

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

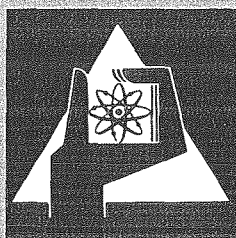
Mai 1973

KFK 1542

Reaktorbetrieb und Technik

**Neutronen-Radiographie mit Cf-252  
Literaturübersicht**

W. Kathol



**GESELLSCHAFT  
FÜR  
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

**KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE

---

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE  
REAKTORBETRIEB UND TECHNIK

KFK 1542  
PACT-Bericht No. 17

NEUTRONEN-RADIOGRAPHIE MIT CF-252  
LITERATURÜBERSICHT

W. KATHOL

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG MBH, KARLSRUHE

---



## Zusammenfassung

Die Neutronen-Radiographie ist ein Verfahren zur Abbildung von Objekten mit Neutronen. Sie ist in vielen Aspekten der Radiographie mit Röntgen- und Gammastrahlen ähnlich, kann diese aber in einigen Fällen wesentlich ergänzen. Als mögliche Anwendungsgebiete werden die Biologie/Medizin und die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung genannt.

Cf-252 ermöglicht es, eine transportable Neutronen-Radiographie-Anlage zu bauen, die in verschiedensten Laboratorien eingesetzt werden kann. Bei entsprechender Auslegung ist eine solche Einrichtung auch zur Aktivierung von Proben für Aktivierungsanalysen zu verwenden.

## Summary

Neutron radiography is a technique of representing objects with the help of neutrons. It resembles X-ray and gamma radiography in many respects, although it can supplement these techniques remarkably in some cases. Possible applications are in biology/medicine and in non-destructive material testing.

Cf-252 allows to build a transportable neutron radiography device which can be employed in various laboratories. With an appropriate design, this device can be utilized also to activate samples for activation analyses.

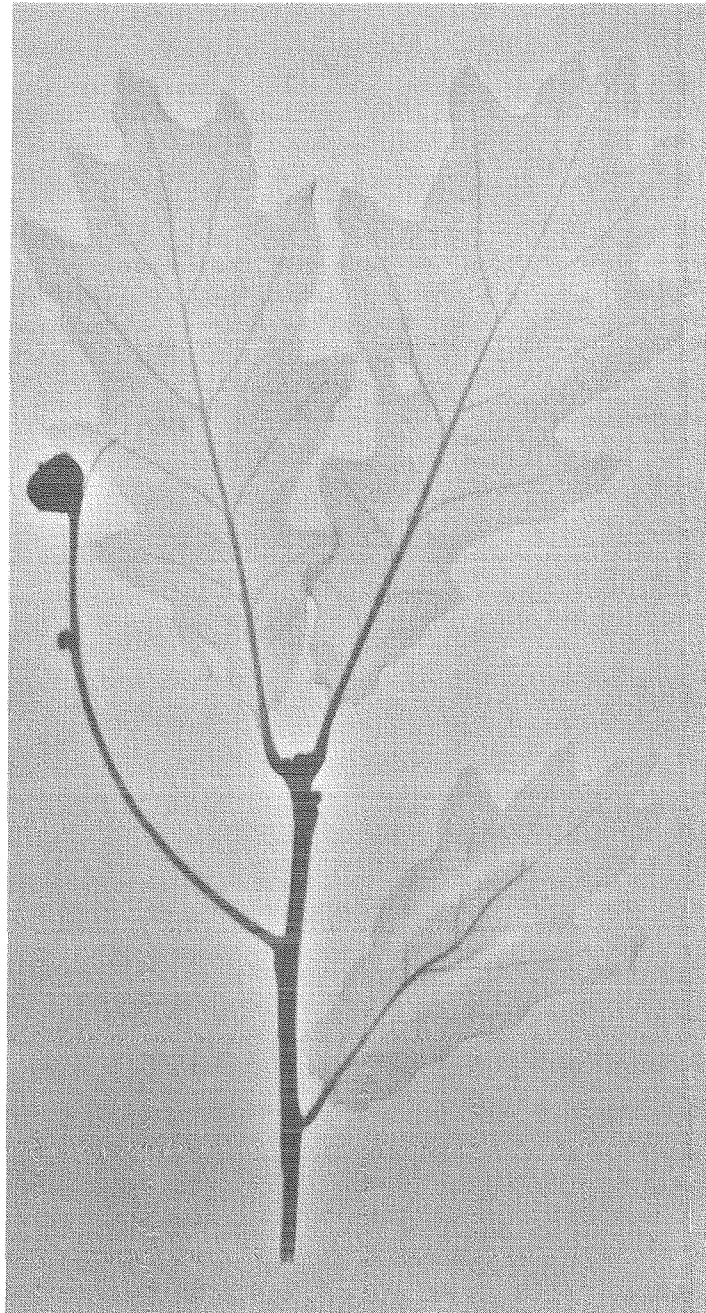


# I n h a l t

	S e i t e	
1.	Einleitung	1
1.1.	Geschichtliches	1
1.2.	Radiographie	2
1.3.	Absorptionsvermögen	3
1.4.	Kontrast	9
1.5.	Unschärfe und Auflösungsvermögen	13
2.	Neutronen-Quellen	16
2.1.	Kostenabschätzungen	20
2.2.	Californium-252	22
2.3.	Neutronen-Quellen mit Cf-252	24
2.4.	Kollimatoren	28
3.	Neutronen-Bildwandler	32
3.1.	Direkte Belichtungsmethode	33
3.1.1.	Thermische Neutronen	34
3.1.2.	Kalte Neutronen	38
3.1.3.	Schnelle Neutronen	39
3.2.	Aktivierungsmethode	39
3.3.	Methode des Spuren-Ätzens	40
3.4.	Verwendung phosphoreszierender Schichten	44
3.5.	Fernsehübertragung	45
3.6.	Sonderverfahren	47
4.	Anwendungsmöglichkeiten für die Neutronenradiographie	48
4.1.	Anwendung der Neutronenradiographie in der Biologie und Medizin	49
5.	Schlußfolgerung	54
	Literaturzusammenstellung	56







### Neutronen-Radiographie eines Eichenblattes

Diese Aufnahme wurde von Herrn Schülken am FR 2 mit thermischen Neutronen gemacht.



## 1. Einleitung

### 1.1. Geschichtliches

In den 75 Jahren seit der Entdeckung der Röntgenstrahlen durch Röntgen 1895 hat die Radiographie mit Röntgen- und Gammastrahlen einen hohen technischen Stand erreicht, zu dem die Neutronen-Radiographie bisher noch nicht vorgedrungen ist. In der Zukunft können beide jedoch als gleichwertige, einander ergänzende Verfahren angesehen werden.

1932 entdeckte Chadwick, auf Vorhersagen von Bothe, Becker, Curie und anderen fußend, eine Strahlung, die sich elektrisch neutral verhält, und die er daher als Neutronen-Strahlung bezeichnete. Chadwick erzeugte Neutronen durch Beschuß von Beryllium mit Alphateilchen (4).

Es lag nahe, die Neutronen zur Radiographie zu benutzen. Hieran arbeiteten von 1935 bis 1939 Kallmann und Kuhn. Beide entwickelten wichtige, noch heute verwendete Hilfsmittel der Neutronen-Radiographie. Viele ihrer Ideen wurden patentiert. Wegen der Kriegereignisse konnte ein Bericht über die Arbeiten erst 1948 veröffentlicht werden (2).

Während des 2. Weltkrieges stand Peter in der Forschungsanstalt der Deutschen Reichspost eine wesentlich stärkere Neutronenquelle (Hochspannungsgenerator mit Be-Target) als Kallmann zur Verfügung. In seiner 1946 erschienenen Veröffentlichung (3) zeigt er Vergleichsaufnahmen von Gamma- und Neutronen-Radiographien von Ventilen, Manometern usw. Er weist auch bereits auf die mögliche Anwendung der Neutronen-Radiographie für spezielle Fälle der zerstörungsfreien Materialprüfung hin.

Erst Anfang der fünfziger Jahre wurden die Arbeiten an der Neutronen-Radiographie von Thewlis in England wieder aufgenommen. Thewlis konnte einen 8000 kW graphitmoderierten Reaktor als Strahlenquelle verwenden. Die ersten seiner qualitativ bereits ausgezeichneten Radiographien veröffentlichte er 1956 (5, 6).

Angeregt durch die Ergebnisse von Thewlis nahm in den folgenden Jahren

das Interesse an der Neutronen-Radiographie stark zu. Untersucht wurden hauptsächlich verschiedene Nachweismethoden und der Einfluß der Neutronen-Energie auf die Abbildungsparameter (7 - 26, 36, 40 - 44).

Die erste zusammenfassende Darstellung gab Berger 1965 (1).

Seit 1964 werden von der Society for Nondestructive Testing, Inc. die "Neutron Radiography Newsletters" veröffentlicht. Herausgeber sind J.P. Barton und Harold Berger, D-212 Argonne National Laboratory, 9700 South Cass Avenue, Argonne, Illinois 60439, USA (14).

Die Newsletters enthalten Arbeitsberichte aus verschiedenen Instituten, die sich mit der Neutronen-Radiographie beschäftigen, Zusammenfassungen einzelner Veröffentlichungen und Kongreß-Berichte sowie eine Übersicht über die jeweils neu erschienenen Publikationen. 1970 wurde ein Komitee gegründet, das den Kontakt zwischen einzelnen Arbeitsgruppen herstellen soll.

Relativ viele Arbeiten beschäftigten sich mit dem Einsatz der Neutronen-Radiographie in der Biologie und Medizin. Obwohl sie hier eine wertvolle Ergänzung zur Röntgen-Radiographie darstellt, ist der augenblickliche Entwicklungsstand des Verfahrens noch nicht ausreichend, um befriedigend verwendet werden zu können (150).

Ein wichtiger Schritt ist der Bau leicht transportabler Strahlenquellen. Dies ist mit dem Transplutoniumelement Cf-252 möglich (37, 67).

Während des letzten Jahrzehnts lief in den USA ein Programm zur Erzeugung von Cf-252 an, so daß dieses neutronenaussendende Transplutoniumelement jetzt zur Verfügung steht (61, 52, 53).

Seit 1970 bearbeitet im Kernforschungszentrum Karlsruhe das Projekt Actiniden (PACT) die Erzeugung und Anwendung der Transplutoniumelemente. Diese Literaturübersicht entstand im Rahmen eines Forschungsauftrages PACT 3500/3/72.

## 1.2. Radiographie

Grundsätzlich gelten für die Radiographie - Röntgen-,

Gamma- und Neutronen-Radiographie - die gleichen Regeln, die bei sichtbarem Licht den Schattenwurf eines mehr oder weniger durchsichtigen Körpers auf einen Bildschirm bestimmen.

Die von der Lichtquelle ausgehenden Strahlen werden von dem Körper ganz oder teilweise absorbiert. Die nicht abgeblendeten Strahlen treffen auf den Bildschirm, der auch durch einen photographischen Film ersetzt werden kann, und zeichnen ein Abbild des Gegenstandes.

Da das Absorptionsvermögen von der Wellenlänge des Lichtes abhängt, kann durch eine Änderung der Wellenlänge unter Umständen ein völlig anderes Bild erzeugt werden. Bestimmte Acrylglassorten sind z.B. für violette Licht wesentlich weniger durchlässig als für rotes.

Kanten eines Körpers werden nur dann scharf abgebildet, wenn die Strahlen entweder von einem Punkt ausgehen oder parallel sind. Mit der Abbildungsschärfe verbunden ist das Auflösungsvermögen, d. h. die Unterscheidbarkeit zweier nebeneinander liegender Kanten oder Punkte. Das Auflösungsvermögen wird nicht nur von der Geometrie des Strahlenganges, sondern auch von der Körnigkeit des Bildschirmes bzw. des Filmes beeinflusst.

Um zwei nebeneinander liegende Teile voneinander unterscheiden zu können, muß der durch ihre unterschiedliche Lichtabsorption (infolge anderer Dicke oder anderen spezifischen Absorptionsvermögens) hervorgerufene Helligkeitskontrast einen gewissen Wert übersteigen. Der kleinste noch zu erkennende Kontrast hängt von der Gesamtbeleuchtungsstärke des Schirmes ab. Der Kontrast wird durch Streustrahlung, die durch Fremdstrahlung oder Reflexion in dem Körper und der Apparatur entsteht, verringert; Projektionsräume werden deshalb abgedunkelt.

Um stärker absorbierende Körper durchstrahlen zu können, was z. B. zum Erkennen von Einschlüssen erforderlich ist, muß die Lichtquellstärke ausreichend groß sein. Andernfalls steigt der Einfluß der Störstrahlung und die Belichtungszeit eines Filmes wird länger.

### 1.3. Absorptionsvermögen

Röntgen- und Gammastrahlen reagieren im wesentlichen mit

der Atomhülle, Neutronen hingegen mit dem Atomkern. Hieraus ergeben sich Unterschiede bei den Massenschwächungskoeffizienten gleicher Elemente gegen Neutronen bzw. Gammastrahlen, die die Neutronen-Radiographie zur wichtigen Ergänzung der Gammastrahlen-Radiographie machen.

In der Abbildung 1.1 sind über der Ordnungszahl der Elemente die zugehörigen Massenschwächungskoeffizienten aufgetragen, und zwar einmal für 130 keV Röntgenstrahlen und zum anderen für thermische Neutronen. Die Massenschwächungskoeffizienten gegen Röntgenstrahlen liegen alle auf einer stetigen, monoton ansteigenden Kurve, die Koeffizienten gegen Neutronen hingegen lassen sich nicht durch eine einfache Kurve verbinden.

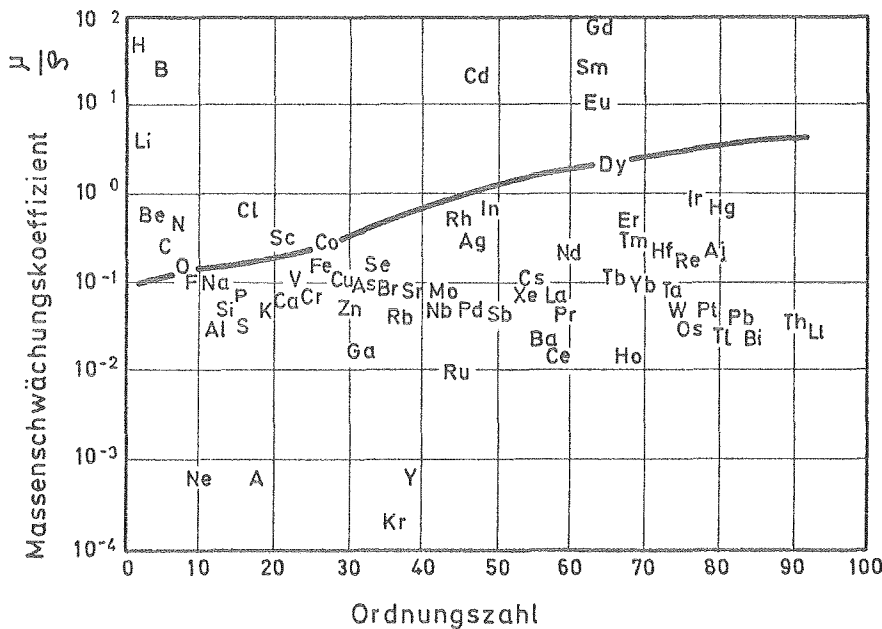


Abb. 1.1 Massenschwächungskoeffizienten für thermische Neutronen und für 130 keV Röntgenstrahlen (ausgezogene Kurve) nach (12).

Während Gammastrahlen nur wenig in Körper aus schweren Elementen eindringen können, werden Neutronen davon nur schwach abgeschirmt. Genau umgekehrt ist es bei leichten Elementen, insbesondere Wasserstoff, die Neutronen stark, Gammastrahlen wesentlich geringer beeinflussen.

Tabelle 1.1 Massenschwächungskoeffizienten für thermische Neutronen nach (12)

Ordnungs- zahl	Element	Koeffizient cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>	Ordnungs- zahl	Element	Koeffizient cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>	Ordnungs- zahl	Element	Koeffizient cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>
1	Wasserstoff	48,5	32	Germanium	0,082	63	Europium	10 <sup>2</sup>
3	Lithium	3,7	33	Arsen	0,072	64	Gadolinium	84 <sup>2</sup>
4	Beryllium	0,50	34	Selen	0,132	65	Terbium	0,09 <sup>2</sup>
5	Bor	24 <sup>2</sup>	35	Brom	0,074	66	Dysprosium	2,0 <sup>2</sup>
6	Kohlenstoff	0,26	36	Krypton	0,0002 <sup>2</sup>	67	Holmium	0,015 <sup>2</sup>
7	Stickstoff	0,48	37	Rubidium	0,042	68	Erbium	0,41
8	Sauerstoff	0,15	38	Strontium	0,070	69	Thulium	0,25 <sup>2</sup>
9	Fluor	0,11	39	Yttrium	0,0056 <sup>2</sup>	70	Itterbium	0,076 <sup>2</sup>
10	Neon	0,006 <sup>2</sup>	40	Zirkon	0,047	71	Lutetium	0,22 <sup>2</sup>
11	Natrium	0,099	41	Niob	0,044	72	Hafnium	0,20 <sup>2</sup>
12	Magnesium	0,093	42	Molybdän	0,055 <sup>2</sup>	73	Tantal	0,067
13	Aluminium	0,036	44	Ruthenium	0,009 <sup>2</sup>	74	Wolfram	0,058
14	Silizium	0,044 <sup>3</sup>	45	Rhodium	0,53 <sup>2</sup>	75	Rhenium	0,16 <sup>2</sup>
15	Phosphor	0,062 <sup>3</sup>	46	Palladium	0,050	76	Osmium	0,028 <sup>2</sup>
16	Schwefel	0,029	47	Silber	0,24	77	Iridium	0,80 <sup>2</sup>
17	Chlor	0,59	48	Cadmium	11,2 <sup>2</sup>	78	Platin	0,050
18	Argon	0,006 <sup>2</sup>	49	Indium	0,60 <sup>2</sup>	79	Gold	0,20
19	Kalium	0,049	50	Zinn	0,027	80	Quecksilber	0,71
20	Calcium	0,057	51	Antimon	0,037	81	Thallium	0,027 <sup>3</sup>
21	Scandium	0,27 <sup>3</sup>	52	Tellur	0,031	82	Blei	0,034
22	Titan	0,119	53	Jod	0,036	83	Wismuth	0,029
23	Vanadium	0,093	54	Xenon	0,083 <sup>2</sup>	90	Thorium	0,031 <sup>1</sup>
24	Chrom	0,065	55	Caesium	0,109	92	Uran	0,028 <sup>3</sup>
25	Mangan	0,107	56	Barium	0,018 <sup>3</sup>			
26	Eisen	0,141	57	Lanthan	0,063			
27	Kobalt	0,26	58	Cer	0,014			
28	Nickel	0,213	59	Praesodym	0,046			
29	Kupfer	0,095	60	Neodym	0,21			
30	Zink	0,045 <sup>2</sup>	62	Samarium	25 <sup>2</sup>			
31	Gallium	0,015 <sup>2</sup>						

1 Nur Streuung berücksichtigt

2 Streuung nicht berücksichtigt

3 Inkohärente Streuung nicht berücksichtigt

So ist es mit Hilfe der Neutronen-Radiographie möglich, z. B. Details von Kunststoffteilen, die in Blei eingeschlossen sind, zu erkennen, oder die Höhe einer Wassersäule in einem druckfesten Stahlrohr zu bestimmen.

