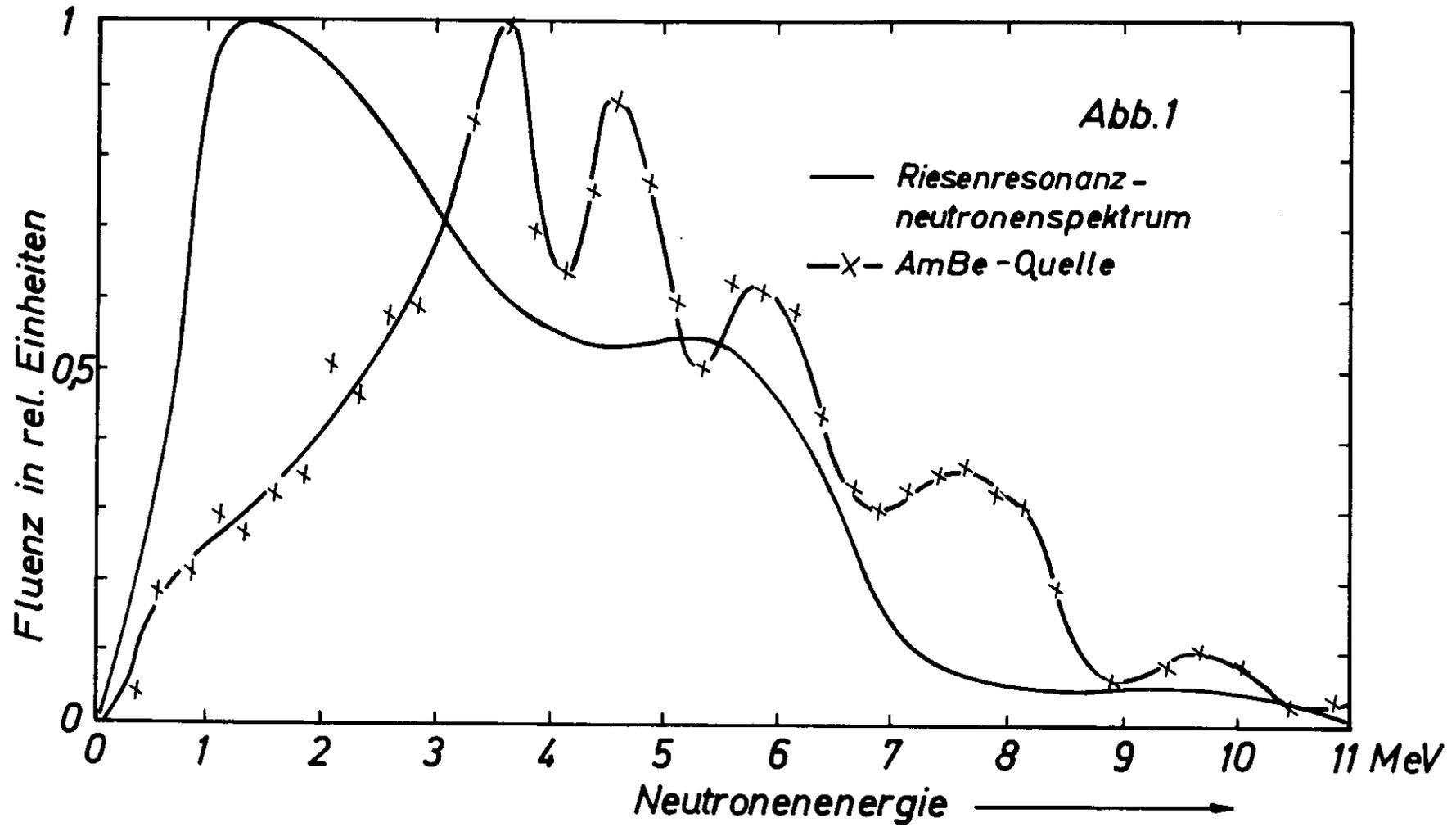
Tabelle 5: wichtigste Eigenschaften der 3 Methoden.

