

KFK-282

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

November 1964

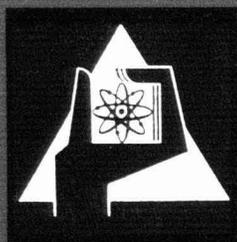
KFK 282

Abteilung Reaktorbetrieb

Die Radiografie mit Neutronen

Willy Marth

*Gesellschaft für Kernforschung m. B. H.
Zentralbibliothek*



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

Die Radiografie mit Neutronen

Von WILLY MARTH

(Aus dem Kernforschungszentrum Karlsruhe, Abteilung Reaktorbetrieb)

Mit 18 Textabbildungen

(Eingegangen am 7. Juli 1964)

Zusammenfassung. Es wird eine Übersicht über den gegenwertigen Stand der Radiografie mit Neutronen gegeben. Durch Vergleich der Massenschwächungskoeffizienten der Elemente werden die Unterschiede zur klassischen Röntgen- und Gamma-radiografie dargestellt. Die vorwiegend verwandten experimentellen Techniken, die gebräuchlichen Neutronenquellen sowie die optischen Abbildungseigenschaften verschiedener Detektoranordnungen sind ausführlich erläutert. Es folgen eine Diskussion der praktischen Anwendungsmöglichkeiten der Neutronenradiografie und eine Literaturzusammenstellung über das Gesamtgebiet.

I. Einleitung

Seit vielen Jahren hat die Radiografie mit Röntgen- und Gammastrahlen ihren festen Platz innerhalb der Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung von Festkörpern [1]. Als Gußfehler entstandene Lunker oder durch Schrumpfung, Materialermüdung oder mangelhaftes Schweißen hervorgerufene Risse können in einfacher Weise aufgefunden werden. In der Mikroradiografie gelingt es darüber hinaus, mechanische oder chemische Inhomogenitäten von mikroskopischer Größe (z. B. Gefügekomponenten von Legierungen) nachzuweisen.

Zu der Radiografie mit elektromagnetischen Strahlen ist in den letzten Jahren die Radiografie mit Neutronen getreten. Erste Versuche in dieser Richtung wurden bereits um 1946 von KALLMANN [2] und PETER [3] unternommen. Die technische Fortentwicklung der Neutronenquellen ermöglichte schließlich, insbesondere in Großbritannien [4—6] und den USA [7—19], einen beachtlichen Aufschwung der Forschung auf diesem Gebiet, der in zahlreichen Veröffentlichungen zum Ausdruck kommt. Hieraus läßt sich die Bedeutung ermesen, welche der Neutronenradiografie vor allem von der industriellen Physik her zuteil wird.

II. Die Massenschwächungseigenschaften der Materialien

Soll das radiografische Abbild eines Objekts eine Struktur zeigen, so ist es notwendig, daß die abbildende Strahlung unterschiedlich geschwächt wird. Im einfachsten Fall wird dies bei homogener Zusammensetzung des Objekts durch dessen variable Dicke hervorgerufen, und soll in diesem Zusammenhang nicht weiter diskutiert werden. Hat man ein Objekt von heterogener Zusammensetzung und interessiert die strukturelle Anordnung, dann läßt sich die unterschiedliche Strahlenschwächung durch die Anteile der verschiedenen Atomsorten benutzen.

Von der klassischen Röntgen- und Gammadiografie ist bekannt, daß die Energie- und Intensitätsverluste der elektromagnetischen Strahlung eine Folge der in der Materie stattfindenden Photo-, Compton- und Paarbildungseffekte sind. Je nach der Energie des Gammaquants ist einer dieser drei Prozesse vorherrschend. Die Schwächung (in der Radiografie meist durch den „Massenschwächungskoeffizienten“ dargestellt) ergibt sich aus der Überlagerung dieser drei

Effekte. Abb. 1 zeigt die Massenschwächungskoeffizienten als Funktion der Ordnungszahl (Parameter ist die Energie der Gamma- bzw. Röntgenstrahlung). Es ist ersichtlich, daß die Absorption mit zunehmender Ordnungszahl ansteigt. Von der Röntgenabsorption mit ihren Absorptionskanten abgesehen, vollzieht sich der Anstieg monoton, also ohne Sprünge.

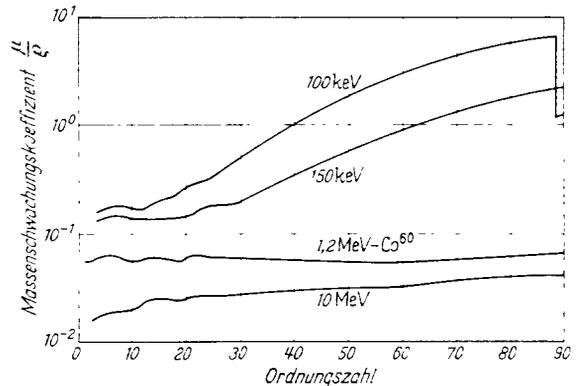


Abb. 1. Massenschwächungskoeffizienten der Elemente für einige gebräuchliche Gamma- bzw. Röntgenlinien

Die Verhältnisse werden grundsätzlich anders, wenn man die Absorption *thermischer Neutronen* betrachtet, die für Radiografie zwecke gut verwendbare, typische Absorptionsunterschiede zeigen. Absolut genommen ist ihre Absorption vergleichbar mit der von Gamma- bzw. Röntgenstrahlen im Energiebereich von hundert bis einigen tausend Kilovolt. Bemerkenswert sind hier jedoch die relativen Absorptionsunterschiede von Element zu Element; die völlig unregelmäßig variieren und in keinem Fall die Gesetzmäßigkeit der Gammaabsorption zeigen.

Die Schwächung eines Neutronenstrahls in vorgegebener Richtung ergibt sich als Folge von 2 Prozessen: Einfang und Streuung. Sie ist darstellbar durch das Schwächungsgesetz:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-N \cdot \sigma_t \cdot x}, \quad (1)$$

wobei I/I_0 der Bruchteil der durch einen Absorber der Dicke x durchgelassenen Neutronen, N die Anzahl der Kerne pro cm^3 des absorbierenden Materials und σ_t den totalen Wirkungsquerschnitt darstellt.

Das Produkt $N \cdot \sigma_t$ wird als „Schwächungskoeffizient μ “ bezeichnet. Bezieht man ihn auf eine einheitliche Dichte ρ , so erhält man die in der

Tabelle 1. Massenschwächungskoeffizienten μ/ρ für thermische Neutronen und Röntgenstrahlen (130 keV)

| Ordnungs- zahl | Element | Massenschwächungskoeffizient | | Ordnungs- zahl | Element | Massenschwächungskoeffizient | |
|-------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | Neutronen (therm.) | Röntgenstrahlen (130 keV) | | | Neutronen (therm.) | Röntgenstrahlen (130 keV) |
| 1 | Wasserstoff | 48,5 | 0,110 | 44 | Ruthenium | 0,009 ² | 0,90 |
| 3 | Lithium | 3,7 | 0,125 | 45 | Rhodium | 0,53 ² | 0,95 |
| 4 | Beryllium | 0,50 | 0,131 | 46 | Palladium | 0,050 | 0,99 |
| 5 | Bor | 24 ² | 0,138 | 47 | Silber | 0,24 | 1,05 |
| 6 | Kohlenstoff | 0,26 | 0,142 | 48 | Cadmium | 11,2 ² | 1,09 |
| 7 | Stickstoff | 0,48 | 0,143 | 49 | Indium | 0,60 ² | 1,13 |
| 8 | Sauerstoff | 0,15 | 0,144 | 50 | Zinn | 0,027 | 1,17 |
| 9 | Fluor | 0,11 | 0,146 | 51 | Antimon | 0,037 | 1,21 |
| 10 | Neon | 0,006 ² | 0,148 | 52 | Tellur | 0,031 | 1,25 |
| 11 | Natrium | 0,099 | 0,150 | 53 | Jod | 0,036 | 1,33 |
| 12 | Magnesium | 0,093 | 0,152 | 54 | Xenon | 0,083 ² | 1,40 |
| 13 | Aluminium | 0,036 | 0,156 | 55 | Caesium | 0,109 | 1,46 |
| 14 | Silizium | 0,044 ³ | 0,159 | 56 | Barium | 0,018 ³ | 1,52 |
| 15 | Phosphor | 0,062 ³ | 0,162 | 57 | Lanthan | 0,063 | 1,60 |
| 16 | Schwefel | 0,029 | 0,166 | 58 | Cer | 0,014 | 1,68 |
| 17 | Chlor | 0,59 | 0,176 | 59 | Praseodym | 0,046 | 1,75 |
| 18 | Argon | 0,006 ² | 0,184 | 60 | Neodym | 0,21 | 1,81 |
| 19 | Kalium | 0,049 | 0,191 | 62 | Samarium | 25 ² | 1,95 |
| 20 | Calcium | 0,057 | 0,200 | 63 | Europium | 10 ² | 2,02 |
| 21 | Scandium | 0,27 ³ | 0,208 | 64 | Gadolinium | 84 ² | 2,08 |
| 22 | Titan | 0,119 | 0,217 | 65 | Terbium | 0,09 ² | 2,13 |
| 23 | Vanadium | 0,093 | 0,227 | 66 | Dysprosium | 2,0 ² | 2,23 |
| 24 | Chrom | 0,065 | 0,238 | 67 | Holmium | 0,015 ² | 2,33 |
| 25 | Mangan | 0,107 | 0,250 | 68 | Erbium | 0,41 | 2,40 |
| 26 | Eisen | 0,141 | 0,265 | 69 | Thulium | 0,25 ² | 2,48 |
| 27 | Kobalt | 0,26 | 0,287 | 70 | Ytterbium | 0,076 ² | 2,55 |
| 28 | Nickel | 0,213 | 0,310 | 71 | Lutetium | 0,22 ² | 2,63 |
| 29 | Kupfer | 0,095 | 0,325 | 72 | Hafnium | 0,20 ² | 2,72 |
| 30 | Zink | 0,045 | 0,350 | 73 | Tantal | 0,067 | 2,80 |
| 31 | Gallium | 0 015 ² | 0,380 | 74 | Wolfram | 0,058 | 2,88 |
| 32 | Germanium | 0,082 | 0,41 | 75 | Rhenium | 0,16 ² | 2,95 |
| 33 | Arsen | 0,072 | 0,44 | 76 | Osmium | 0,028 ² | 3,02 |
| 34 | Selen | 0,132 | 0,48 | 77 | Iridium | 0,80 ² | 3,09 |
| 35 | Brom | 0,074 | 0,52 | 78 | Platin | 0,050 | 3,15 |
| 36 | Krypton | 0,0002 ² | 0,56 | 79 | Gold | 0,20 | 3,21 |
| 37 | Rubidium | 0,042 | 0,59 | 80 | Quecksilber | 0,71 | 3,31 |
| 38 | Strontium | 0,070 | 0,61 | 81 | Thallium | 0,027 ³ | 3,41 |
| 39 | Yttrium | 0,0056 ² | 0,66 | 82 | Blei | 0,034 | 3,50 |
| 40 | Zirkon | 0,047 | 0,71 | 83 | Wismuth | 0,029 | 3,57 |
| 41 | Niob | 0,044 | 0,75 | 90 | Thorium | 0,033 ¹ | 3,80 |
| 42 | Molybdan | 0,055 | 0,79 | 92 | Uran | 0,028 ³ | 3,90 |