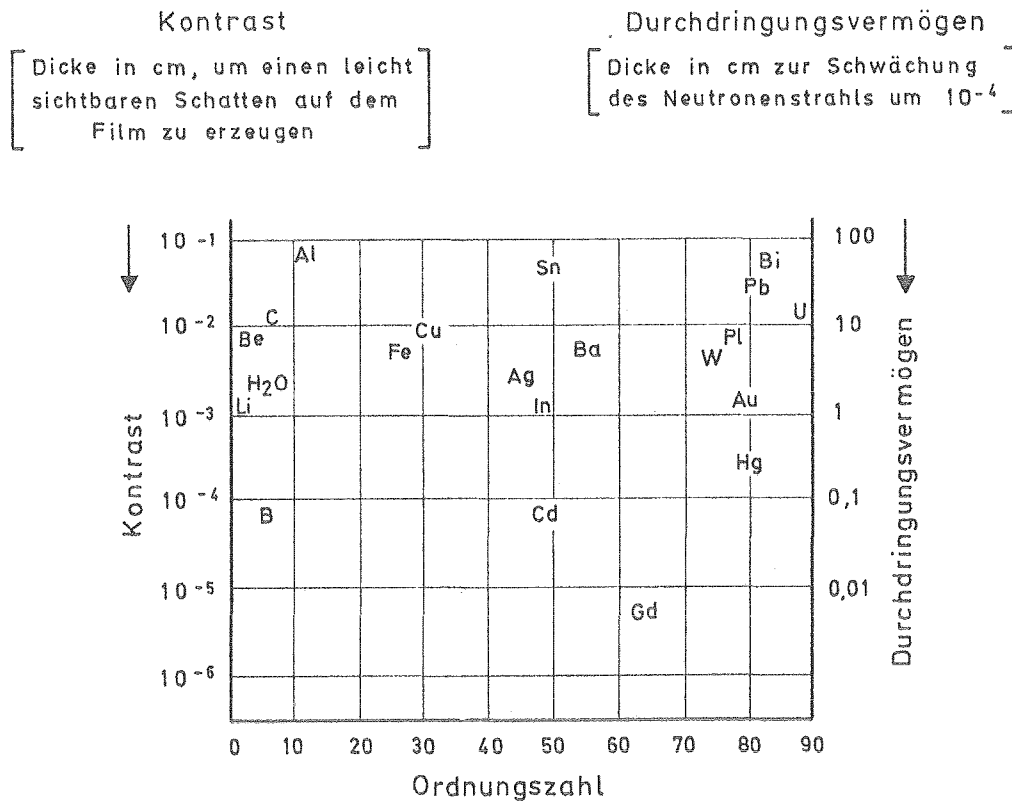


Abb. 1.2 Kontrast und Durchdringungsvermögen thermischer Neutronen nach (11).

Weil die Wirkungsquerschnitte der Elemente für Reaktionen mit thermischen Neutronen, selbst bei Elementen mit benachbarter oder gleicher Ordnungszahl (Isotope), häufig stark voneinander abweichen, können sie in einer Neutronen-Radiographie voneinander unterschieden werden. Ein Beispiel ist die Untersuchung der Vermischung von U-235 und U-238 in einem Brennelement (129).

Wegen der großen Unterschiede in den Wirkungsquerschnitten werden hauptsächlich thermische Neutronen zur Neutronen-Radiographie verwendet. In der letzten Zeit werden jedoch in zunehmendem Maße auch Neutronen anderer Energie zur Radiographie herangezogen (32, 33).



### Kalte Neutronen

Untersuchungen von Melkonian (28) zeigen, daß der Wirkungsquerschnitt von Wasserstoff im Bereich kalter Neutronen stetig von 20 b bei 0,025 eV auf ca. 80 b bei 0,003 eV ansteigt, wenn das Wasserstoffatom chemisch gebunden ist. Der Wirkungsquerschnitt des Eisens sinkt von 12 b bei 0,025 eV auf 6 b bei 0,005 eV ab. Kalte Neutronen können Stahl also weiter durchdringen und werden weniger gestreut, wodurch sich eine erhebliche Steigerung des Kontrastes ergibt (29).

Barton führte erste Versuche mit kalten Neutronen durch. Die folgende Abbildung 1.3 zeigt, um wieviel der Kontrast, den ein Kunststoffplättchen bestimmter Dicke auf einem HP3 Film mit einem  $^6\text{Li-Zn S-Szintillator}$  erzeugt, durch die Anwendung kalter Neutronen steigt.

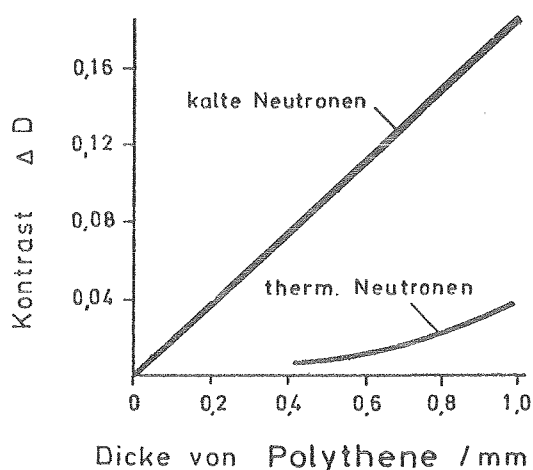


Abb. 1.3 Einfluß der Neutronenenergie auf den Kontrast

In einem weiteren Versuch wurde untersucht, welchen Einfluß die Neutronenenergie auf den Kontrast der Abbildung eines Kunststoffkörpers hat, wenn in den Strahlengang gleichzeitig Stahlbleche eingeführt werden (Abb. 1.4). Während bei thermischen Neutronen der Kunststoff schon mit einer wenige Zentimeter dicken Stahlplatte nicht mehr zu erkennen ist, beeinflußt der Stahl bei kalten Neutronen die Abbildung nur wenig.

### Epithermische Neutronen

Für Anwendungsfälle in der Biologie und Medizin sind thermische Neutronen wegen des hohen Schwächungskoeffizienten des Wasser-

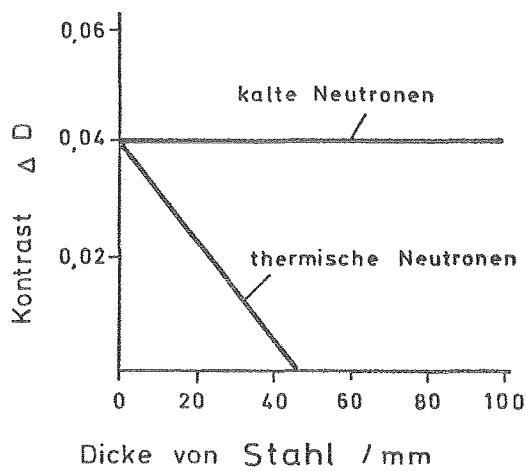


Abb. 1.4

Einfluß der Neutronen-  
energie auf den Kontrast

stoffs nicht durchdringend genug; mit schnellen Neutronen können die Gewebe zwar durchstrahlt werden, jedoch sind die auftretenden Strahlenschäden oft nicht tragbar. Als möglicher Kompromiß wurde die Verwendung epithermischer Neutronen untersucht (31).

Einige Elemente weisen im epithermischen Energiebereich Resonanzen auf. Bei Anwendung passender, annähernd monoenergetischer Neutronen können diese Elemente sehr kontrastreich abgebildet werden (30).

#### Schnelle Neutronen

Schnelle Neutronen zeichnen sich durch ein großes Durchdringungsvermögen aus. Da die meisten Elemente etwa den gleichen Wirkungsquerschnitt für schnelle Neutronen haben, hängt das Durchdringungsvermögen nur von der Energie ab. Diagramme über das Durchdringungsvermögen, insbesondere bei Wasser, finden sich bei Tochilin (34, 35, 39, 62, 112).

Infolge der fast übereinstimmenden Wirkungsquerschnitte sind die erzielbaren Kontraste zwischen einzelnen Materialien gleicher Dicke gering.

Bei schnellen Neutronen tritt der bei thermischen Neutronen auftretende Sekundärgammastrahlen-Hintergrund weitgehend zurück.

Schwierigkeiten ergeben sich bei der Anwendung schneller Neutronen durch die starke Streuung der Neutronen, die eine Verringerung des ohnehin schon kleinen Kontrastes bewirkt (144). In der Medizin kommt die Schädigung des Untersuchungsobjektes durch die Strahlung hinzu.

#### 1.4. Kontrast

In einer Neutronen-Radiographie wird ein Unterschied in der Strahlenabsorption des Objektes, verursacht z. B. durch eine unterschiedliche Dicke, durch verschiedene Filmschwärzungen wiedergegeben (47):

$$\Delta S = 0,43 G \Delta (\mu x) \quad (1.1)$$

Hierin ist S die Schwärzung,  $\Delta S$  der Kontrast, G der Gradient der Schwärzungskurve,  $\mu$  der Absorptionskoeffizient des Objektmaterials und x die Dicke des Objektes. Enthält eine Platte aus einem Material mit dem Absorptionskoeffizienten  $\mu_1$  einen Einschluß der Dicke  $\Delta x_2$  aus einem Werkstoff mit dem Koeffizienten  $\mu_2$ , so entsteht ein Unterschied in der Filmschwärzung:

$$\Delta S = 0,43 G (\mu_2 - \mu_1) \Delta x_2 \quad (1.2)$$

Enthält die Platte zwei Einschlüsse mit verschiedenen Absorptionsvermögen  $\mu_2^1$ ,  $\mu_2^2$ , so ist der Schwärzungsunterschied zwischen den Abbildungen der Einschlüsse unabhängig von dem Material und der Dicke der Platte:

$$\Delta S = 0,43 G (\mu_2^1 - \mu_2^2) \Delta x_2 \quad (1.3)$$

Mit Hilfe von Röntgenstrahlen ist es kaum möglich, die Höhe einer Flüssigkeitssäule in einem Rohr kleinen Durchmessers zu bestimmen. Sehr gut eignen sich dazu hingegen Neutronen, mit denen selbst wassergefüllte Kapillare in mehrere Zentimeter dicken Bleiplatten nachgewiesen werden können.

Die vorstehenden Gleichungen gelten jedoch nur, wenn Störstrahlungen ausgeschlossen sind. Solche Störstrahlungen resultieren aus der Gamma-

strahlung der Neutronenquelle, dem im Objekt entstehenden Einfang-Gammstrahler und aus gestreuten Neutronen. Der erreichbare Kontrast reduziert sich dadurch auf

$$\Delta S = 0,43 G \Delta (\mu x) \frac{E_D}{E_D + E_\gamma + E_{n\gamma} + E_S} \quad (1.4)$$

E gibt darin die Exposition des Films durch die jeweilige Strahlenart an:

- $E_D$  durch den direkten Nutzstrahl
- $E_\gamma$  durch die Gammastrahlen aus der Quelle
- $E_{n\gamma}$  durch die Sekundärgammastrahlung
- $E_S$  durch gestreute Neutronen

Da es möglich ist, durch verschiedene Verfahren den Einfluß der Gammastrahlung zu vermindern bzw. auszuschalten, kommt den gestreuten Neutronen eine besondere Bedeutung zu. Sie bestimmen die maximale Dicke der abzubildenden Gegenstände. Es wird versucht, die Zahl der gestreuten Neutronen durch Gitter, die die Funktion eines Kollimators haben und zwischen Objekt und Bildwandler angeordnet werden, zu vermindern. Gitter haben aber verschiedene Nachteile: Sie vergrößern die Unschärfe durch den erforderlichen Abstand zwischen Objekt und Bildwandler und können ein Raster auf dem Bild erzeugen. Um die Neutronen-Radiographie in der Medizin einsetzen zu können, ist es unbedingt erforderlich, die gestreuten Neutronen besser zu unterdrücken (45).

Das Verhältnis der Intensität der gestreuten Neutronen  $I_S$  zu der Intensität des direkten Neutronenstrahles  $I_D$  hat Barton für einige Werkstoffe (Stahl, Blei, Perspex) bestimmt.  $I_S/I_D$  ist bei gegebener Geometrie abhängig von der Materialdicke (Abb. 1.5).

Die Exposition des Films ist nicht proportional zur Neutronenintensität, sondern energieabhängig. Bei thermischen Neutronen kann man jedoch die Proportionalität mit ausreichender Genauigkeit annehmen, da hier die gestreuten Neutronen die gleiche Energie wie die nicht gestreuten haben. Damit geht die Gleichung 1.4 über in

$$\Delta x = \frac{\Delta S}{0,43 G \mu} \left(1 + \frac{I_S}{I_D}\right) \quad (1.5)$$

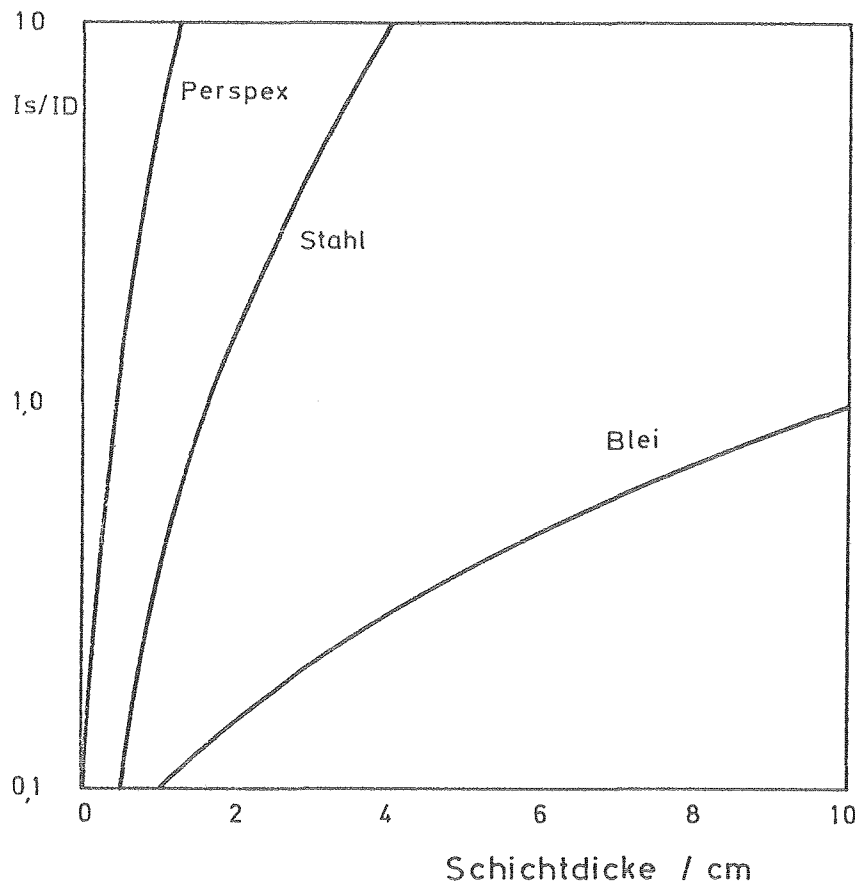


Abb. 1.5 Verhältnis der Intensität gestreuter Neutronen zur Intensität des direkten Neutronenstrahls

Setzt man hierin den kleinsten erkennbaren Schwärzungsunterschied  $\Delta S_{\min}$  ein, so erhält man mit  $\Delta x_{\min}$  den kleinsten nachweisbaren Dickenunterschied. Als Anhaltswert kann  $\Delta S_{\min} = 0,015$  gelten.

$\Delta S_{\min}$  ist abhängig von der Schärfe der Abbildung. In einer scharfen Abbildung steigt an einer Kante des Objektes die Schwärzung des Filmes sprunghaft an. Ist das Bild unscharf, so erfolgt die Änderung der Schwärzung stetig. Dies kann dazu führen, daß kleine Gegenstände (Drähte, Spalte) nicht mehr zu erkennen sind.

Untersucht wurde der Einfluß der Gesamtschwärzung des Films auf die Erkennbarkeit dünner Drähte. Die Versuche zeigen, daß mit steigender

Gesamtschwärzung immer dünnere Drähte nachzuweisen sind. Das gilt jedoch nur so lange, wie die Helligkeit des Leuchtkastens, auf dem die Filme betrachtet werden, ausreicht (48).

In der folgenden Abbildung ist über der Schwärzung des Filmes ein Bildqualitäts-Index nach DIN 54 109/2 aufgetragen. Dieser Index ergibt sich aus dem kleinsten, noch zu erkennenden Draht mit dem Durchmesser  $d$  zu  $BZ = 6 - 10 \log d$ . Als Parameter ist in dem Diagramm die Helligkeit des Bildkastens in willkürlichen Einheiten angegeben.

In der Gleichung 1.4 sind die verschiedenen, den Kontrast beeinflussenden Größen zusammengefaßt. Eine Verbesserung des Kontrastes ist danach möglich durch

- positive oder negative Kontrastmittel
- Vermeidung oder Abschirmung der gestreuten Neutronen und der Gammastrahlung

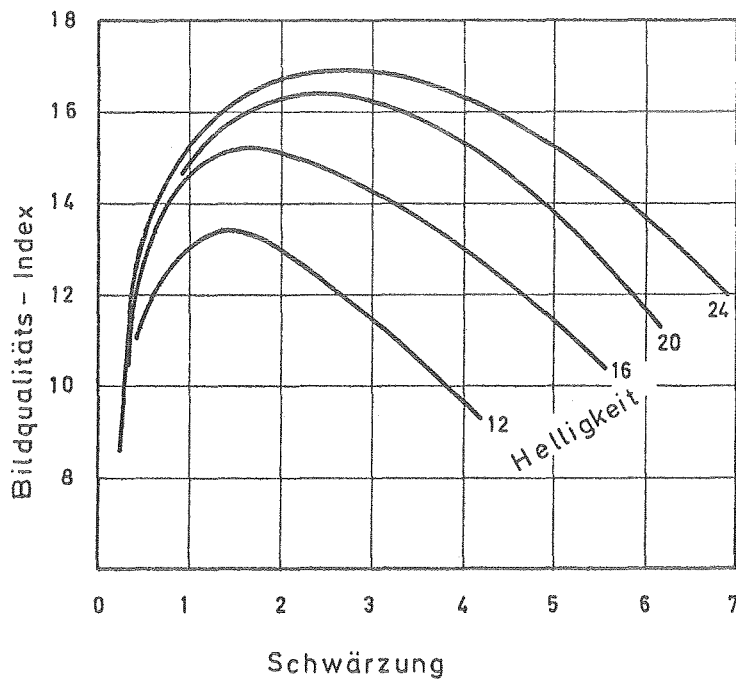


Abb. 1.6 Abhängigkeit des Bildqualitäts-Index von der Schwärzung

Kontrastmittel erhöhen oder vermindern den Gesamt-Wirkungsquerschnitt eines Teils des Objektes, indem diesem Elemente mit entsprechend ho-

hem oder niedrigem Wirkungsquerschnitt zugesetzt oder entzogen werden (152).

Der Einfluß der Gammastrahlung kann durch Bildwandler, die für Gammastrahlen nahezu oder ganz unempfindlich sind, vermindert werden. Zumeist sind solche Bildwandler jedoch auch ziemlich unempfindlich gegen Neutronen. Hier zeigt sich ein Vorteil des Cf-252, dessen Gammastrahlenanteil relativ zur Neutronenemission besonders gering ist.