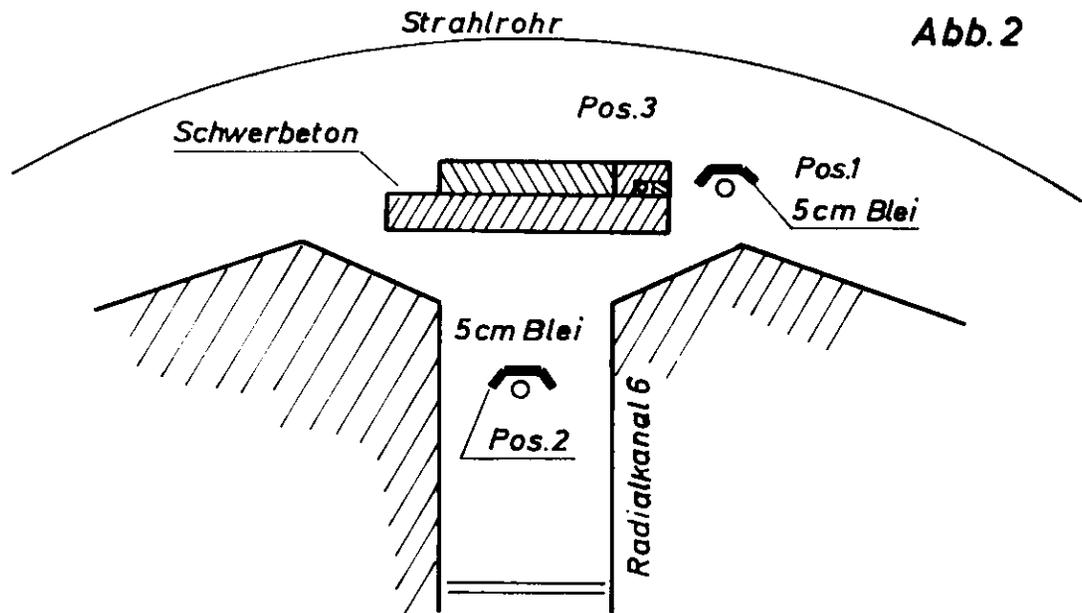
Literatur:

- 1.) E. Piesch, Atompraxis 9 (1963) 179; Hans Dresel, Kerntechnik 3 (1961) 498
- 2.) W.R. Dixon, Can.J. Phys. 33 (1955) 785; F.T. Kuchnir, Phys. Rev. 161 (1967) 1238
- 3.) F.De Guarrini und R. Malaroda, N. I. 92 (1971) 277
- 4.) I.Ö. Anderson und J. Braun, Nukleonik 5 (1964) 237
- 5.) Masao Oshino, Health Phys. 24 (1973) 71
- 6.) H. Dresel, Kerntechnik 11 (1963) 446; J. Jasiak und T. Musialowicz, Nucleonika 17 (1972) 647
- 7.) Albert Turner, Nucleonics 24 (1964) 62
- 8.) K. Becker, Atomkernenergie 2 (1963) 74
- 9.) Stephen A. Mc Guire, Los Alamos Scientific Laboratory LA-3435 (1966)
- 10.) J.W. Leake, N. I. 63 (1968) 329
- 11.) D. Nachtigall, Health Phys. 13 (1967) 213