¹ Nur Streuung berücksichtigt. ² Streuung nicht berücksichtigt. ³ Inkohärente Streuung nicht berücksichtigt.

Radiografie häufig benutzte Größe des „Massenschwächungskoeffizienten μ/ρ “.

Da:
$$N = \rho \cdot \frac{N_L}{A} \quad (N_L = \text{Loschmidtsche Zahl, } A = \text{Atomgewicht}),$$

so gilt:

$$\mu = \rho \cdot \frac{N_L}{A} \cdot \sigma_t = \frac{N_L}{A} \cdot \sigma_t \quad (2)$$

wobei:

$$\sigma_t = \sigma_{\text{total}} = \sigma_{\text{Einfang}} + \sigma_{\text{Streuung}}$$

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die bisher bekannten Massenschwächungskoeffizienten der verschiedenen Elemente. Zum Vergleich sind die entsprechenden Werte für Röntgenstrahlen (130 keV) angeführt. In Abb. 2 sind, der größeren Anschaulichkeit wegen, die Schwächungskoeffizienten grafisch aufgetragen.

Tabelle 1 sowie Abb. 2 lassen folgendes erkennen: bestimmte Isotope der leichten Elemente (Wasserstoff, Lithium etc.) schwächen thermische

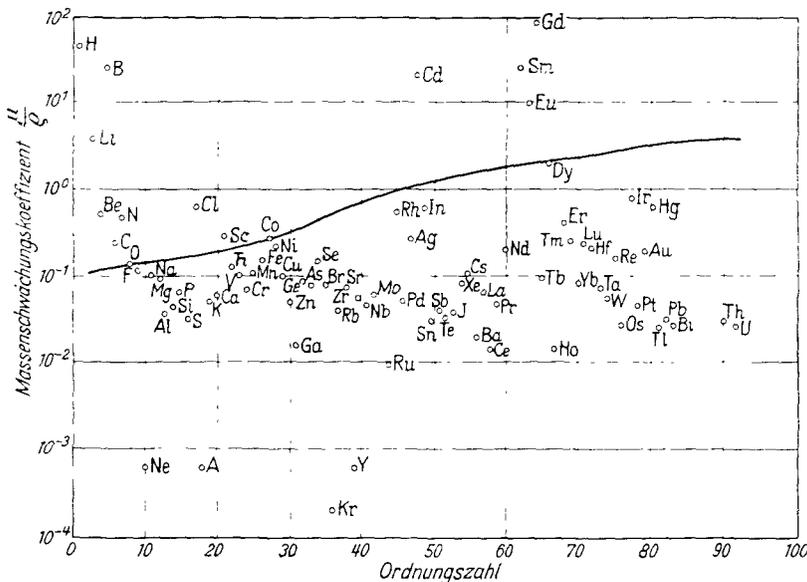


Abb. 2. Graphische Darstellung der Massenschwächungskoeffizienten der einzelnen Elemente für thermische Neutronen. Die ausgezogene Linie stellt den Verlauf der Massenschwächungskoeffizienten für 130 keV Röntgenstrahlung dar (s. auch Tabelle 1)

Neutronen wesentlich stärker als die natürlich vorkommenden Isotope einiger schwerer Elemente (Wismut, Blei etc.). Das bedeutet, daß die Schwächungscharakteristik der thermischen Neutronen denen der Röntgen- und Gammastrahlung in großen Zügen entgegengesetzt ist. Daraus ergibt sich für die praktische Anwendung, daß es z. B. mit Hilfe der Neutronenradiografie möglich ist, die Höhe einer Wassersäule in einem Bleirohr festzustellen. Ein Neutronenstrahl durchdringt den Bleimantel ohne Schwierigkeit, wird jedoch im Wasserstoff des Wassers stark geschwächt. Röntgenstrahlen hingegen würden weitgehend im Blei absorbiert werden, während die geringe zusätzliche Schwächung durch das Wasser kaum beobachtbar wäre.

Eine weitere, praktisch sehr nützliche Eigenschaft läßt sich ebenfalls aus Tabelle 1 bzw. Abb. 2 entnehmen: Die Schwächung der Röntgen- und Gammastrahlen erfolgt nach einer schwach ansteigenden, monotonen Funktion. Aus diesem Grunde ist es schwierig oder unmöglich, zwischen Elementen zu unterscheiden, die im Periodensystem nahe beieinander liegen. Im Gegensatz hierzu steht die Schwächung der Neutronen in keinem einfachen Zusammenhang mit der Ordnungszahl. Es gibt einige im Periodensystem benachbarte Elementpaare, deren Massenschwächungskoeffizienten um den Faktor 100–1000 differieren. Solche Paare sind z. B. Cadmium und Zinn oder Bor und Kohlenstoff. Werkstücke, die solche Elemente enthalten, lassen sich also mit der Neutronenradiografie auf Inhomogenitäten prüfen.

III. Methodisches

Die Herstellung einer Neutronenradiografie verläuft grundsätzlich in gleicher Weise wie die einer Röntgen- oder Gammadiografie. Das zu untersuchende Objekt befindet sich zwischen einer Strahlenquelle (Quelle thermischer Neutronen) und einem Detektor. Die Einzelheiten der Quelle werden weiter unten beschrieben. Abb. 3 skizziert die Prinzipanordnung.

Der Aufbau des Detektors wird von der vorgesehenen Methode bestimmt. In jedem Fall ist jedoch ein getreues Abbild der durch das Objekt hindurchtretenden Neutronen erwünscht. Hier soll vor allem die radiografische Technik beschrieben werden, also die fotografische Methode der Aufzeichnung von Neutronen.

Die unmittelbare Verwendung eines fotografischen Films als Detektor scheidet daran, daß die Neutronenempfindlichkeit eines nicht speziell sensibilisierten Films nur gering ist. Abb. 4 zeigt die Schwärzungen eines Du Pont-510-Films bei Bestrahlung mit Neutronen und Röntgenstrahlen. Da unter praktischen Verhältnissen die Neutronenstrahlung meist mit einer intensiven Gammastrahlung vermischt ist, erhält man zwei überlagerte Abbildungen: eine Neutronen- und eine Gammadiografie. Kontrast und Auflösung des Anteils der Neutronenradiografie sind unter diesen Umständen gering.

Die Wirksamkeit eines fotografischen Neutronendetektors wird außerordentlich erhöht, wenn zwischen

Objekt und Film ein Konverter liegt. Er besteht aus einer dünnen Folie eines Materials, das die auftretende Neutronenstrahlung in fotografisch wirksamere Gamma-, Beta- oder Alphastrahlung verwandelt. Es gibt zwei verschiedene Verfahrensweisen: Eine Kontaktmethode und eine Aktivierungsmethode (u. a. [6, 13, 17]).