Gestreute Neutronen können teilweise durch ein Gitter, das zwischen Objekt und Bildwandler angeordnet ist, abgefangen werden. Atkins verwendete als Gitter eine Aluminiumplatte, in die parallele Rillen mit einer Breite von 0,15 mm und einer Tiefe von 3 mm geschnitten waren. Der Abstand der Rillen betrug 0,85 mm. Die Rillen waren mit B-10 gefüllt und mit einem dünnen Film aus organischem Material abgedeckt. Durch solche Gitter erreichte er eine wesentliche Steigerung des Kontrastes (146).

#### 1.5. Unschärfe und Auflösungsvermögen

In einer Neutronen-Radiographie werden die Kanten eines Gegenstandes unscharf abgebildet. Diese Unschärfe kann auf vier Ursachen zurückgeführt werden:

1. Endliche Größe der Neutronenquelle
2. Innerer Aufbau des Neutronen-Bildwandlers
3. Bewegung des Objektes
4. Statistische Verteilung der Neutronen im Neutronenstrahl

Die geometrische Unschärfe  $U_g$  ergibt sich aus dem Abstand  $a$  zwischen der Quelle und dem Objekt, dem Abstand  $b$  zwischen dem Objekt und dem Bildwandler sowie dem Durchmesser  $f$  der Quelle

$$U_g = \frac{b}{a} f \quad (1.6)$$

Um die Unschärfe klein zu halten, wird man Objekt und Bildwandler möglichst nahe aneinanderbringen. Eine weitere Verbesserung des Bildes durch Vergrößerung von  $a$  bzw. Verkleinerung von  $f$  erniedrigt quadratisch den Neutronenfluß in der Bildebene. Bei gegebener Empfindlichkeit des Bildwandlers und vertretbarer Expositionszeit ist die

erreichbare Schärfe von der Neutronenquellstärke abhängig. Hier zeigt sich eine Schwierigkeit bei der Anwendung von Cf-252, die die Entwicklung besonders empfindlicher Bildwandler erfordert.

Eine Steigerung der Empfindlichkeit ist jedoch nicht in beliebigem Umfang sinnvoll. Wird das Bild nur von relativ wenigen Neutronen erzeugt, so ergibt sich eine Unschärfe durch die statistische Verteilung der Neutronen im Neutronenstrahl.

Der innere Aufbau der Neutronen-Bildwandler kann vom Benutzer nicht unmittelbar verändert werden. Die Unschärfe folgt aus der Struktur des Wandlers und der Lage der Strukturelemente. Strukturen sind das Korn der Filme und Szintillatoren, die Zeilen einer Fernsehanlage usw. Im allgemeinen kann man sagen, daß zumeist die empfindlicheren Wandler die größere Unschärfe ergeben.

Die Bewegungsunschärfe ist für die Neutronen-Radiographie zur Zeit noch von untergeordneter Bedeutung.

Liegen zwei Kanten eines Objektes dicht beieinander, so überlagern sich in der Abbildung die Unschärfebereiche. Dies kann dazu führen, daß die Kanten nicht mehr als Einzelobjekte voneinander unterschieden, nicht mehr aufgelöst werden.

Das Auflösungsvermögen ist nicht nur von der Unschärfe der beiden Kanten, sondern auch von dem Kontrast, mit dem die Objekte abgebildet werden, abhängig.

Für die einzelnen Bildwandler-Systeme gibt es verschiedene Definitionen des Auflösungsvermögens, deren Darstellung hier zu weit führen würde (49).

Eine eingehende Untersuchung der Unschärfe und der Überlagerung ihrer Komponenten findet sich unter anderem bei Klasens (46).

Zur Beurteilung von Kontrast und Auflösungsvermögen

Die Qualität einer Neutronen-Radiographieanlage bzw. einer Neutronen-Radiographie ist nur schwer zu definieren und quantitativ zu



bestimmen, da sie durch eine große Zahl von Einflußgrößen festgelegt wird.

In der Röntgen-Radiographie werden daher Testkörper (z. B. Drähte mit verschiedenen Durchmessern), deren Abbildung die Beurteilung und einen Vergleich mehrerer Radiographien ermöglicht, verwendet (14, 50).

Barton schlägt für die Neutronen-Radiographie einen Image Quality Indicator (IQI) vor. Dieser Testkörper sollte bald allgemein eingeführt werden, um nicht durch verschiedene Indikatoren die Möglichkeit zum Vergleich der Arbeiten verschiedener Autoren zu nehmen.

Den IQI gibt es in zwei Ausführungen: als System-IQI zum Test einer Neutronen-Radiographieranlage und als Objekt-IQI, der auf jeder Radiographie mit abgebildet wird.

#### System-IQI

Dieser Indikator soll möglichst viel über die Anlage aussagen. Er besteht aus einem Stapel dünner Aluminiumplatten, die durch vier Bolzen mit Abstandsröhrchen gehalten werden. Der Abstand variiert von 8 mm bis 14,5 mm. Jede Platte trägt einen Teststreifen vom Typ B, und zwar derart, daß die Streifen nebeneinander abgebildet werden. Die dem Bildwandler nächste Platte hält zusätzlich einen Teststreifen vom Typ A.

Der Teststreifen Typ A besteht aus quadratischen Plättchen von unterschiedlichen Absorbermaterialien sowie aus einem Cadmiumblech mit Löchern. Der Abstand der Löcher wird von Loch zu Loch kleiner. Die Plättchen geben Aufschluß über die verschiedenen Einflüsse auf den Kontrast, die Löcher über das Auflösungsvermögen des Bildwandlersystems.

Der Teststreifen B enthält Serien von Plastik- und Cadmium-Drähten sowie von Löchern verschiedener Durchmesser in einem Cadmium-Blech. Er zeigt den Effekt der geometrischen Unschärfe.

## Objekt-IQI

Der Objekt-IQI ist einfacher aufgebaut und entspricht etwa dem Teststreifen A des System-IQI.

Eine Aluminiumplatte (40 x 20 mm) trägt Quadrate aus Absorbermaterial, Kunststoff- und Cadmium-Drähten sowie in einem Cd-Blech Gruppen von Bohrungen.

Es muß üblich werden, wie in der Röntgen-Radiographie auch in der Neutronen-Radiographie stets den Objekt-IQI mit abzubilden.

## 2. Neutronen-Quellen

Unter Neutronen-Quelle soll hier die Kombination aus der eigentlichen Neutronenquelle, der zugehörigen Abschirmung und einem Kollimator verstanden werden.

Für die Neutronen-Radiographie werden Neutronen-Quellen benötigt, an die je nach Anwendungsgebiet verschiedene Anforderungen zu stellen sind bezüglich

Quellstärke  
Neutronen-Energie  
Baugröße.

Mit den zur Zeit bekannten Bildwandlern können bereits Neutronen-Radiographien hergestellt werden, wenn der thermische Fluß in der Bildebene einige  $10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  beträgt. Wünschenswert ist jedoch ein Fluß von mindestens einigen  $10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Hierfür ist, selbstverständlich abhängig vom Kollimationsverhältnis, eine Quellstärke schneller Neutronen von einigen  $10^8 \text{ s}^{-1}$  bzw. einigen  $10^{10} \text{ s}^{-1}$  erforderlich.

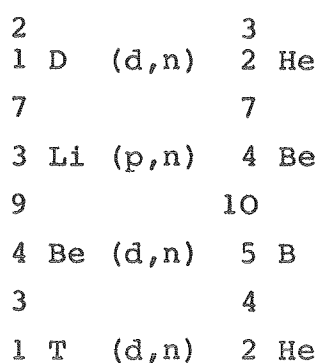
Die Neutronenquellen werden im allgemeinen in drei Gruppen eingeteilt:

Beschleuniger Neutronen-Quellen  
Radioaktive Neutronen-Quellen  
Kernreaktoren.

Hier soll außerdem das spontan spaltende Cf-252, das üblicherweise

zu den radioaktiven Neutronen-Quellen gerechnet wird, gesondert behandelt werden. Außer bei dem Cf-252 werden die Neutronen frei, wenn ein Atomkern mit Teilchen beschossen wird. Geeignete Teilchen können bei anderen Atomzerfällen und Kernspaltungen entstehen oder in Beschleunigern erzeugt werden.

Beschleuniger sind Maschinen, in denen geladene Teilchen in einem elektrischen Feld auf hohe Energie gebracht und dann auf ein Target gelenkt werden. Dabei entstehen die Neutronen durch folgende, häufig benutzte Reaktionen:



In der Tabelle 2.1 sind die wichtigsten Daten einiger, zur Zeit verfügbaren, Beschleuniger Neutronen-Quellen zusammengestellt (56, 57, 77).

Gegenüber den technisch aufwendigen Beschleunigern sind die radioaktiven Neutronen-Quellen wesentlich einfacher, billiger und wartungsfreier gebaut. Diesem Vorteil steht jedoch die im allgemeinen geringe Neutronen-Quellstärke und die fehlende Möglichkeit zum Abschalten der Quelle entgegen.

Die radioaktiven Neutronen-Quellen werden durch innige Vermischung eines Gamma- bzw. Alpha-Strahlers mit einem Targetmaterial hergestellt. Bei den technisch interessanten Quellen wird als Targetmaterial Beryllium verwendet (61).

Sb-Be-Quellen erzeugen Neutronen kleiner Energie (30 keV), die gut zu thermalisieren sind. Wegen der hohen Gammastrahlen-Dosisleistung müssen die Arbeiten jedoch in Heißen Zellen ausgeführt werden. Am-Be eignet sich wegen seiner langen Halbwertszeit gut für Quellen kleiner In-

Tabelle 2.1 Beschleuniger Neutronen-Quellen nach (15)

Hersteller	Type	Teilchen	Target- material	Betriebs- spannung/kV	Strahl- strom mA	Quellstärke Schnelle N./s <sup>-1</sup>
Elliot Automation	PTube	Deuterium	Tritium	120		1 · 10 <sup>11</sup>
20th Century Electronics	NGH 150	Deuterium	Tritium	150	3,5	4 · 10 <sup>11</sup>
Sames	T	Deuterium	Tritium	400	3,0	1 · 10 <sup>11</sup>
Philips	PW5320	Deuterium	Tritium	150	1,5	3 · 10 <sup>10</sup>
High Voltage Eng. Co	Van der Graaf	Deuterium	Beryllium	3 000	0,6	x
Mullard	Linac	Elektron	Beryllium	5 500	0,2	2 · 10 <sup>10</sup>

x Maximaler Fluß 10<sup>10</sup> cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>

Tabelle 2.2 Radioaktive Neutronen-Quellen nach (58, 61)

Quelle	Reaktion	Halbwertszeit	Quellstärke schneller Neutronen $s^{-1} Ci^{-1}$	$\gamma$ -Dosisleistung $mR/h \cdot m$ je $10^6$ Neutronen
Sb - Be	$\gamma, n$	60 d	$1,0 \cdot 10^6$	280
Am - Be	$\alpha, n$	433 a	$2,2 \cdot 10^6$	1
Po - Be	$\alpha, n$	138 d	$2,5 \cdot 10^6$	< 0,1
Ra - Be	$\alpha, n$	1622 a	$1,3 \cdot 10^7$	60
Ac - Be	$\alpha, n$	22 a	$1,5 \cdot 10^7$	8
Th - Be	$\alpha, n$	1,9 a	$2,0 \cdot 10^7$	
Cf-252	sp.Sp	2,6 a	$4,4 \cdot 10^9$	0,06

tensität. Ebenfalls kleine Intensitäten besitzen Po-Be-Quellen. Sie sind jedoch relativ billig (58, 59, 60).

Die Tabelle 2.2 gibt eine Zusammenstellung dieser Quellen wieder, wobei das Cf-252 zum Vergleich angefügt ist.

In Bezug auf die Neutronen-Quellstärke sind Kernreaktoren allen anderen Neutronen-Quellen überlegen. Nachteilig ist jedoch, daß sie ortsgebunden sind. Sie werden zweckmäßig eingesetzt bei der Radiographie von bestrahlten Brennelementen oder, wegen des zur Verfügung stehenden großen Neutronenflusses, bei Versuchen mit epithermischen Neutronen (1, 55).

Farny und Honelle beschreiben einen einfachen, relativ billigen Reaktor, der speziell für die Neutronen-Radiographien entwickelt wurde (54). Der Reaktor arbeitet mit Uranylнитrat-Lösung. Ein BeO-Reflektor führt durch Annäherung an das unterkritische Core die Kritikalität, die durch einen inhärenten negativen Reaktivitätskoeffizienten wieder aufgehoben wird, herbei. Während dieses Vorganges werden  $5 \cdot 10^{16}$  Spaltungen ausgeführt. Bei einem Kollimator mit dem Verhältnis 1 : 40 wurde ein integraler Neutronenfluß in der Bildebene  $3 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$  erreicht.

## 2.1 Kostenabschätzungen

Ein bisher wenig beachtetes Gebiet ist das der Kosten, die eine Neutronen-Radiographie-Anlage verursacht. Sie sind nur schwer allgemein abzuschätzen, da die Anlagen heute zumeist noch in Verbindung mit anderen, die Kosten beeinflussende Einrichtungen betrieben werden. Dazu kommt, daß sich die Einflußgrößen noch stark verändern.

Cutforth veröffentlichte 1970 eine Analyse der Kosten verschiedener Quellen für die Radiographie mit thermischen Neutronen. Er geht davon aus, daß ein unkollimierter thermischer Neutronenfluß von  $10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  erforderlich ist und kommt somit auf die in folgender Tabelle wiedergegebenen Werte (93):

Tabelle 2.3 Kosten verschiedener thermischer Neutronenquellen

Quelle	Anschaffungskosten	Betriebskosten
Sb-Be-Quelle	45.000 §	15.000 § jährlich
Beschleuniger	80.000 §	ca. 100 § je Betriebsstunde
Unterkritischer U-H <sub>2</sub> O-Reaktor	75.000 §	-
Kritischer Reaktor	200.000 § bis 500.000 §	10.000 § jährlich
Cf-252-Quelle	128.000 § <sup>x)</sup>	61.500 § jährlich

x) basierend auf 10.000 § je mg Cf-252

Die Kosten für die Cf-252-Quelle berechnen sich nach folgenden Formeln:

Anschaffung	8.000 § + 12 * Kosten je mg Cf-252
Betrieb	1.500 § + 6 * Kosten je mg Cf-252

Zu den Kosten der Neutronen-Quellen müssen weitere für Abschirmungen, Sicherheitseinrichtungen usw., die individuell sehr verschieden sein können, angesetzt werden.

Cutforth gelangt zu dem Schluß, daß der Kernreaktor kostenmäßig die günstigste Neutronen-Quelle ist. Danach folgen die radioaktiven Quellen und der Beschleuniger.

Heinrich entwickelte eine Methode zur Berechnung der jährlichen Betriebskosten, die den Zerfall der Quelle, die Kapselung und den Transport berücksichtigt. Er betrachtete einen Zeitraum von 10 Jahren (1970 - 1980), in dem der Preis des Cf-252 um den Faktor 5 sinken soll und erhält folgendes Ergebnis:

Für Quellen mit einer Quellstärke unter  $7 \cdot 10^8$  Neutronen je Sekunde ist Pu-238/Be das wirtschaftlichste Material, bei größeren Quellstärken wird Cf-252 wirtschaftlicher (92).

Matfield, der in England an zwei Reaktoren (DIDO, LIDO) arbeitet, gibt folgende Herstellungspreise für Neutronen-Radiographien an. Die Mengenangaben beziehen sich dabei auf Serien gleichartiger Teile (15, 25).

Menge	Preis je Radiographie
1 - 2	18,00 £
3 - 5	8,00 £
6 - 10	6,00 £
10 - 50	5,25 £
50 - 100	4,75 £
über 100	4,50 £

## 2.2 Californium-252

Cf-252 ist ein, heute in den für verschiedene Anwendungszwecke erforderlichen Mengen und zu konkurrenzfähigen Preisen herstellbares, radioaktives Transplutoniumnuklid mit einer Halbwertszeit von 2,6 Jahren. Cf-252 zerfällt unter Emission von Alpha-Teilchen. Der Aufbau des Kerns ist jedoch so instabil, daß neben dem weitgehend die Halbwertszeit bestimmenden Alphazerfall eine Spontanspaltung auftritt, bei der je Milligramm des Nuklids und je Sekunde  $2,4 \cdot 10^9$  Neutronen freigesetzt werden. Diese Neutronen haben eine mittlere Energie von 2,34 MeV. Wenige Milligramm Cf-252 entsprechen in ihrer Neutronenquellstärke modernen Neutronen-Generatorröhren (52, 53).

Das Emissionsspektrum des Cf-252 besteht aus Alpha-Teilchen, Neutronen und Gammaquanten. Beta-Teilchen wurden nicht beobachtet. Für die Neutronenradiographie sind die Alpha-Teilchen ohne Bedeutung, da sie bereits durch wenige Zentimeter Luft absorbiert werden und  $\alpha, n$ -Reaktionen mit leichten Kernen, wie z. B. Be, nur einen unwesentlichen Beitrag zur Neutronenquellstärke leisten würden (27).

Wichtig hingegen sind die Gammaquanten wegen ihres negativen Einflusses auf den Kontrast der neutronenradiographischen Aufnahmen. Das Gammastrahlenspektrum setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen:

- a) Gammastrahlen, die den Alpha-Zerfall begleiten
- b) Gammastrahlen, die die Spontanspaltung begleiten



c) Gammastrahlen der Spaltprodukte.

Insgesamt gehen in der Sekunde von einem Milligramm Cf-252  $1,3 \cdot 10^{10}$  Gammaquanten aus. Setzt man die Gammastrahlenquellstärke in ein Verhältnis zur Neutronenquellstärke, so ergibt sich ein Wert von 5,4 Gammaquanten je Neutron, der wesentlich unter dem anderer Quellen liegt.

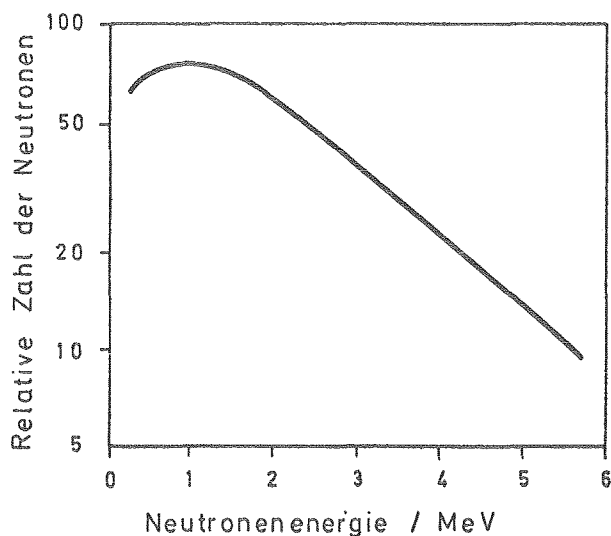


Abb. 2.1 Spaltneutronen-Spektrum des Cf-252

In den folgenden Tabellen sind Spektren der Neutronen und Gammaquanten zusammengestellt. Die Werte geben jeweils für ein Milligramm Cf-252 die Teilchenzahl je Sekunde an.