- 12.) J.J. Steyn und D.G. Andrews, N.I. 68 (1969) 122; C.C. Grosyeon und W. Bossaert, Table of Absolute Detection Efficiencies of cylindrical Scintillation, Gamma-Ray Detectors (1965)
- 13.) G. Bathow, E. Freytag und K. Tesch, Nucl. Phys. 2 (1967) 669
- 14.) K. Tesch, Interner Bericht DESY D3/9 (1972)

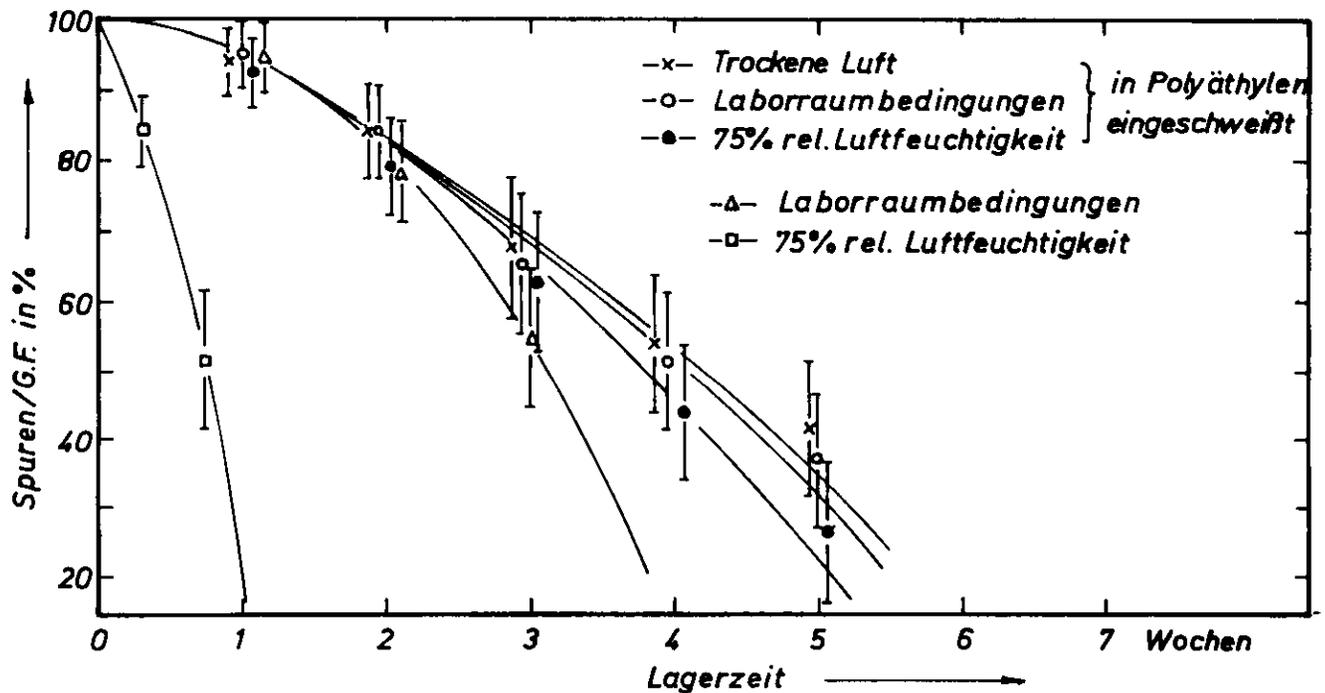
- 15.) E. Piesch, B. Burgardt, KfK 1666 (1972)
- 16.) Y. Furuta und S. Tanaka, N.I. 104 (1972) 365
- 17.) J.R. Cameron, N. Suntharalingam und G.N. Kenny, Thermoluminescent Dosimetrie (TLD). Madison, Milwaukee, London: The University of Wisconsin (1968)

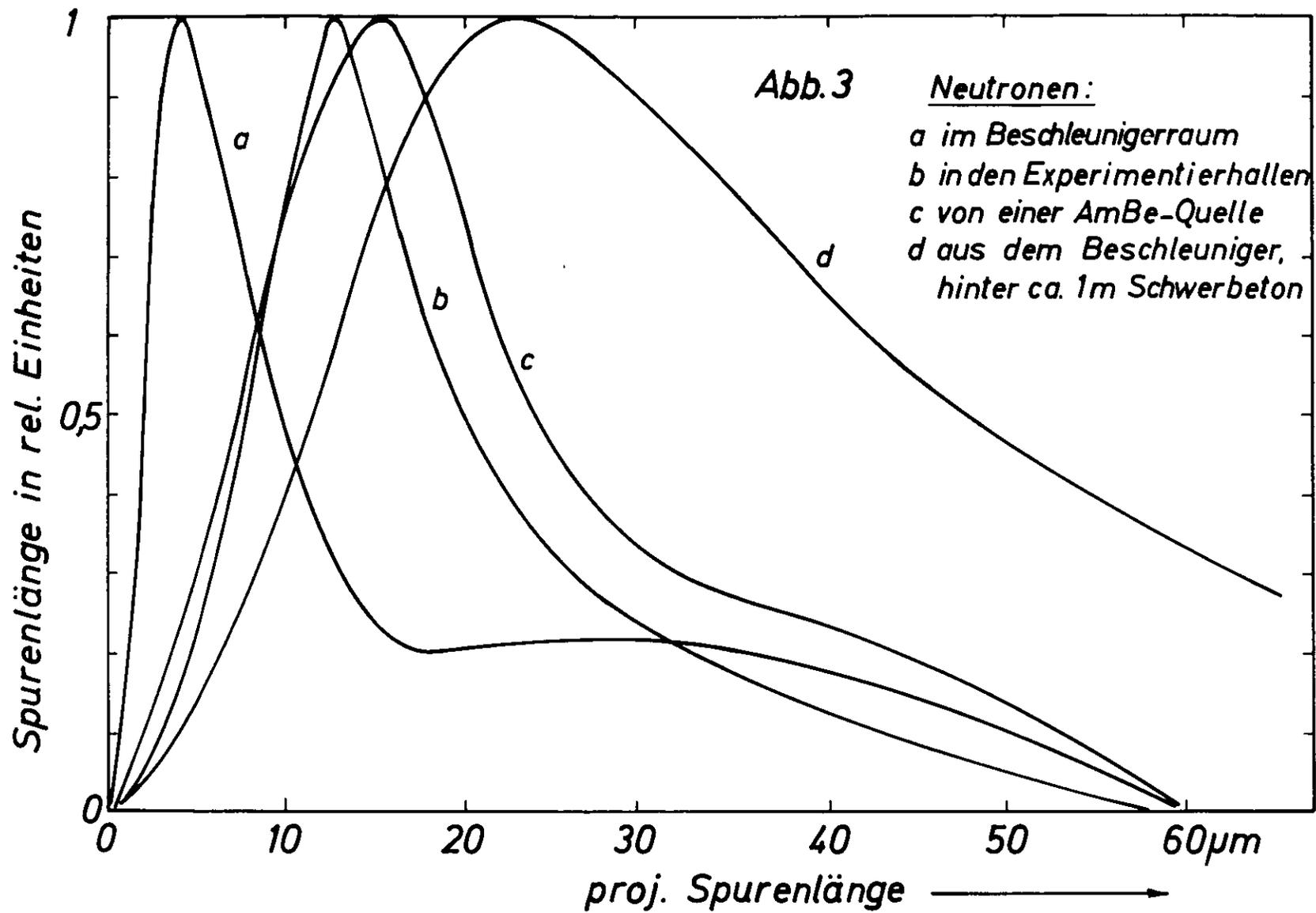
- Abb.1 Spektrum der Riesenresonanzneutronen nach Dixon und Kuchnir (Lit.2) und Spektrum einer AmBe-Quelle nach Nachtigall (Lit.11).