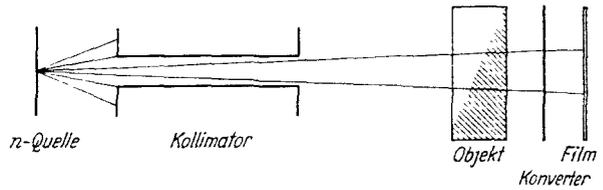


Abb. 3. Prinzipanordnung bei der Herstellung einer Neutronenradiografie (Kontaktverfahren)

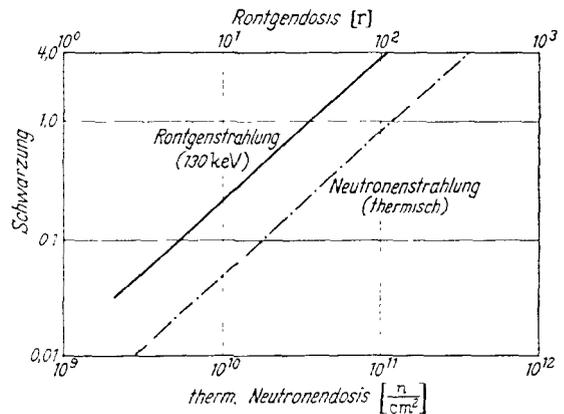


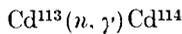
Abb. 4. Schwarzung eines (Dupont-510)-Films durch thermische Neutronen bzw. Röntgenstrahlung

Tabelle 2. Häufig verwendete Konvertertypen

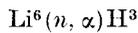
| Material | Wesentliches Isotop | Reaktion | Halbwertszeit | Photographisch wirksame Strahlung |
|------------|---------------------|--------------------------------|---------------|--|
| Lithium | Li-6 | $Li^6(n, \alpha)H^3$ | prompt | α -Teilchen, bzw. Licht aus angeregtem Phosphor |
| Bor | B-10 | $B^{10}(n, \alpha)Li^7$ | prompt | α -Teilchen, bzw. Licht aus angeregtem Phosphor |
| Gadolinium | Gd-158 | $Gd^{158}(n, \gamma)Gd^{159}$ | prompt | Betastrahlen |
| Rhodium | Rh-103 | $Rh^{103}(n, \gamma)Rh^{104m}$ | 4,5 m | Isomerer Übergang zu Rh-104 |
| Silber | Ag-107 | $Ag^{107}(n, \gamma)Ag^{108}$ | 2,3 m | } Beta- und Gammastrahlen |
| | Ag-109 | $Ag^{109}(n, \gamma)Ag^{110m}$ | 270 d | |
| | Ag-109 | $Ag^{109}(n, \gamma)Ag^{110}$ | 24,2 s | |
| Cadmium | Cd-113 | $Cd^{113}(n, \gamma)Cd^{114}$ | prompt | } Gammastrahlen |
| Indium | In-115 | $In^{115}(n, \gamma)In^{116m}$ | 54 m | } Beta- und Gammastrahlen |
| | In-115 | $In^{115}(n, \gamma)In^{116}$ | 13 s | |
| Gold | Au-197 | $Au^{197}(n, \gamma)Au^{198}$ | 2,7 d | } Beta- und Gammastrahlen |

Bei der Kontaktmethode werden die auf den Konverter treffenden Neutronen sofort in eine fotografisch wirksame Strahlung umgewandelt. Konverter und Film werden gemeinsam (in einer Kassette) hinter dem Objekt angeordnet und eine angemessene Zeit bestrahlt. Der Konverter besteht daher aus solchen Elementen, die einen hohen Einfangquerschnitt für thermische Neutronen besitzen und deren Sekundärstrahlung geeignet ist, den Film in möglichst kurzer Zeit zu schwärzen. Fotografisch besonders wirksam sind weiche Gammastrahlen sowie Beta- und Alphastrahlung; (letztere insbesondere in Verbindung mit Szintillatoren). Tabelle 2 gibt eine Übersicht der am häufigsten verwendeten Konvertertypen. Besonders

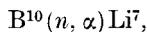
geeignet ist das Element Gadolinium. Es hat einen außergewöhnlich hohen Einfangquerschnitt (46000 b) und ermöglicht in Form dünner Folien Radiografien, deren Schärfe noch von keinem anderen Konvertermaterial erreicht wurde. Gut brauchbar ist auch Cadmium, vor allem wegen der sehr wirksamen Reaktion



Weitverbreitet als Neutronenkonverter sind Szintillatoren [22–24]. In dem Leuchtphosphor ZnS(Ag) werden sowohl Li-6 als auch B-10 zur Lumineszenzauflösung verwendet. Li-6 besitzt den Vorteil, daß die Reichweite der Sekundärteilchen aus der Reaktion



etwa 10mal größer ist als aus der Reaktion



so daß ein größerer Bereich des Szintillators angeregt wird [23, 24]. Obwohl der Neutroneneinfangquerschnitt bei Li⁶ nur etwa ein Viertel von dem des B¹⁰ (950 b gegenüber 4017 b) ist, ergeben Li⁶-dotierte Szintillatoren im Durchschnitt eine um den Faktor 2–3 höhere Ausbeute. Weiterhin wurden vielfach dünne Metallfolien aus Rhodium, Silber und Indium als Konverter verwendet (u. a. [17]).

Beim *Aktivierungsverfahren* wird ein Schirm hinter dem Objekt der Neutronenstrahlung ausgesetzt, der durch die Neutronen radioaktiv indiziert wird. Damit erhält er ein „latentes“ radioaktives Abbild des Objekts. Um dieses sichtbar zu machen, wird der Schirm anschließend in einer Kassette auf einen Film gelegt, dem durch die Abklingstrahlung die endgültige Radiografie aufgeprägt wird. Für Schirme dieser Art eignen sich insbesondere Elemente, die außer einem hohen Aktivierungsquerschnitt auch eine für das Experimentieren bequeme Halbwertszeit der aktivierten Atomkerne aufweisen. (Größenordnung: einige Minuten bis einige Tage). Als Beispiele sind anzuführen: Gold-198 (Halbwertszeit 2,7 Tage), Dysprosium-165 (2,3 Std), Indium-116 (54 min), Rhodium-104 (4,4 min), und Silber-108 (2,3 min) [6, 12, 13, 14, 17, 18].

Das Aktivierungsverfahren besitzt im Vergleich zur Kontaktmethode den großen Vorteil, daß der im Neutronen-Strahlenfeld normalerweise enthaltene Gamma-Untergrund ohne Einfluß auf das radiografische Bild bleibt, was sich insbesondere dann günstig auswirkt, wenn das Objekt selbst stark radioaktiv ist (z. B. aktivierte Reaktorbrandelemente). Der

Nachteil des Aktivierungsverfahrens ist, daß es durch den Zweistufenprozeß umständlicher wird und im Vergleich zur Kontaktmethode eine längere Belichtungszeit erfordert.

IV. Die Neutronenquellen

Zur Erzeugung von Neutronenradiografien werden Quellen für thermische Neutronen benötigt. Eine der Schwierigkeiten für die ersten neutronen-radiografischen Untersuchungen war die geringe Auswahl an Kernreaktionen, die — ohne allzu kostspieliges Material zu erfordern — genügende Neutronenflußdichten hervorbrachten. Vor allem nach der Entdeckung der Kernspaltung und der technischen Anwendung der Kernenergie hat sich das Angebot bedeutend erweitert.

Eine Aufteilung der Neutronenquellen in drei Gruppen erscheint sinnvoll:

1. Radioaktive Quellen,
2. Beschleuniger,
3. Kernreaktoren.

Für eine gute Auflösung sollten die Neutronen von einer möglichst punktförmigen Quelle ausgehen. Sie muß das Objekt homogen bestrahlen. Zusätzlich ist zu fordern, daß außer Neutronen keine weitere Strahlung ausgesandt wird, die der Detektor ebenfalls registriert. Das Verhältnis von Gamma- zu Neutronenstrahlung soll also möglichst klein sein. Die erste Forderung, die Punktstrahlung, ist für *thermische* Neutronen schwer zu erreichen. Thermische Neutronen werden gewöhnlich durch Abbremsung schneller Neutronen erhalten. Für diese Moderation finden im allgemeinen leichte Elemente wie Wasserstoff, Deuterium, Beryllium, Kohlenstoff Verwendung. Die Verlangsamung kommt vor allem durch elastische Zusammenstöße der Neutronen mit den leichten Kernen zustande. Um eine Abbremsung der ursprünglich meist im Energiegebiet um einige MeV ausgesandten Neutronen auf thermische Energien zu erreichen, ist eine beträchtliche Moderatorstärke erforderlich. Die Quellenfläche der langsamen Neutronen wird dadurch wesentlich größer als z. B. der Brennfleck einer Röntgenröhre [20].

1. Radioaktive Quellen

Von den radioaktiven Neutronenquellen sind am weitesten verbreitet die

a) *Alpha-Neutronenquellen*. Sie bestehen aus einem Alpha-Strahler und einem Target-Material, die innig miteinander vermischt sind. Da mit zunehmender Menge dieser Grundkomponenten auch die geometrische Größe der Quelle zunimmt, ergeben sich obere Grenzen der Neutronenergiebigkeit, wie sie in Tabelle 3 aufgeführt sind [26]. Als Target wird vorwiegend Beryllium verwendet; der Alphastrahler ist meistens Radium oder Polonium, neuerdings auch Aktinium, Plutonium und Thorium.