Tabelle 2.4 Neutronenquellstärke

Energie MeV	Quellstärke $s^{-1} \text{ mg}^{-1}$	Energie MeV	Quellstärke $s^{-1} \text{ mg}^{-1}$
0 - 0,5	$2,8 \cdot 10^8$	5,0 - 6,0	$5,6 \cdot 10^7$
0,5 - 1,0	$3,7 \cdot 10^8$	6,0 - 7,0	$4,0 \cdot 10^7$
1,0 - 2,0	$7,6 \cdot 10^8$	7,0 - 8,0	$1,3 \cdot 10^7$
3,0 - 4,0	$2,8 \cdot 10^8$	8,0 - 10,0	$9,9 \cdot 10^6$
4,0 - 5,0	$1,6 \cdot 10^8$	10,0 - 13,0	$2,2 \cdot 10^6$

Tabelle 2.5 Gammastrahlen-Quellstärke

Energie MeV	Quellstärke s <sup>-1</sup> mg <sup>-1</sup>	Energie MeV	Quellstärke s <sup>-1</sup> mg <sup>-1</sup>
0 - 0,5	4,6 · 10 <sup>9</sup>	3,5 - 4,0	3,0 · 10 <sup>7</sup>
0,5 - 1,0	5,7 · 10 <sup>9</sup>	4,0 - 4,5	1,7 · 10 <sup>7</sup>
1,0 - 1,5	1,7 · 10 <sup>9</sup>	4,5 - 5,0	8,2 · 10 <sup>6</sup>
1,5 - 2,0	7,7 · 10 <sup>8</sup>	5,0 - 5,5	4,9 · 10 <sup>6</sup>
2,0 - 2,5	2,2 · 10 <sup>8</sup>	5,5 - 6,0	1,8 · 10 <sup>6</sup>
2,5 - 3,0	1,1 · 10 <sup>8</sup>	6,0 - 6,5	1,0 · 10 <sup>6</sup>
3,0 - 3,5	5,6 · 10 <sup>7</sup>		

Die Herstellung des Cf-252 erfolgt durch schrittweisen Einfang von Neutronen. Hierbei kann man von Plutonium, speziell Pu-242, oder von Am-241, Am-243, Cm-244, das aus der Abfalllösung von Wiederaufarbeitungsanlagen bestrahlter Brennelemente gewonnen wird, ausgehen.

### 2.3 Neutronen-Quellen mit Cf-252

Nachdem Cf-252 verfügbar geworden war, begann man zunächst mit einfachen Versuchsaufbauten, um die Verwendbarkeit des Cf-252 in der Neutronen-Radiographie zu erproben. Man beschränkte sich dabei auf thermische Neutronen.

Eine derartige Anlage (124) besteht aus einem wassergefüllten Edeltank. Das Wasser übernimmt sowohl die Neutronenmoderation als auch einen wesentlichen Teil der Abschirmung, die allerdings noch durch eine Bleiwand ergänzt wird. In das Wasser wird die Cf-252-Quelle in einem Tauchrohr abgelassen. Ein allseitig wasserdicht geschlossener Divergent-Kollimator ist am Deckel des Tanks befestigt. Der Kollimator ist teilweise mit Blei und Boral belegt. Wismuth-Scheiben reduzieren den direkten Austritt von Gammastrahlen. Zur Optimalisierung kann die Quelle relativ zum Kollimator verschoben werden. Am Kollimatoraustritt stand eine Bildfläche von  $15 \times 15 \text{ cm}^2 = 225 \text{ cm}^2$  zur Verfügung.

Die Quelle enthielt 918 µg Cf-252. Der gemessene Verlauf des thermischen Flusses, aufgetragen über dem Abstand von der Quelle, stimmt erst bei einer Entfernung über 10 cm mit dem berechneten überein.

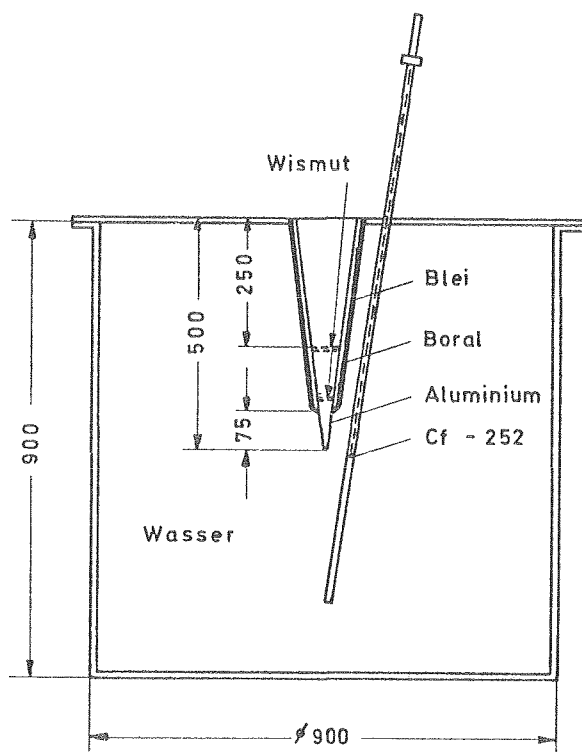


Abb. 2.2  
Neutronen-Ra-  
diographie-An-  
lage mit Cf-252  
nach (124)

In größerer Nähe, z. B. bei 4 cm, war der gemessene Wert mit  $1,4 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  kleiner als der berechnete mit  $2 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

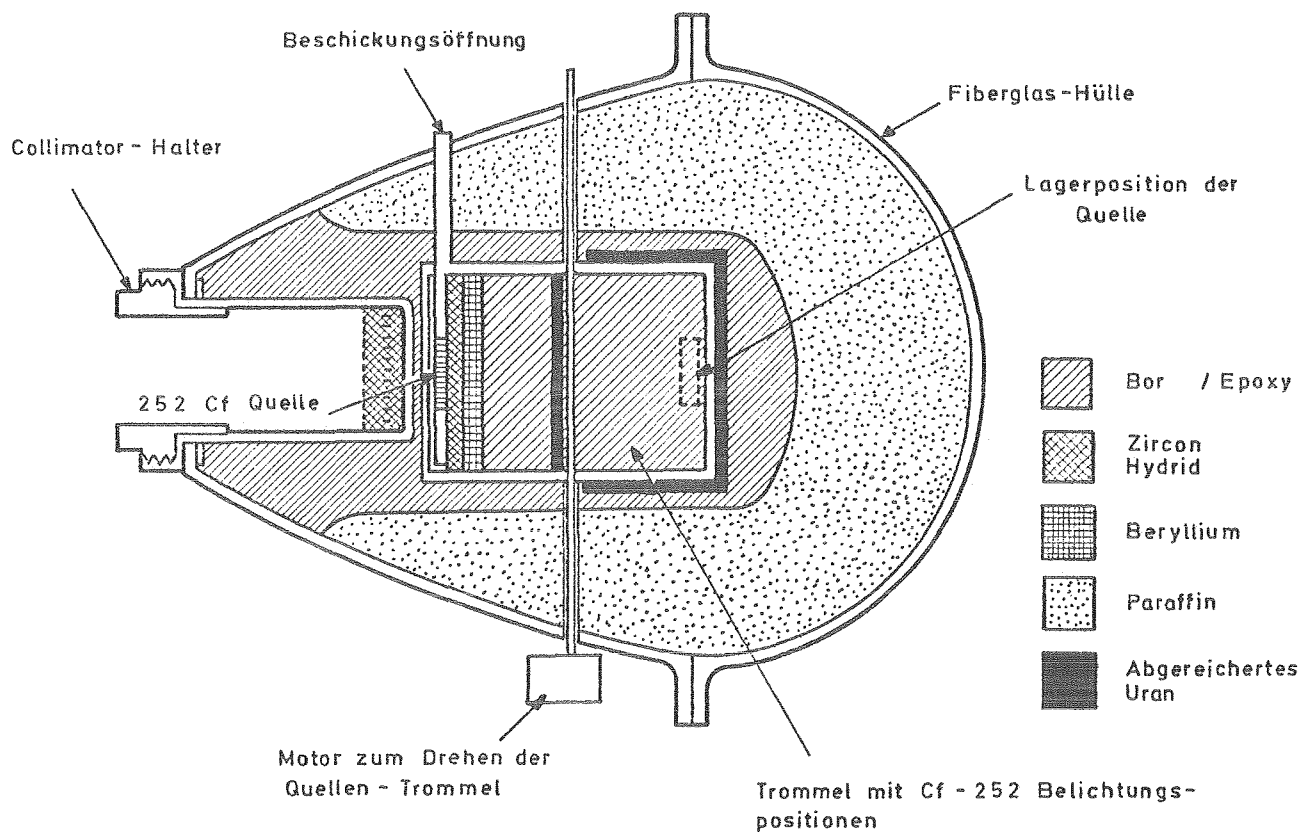
Die Idaho Nuclear Corporation baute einen Lagerbehälter für 2 mg Cf-252. Der zylindrische Behälter hat einen Durchmesser und eine Länge von 1,5 m. Er ist fast vollständig mit boriertem Wasser gefüllt. Die Quelle befindet sich in der Mitte, umgeben von einem kleinen, mit reinem Wasser gefüllten Zylinder. Von vier gegenüberliegenden Seiten aus führen Strahlrohre bis zu Quelle. Diese Strahlrohre können mit den verschiedensten Einbauten, Kollimatoren usw. bestückt werden. Durch Ablassen des als Moderator dienenden reinen Wassers erhält man einen Strahl schneller Neutronen. Die Anlage wird auch zur Aktivierung von Proben für Aktivierungsanalysen verwendet.

Ähnliche Einrichtungen wurden auch von Barton, von Gage, Draper, Bouchey und Day sowie von Cason erstellt (73, 132).

Obwohl der Preis pro Neutron einer Cf-252-Quelle zur Zeit noch höher

liegt als der für Neutronen aus anderen Quellen, kann der Einsatz von Cf-252-Quellen für die Neutronen-Radiographie überall dort von Vorteil sein, wo eine leichte, ortsunabhängige, gut transportierbare Anlage benötigt wird.

Cason hat im Battelle Memorial Institute, Northwest, für 268 µg Cf-252 ein weitgehend optimal ausgelegtes Gerät gebaut. Die Strahlenquelle wiegt ca. 160 kg und ist in ein Fahrgestell eingebaut. Das Gesamtgewicht beträgt ca. 400 kg (65 - 71).



**Abb. 2.3** Querschnitt durch die Strahlenquelle der von Cason gebauten Neutronen-Radiographie-Anlage

Die Abbildung 2.3 zeigt einen Querschnitt durch die Strahlenquelle. Der Behälter ist 660 mm lang und hat einen größten Durchmesser von 560 mm.

Die äußere Hülle des Behälters besteht aus zwei Fiberglasschalen mit einer Wanddicke von 12,7 mm. Fiberglas wurde wegen seines bei hoher Festigkeit geringen Gewichtes und wegen der leichten Formbarkeit gewählt.

Im vorderen Gehäuseteil sitzen zwei konzentrische Metall-Trommeln, von denen die äußere in der Abschirmung fixiert ist, während die innere gedreht werden kann. Die Drehung kann von Hand oder von einem Motor ausgeführt werden.

An die Trommel schließt ein Moderator- und Kollimator-Halter an. Der Halter hat einen Durchmesser von 127 mm und ist mit einem Gewinde versehen.

Zur Abschirmung sind ein Borkarbid-Epoxy-Gemisch, Paraffin und angereichertes Uran vorgesehen. Zirkonhydrid dient als Moderator und Beryllium als Neutronenreflektor.

Die Cf-252-Quelle wird mit einer Stange durch eine Beschickungsöffnung in der inneren Trommel befestigt. Durch Drehen der Trommel wird die Quelle entweder in eine Warteposition oder in die Bestrahlungsposition gebracht. Die Strahlendosisleistung an der Oberfläche des Behälters beträgt bei Betriebsbereitschaft  $200 \text{ mrem h}^{-1}$ , in Wartestellung  $50 \text{ mrem h}^{-1}$ .

Zu der Anlage gehört ein Bedienungspult, von dem aus die Bewegung der Trommel gesteuert wird; Lampen zeigen die Position der Quelle an. Ein Dosisleistungsmesser bestimmt die Strahlendosis im Betriebsraum.

Zur Auslegung des Strahlenbehälters wurden verschiedene Untersuchungen herangezogen bzw. durchgeführt, über die in folgendem kurz berichtet werden soll.

Kok, Artigas und Ray zeigten den Einfluß des Materials der Kapseln, in die das Cf-252 gefüllt wird, auf den erreichbaren Neutronenfluß. Gewöhnlich wird hierzu eine Platin-Rhodium-Legierung verwendet, die bei der Wiedergewinnung von Cf-252-Resten Vorteile aufweist. Berechnungen ergaben jedoch, daß sich bei einer Kapsel aus Aluminium ein um 20 % höher thermischer Neutronenfluß einstellt (74).

Zur Auswahl des Moderatormaterials wurden mit Hilfe des Rechenprogrammes ANISN verschiedene Werkstoffe (Paraffin, C, Be,  $\text{ZrH}_2$ ,  $\text{TiH}_2$ ,  $\text{GeH}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) untersucht. Bestimmt wurde der thermische Neutronenfluß an der Oberfläche von Moderatorerkugeln verschiedener Durchmesser so-

wie die jeweils zu erwartende Reaktion eines Konverterfolienmaterials. Optimale Moderatorbedingungen ergeben sich, wenn beide Größen ein Maximum erreichen.

Metallhydride, insbesondere Zirkonhydrid, erwiesen sich als günstigstes Moderatormaterial. Bei einem Durchmesser der Moderatorkugel von 6,4 cm berechnet sich der thermische Fluß, bezogen auf 268  $\mu\text{g}$  Cf-252, zu  $1,2 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Wasser und Paraffin erfordern einen Kugeldurchmesser von 10 cm und ergeben einen thermischen Fluß von  $7 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Bei Beryllium und Kohlenstoff stellt sich bei einem Kugeldurchmesser von 50 cm ein Fluß von  $1 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ein (63).

Verschiedene Autoren beschäftigen sich auch mit der Möglichkeit, den Neutronenfluß durch eine multiplizierende Anordnung zu vergrößern. An eine derartige Anordnung müssen einige Bedingungen gestellt werden, die ihre Verwirklichung wesentlich erschweren (75, 76, 96):

Die Kosten für die Flußanhebung mit einem multiplizierenden System einschließlich zusätzlicher Sicherheits- und Kontrolleinrichtungen müssen geringer sein als die Kosten für eine entsprechende Menge Cf-252 (91).

Die Anordnung sollte transportabel bleiben.  
Es darf keine Kritikalitätsgefahr bestehen.

Es muß eine Betriebserlaubnis zu erlangen sein, wofür nach Ansicht eines amerikanischen Autors  $k_{\text{eff}} < 0,9$  bleiben muß (93).

Mc. Crossen zeigte, daß durch Zugabe von U-235 zu einem Wassermoderator der maximale Neutronenfluß absinkt, solange  $k < 0,99$ . Erst bei einem hier sicherlich nicht in Betracht kommenden  $k = 0,995$  ergibt sich eine Flußerhöhung um den Faktor 1,5. Durch einen Reflektor aus Wasser kann bei  $k = 0,98$  je nach der Geometrie ein Faktor zwischen 6 und 20 erreicht werden (76).

## 2.4 Kollimatoren

Um eine scharfe Abbildung zu erzeugen, ist es erforderlich, daß jeder Punkt des Objektes nur durch einen Strahl in die Bildebene übertragen wird. Das wird durch Strahlenbündel, die parallel sind oder

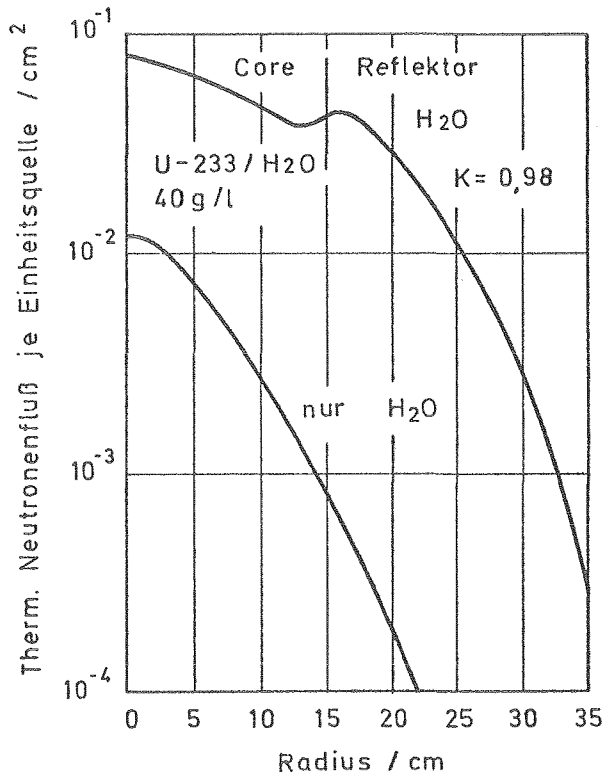


Abb. 2.4

Verlauf des thermischen Neutronenflusses in einem multiplizierenden und einem nicht multiplizierenden System bei  $k = 0,98$  [nach (76)]

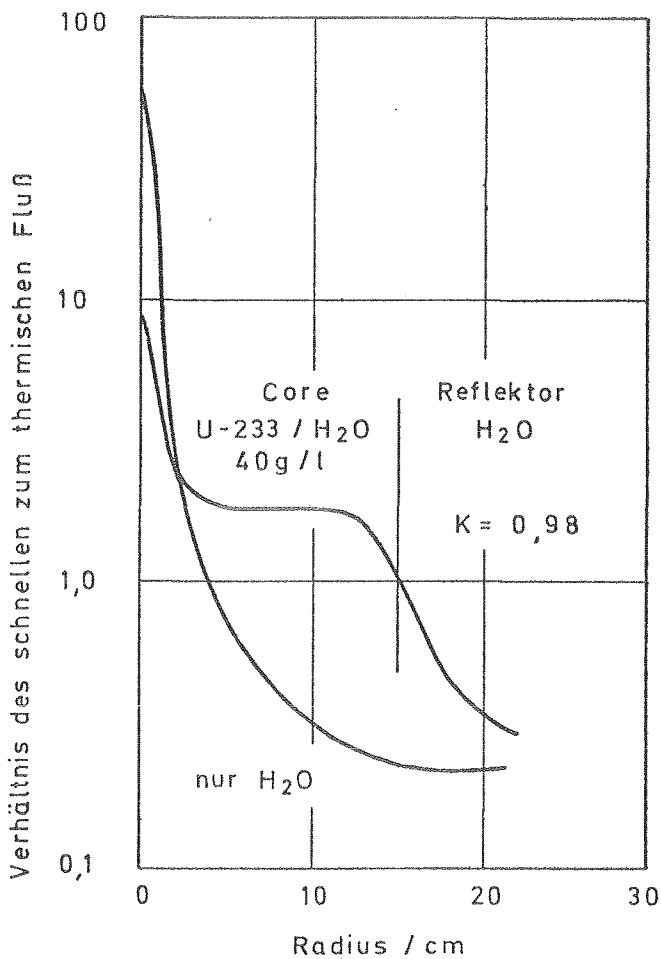


Abb. 2.5

Verhältnis des schnellen zum thermischen Fluß [nach (76)]

von einem Punkt ausgehen, erreicht. Bei divergierenden Strahlen tritt allerdings eine Verzerrung auf, wenn die Bildfläche eben ist, doch ist dieser Effekt bei der üblichen Dimensionierung der Anlagen gering.

