

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

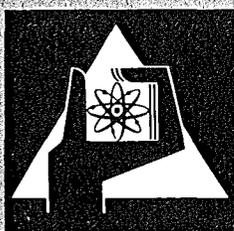
September 1973

KFK 1841

Abteilung Reaktorbetrieb und Technik

Neutronenradiographie am FR 2

H. Schülken



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

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

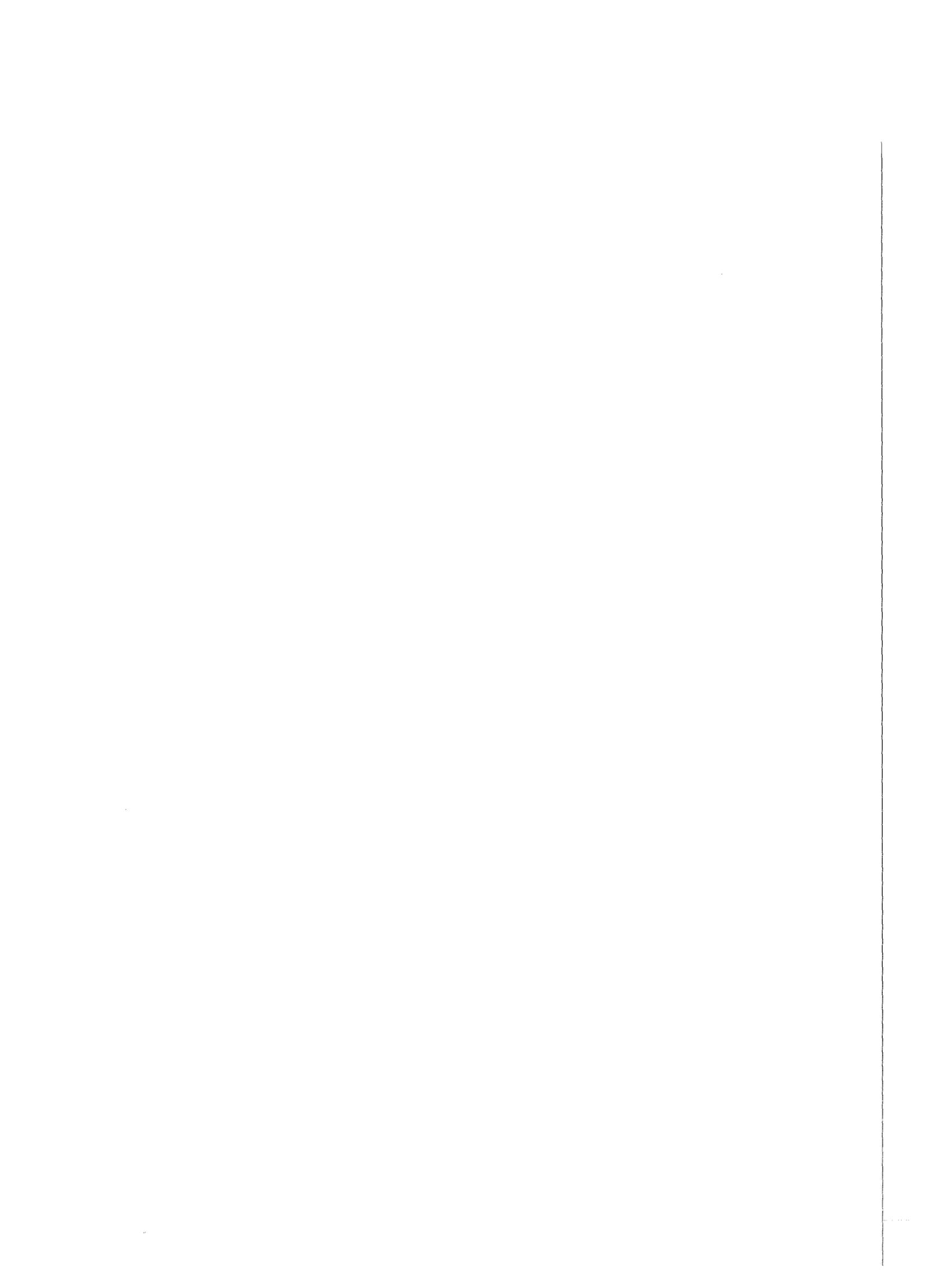
KFK 1841

Abteilung Reaktorbetrieb und Technik

Neutronenradiographie am FR2

H. Schülken

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M.B.H., KARLSRUHE



Zusammenfassung

Am FR2 wird eine Neutronenradiographieanlage zur zerstörungsfreien Untersuchung hoch radioaktiver Reaktoreinsätze aufgebaut. Als Aufnahmetechnik wird das Aktivierungsverfahren gewählt.

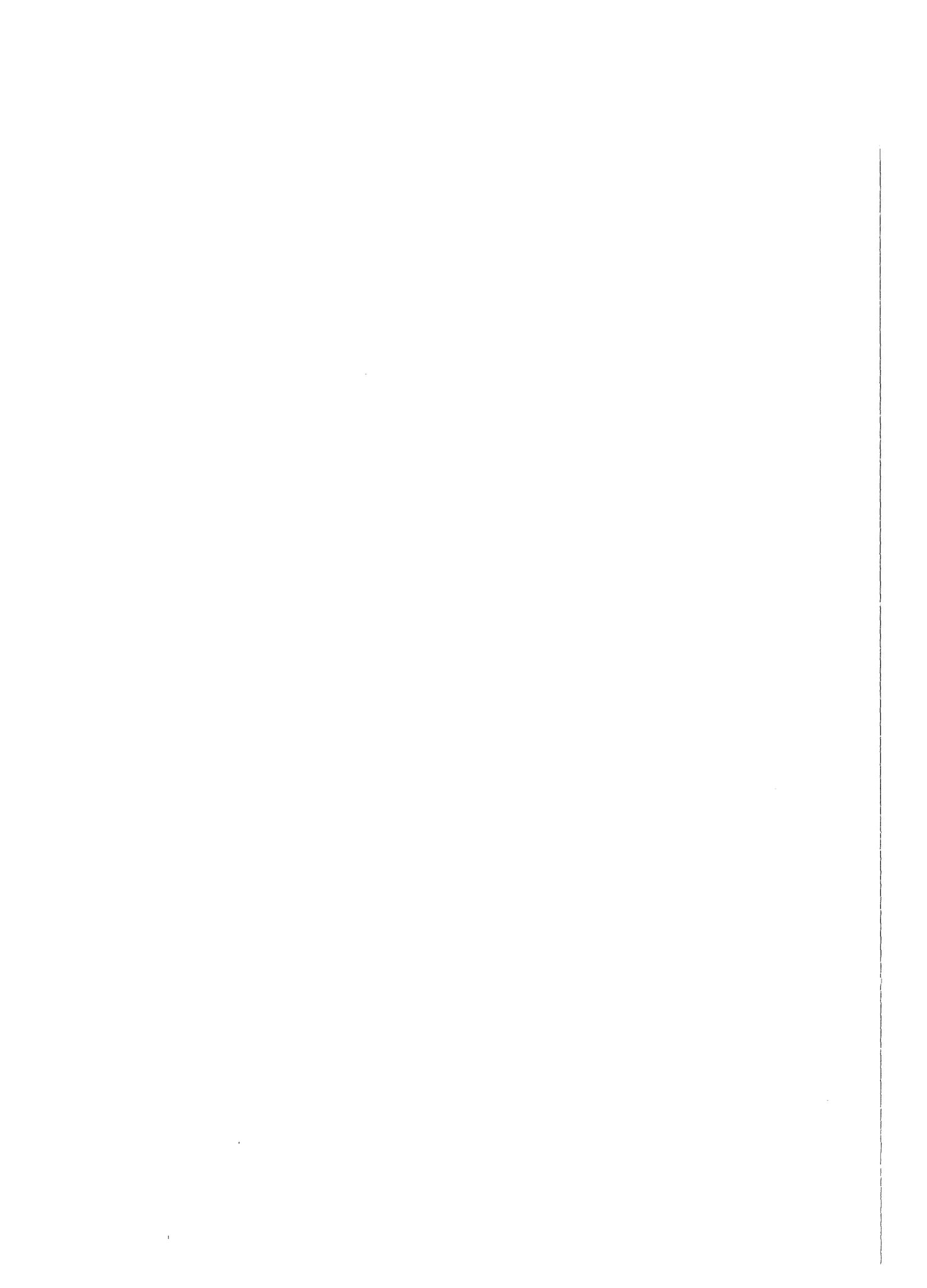
In diesem Bericht sind die Ergebnisse von Vorversuchen zusammengefaßt, die zur Gewinnung von Auslegungsdaten und zum Vergleich der Neutronenradiographie mit der Röntgen- und Betatrontechnik durchgeführt wurden. Als Konverter dienten Dysprosium-, Gold- und Indiumfolien in Verbindung mit Structurix- und Ostray-Filmen. Es wurden Nomogramme erarbeitet, die universell für Radiographieanlagen mit thermischen Neutronen verwendbar sind.

Neutron Radiography at FR2

Abstract

A Neutron radiography device for nondestructive testing of highly radioactive reactor components will be built at FR2.

In this paper the results of initial test measurements are reported. They give some useful informations for the final construction and show the difference between neutron-, X- and betatron-radiographs. The transfer exposure method with dysprosium, gold and indium in connection with Structurix- and Ostray-films was used for alle measurements. Nomographs were made, which are generally valid for thermal neutron radiography facilities.



<u>Inhaltsverzeichnis</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung	3
2. Aufnahmeprinzip und Möglichkeiten der Neutronen- radiographie	3
3. Vorbereitung zur Versuchsdurchführung	7
3.1 Platzwahl	7
3.2 Neutronenflußdichte im SO- und S ⁴ -Kanal	8
4. Versuchsanordnung	8
4.1 Neutronenquelle	8
4.2 Kollimator	9
4.2.1 Neutronenflußdichte in der Bildebene	10
4.2.2 Objektvergrößerung	12
4.2.3 Geometrische Unschärfe	13
4.3 Konvertermaterialien	13
4.3.1 Dysprosium	14
4.3.2 Gold	15
4.3.3 Indium	16
4.4 Filmmaterial und -entwicklung	18
4.5 Abschirmung der geplanten Anlage	18
5. Bilderzeugung und -übertragung	19
5.1 Aktivität der Konverterfolien	19
5.2 Aktivitätsstundenzahl	20
5.3 Filmschwärzung	20
5.4 Kürzeste Aufnahmezeit	21
5.5 Neutronenschwächung im Objekt	23
5.6 Entwicklertemperatur	23
5.7 Benutzung der Nomogramme	24
5.8 Konverterdicke	25
5.9 Relative Filmempfindlichkeit	27
5.10 Relative Empfindlichkeit des Systems Konverter-Film	27
5.11 Gesamtunschärfe	28
5.12 Strahlenbelastung durch die Konverterfolie	30

	<u>Seite</u>
6. Auswertung und Diskussion einiger neutronen- radiographischer Objektaufnahmen und ihr Vergleich mit Röntgen- und Betatron-Aufnahmen	31
6.1 Lochblende aus Kadmium	32
6.2 Uranstab mit geplatzter Hülle	33
6.3 Uranstab mit abgesetztem Can	37
6.4 Objekte mit unterschiedlichen Struktur- materialien	41
6.5 Bornitridisolierte Heizstäbe	42
6.6 Kadmiertes Gasführungsrohr	43
7. Schlußbetrachtung	44
8. Literaturverzeichnis	46
9. Bezeichnungen	48
10. Verzeichnis der Tabellen	51
11. Verzeichnis der Abbildungen	52

1. Einleitung

Neutronenradiographie ist eine relativ neue Methode zur zerstörungsfreien Materialuntersuchung. Eine der vielen inzwischen entwickelten Aufnahmetechniken - das indirekte oder Aktivierungsverfahren - hat die Eigenschaft, unempfindlich gegenüber der Eigenstrahlung der zu testenden Objekte zu sein.

Am FR2 soll für Routine-Untersuchungen von hochradioaktiven Reaktoreinsätzen und Brennelementen eine Neutronenradiographieanlage aufgebaut werden.

Durch Versuche war zu klären, wo am FR2 unter Berücksichtigung neutronenphysikalischer Gesichtspunkte eine solche Einrichtung am günstigsten erstellt werden kann und welche Experimentierbedingungen dort zu erwarten sind. Die Ergebnisse sind in diesem Bericht zusammengefaßt.

2. Aufnahmeprinzip und Möglichkeiten der Neutronenradiographie

Die ersten neutronenradiographischen Versuche und Aufnahmen wurden im Jahre 1935 in Deutschland von Kallmann und Kuhn 1) gemacht. Als Neutronenquelle wurde ein Beschleuniger eingesetzt, der schnelle Neutronen mit einer Quellstärke von $4 \cdot 10^7$ 1/sec lieferte, so daß nach Moderierung und Kollimation nur eine sehr kleine Neutronenflußdichte verfügbar war.

Mit Reaktorneutronen arbeiteten zum ersten Male Thwelis und Derbyshire 2) 1956 am BEPO-Reaktor in England.

Erst 1960 setzte in verschiedenen Laboratorien eine breite Anwendung der Neutronenradiographie ein 3), 4).

Das Prinzip der Neutronenradiographie besteht darin, die Intensität eines Neutronenstrahles durch die Struktur-, Absorptions- und Streueigenschaften des zu untersuchenden Objektes zu modulieren und nach verschiedenen Verfahren - z.B. durch neutronenaktivierbare Folien in Verbindung

mit Röntgenfilmen, thermoluminiszierenden Substanzen, spurengeätzten Kunststoffolien und szintillatorbestückten Fernsehkameras - sichtbar zu machen.

Die Übereinstimmung dieses Prinzips mit dem in der Röntgentechnik angewandten legt es zunächst nahe, in Analogie zum Brennfleck der Röntgenröhre die feine Bohrung einer Lochblende als Neutronenquelle zu benutzen. Tatsächlich wurden in den vergangenen Jahren mit solchen Anordnungen Versuche durchgeführt, die jedoch wegen der geringen Auflösung infolge schlechter Strahlgeometrie (große Divergenz) und der unzureichenden Strahlintensität nicht weitergeführt wurden 3). Heute werden in der Neutronenradiographie durchweg Anordnungen benutzt, die durch Anwendung verschiedener Kollimatortypen mit fast parallelen Neutronenstrahlen arbeiten.

Neutronenradiographische Aufnahmen werden - im Gegensatz zur Röntgentechnik - üblicherweise nicht mit unpräparierten Filmen angefertigt, da der Aufbau des latenten Bildes nur über die wenig effektiven Reaktionen der Neutronen mit Bestandteilen der Emulsionen erfolgt.

Durch Beladen der Emulsion mit Neutronenabsorbern wie z.B. Bor oder Lithium wird die Nachweisempfindlichkeit beträchtlich erhöht. Trotzdem erfordert dieses Verfahren lange Belichtungszeiten, so daß es - ebenso wie die Anwendung der unbeladenen Emulsionen - auf Sonderfälle beschränkt bleibt.

Die in der Neutronenradiographie am weitesten verbreitete Methode der Abbildungstechnik benutzt einen normalen Röntgenfilm in Verbindung mit Konverterfolien.

In der Konverterfolie wird das Neutronenstrahlrelief in ein Alpha-, Beta- und/oder Gamma-Aktivitätsbild umgewandelt, für das der Röntgenfilm wesentlich empfindlicher ist. Man erzielt dadurch im Vergleich zum nackten Röntgenfilm eine Verkürzung der Belichtungszeit um den Faktor 50 bis 100.

Bei der Übertragung des Aktivitätsbildes der Konverterfolie auf den Film sind je nach Versuchsbedingungen zwei Verfahren möglich:

1. die direkte oder Kontaktmethode oder
2. die indirekte oder Aktivierungsmethode.

Bei der Kontaktmethode erzeugen die mit dem Konverter reagierenden Neutronen sofort photographisch gut nachweisbare Strahlung (weiche Capture-Gammastrahlung, Strahlung kurzlebiger Tochterisotope). Der Film befindet sich vor, hinter oder zwischen den Konverterfolien in einer Kassette hinter dem Objekt und wird dort eine angemessene Zeit bestrahlt. Als Konverterfolien werden Gadolinium, Kadmium, Rhodium, Silber und Indium verwandt. Dieses direkte Verfahren ist sehr schnell. Es hat jedoch den Nachteil, daß der Film nicht nur der fast immer vorhandenen Gammakontamination des Neutronenstrahls ausgesetzt ist, sondern bei der Nachbestrahlungsuntersuchung von Reaktoreinsätzen auch der sehr intensiven Eigenstrahlung dieser Objekte. Dadurch wird die Untergrundschwärzung des Films unzulässig erhöht.

Beim indirekten Verfahren vermeidet man diesen Nachteil - allerdings auf Kosten der Aufnahmegeschwindigkeit - dadurch, daß sich im modulierten Neutronenstrahl nur die Konverterfolie befindet. Sie besteht aus einem Material mit möglichst großem Aktivierungsquerschnitt und einer Halbwertszeit der entstehenden Tochterisotope von etwa einer Stunde bis zu einigen Tagen. Geeignete Foliensubstanzen sind Dysprosium, Indium und Gold.

Nach genügend langer Bestrahlungszeit entfernt man den Konverter aus dem Neutronenstrahl und bringt seine dem Objekt zugewandte Seite^{x)} an einem strahlungsfreien Ort in engen Kontakt mit einem Röntgenfilm. Dieser übernimmt das gespeicherte Aktivitätsbild der Folie als latentes Bild.

x) Bei dünnen Konvertern können beide Konverterseiten gleichzeitig je einen Film belichten, wobei der Film auf der strahlabgewandten Folienseite etwas weniger geschwärzt wird (ca. 18 % Schwärzungsverlust bei 100 µ dicker Dy-Folie).

Im Hinblick auf die gestellte Forderung - zerstörungsfreie Untersuchung hochradioaktiver Reaktoreinsätze mit Reaktorneutronen - beschränken sich die in diesem Bericht wiedergegebenen Versuche und Überlegungen ausschließlich auf eine Neutronenradiographie nach der Aktivierungsmethode.

Das Bild des zu untersuchenden Objektes wird als Intensitätsmodulation des Neutronenstrahls weitergegeben. Der Modulationsgrad $(I_0 - I)/I_0$ ist für homogene Objekte nur abhängig von den Dickenunterschieden Δd_0 in der Struktur des Objektes.

$$(1) \quad (I_0 - I)/I_0 = 1 - e^{-\Sigma_{t0} \cdot \Delta d_0}$$

Σ_{t0} = Schwächungskoeffizient für Strahlneutronen [cm^{-1}]

Heterogene Objekte modulieren darüber hinaus auch durch ihre unterschiedlichen Absorptions- und Streueigenschaften.

$$(2) \quad (I_0 - I)/I_0 = 1 - e^{-\Delta(\Sigma_{t0} \cdot d_0)}$$

Hier stellt man einen weiteren Unterschied zwischen Neutronen- und Röntgenradiographie fest. Während die Massenschwächungskoeffizienten für Röntgen- und Gammastrahlung eindeutige Funktionen der Ordnungszahl und der Gammaenergie sind, besteht für Neutronen kein systematischer Zusammenhang von Wirkungsquerschnitt und Ordnungszahl 3), 5). Bei leichten Elementen überwiegt in den meisten Fällen die Neutronenstreuung. Dagegen wird der Massenschwächungskoeffizient für schwere Elemente vornehmlich durch Absorptionsprozesse bestimmt.