Tabelle 3. Gebräuchliche Alpha-Neutronenquellen und ihre Eigenschaften

| Alphastrahler | Alpha-Energien (MeV) | Halbwertszeit | Neutronenquelle | Ausbeute (Neutronen/sec Curie) |
|---------------------|--|---------------|-----------------|--------------------------------|
| Radium 226 | 4,791; 5,486; 5,998; 7,680; 5,298 | 1620 a | Ra: Be | 1,0 – 1,5 × 10 ⁷ |
| Blei 210 (Radium D) | 5,30 | 22 a | RaD: Be | 2,5 × 10 ⁶ |
| Polonium | 5,30 | 138 d | Po: Be | 2,5 × 10 ⁶ |
| Aktinium 227 | 4,94; 6,03; 5,86 6,82; 7,36; 6,62; 7,43 und andere | 22 a | Ac: Be | 1,7 – 2,0 × 10 ⁷ |
| Plutonium 239 | 5,15; 4,40; 5,00 | 24000 a | Pu: Be | 2,2 × 10 ⁶ |
| Thorium 228 | 5,42; 5,34; 5,68; 5,44; 5,75; 6,77; 6,28; 6,05; 6,09 | 1,9 a | RdTh: Be | 1,7 – 2,0 × 10 ⁷ |

Wie Tabelle 3 zeigt, liegen die Ergiebigkeiten der Alpha-Neutronenquellen in der Größenordnung von 10^7 Neutronen/sec · C. Es handelt sich um schnelle Neutronen, die z.T. bis über 10 MeV Energie besitzen. Abb. 5 und 6 zeigen die Energiespektren für eine Ra-Be- und eine Po-Be-Quelle [26]. Durch die notwendige Moderation auf thermische Energien nimmt der zur Verfügung stehende Neutronenstrom beträchtlich ab. In der Regel erhält man eine Verminderung um 2 bis 3 Größenordnungen. Eine anschließende Kollimation bewirkt weitere Reduzierung. Abb. 7 zeigt die Verteilung der Neutronenenergie einer wassermodierten Ra-Be-Quelle als Funktion des Abstandes [26].

Erschwerend wirkt sich die überlagerte Gammastrahlung aus. Sie stammt z.T. vom Alphastrahler selbst, z.T. von den angeregten Kernen der Target-Elemente. Um sie auszuschalten ist es erforderlich, die Quelle abzuschirmen oder sich auf die „Aktivierungsmethode“ zu beschränken. Den weitaus geringsten Gamma-Untergrund besitzt die Po-Be-Quelle, jedoch hat sie den Nachteil einer kurzen Halbwertszeit (138 Tage).

b) *Photo-Neutronenquellen*. Bei ihnen wird in einem Targetmaterial die Neutronen-Emission durch ein energiereiches Gammaquant ausgelöst. Für ein Berylliumtarget ist die Schwellenergie der Gammastrahlung 1,67 MeV; bei Deuterium beträgt sie 2,23 MeV. In allen anderen Fällen liegt sie über 6 MeV. Das ist höher als die Gammaenergien der bekannten Radioisotope, weshalb sich lediglich Beryllium und Deuterium als Targetelemente verwenden lassen. (Die Neutronen aus Photo-Neutronenquellen sind im Gegensatz zu den aus Alpha-Neutronenquellen monoenergetisch, sofern die Gammaquelle nicht mehr als eine

2. Beschleuniger

Höhere Quellstärken als mit radioaktiven Präparaten erzielt man mit *Beschleunigern* [7, 11]. Hier liegt die Ausbeute an schnellen Neutronen in der Größenordnung von 10^6 bis 10^{11} Neutronen/sec. Selbst

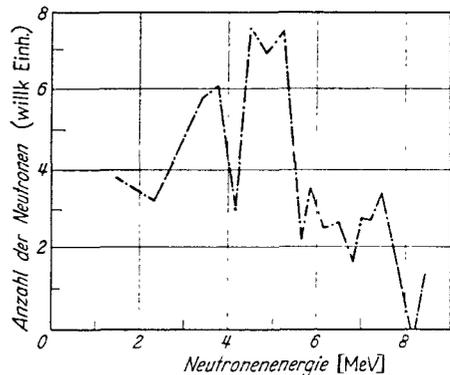


Abb. 5. Energiespektrum der Neutronen aus einer Ra-Be-Quelle

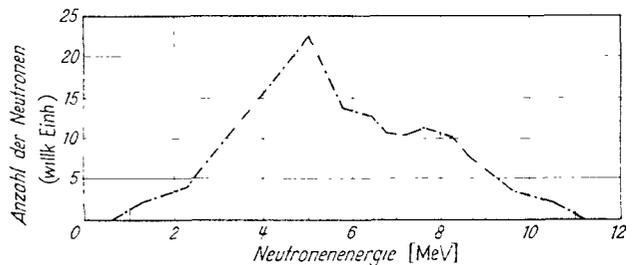


Abb. 6. Energiespektrum der Neutronen aus einer Po-Be-Quelle

Tabelle 4. Gebräuchliche Photo-Neutronenquellen und ihre Eigenschaften

| Type | Halbwertszeit | Gamma-Energien (MeV) | Neutronenenergie (MeV) | Ausbeute (Neutronen/sec; Curie) | Gammastrahlung (mrhm Curie) ¹ |
|-------------------------------------|---------------|----------------------|------------------------|---------------------------------|--|
| Na ²⁴ :Be | 14,8 h | 2,76 | 0,83 | $1,3 \times 10^4$ | 1920 |
| Na ²⁴ :D ₂ O | 14,8 h | 2,76 | 0,22 | 27×10^4 | 1920 |
| Mn ⁵⁶ :Be | 2,59 h | 1,81; 2,13; 2,7 | 0,15; 0,30 | $2,9 \times 10^4$ | |
| Mn ⁵⁶ :D ₂ O | 2,59 h | 2,7 | 0,22 | $0,31 \times 10^4$ | |
| Ga ⁷² :Be | 14,1 h | 1,87; 2,21; 2,51 | 0,78 | 5×10^4 | 1500 |
| Ga ⁷² :D ₂ O | 14,1 h | 2,51 | 0,13 | 6×10^4 | 1500 |
| Y ⁸⁸ :Be | 87 d | 1,9; 2,8 | 0,158 | 10×10^4 | |
| Y ⁸⁸ :D ₂ O | 87 d | 2,8 | 0,31 | $0,3 \times 10^4$ | |
| In ¹¹⁶ :Be | 54 m | 1,8; 2,1 | 0,30 | $0,82 \times 10^4$ | |
| Sb ¹²⁴ :Be | 60 d | 1,7 | 0,024 | 19×10^4 | 1200 |
| La ¹⁴⁰ :Be | 40 d | 2,50 | 0,62 | $0,3 \times 10^4$ | |
| La ¹⁴⁰ :D ₂ O | 40 d | 2,50 | 0,151 | $0,8 \times 10^4$ | |

¹ mrhm = milliröntgen pro Stunde in 1 m Entfernung.

Gammaenergie aussendet, welche über der Schwellenergie liegt. Da die Neutronen aber auch hier erst in das thermische Energiegebiet heruntermoderiert werden müssen, ist diese Eigenschaft für radiografische Zwecke ohne Bedeutung.)

Tabelle 4 gibt einen Überblick über mögliche Photo-Neutronenquellen. Es ist ersichtlich, daß die Quellstärken unterhalb der der Alpha-Neutronenquellen liegen. Die am häufigsten verwendete Photo-Neutronenquelle ist die Sb-Be-Quelle, die sich durch eine relativ lange Halbwertszeit, eine hohe Quellstärke und einen niedrigen Preis auszeichnet.

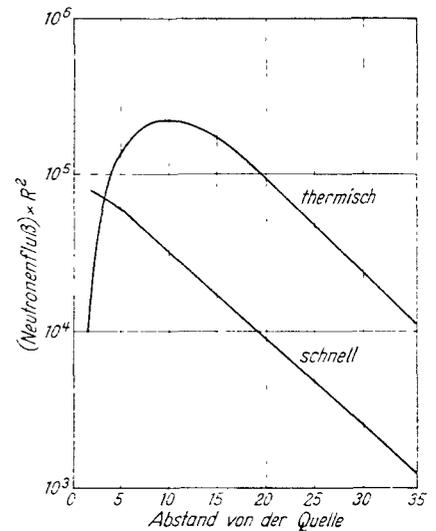
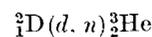


Abb. 7. Verteilung der Neutronen aus einer Ra-Be-Quelle in Wasser (Quellstärke 10^6 n/sec)

nach Moderation und Kollimation ist noch mit einem Fluß von 10^3 bis 10^8 Neutronen/cm² · sec zu rechnen, ein Bereich, der für radiografische Arbeiten ausreichend ist.

Bestrahlt man ein Deuteriumtarget, etwa schweres Wasser, schweres Paraffin oder Deuterium-Verbindungen mit Deuteronen, so erhält man eine intensive Neutronenquelle. Die zugrunde liegende Kernreaktion ist



(eine gleichwahrscheinliche Konkurrenzreaktion ist ${}^2_1\text{D}(d, p){}^3_1\text{H}$).