Zur Erzeugung der Strahlenbündel dienen Kollimatoren, die ihre Aufgabe zwar nicht exakt, jedoch auf Kosten des Neutronenflusses in der Bildebene mit hinreichender Genauigkeit erfüllen.

Man unterscheidet zwei Kollimator-Typen:

1. Divergent-Kollimator
2. Parallel-Kollimator

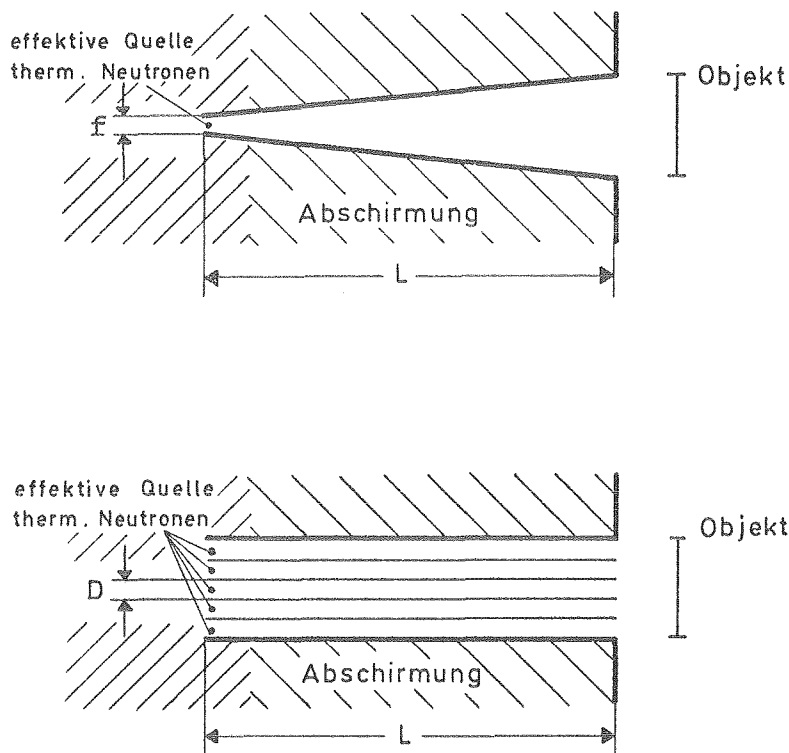


Abb. 2.6 Kollimatoren

Der 1966 von Barton eingeführte Divergent-Kollimator hat eine Strahleintrittsöffnung der Größe  $f$ . Im Abstand  $a$  von dieser Öffnung ist das Objekt angeordnet (79).



Die geometrische Unschärfe ist proportional  $f/a$ . Sie kann durch Vergrößerung von  $a$  leicht vermindert werden.

In erster Näherung berechnet sich der Neutronenfluß am Objekt zu  $\phi = 1/16 (f/a)^2 \phi_0$ , wobei  $\phi_0$  der Fluß an der Eintrittsöffnung ist (15). Die Gleichung zeigt, daß eine größere Schärfe eine wesentliche Senkung des Flusses in der Bildebene bewirkt.

Im allgemeinen wird ein Divergent-Kollimator als ein innen mit Kadmiumfolie ausgelegter Trichter gebaut. Er ist gegenüber dem Parallel-Kollimator einfach herzustellen.

Verwendet man als Neutronenquelle Cf-252, so kann die Eintrittsöffnung bis nahe an das Flußmaximum inmitten des Moderators gebracht werden. Es ist allerdings nicht zweckmäßig, den Kollimator direkt auf die Quelle zu richten, da dann sowohl schnelle Neutronen als auch Gammastrahlen ungehindert auf den Bildwandler treffen und eine Minderung des Kontrastes verursachen. Vielmehr wird man die Quelle seitlich und in einem gewissen Abstand von der Eintrittsöffnung anordnen. Weiter kann der Neutronenfluß vergrößert werden, wenn der Trichter in der Umgebung der Eintrittsöffnung nicht mit Kadmium belegt wird (38).

Kok und Ray (81) haben mit einer 946 mg Cf-252-Quelle den Einfluß der verschiedenen Parameter auf die Bildqualität und Belichtungszeit untersucht und sind zu folgender optimalen Anordnung gekommen:

Kollimator-Länge	a	190 mm
Eintrittsdurchmesser	f	12,7 mm
Kollimator-Verhältnis	a/f	15:1
Luftspalt (nicht mit Cd belegt)		50 mm
Quelle seitlich versetzt		12,7 mm

Der Parallel-Kollimator besteht aus einer Vielzahl paralleler Rohre mit unterschiedlichem, zumeist quadratischem oder rundem Profil.

Der Parallel-Kollimator wurde zuerst 1924 von Soller beschrieben. Theoretisch untersucht wurde er von Morris und später von Rossitto und Polletti (78, 80).

Da die Strahlen parallel verlaufen, müssen das Bild, der Kollimator und die Strahlenquelle die gleiche Größe haben. Eine überall gleichmäßig strahlende Oberfläche dieser Größe ist zwar an einem Reaktor vorhanden, bei Verwendung einer Cf-252-Quelle jedoch kaum zu erzielen. Aus diesem Grund und wegen seiner schwierigen Herstellung wurde der Parallel-Kollimator in der Neutronen-Radiographie mit Cf-252 bisher nicht verwendet.

Ordnet man den Bildwandler unmittelbar hinter dem Kollimator an, so werden die Rohrwandungen als Schatten abgebildet. Morris hat gezeigt, daß diese Schatten praktisch verschwinden, wenn zwischen dem Kollimatoraustritt und dem Bildschirm ein Mindestabstand in der Größenordnung des Anderthalbfachen der Kollimatorlänge eingehalten wird.

In diesem schattenfreien Bereich ist sowohl die geometrische Unschärfe als auch der Neutronenfluß in erster Näherung unabhängig vom Abstand.

Die geometrische Unschärfe ist proportional  $D/L$ , wobei  $D$  der Rohrdurchmesser und  $L$  die Kollimatorlänge ist. Die Unabhängigkeit des Flusses gilt bei einem unendlich ausgedehnten Kollimator, wenn also der Abstandseffekt durch die Strahlung aus weiter außen liegenden Rohren kompensiert wird.

Begrenzt werden die Möglichkeiten des Parallel-Kollimators durch Strahlen, die an den Rohrwänden reflektiert werden oder sie durchdringen.

### 3. Neutronen-Bildwandler

Die dem Neutronenstrom von dem durchstrahlten Objekt eingepprägten Intensitätsunterschiede müssen durch Neutronen-Bildwandler sichtbar gemacht werden. Im wesentlichen bedient man sich dazu der in der Strahlendosimetrie üblichen Verfahren. Erst in den letzten Jahren zeichnet sich die Tendenz ab, spezielle Bildwandler zu entwickeln (99).

Die wichtigsten Größen zur Beurteilung eines Bildwandlers sind die Empfindlichkeit und das Auflösungsvermögen.

In der Tabelle 3.1 sind für einige wichtige Bildwandler der im Mittel für eine befriedigende Abbildung erforderliche integrierte Neutronenfluß und ein Anhaltswert für das Auflösungsvermögen zusammengestellt.

Tabelle 3.1

Bildwandler	integr. Neutronen- fluß in $\text{cm}^{-2}$	Auflösung in $\mu\text{m}$
a) thermische Neutronen		
Szintillator, direkte Belichtung	$1,8 \cdot 10^6$	50
Gd-Einfachkonverter, direkte Belichtung	$2,0 \cdot 10^8$	30
In-Doppelkonverter, direkte Belichtung	$1,0 \cdot 10^8$	100
Au-Aktivierungsfolie	$4,3 \cdot 10^9$	30
In-Aktivierungsfolie	$3,0 \cdot 10^9$	50
Dy-Aktivierungsfolie	$2,6 \cdot 10^8$	50
Spuren-Ätzen	$2,0 \cdot 10^9$	10
Fernsehen	(Fluß = $10^7 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ )	200
b) schnelle Neutronen		
Hochempfindlicher Röntgenfilm in Bakelit	$4,0 \cdot 10^8$	
Hochempfindlicher, lichtempfindlicher Röntgenfilm mit Fluoreszenzschicht	$5,0 \cdot 10^7$	
Cu-Aktivierungsfolie	$1,2 \cdot 10^{10}$	
Spuren-Ätzen	$2,0 \cdot 10^{10}$	

### 3.1 Direkte Belichtungsmethode

Bei dieser Methode wird ein photographischer Film zusammen mit einer oder mehreren Konverterfolien direkt dem Neutronenfluß ausgesetzt. Nachteilig wirkt sich hierbei der Einfluß der die Neutronen begleitenden Gammastrahlung aus (2, 3).

Normale photographische Emulsionen sind empfindlich für Licht und Beta-Teilchen, jedoch fast unempfindlich für Neutronen und Gammastrahlen. Die Emulsionen von Röntgenfilmen ist durch Zusätze für den direkten Nachweis von Gammastrahlen sensibilisiert, neutronenempfindliche Filme

sind nicht im Handel (114).

Zum Nachweis von Neutronen muß der Film daher mit einem Konverter gekoppelt werden. Der Konverter reagiert auf die Neutronenbestrahlung mit sichtbarem Licht oder Beta- bzw. Gammastrahlung.

Als direkte Neutronenkonverter werden verwendet:

1. Szintillatoren
2. Materialien mit prompter  $(n, \gamma)$ -Reaktion
3. Aktivierbare Materialien mit kurzer Halbwertszeit

Die Konverterfolien werden vor, hinter oder vor und hinter dem Film angeordnet. Art und Anordnung der Folie beeinflussen das Auflösungsvermögen und die Empfindlichkeit der Kombination. Im allgemeinen verhalten sich Empfindlichkeit und Auflösungsvermögen gegenläufig.

Der tolerierbare Gammastrahlenanteil ist am größten, wenn kein Röntgenfilm verwendet wird, wenn also als Konverter kein Gamma-Emitter vorgesehen ist.

Im einzelnen sind die Eigenschaften der Konverter von der Neutronenenergie abhängig.

### 3.1.1. Thermische Neutronen

Die Bildwandlung thermischer Neutronen ist besonders ausführlich behandelt worden. Untersucht wurden die verschiedenen Einflüsse auf die Empfindlichkeit und das Auflösungsvermögen:

Folienmaterial

Folienanordnung

Foliendicke

Neutronenfluß

Fotographischer Film

Im folgenden werden diejenigen Kombinationen angegeben, die sich als optimal erwiesen haben.

Für die Konversion thermischer Neutronen sind die Szintillatoren mit B-10 oder Li-6 vermischt. In der Literatur werden verschiedene Zusam-

mensetzungen angegeben. Beispiele sind:

1. 1 Teil  ${}^6\text{LiF}$  (96 % Anreicherung), 4 Teile Zn S (Ag) jeweils als  
Pulver
2. 1 Teil  ${}^6\text{LiF}$ , 2 Teile Zn S + 0,01 % Ag, 1 Teil Perspex

Berger berichtet über die Abhängigkeit der Empfindlichkeit der Szintillatoren vom Neutronenfluß. Für diese Messungen wurden die Szintillatoren mit Neutronenflüssen zwischen  $3 \cdot 10^2 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  und  $3 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  bis zu einer Fluenz von jeweils  $6 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2}$  bestrahlt und die entstandene Filmschwärzung bestimmt. Die Schwärzung in Abhängigkeit vom Neutronenfluß weist bei  $3 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  ein ausgeprägtes Minimum auf. In dem Bereich um  $3 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  sind Szintillatoren also am unempfindlichsten (101).

Tabelle 3.2 nach (1)

Isotope	Relativer Anteil in %	Wirkungsquerschnitt in barn für 0,025 eV	Reaktion	Halbwertszeit
Rh-103	100	12	Rh-103 (n) Rh-104m	4,5 min
		140	Rh-103 (n) Rh-104	44 sec
Ag-107	51,35	44	Ag-107 (n) Ag-108	2,3 min
Ag-109	48,65	2,8	Ag-109 (n) Ag-110m	270 d
		110	Ag-109 (n) Ag-110	24,2 sec
Cd-113	12,26	20 000	Cd-113(n, $\gamma$ )Cd-114	
In-115	95,77	155	In-115 (n) In-116m	54,1
		52	In-115 (n) In-116	13 sec
Sm-149	13,8	40 800	Sm-149(n, $\gamma$ )Sm-150	
Sm-152	26,8	140	Sm-152 (n) Sm-153	47 h
Gd-155	14,73	61 000	Gd-155(n, $\gamma$ )Gd-156	
Gd-157	15,68	240 000	Gd-157(n, $\gamma$ )Gd-158	
Dy-164	28,1	500	Dy-164 (n) Dy-165m	1,25 min
			Dy-164 (n) Dy-165	140 min

Die Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die verschiedenen für die direkte Belichtungsmethode untersuchten Konverterfolien.

Tab. 3.3.: Vergleich verschiedener Konverter für thermische Neutronen <sup>3</sup> nach (1, 115)

Konvertermaterial <sup>1</sup> , Dicke und Lage (bezügl. Film)	Auflösungsvermögen <sup>2</sup>		Untersuchte Konverter- dicken	Neutronen Be- strahlungszeit in Minuten (für Kodak-AA)	Relative Empfind- lichkeit	Bemerkungen
	Cadmium- Teststück	Gadolinium- Teststück				
12 Gd (Rück)	28	9,6	6- 48	11,1	0,54	
72 Cd (Rück)	28	-	24-720	15,1	0,4	
72 Rh (Rück)	48	-	72-240	17,1	0,35	
120 In (Vorder)	48	-	48-720	23	0,26	Metallfolien
240 Dy (Rück)	48	-	120-240	8,1	0,75	
120 Ag (Vorder)	48-86	-	120-720	21,75	0,28	
Li <sup>6</sup> F-Pulver (Rück)	28	24	60	25	0,24	Gepreßtes Li <sup>6</sup> F- Pulver 95,6 % anger.
B-10, ZnS (Ag) (Rück)	28	72	24	8	0,75	B-10 Schicht mit Phosphor bedampft.
Li-6, ZnS (Ag) (Rück)	48	-	190	0,1	60	
Li-6, ZnS (Ag) (Rück)	48	-	1.440	0,1	60	
Li-6, Glas (Rück)	48	-	1.800	1	6	Mit Cer aktivier- tes Silikatglas 2,5 % Li (96 % an- ger. Li <sup>6</sup> ).
B-10, ZnS (Ag) (Rück)	48	-	280	1	6	
240-240 Rh	48-86	-	-	4,3	1,4	
480-720 In	86	-	-	5,5	1,1	
430-430 Ag	86	-	-	7,5	0,7	
240-480 Cd	480	-	-	6	1,0	Doppelkonverter
6-48 Gd	28	9,6-11	-	4,8	1,2	
240 Rh-48 Gd	28	24 -72	-	3,85	1,5	

<sup>1</sup> Zahl vor Element bedeutet Konverterdicke in  $\mu\text{m}$

<sup>2</sup> Zahlen in den Spalten sind die maximal auflösbaren Abstände in  $\mu\text{m}$  zwischen den Löchern des Teststückes

<sup>3</sup> Neutronenfluß  $3 \times 10^5 \text{ n/cm}^2\text{sec}$

Hawkesworth berichtet über seine Untersuchung zu den Eigenschaften verschiedener Konverter-Film-Kombinationen (100). Als Konverter verwendet er:

1. NE 421-Granulat; hergestellt von der Nuclear Enterprises (UK) Ltd. of Edinburgh; bestehend aus einem Gemisch von 1 Teil  $^6\text{Li-F}$ , 2 Teile Zn S mit 0,01 % Ag (Teilchen kleiner  $15\mu\text{m}$ ), 1 Teil Perspen; Dicke 0,65 mm
2. NE 905-Glas; ebenfalls hergestellt von der Nuclear Enterprises (UK) Ltd. of Edinburgh; Silikatglas mit 27 %  $^6\text{Li-Oxyd}$  und 2 % Ceroyd als Szintillator; Dicke 1,3 mm
3. Gadolinium-Folie mit einer Dicke von 0,025 mm

Mit diesen Konvertern kombiniert er die wichtigsten der in Europa erhältlichen Filme folgender Hersteller:

1. Ilford Ltd, Essex UK
2. Kodak Ltd. London
3. Eastman-Kodak, USA
4. Agfa-Gevaert, Mortsel

Aus den Messungen ergeben sich 36 Diagramme, in denen über der Neutronen-Fluenz die erzielte Filmschwärzung aufgetragen ist.

Vergrößerungen dieser wichtigen Diagramme können bezogen werden von M.R. Hawkesworth, Department of Physics, University of Birmingham.

Ebenfalls nach Hawkesworth sind in der folgenden Tabelle die Unschärfe und der tolerierbare Gammastrahlenanteil zusammengestellt.

Konverter	Dicke mm	Tolerierbarer Gamma- strahlenanteil in R je Neutron·cm <sup>-2</sup>	Unschärfe <sup>x)</sup> μm
NE 421-Granulat	0,65	$1,6 \cdot 10^{-8}$	1.000
NE 905 Glas	1,3	$4 \cdot 10^{-9}$	500
Gadolinium- Folie	0,025	$8 \cdot 10^{-10}$	100

x) Abstand zwischen dem 10 % und 90 % Punkt, bei der Abbildung einer Schneide

Ähnliche Untersuchungen für verschiedene Metall-Konverter haben Blanks und Morris durchgeführt (116).

Von Barton und Klozar wurde der Einfluß der Temperatur auf die Leistungsfähigkeit eines Li-6-Szintillators untersucht. Verwendet wurde ein Szintillator aus 1 Teil LiF (96 % Li-6) und 4 Teilen Zn S (102).

Die Empfindlichkeit des Szintillators ist bei  $-35^{\circ}\text{C}$  (Kühlung mit Trockeneis) am größten. Die relative Steigerung der Empfindlichkeit, bezogen auf Werte bei  $+20^{\circ}\text{C}$ , nimmt mit abnehmendem Neutronenfluß zu.

Abhängigkeit der Filmschwärzung von der Szintillatortemperatur und dem Neutronenfluß; Neutronenfluenz konstant =  $3 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$ :

Neutronenfluß $\text{s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$	Szintillatortemperatur	
	$+20^{\circ}\text{C}$	$-35^{\circ}\text{C}$
	Filmschwärzung	
$10^5$	1,7	1,9
$10^4$	1,2	1,6
$10^3$	0,5	1,7

Durch die Kühlung des Szintillators ist eine Steigerung der Empfindlichkeit um den Faktor 3 möglich. Dieses Ergebnis könnte für Neutronen-Radiographie-Anlagen mit Cf-252 als Neutronenquelle wichtig sein.

### 3.1.2. Kalte Neutronen

Zum Nachweis kalter Neutronen werden die gleichen Konverter-Film-Kombinationen wie für thermische Neutronen verwendet. Die Empfindlichkeit von Szintillatoren ist infolge des größeren Einfangquerschnitts von Li-6 bzw. B-10 für kalte Neutronen etwas höher. Mit kalten Neutronen ist ein größeres Auflösungsvermögen als mit thermischen Neutronen zu erzielen (29).