- Abb.2 Positionen der Bestrahlungsversuche innerhalb des Beschleuniger-  
raumes.
- Abb.3 Spurenhäufigkeit in Abhängigkeit der projizierten Spurenlänge mit unterschiedlichen Neutronenfeldern.
- Abb.4 Abnahme der Kornspurdichte des in polyäthylen verpackten und des nicht verpackten Filmes bei unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten.
- Abb.5 Zerfallsschema von  $^{182}\text{Ta}$ .
- Abb.6 Blockschaltbild eines Einkanalzintillationspektrometers
- Abb.7 Gammaskpektrum einer aktivierten Tantal-Sonde, ermittelt mit einem Ge(Li)-Detektor.
- Abb.8 Glow-Kurve verschiedener Thermolumineszenz-Dosimeter.
- Abb.9 Standardabweichungen des LiF-Dosimeters für Neutronen- bzw. Gammastrahlung.
- Abb.10 Die Kurve beschreibt die Grenze zwischen den Bereichen, in dem bei gemischten Strahlungsfeldern Neutronendosismessungen möglich sind, und in dem die Gammadosis zu hoch ist.
- Abb.11 Meßbereiche der drei Meßmethoden, in denen Messungen möglich sind.

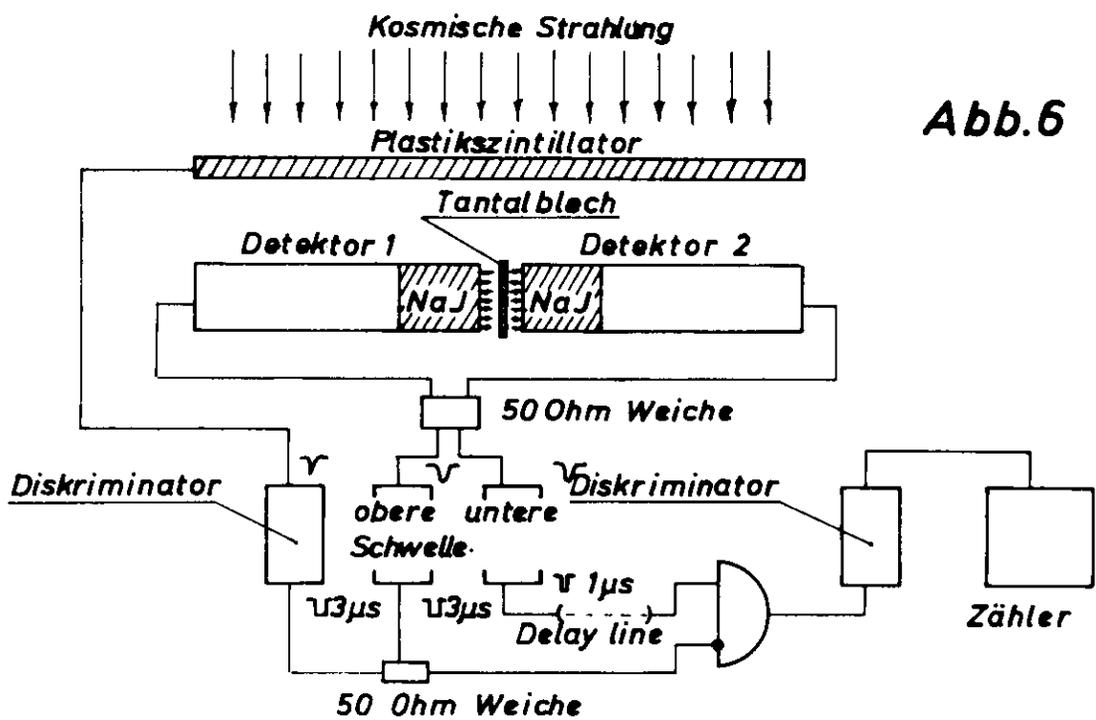