Weitere Möglichkeiten zur Erzeugung von Neutronen über Kernreaktion mittels Beschleunigungsanlagen sind: die Bestrahlung eines Lithiumtargets mit Protonen und die eines Beryllium- bzw. Tritiumtargets mit Deuteronen. In Frage kommende Maschinen sind van de Graaff-Beschleuniger und Zyklotrone, in beiden Fällen mit mehreren MeV betrieben. Die Kernreaktionen sind:

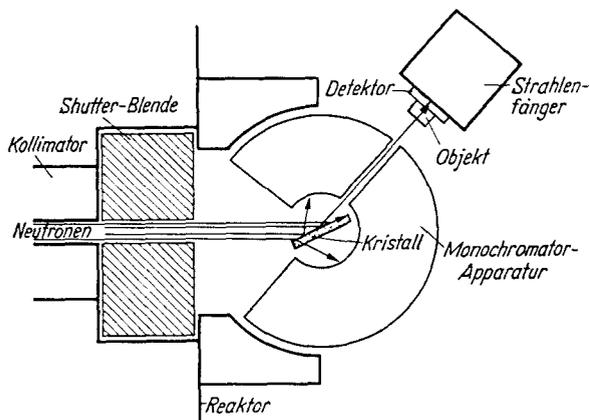
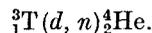
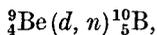
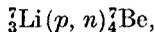


Abb. 8. Schematische Darstellung einer Anordnung zur Erzeugung von Neutronenradiografien unter Benutzung eines Kristall-Monochromators an einem Reaktor

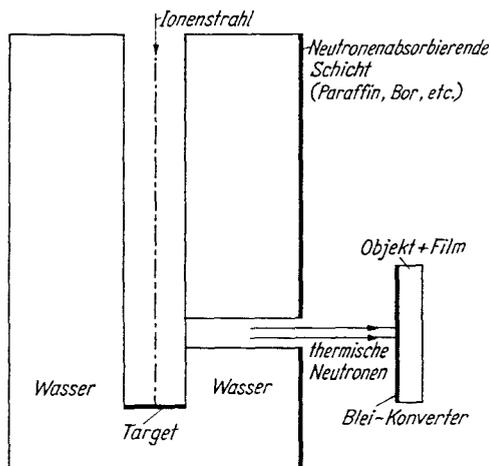


Abb. 9. Von KALLMANN benutzte Anordnung zur Erzeugung von Neutronenradiografien

3. Kernreaktoren

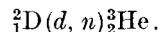
Den angeführten Neutronenquellen überlegen bezüglich Neutronenausbeute ist der *Kernreaktor*. Hier hat man Flußdichten in der Größenordnung von 10^{11} bis 10^{13} Neutronen/cm² · sec. Nachteilig kann die örtliche Gebundenheit der Anlage sein.

Man baut das Objekt entweder in einer thermischen Säule auf, oder an einem Neutronenspektrometer. Die thermische Säule hat den Vorteil, daß auch größere Objekte radiografiert werden können. Durch Verwendung von Wismut-Filtern, die einen hohen Absorptionsquerschnitt für Gammastrahlung haben, jedoch Neutronen nur geringfügig schwächen, läßt sich der störende Gamma-Untergrund weitgehend

unterdrücken. Auch mit Neutronenspektrometern (Abb. 8), die an den meisten Reaktoren bereits vorhanden sind, erhält man eine gute Trennung von Neutronen- und Gammastrahlung. Der kollimierte Neutronenstrahl trifft auf einen Kristall-Monochromator, welcher die Diskriminierung der verschiedenen Energien vollzieht. Es ist zu bemerken, daß dieser Aufbau über die Bedürfnisse der Radiografie hinaus nicht nur thermische, sondern sogar monoenergetische Neutronen liefert. Letztere sind für Versuche dieser Art nicht nötig, weswegen sich auch der Aufbau einer solchen Apparatur ausschließlich zum Zwecke der Radiografie kaum lohnt.

4. Historisches

Die ersten erfolgreichen Experimente zur Neutronenradiografie wurden bereits während des 2. Weltkrieges in Deutschland durch KALLMANN und KUHN durchgeführt [2]. Als Neutronenquelle diente eine kleine Entladeröhre, die bei 300 kV arbeitete. Ein Deuteronenstrahl traf auf ein Target aus schwerem Eis oder schwerem Paraffin und erzeugte Neutronen gemäß der Reaktion



KALLMANN gibt an, daß die Intensität seiner Quelle vergleichbar war mit der einer Ra-Be-Quelle, die aus 2 bis 3 g Radium aufgebaut ist. Durch einen engen-Schlitz, der gleichzeitig als Kollimator wirkt, treten die Neutronen aus der Quelle aus (Abb. 9). Objekt und Film waren in einer bleigepanzerten Kassette verpackt, um die fotografische Wirkung der gleichzeitig ausgesandten Gammastrahlen zu unterdrücken. Die besten Detektoreigenschaften zeigte ein zwischen zwei Bor- bzw. Lithiumschichten gelegter Röntgenfilm. In weiteren Versuchen prüfte KALLMANN noch verschiedene andere Materialien auf ihre Brauchbarkeit als Detektoren. So erwähnt er z.B. bereits die Gamma-Emission von Cadmium und die Beta-Emission von Gadolinium, Silber und Indium als fotografisch nützlich zur Aufzeichnung von Neutronen.

PETER [3] führte die Arbeiten von KALLMANN und KUHN mit einer wesentlich stärkeren Neutronenquelle fort. Die Anordnung war die gleiche wie in Abb. 9, jedoch entsprach die Intensität einem Äquivalent von 13 kg Radium in einer Ra-Be-Quelle. Mit dieser gesteigerten Neutronenenergie gelang es PETER, Radiografien technischer Objekte in 1 bis 3 min herzustellen, wozu KALLMANN noch Belichtungszeiten von mehr als 4 Std benötigte. Als Detektor diente ihm ein Röntgenfilm, der in einer Sandwich-Packung zwischen einer Silber- und einer Cadmiumfolie lag.

Anfang der fünfziger Jahre wurde die Forschung auf dem Gebiet der Radiografie in Großbritannien durch THEWLIS wieder aufgegriffen [4, 5, 6]. Als Neutronenquelle diente nunmehr ein Kernreaktor (BEPO), als Detektor ein Röntgenfilm mit einer konvertierenden Indiumfolie. Die von THEWLIS veröffentlichten Radiografien waren, was Auflösung anbetrifft, bereits mit Gammadiografien vergleichbar. Dieser Autor wies zum ersten Mal ausführlich auf das weite Anwendungsfeld der Neutronenradiografie hin, wobei er insbesondere die zerstörungsfreie Untersuchung von neutronenabschirmenden Materialien und die Radiografie von biologischen Objekten nannte.

V. Die Abbildungseigenschaften verschiedener Detektoranordnungen

1. Einfluß der Dicke des Konverters

Umfangreiche experimentelle Untersuchungen galten der Bestimmung der günstigsten Dicke der Konverterfolien [8, 13, 16]. Bei Beta-Strahlern ist diese optimale Dicke aufgrund der geringen Reichweite der Beta-Teilchen verhältnismäßig leicht abschätzbar. Bei Gammastrahlen, z.B. von Cadmium, sollte der Konverter die Neutronen vollständig absorbieren. Die im folgenden aufgeführten Untersuchungsergebnisse wurden so erhalten, daß ein Röntgenfilm zwischen zwei Konverterfolien einer konstanten Neutronendosis ausgesetzt wurde (Sandwich-Methode). Falls der Konverter selbst radioaktiv wurde, blieben Film und Konverter nach Beendigung der Neutronenbestrahlung noch drei Halbwertszeiten miteinander in Kontakt. (Dies stellt also eine Verknüpfung von Kontakt- und Aktivierungsmethode dar).

Abb. 10 zeigt für Cadmiumkonverter die Abhängigkeit der Filmschwärzung von der Stärke des Vorder- bzw. Rückschirms (Rückschirm ist der Schirm, welcher sich am weitesten entfernt von der Neutronenquelle befindet). In der oberen Darstellung sind die Dicken der Vorderschirme konstant gehalten, und ihre absoluten Beträge an den Kurven vermerkt. Es zeigt sich, daß ab einer Stärke des Rückschirms von 480 μ alle Kurven abfallen und daß die größte Schwärzung bei einem Vorderschirm der Dicke 240 μ erreicht wird. In der unteren Abbildung ist die Filmschwärzung gegen die Stärke des Vorderschirms aufgetragen. Die Dicke des Rückschirms beträgt dabei konstant 480 μ . Die Kurve zeigt ein breites Maximum für einen Vorderschirm zwischen 240 und 360 μ . Aus beiden Darstellungen ergibt sich, daß bei Cadmium-Konvertern die optimale Kombination durch einen 240 μ Vorder- und einen 480 μ Rückschirm gegeben ist. Im folgenden wird für derartige Anordnungen die Bezeichnung Cd (240—480) gebraucht werden, wobei sich die in der Klammer stehenden Zahlen auf die Dicke des Vorder- bzw. Rückschirms beziehen.