Ferner gibt es im periodischen System benachbarte Elemente wie z.B. Cd/Sn oder B/C, deren Massenabsorptionskoeffizienten sich um den Faktor 100 bis 1000 unterscheiden. In Werkstoffkombinationen, die solche oder ähnliche Elemente enthalten (z.B. Zirkonhydrid), lassen sich Inhomogenitäten sehr leicht neutronenradiographisch nachweisen.

Haben Isotope eines Elementes unterschiedliche Wirkungsquerschnitte für thermische Neutronen, dann können Inhomogenitäten in ihren Gemischen festgestellt werden. So lassen sich z.B. U235-Anreicherungsunterschiede in Uranbrennstäben kontrollieren 6), 14).

Aufgrund der u.U. großen Änderung der Neutronenwirkungsquerschnitte bei wechselnder Ordnungs- und Massenzahl ist es z.B. auch möglich, Abbrände an ursprünglich starken Absorbieren zu lokalisieren und quantitativ zu bestimmen 5), 17).

3. Vorbereitungen zur Versuchsdurchführung

Die Versuchsanordnung zur Durchführung von Parameterstudien und zur Ermittlung optimaler Experimentierbedingungen wurde so flexibel wie möglich aufgebaut. Ihre prinzipielle Konzeption unterscheidet sich jedoch nicht wesentlich von der später zu erstellenden Anlage.

3.1 Platzwahl

Der Standort der Neutronenradiographieanlage am FR2 muß zwei Forderungen erfüllen:

Es müssen Reaktorneutronen hoher Flußdichte zur Verfügung stehen.

Der An- und Abtransport aktiver Prüflinge soll mit der Brennelementwechsellaschine möglich sein.

Als Standort für die Radiographieanlage kommt daher nur der Bereich vor der Thermischen Säule in Frage. Hier stehen 5 Bestrahlungskanäle für den Einbau eines Kollimators zur Verfügung. Sie reichen von der Reaktoraußenwand ca. 2500 mm tief in den Graphitblock hinein. Die übrigen Abmessungen können der Tabelle 1 (nach 7)) entnommen werden.

Die Kanäle S1 und S2 scheiden wegen der geringen lichten Querschnitte von vornherein aus. Welcher der noch verbleibenden Kanäle für den Aufbau der Anlage gewählt wird, ist nach baustatischen (Durchbruch des Hallenbodens) und betriebstechnischen Gesichtspunkten (Behinderung der oder durch die BE-Flasche) zu entscheiden.

Die Benutzung des SO-Kanals bietet die Möglichkeit, mit einer Belichtung ca. 1000 mm lange Objekte zu untersuchen, während der Aufbau vor dem S3- oder S4-Kanal bei 300 mm Bildhöhe eine geringere betriebliche Behinderung erwarten läßt.

3.2 Neutronenflußdichte im SO- und S4-Kanal

Vor der Montage des Versuchsaufbaues wurden bei 44 MW Reaktorleistung die thermischen Neutronenflußdichteprofile mit 20 %-igen Gold/Aluminium-Drähten im SO- und S4-Kanal gemessen.

Die Abbildung 1 gibt den Verlauf der thermischen Neutronenflußdichte in der Achse des leeren bzw. des mit Graphitstopfen verkleinerten SO-Kanals und des S4-Kanals wieder.

4. Versuchsanordnung (Abb. 2)

Zur Herstellung neutronenradiographischer Aufnahmen nach dem Aktivierungsverfahren benötigt man folgende Hilfsmittel:

- eine genügend intensive Neutronenquelle
- einen geeigneten Kollimator
- eine Konverterfolie
- Filmmaterial zur Übertragung des Aktivitätsbildes und
- Entwicklungsmaterial.

4.1 Neutronenquelle

Bei den durchgeführten Versuchen diente die corenahe Stirnfläche des SO-Kanals im Graphitblock der Thermischen Säule als Neutronenquelle. Da für den Kollimatoreinbau nicht der gesamte Kanalquerschnitt benötigt wurde, konnten die unteren beiden Drittel zur Flußdichteanhebung und zur Reduzierung der austretenden Core-Gammastrahlung auf der gesamten Länge des Kanals mit Graphitstopfen ausgefüllt werden. Die Neutronenflußdichte an der Stirnfläche des so verkleinerten SO-Kanals betrug

$$\phi_{th} = 2,4 \cdot 10^{11} \text{ 1/cm}^2\text{sec}$$

Das Verhältnis der thermischen zur epithermischen Flußdichte beträgt etwa 10^4 .

Mit dem Blei-Boral-Schieber der Thermischen Säule kann der Neutronenstrom beim Be- und Entladen der Anlage unterbrochen werden.

4.2 Kollimator

Die in der Neutronenradiographie benutzten Kollimatoren sind einfache oder bisweilen auch querschnittsgeteilte Kanäle 3), 8), die nur solche Neutronen zur Austrittsöffnung gelangen lassen, die die Eintrittsöffnung innerhalb eines durch die Kollimatorabmessungen gegebenen Raumwinkels durchsetzen.*⁾ Alle Neutronen, die außerhalb dieses Winkels in den Kollimator eintreten oder von außen seine Wand durchdringen, werden von der neutronenabsorbierenden Auskleidung der Innenwände eingefangen.

Bei der Festlegung der Kollimatorabmessungen sind zu berücksichtigen:

- der Platz für den Ein- oder Anbau des Kollimators
- die gewünschte Bildgröße
- die thermische Neutronenflußdichte in der Bildebene
- die vergrößerte Wiedergabe des Objektes infolge der Strahlgeometrie
- die zulässige Unschärfe des Aktivitätsbildes auf der Konverterfolie (geometrische Unschärfe) und
- die Transparenz des Kollimatorinnenraumes.

Die Konstruktion des verwendeten Kollimators geht aus Abbildung 3 hervor.

Es handelt sich um einen quadratischen Kanal von 4425 mm Länge, der sich von der Eintrittsöffnung mit $92 \times 92 \text{ mm}^2$ auf eine Austrittsfläche mit $236 \times 236 \text{ mm}^2$ erweitert. Die

*⁾ Streuung ist hier vernachlässigt

Eintrittsöffnung kann durch drei kadmiumbelegte Klappblenden auf $d_n = 41,5, 21,5$ und 10 mm Durchmesser verkleinert werden. An die Austrittsfläche schließt sich ein ca. 100 mm tiefes Gehäuse mit einem nutzbaren lichten Querschnitt von $230 \times 230 \text{ mm}^2$ an. Es ist zur Aufnahme der Objekt- und Konverterträger mit eingienieteten Führungsleisten versehen.

In der Tabelle 2 ist für die 4 verschiedenen Blendenöffnungen das Kollimationsverhältnis

$$(3) \quad K = \frac{\text{Kollimatoreintrittsöffnung}}{\text{Kollimatorlänge}} = \frac{d_n}{L}$$

eingetragen. Bei der Blende 4 (quadratische Eintrittsöffnung $s^2 = 92 \times 92 \text{ mm}^2$) wird K mit dem Durchmesser

$$(4) \quad d_4 = 2s/\sqrt{\pi}$$

des flächengleichen Kreises berechnet.

4.2.1 Neutronenflußdichte in der Bildebene

Die thermische Neutronenflußdichte in der Bildebene hinter dem Kollimator ist

$$(5) \quad \phi_a = C' \cdot Q_0 / (4\pi \cdot L'^2) .$$

L' = Abstand der Bildebene von der Neutronenquelle [cm]

Q_0 = Neutronenquellstärke an der Stirnfläche des SO-Kanals [1/sec]

C' = Transparenz der Strecke Neutronenquelle/Bildebene

Q_0 ist näherungsweise

$$(6) \quad Q_0 = F \cdot \phi_{th} = d'^2 \cdot \pi \cdot \phi_{th} / 4 .$$

F = Fläche mit dem Durchmesser d' , die ein Punkt P der Bildebene auf der Stirnseite des SO-Kanals sieht [cm²]

ϕ_{th} = Flußdichte in der strahlenden Fläche [1/cm²·sec].

Mit Gl. (5) und (6) erhält man

$$(7) \quad \phi_a = C' \cdot (d'/L')^2 \cdot \phi_{th} / 16$$

Da nach Abb. 4 gilt

$$(8) \quad d'/L' = d_n / L$$

wird mit Gl. (3)

$$(9) \quad \phi_a = C' \cdot K^2 \cdot \phi_{th} / 16$$

Die Neutronenflußdichte am Ausgang des Kollimators ist also dem Quadrat des Kollimationsverhältnisses K proportional.

Der Kollimator nach Abb. 3 ist an der Bildseite offen und daher mit Luft geflutet. Die Transmission des Kollimatorinnenraumes

$$(10) \quad C' = e^{-L' \cdot \Sigma_{tG}}$$

kann durch Evakuierung oder Flutung mit Helium bzw. Argon erhöht werden.

In der Tabelle 3 sind die totalen Wirkungsquerschnitte Σ_{tG} für trockene Luft und Helium bei 1 ata zusammengestellt 9).

Für den Gesamtweg von der Neutronenquelle (Stirnseite SO-Kanal bis zur Bildebene ergibt sich nach Gl. (10) für die luftgeflutete Anordnung mit $L' = 4700$ mm eine Transmission von

$$C'_{\text{Luft}} = 0,76$$

und bei Heliumflutung eine Transmission von

$$C'_{\text{Helium}} \approx 1.$$

Wird aus ökonomischen Gründen Argon als Spülgas verwendet, so erhält man

$$c'_{\text{Argon}} = 0,97.$$

Der Neutronengewinn für die Bildebene beträgt damit bei Helium- oder Argonflutung des Kollimators ca. 30 %.

Die nach Gl. (9) berechneten Flußdichten in der Bildebene sind neben den mit Goldsonden gemessenen Werten in der Tabelle 4 aufgeführt. Die systematische Abweichung der berechneten von den gemessenen Werten ist u.U. darauf zurückzuführen, daß die für die Rechnung zugrunde gelegte Flußdichte einige Tage vor den Flußdichtemessungen in der Bildebene ermittelt wurde und sich in der Zwischenzeit veränderte.

4.2.2 Objektvergrößerung

Wegen der Divergenz des Neutronenstrahls erhält man eine vergrößerte Abbildung des Objektes auf der Konverterfolie. Die geometrischen Verhältnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Danach ist die relative Vergrößerung V_R bezogen auf die Objektabmessung t_o :

$$(11) \quad V_R = s_o/L'$$

In der Tabelle 5 sind für einen Quelle/Objekt-Abstand von $L' = 4700$ mm und einige Objekt/Konverter-Abstände s_o die relativen Vergrößerungen V_R angegeben.

Anstatt bei der Ermittlung der wahren Objektabmessung nach einer neutronenradiographischen Aufnahme von Gl. (11) auszugehen, ist es zweckmäßiger, ein in der gleichen Ebene liegendes Standardobjekt mit genau bekannten Maßen mit-abzubilden.

4.2.3 Geometrische Unschärfe

Die geometrische Unschärfe U eines Objektpunktes P in der Bildebene ist nach Abbildung 6 aus dem Verhältnis

$$(12) \quad U/d_n = s_0/L$$

zu berechnen. Gl. (3) und (12) ergeben

$$(13) \quad U = K \cdot s_0 .$$

Die geometrische Unschärfe hängt linear vom Kollimationsverhältnis K ab. Der Abstand s_0 zwischen Objekt und Konverter muß so gering wie möglich gehalten werden.

In der Tabelle 6 sind für unsere Versuchsanordnung die geometrischen Unschärfen für einige Abstände s_0 angegeben.

Es ist nicht sinnvoll, die geometrische Unschärfe um jeden Preis so klein wie möglich zu halten, da die Gesamtunschärfe einer Neutronenradiographie-Aufnahme noch von anderen Faktoren abhängt, die u.U. den Einfluß der geometrischen Unschärfe weit zurücktreten lassen (siehe dazu Abschnitt 5.11).

4.3 Konvertermaterialien

Neutronenradiographische Aufnahmen nach dem Aktivierungsverfahren können mit Konverterfolien aus Gold, Indium und Dysprosium hergestellt werden. Im folgenden sollen die hier interessierenden Daten der drei Materialien kurz zusammengefaßt werden.

4.3.1 Dysprosium

Dysprosium (${}_{66}\text{Dy}$) hat folgende natürliche Zusammensetzung:

Isotop	Häufigkeit [%]	Absorptionsquerschnitt [barn]
Dy 156	0,05	
Dy 158	0,09	96
Dy 160	2,29	55
Dy 161	18,88	600
Dy 162	25,53	160
Dy 163	24,97	125
Dy 164	28,18	2570

Die Isotope Dy 156 und Dy 158 können wegen ihrer geringen Häufigkeit unberücksichtigt bleiben. Die Isotope Dy 160 bis Dy 163 sind wegen der relativ kleinen Absorptionsquerschnitte und der entstehenden stabilen Tochterisotope uninteressant.

Für die Neutronenradiographie läßt sich nur das Isotop Dy 165 ausnutzen, das mit einer Halbwertszeit von

$$T_{\text{Dy}165} = 140 \text{ min}$$

zum stabilen Ho 165 zerfällt. Ho 165 hat einen kleinen Einfangquerschnitt für thermische Neutronen.

Dysprosium 165 emittiert Beta- und Gammastrahlung mit folgenden Energien und Häufigkeiten:

$E_{\beta\text{max}}$ [MeV]	Häufigkeit [%]	E_{γ} [MeV]	Häufigkeit [%]
0,22	0,1	0,094	10
0,254	0,03	0,279	1
0,3	1,3	0,361	40
1,2	15	0,71	2
1,3	83	1,02	8

Ferner hat Dysprosium folgende Daten:

Dichte des natürlichen Gemisches	$\rho_{\text{Dy}} = 8,56 \text{ g/cm}^3$
Atomgewicht	$A_{\text{Dy}} = 162,51$
Teilchenzahldichte	$n_{\text{Dy}} = 3,17 \cdot 10^{22} \frac{\text{Atome}}{\text{cm}^3}$
Streuquerschnitt	$\sigma_{\text{s Dy}} = 100 \text{ barn}$

Mit den vorstehenden Daten wird der Gesamtabsorptionsquerschnitt des natürlichen Gemisches

$$\sum_a \text{Dy} = 28,9 \text{ cm}^{-1}$$

und der Aktivierungsquerschnitt für Dy 164 im natürlichen Gemisch

$$\sum_a \text{Dy eff} = 23,0 \text{ cm}^{-1}$$

4.3.2 Gold

Das stabile Gold (${}_{79}\text{Au}$) liegt monoisotop mit der Massenzahl 197 vor.

Das durch Neutronenabsorption entstehende Tochterisotop Au 198 geht mit einer Halbwertszeit von

$$T_{\text{Au}} = 2,7 \text{ d}$$

durch β -Zerfall in das stabile Hg 198 über. Au 198 hat einen thermischen Einfangquerschnitt von 25800 barn. Es emittiert Beta- und Gamma-Strahlung folgender Energie und Häufigkeit:

$E_{\beta\text{max}}$ [MeV]	Häufigkeit [%]	E_{γ} [MeV]	Häufigkeit [%]
0,3	1,1	0,412	95
0,962	99	0,676	1
1,374	0,025	1,088	0,5

Der Aktivierungsquerschnitt von Au197 beträgt

$$\sigma_a \text{ Au eff} = 98,8 \text{ barn.}$$

Weitere Daten für Gold sind:

Dichte	ρ_{Au}	=	19,32 g/cm ³
Atomgewicht	A_{Au}	=	196,967
Teilchenzahldichte	n_{Au}	=	5,91 · 10 ²² Atome/cm ³
Streuquerschnitt	$\sigma_s \text{ Au}$	=	9,3 barn

Damit ergibt sich der makroskopische Aktivierungsquerschnitt zu

$$\Sigma_a \text{ Au eff} = \Sigma_a \text{ Au} = 5,84 \text{ cm}^{-1}$$

4.3.3 Indium

Das natürliche Isotopengemisch von Indium (⁴⁹In) besteht aus

$$\begin{aligned} &4,28 \% \text{ In113} \text{ und} \\ &95,72 \% \text{ In115.} \end{aligned}$$

Das Isotop 113 hat einen Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen von

$$\sigma_a \text{ In113} = 11,1 \text{ barn.}$$

Das Tochterisotop In114 hat eine Halbwertszeit von

$$T_{\text{In114}} = 72 \text{ sec,}$$

die zu gering ist, um bei der Aktivierungsmethode Bedeutung zu haben.

In115 hat einen Absorptionsquerschnitt von

$$\sigma_a \text{ In115} = 155 \text{ barn}$$

für die Bildung von In116m mit einer Halbwertszeit von

$$T_{\text{In116m}} = 54,1 \text{ min.}$$

In116m emittiert Beta- und Gammastrahlung mit folgenden Energien und Häufigkeiten:

$E_{\beta\max}$ [MeV]	Häufigkeit [%]	E_{γ} [MeV]	Häufigkeit [%]
0,34	1,5	0,138	3
0,59	11	0,417	36
0,87	40	0,819	17
1,0	49	1,09	53
		1,293	80
		1,508	11
		2,111	20

Ferner entsteht aus In115 durch Neutroneneinfang mit

$$\sigma_a \text{ In115} = 52 \text{ barn das Isotop In116,}$$

das aber wegen seiner kurzen Halbwertszeit von 13 sec in unserem Falle unberücksichtigt bleiben kann.

Zerfallsprodukt von In116 ist Sn116, das einen sehr kleinen Einfangquerschnitt hat.

Weitere Daten für Indium sind:

Dichte des natürlichen Gemisches	ρ_{In}	= 7,28 g/cm ³
Atomgewicht	A_{In}	= 114,82
Teilchenzahldichte	n_{In}	= $3,82 \cdot 10^{22} \frac{\text{Atome}}{\text{cm}^3}$
Streuquerschnitt	$\sigma_s \text{ In}$	= 2,2 barn

Aus den vorstehenden Daten ergibt sich der Absorptionsquerschnitt des natürlichen Gemisches zu

$$\sum_a \text{ In} = 7,75 \text{ cm}^{-1}.$$

Der für die Erzeugung des Aktivitätsbildes bei der indirekten Radiographie interessante Aktivierungsquerschnitt ist

$$\sum_a \text{ In eff} = 5,67 \text{ cm}^{-1}.$$

4.4 Filmmaterial und -entwicklung

Alle hier beschriebenen Versuche wurden mit den doppelseitig beschichteten Röntgenfilmen Strukturix D2, D4, D7 und Osray DW der Firma Agfa-Gevaert durchgeführt.

Die Entwicklerbäder wurden nach Angaben der Herstellerfirmen Agfa-Gevaert mit folgenden Konzentrationen angesetzt: Röntgenentwicklerkonzentrat G 150, Fixierbadkonzentrat G 334, Netzmittel Gevatol. Als Stoppbad diente 5 %-ige Essigsäure.