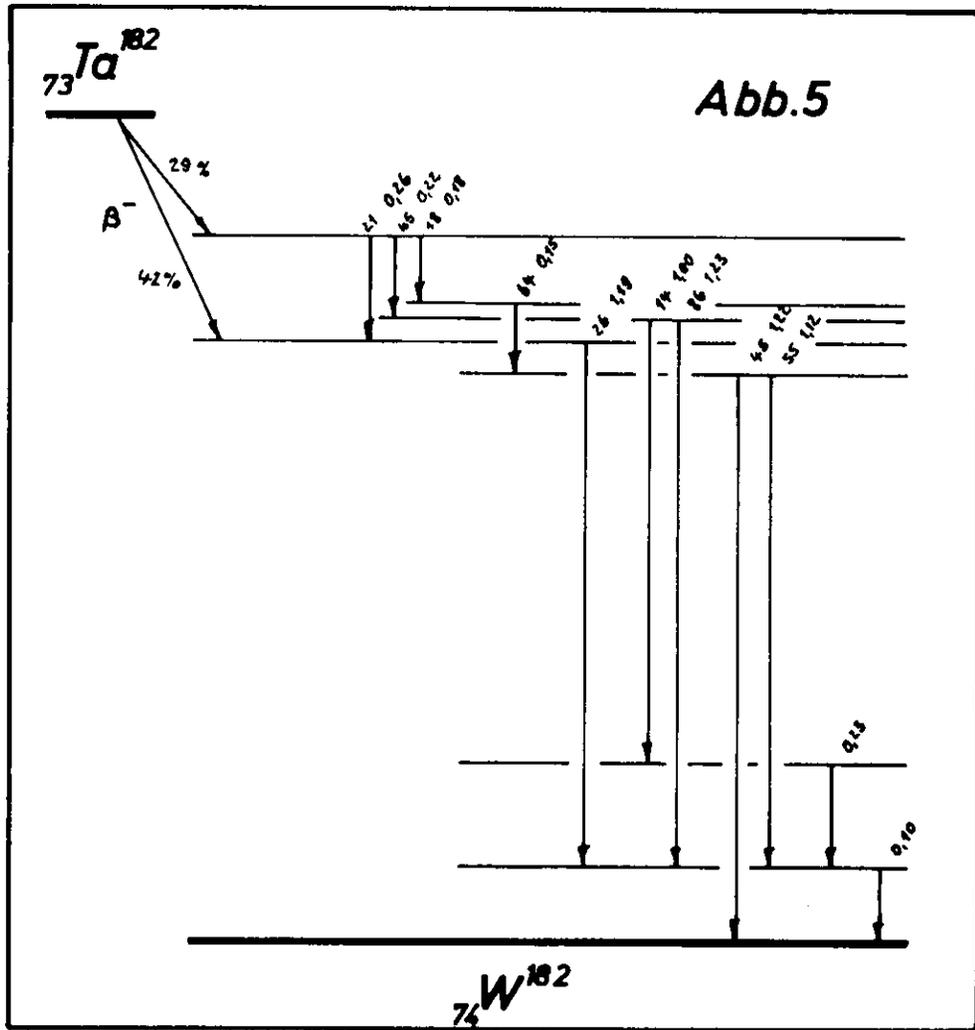




**Abb. 4**







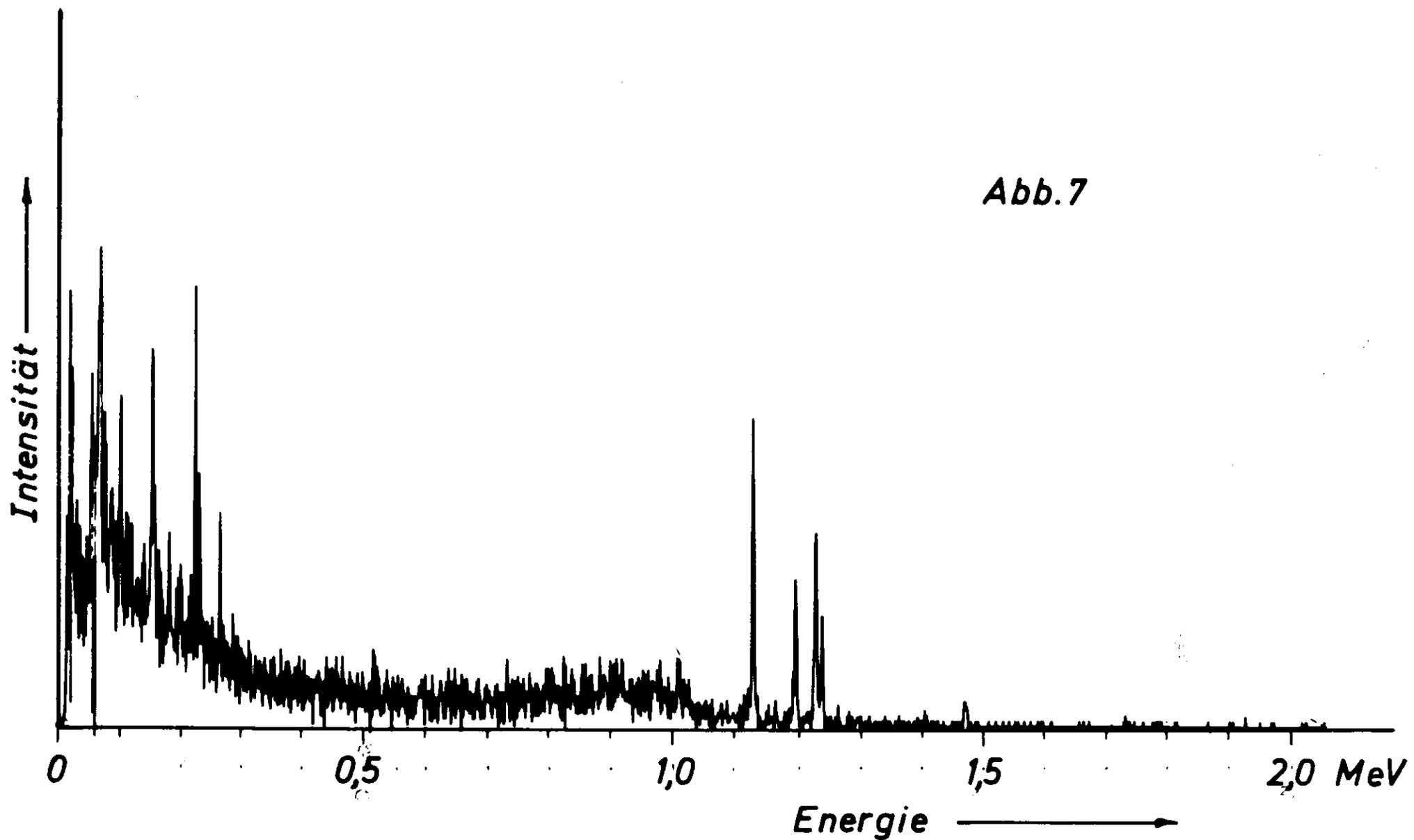
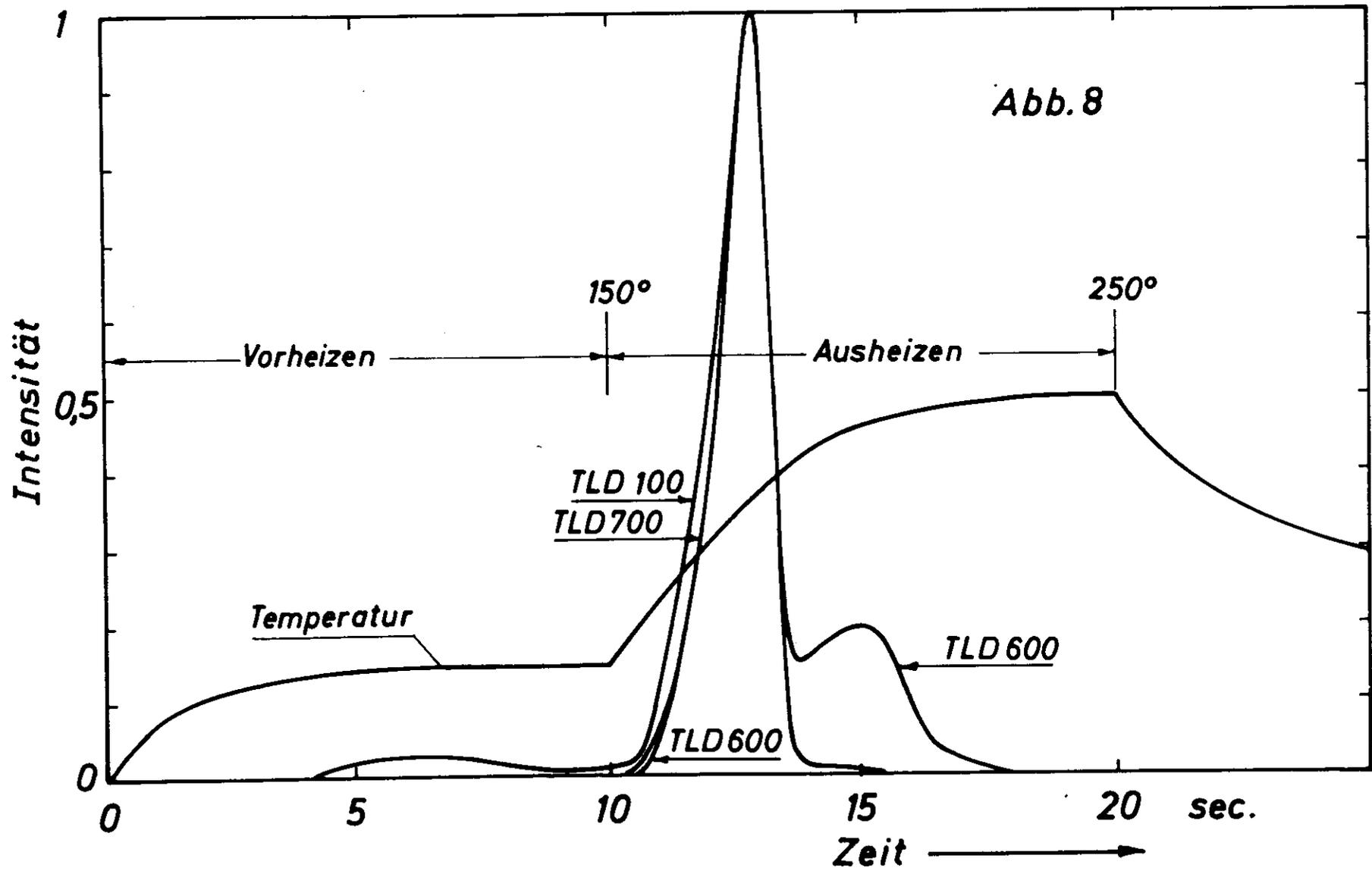
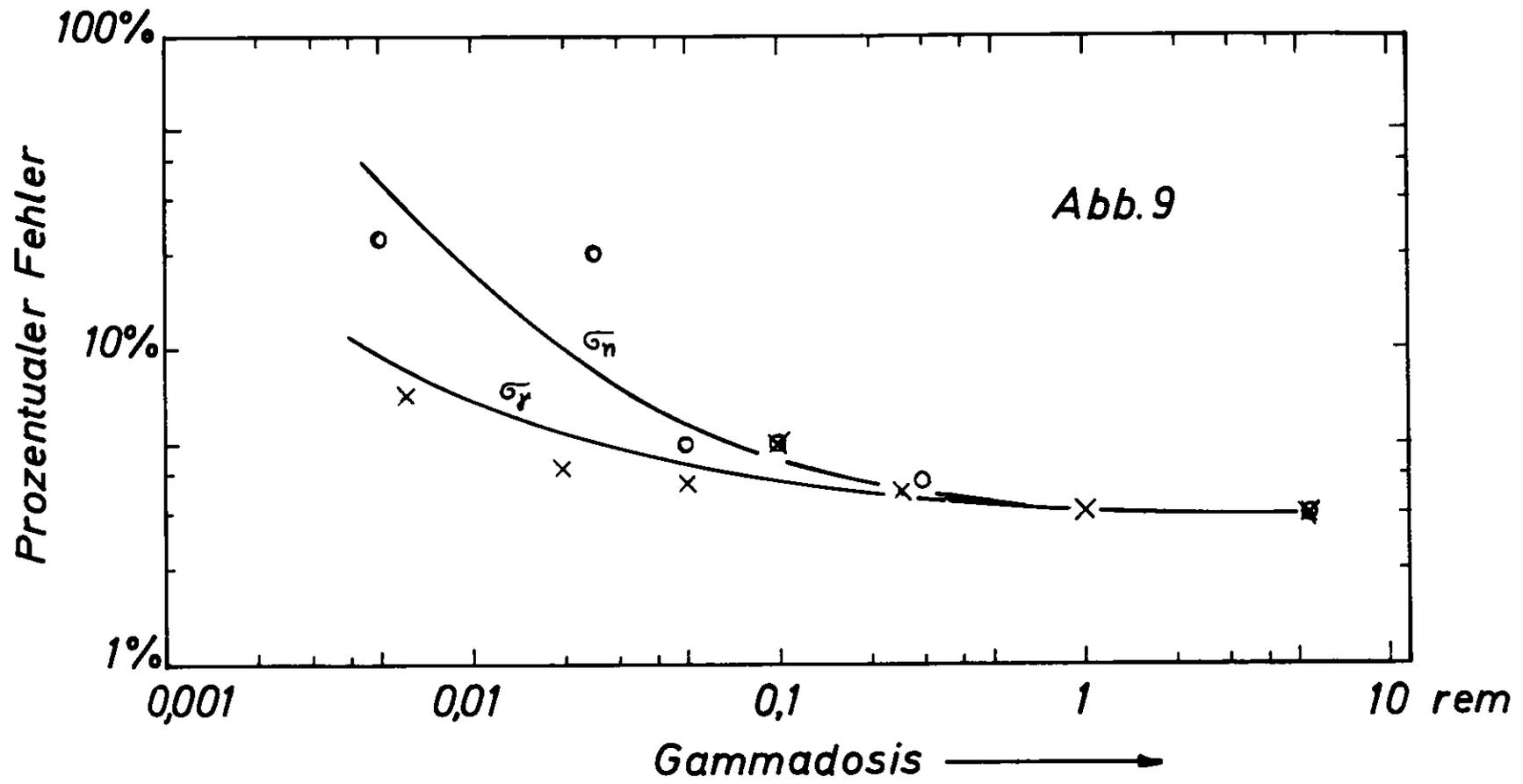


Abb.7





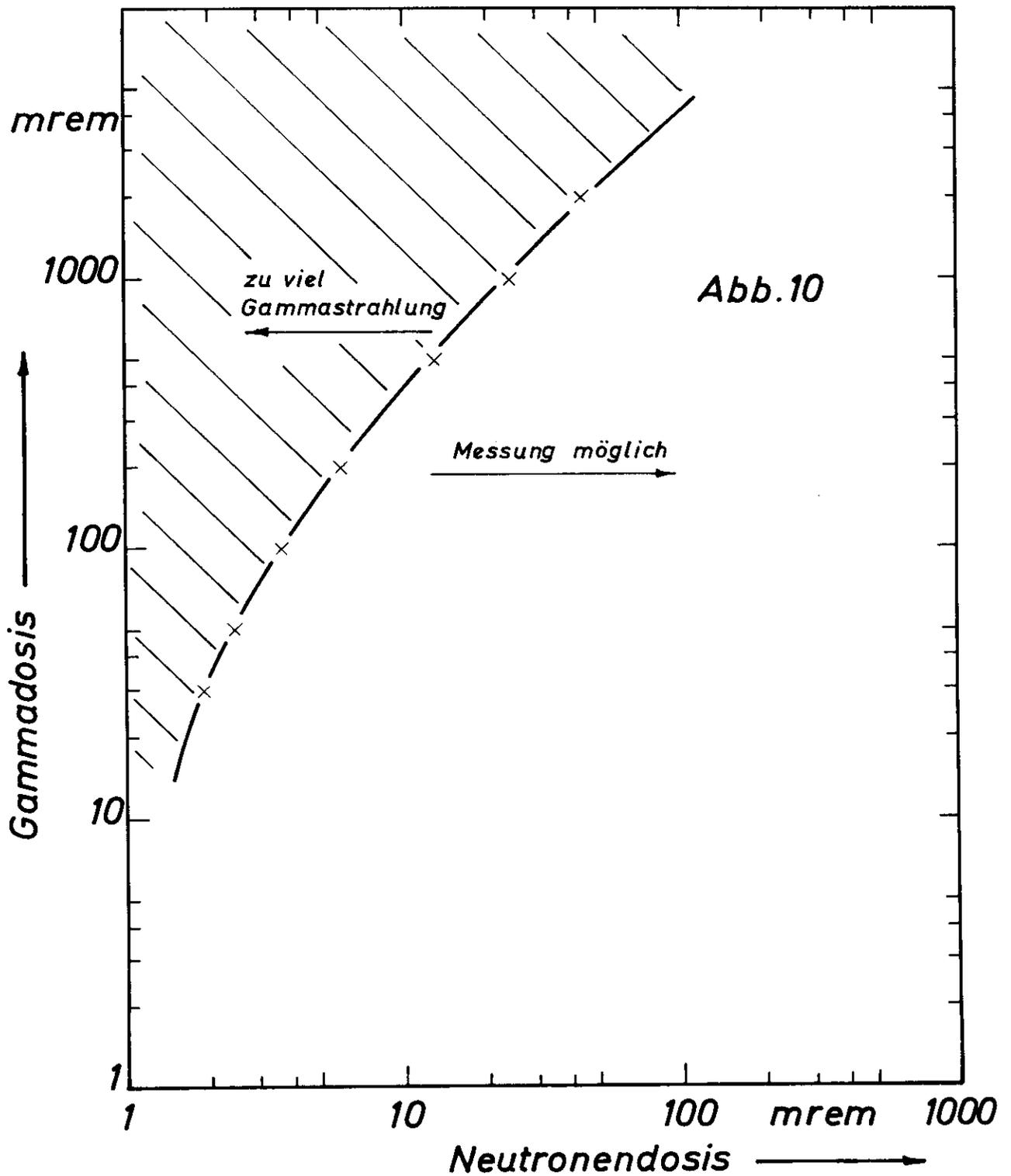


Abb.10