Eine 240 μ starke Cadmiumfolie absorbiert etwa 95% aller auftreffenden thermischen Neutronen. Die durch den Rückschirm hervorgerufene zusätzliche Schwärzung scheint somit von der Elektronenstrahlung herzuführen, welche durch die harte Gammastrahlung des (n, γ)-Prozesses ausgelöst wird. Diese Annahme wird auch dadurch gestützt, daß sich die Schwärzung nur geringfügig ändert, falls das Cadmium des Rückschirms durch Blei ersetzt wird.

Optimale Konverterdicken für Silber und Indium wurden in ähnlicher Weise ermittelt. Die Daten sind in Abb. 11 und 12 dargestellt. Da beide Elemente bei Neutronenbestrahlung radioaktiv werden, ist es notwendig, neben der Bestrahlungszeit für Neutronen auch den Zeitraum zu kontrollieren, während dessen Film und Konverter nach der Bestrahlung noch miteinander in Kontakt sind. Dieser Zeitraum betrug in allen Fällen drei Halbwertszeiten. Bei Silber sind die beiden wesentlichen Isotope Ag^{108} und Ag^{110} , die entsprechenden Halbwertszeiten 2.3 min bzw. 24.2 sec. Im Falle des Indiums ist wegen der langen Halbwertszeit des Indiums-116 (54.1 min) die Bestrahlung

über mehrere Stunden zu erstrecken, falls Sättigungsaktivität erreicht werden soll. Abb. 11 und 12 zeigen, daß die optimale Kombination für Silber Ag (480—420), für Indium In (480—720) sind.

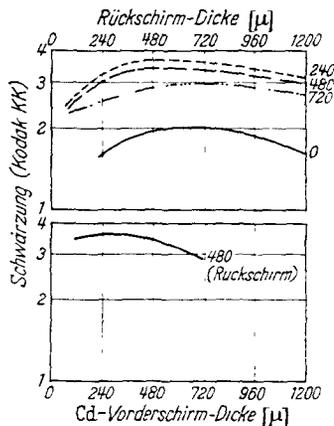


Abb. 10. Optimale Cadmium-Schirmdicken für konstante Neutronenexposition. Obere Abbildung: Einfluss der Rückschirm-Dicke auf Filmschwärzung (Parameter: Dicke des Vorderschirms). Untere Abbildung: Einfluss der Vorderschirm-Dicke auf Filmschwärzung (für Rückschirm der Dicke 480 μ)

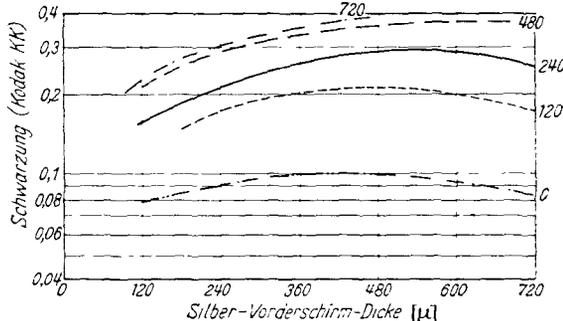


Abb. 11. Optimale Vorderschirm-Dicken bei Silber für konstante Neutronenexposition (Parameter: Dicke des Silber-Rückschirms in μ)

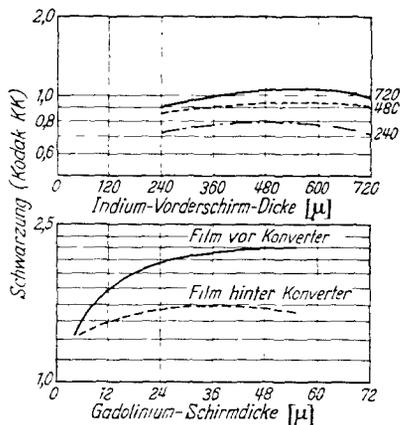


Abb. 12.

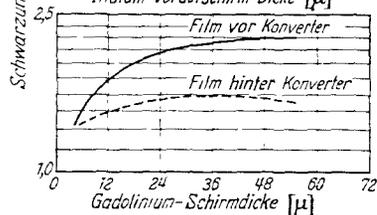


Abb. 13.

Abb. 12. Optimale Vorderschirm-Dicken bei Indium für konstante Neutronenexposition (Parameter: Dicke des Silber-Rückschirms in μ)

Abb. 13. Einfluß der Schirmdicke und Filmposition beim Gadolinium-Kontaktverfahren

Da Gadoliniumfolien erst neuerdings erhältlich sind, liegen Ergebnisse für dieses Element nur in beschränktem Maße vor. Abb. 13 zeigt die Abhängigkeit der Filmschwärzung von der Konverterdicke, wobei jedoch — im Gegensatz zu oben — nur entweder mit Vorder- oder Rückschirm gearbeitet wurde. Deutlich zeigt sich die Überlegenheit des Vorderschirms. Die optimale Dicke mit 24 bis 30 μ ist erstaunlich niedrig.

2. Die Empfindlichkeit

Vergleichbare Werte für die Empfindlichkeit verschiedener Konvertermaterialien wurden durch die

Tabelle 5. Relative Empfindlichkeiten verschiedener Konverter beim Kontaktverfahren

| Konvertermaterial und -anordnung | Relative Empfindlichkeit ¹ |
|--|---------------------------------------|
| B-10 Szintillator (Rückschirm) | 32 |
| Rhodium-Doppelkonverter (240—240) ² | 1,4 |
| Gadolinium-Doppelkonverter (12—48) | 1,1 |
| Indium-Doppelkonverter (480—720) | 1,1 |
| Cadmium-Doppelkonverter (240—480) | 1,0 |
| Silber-Doppelkonverter (430—430) | 0,8 |
| Gadolinium-Einfachkonverter (Rückschirm: 24) | 0,71 |
| Cadmium-Einfachkonverter (Rückschirm: 240) | 0,67 |
| Rhodium-Einfachkonverter (Rückschirm: 240) | 0,62 |
| Indium-Einfachkonverter (Vorderschirm: 480) | 0,5 |
| Silber-Einfachkonverter (Vorderschirm: 360) | 0,35 |

¹ Als Filmmaterial wurde — außer bei B-10 Szintillator („Kodak F“) — ausschließlich „Kodak KK“-Film verwendet.
² Die erste Zahl bezieht sich auf die Dicke des Vorderschirmes, die zweite auf die des Rückschirmes, jeweils gemessen in μ .

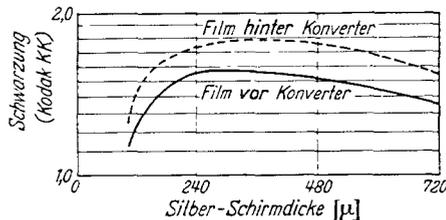


Abb. 14. Einfluß der Schirmdicke und Filmposition beim Silber-Kontaktverfahren

Tabelle 6. Das Auflösungsvermögen verschiedener Konvertertypen³

| Konvertermaterial ¹ , Dicke und Lage (bezüglich Film) | Auflösungs-vermögen ² | | Untersuchte Konverter- dicken μ | Neutronen- Bestrahlungs- zeit in Minuten (für Kodak-AA) | Bemerkungen |
|--|----------------------------------|----------------------------------|--|--|-----------------|
| | Cadmium- Test-stück μ | Gadolinium Teststück μ | | | |
| 12 Gd (Rück) | 28 | 9,6 | 6—48 | 11,1 | Metallfolien |
| 72 Cd (Rück) | 28 | — | 24—720 | 15,1 | |
| 72 Rh (Rück) | 48 | — | 72—240 | 17,1 | |
| 120 In (Vorder) | 48 | — | 48—720 | 23 | |
| 240 Dy (Rück) | 48 | — | 120—240 | 8,1 | |
| 120 Ag (Vorder) | 48—86 | — | 120—720 | 21,75 | |
| Li ⁶ F-Pulver (Rück) | 28 | 24 | 60 | 25 | |
| B-10, ZnS (Ag) (Rück) | 28 | 72 | < 24 | 8 | |
| Li-6, ZnS (Ag) (Rück) | 48 | — | 190 | 0,1 | |
| Li-6, ZnS (Ag) (Rück) | 48 | — | 1440 | 0,1 | |
| Li-6, Glas (Rück) | 48 | — | 1800 | 1 | |
| B-10, ZnS (Ag) (Rück) | 48 | — | 280 | 1 | Doppelkonverter |
| 240—240 Rh | 48—86 | — | — | 4,3 | |
| 480—720 In | 86 | — | — | 5,5 | |
| 430—430 Ag | 86 | — | — | 7,5 | |
| 240—480 Cd | 480 | — | — | 6 | |
| 6—48 Gd | 28 | 9,6—17 | — | 4,8 | |
| 240 Rh—48 Gd | 28 | 24—72 | — | 3,85 | |
| 72 Au (Aktiv.-Meth.) | 28 | 24 | 72—240 | 240 | |
| 48 In (Aktiv.-Meth.) | 48 | — | 48—720 | 163 | |
| 240 Dy (Aktiv.-Meth.) | 48 | — | 120—240 | 14,6 | |

¹ Zahl vor Element bedeutet Konverterdicke in μ .
² Zahlen in Spalten sind die maximal auflösbaren Abstände in μ zwischen den Löchern des Teststücks.
³ Neutronenfluß 3×10^5 n/cm²sec.