Die Filmentwicklungen wurden nach folgendem Arbeitsplan vorgenommen:

1. 10 Minuten entwickeln
2. 5-10 sec im Wasserbad schwenken
3. 30 sec Unterbrecherbad
4. 5-10 sec im Wasserbad schwenken
5. 10 min fixieren
6. 30 min wässern
7. 1 min Netzmittelbad
8. Filmtrocknung bei Raumtemperatur.

4.5 Abschirmung der geplanten Anlage

Die Abschirmung der Gamma-Eigenstrahlung der Objekte wird bei der geplanten Anlage den größten Konstruktions- und Materialaufwand erfordern. Ein FR2-Brennelement mit einer Leistung von 400 kW verlangt nach zweijähriger Betriebszeit und einer Lagerzeit von 1 Stunde eine Bleiabschirmung von 35 cm Dicke, wenn in 1 m Abstand die Toleranzdosisleistung von 2,5 mrem/h nicht überschritten werden soll. Die für andere Lagerzeiten benötigten Abschirmdicken sind der Abb. 7 zu entnehmen. Der Beitrag der Reaktor-Gammastrahlung zur Gesamtdosis kann hier vernachlässigt werden. Die thermischen Neutronen lassen sich mit einer 1 mm dicken Kadmiumauskleidung des Objektgehäuses abschirmen.

Die nichtthermische Flußdichte ist in der Thermischen Säule gering (siehe Abschn. 4.1). Deshalb und wegen der relativ

starken inelastischen Neutronenstreuung im Blei kann man auf eine zusätzliche Abschirmung gegen schnelle Neutronen verzichten. Eine Messung hinter 20 cm Blei an der Anlage nach Abb. 2 ergibt eine Dosisleistung schneller Neutronen von $< 0,5$ mrem/h.

5. Bilderzeugung und -übertragung

Im folgenden Kapitel wird der Einfluß verschiedener Parameter auf die Bildübertragung und Bildqualität untersucht und in Diagrammen dargestellt.

5.1 Aktivität der Konverterfolien

Die Konverterfolie in der Bildebene hinter dem Kollimator wird von einem gerichteten, thermischen Neutronenstrahl mit der Flußdichte ϕ_a senkrecht getroffen. Im Abstand x von der Oberfläche der Folie ist der Fluß

$$(14) \quad \phi(x) = \phi_a \cdot e^{-\Sigma_t \cdot x}$$

wenn Σ_t der totale makroskopische Wirkungsquerschnitt für thermische Neutronen ist.*

Eine Folie der Dicke d hat unter diesen Bedingungen nach einer Bestrahlungszeit t_{bs} die spezifische Aktivität

$$(15) \quad A'_{spez} = K_1 \cdot \phi_a \cdot \frac{\Sigma_a \text{ eff}}{\Sigma_t} (1 - e^{-\Sigma_t \cdot d}) (1 - e^{-\lambda \cdot t_{bs}}) \quad [\mu\text{C}/\text{cm}^2].$$

$$K_1 = 2,7 \cdot 10^{-5} \mu\text{C} \cdot \text{sec}$$

$$\Sigma_a \text{ eff} = \text{makroskopischer Aktivierungsquerschnitt } [\text{cm}^{-1}]$$

$$\lambda = \text{Zerfallskonstante } [1/\text{Zeit}]$$

In den Abbildungen 8a, 9a und 10a ist Gl. (15) für Konverter aus Dysprosium, Gold und Indium als Nomogramm dargestellt.

* Da der Streuquerschnitt bei den hier verwendeten Folienarten und -dicken von geringer Bedeutung ist, werden für Σ_t die Werte der totalen makroskopischen Absorptionsquerschnitte eingesetzt.

5.2 Aktivitätsstundenzahl

Die Schwärzung eines Filmes nach der Entwicklung ist abhängig vom Zeitintegral der Strahlungsleistung, die auf ihn einwirken konnte. In Anlehnung an die in der Röntgentechnik übliche Angabe der Milliampereminuten [mA·min] bei vorgegebener Röhrenspannung [V] soll hier bei einer durch die Wahl der Folie vorgegebenen Energie der β - oder γ -Strahlung [eV] das Zeitintegral der Aktivität [$\mu\text{C}\cdot\text{h}$] als Bezugsgröße definiert werden (siehe Tabelle 7).

Für das Zeitintegral der Aktivität erhält man mit

t_w = Wartezeit zwischen Bestrahlungsende und Filmbelichtungsanfang und

t_{bl} = Filmbelichtungszeit

$$(16) \quad E_{spez} = A'_{spez} \cdot \frac{e^{-\lambda \cdot t_w}}{\lambda} (1 - e^{-\lambda \cdot t_{bl}}) \quad [\mu\text{C}\cdot\text{h}/\text{cm}^2]$$

In den Abbildungen 8b, 9b und 10b ist die Gleichung (16) für Konverterfolien aus Dysprosium, Gold und Indium als Nomogramm dargestellt.

5.3 Filmschwärzung

Trägt man die Nettoschwärzung der Filme

$$(17) \quad S_{Netto} = S - S_0$$

S = Bruttoschwärzung

S_0 = Untergrundschwärzung oder Entwicklungsschleier

über E_{spez} auf, so erhält man in doppeltlogarithmischer Darstellung in dem hier interessierenden Schwärzungsbereich Geraden, deren Verlauf von der Filmempfindlichkeit und der Art und Dicke der Konverterfolie abhängt.

In den Abb. 11a, b, c bis 13a, b, c ist der experimentell ermittelte Verlauf der Funktion $S_{\text{Netto}} = f(E_{\text{spez}})$ für die Belichtung von D2, D7- und Ostray-Filmen mit Dysprosium-, Gold- und Indium-Konvertern unterschiedlicher Dicke dargestellt.

Analytisch lassen sich diese Geraden durch die Gleichung

$$(18) \quad S_{\text{Netto}} = \eta \cdot E_{\text{spez}}^x$$

$$(19) \quad x = f(\text{Film, Konverter}) ; \eta = f(d, \text{Film, Konverter})$$

beschreiben. Für eine vorgegebene Film-Konverter-Paarung liefert die numerische Auswertung der gemessenen Kurven den Exponenten x und für die jeweiligen Konverterdicken den Faktor η $[(\text{cm}^2/\mu\text{C}\cdot\text{h})^x]$. Der Wert η läßt sich berechnen nach

$$(20) \quad \eta = (a + bd + cd^2)/(1 + 0,05d)$$

Die Koeffizienten a, b und c werden aus den Stützwerten d und den zugehörigen, nach Gl. (18) aus den Meßwerten gewonnenen Funktionswerten η mit Hilfe eines Fitprogramms berechnet. Sie sind in der Tabelle 9 zusammengestellt.

Mit den Gleichungen (15), (16), (18) und (20) wird die Schwärzung eines gegebenen Films durch eine gegebene aktivierte Konverterfolie

$$(21) \quad S_{\text{Netto}} = [(a + bd + cd^2)/(1 + 0,05d)] \cdot \left[\frac{K_f \cdot \phi_a}{\lambda} \cdot \frac{\Sigma_a \text{eff}}{\Sigma_f} (1 - e^{-\Sigma_f \cdot d}) (1 - e^{-\lambda \cdot t_{bs}}) (1 - e^{-\lambda \cdot t_{bl}}) \cdot e^{-\lambda \cdot t_w} \right]^x$$

In den folgenden Betrachtungen wird ohne besonderen Hinweis stets $x = 1$ angenommen (siehe Tabelle 9).

5.4 Kürzeste Aufnahmezeit

Die Gesamtherstellungzeit t_{ges} für eine neutronenradiographische Aufnahme ist unter Vernachlässigung der Wartezeit t_w und der Entwicklungszeiten

$$(22) \quad t_{\text{ges}} = t_{bs} + t_{bl}$$

Gleichung (21) läßt sich schreiben:

$$(23) \quad S_{\text{Netto}} = C_j \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_{bs}})(1 - e^{-\lambda \cdot t_{bl}})$$

Mit Gl. (22) und (23) wird

$$(24) \quad t_{\text{ges}} = t_{bs} - \frac{\ln\left(1 - \frac{S_{\text{Netto}}}{C_j(1 - e^{-\lambda \cdot t_{bs}})}\right)}{\lambda}$$

Diese Funktion hat ein Minimum für

$$t_{bs} = t_{bl}$$

Damit wird die spezifische Aktivitätsstundenzahl

$$(25) \quad E_{\text{spez opt}} = \frac{K_j \cdot \phi_a}{\lambda} \cdot \frac{\Sigma_a \text{ eff}}{\Sigma_t} \cdot (1 - e^{-\Sigma_t \cdot d})(1 - e^{-\lambda \cdot t_{bs}})^2$$

In den Nomogrammen der Abbildungen 14, 15 und 16, denen diese Gleichung zugrunde liegt, sind für die drei Konvertertypen die Ortskurven für $S_{\text{Netto}} = 2$ bei Verwendung von D7- und Osray-Filmen eingezeichnet.

Die Nomogramme 14 bis 16 zeigen, daß es nicht immer sinnvoll oder teilweise sogar unmöglich ist, D2-Filme nach dem Verfahren des optimalen Zeitaufwandes zu benutzen (wenigstens dann nicht, wenn eine brauchbare Filmschwärzung gewünscht wird). Entweder reicht selbst die Sättigungsaktivität der Folie nicht aus, um die gewünschte Filmschwärzung zu erzeugen, oder die Bestrahlungszeit t_{bs} wird unökonomisch lang (geringer Durchsatz der Bestrahlungsanlage).

Daher sollte man in letzteren Fällen nach den Abb. 11a, 12a und 13a die erforderliche spezifische Aktivitätsstundenzahl ermitteln und dann für eine relativ lange Belichtungszeit ($t_{bl} \approx 4 \cdot T_{\text{Konverter}}$) die notwendige Bestrahlungszeit festlegen. Damit verlagert man den größten Teil des Zeitaufwandes von der Bestrahlungseinrichtung in die Dunkelkammer.

Dieses Aufnahmeverfahren kann wegen der geringeren Konverteraktivitäten auch im Hinblick auf die Strahlenbelastung des Bedienungspersonals empfehlenswert sein.

5.5 Neutronenschwächung im Objekt

Bei der Bildübertragung ist streng genommen nicht die Aktivierung der Konverterfolien durch den ungeschwächten Neutronenstrahl interessant, sondern vielmehr die Aktivität der Folienstellen, die durch das Objekt mehr oder weniger abgeschattet werden.

Die Neutronenflußdichte hinter einem homogenen Objekt ist

$$(26) \quad \phi_0 = \phi_a / F_0.$$

Die Berechnung von F_0 liefert meist nur grobe Anhaltswerte.

Als Beispiel einer experimentellen Bestimmung der Schwärzungsabnahme hinter einem Objekt sind in der Abbildung 17 die an Stufenkeilen aus Edelstahl und Polyäthylen gemessenen Faktoren F_0 eingezeichnet.

Die spezifische Aktivitätsstundenzahl zur Erzielung einer Filmschwärzung S_{Netto} geschwächt hinter einem Objekt kann nach den Abb. 11a, b, c bis 13a, b, c ermittelt werden, wenn man von

$$(27) \quad S_{\text{Netto}} = S_{\text{Netto geschwächt}} \cdot F_0$$

ausgeht.

In vielen Fällen genügt es jedoch, die Bestrahlungs- und Belichtungszeiten so zu wählen, daß der ungeschwächte Neutronenstrahl eine Filmschwärzung von z.B. $S_{\text{Netto}} = 1,5$ bis 3,0 hervorruft. Details an nicht allzu starken Objekten aus z.B. Stahl, Edelstahl oder Aluminium sind dann noch gut zu erkennen.

5.6 Entwicklertemperatur

Alle Diagramme dieses Berichtes, in denen die Nettofilm-schwärzung S_{Netto} als abhängige Variable erscheint, gelten für eine Entwicklertemperatur von

$$t_{\text{Entw.}} = 25^\circ\text{C}$$

Die Nettoschwärzung bei anderen Badtemperaturen kann nach

$$(28) \quad S_{\text{Netto}}(\mathcal{V}) = S_{\text{Netto}} \cdot S(\mathcal{V})/S(25^{\circ}\text{C})$$

berechnet werden. Die Abbildung 18 zeigt den Verlauf der gemessenen Filmschwärzung $S(\mathcal{V})$ normiert auf die Schwärzung $S(25^{\circ}\text{C})$ als Funktion der Entwicklertemperatur.

5.7 Benutzung der Nomogramme

Die Benutzung der Nomogramme soll an einem Beispiel erläutert werden.

Aufgabe

Mit einer 100 μ dicken Goldfolie, die bei einer Neutronenflußdichte in der Bildebene von $\phi_a = 5,5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ $t_{\text{bs}} = 100 \text{ min}$ hinter einem im Mittel 2,5 mm dicken Edelstahlobjekt bestrahlt wird, soll nach einer Wartezeit von $t_w = 10 \text{ min}$ auf einem D7-Film bei einer Entwicklungstemperatur von 20°C im Bereich des Objektes eine Schwärzung von $S_{\text{Netto}}(\mathcal{V}) = 1,0$ erzielt werden. Wie lange muß der Film belichtet werden?

Lösungsweg

a) Forderung:

$$S_{\text{Netto}}(\mathcal{V} = 20^{\circ})_{\text{geschwächt}} = 1,0$$

b) Berücksichtigung der Schwärzungsabnahme hinter dem Objekt:

$$\text{Nach Abb. 17 für 2,5 mm V2A: } F_o = 1,2$$

$$\text{Nach Gl. (27): } S_{\text{Netto}}(\mathcal{V} = 20^{\circ}) = 1,0 \cdot 1,2 = 1,2$$

c) Berücksichtigung der Entwicklertemperatur:

$$\text{Nach Abb. 18 für } \mathcal{V} = 20^{\circ}\text{C: } S(\mathcal{V})/S(25^{\circ}\text{C}) = 0,58$$

$$\text{Nach Gl. (28): } S_{\text{Netto}} = 1,2/0,58 \approx 2$$

d) Ermittlung der erforderlichen Aktivitätsstundenzahl:

$$\text{In Abb. 12b findet man auf der Geraden für 100 } \mu \text{ Goldfoliendicke: } E_{\text{spez}} \approx 1,7 \mu\text{C} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$$

- e) Ermittlung der spezifischen Folienaktivität aus den vorgegebenen Daten:

In Abb. 9a geht man vom Punkt mit $d = 100 \mu$ und $\phi_a = 5,5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ parallel zu den Hilfsdiagonalen bis unter $t_{bs} \approx 1,7 \text{ h}$ und liest $A'_{\text{spez}} = 0,14 \mu\text{C/cm}^2$ ab.

- f) Ermittlung der erforderlichen Filmbelichtungszeit:

Da $t_w = 10 \text{ min}$ bei Gold unberücksichtigt bleiben kann, geht man in Abb. 9b von $E_{\text{spez}} = 1,7 \mu\text{C} \cdot \text{h/cm}^2$ parallel zu den Hilfsdiagonalen bis über $A'_{\text{spez}} = 0,14 \mu\text{C/cm}^2$ und erhält eine Belichtungszeit von

$$t_{bl} = 12 \text{ h.}$$

5.8 Konverterdicke

Die Dicke eines Konverters beeinflusst über Aktivierung und Selbstabsorption die Strahlungsdichte, die an seiner Oberfläche für eine Filmbelichtung zur Verfügung steht. Wird ein Film auf die dem Neutronenstrahl zugewandte Konverterseite gelegt, so erfährt er durch die Strahlenart i eine Schwärzung, die von der Schichtdicke d gemäß

$$(29) \quad S_i = m_i \cdot (1 - e^{-(\Sigma_t + Z_i) \cdot d}).$$

abhängt 10), 16). Es bedeuten

Z_i = Konverterabsorptionskoeffizient für Strahlenart i

Σ_t = totaler Schwächungsquerschnitt des Konvertermaterials für thermische Neutronen

m_i = Proportionalitätsfaktor, der von der Strahlenart i , vom Konvertermaterial, dem Neutronenfluß und von der Bestrahlungs-, Belichtungs- und Wartezeit abhängt.

Die relative Schwärzung bezogen auf $S_i(d = \infty)$ ist damit

$$(30) \quad S_{Ri} = 1 - e^{-(\Sigma_t + Z_i) \cdot d}$$

Da diese Funktion kein Maximum hat, wird die Foliendicke d_{opt} als ausreichend angesehen, bei der $S_{Ri}(d)$ den Wert 0,95 annimmt 10):

$$(31) \quad d_{opt} = 3/(\Sigma_i + Z_i) \text{ [cm]}$$

Die rechnerische Abschätzung von d_{opt} und S_{Ri} ist hinreichend genau, wenn sie auf die charakteristische Betastrahlung (größte Häufigkeit) der aktiven Konverteratome gestützt wird.

Z_i kann dann nach 11) im Energiebereich von

$$0,5 \text{ MeV} < E_{\beta \text{ max } i} < 6 \text{ MeV}$$

berechnet werden:

$$(32) \quad Z_i = 22 \cdot \rho \cdot E_{\beta \text{ max } i}^{-1,33} \text{ [cm}^{-1}\text{]}$$

$E_{\beta \text{ max } i}$ = Energie der Betastrahlung i [MeV]

ρ = Dichte des Folienmaterials [g/cm³]

In der Tabelle 8 sind die so berechneten Konverterdicken d_{opt} eingetragen.

In den Abbildungen 19, 20 und 21 ist der Verlauf der experimentell ermittelten Filmschwärzungen als Funktion der Foliendicke der benutzten drei Konvertermaterialien wiedergegeben. Einige Meßpunkte aus diesen Diagrammen sind normiert auf die gerechnete relative Schwärzung der jeweils dicksten Konverterfolie zum Vergleich in der Abbildung 22 eingezeichnet, die den Verlauf der nach Gl. (30) gerechneten relativen Filmschwärzung als Funktion der Foliendicke darstellt. Die Übereinstimmung der Meßpunkte mit den berechneten Kurven ist recht gut.

5.9 Relative Filmempfindlichkeit

In der Röntgentechnik ist es üblich, die Filmempfindlichkeit als sogenannten "relativen Belichtungsfaktor" anzugeben. Nach Agfa-Angaben ist für Röntgenstrahlen das Verhältnis der relativen Belichtungsfaktoren für die Filme D10, D7 und D2:

$$D10 : D7 : D2 = 1 : 4 : 60,$$

d.h. um gleiche Schwärzungen zu erzeugen, muß ein D7-Film 4mal und ein D2-Film 60mal solange wie ein D10-Film mit der gleichen Röntgenstrahlenqualität belichtet werden.

In den Abbildungen 23, 24 und 25 sind mit den Daten aus den Abbildungen 11a, b, c bis 13a, b, c die zur Erzielung einer Schwärzung von $S_{\text{Netto}} = 2$ erforderlichen Aktivitätsstundenzahlen für die verwendeten drei Filmsorten als Funktion der Konverterdicke eingezeichnet.