### 3.1.3. Schnelle Neutronen

Schnelle Neutronen können durch elastische Streuung am Wasserstoff nachgewiesen werden, wobei das Proton die Filmschwärzung verursacht. Konvertermaterialien für schnelle Neutronen enthalten daher viel Wasserstoff (34).

Tochilin untersuchte Plastik-Szintillatoren wie p-Terphenyl und organische Kristalle wie Anthracen und vergleichbare Materialien (112).

### 3.2. Aktivierungsmethode

Bei der Aktivierungsmethode wird eine Folie aus einem aktivierbaren Material dem Neutronenfluß ausgesetzt und nach der Bestrahlungszeit auf einen photographischen Film gedrückt. Hierdurch wird der Einfluß der die Neutronen begleitenden Gammastrahlung ausgeschaltet.

Die Aktivität einer dünnen Folie im Neutronenfluß berechnet sich zu

$$A = \phi \Sigma_{\alpha} (1 - e^{-0,693 t/T}) \quad (3.1)$$

A	s <sup>-1</sup> cm <sup>-3</sup>	Aktivität
$\phi$	s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>	Neutronenfluß
$\Sigma_{\alpha}$	cm <sup>-1</sup>	makroskopischer Absorptionsquerschnitt
T	s	Halbwertszeit des Folienmaterials
t	s	Bestrahlungszeit

Nach dieser Gleichung ist die erzeugte Aktivität dem Neutronenfluß direkt proportional, d. h. ein dem Fluß aufmoduliertes Bild wird unabhängig von den anderen Parametern unverfälscht wiedergegeben.

Die Aktivität nimmt mit der Bestrahlungszeit nicht beliebig zu, sondern erreicht einen Grenzwert. Nach einer Halbwertszeit sind 50 % und nach 6 Halbwertszeiten 98,5 % des Grenzwertes erreicht. Dieser Sättigungseffekt macht es bei der Aktivierungsmethode unmöglich, einen kleinen Neutronenfluß durch längere Bestrahlungszeit auszugleichen.

Nach Abschluß der Bestrahlung fällt die Aktivität wieder exponentiell

ab. Um eine Auswertung der Folie zu gestatten, darf die Halbwertszeit nicht zu gering sein.

Der Vorteil der Aktivierungsmethode gegenüber der Direktbelichtungsmethode liegt in der Unabhängigkeit von Gammastrahlung. Nachteilig wirken sich die geringe Auflösung, die Sättigung und die längere Bearbeitungszeit, bedingt durch die Übertragung der Folie auf den Film, aus.

Die Tabellen 3.4 bis 3.6 geben einen Überblick über die Materialien der Folien für verschiedene Neutronenenergiebereiche.

Im allgemeinen wird die Seite der Folie, die der Neutronenquelle zugewandt war, auf den Film gelegt.

Die erzielbare Filmschwärzung nimmt zunächst mit der Foliendicke zu, erreicht aber wegen der Selbstabsorption einen Maximalwert. Die optimale Foliendicke (1) für thermische Neutronen liegt für einige wichtige Materialien bei

Gold	0,125 mm
Indium	0,5 mm
Dysprosium	0,25 mm

Mit zunehmender Foliendicke sinkt im allgemeinen das Auflösungsvermögen.

Die Tabelle 3.7 zeigt, daß unter den untersuchten Materialien Gold die beste Auflösung ergibt, während Dysprosium mit der geringsten Belichtungszeit auskommt.

### 3.3. Methode des Spuren-Ätzens

Energiereiche, schwere Teilchen erzeugen in einem Festkörper längs ihrer Bahn bleibende Schädigungen. Die geschädigten Stellen werden von chemischen Ätzmitteln stärker angegriffen als ungeschädigte. Aus den zunächst nur einen Bereich von etwa  $40 \text{ \AA}$  Durchmesser umfassenden Spuren werden sichtbare Ätzgruben mit 1 bis  $10 \text{ \mu m}$  Durchmesser (108, 109).

Tab. 3.4 Konverterfolienmaterialien für die Aktivierung durch thermische Neutronen

Material	Isotop	Anteil %	Wirkungsquerschn. barn	Reaktion	Halbwertszeit
Rhodium	Rh-103	100	12	$^{103}\text{Rh}(n)^{104\text{m}}\text{Rh}$	4,5 m
			140	$^{103}\text{Rh}(n)^{104}\text{Rh}$	44 s
Silber	Ag-107	51,35	44	$^{107}\text{Ag}(n)^{108}\text{Ag}$	2,3 m
	Ag-109	48,65	2,8	$^{109}\text{Ag}(n)^{110\text{m}}\text{Ag}$	270 d
Indium	In-115	95,77	155	$^{115}\text{In}(n)^{116\text{m}}\text{In}$	51,1 m
			52	$^{115}\text{In}(n)^{116}\text{In}$	13 s
Dysprosium	Dy-164	28,1	500	$^{164}\text{Dy}(n)^{165}\text{Dy}$	1,25 m
			2.000	$^{164}\text{Dy}(n)^{165}\text{Dy}$	140 m
Gold	Am-197	100	96	$^{197}\text{Au}(n)^{198}\text{Au}$	2,7 d

Tab. 3.5 Konverterfolienmaterialien für die Aktivierung durch epithermische Neutronen

Material	Resonanzenergie (Hauptresonanz)	Isotop	Halbwertszeit
Indium	1,46 eV	In-115	54 m
Gold	4,9 eV	Au-197	2,7 d
Wolfram	18,8 eV	W -186	24 h
Lanthan	73,5 eV	La-139	40 h
Mangan	337 eV	Mn- 55	2,56 h

Tab. 3.6 Konverterfolienmaterial für die Aktivierung durch schnelle Neutronen

Material	Isotop	Anteil % am Normalmaterial	Wirkungsquerschnitt in mbarn		Reaktion	Halbwerts- zeit
			1 MeV	3 MeV		
Rhodium	Rh-103	100	450	800	$^{103}\text{Rh}(n,n')^{103m}\text{Rh}$	57 min
Cadmium	Cd-111	12,7	130	300	$^{111}\text{Cd}(n,n')^{111m}\text{Cd}$	48,7 min
Indium	In-115	95,7	55	340	$^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$	4,5 h
Phosphor	P - 31	100		80	$^{31}\text{P}(n,p)^{31}\text{Si}$	2,65 h
Schwefel	S - 32	95,02		150	$^{31}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$	14,3 d

Tabelle 3.7 Daten der wichtigsten Folien für die Aktivierungsmethode

Material	opt. Dicke	untersuchte Dicke	Bestrahlungszeit <sup>x)</sup>	Auflösung
Gold	0,076 mm	0,076 - 0,25 mm	240 min	0,03 mm
Indium	0,05 mm	0,05 - 0,76 mm	163 min	0,05 mm
Dysprosium	0,25 mm	0,125 - 0,25 mm	14,6 min	0,05 mm

x) Zeit zur Erzielung der Schwärzung 1,5 auf AA Film bei  $\phi = 3 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Das Verfahren wurde 1962 von Fleischer, Price und Walker erarbeitet und in den folgenden Jahren weiterentwickelt. Es wird heute unter anderem zur Dosimetrie und Autoradiographie verwendet (110, 117)

Als Festkörper kommen für die Neutronen-Radiographie Folien aus Polycarbonat (Makrofol E von Bayer, Lexan von Kodak) oder aus Cellulose-Nitrat bzw. Cellulose-Acetat in Frage. Verwendet werden können jedoch auch andere Filme aus elektrisch isolierendem Material (107).

Mit dieser Methode können bei allerdings geringer Empfindlichkeit schnelle Neutronen direkt nachgewiesen werden. Schnelle Neutronen beschleunigen bei einem Stoß die Kerne des Sauerstoffes bzw. Kohlenstoffes, die ihrerseits dann die gewünschten Schäden hervorrufen. Eine größere Empfindlichkeit erreicht man mit einer Konverterfolie aus Neptunium. Neptunium hat für schnelle Neutronen einen hohen Spaltquerschnitt.

Zum Nachweis thermischer Neutronen verwendet man Konverterfolien aus Uran (93 % U-235) oder aus Bor bzw. Lithium. Hierbei erhält man je einfallendes Neutron und je Barn Wirkungsquerschnitt  $1,16 \cdot 10^{-5}$  Spuren (111).

Da Gammastrahlen in der Folie kaum absorbiert werden, ist der Einfluß einer die Neutronenstrahlung begleitenden Gammastrahlung auf den Kontrast des Bildes gering.

Gegenüber der Aktivierungsmethode hat dieses Verfahren den Vorteil, daß die einmal erzeugten Spuren nicht wieder verschwinden. Es tritt also keine zeitliche Sättigung auf. Daher kann die Bestrahlungszeit beliebig lange ausgedehnt werden; es können also bei gegebenem Neutronenstrom besonders stark absorbierende Teile abgebildet oder, was noch wichtiger erscheint, auch mit kleinstem Neutronenfluß ( $10^3 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ) Radiographien angefertigt werden.

Die Zahl der Spuren je Flächeneinheit ist über mindestens 4 Dekaden genau proportional zur Zahl der einfallenden Neutronen. Hierdurch ist es z. B. möglich, die jeweilige Zahl der Spuren direkt einer bestimmten Dicke des abgebildeten Objektes zuzuordnen, was bei photographi-

schen Verfahren wegen der gekrümmten Schwärzungskurve nicht möglich ist.

Zur Erzeugung eines Bildes, das mit einem gut belichteten Film verglichen werden kann, sind unter Verwendung einer 0,025 mm dicken U-235 (93 %)-Folie und einer gleich dicken Folie aus Cellulose-Nitrat ca.  $2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$  Neutronen erforderlich. Weniger Neutronen geben gesprengelte Bilder, mehr vermindern den Kontrast. Für schnelle Neutronen ermittelte Berger mit einer Kodak-Pathé CA 8015 Cellulose-Nitrat-Folie eine erforderliche Fluenz von  $2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  (111).

Die Methode des Spuren-Ätzens ergibt Bilder hoher Auflösung. Diese liegt, wenn man nur den Einfluß der Folie betrachtet, in der Größenordnung von 10  $\mu\text{m}$ , dabei wird die Reduzierung auf 5  $\mu\text{m}$  für möglich gehalten.

Die bestrahlten Folien können bei Tageslicht verarbeitet werden. Makrofol E wird 1 h bis 3 h in einer 28 % KOH-Lösung bei 60 °C geätzt; Cellulose-Nitrat hingegen nur ca. 5 min in einer 6,5 n NaOH-Lösung bei 55 °C (107, 111).

Die Ätzgruben sind auf der Folienfläche nur als milchige Schicht zu sehen. Das Bild wird sichtbar durch Projektion oder photographisches Umkopieren. Es kann ferner durch elektrische Entladungen auf eine Aluminiumfolie übertragen werden, wobei jedoch die Auflösung abnimmt. Für Detailuntersuchungen eignet sich auch die Interferenz-Mikroskopie.

Eine besondere Anwendung des Verfahrens ergibt sich, wenn die gesuchte Information in dem Konvertermaterial enthalten ist. Auf diese Weise kann z. B. die Vermischung von U-236 mit U-238 im Querschnitt eines Brennstabes dargestellt werden.

### 3.4 Verwendung phosphoreszierender Schichten

Durch ionisierende Strahlen können in geeigneten Kristallen zunächst freie Elektronen in Gitterfehlstellen festgesetzt wer-

den. Diese bleiben dort solange gebunden, wie der Kristall nicht über die Temperatur, bei der er bestrahlt wurde, erhitzt wird. Erwärmt man ihn jedoch darüber, so gibt er die gespeicherte Energie als Licht ab. Die Lichtemission ist der Strahlendosis proportional, die Lichtintensität ist um so größer, je schneller der Kristall erwärmt wird (99).

Zur Neutronendosimetrie werden bisher hauptsächlich aktivierte  $^6\text{LiF}$ -Kristalle verwendet (Harshaw Chemical Company, Cleveland). Diese sind besonders empfindlich für thermische Neutronen und relativ unempfindlich gegenüber Gammastrahlen. Zur Neutronenradiographie wurden Versuche mit diesen Schichten gemacht, die entweder aus Einkristallen geschnitten oder aus Pulver gefertigt waren.

Die Anwendung dieser phosphoreszierenden Schichten gleicht der der Übertragungsmethode. Vorteilhaft ist hierbei jedoch, daß keine Sättigung auftritt. Es ist daher möglich, auch mit kleinen Neutronenflüssen Radiographien zu erzeugen. Erhebliche Schwierigkeiten bereitet wegen der erforderlichen Erhitzung die Übertragung des Bildes auf einen photographischen Film.

Obwohl die Verwendung phosphoreszierender Schichten in der Neutronenradiographie noch ein gewisses Entwicklungspotential hat, wird zur Zeit kaum damit gearbeitet.

### 3.5 Fernsehübertragung

Die in der Neutronenradiographie, insbesondere in der Neutronenradiographie mit Cf-252 verwendeten Neutronenflüsse sind so klein, daß ihr Nachweis mit den bisher beschriebenen Methoden nur durch Akkumulation der Wirkungen über einen längeren Zeitraum möglich ist. Hierdurch ergibt sich eine geringe Effektivität der Anlagen, ausserdem ist die Verfolgung bewegter Vorgänge unmöglich (1, 118).

In der Kernstrahlenmeßtechnik wird durch Kopplung eines Szintillatorkristalls mit einem Sekundärelektronenvervielfacher ein anderer Weg beschritten, der bei entsprechender Konstruktion des Vervielfachers auch für die Radiographie gangbar ist. Wichtig ist, daß der Vervielf-

facher das Bild nicht verzerrt.

Von Berger, Green und Niklas wird eine Bildverstärkerröhre beschrieben, die auf der dem Objekt zugewandten Seite eine Konverterfolie trägt. Einfallende Neutronen lösen aus dieser Folie Elektronen, die dann durch eine elektrische Spannung von 33 KV beschleunigt werden. Die Elektronen treffen auf eine Szintillatorschicht (Zn Cd 5 (Ag)) an der anderen Seite der Röhre. Die Lichtstärke auf diesem Szintillator reicht bei einem thermischen Neutronenfluß von  $10^7 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  aus, um das Bild direkt betrachten und mit einer normalen Fernsehaufnahmeröhre (Vidikon 7735 A) aufnehmen zu können. Die Lichtausbeute ist für Neutronenflüsse zwischen  $10^4 \text{ s}^{-2} \text{ cm}^{-2}$  und  $2,5 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  linear vom Fluß abhängig, in diesem Bereich wird also der Kontrast nicht verfälscht (103, 104, 105, 106).

Die beschriebene Röhre mit eingebauter neutronenempfindlicher Schicht wurde speziell für die Neutronenradiographie entwickelt. Verwendet werden jedoch auch handelsübliche Lichtverstärkerröhren, wie sie z. B. in den Nachtsehgeräten der Firma Eltro GmbH & Co., Heidelberg, eingesetzt werden. Mit einer solchen Röhre wird eine 2.000-fache Lichtverstärkung erreicht. Vor die Röhre muß zur Bildwandlung ein Szintillator geschaltet werden. Spowart beschreibt eine derartige Anlage, die zur Lichtverstärkung eine wassergekühlte Röhre EMI Type 9694 verwendet (119).

Manley gibt einen Bildverstärker an, mit dem Verstärkungsfaktoren von  $10^6$  bis  $10^8$  erreicht werden. Es handelt sich um einen Kanal-Sekundär-Elektronenvervielfacher, bei dem anstelle der einzelnen Dynoden des herkömmlichen SEV hochohmig beschichtete Glasrohre treten, an die die Beschleunigungsspannung in axialer Richtung angelegt wird (103, 164).

Das Auflösungsvermögen bei einer Fernsehübertragung wird von dem Zeilenraster bestimmt. Bezogen auf ein Abbildungsfeld von 6,3 cm Durchmesser und 525 Zeilen je Bild ergibt sich eine vertikale Auflösung von 0,13 mm und eine horizontale Auflösung von 0,21 mm.

Bisher reichte der Kontrast aus, um im günstigen Fall einen Unter-



schied in der Materialdicke von 5 % zu erkennen.

### 3.6 Sonderverfahren

Neben den bisher beschriebenen Methoden wurden einige Verfahren beschrieben oder erprobt, die speziell den Erfordernissen der Neutronenradiographie angepaßt sind.

Watts verwendete ein Drahtgitter, das dicht neben einer Schicht aus B-10 angeordnet ist. Zwischen den einzelnen Drähten wird eine hohe elektrische Spannung aufrecht erhalten. Alphateilchen, die durch Neutroneneinfang im B-10 erzeugt werden, ionisieren das Gas zwischen den Drähten, so daß es zu einer Glimmentladung kommt. Das so entstehende Lichtbild wird fotografiert. Die Auflösung des Gerätes beträgt 1 mm. Zur Erzeugung eines Bildes wird ein integrierter Neutronenfluß von einigen  $10^6 \text{ cm}^{-2}$  benötigt (1).

Parks, Brown und Harmer beschreiben einen Bildwandler, der zum Nachweis schneller Neutronen vorgesehen ist. Zur Vergrößerung der Empfindlichkeit machten sie die Szintillatorschicht des Wandlers mehrere Zentimeter dick. Um trotzdem eine ausreichende Auflösung zu erhalten, unterteilten sie den Szintillator in einzelne Fasern, die so angeordnet sind, daß gestreute Neutronen gedämpft werden (159).

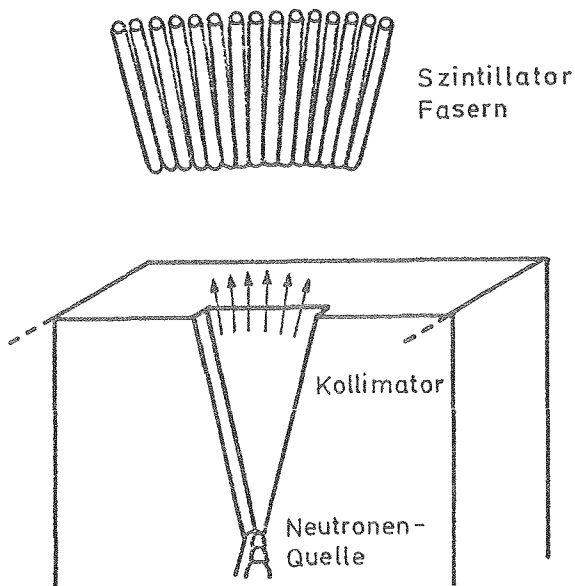


Abb. 3.1

Schema einer Neutronenradiographie-Einrichtung mit Bildwandler nach Parks, Brown und Harmer

#### 4. Anwendungsmöglichkeiten für die Neutronenradiographie

Die Anwendungsmöglichkeit der Neutronenradiographie für ein bestimmtes Objekt ergibt sich primär aus den Neutronen-Wirkungsquerschnitten der darin enthaltenen Elemente. Sie wird jedoch beschränkt durch folgende Einflüsse:

Durchdringungsvermögen,  
Kontrastminderung: Neutronenstreuung und Sekundärgammastrahlen,  
Auflösungsvermögen,  
Strahlenschädigung des Objektes.

Bei verschiedenen Autoren finden sich Listen über angenommene und erwiesene Anwendungsfälle.

##### Reaktor Technologie

Untersuchung auf Homogenität, Kontinuität und Giftelemente;  
Untersuchung von Abschirmungen auf Lunker;  
Lokalisierung von organischen Resten in Metallrohren usw.;  
Untersuchung dicker Brennelemente;  
Studium von Einschlüssen in Metallen, z. B. Wasser, Bor, Zirkon;  
Spaltstoffflußkontrolle (13).