Auswertung der jeweiligen Filmschwärzungen und Expositionszeiten erhalten [16]. Hierbei wurde entweder die Neutronendosis konstant gehalten oder solange bestrahlt bis gleiche Filmschwärzungen erzielt worden waren. Bei der Bemessung der Dicke der Konverterfolien machte man weitgehend von den oben angeführten Ergebnissen Gebrauch. (Aus Beschaffungsgründen mußten die verschiedenen Autoren oft Folien vorgegebener Stärke verwenden.)

Tabelle 5 zeigt eine Zusammenstellung der Empfindlichkeiten der untersuchten Konverterschirme. Hierbei ist die Empfindlichkeit des Cadmium-Konverters willkürlich mit dem Wert 1,0 bedacht. Eindeutig zeigt sich die Überlegenheit der Doppelschirme (Konverter bestehend aus Vorder- und Rückschirm) im Vergleich zu den Einzelschirmen (Vorder- oder Rückschirm). Zu beachten ist, daß sich diese Stufung nur auf die Empfindlichkeit bezieht und nicht auf die weiter unten betrachtete Abbildungsschärfe.

Herausragend ist die Empfindlichkeit des B¹⁰-Szintillators. Da auch sein Auflösungsvermögen gut ist, so besitzt er gemeinsam mit Gadolinium die günstigsten Konvertereigenschaften. Nachteilig wirkt sich jedoch aus, daß zuweilen der Untergrund der Radiografien gefleckt erscheint, was durch nicht gleichförmige Verteilung des ZnS (Ag)-Phosphors erklärt wird [22, 23].

An zweiter Stelle kommen die Doppelschirmanordnungen von Rhodium, Gadolinium, Indium, Cadmium und Silber: die Einzelschirmanordnungen sind in der Reihenfolge Gadolinium, Cadmium, Rhodium, Indium und Silber abgestuft. Bemerkenswert ist, daß bei Einzelschirmen die Empfindlichkeit deutlich davon abhängt, ob der Konverter (von der Neutronenquelle her gesehen) vor oder hinter dem Film angebracht

ist. Abb. 14 veranschaulicht diese Verhältnisse am Beispiel des Silbers.

3. Die Auflösung

Von ausschlaggebender Bedeutung für die Güte einer Radiografie ist das Auflösungsvermögen des Konverters. Quantitative Untersuchungen hierüber sind spärlich und erst neueren Ursprungs. BERGER [19] verwendet für seine vergleichenden Experimente ein Testobjekt aus Cadmium, in das Löcher gleichen Durchmessers (480 μ) gebohrt sind. Die Abstände zwischen diesen Löchern variieren von 720 bis 30 μ . Von diesem Testobjekt wurden nach verschiedenen Techniken und mit verschiedenen Konvertern Radiografien hergestellt und auf ihre Abbildungsschärfe hin untersucht. Tabelle 6 gibt eine Zusammenstellung der Ergebnisse wieder. Im oberen Teil sind die verschiedenen Metallkonverter bei

Einzelschirmanordnung aufgeführt. Die Angaben über Schirmstärke und -anordnung beziehen sich auf optimale Auflösung. Die Untersuchungen ergaben in den meisten Fällen eine deutliche Überlegenheit des Rückschirms gegenüber dem Vorderschirm. Abb. 15 zeigt dies für den Fall eines Cadmiumschirms.

An die Einzelschirme schließen sich in Tabelle 6 die Szintillatoren an; diesen folgen die Doppel-Metallschirme. Am Ende der Tabelle sind noch drei Konverter aufgeführt, die häufige Verwendung beim Aktivierungsverfahren finden.

Gadolinium war in der Lage, alle Lochabstände in dem Testobjekt aufzulösen. Um die Grenze seines Auflösungsvermögens festzustellen, wurde ein zweites Testobjekt aus Gadolinium hergestellt, dessen Lochdurchmesser 120 μ war, während die Abstände von 72 bis 6 μ variierten. Auch diese wurden alle aufgelöst.

Als die wirkungsvollsten Szintillatoren erwiesen sich Li^6F und B^{10} , bedeckt mit $ZnS(Ag)$ -Leuchtphosphor, welche beide die engsten Abstände des ursprünglichen Testobjekts aufzulösen vermochten. Unter den Doppelschirmen ist Rhodium sehr brauchbar. Bei der Herstellung von Radiografien nach der Aktivierungsmethode sind Goldkonverter zu empfehlen, falls auf die Schärfe der Abbildung Wert gelegt werden muß.

VI. Die Anwendungsmöglichkeiten der Neutronenradiografie

Für die praktische Anwendung ist die Neutronenradiografie nicht als Konkurrenzmethode zur bisher benützten Röntgen- und Gammarradiografie anzusehen. Beide Arten der Radiografie haben ihre spezifischen Anwendungsgebiete. Die Neutronenradiografie ist zur Lösung folgender Probleme besonders geeignet:

1. Radiografie von Elementen *niedriger* Ordnungszahl, wegen des hohen Massenschwächungskoeffizienten für diese Elemente.
2. Radiografie von Elementen *hoher* Ordnungszahl, wegen des relativ niedrigen Massenschwächungskoeffizienten für diese Elemente.
3. In Einzelfällen zur Radiografie *benachbarter* Elemente, falls die Massenschwächungskoeffizienten genügend weit voneinander abweichen.
4. Zur Radiografie *radioaktiver* Objekte, falls die Eigenstrahlung eine Röntgen- oder Gammarradiografie unmöglich macht.

Für alle vier Gruppen lassen sich Beispiele angeben, in denen die Neutronenradiografie mit Erfolg angewendet wird [5, 6, 13, 15].

Zu 1. Die starke Neutronenabsorption wasserstoffhaltiger Substanzen ermöglicht die Radiografie von Hochpolymeren, Gummi, Holz, Papier, etc. Dies gilt im besonderen für Abschirmmaterial von Neutronen, welches unter anderem auf Homogenität und Lückenfreiheit untersucht werden kann. In der Reaktortechnologie ist die homogene Verteilung des neutronenabsorbierenden Bors in den Kontrollstäben aus Zirkon wichtig. Röntgen- bzw. Gammarradiografie geben hier wenig Aufschluß, da die Schwächung durch Borkarbid und Zirkon sich nur geringfügig unterscheidet. Anders ist dies im Falle der Neutronenradiografie, wie Abb. 16a und b deutlich zeigen.

Im Prinzip ähnlich ist die Anwendung der Neutronenradiografie auf Probleme der Diffusion. Hier ist unter anderem die Verfolgung der Diffusion von Bor und Lithium in Halbleitern vorgeschlagen worden [18].

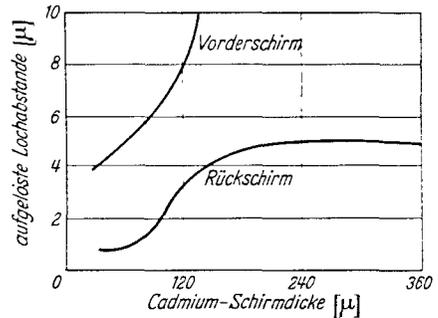


Abb. 15. Das Auflösungsvermögen eines Cadmiumkonverters in Abhängigkeit von seiner Dicke (Kontaktverfahren). Es zeigt sich deutlich die Überlegenheit des Rückschirms gegenüber dem Vorderschirm

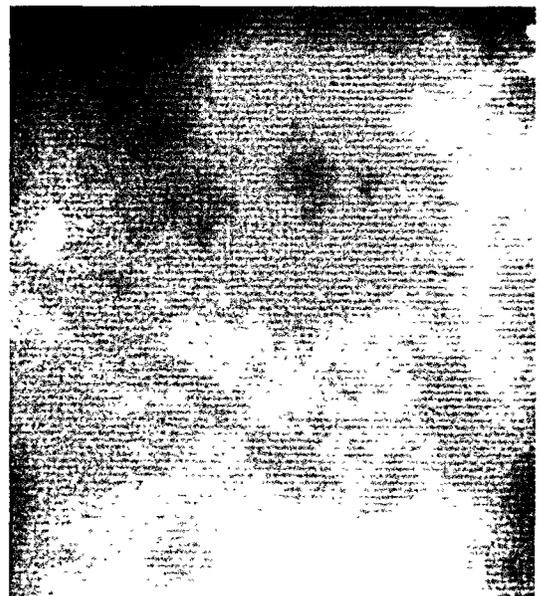


Abb. 16a



Abb. 16b

Abb. 16a u. b. Neutronen- bzw. Gammarradiografien eines Stück Boralblechs (Borcarbid zwischen zwei Aluminiumfolien gepreßt). b zeigt deutlich einen defekten Bereich, an dem die Boreinlagerung unterbrochen ist (helles Gebiet). Die gammarradiografische Untersuchung bringt diesen Defekt nicht zutage

Schließlich sei noch auf die Durchleuchtung biologischer Objekte wie Blätter, Insekten, etc. hingewiesen. Abb. 17 illustriert die Tatsache, daß Neutronenstrahlen sowohl zur Untersuchung von Stahl- und Bleiobjekten beträchtlicher Dicken als auch für dünnere biologische Proben verwendet werden kann.