Die Auswertung dieser Diagramme ergibt für jeweils konstante Konverterdicken folgende Verhältnisse der relativen Belichtungsfaktoren (gemittelte Werte):

Für Dysprosiumkonverter:

$$E_{\text{spez}}(\text{Osray}) : E_{\text{spez}}(\text{D7}) : E_{\text{spez}}(\text{D2}) = 1 : 2,7 : 39$$

für Indiumkonverter:

$$E_{\text{spez}}(\text{Osray}) : E_{\text{spez}}(\text{D7}) : E_{\text{spez}}(\text{D2}) = 1 : 3,6 : 41$$

für Goldkonverter:

$$E_{\text{spez}}(\text{Osray}) : E_{\text{spez}}(\text{D7}) : E_{\text{spez}}(\text{D2}) = 1 : 3 : 49$$

5.10 Relative Empfindlichkeit des Systems Konverter-Film

Die relative Empfindlichkeit des Systems Konverter-Film ist von der Art und Dicke der Konverterfolie, von der Bestrahlungs- und Belichtungszeit und von der Filmsorte abhängig.

In den Diagrammen der Abbildungen 26 und 27 ist Gold als Standard-Konvertermaterial zugrunde gelegt. Verglichen wird die Schwärzung von Structurix-D2-Film durch 100 μ dicke Konverter.

In der Abb. 26 ist die relative Empfindlichkeit $V_g(\text{In}/\text{Au})$ von Indium über Bestrahlungszeiten zwischen 0,25 h und 2 h für verschiedene Belichtungszeiten (1-6 h) eingezeichnet.

Bei hohen Neutronenflußdichten in der Bildebene, die sowohl kurze Bestrahlungszeiten als auch kurze Filmbelichtungszeiten zulassen (z.B. $t_{bs} = 0,25$ h, $t_{bl} = 1$ h), ist ein Indiumkonverter etwa 120mal empfindlicher als ein gleichdicker Konverter aus Gold. Für längere Bestrahlungs- und Belichtungszeiten ist der Empfindlichkeitsunterschied kleiner. Er beträgt aber bei $t_{bs} = 2$ h und $t_{bl} = 6$ h immer noch $V_g(\text{In}/\text{Au}) \approx 20$. Die Empfindlichkeitssteigerung bei Verwendung von Indiumfolien ist hauptsächlich auf ihre im Vergleich zu Gold kürzere Halbwertszeit zurückzuführen.

Die Empfindlichkeit von Dy-Konverterfolien ist ebenfalls höher als die von Au, weil die Halbwertszeit kleiner und der Aktivierungsquerschnitt um etwa den Faktor 4 größer ist. Die Auswirkung dieser Materialeigenschaften zeigt die Abb. 27.

Unter der Voraussetzung genügend hoher Neutronenflußdichten beträgt das Verhältnis der Empfindlichkeiten von Dy und Au $V_g(\text{Dy}/\text{Au}) \approx 310$. Selbst für längere Bestrahlungs- und Belichtungszeiten, die bei kleineren Flußdichten erforderlich werden, ist der Gewinn immer noch $V_g(\text{Dy}/\text{Au}) \approx 200$.

5.11 Gesamtunschärfe

Die neutronenradiographische Aufnahme der Kante eines praktisch "schwarzen" Objektes zeigt auf dem Film keinen scharfen Schwärzungssprung, sondern eine mehr oder weniger lange Schwärzungsrampe. Die Länge dieser Schwärzungsrampe auf dem Film ist die Gesamtunschärfe U_0 . Sie setzt sich zusammen aus:

- a) der geometrischen Unschärfe U aufgrund der endlichen Kollimation des Neutronenstrahls (s. Gl. (13)),
- b) der Konverterunschärfe U_K , die dadurch entsteht, daß die Beta- und Gammastrahlung des Aktivitätsbildes nicht nur senkrecht zum Film, sondern nach allen Richtungen die Konverterfolie verläßt, und
- c) der inneren Unschärfe U_F , die für eine bestimmte Strahlenart eine charakteristische Größe des verwendeten Filmtyps ist.

Die Konverterunschärfe U_K hängt ab von der Foliendicke und der Art und Energie der emittierten Strahlung. Sie läßt sich kaum von der inneren Unschärfe getrennt erfassen. Deshalb schlägt man sie zweckmäßigerweise der inneren Unschärfe des Films zu.

Die innere Unschärfe der Structurix-Filme beträgt nach Angaben des Herstellers 12) in der Röntgentechnik bei Verwendung von Blei-Verstärkerfolien bis zu 20μ und einer Strahlenenergie ≥ 100 keV $U_F = 0,2$ mm, beim Einsatz von Radioisotopen wie $Co60$ und $Cs137$ mit Verstärkerfolie aus Blei ($0,1$ mm) $U_F = 0,3$ mm und mit Salzfolien U_F bis $0,7$ mm.

Im folgenden soll mit einer Mindestunschärfe von $U_F = 0,3$ mm gerechnet werden (siehe auch 13), S. 246).

Nach 13) ist die Gesamtunschärfe U_0

$$(33) \quad U_0 = \sqrt[3]{U^3 + U_F^3}$$

Die Gesamtunschärfe kann damit einen bestimmten Wert, der durch die innere Unschärfe U_F vorgegeben ist, nicht unterschreiten. Es ist also nicht sinnvoll, die Kollimation extrem gut zu wählen, da die Schärfe der Aufnahme nicht wesentlich verbessert wird.

Soll die geometrische Unschärfe U nur etwa 10 % zur Gesamtunschärfe U_0 beitragen, dann muß U auf

$$U = 0,7 U_F$$

beschränkt werden.

Nach Gl. (13) erhält man damit für das zugehörige Kollimationsverhältnis:

$$K_{opt} = 0,7 U_F/s_0$$

Das ergibt für $s_0 = 25$ mm bei unserer Anlage die Blende 3 mit 41,5 mm Durchmesser ($K = 1:106,7$). Tatsächlich stellt man auch bei visueller Beurteilung der Aufnahmen, die mit verschiedenen Blendenöffnungen von einem 20 mm vom Konverter entfernten Objekt gemacht wurden, bei kleinerer Blende (21,5 \emptyset) keine Verbesserung der Bildschärfe fest.

Es sei hier aber darauf hingewiesen, daß eine Unschärfe von $U_0 = 0,3$ mm nicht identisch ist mit einer Detaillierbarkeit von 0,3 mm. Die Detaillierbarkeit kann durchaus besser sein (s. Abb. 28). Nur wird die exakte geometrische Vermessung von Objekten durch die Auswertung neutronenradiographischer Aufnahmen mit zunehmender Unschärfe immer schwieriger.

5.12 Strahlenbelastung durch die Konverterfolie

Beim Transport und bei der Handhabung nach der Aktivierung ist der Operateur der radioaktiven Strahlung der Konverterfolie ausgesetzt. Im folgenden soll die maximal zu erwartende Dosis abgeschätzt werden.

Es wird angenommen, daß die Folie mit einer Fläche von $F_f = 10 \times 24$ cm² in einer großen Kunststoffschale abgelegt und so von Hand in die Dunkelkammer transportiert wird. Dabei läßt sich leicht ein Abstand Folie/Körper von $r = 50$ cm einhalten. Die Einwirkungszeit der Strahlung auf den Operateur wird sehr pessimistisch mit $t_a = 10$ min bei konstanter

Aktivität angesetzt. Dann ergibt sich die durch die aktivierte Konverterfolie erzeugte Dosis

$$(45) \quad D_{\gamma \text{Folie}} = A'_{\text{spez}} \cdot K_{\gamma} \cdot F_f \cdot t_a / r^2 = A'_{\text{spez}} \cdot \beta \cdot F_f$$

K_{γ} = Gesamtdosiskonstante des aktiven Konverterisotops
[R · cm²/h · μC]

In der Tabelle 10 sind für die drei verwendeten Konverterfolien die β-Werte eingetragen. Die Multiplikation dieser β-Werte mit den nach den Diagrammen 8a, 9a und 10a ermittelten spezifischen Aktivitäten und der Fläche der bestrahlten Konverterfolien ergibt einen Anhaltswert für die unter den gemachten Annahmen zu erwartende Strahlendosis. Selbst bei ungünstigsten Annahmen (sehr lange Bestrahlungszeiten bei großer Blende) bleibt die applizierte Dosis unter 3 mR (siehe Tabelle 10).

In den meisten Fällen wird die Dosis unter 1 mR liegen, so daß zum Transport der Folien keine Bleibehälter erforderlich sind. Eine dickwandige große Plastikschiene mit einem Plexiglasdeckel zur teilweisen Abschirmung der β-Strahlung dürfte hier ausreichen.

6. Auswertung und Diskussion einiger neutronenradiographischer Objektaufnahmen und ihr Vergleich mit Röntgen- und Betatron-Aufnahmen

Nach Durchführung der Parameterstudien wurden an der Anlage nach Abb. 2 einige Aufnahmen von verschiedenen Objekten gemacht. Mit ihnen sollten die Abbildungsqualität geprüft und die Grenzen des Auflösungsvermögens und der Detaillierbarkeit qualitativ untersucht werden. Ferner wurden von einigen Objekten vergleichende Aufnahmen mit verschiedenen Röntgenanlagen (150 kV-, 300 kV- und 400 kV-Anlage) und einem Betatron (18 MeV) der Firma Siemens angefertigt.

Alle Objekte waren schwach oder gar nicht radioaktiv. Die hier wiedergegebenen Aufnahmen mit den obengenannten Anlagen lassen daher keine vergleichende Betrachtung über den Einfluß einer intensiven Objekt-Eigenstrahlung auf die Bildqualität zu. Es steht jedoch fest, daß die Güte neutronenradiographischer Aufnahmen nach dem hier behandelten indirekten Verfahren durch die Eigenstrahlung der Objekte in keiner Weise beeinflußt wird, während sie bei der Röntgen- oder Betatronuntersuchung mit zunehmender Objektaktivität mehr oder weniger abnimmt.

In Röntgenanlagen, in denen ohne Abschirmmaterial zwischen Objekt und Film gearbeitet wird, führt die Objektstrahlung zu einer Erhöhung des Filmschleiens. Bei Betatronaufnahmen versucht man, diesem unmittelbaren Aktivitätseinfluß auf die Bildgüte durch Einbau einer Abschirmung zwischen Objekt und Film entgegenzuwirken, muß aber diesen Vorteil mit zusätzlicher Abbildungsunschärfe infolge der erhöhten Strahlstreuung im Abschirmmaterial und des vergrößerten Objekt-Film-Abstandes erkaufen.

Der Effekt der Strahlstreuung und der Abstandsvergrößerung ist in den hier wiedergegebenen Betatronaufnahmen bereits enthalten, da sie unter Verwendung einer zur Strahlhomogenisierung besonders geformten Eisenabschirmung (Homogenisator) gemacht wurden 15).

6.1 Lochblende aus Kadmium

Das Objekt besteht aus einem 0,3 mm dicken Kadmiumpulverplättchen, das in der Längsachse neun Bohrungen mit folgenden Durchmessern und gegenseitigen Abständen aufweist:

Bohrungsdurchmesser [mm]	Abstand der Bohrungen [mm]
3,0	
2,0	3,0
1,5	1,75
1,0	1,5
0,8	1,0
0,5	0,8
0,3	0,5
0,2	0,3
0,1	0,2

Die Lochblende wurde in Kontakt mit einer 270 μ dicken Dysprosium-Konverterfolie bei Blende 2 ($d_2 = 21,5$ mm \emptyset , $K = 1 : 206$) $t_{bs} = 215$ min lang bestrahlt. Die Belichtung der Filme geschah unter folgenden Bedingungen:

Film	Wartezeit	Belichtungszeit	Erkennbarkeit der kleinsten Bohrung
D 10	11 min	10 min	gerade noch möglich
D 7	22 min	41 min	befriedigend
D 4	1,1 h	$\cong \infty$	gut

Die Abb. 28a-c zeigen die Ergebnisse dieses Versuchs für die drei benutzten Filme. Wie zu erwarten, wird die Erkennbarkeit der kleinsten Bohrung mit zunehmender Filmempfindlichkeit und damit zunehmender Korngröße schlechter.

6.2 Uranstab mit geplatzter Hülle

Der Uranstab (N62) ist in seinem mechanischen Aufbau mit den Stäben des Projektes FR2/55 identisch. Die Hülle aus Incoloy 800 hat eine Gesamtlänge von 172 mm und einen äußeren Durchmesser von 7 mm bei einer Wandstärke von 0,38 mm. In der Hülle befindet sich eine 90 mm hohe pelletierte federbelastete Brennstoffsäule, die im Gegensatz zu den Originalstäben aus Natururanoxid besteht.

Das Can wurde in Längsrichtung auf der Außenseite leicht angefräst und out of pile durch hohen Innendruck zum Bersten gebracht. Dieser Stab ist in der Längsachse eines V2A-Rohres (Abmessungen: 42 mm \varnothing , 2,0 mm Wandstärke) untergebracht, das einige am Umfang verteilte radiale Bohrungen aufweist und einige Windungen Thermoelementleitung (1,5 mm \varnothing) trägt. Im Innern des Rohres verlaufen parallel zum Brennstab ein V2A-Röhrchen (Abmessungen: 3 mm \varnothing , 0,15 mm Wandstärke) und eine Thermoelementleitung von 1,5 mm Außendurchmesser. Die ganze Anordnung ist an den Stirnseiten mit je einem zur besseren Zentrierung abgesetzten Deckel aus V2A-Stahl verschlossen.

Dieses Objekt wurde in zwei verschiedenen Richtungen neutronenradiographisch untersucht. Die Abb. 29a und b zeigen das Ergebnis. Die Versuchsparameter waren wie folgt gewählt:

Abb.	Konverter	Blende		t_{bs} [min]	t_w [min]	Film	t_{bl} [min]
		Nr.	\varnothing				
29a	Dy 270 μ	3	41,5mm	60	11	D4	$\hat{=} \infty$
29b	Dy 270 μ	2	21,5mm	240	12	D2	$\hat{=} \infty$

In der Abb. 29a erkennt man in der Bildmitte deutlich die lanzettförmige Berststelle im Can und als deren Fortsetzung die fadenartige Anfräsung der Hülle in Richtung der Stablängsachse. Die Abbildung zeigt ferner im Bereich der Berststelle einen geringen Luftspalt zwischen Brennstoff und Can, der auf die Aufweitung des Cans an dieser Stelle zurückzuführen ist.

Ebenfalls sind einige Pelletstöße, die Feder im Spaltgasplenum und die Längsbohrung im Stabkopf und im Druckstück oberhalb des Brennstoffes sichtbar. Gut wiedergegeben sind auch alle Thermoelemente und die dünnwandige V2A-Kapillare,

wobei die Adern der Thermoelementleitungen nur in Konverternähe (im Bereich des Stabkopfes) und bei gegenseitiger Abschattung gut sichtbar sind. Die Abb. 29a gibt keine genaue Auskunft über die Dicke der äußeren Rohrwand^{*}) und über die Thermoelemente, soweit sie über die Rohrwand hinausragen. Dazu ist der Objektrand bei der Übertragung des Aktivitätsbildes auf den Film zu stark überstrahlt (für diesen Zweck zu lange Filmbelichtung).

Wie solche Überstrahlungen vermieden werden können, zeigt die Abb. 29b, bei der ein weniger empfindlicher Film verwendet wurde. Die übertragene Strahlungsmenge (Aktivitätsstundenzahl) wurde so gewählt, daß die Schwärzung des Films kleiner als in Abb. 29a ausfiel. Dadurch ist die Gesamtwiedergabe etwas flauer. Die äußeren Konturen des Objektes treten aber schärfer und detaillierter hervor (Thermoelementüberstände, Kopf der Inbusschraube). Das Objekt wurde im Vergleich zur Abb. 29a 90° um die Längsachse gedreht. Man erkennt in der Bildmitte die starke Aufwerfung des Cans an der Berststelle und eine Verschiebung der Uranpellets.

Die Abb. 30a zeigt eine Röntgenaufnahme des gleichen Objektes. Sie wurde mit einer Röntgenanlage mit folgender Einstellung gemacht:

$$U = 140 \text{ kV}; I = 5 \text{ mA}; t_{\text{bS}} = 6 \text{ min.}$$

Die Zeichnung der Feder, des Kapillarrohres und der Thermoelementleitungen ist hervorragend. Ferner sind im Negativ die Bohrungen des Stabkopfes und des Druckstückes und die Stoßstellen der Brennstoffpellets sichtbar. Nicht nachweisbar ist dagegen die Berststelle des Cans. Aussagen über die Dicke der äußeren Wand sind auch bei Auswertung des Negativs nicht möglich. Bei diesen wie bei allen übrigen noch zu besprechenden Röntgenaufnahmen fällt die im Vergleich zur Neutronenradiographie starke, strahlgeometriebedingte Verzerrung der Objektstirnseiten auf.

^{*}) Das Negativ läßt durchaus die Wandstärke erkennen

Die Abb. 30b wurde mit einer 400 kV-Röntgenanlage bei folgender Einstellung gemacht:

$$U = 150 \text{ kV}; I = 2,5 \text{ mA}; \text{ Brennfleck} = 1,8 \times 1,8 \text{ mm}^2$$

$$t_{\text{bs}} = 30 \text{ sec}; \text{ Focus-Film-Abstand} = 970 \text{ mm}.$$

Die Aufnahme ist scharf gezeichnet und gibt viele Details wieder. Zwar ist auch hier die Berststelle nicht sichtbar, aber eine Aufweitung des Cans in diesem Bereich ist erkennbar. Das Negativ läßt an dieser Stelle auch eine Versetzung der Pellets erkennen.

Die Aufnahme 31 wurde mit dem Betatron bei folgender Einstellung gemacht:

Gammaenergie: 18 MeV; Gammadosisleistung in 50 cm Abstand vom Focus: 150 rem/min; $t_{\text{bs}} = 9 \text{ min}$.

Die Aufnahme ist nicht besonders scharf, was auf die Streustrahlung im Homogenisator und die durch ihn bedingte Abstandsvergrößerung zwischen Objekt und Film zurückzuführen ist. Während das innere Kapillarrohr und das Thermoelement ebenso wie die einzelnen Leiter im äußeren Thermoelement nur ganz schwach sichtbar sind, kann man Pelletstöße und eine Aufweitung des Cans im Berstbereich erkennen. Die Berststelle selbst ist nicht sichtbar, obwohl der Stab nur wenig gegenüber seiner Stellung in Abb. 29a gedreht ist.

Zusammenfassend kann man für die Beurteilung dieses Objekts feststellen, daß die meisten Informationen durch eine neutronenradiographische Untersuchung erbracht werden. So wird weder bei Röntgen- noch bei Betatronaufnahmen der Rand der Canschadenstelle sichtbar. Die Neutronenradiographie zeichnet zwar die Adern der Thermoelemente schlechter als die beiden Röntgenanlagen, aber doch besser als das Betatrongerät. Wie sich jedoch die Bildgüte der Röntgenaufnahmen bei hohen Objektaktivitäten verschlechtert, kann hier leider nicht demonstriert werden.