##### Raketen und Sprengstoff Technologie

##### Werkstoff-Untersuchungen

Intermetallische Verbindungen (123)  
Gas-Metall Diffusion (121, 139)

##### Kriminalistik (32)

##### Untersuchung von Kunststoffen

Biologie und Medizin (Beispiele aus diesem Gebiet werden in einem besonderen Abschnitt behandelt).

Für die Neutronenradiographie wurden bisher zumeist Kernreaktoren als Neutronen-Quellen verwendet. Es lag daher nahe, daß sich nach Abschluß erster Vorversuche bevorzugt Anwendungsmöglichkeiten aus der Reaktor-Technologie aufdrängten.

Besonders interessant sind Neutronenradiographien von aktiven Teilen, wie z. B. bestrahlten Brennelementen, da sich der Einfluß der Eigenstrahlung des Objektes durch die Anwendung der Aktivierungsmethode ausschalten läßt. Als nachteilig erwies sich, daß diese Arbeiten nahe am Reaktor durchgeführt werden mußten und nicht in die zumeist in

größerer Entfernung liegenden Heißen Zellen zu übertragen waren. Deswegen wurde für Prüflingsuntersuchungen im Kernforschungszentrum Karlsruhe 1965 zuerst ein 18 MeV-Betatron angeschafft (133). In der AEG-Kernenergieversuchsanlage steht ein Prüfreaktor in unmittelbarer Nähe der Heißen Zellen. Dadurch war es möglich, eine Neutronenradiographie-Einrichtung zu schaffen, die zu einem festen Bestandteil des Untersuchungsprogrammes an bestrahlten Brennstäben geworden ist (165).

#### 4.1 Anwendung der Neutronenradiographie in der Biologie und Medizin

Angesichts des heutigen Entwicklungsstandes der Neutronenradiographie gilt besonders in der Biologie, daß dieses Verfahren nur als Ergänzung zur Radiographie mit Röntgenstrahlen anzusehen ist. Die Neutronenradiographie hat jedoch ein ein Entwicklungspotential, so daß langfristig beide Arten der Radiographie gleichrangig werden können.

Ein wesentlicher Fortschritt ergibt sich aus der Einführung des Cf-252 als Neutronenquelle. Hierdurch wird es möglich, einfache transportable Neutronenradiographie-Anlagen zu bauen und diese den biologischen und medizinischen Forschungsinstituten zur Verfügung zu stellen.

Erkennbare Anwendungsgebiete der Neutronenradiographie sind:

Untersuchung der inneren Struktur von Knochen, Zähnen usw. ;  
Lokalisierung besonders wasserstoffhaltiger Bereiche (Tumore) ;  
Anwendung von Kontrastmitteln.

Tierisches Gewebe kann summarisch durch eine chemische Formel charakterisiert werden, für die Barton  $C_5 H_{40} O_{18} N$ , Flynn dagegen  $C_7 H_{70} O_{32} N_2$  angibt (145, 150).

Aus dem hohen Wasserstoffgehalt der biologischen Objekte resultieren erhebliche Schwierigkeiten für die Neutronenradiographie. Durch den hohen Wirkungsquerschnitt des Wasserstoffes werden die Neutronen erstens stark geschwächt und vermögen nur geringe Schichtdicken zu durchdringen, zweitens wird der Kontrast des Bildes durch gestreute Neutro-

nen herabgesetzt oder gar aufgehoben.

### Durchdringungsvermögen

In der Abbildung 4.1 sind für ein standardisiertes Gewebe mit der Dichte  $1 \text{ g cm}^{-3}$  die linearen Schwächungskoeffizienten von Neutronen und Röntgenstrahlen über der Energie dieser Strahlung aufgetragen. Thermische Neutronen entsprechen danach in ihrem Durchdringungsvermögen 11 keV Photonen, die unmoderierten Neutronen des Cf-252 sind einer 63 keV-Röntgenstrahlung vergleichbar.

Übliche Röntgenanlagen arbeiten mit einer Spannung von ca. 50 keV. Ein entsprechendes Durchdringungsvermögen ist nur mit schnellen Neutronen zu erzielen (148).

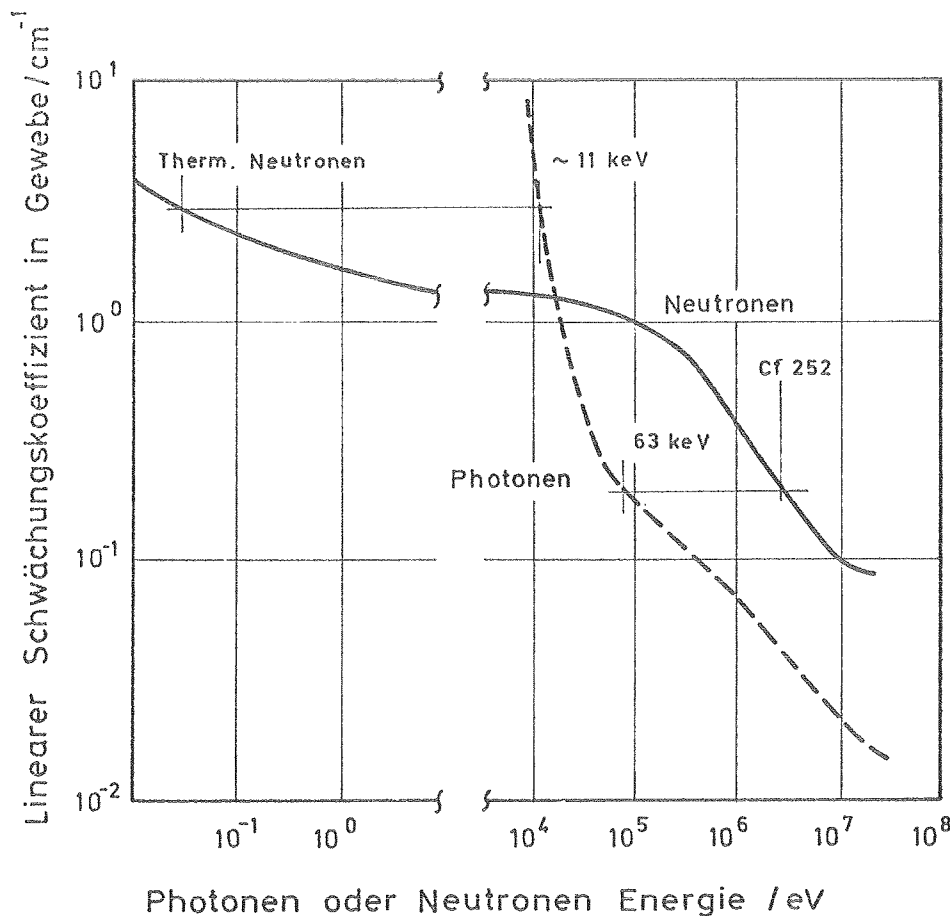


Abb. 4.1

Linearer Schwächungskoeffizient für Neutronen und Photonen in Abhängigkeit von der Energie der Teilchen nach (148)

Die Angabe einer Gewebeschichtdicke, die von Neutronen noch durchdrungen werden kann, ist abhängig von der zur Verfügung stehenden Quellstärke, der Empfindlichkeit des Bildwändlers und der zumutbaren Belichtungszeit. Im Mittel werden folgende Schichtdicken als

obere Grenze angegeben:

bei thermischen Neutronen	2 cm
bei schnellen Neutronen	30 cm

Diese Werte können durch eine größere Quellstärke erweitert werden. Anzustreben wäre eine Quelle mit 100 mg Cf-252.

#### Kontrast

Der Kontrast, mit dem zwei Teile abgebildet werden, hängt hauptsächlich von ihrem Schwächungskoeffizienten und von der Streuung der Neutronen in der Probe ab.

Verwendet man thermische Neutronen, so sind Knochen mit einem Schwächungskoeffizienten von  $2,26 \text{ cm}^{-1}$  durchsichtig im Vergleich zu Muskel- und Fettgewebe, die mit einem Schwächungskoeffizienten um  $3,2 \text{ cm}^{-1}$  kaum voneinander zu trennen sind. Tumor-Gewebe enthält besonders viel Wasserstoff und ist daher von anderem Gewebe zu unterscheiden.

Wegen der Streuung der Neutronen können die entsprechend den Schwächungskoeffizienten möglichen Kontraste jedoch nur bei sehr dünnen Proben erreicht werden. Bei dickeren Proben sind die bisher erzielten Ergebnisse noch unbefriedigend. Es wird versucht, die gestreuten Neutronen durch Gitter abzufangen.

Weisman und Brown erprobten die Anwendung der Radiographie mit thermischen Neutronen bei der Untersuchung von Zähnen eines gerade getöteten Hundes. Die innere Struktur von Zähnen kann mit gebräuchlichen Röntgenstrahlen nicht erfaßt werden, da die Zähne mit Calcium-Phosphat, das für Röntgenstrahlen wenig durchlässig ist, umgeben sind. Die Neutronenradiographien erfüllten jedoch nicht die Erwartungen (142).

Boyne und Whittemare verwenden die Neutronenradiographie zum Nachweis von Krebs in Knochen. Die Ergebnisse lassen nach ihrer Meinung ein sicheres Anwendungsgebiet erwarten (162).

Wie in der Röntgen-Radiographie können auch in der Neutronenradiographie bestimmte Organe durch geeignete Kontrastmittel hervorgehoben werden. Wegen der großen Streuung der Wirkungsquerschnitte für thermische Neutronen ist hier die Auswahl wesentlich größer.

Man kann dabei zwischen negativen und positiven Kontrastmitteln unterscheiden. Negative Mittel wie  $D_2O$  verringern die Schwächung der Neutronen, positive Mittel wie B, Gd usw. erhöhen die Schwächung.

Brown, Allen und Parks ersetzten bei ihren Experimenten das Wasser durch schweres Wasser. Sie erreichten dadurch ein größeres Durchdringungsvermögen bzw. eine kürzere Belichtungszeit und eine Verringerung der absorbierten Strahlendosis (153, 152).

Da Muskel- und Knochengewebe im Gegensatz zum Fettgewebe einen großen Wasserumsatz haben und daher schneller  $D_2O$  anreichern, ergibt sich so ein guter Kontrast zwischen Muskel- und Fettgewebe, der sonst nicht vorhanden ist.

Bei in vitro-Untersuchungen wird das Gewebe mehrere Stunden in  $D_2O$  gelegt. Bei lebenden Tieren kann man  $D_2O$  in die Arterien injizieren. Werden bei einem kleinen Säugetier weniger als 15 % des Körperwassers durch  $D_2O$  ersetzt, so beeinträchtigt dies sein Leben nicht, dagegen stirbt es, wenn mehr als 30 % ersetzt werden.

Bestimmte B-10-Verbindungen reichern sich in Tumoren an. Sie werden primär verwendet, um lokalisierte Schäden bei der Bestrahlung mit thermischen Neutronen hervorzurufen, könnten jedoch auch in der Neutronenradiographie eingesetzt werden (147).

Schnelle Neutronen zeichnen sich durch ihr großes Durchdringungsvermögen aus, doch sind die erreichbaren Kontraste geringer.

Die Schwächungskoeffizienten von Muskeln, Fett und Knochen fallen bei dem Neutronenspektrum des Cf-252 weitgehend zusammen, bei 14 MeV Neutronen könnte sich ein kleiner Kontrast zwischen Muskeln und Knochen

ergeben. Kontrastmittel für schnelle Neutronen gibt es nicht. Gut abgebildet werden dagegen gasgefüllte Hohlräume wie z. B. die Lunge, die ohne die Schatten des Skeletts erscheint (144).

Budinger, Howerton und Plechaty zeigen in einer theoretischen Studie am Beispiel eines menschlichen Oberarmes, daß durch die verschiedenen in ihrer Rechnung berücksichtigten Neutronenstreuungsprozesse eine befriedigende Abbildung nicht möglich ist (147).

Im Gegensatz zu den thermischen Neutronen haben schnelle Neutronen nach der Streuung eine geringere Energie. Vielleicht könnte dieser Effekt zur Verbesserung des Kontrastes ausgenutzt werden.

#### Strahlenschäden

Besonders bei in-vivo-Untersuchungen, aber auch teilweise bei in-vitro-Experimenten, spielen die durch die Neutronen verursachten Strahlenschäden eine bedeutende Rolle.

Die Schädigung des Gewebes ist abhängig von

- der Neutronenenergie;
- der Belichtungszeit bzw. der durchstrahlten Schichtdicke;
- der chemischen Zusammensetzung des Gewebes.

Bei thermischen Neutronen erzeugen die hochenergetischen Gammastrahlen, die bei der Absorption von Neutronen in H, N entstehen, die Schäden.

Einem integrierten Neutronenfluß von  $10^9 \text{ cm}^{-2}$  entspricht bei einer Neutronenenergie unter 10 keV einer äquivalent Dosis von  $0,01 \text{ Jkg}^{-1}$  (1 rem) Budinger, Howerton und Plechaty (147) kommen bei ihrer Untersuchung eines Oberarmes auf folgende durchschnittliche Dosen:

Neutronenenergie in MeV	Dosis in $\text{Jkg}^{-1}$
$10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
0,12	$1,5 \cdot 10^{-2}$
Cf-252	$1,0 \cdot 10^{-1}$
14	$4,04 \cdot 10^{-1}$

Die Werte sind jeweils auf einen integrierten Neutronenfluß von  $10^{10}$   $\text{cm}^{-2}$  bezogen.

Buchet empfiehlt für in-vitro-Untersuchungen mit schnellen Neutronen als obere Grenze einen Neutronenfluß von  $10^5$   $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  und eine Fluenz von  $10^9$   $\text{cm}^{-2}$  (148).

### Bildauswertung

Zum Abschluß soll noch auf ein besonderes Verfahren der Bildauswertung hingewiesen werden. Mit Hilfe des Agfacontour-Filmes der Agfa-Gevaert ist es möglich, Bereiche gleicher Schwärzung aus der Radiographie zu separieren. Durch verschiedenfarbiges Umkopieren werden die Grautöne in Farbtöne umgesetzt, wodurch die Auswertung wesentlich erleichtert wird (154).

Konvermann zeigt die Anwendung dieses Verfahrens an Hand eines Knochens (155).

### 5. Schlußfolgerung

Die Neutronenradiographie ist ein Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung von Körpern.

Ihr Vorteil ist es, einzelne Isotope, insbesondere Wasserstoff, kontrastreich abzubilden. Der Kontrast kann allerdings durch gestreute Neutronen geschwächt und sogar aufgehoben werden.

Die Neutronenradiographie ist erst in den letzten Jahren entwickelt worden. Sie steht in starker Konkurrenz zu anderen zerstörungsfreien Untersuchungsverfahren. Als nukleares Verfahren ist sie durch den Nachteil erheblicher Sicherheitsvorschriften (Kontrollbereich) belastet.

Erst seit das neutronenaussendende Californium-252 verfügbar wurde, ist es möglich, die Neutronenradiographie von Kernreaktoren oder anderen stationären Neutronenquellen zu lösen. Mit Cf-252 kann eine



leicht transportable Neutronen-Radiographie-Einrichtung gebaut werden. Es erscheint möglich, die Anlage so auszulegen, daß in ihr gleichzeitig auch Proben für Aktivierungsanalysen aktiviert werden können.

Der Preis des Cf-252 ist jedoch so hoch, daß im allgemeinen nur die Beschaffung kleiner Neutronenquellstärken möglich ist. Hierdurch wird der Anwendungsbereich begrenzt, wenn es nicht gelingt, empfindlichere Bildwandler als zur Zeit zugänglich zu entwickeln.

Anwendungsmöglichkeiten für die Neutronenradiographie ergeben sich u.a. bei

- dem Nachweis von wasserstoffhaltigen Stoffen in Metallen
- der Untersuchung radioaktiver Teile
- in-vitro-Experimenten in der Biologie

In der Medizin könnten sich außerordentlich interessante Anwendungsfälle ergeben, wenn es gelänge, die Strahlenschädigung der Patienten durch hochempfindliche Bildwandler und die Kontrastminderung durch gestreute Neutronen mit geeigneten Verfahren zu mindern.

Entwicklungsaufgaben, an denen bereits von mehreren Gruppen gearbeitet wird, sind

- Steigerung der Nachweisempfindlichkeit für Neutronen bis an die durch die statistische Unschärfe gegebene Grenze. Verwendet werden dazu elektronische Bildverstärkerverfahren.
- Die Erhöhung des Kontrastes durch die Ausschaltung gestreuter Neutronen. Hierzu sind nur wenige Ansätze bekannt. Zu betrachten sind unter anderem der Einsatz von Gittern und die Neutronen-Energiediskriminierung.

Insgesamt ist damit zu rechnen, daß die Neutronenradiographie zu einem Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung entwickelt werden kann, das in speziellen Fällen sinnvoll zu verwenden ist. Ein größeres Anwendungsgebiet zeichnet sich zur Zeit nicht ab.