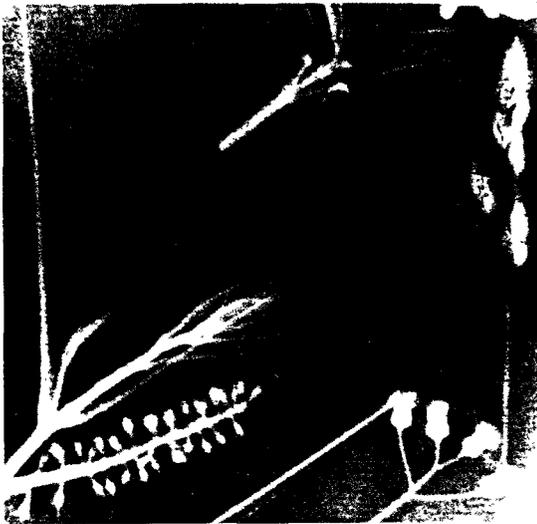


Abb. 17. Neutronenradiografische Abbildung pflanzlicher Objekte (Blätter, Blüten etc.)

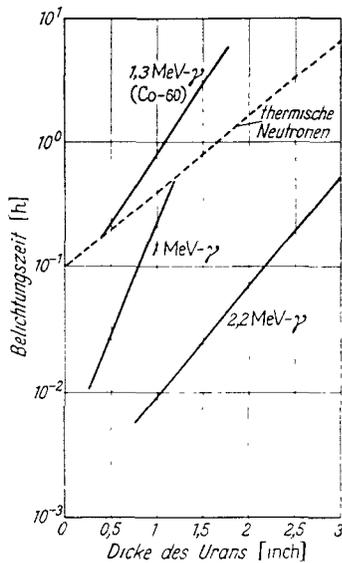


Abb. 18. Belichtungszeiten für Neutronen- bzw. Gammastrahlen bei der Radiografie von Uran. Der Fluß der Neutronenquelle betrug 10^5 n $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ (Angaben für Gammaquellen fehlen). Die Daten beziehen sich auf Gadoliniumkonverter bei Verwendung der Kontaktmethode [18]

Zu 2. Zur Untersuchung schwerer Objekte aus Wismut, Blei, Uran, etc. wird die Neutronenradiografie insbesondere dann interessant, wenn die Dicke der Objekte 2 bis 5 cm übersteigt. In diesem Falle liegen die benötigten Belichtungszeiten z.T. beträchtlich unter denen der Röntgen- und Gammadiografie, wie Abb. 18 veranschaulicht. (Es sei vermerkt, daß den Kurven ein verhältnismäßig sehr bescheidener Neutronenfluß von 10^5 Neutronen/ $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ zugrunde liegt.) In der Praxis spielen solche Untersuchungen vor allem bei der Prüfung von Reaktorbrennelementen eine Rolle. Untersuchungen auf Homogenität der Packung können mit Neutronen in kurzer Zeit durchgeführt werden.

Zu 3. Eine weitere neue Möglichkeit, die sich bei der Anwendung der Neutronenradiografie bietet, ist die Unterscheidung zwischen benachbarten Elementen im Periodensystem. Bei der Röntgen- und Gammadiografie ist dies unmöglich. Im Normalfall sind aus verschiedenen Materialien aufgebaute Objekte erst dann sichtbar zu machen, wenn der Unterschied der Ordnungszahlen ihrer Elemente 10 bis 15 Einheiten beträgt. Mit Neutronen gelingt unter anderem die Unterscheidung solcher benachbarter Elementpaare wie Cadmium und Zinn, Bor und Kohlenstoff sowie Blei und Gold. In diesen Fällen unterscheiden sich die Massenschwächungskoeffizienten um Faktoren 10 bis 1000, was zu deutlich auswertbaren Schwärzungscontrasten führt.

Zu 4. Besonders bewährt hat sich die Neutronenradiografie bei der Prüfung stark radioaktiver Objekte. Das sind z. B. Reaktorbrennelemente, die bereits einige Zeit der Reaktorstrahlung ausgesetzt waren. Zerstörungsfreie Untersuchungen können erwünscht sein, um Längenänderungen festzustellen, Brennstofflücken (Heterogenitäten) aufzudecken oder die Lage von angelöteten Thermoelementen nachzuprüfen. Ist das Objekt bereits sehr stark radioaktiv, so wird eine Radiografie mit Gammastrahlen keinen genügenden Kontrast aufweisen. Auch die Verwendung eines Schlitzverschlusses hilft nur bis zu einer Aktivität von unterhalb 20 r/h (ganz abgesehen davon, daß diese Apparaturen sehr aufwendig sind). Alle diese Schwierigkeiten werden umgangen bei Anwendung der Neutronen-Aktivierungsmethode. Solche Untersuchungen wurden mit großem Erfolg unter anderem am Argonne-Reaktor CP-5 durchgeführt [27].

Herrn Dr. SÜSSMANN danke ich für die Unterstützung dieser Arbeit und nutzbringende Hinweise. Herrn Priv.-Doz. Dr. SIZMANN (Labor. f. Technische Physik, TH München) für seine fördernde Anteilnahme und zahlreiche wertvolle Anregungen.

Literatur: [1] GLOCKER, H.: Materialprüfung mit Röntgenstrahlen, 4. Aufl. Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer 1958. — [2] KALLMANN, H.: Research 1, 254—260 (1947). — [3] PETER, O.: Z. Naturforsch. 1, 557—559 (1946). — [4] THEWLIS, J., and R. T. P. DERBYSHIRE: Neutron Radiography. Harwell Report AERE M/TN 37 (Juli 1956). — [5] THEWLIS, J.: Brit. J. Appl. Phys. 7, 345—350 (1956). — [6] THEWLIS, J.: Neutron Radiography. Progress in Nondestructive Testing, vol. 1, p. 111—126. London: Heywood & Co., Ltd 1958. — [7] BURRILL, E. A.: The Scientific Application of Particle Accelerators to Nondestructive Testing. Proceedings Symposium on Physics and Nondestructive Testing, Okt. 1960. ANL-6346, p. 176—196. — [8] BERGER, H.: Neutron Radiography. Symposium on Physics and Nondestructive Testing, Okt. 1960, ANL-6346, p. 12—38. — [9] WATTS, H. V., and C. A. STONE: Trans. Am. Nuclear Soc. 4, No. 1, 127—128 (1961). — [10] STONE, C. A.: Techniques of Nondestructive Testing Utilizing Radioisotopes. Symposium Missiles and Rockets, Concord, Cal. April 1961. — [11] BURRILL, E. A.: High Energy Nuclear Radiation — Their Implication for Industry. Nondestructive Testing, vol. 19, p. 167—176, Mai—Juni 1961. — [12] WATTS, H. V.: Research Study on Neutron Interactions in Matter as related to Image Formation. Armour Research Foundations Report ARF-1164-12. — [13] BERGER, H.: Neutron Radiography — A second Progress Report. 2nd Symposium on Physics and Nondestructive Testing, Oct. 1961, ANL-6515. — [14] WATTS, H. V.: Investigations in Neutron Imaging, 2nd Symposium on Physics and Nondestructive Testing, Oct. 1961, ANL-6515. — [15] BERGER, H.: Sci. American II (101—119) (1962). — [16] BERGER, H.: J. Appl. Phys. 33, 48—55 (1962). — [17] BERGER, H.: Nucleonics 20, No. 9, 77—81 (1962). — [18] BERGER, H.: A Discussion of Neutron Radiography. Nondestructive Testing, Mai—Juni

1962, p. 185—194. — [19] BERGER, H.: J. Appl. Phys. **34**, Part 1, 914—918 (1963). — [20] FELD, B.T.: The Neutron, Part 7, in: Experimental Nuclear Physics, edit. by E. SEGRE, vol. II. New York: John Wiley & Sons 1953. — [21] BREIT, G., and E.P. WIGNER: Phys. Rev. **49**, 519 (1936). — [22] SUN, K.H., P.R. MALMBERG, and F.A. PECJAK: Nucleonics **14**, No. 7, 46 (1956). — [23] STEDMAN, R.: Rev. Sci. Instr. **31**, 1156 (1960). — [24] WANG, S.P., C.G. SHULL, and W.C. PHILIPPS: Rev. Sci. Instr. **33**, 126 (1962). — [25] CAMERON,

J.F., J.R. RHODES, and P.F. BERRY: Tritium Bremsstrahlung and its Applications. AERE-R 3086, Okt. 1959. — [26] Neutron Sources and their Characteristics. Atomic Energy of Canada Ltd., Technical Bulletin NS-1. — [27] BERGER, H., and W.N. BECK: Nuclear Sci. and Eng. **15**, 411—414 (1963).

Anschrift: Dr. WILLY MARTH
Kernforschungszentrum Karlsruhe
Abteilung Reaktorbetrieb, 75 Karlsruhe