6.3 Uranstab mit abgesetztem Can

Das Objekt ist eine Nachbildung der einwandigen NaK-Kapsel des Projektes FR2/86. Der Brennstoffstab enthält eine auf 12,5 % U-235 angereicherte, eingerüttelte Urandioxidsäule von 10 mm Durchmesser und 228 mm Länge. Auf den Stirnseiten der Uransäule liegt je ein 1,5 mm starkes Rhodium-Adsorberplättchen. Der Außendurchmesser der Stabhülle mit maximal 12 mm wurde in 14 mm langen Stufen um je 0,1 mm bis auf 10,4 mm verkleinert. Dieser Stab ist von vier Hüllen konzentrisch umgeben, die gegeneinander und zum Stab durch entsprechend geformte V2A-Deckel zentriert werden. Die erste stabnahe Hülle ist ein zur Aufnahme eines Zentriersternes mittig geteiltes Niob-Verdränger-Rohr mit 21 mm Außendurchmesser und 4 mm Wandstärke. Darauf folgt ein V2A-Rohr mit 27 mm Außendurchmesser und 1,5 mm Wandstärke, das mit dem Objektboden an dem einen und dem Einfüllstutzen am anderen Ende verschweißt ist. Der Raum zwischen Stabcan und diesem V2A-Rohr wurde mit NaK gefüllt. Die folgende Hülle aus V2A hat 40 mm Außendurchmesser und 2 mm Wandstärke. Das äußere Rohr hat 46 mm Außendurchmesser und ist aus 1 mm starken V2A-Blech gewickelt.

Das Objekt wurde neutronenradiographisch mit folgenden Parametern aufgenommen:

Blende $3 \hat{=} d_3 = 41,5 \text{ mm } \emptyset$, Dysprosium-Konverter mit $d = 270 \text{ } \mu$;
 $t_{\text{bs}} = 240 \text{ min}$; $t_{\text{w}} = 10 \text{ min}$.

Anschließend wurde mit dieser Folie ein Structurix-D2-Film praktisch unendlich lange belichtet.

Das Ergebnis zeigt die Abb. 32a. Man erkennt die abnehmende Wandstärke des Brennstoffcans, den Zentrierstern, vier Hüllen mit ihren unterschiedlichen Wandstärken, das Rhodiumscheibchen als offensichtlich starken Neutronenabsorber und die Langlöcher im Niob-Verdrängerrohr (helle Stellen im Niob in Höhe des Rhodiumplättchens). Beim gut ausgeleuchteten Negativ oder einem guten Papierabzug sind auch die Stufen des Cans sichtbar, wenn man das Bild unter flachem

Winkel in Richtung der Stablängsachse betrachtet. Ferner erkennt man das Ein- und Übergreifen der beiden äußeren Hüllen in bzw. über die Zentrierungen am Objektfuß. Nicht dargestellt ist der NaK-Spiegel, da er oberhalb des Kollimatorfensters lag. Die etwas intensivere Bildschwärzung im Bereich der Stabenden läßt eine schwache Neutronenflußabsenkung am äußeren Bildrand vermuten.

Die Abb. 32b wurde vom gleichen Objekt durch starke Überbelichtung eines D4-Filmes mit einer 270 μ dicken Dysprosiumfolie gewonnen, die mit folgenden Daten bestrahlt wurde:

$$\text{Blende } 3 \hat{=} d_3 = 41,5 \text{ mm } \emptyset; t_{\text{bs}} = 183 \text{ min}; t_{\text{w}} = 11 \text{ min.}$$

Die Aufnahme zeigt deutlich Inhomogenitäten innerhalb des Urandioxidpulvers (z.B. Dichte- oder Anreicherungsunterschiede). Es ist also durchaus möglich, an diesen oder ähnlichen Stäben Abbrandunterschiede neutronenradiographisch festzustellen (s.a. 14)).

Die Abb. 32b läßt erkennen, daß es schwierig ist, wegen des geringen Schwärzungsumfanges von Photopapieren von einem sehr dunklen Negativ gute Positive herzustellen. Der Informationsgehalt des zugehörigen Negatives ist nämlich viel größer als der der Abbildung 32b.

Die Abb. 33a und b zeigen zwei Positivbilder einer Aufnahme, die mit einer Röntgenanlage von dem hier besprochenen Objekt gemacht wurden ($U = 250 \text{ kV}$; $I = 5 \text{ mA}$; $t_{\text{bs}} = 5 \text{ min}$). In der Aufnahme 33a kann man bei gleicher Betrachtungsweise wie bei Abb. 32a die Stufen der abgesetzten Brennstabhülle erkennen. Ferner ist noch das Verdrängungsrohr mit den beiden Langlöchern am unteren Ende zu sehen. Auffallend ist, wie wenig sich bei dieser Aufnahme im Gegensatz zur Neutronenradiographie der Zentrierstern aus V2A vom Niob-Verdrängerrohr optisch abhebt. Wenig befriedigend ist auch die Wiedergabe des Objektfußes, der in seinem äußeren Umriß in der Abb. 33b besser hervortritt.

Allerdings ist jetzt der Bereich innerhalb der äußeren Kontur des Verdrängerrohres überhaupt nicht mehr strukturiert, trotzdem ist die dünne äußere Hülle immer noch nicht sichtbar. Auch die relative Lage der beiden äußeren Hüllen zum Zentrierring des Objektbodens ist nicht feststellbar.

Die Abb. 33a und b geben etwa den Umfang der dem bloßen Auge möglichen Detaillierkennbarkeit auf dem gut ausgeleuchteten Röntgennegativ an.

Die Abb. 34a wurde nach Drehung des Objektes um 90° um die Längsachse mit der 400 kV-Röntgenanlage bei folgender Einstellung gemacht:

$$U = 400 \text{ kV}; I = 10 \text{ mA}; t_{\text{bs}} = 1,5 \text{ min.}$$

Die Transparenz ist wegen der höheren Strahlenenergie deutlich besser. Es gelten aber nach wie vor die im Zusammenhang mit den Abb. 33a und b getroffenen Feststellungen.

Eine Betatronuntersuchung dieses Objektes, die mit der für Abb. 31 angegebenen Geräteeinstellung durchgeführt wurde, lieferte die Abb. 34b. Die Objekttransparenz ist bei der sehr harten Gammastrahlung des Betatrons recht gut. Vom Brennstoff bis zur äußeren Hülle sind alle Objektkomponenten mehr oder weniger deutlich zu erkennen (allerdings schlechter als bei der Neutronenradiographie). Im Gegensatz zur Neutronenradiographie stellt man eine starke elliptische Verzerrung des Objektfußes, keinen Schwärzungsunterschied zwischen Rhodiumplättchen und Uranoxid und eine Umkehr des Schwärzungsunterschiedes zwischen Niob-Verdrängerrohr und Zentrierstern fest. Die Stufen des Cans sind wegen der im Vergleich zu den Röntgen- und Neutronenradiographie-Aufnahmen größeren Unschärfe nicht mehr erkennbar.

Zusammenfassend kann man sagen, daß auch bei diesem Objekt der Informationsgehalt der Neutronenradiographie-Aufnahmen am größten ist.

Allerdings ist es auch mit ihrer Hilfe nicht möglich, Maßänderungen von Einzelkomponenten - besonders im Innern großvolumiger Kapseln - mit Genauigkeiten von ca. 0,1 mm durch direktes Ausmessen zu bestimmen. Dazu ist die Schärfe der Wiedergabe zu gering. Derart genaue Maßbestimmungen lassen sich u.U. durch Auswertung der Schwärzungsprofile einer Aufnahme mit einem hochauflösenden Mikrodensitometer vornehmen.

Eine weitere Begrenzung der Leistungsfähigkeit der geplanten Neutronenradiographieanlage in der Thermischen Säule ist wegen des Fehlens eines nennenswerten epithermischen Flußanteiles zu erwarten. Bei kadmiumabgeschirmten Bestrahlungseinsätzen ist eine Untersuchung mit rein thermischen Neutronen nicht oder nur sehr unvollständig möglich. Metallisches Uran mit 10 % Anreicherung ist schon ab ca. 3 mm Dicke für thermische Neutronen praktisch schwarz. Zentralkanäle oder andere Defekte innerhalb des Brennstoffes oder Anreicherungsunterschiede lassen sich nur durch starke Überstrahlung der benachbarten Einsatzkomponenten sichtbar machen (siehe Abb. 32b). Abbrände können dann bei hochangereicherten Stäben nur über Veränderungen der abgebildeten äußeren Brennstoffkonturen ermittelt werden.

Diese Schwierigkeiten lassen sich durch den Einsatz epithermischer Neutronen vermeiden. Dazu müßte entweder die Neutronenradiographieanlage vor einem C- oder R-Kanal aufgebaut oder der zum Einbau des Kollimators vorgesehene Kanal der Thermischen Säule bis zum Reaktortank verlängert werden. Der Durchbruch in der Thermischen Säule sollte sowohl mit Graphit als auch wahlweise mit einem mit D_2O -flutbaren Moderator-Stopfen aus Aluminium verschließbar sein, um erstens den für andere Experimente benötigten ursprünglichen Zustand wiederherstellen und zweitens durch Fluten

oder Lenzen des Moderatorstopfens eine schnelle Veränderung des Neutronenspektrums am Kollimatoreingang vornehmen zu können. Die zu erstellende Neutronenradiographieanlage ist daher zweckmäßig so zu konzipieren, daß die Vorteile einer zukünftigen Modifizierung der Thermischen Säule in der hier vorgeschlagenen Form ohne große Änderungen voll ausgeschöpft werden können.

6.4 Objekte mit unterschiedlichen Strukturmaterialien

In diesem Abschnitt wird die Untersuchung von inaktiven Objekten besprochen, die sowohl metallische als auch organische (also wasserstoffhaltige) Komponenten enthalten.

Die Abb. 35a zeigt als Beispiel einige Schalter und einen Sicherungsautomaten, die neutronenradiographisch unter folgenden Bedingungen aufgenommen wurden:

Blende $3 \cong d_3 = 41,5 \text{ mm } \emptyset$; $K = 1:106$; $t_{\text{BS}} = 200 \text{ min}$
 $t_{\text{W}} = 12 \text{ min}$

Die 270μ dicke Dysprosiumfolie belichtete 182 min einen D2-Film.

Die Aufnahme gibt alle Strukturen des Kunststoffgehäuses und der inneren Kunststoffteile gut wieder.

Die Zeichnung der Metallteile ist weniger kontrastreich aber im allgemeinen als befriedigend zu bezeichnen. Es sind im Mikroschalter und im kleinen Kippschalter die Kontaktanordnung und -stellung und die dünnen Federelemente zu erkennen. Ferner sind im Sicherungsautomaten die Hebel samt Lagerstellen und Federn und die Spulen sichtbar. Schlecht wird die Wiedergabe der Metallteile hinter oder vor dicken Kunststoffschichten wie z.B. beim großen Kippschalter oder im Bereich des Automatenfußes

Dagegen werden Metallteile dieser Gegenstände in der in Abb. 35b wiedergegebenen Röntgenaufnahme ($U = 65$ kV; $I = 5$ mA; $t_{\text{bs}} = 1$ min) sehr scharf und kontrastreich gezeichnet. Während beim Mikroschalter die Gehäuseteile unsichtbar bleiben, sind sie beim großen Kippschalter und der Sicherung auf dem Negativ schwach zu erkennen. Das Kunststoffunterteil des kleinen Kippschalters ist sehr gut und scharf zu erkennen. Überhaupt nicht aufgelöst sind dagegen Stellen mit mehreren übereinander liegenden Metallteilen wie z.B. die Hebel und Wippen im Sicherungsautomaten oder die Betätigungshebel der Schalter im Bereich der Zentralbefestigung.

6.5 Bornitridisolierte Heizstäbe

Das Institut für Reaktorbauelemente der GfK entwickelt im Rahmen des Schnellbrüter-Projektes (PSB) bornitridisolierte Heizstäbe.

Die Heizstäbe bestehen aus einem Metallrohr von ca. 6 mm Außendurchmesser, das etwa konzentrisch in seinem Innern den aus Metallband gewendelten Heizleiter aufnimmt. Der vom Heizleiter umschlossene Raum ist mit MgO gefüllt, während die Isolation zwischen dem äußeren Leiterrohr und der Heizwendel aus Bornitrid besteht. Angestrebt wird eine möglichst gleichmäßige Dichte dieser Isolationsschicht.

Die Röntgenaufnahme eines solchen Heizstabes, wie sie in Abbildung 36b gezeigt ist, kann wohl die Lage der Heizwendel im äußeren Leiterrohr, nicht aber die relative Dichte der Isolationsschicht nachweisen.

Hier liegt jedoch ein typisches Anwendungsgebiet der Neutronenradiographie.

Die beiden Aufnahmen der Abbildung 36a wurden mit folgenden Parametern neutronenradiographisch gewonnen:

$$\begin{aligned} \text{Blende } 4 \hat{=} d_4 &= 104 \text{ mm; } D_y 270 \text{ } \mu; t_{\text{bs}} = 75 \text{ min;} \\ t_w &\approx 10 \text{ min; D4-Film; } t_{\text{bl}} \hat{=} \infty \end{aligned}$$

Bei der unteren Aufnahme war das Objekt gegenüber der oberen Darstellung um 90° in der Längsachse gedreht.

Die Bilder zeigen sehr deutlich die unterschiedliche Borbelegung der Isolationsschicht.

Allerdings muß bei der hier angewandten Aufnahmetechnik mit thermischen Neutronen eine völlige Überstrahlung der äußeren Objektstrukturen in Kauf genommen werden. Eine gleichzeitige Aussage über Dicke und Dichte der Isolationsschicht ist nur bei der Radiographie mit epithermischen Neutronen (siehe Abschnitt 6.3) oder durch eine sich ergänzende Auswertung von Röntgen- und Neutronenradiographie-Aufnahmen möglich.

6.6 Kadmiertes Gasführungsrohr

Die Bestrahlungsprobe des Projektes FR2/26 (Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Brennstoff und Can im Rahmen des PSB) liegt in der Achse eines sogenannten Gasführungsrohres aus Edelstahl, das auf seinem äußeren Mantel unter einer dünnen Nickelschicht eine 200μ dicke Kadmiumbelagung trägt. Zur Erzeugung definierter "Neutronenfenster" werden beide Schichten von einer schraubenförmigen Nut mit $1,5 \text{ mm}$ Steigung durchbrochen.

Bei der Herstellung der Nut löste sich bei einigen Rohren teilweise die Nickelschicht ab. Es war zu prüfen, ob und wieviel Kadmium an solchen Stellen mit der Nickelschicht entfernt war.

Zu diesem Zweck wurden unter folgenden Bedingungen zwei Neutronenradiographien gemacht:

Abb.	Folie	t_{bs}	Blende	t_w	Film	t_{bl}
37a	$270 \mu \text{ Dy}$	60 min	4	10 min	D4	$\cong \infty$
37b	$33 \mu \text{ Dy}$			46 min		5,25 h

Bei der Aufnahme 37a lag das Gasführungsrohr mit seinem gesamten Umfang vor der Konverterfolie, während bei der Aufnahme 37b ein Konverterstreifen mit einem Polyäthylenbolzen an die Innenseite der dem Neutronenstrahl zugekehrten Rohrwand gedrückt wurde.

Die Abbildung 37a, die den hier interessierenden Teil des Objektes wiedergibt, läßt die ersten 20 Nuten (von oben) wegen ihrer größeren Breite als tiefer eingestochen erkennen (Spitznuten). In diesem Bereich hatte sich die Nickelschicht abgelöst, so daß auf ein Weiterschneiden der Nut vorerst verzichtet wurde.

Eine nachteilige Veränderung der Kadmiumschicht kann nicht festgestellt werden. Die kleinen Fehlstellen im Bereich der dritten und vierten Nut in der Abb. 37b können toleriert werden.

Interessant ist nebenbei der von der axial verlaufenden Nut im Rohrkopf ausgehende dunkle Streifen. Er läßt den Schluß zu, daß nach dem galvanischen Auftragen der Kadmiumschicht am außerhalb des Bades senkrecht abgestellten Rohr aus der Thermolementbohrung und der daran anschließenden Nut Reste der Elektrolytflüssigkeit nach unten ausflossen und so zu einer zusätzlichen streifenförmigen Kadmiumabscheidung führten.

7. Schlußbetrachtung

Aufgrund der besprochenen Aufnahmen kommt man zu dem Schluß, daß die Technik der Neutronenradiographie keine Konkurrenz zu den anderen zerstörungsfreien Untersuchungsverfahren sein kann, sondern eine sinnvolle und erstrebenswerte Ergänzung dieser bewährten Methoden darstellt. Das gilt ganz besonders für die Behandlung inaktiven Materials. In solchen Fällen könnte für jede Problemstellung aus den genannten drei Untersuchungsverfahren dasjenige ausgewählt werden, das die klarsten und umfassendsten Aussagen erbringt. So wird man z.B. Untersuchungen an dickwandigen Stahlteilen nach wie vor mit

dem Betatron durchführen und die Röntgenanlage zur Betrachtung dünner Metallteile in Kunststoffen einsetzen. Dagegen ist z.B. eine Bestimmung des Wasserstoffgehaltes und seiner Verteilung in Zirkonhydrid oder die Feststellung der Homogenität bestimmter Isotopengemische nur neutronenradiographisch möglich.

Mit zunehmender Eigenaktivität der Objekte wird der Vorzug der Neutronenradiographie immer deutlicher. Bis zu gewissen Grenzen, die sowohl durch die Objektgeometrie als auch die Objektaktivität gesetzt sind, können gute bis brauchbare Untersuchungsergebnisse noch mit Betatron und Hochenergie-Röntgenanlagen erzielt werden.

Aber bei Objekten, die unmittelbar nach dem Ausbau aus dem Reaktorcore voll assembliert untersucht werden müssen, ist die Neutronenradiographie das Untersuchungsverfahren mit der größten Aussagekraft.

Eine Neutronenradiographieanlage am FR2, die unter den gleichen oder ähnlichen örtlichen und physikalischen Gegebenheiten wie bei den hier beschriebenen Vorversuchen betrieben werden kann, wird gute Dienste für eine schnelle und umfassende zerstörungsfreie Prüfung kompletter Reaktoreinbauten leisten.

Die z.Z. geplante Anlage ist so konzipiert, daß eine zukünftige Erweiterung des Einsatzbereiches durch wahlweisen Betrieb mit epithermischen Neutronen nach Modifizierung der Thermischen Säule möglich ist.