Literaturzusammenstellung

1. H. Berger, Neutron Radiography, Elsevier Publishing Company, New York 1965
2. H. Kallmann, Neutron Radiography, Research 1 (1948)
3. D. Peter, Neutronen-Durchleuchtung, Z. Naturforschung 1 (1946)
4. J. Chadwick, Possible Existence of a Neutron, Nature 129 (1932), 3252
5. J. Thewlis, R.T.P. Derbyshire, AERE M/TN 37 (1956)
6. J. Thewlis, Neutron Radiography, Brit. J. Appl. Phys. 7 (1956)
7. H. Berger, Proceedings Symp. on Phys. and Nondestr. Testing, ANL 6346 (1960)
8. A.W. Schultz, W.Z. Leavitt, WALTR 142/67 (1961)
9. H.V. Watts, ARF 1164-6 (1960)
10. H. Berger, Application of Neutron Radiography, 15th Conf. on Remote Systems Technology (1967)
11. J.P. Barton, H. Berger, Some Future Potentialities of Neutron Radiography, 16th Conf. on Remote Systems Technology (1969)
12. W. Marth, Die Radiographie mit Neutronen, Nukleonik 6 (1964), 7
13. W. Lausch, Neutronenradiographie und ihre Anwendungsmöglichkeiten, Kerntechnik 13 (1971), 2
14. Neutron Radiography Newsletter, seit 1964 etwa zweimal jährlich herausgegeben von P. Barton, H. Berger, Argonne National Laboratory 9700 South Cass Avenue, Argonne Illinois, USA
15. R.S. Matfield, Neutron Radiography, Atom 174 (1971), 4
16. Z. Hrdlicka, UJV 2545 RT (1971)
17. J.P. Barton, M.F. Klozar, Your Own Personal Neutron Radiography Set?, Materials Evaluation 27, (1969), 12
18. H. Berger, Second Symp. on Physics and Nondestr. Testing, ANL-6515 (1961)
19. H. Berger, Report on Neutron Radiography, ANL-6279 (1962)

20. H. Berger, A Summary Report on Neutron Radiography, ANL-6846 (1964)
21. Neutron Radiography: Possibilities and Perspectives, Proceeding of Information Meeting Saclay 1966, CEA Report DR/AR/67.1
22. K. Ogawa, N. Wakabayashi, Thermal neutron radiography by the use of small nuclear reactor, NSL-Tr-38 (1965)
23. J.P. Pervès, La neutrographie. Nouvelle méthode de controle non destructif, PI 750-016/70 C.E.A.
24. L. Vu Hong, La Neutrographie. DR/SAR/G/68-19 (1968)
25. R.S. Matfield, Neutron-radiography services in research reactors division at Harwell, AERE-R 6372 (1971)
26. J.L. Boutaine, Principes générale de la neutrographie Suppl. an Bull d'Inform. A. T.E.N. N 90 (1971)
27. D.H. Stoddard, Radiation properties of Californium-252, DP.986 (1965)
28. E. Melkonian, Slow neutron velocity spectrometer studies of  $O_2, N_2, H, H_2, H_2O$  and seven hydrocarbons, Phys. Rev. 76 (1949) 12
29. J.P. Barton, Radiographie examination through steel using cold neutrons, Brit. J.Appl. Phys. 16 (1965)
30. J.P. Barton, Radiography with resonance energy neutrons, Phys. Med. Biol. 10 (1965), 2
31. A.R. Spowart, The advantages of epicadmium neutron beams in neutron radiography, Non-destructive testing (1968), 2
32. L.G. Miller, T. Watanabe, Enhancing contrast of neutron radiographs by energy tailoring of beams, 6. ICNT (1970)
33. G.D. Bouchey, E.L. Draper, S.J. Gage, Neutron radiography with Cf-252: The effect of tailoring, Conf. 710 402 (1971) Augusta
34. H. Berger, Radiography with fast neutrons, 6. ICNT (1970)
35. D.E. Wood, Fast neutron radiography with a neutron generator, Proceedings 15th Conf. Rem. Syst. Techn. (1967)
36. H. Berger, The present state of neutron radiography and its potential, Brit. J. NDT (1972), 2

37. A.R. Spowart, Mobile unit for neutron radiography, Nuclear engeneering (1968), 5
38. J.P. Barton, Developments in use of Californium-252 for Neutron Radiography, Nucl. Techn. 15 (1972)
39. H. Berger, Some experiments in fast neutron radiography, Materials evaluation 27 (1969), 12
40. J.L. Boutaine, Developement of neutron radiography within the CEA, Conf. 680606-4
41. J.J. Haskins, Imaging with neutrons, Industrial research (1969), 7
42. A.R. Spowart, The development of neutron radiography in the UKAEA at Dounreay, Materials evaluation, 27 (1969), 7
43. J.P. Barton, J.L. Boutaine, Initial development of neutron radiography in France, Isotopes and Rad. Techn. 6 (1968), 3
44. M.R. Hawkswarth, An introduction to practical neutron radiography, X-Ray Focus 8 (1968), 3
45. P.B. Parks, M. Brown, Antiscatter grids for low-energy neutron radiography, Radiol. 92 (1969)
46. H.A. Klasens, Measurement and calculation of unsharpness combinations in X-ray photography, Philips research reports 1 (1946), 4
47. J.P. Barton, Contrast sensitivity in neutron radiography, Appl. Materials Research (1965), 4
48. W. Bock, E. Mundry, D. Schnitger, Relations between radiographic image quality and film density, Technical session 12
49. I. Schmidtborn, Einführung in die Probleme und Methoden der Autoradiography, Kerntechnik 9 (1967), 11
50. J.P. Barton, A visual IQI for neutron radiography, J. of Materials 7 (1972), 1
51. A. Choudry, Multipile scattering and absorpion of thermal neutrons in thin targets, Nuclear Instr. and Methods 71 (1969)
52. W.C. Reinig, Cf-252: A new isotopic source for neutron radiography, Isotopes and Radiation Technology 7 (1969), 1

53. W.C. Reinig, Californium-252: A new isotopic source for neutron radiography, Material evaluation 27 (1969)
54. G. Farny, M. Houelle, Small pulsed reactor for neutron radiography and underwater facility using existing pool reactors, Conf. 710402 (1917), Augusta
55. G.T. Schnurer, A.T. McMain, Neutron radiography with a triga neutron provision system, Conf. 710402 (1917) Augusta
56. G. Breynat, M.M. Dubus, Utilization of small accelerator neutron generators für neutron radiography, Materials evaluation (1969), 10
57. R.R. Fullwood, Using a meson factory as an intense pulsed neutron source, Conf. 710402 (1971) Augusta
58. K.H. Ansell, E.G. Hall, High intensity ( $\alpha, n$ ) sources, Conf. 710402 (1971) Augusta
59. J.P. Barton, Neutron radiography using nonreactor sources, Isotopes and radiation technology 6 (1968), 2
60. D.C. Cutfarth, On optimizing an Sb-Be source for neutron radiographic applications, Materials evaluation (1968), 26
61. R.L. Stetson, Transplutronics: Promising neutron sources for research, Nucleonics 24 (1966)
62. D.E. Wood, Fast neutron radiography with neutron generator, Trans. Amer. Nucl. Soc. 10 (1967)
63. J.P. Barton, Moderation of neutrons from point sources-application, Neutron radiography DR/SARF/67-45 (1967)
64. J.P. Barton, On the possibility using D-T-neutron generator for the radiographic inspection of highly radioactive elements, SAR - G/66-370 (1966)
65. J.L. Cason, Neutron radiography with Cf-252, BNWL-1308-2 (1970)
66. J.L. Cason, Design and fabrication of a portable device for neutron radiography, BNWL-1329-UC-37 (1971)
67. C.B. Shaw, J.L. Cason, Portable neutron radiographic camera using Cf-252, BNWL-SA-3090 (1970)

68. C.B. Show, J.L. Cason, Portable neutron radiographic camera using Cf-252, *Isotopes and radiation techn.* 8 (1970), 1
69. J.L. Cason, Neutron radiography with Cf-252, a portable camera, BNWL-SA-3169 (1970)
70. J.L. Cason, Neutron radiography with Cf-252, a portable camera, *Nuclear News* 13 (1970), 3
71. J.L. Cason, C.B. Show, Neutron radiography with Cf-252, *Trans. Am. Nucl. Soc.* 12 (1969)
72. M. Vu Hong Lạc, M. Berthod, Mme. Breynat, Vers une neutroradiographie utilisant de petits accélérateurs de neutrons, 6. ICNT Report M 10 (1970)
73. S.J. Gage, E.L. Draper, G.D. Bouchey, R.R. Day, Design and construction of a versatile Cf-252 neutron source shield and experimental facility, Conf. 710 402 (1971)
74. K.D. Kok, R. Artigas, I.W. Ray, Effects of source encapsulation materials on the thermal-neutron flux from a Cf-252 source in a water moderator, Conf. 710 402 (1971)
75. R.L. Currie, F.I. McCrosson, P.B. Parks, Flux enhancement with Cf-252 source in a subcritical assembly, Conf. 710 402 (1971) Augusta
76. E.J. McCrosson, Calculated enhancement of thermal neutron flux from a Cf-252 source, DP-1250 (1971)
77. G.A. Fink, The production and absorption of thermal energy neutrons, *Phys. rev.* 50 (1936), 10
78. R.A. Morris, An investigation of neutron collimators and their application in neutron radiography, LA-DC-1594 (1965)
79. J.P. Barton, Divergent beam collimator for neutron radiography, *Materials evaluation* 25 (1967)
80. F. Rossitto, G. Poletti, The performance neutron collimators, *Acta Cryst* 27 (1971), 4
81. K.D. Kok, I.W. Ray, Optimization of source-collimator geometry for a neutron radiographic facility utilizing a Cf-252 source, Conf. 710 402 (1971), Augusta

82. M. Houelle, Source utilisant la bouffée de neutrons produite par un scut de réactivité dans un reacteur homogene Application a la Neutrographie, Suppl. an Bull. a' Information A.T.E.N. N 90 (1971)
83. M. Vu Hong, B. Breynat, La Neutrographie par neutron thermiques avec accelerateur de deutons, Suppl. an Bull a' Information A.T.E.N. N 90 (1971)
84. B.R. Dennis et al., Mobile accelerator facility for neutron, Interrogation and nondestructive assay, Conf. 710 402 (1971) Augusta
85. L. Vu Hong, Optimisation de la position du Collimateur dans un ensemble neutrographie, DR/SARG/69-16 C.E.N.H. (1969)
86. J.P. Barton, J.P. Pervés, Underwater neutron radiography with conical collimator, Brit. J. NDT 8 (1966), 4
87. J.C. Hendry, Neutron radiography at Dounray, Nuclear Engeneering (1968), 2
88. L.E. Wilson, S.A. Wenk, G.A. Hildreth, Neutron radiography with a 2,5 MeV Van de Graaf accelerator, 6. ICNT (1970)
89. J.L. Crandall, Survey of applications for Cf-252, Conf. 681 032 (1968)
90. B.L. Blanks, DA Garret, R.A. Morris, Improved resolution neutron radiography, Technical Session 8
91. G.D. Bouchey, S.J. Gage, The economics of a subcritical neutron radiography assembly, Trans ANS 14 (1971), 1
92. L.A. Heinrich, Comparison of neutron source costs, Conf. 710 402 (1971), Augusta
93. D.C. Cutforth, Analysis of neutron sources for thermal neutron radiography, 6. ICNT (1970)
94. D.G. Albertson, D.P. Rathke, Application of neutron radiography using a radioactive neutron source, Trans. ANS 12 (1969)
95. J.P. Barton, M.F. Klozar, Thermal neutron radiography with Cf-252 and other small sources, Trans. Am Nucl. Soc. 12 (1969), 12
96. G.D. Bouchey, S.J. Gage, Neutron radiography using a small subcritical assembly, Trans. ANS 12 (1969), 12

97. G.D. Bouchey, S.J. Gage, Neutron radiography facility at university of Texas nuclear reactor Laboratory, Isotope radiation Techn. 7 (1970)
98. A. Choudry, Monte Carlo study of neutron collimation by rectangular tubes, Nucl. Instr. and Methodes 68 (1969), 2
99. H. Berger, Recent progress in neutron imaging, Brit.J.of NDT (1968), 6
100. M.R. Hawkesworth, Films for neutron radiography: an investigation of film-intensifying screen image records, J. Sci. Instr. 2 (1969), 2
101. H. Berger, Photographic Detectors for Neutron Diffraction, Rev. Sci. Instr. 33 (1962), 8
102. J.P. Barton, M.F. Klozar, Method for efficiency gain in neutron radiography, 6. ICNT (1970), Report M 9
103. W.F. Niklas, P.J. Dolon, H. Berger, A thermal-neutron image intensifier, Photo Electronic Image Device (1966)
104. H. Berger, Characteristics of a thermal neutron television imaging system, Materials evaluation 24 (1966), 9
105. D.T. Green, W.F. Niklas, An image-intensifier tube with high gain for 1 MeV Photons, Materials evaluation 22 (1964)
106. H. Berger, W.N. Beck, A thermal neutron television system for post-irradiation annealing studies, Transa. Amer. Nucl. Soc. 8 (1965), 1
107. E. Piesch, Anwendung der Interferenzkontrast-Mikroskopie zur Kernspurregistrierung in Festkörpern, Zeiss-Informationen 18 (1970), 76
108. D. Isabelle, M. Mommin, Proceedings of Int. Conf. on Solid State Track Detectors (May 1969, Clermont-Ferrand)
109. S.C. Furman, R.W. Darmitzel, C.R. Porter, D.W. Wilson, Track etching some novel applications and uses, Transac. of the AN S 9 (1966)
110. R.L. Fleischer, P.B. Price, R.M. Walker, Neutron flux measurement by fission tracks in solids, Nucl. Sci. Eng. 22 (1965)



111. H. Berger, I.R. Kraska, A track-etch plastic-film technique for neutron imaging, *Transac. of the ANS* 10 (1967)
112. E. Tochilin, Photographic detection of fast neutrons: application to neutron radiography, *Phys. med. biol.* 10 (1965), 4
113. S.P. Wang, C.G. Schull, W.C. Phillips, Photography of neutron diffraction patterns, *Rev. Sci. Instr.* 33 (1962)
114. J. Cobb, A.K. Solomon, The detection of beta-radiation by photographic film, *Rev. Sci. Instr.* 19 (1948), 7
115. H. Berger, Resolution study of photographic thermal neutron image detectors, *J. Appl. Phys.* 34 (1963), 4
116. B.L. Blankes, R.A. Morris, Experiments with foil-film combination and collimators for neutron radiography, *Materials evaluation* (1966), 2
117. B. Dörschel, Neutronen-Routinedosimetrie mit Festkörperspurdetectoren, *Kernenergie* 14 (1971), 11
118. R.L. Brown, Televisionsystem for neutron radiography using small sources, *Trans. ANS* 12 (1969), 12
119. A.R. Spowart, Optimizing neutron scintillators for neutron radiography, *Brit. J.NDT* 11 (1969), 1
120. E. Ricci, T.H. Handley, Activation analysis with Californium-252, *Analytical Chemistry* 42 (1970), 3
121. D. Hagenmaier, I. Halchak, G. Basl, Detection of titanium hydride by neutron radiography, *Materials Evaluation* 27 (1969), 9
122. A. Settapani, Applications industrielles de la neutrographie, *Suppl. an Bull d'Inform. A.T.E.N.* No. 90 (1971)
123. I.A. Holloway, W.F. Stuhrke, H. Berger, Low voltage and neutron-radiographic techniques for evaluating boron-filament metal-matrix composites, *Proceedings 15th Remote Syst. Techn.* (1967)
124. W.E. Dungan, Neutron radiography using Cf-252 for aircraft NDT applications, *Conf. 710 402* (1971), Augusta
125. D.C. Cutforth, V.G. Aqunio, Neutron radiography in the EBR-II fuel cycle facility using an isotopic neutron source, *Proceedings 15th Conf. Rem. Syst. Techn.* (1967)

126. I.L. Hoyt, C.E. Porter, C.D. Wilkingson, Neutron radiography applications at General Electric, Proceedings 15th Conf. Rem. Syst. Techn. (1967)
127. D.A. Garrett, R.A. Morris, The application of high resolution neutron radiography to industrial inspection problems, Proceedings 15th, Conf. Rem. Syst. Techn. (1967)
128. J. P. Barton, Toward neutron radiography of radioactive objects in hot cells, Proceedings 15th Conf. Rem. Syst. Techn. (1967)
129. J.J. Haskins, J.F. Jaklevik, C.D. Wilkingson, Applications of neutron radiography in fast reactor fuel development, Proceedings 15th Conf. Rem. Syst. Techn. (1967)
130. J. P. Barton, Forseeable application of Cf-252 to neutron radiography, Conf. 681 032 (1968)
131. G. Olive, I.E. Cameron, C.A. Clayton, A review of high intensity neutron sources and their application in Industry, AERE-R-3926
132. J.L. Cason, Neutron radiography with Cf-252 in forensic science, BNWL-SA-2865 (1969)
133. J. Tucek, R. Wiechers, Prüfung von bestrahlten Brennelementen mit einem 18 MeV-Betatron, Kerntechnik 13 (1971), 2
134. W. Mayer, Neutronenradiography an bestrahlten Brennstäben, Reaktortagung Hamburg (1972)
135. R.A. Moos, The application of neutron radiography to heat-pipe diagnosis, Proceedings 15th, Conf. Rem. Syst. Techn. (1967)
136. H. Berger, I.R. Kraska, Neutron radiography inspection of heavy metals and hydrogenous materials, Materials Evaluation 22 (1964), 7
137. H. Berger, J.H. Talloy, J.P. Tylka, Determination of Cadmium burnab in reactor control rods by neutron radiography, Nucl. Sci. Ing. 18 (1964), 2
138. G. Farney, Industrial applications of neutron radiography equipment and sources, 6. ICNDT (1970)

139. K. Chountas, H. Rauch, Neutron radiographic inspection of metal adhesions, alloys, active fuel elements, diffusion of H into Zn and diffusion  $H_2O-D_2O$ , Atomkernenergie 13 (1968), 12
140. D. Geithoff, Neutron radiography and other NDT methods for examination of irradiated fast breeder reactor fuels, NSA 22.32778
141. J. Anderson, S.B. Osborn, R.W.S. Tomlinson, J.W. Smith, Neutron radiography in man, Brit. J. Radiol. 37 (1964)
142. M.I. Weisman, M. Brown, Neutron radiography in dental diagnosis, Conf. 710 402 (1971), Augusta
143. M. Brown, P.B. Parks, Neutron radiography in biological media: Techniques, observations, and implications, Am.I. Roent. 106 (1969)
144. P.B. Parks, M. Brown, Fast neutron radiography for medical diagnosis, DP-1231 (1970)
145. J.P. Barton, Neutron radiography in the biomedical field: an introduction, Instr. Soc. of Am. 6 (1969)
146. H.L. Altkins, Biological Application of neutron radiography, BNL 8165 (1964)
147. T.F. Budinger, R.I. Howerton, E.F. Plechaty, Neutron Radiography and Dosimetry in Human Beings, Theoretical Studies, Phys. Med. Biol. 16 (1971), 3
148. R. Buchet, Introduction to medical neutrography, Conf. 710 402 (1971), Augusta
149. M. Tubiana, I. Dutreix, A. Dutreix, P. Jockey, Bases Physiques de la Radiothérapie et de la Radiobiologie, Masson et Cie. Paris 1963
150. M.I. Flynn, G.F. Knoll, A.K. Poznanski, Neutrography in medical research and pathology, Conf. 710 402 (1971)
151. J.P. Barton, Some possibilities of neutron radiography, Phys. Med. Biol. 9 (1964), 1
152. P.B. Parks, S.M. Reichard, M. Brown, Deuteration in slow neutron radiography of biological media, DP-1229 (1970)
153. M. Brown, J.J. Allen, P.B. Parks, Slow neutron imaging of fatty

- tissues through deuteration with heavy water, Instr. soc. of Am 6 (1969)
154. Agfacontour Professional in der Photography, Agfa-Gevaert AG, Leverkusen (1971)
  155. H. Kondermann, Dichteverteilung im Röntgenbild des Skeletts, Die Naturwissenschaften 57 (1970)
  156. G.E. Sheline, S.B. Field, I.T. Brennan, A. Raventos, T.L. Philipps, Effects of fast neutrons on human skin, Am.I. Roentgenol. (1971)
  157. F. Ellis, Dose, time and fractionation: A clinical hypothesis, Clin. Radiol. 20 (1969), 1
  158. J.J. Allen, D.S. Harmer, Selected biomedical applications of thermal neutron radiography, Biomed. Sci. Instr. 6 (1969)
  159. P.B. Parks, M. Brown, D.S. Harmer, Problems of fast neutron radiography, Biomed. Sci. Instr. 6 (1969)
  160. W.H. Wilkie, D.S. Harmer, Theoretical modulation transfer functions and dosimetry for fast neutron radiography, Biomed. Sci. Instr. 6 (1969)
  161. C.R. Porter, A.H. Robinson, A monte carlo simulation of biological neutron radiography, Biomed. Sci. Instr. 6 (1969)
  162. Boyne, Whittemore, Bone Cancer, N-radiography a help, 12 C & EN, March 8, 1971
  163. B.W. Manley, Some aspects of glass in channel electron multipliers, Vortrag Symposium on glass in electronic, Jan. 1966, Society of Glass Technology, Sheffield
  164. O. Vinz, Glas in der Elektronik, Schott Information 2 (1967)
  165. W.A. Mayer, Untersuchung von bestrahlten Brennstoffstäben mit Hilfe der Neutronenradiographie, Kerntechnik 14 (1972), 8