8. Literaturverzeichnis

- 1) H. Kallmann
Research, 1 (1948), 254
- 2) J. Thewlis, R.T.P. Derbyshire
Report AERE M/TN 37, U.K. Atomic Energy Research
Establishment, Harwell, England, 1956
- 3) H. Berger
Neutron Radiography
Elsevier Publishing Company
Amsterdam, London, New York (1965)
- 4) W. Kathol
Neutronen-Radiographie mit Cf-252, Literaturübersicht
KFK-Bericht Nr. 1542
- 5) R.S. Matfield
Neutron radiography
Atom Nr. 174, April 1971, S. 84-99
- 6) W. Lausch
Neutronenradiographie und ihre Anwendungsmöglichkeiten
Kerntechnik, 13. Jahrgang (1971), Nr. 2
- 7) Kernreaktor Bau- und Betriebs-GmbH
Experimentiermöglichkeiten am FR2 (1960)
- 8) I.P. Barton, I.P. Perves
Underwater Neutron Radiography with Conical Collimator
British Journal of N.T.D., Dez. 1966, S. 79-83
- 9) P.J. de Munk, H.P. Leeflang
An Apparatus for Neutron Radiography, RCN-135 (1971)
- 10) M. Müllner, H. Jex
Converter-Thickness for Optimum Intensity in Neutron-
Radiography
Nuclear Instr. and Meth. 103 (1972), 229-233
- 11) W.J. Price
Nuclear Radiation Detection
Mc Graw-Hill Book Company, Inc. (1958)
- 12) Agfa-Gevaert
Industrielle Radiograph (1965)
- 13) H.A. Klasens
Measurement and Calculation of Unsharpness Combination
in X-Ray Photography
Philips Research Reports, Vol. 1, No. 4 (Aug. 1946)

- 14) P. Ihle, S. Malang, H.M. Politzky, K. Rust
Zur inhomogenen Uran-Verteilung in den Platten des
HFR Grenoble
Atomwirtschaft, XVII/12, Dez. 1972, S. 623
- 15) J. Tucek, R. Wiechers
Prüfung von bestrahlten Brennelementen mit einem
18-MeV-Betatron
Kerntechnik, 13. Jg., No. 2, Febr. 71
- 16) L.A. Wraight, D.H. Harris, P.A. Egelstaff
Improvements in Thermal Neutron Scintillation Detectors
for Time-Off-Light Studies.
Nuclear Instr. and Meth. 33 (1965), 181-193
- 17) Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und
Schiffahrt m.b.H., Hamburg-Geesthacht
Jahresbericht 1970, S. 155

9. Bezeichnungen

a, b, c	=	Koeffizienten zur Berechnung des Filmempfindlichkeitsfaktors η
β	=	spezifische Gammadosis [R/ μ C]
C'	=	Transparenz der Strecke Neutronenquelle/Bildebene
C ₁	=	Proportionalitätsfaktor [-]
D _{γ}	=	Gammadosis [R]
d	=	Konverterdicke [μ m; cm]
d _{opt}	=	optimale Konverterdicke [μ m; cm]
d _o	=	Materialdicke eines Objektes [cm]
d _n	=	Durchmesser der Kollimatoreintrittsöffnung [mm]
d'	=	effektiver Durchmesser der neutronenstrahlenden Fläche [mm, cm]
E _{β max}	=	maximale Betaenergie [MeV]
E _{spez}	=	spezifische Aktivitätsstundenzahl [μ C·h/cm ²]
E _{spez opt}	=	spezifische Aktivitätsstundenzahl für t _{bs} = t _{b1} [μ C·h/cm ²]
η	=	Filmempfindlichkeitsfaktor [(cm ² / μ C·h) ^{ae}]
F _f	=	Konverterfläche [cm ²]
F _o	=	Materialfaktor zur Berücksichtigung der Neutronenschwächung im Objekt [-]
F	=	effektive neutronenstrahlende Fläche [cm ²]
I	=	Strahlungsintensität geschwächt [1/cm ² sec]
I _o	=	Strahlungsintensität ungeschwächt [1/cm ² sec]
K	=	Kollimationsverhältnis [-]
K _{γ}	=	Gesamtdosiskonstante [R·cm ² /h· μ C]
K ₁	=	Umrechnungsfaktor = 2,7·10 ⁵ [μ C·sec]
ae	=	Schwärzungsexponent [-]
L	=	Kollimatorlänge [m; cm]
L'	=	Abstand Neutronenquelle/Bildebene [mm; cm]

λ	= Zerfallskonstante [1/Zeiteinheit]
m	= Proportionalitätsfaktor [-]
\emptyset	= thermische Neutronenflußdichte [1/cm ² sec]
\emptyset_{th}	= thermische Flußdichte der Neutronenquelle [1/cm ² sec]
\emptyset_a	= Neutronenflußdichte in der Bildebene [1/cm ² sec]
\emptyset_o	= Neutronenflußdichte hinter einem Objekt [1/cm ² sec]
Q_o	= Neutronenquellstärke [1/sec]
r	= Abstand Konverter/Operateur [cm]
ρ	= Dichte [g/cm ³]
S	= Brutto-Filmschwärzung [-]
S_o	= Entwicklungsschleier [-]
S_{Netto}	= Netto-Filmschwärzung [-]
$S_{Netto\ geschwächt}$	= Netto-Filmschwärzung hinter einem Objekt [-]
S_R	= relative Filmschwärzung [-]
s	= Seitenlänge der quadratischen Kollimatoreintrittsöffnung [mm; cm]
s_o	= Abstand Objekt/Konverter [mm]
Σ_{to}	= totaler Schwächungskoeffizient eines Objektes für Neutronen [cm ⁻¹]
Σ_{tG}	= Wirkungsquerschnitt der Gasfüllung des Kollimators für thermische Neutronen [cm ⁻¹]
Σ_a	= Gesamtabsorptionsquerschnitt der Konverter für thermische Neutronen [cm ⁻¹]
Σ_t	= totaler Wirkungsquerschnitt der Konverter für thermische Neutronen [cm ⁻¹] (bei Vernachlässigung der Streuung wurde hier immer $\Sigma_t = \Sigma_a$ gesetzt)

$\Sigma_a \text{ eff}$	=	effektiver Aktivierungsquerschnitt der Konverter für thermische Neutronen [cm^{-1}]
T	=	Halbwertszeit [min; h; d]
t_a	=	Expositionszeit [min; h]
t_{bs}	=	Bestrahlungszeit [sec; min; h]
t_{bl}	=	Belichtungszeit [sec; min; h]
t_{ges}	=	Herstellungszeit für eine Aufnahme [min; h]
t_w	=	Wartezeit zwischen Bestrahlungende und Belichtungsbeginn [sec; min; h]
$\mathcal{J}_{\text{Entw.}}$	=	Entwicklertemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
U	=	geometrische Unschärfe [mm]
U_o	=	Gesamtunschärfe [mm]
U_F	=	innere Unschärfe des Filmes [mm]
V_R	=	relative Gesamtvergrößerung der Objektabbildung [-]
V_g	=	relative Empfindlichkeit der Konverter [-]
Z	=	Absorptionskoeffizient für die Konverterstrahlung [cm^{-1}]

Indizes:

n	=	Index der Blendenöffnungen
i	=	Index der Konverterstrahlung

10. Verzeichnis der Tabellen

Tabelle

- | | |
|----|---|
| 1 | Abmessung und Lage der S-Kanäle |
| 2 | Kollimatordaten |
| 3 | Totale Wirkungsquerschnitte von trockener Luft und Helium bei 1 ata |
| 4 | Thermische Neutronenflußdichte in der Bildebene des Kollimators |
| 5 | Relative Vergrößerung von Objekten bei der Abbildung auf einer Konverterfolie |
| 6 | Geometrische Unschärfe U für einige Objektpunkt/Konverterabstände |
| 7 | Vergleich der Parameter und Bezugsgrößen in der Röntgentechnik und Neutronenradiographie |
| 8 | Werte zur Ermittlung der optimalen Konverterdicke |
| 9 | Werte zur Berechnung der Nettoschwärzung von Filmen durch verschiedene Konverter |
| 10 | Abschätzung der bei der Handhabung der Konverterfolien maximal zu erwartenden Strahlenbelastung |

11. Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung

- 1 Thermische Neutronenflußdichte im S0- und S4-Kanal der Thermischen Säule
- 2 Versuchsaufbau zur Neutronenradiographie am FR2
- 3 Kollimator
- 4 Skizze zur Berechnung der Neutronenflußdichte in der Bildebene
- 5 Skizze zur vergrößerten Abbildung bei neutronenradiographischen Aufnahmen
- 6 Skizze zur geometrischen Unschärfe bei neutronenradiographischen Aufnahmen
- 7 Gamma-Dosisleistung in 1 m Abstand von einem FR2-Brennelement als Funktion der Abschirmdicke
- 8a Nomogramm zur Ermittlung der spezifischen Aktivität von Dysprosium-Konvertern
- 8b Nomogramm zur Ermittlung der spezifischen Aktivitätsstundenzahl für Dysprosium-Konverter
- 9a Nomogramm zur Ermittlung der spezifischen Aktivität von Gold-Konvertern
- 9b Nomogramm zur Ermittlung der spezifischen Aktivitätsstundenzahl für Gold-Konverter
- 10a Nomogramm zur Ermittlung der spezifischen Aktivität von Indium-Konvertern
- 10b Nomogramm zur Ermittlung der spezifischen Aktivitätsstundenzahl für Indium-Konverter
- 11a Schwärzung von Structurix-D2-Filmen durch Dysprosium-Konverter als Funktion der spezifischen Aktivitätsstundenzahl
- 11b Schwärzung von Structurix-D7-Filmen durch Dysprosium-Konverter als Funktion der spezifischen Aktivitätsstundenzahl

- 11c Schwärzung von Osray-Filmen durch Dysprosium-Konverter als Funktion der spezifischen Aktivitätsstundenzahl
- 12a Schwärzung von Structurix-D2-Filmen durch Gold-Konverter als Funktion der spezifischen Aktivitätsstundenzahl
- 12b Schwärzung von Structurix-D7-Filmen durch Gold-Konverter als Funktion der spezifischen Aktivitätsstundenzahl
- 12c Schwärzung von Osray-Filmen durch Gold-Konverter als Funktion der spezifischen Aktivitätsstundenzahl
- 13a Schwärzung von Structurix-D2-Filmen durch Indium-Konverter als Funktion der spezifischen Aktivitätsstundenzahl
- 13b Schwärzung von Structurix-D7-Filmen durch Indium-Konverter als Funktion der spezifischen Aktivitätsstundenzahl
- 13c Schwärzung von Osray-Filmen durch Indium-Konverter als Funktion der spezifischen Aktivitätsstundenzahl
- 14 Nomogramm zur Bestimmung des geringsten Zeitaufwandes zur Herstellung einer Neutronenradiographie mit einem Dysprosium-Konverter
- 15 Nomogramm zur Bestimmung des geringsten Zeitaufwandes zur Herstellung einer Neutronenradiographie mit einem Gold-Konverter
- 16 Nomogramm zur Bestimmung des geringsten Zeitaufwandes zur Herstellung einer Neutronenradiographie mit einem Indium-Konverter
- 17 Materialfaktor als Funktion der Materialdicke
- 18 Relative Schwärzung als Funktion der mittleren Entwicklertemperatur
- 19 Filmschwärzung als Funktion der Dicke von Dysprosium-Konvertern

- 20 Filmschwärzung als Funktion der Dicke von Gold-Konvertern
- 21 Filmschwärzung als Funktion der Dicke von Indium-Konvertern
- 22 Gerechnete und gemessene normierte Filmschwärzung als Funktion der Dicke verschiedener Konverter
- 23 Für $S_{\text{Netto}} = 2$ erforderliche spezifische Aktivitätsstundenzahl als Funktion der Dicke von Dysprosium-Konvertern
- 24 Für $S_{\text{Netto}} = 2$ erforderliche spezifische Aktivitätsstundenzahl als Funktion der Dicke von Gold-Konvertern
- 25 Für $S_{\text{Netto}} = 2$ erforderliche spezifische Aktivitätsstundenzahl als Funktion der Dicke von Indium-Konvertern
- 26 Auf Gold bezogene Empfindlichkeit von Indium-Konvertern als Funktion der Bestrahlungs- und Belichtungszeit
- 27 Auf Gold bezogene Empfindlichkeit von Dysprosium-Konvertern als Funktion der Bestrahlungs- und Belichtungszeit
- 28a-c Neutronenradiographie einer Kadmium-Lochblende
- 29a,b Neutronenradiographie eines Testobjektes mit geplatzttem Uranstabcan
- 30a,b Röntgenaufnahmen eines Testobjektes mit geplatzttem Uranstabcan
- 31 Betatronaufnahme eines Testobjektes mit geplatzttem Uranstabcan
- 32a,b Neutronenradiographie eines Testprojektes mit abgesetztem Uranstabcan
- 33a,b Röntgenaufnahmen eines Testobjektes mit abgesetztem Uranstabcan

- 34a,b Röntgen- und Betatron-Aufnahme eines Testobjektes mit abgesetztem Uranstabcan
- 35a Neutronenradiographie von Objekten mit unterschiedlichem Strukturmaterial
- 35b Röntgenaufnahme von Objekten mit unterschiedlichem Strukturmaterial
- 36a Neutronenradiographie eines bornitridisolierten Heizleiters
- 36b Röntgenaufnahme eines bornitridisolierten Heizleiters
- 37a,b Neutronenradiographie eines kadmierten Gasführungsrohres des Projektes FR2/26

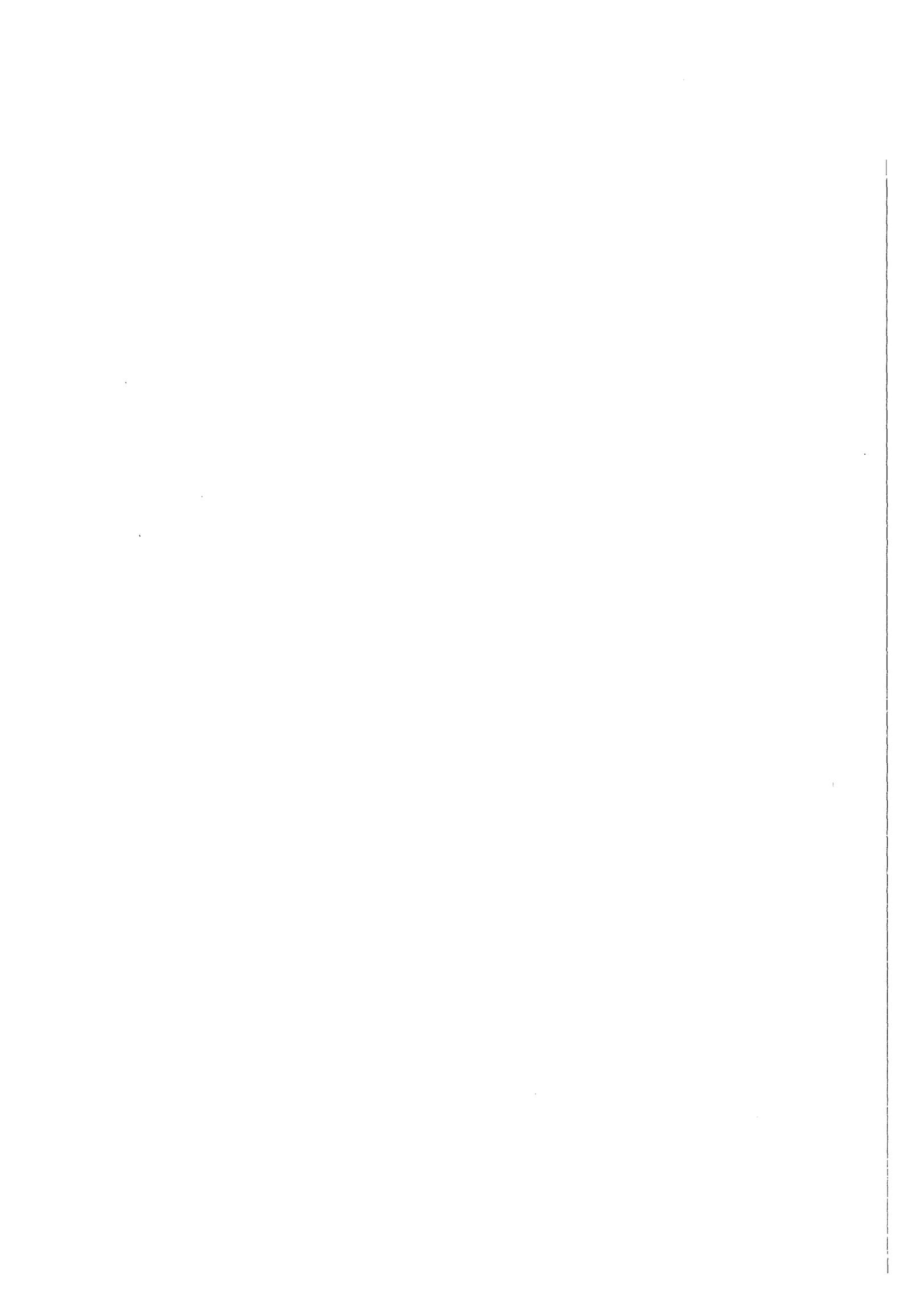


Tabelle 1

Abmessung und Lage der S-Kanäle

Kanal	Soll-Höhe der Kanal- achse ü. Hallenboden [mm]	Höhe d. Kanals [mm]	Breite d. Kanals [mm]
S0	1468	596	400
S1	920	100	100
S2	920	100	100
S3	970	200	200
S4	970	200	200

Die Kanäle S1/S2 und S3/S4 liegen mit einem gegenseitigen Achsabstand von 300 bzw. 800 mm symmetrisch zum S0-Kanal.

Tabelle 2

Kollimatordaten

Blende	Durchmesser der Eintrittsöffnung	Kollimator- länge L	Kollimations- verhältnis $K=d_n/L$
4	$d_4 = 103,8 \text{ mm}$	4425 mm	1 : 42,6
3	$d_3 = 41,5 \text{ mm}$		1 : 106,7
2	$d_2 = 21,5 \text{ mm}$		1 : 206,0
1	$d_1 = 10,0 \text{ mm}$		1 : 442,5

Tabelle 3

Totale Wirkungsquerschnitte von trockener Luft
und Helium bei 1 ata

Neutronenenergie E [eV]	$\Sigma_{tG} [10^{-4} \text{ cm}^{-1}]$	
	Luft	Helium
0,005	8,92	
0,01	6,87	
0,03	5,76	0,209
0,05	5,52	0,214
0,10	5,20	0,220

Tabelle 4

Thermische Neutronenflußdichten in der
Bildebene des Kollimators

Blende	Kollimations- verhältnis K	$\phi_{th} [1/cm^2sec]$ Stirnfl. SO- Kanal	$\phi_a [1/cm^2sec]$ gerechnet	$\phi_a [1/cm^2sec]$ gemessen
4	1 : 42,6	$2,4 \cdot 10^{11}$	$6,3 \cdot 10^6$	$5,55 \cdot 10^6$
3	1 : 106,7		$1,0 \cdot 10^6$	$8,9 \cdot 10^5$
2	1 : 206,0		$2,69 \cdot 10^5$	$2,46 \cdot 10^5$
1	1 : 442,5		$5,82 \cdot 10^4$	$6,5 \cdot 10^4$

Tabelle 5

Relative Vergrößerung von Objekten bei
der Abbildung auf einer Konverterfolie

Abstand Objekt/Konverter $s_o [mm]$	relative Vergrößerung der Abbildung $V_R [\%]$
5	0,106
10	0,213
15	0,32
25	0,532
50	1,06
100	2,13
150	3,19
200	4,25
300	6,38

Quelle/Objekt-Abstand $L' = 4700 \text{ mm}$

Tabelle 6

Geometrische Unschärfe U für einige Objektpunkt/Konverter-
Abstände

Blende	Kollimations- verhältnis K	Objekt/Konverter- Abstand s_o [mm]	Geometrische Un- schärfe U [mm]
4	1 : 42,6	10	0,235
		25	0,587
		50	1,173
		100	2,35
3	1 : 106,7	10	0,0938
		25	0,234
		50	0,469
		100	0,938
2	1 : 206,0	10	0,463
		25	0,116
		50	0,232
		100	0,463
1	1 : 442,5	10	0,0226
		25	0,0565
		50	0,113
		100	0,226

Tabelle 7

Vergleich der Parameter und Bezugsgrößen in der Röntgentechnik und Neutronenradiographie

	Parameter		Bezugsgröße		Zeitintegral der Strahlungsleistung Dimension
	Bezeichnung	Dimension	Bezeichnung	Dimension	
Röntgentechnik	Röhrenspannung	V	Milliampere-minuten	mA · min	V · A · sec = Wsec
Neutronenradiographie	Strahlenenergie der vorgegebenen Konverterfolie	MeV \cong Wsec	Aktivitätsstundenzahl	$\mu\text{C} \cdot \text{h} \cong$ $\frac{1}{\text{sec}} \cdot \text{sec}$	Wsec · $\frac{1}{\text{sec}} \cdot \text{sec} =$ Wsec

Tabelle 8

Werte zur Ermittlung der optimalen Konverterdicke

(siehe Abschnitt 5.8)

Konverter	$\rho \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$	$\Sigma_t \text{ [cm}^{-1}\text{]}$	$E_{\beta \text{ max } i} \text{ [MeV]}$	$Z_i \text{ [cm}^{-1}\text{]}$	$d_{\text{opt}} \text{ [}\mu\text{]}$
Dy	8,56	28,9	1,3	133	185
In	7,28	7,75	1,0	160	179
Au	19,32	5,84	0,962	445	66,5

Tabelle 9

Werte zur Berechnung der Nettoschwärzung von Filmen durch verschiedene Konverter (zu Abschnitt 5.3)

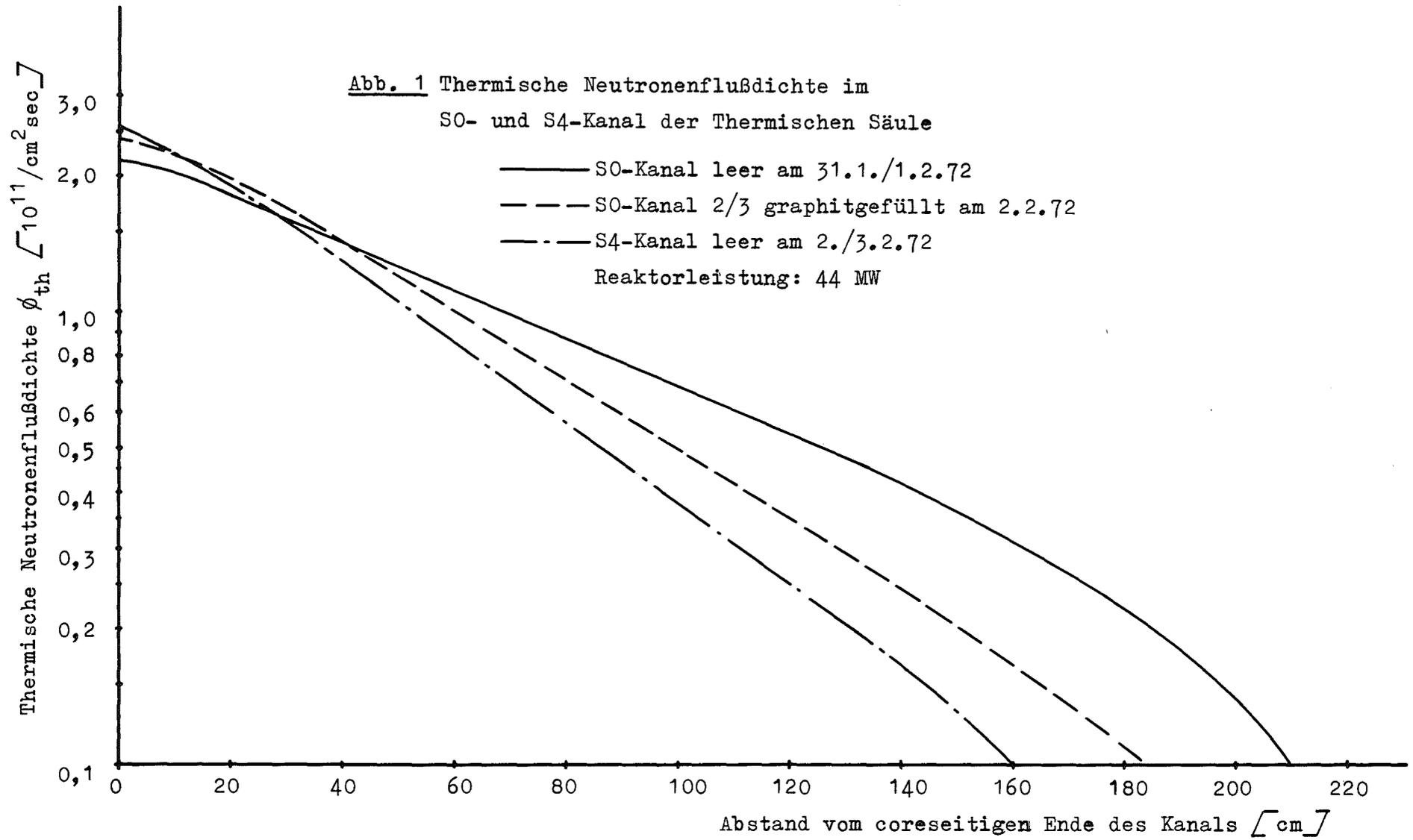
Konverter	Film	Exponent α	Koeffizienten		
			a	b	c
Dysprosium	D 2	1,118	0,653	0,0087	$- 1,85 \cdot 10^{-5}$
	D 7	1,1055	13,77	0,1419	$- 2,8 \cdot 10^{-4}$
	Osray	0,82	17,04	0,3568	$- 5,3 \cdot 10^{-4}$
Gold	D 2	0,973	0,399	0,0022	$- 8,3 \cdot 10^{-6}$
	D 7	0,889	5,33	0,0684	$- 4,6 \cdot 10^{-4}$
	Osray	0,828	12,68	0,188	$- 1,07 \cdot 10^{-3}$
Indium	D 2	1,363	0,856	$- 0,00454$	$1,44 \cdot 10^{-5}$
	D 7	0,907	12,93	$- 0,0129$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
	Osray	0,883	39,72	$- 0,00984$	$3,5 \cdot 10^{-4}$

Bei Verwendung der hier angegebenen Werte für die Exponenten und Koeffizienten in den Gl. (18), (20) und (21) ist E_{spez} in $\left[\frac{\mu\text{C} \cdot \text{h}}{\text{cm}^2} \right]$ und d in $[\mu\text{m}]$ einzusetzen.

Tabelle 10

Abschätzung der bei der Handhabung der Konverterfolien maximal zu erwartenden Strahlenbelastung

Konverter	Konverter- dicke	maximale realistische Bestrahlungs- zeit	$A'_{\text{spez}} \left[\frac{\mu\text{C}}{\text{cm}^2} \right]$ bei $\phi_a = 5,5 \cdot 10^6 / \text{cm}^2 \text{sec}$	Dosiskonstante K_γ $[\text{R} \cdot \text{cm}^2 / (\text{h} \cdot \mu\text{C})]$	$\beta \left[\text{R} / \mu\text{C} \right]$ bei $r = 50 \text{ cm}$ $t_a = 10 \text{ min}$	$D_\gamma \text{ spez}$ $[\text{R} / \text{cm}^2]$	$D_\gamma \text{ Folie} \text{ [mR]}$ bei 240 cm^2
Dy	270 μ	5 h	50	$1,47 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-8}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	1,18
In	220 μ	2 h	13	$13,53 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^{-7}$	$1,17 \cdot 10^{-5}$	2,81
Au	100 μ	8 h	0,7	$2,44 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$1,12 \cdot 10^{-7}$	0,269



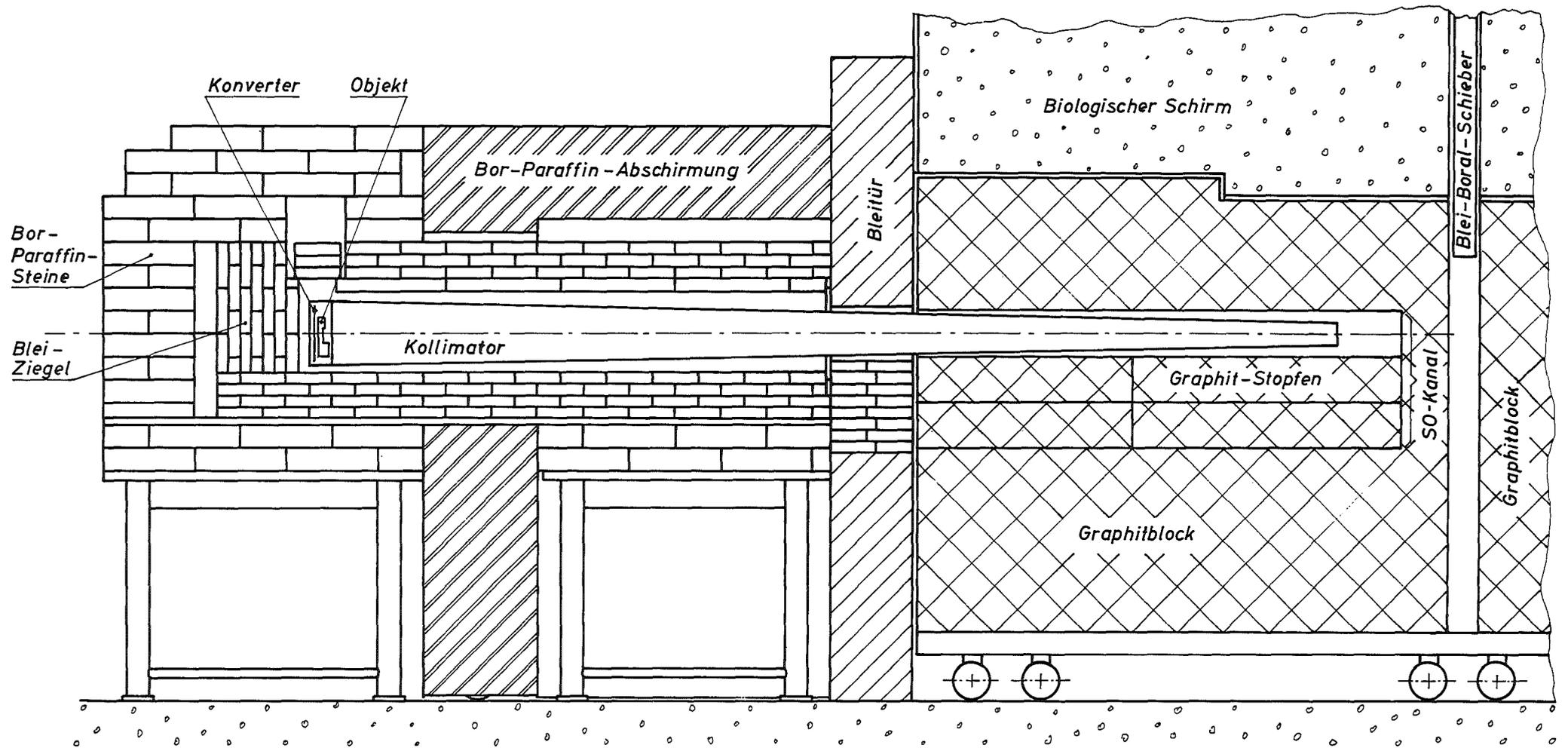
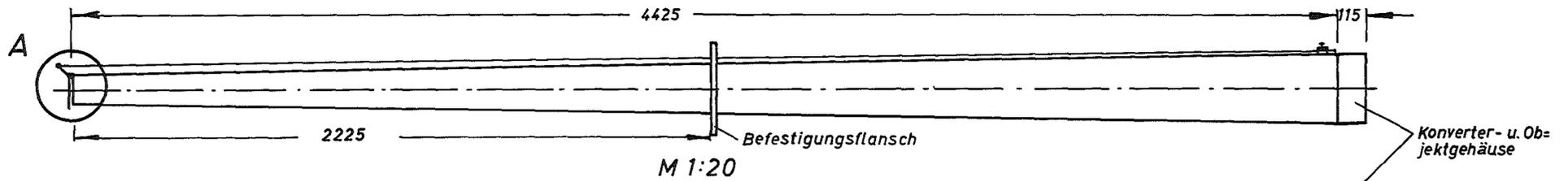


Abb.2 Versuchsaufbau zur Neutronenradiographie am FR2



Detail A

Schnitt B-B

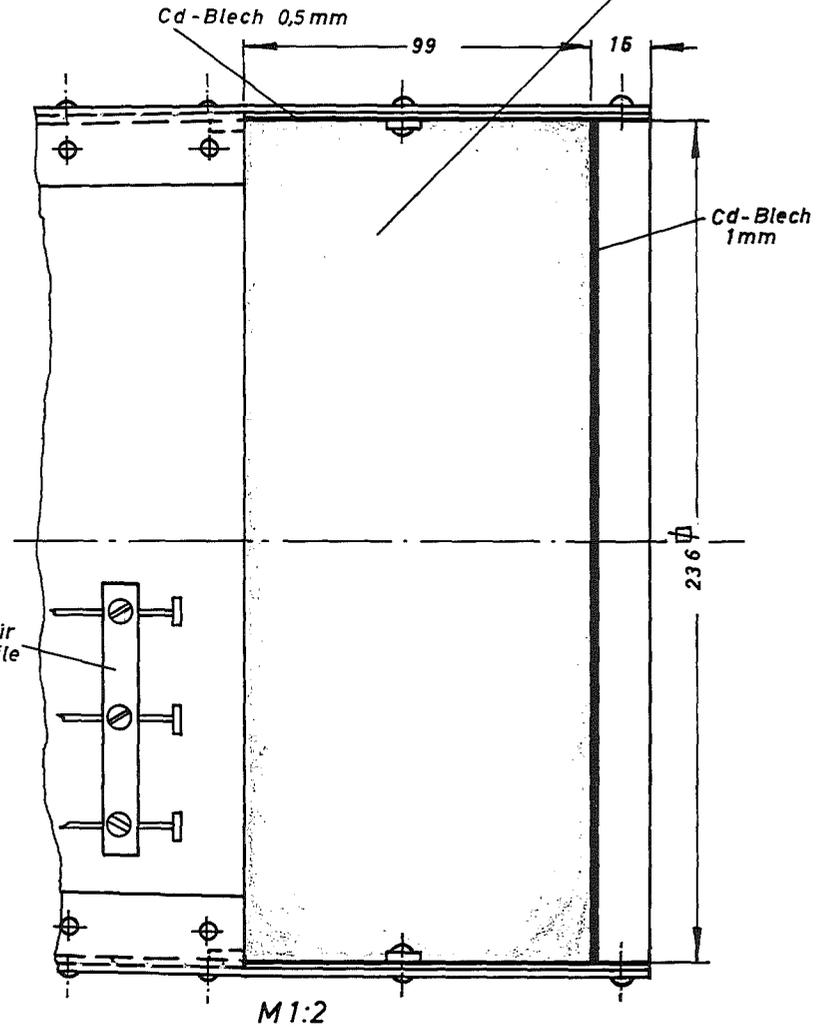
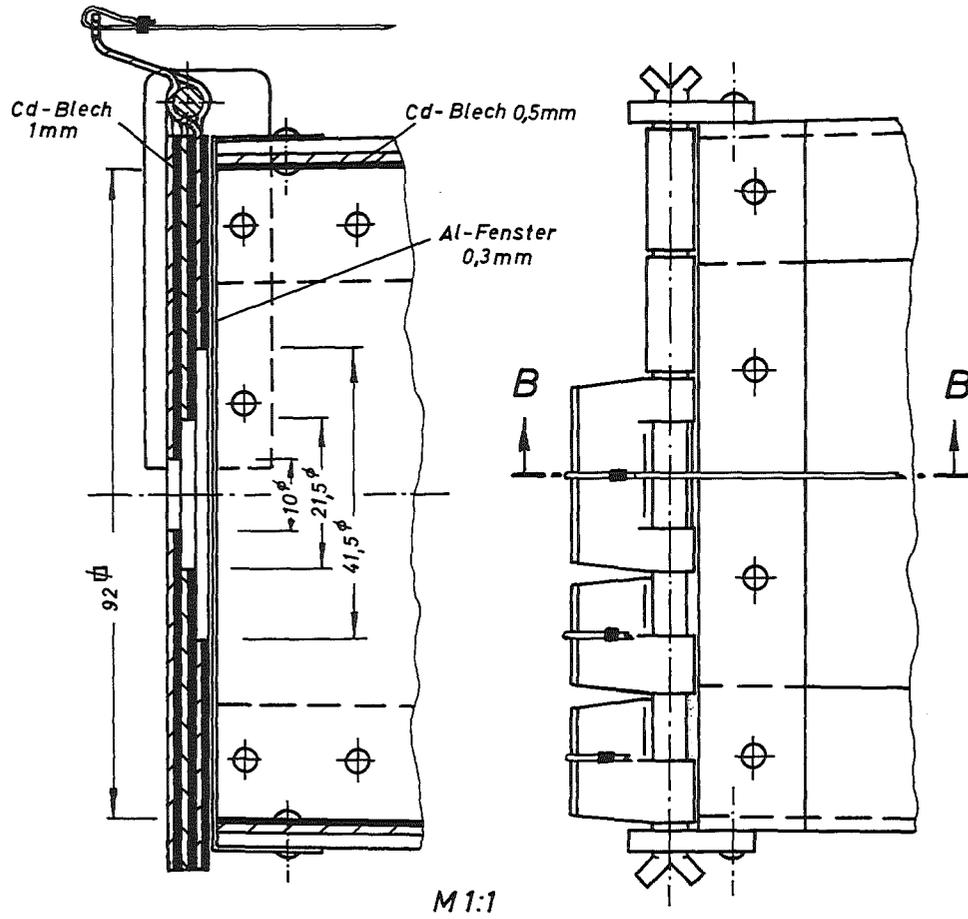


Abb. 3: Kollimator

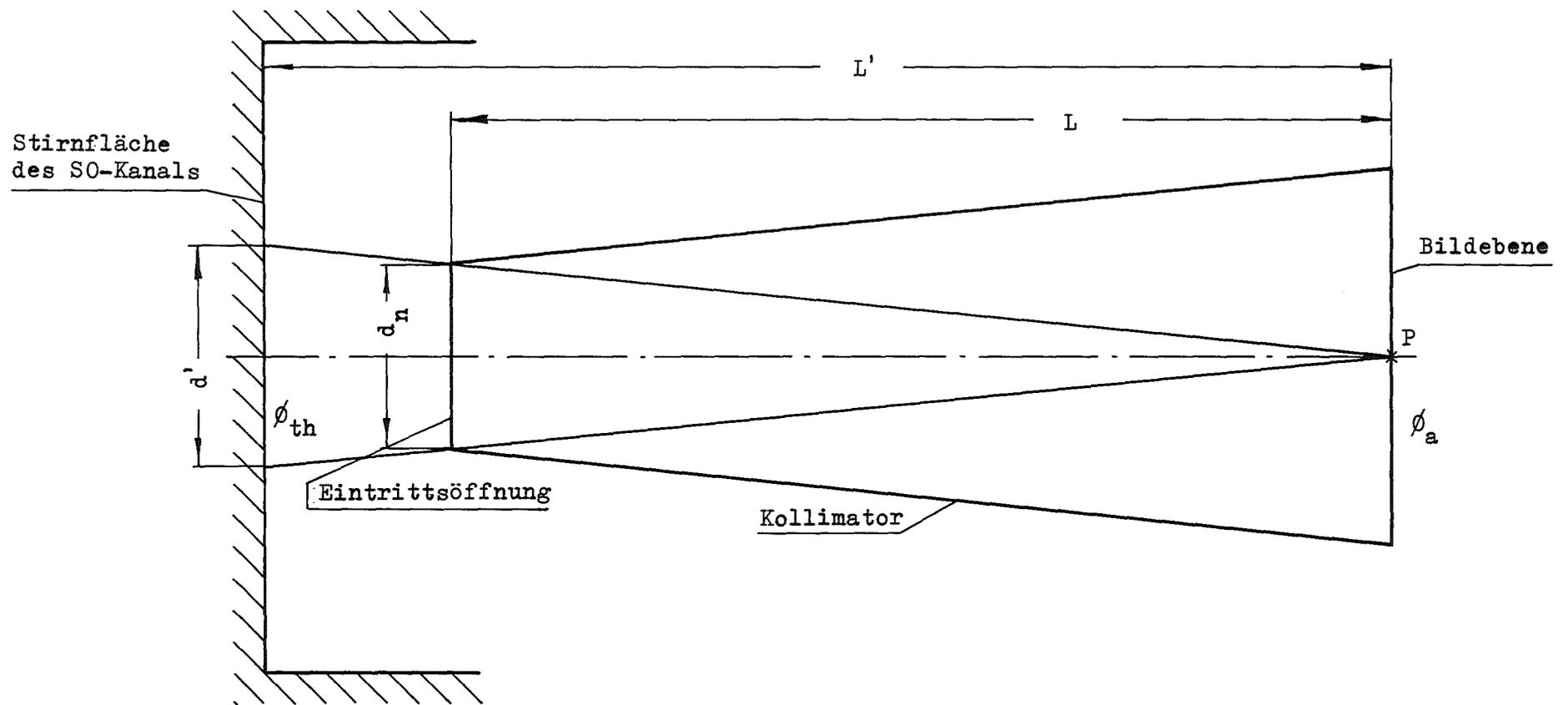


Abb. 4 Skizze zur Berechnung der Neutronenflußdichte in der Bildebene

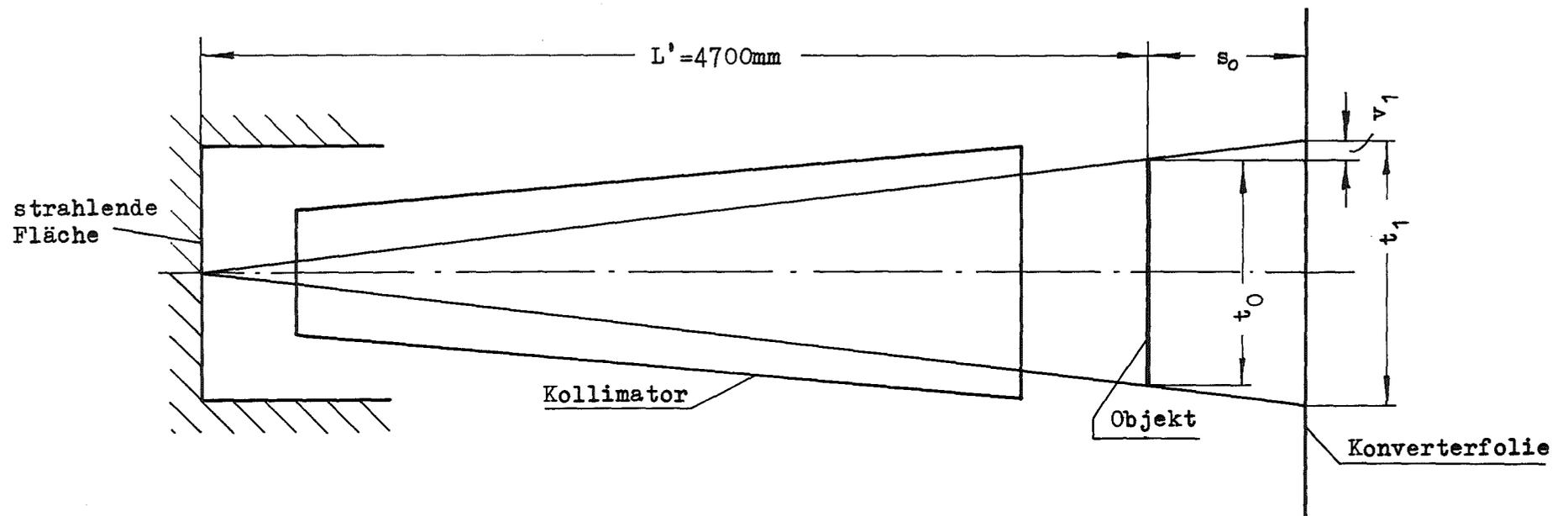


Abb. 5 Skizze zur vergrößerten Abbildung bei
 neutronenradiographischen Aufnahmen

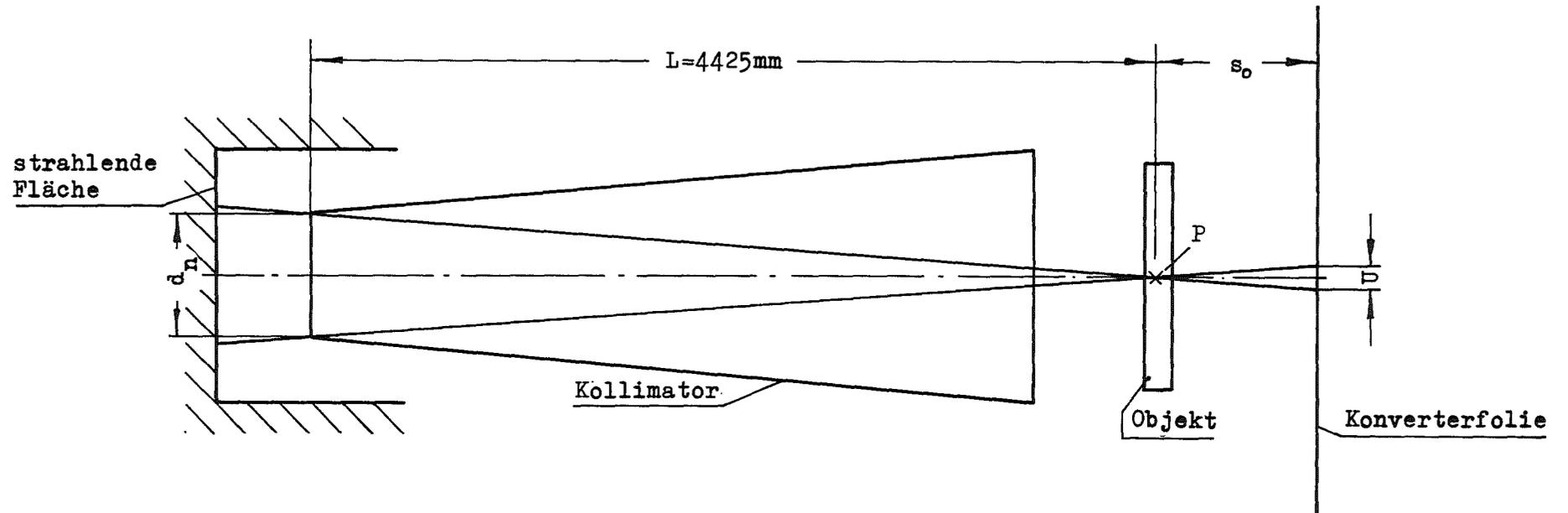


Abb. 6 Skizze zur geometrischen Unschärfe bei neutronenradiographischen Aufnahmen

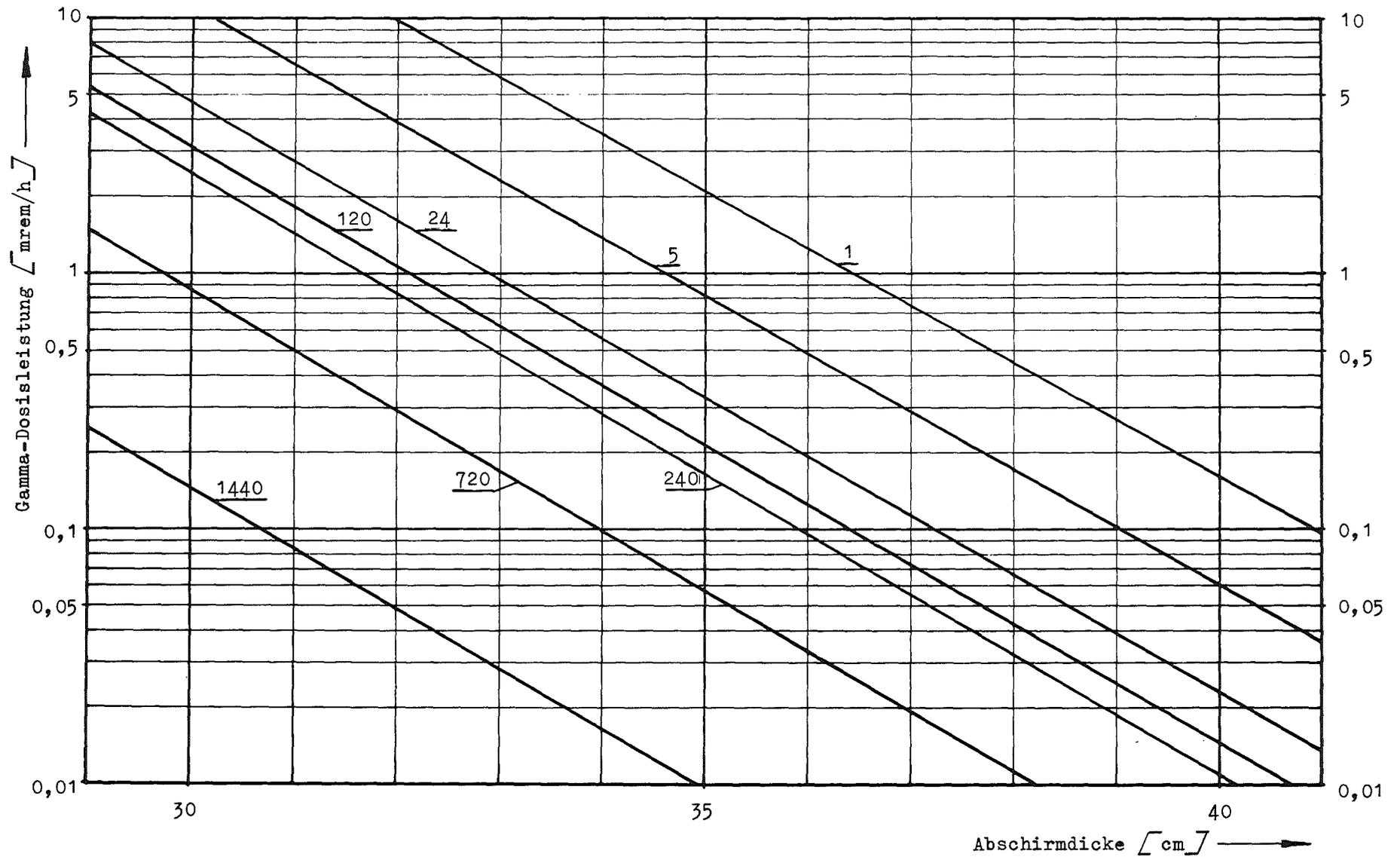
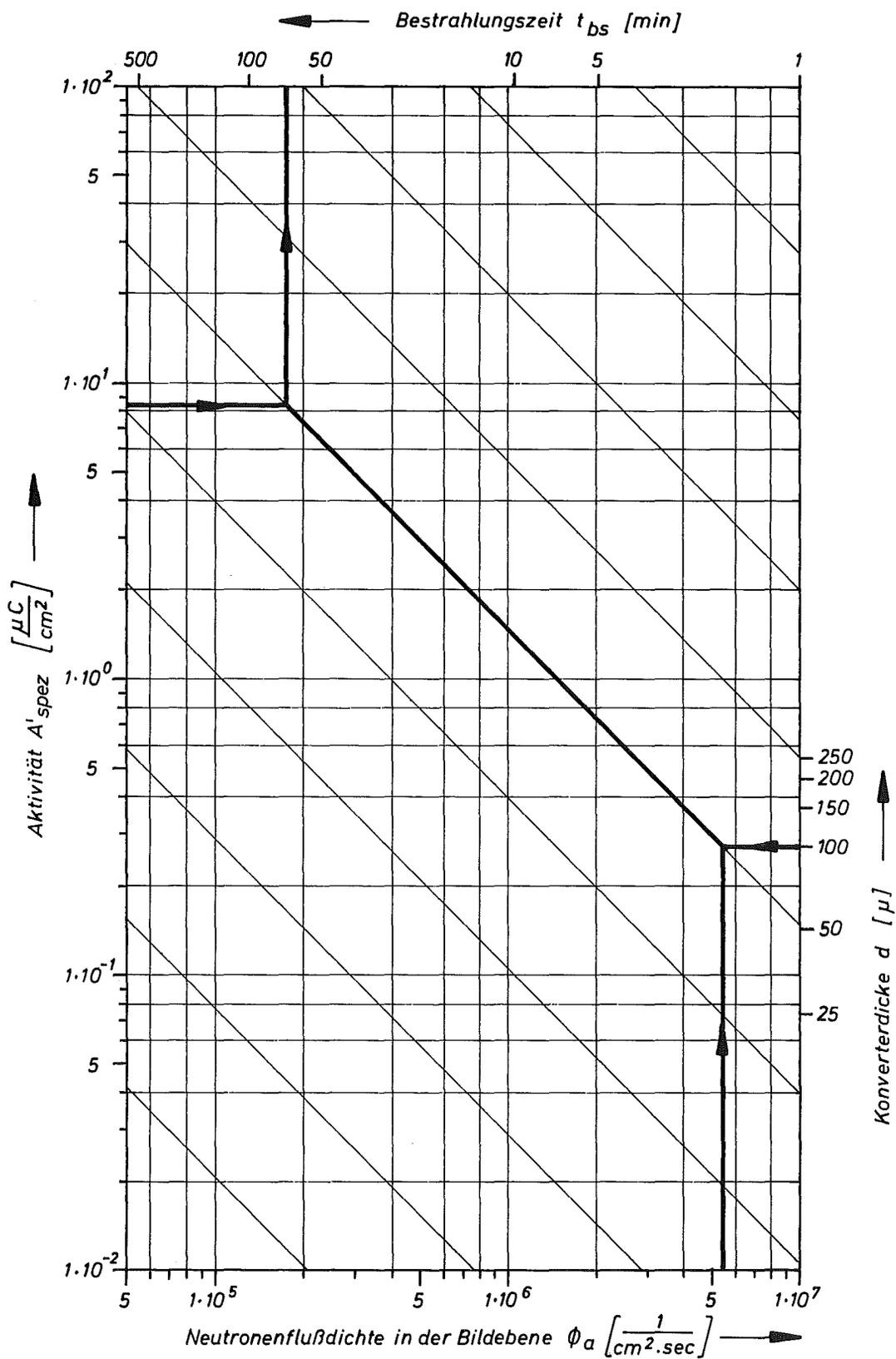
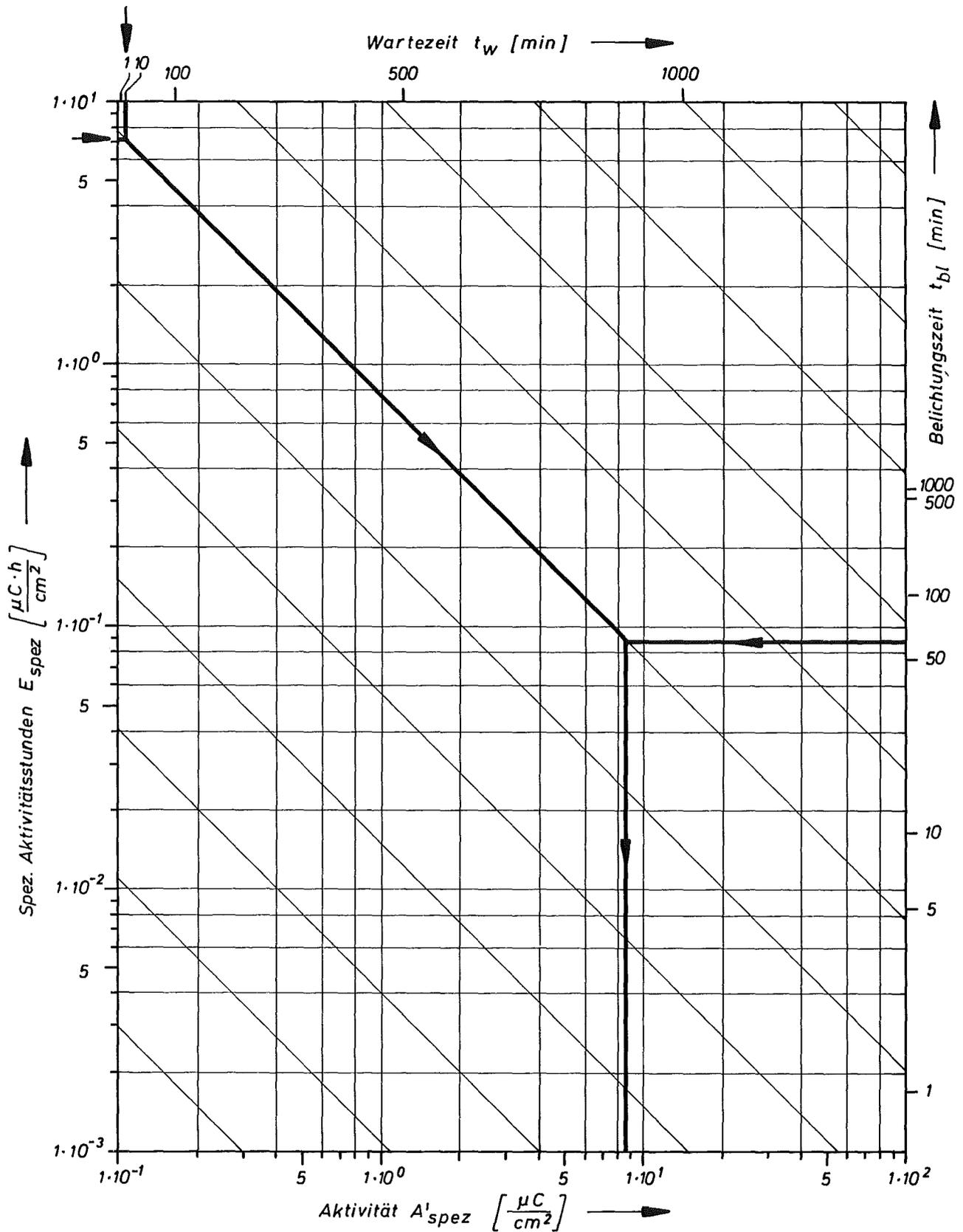


Abb. 7 Gamma-Dosisleistung in 1m Abstand von einem FR2-Brennelement als Funktion der Abschirmdicke
 Abschirmmaterial : Blei Vertikaler Formfaktor der Be-Leistung: 1,3
 Be-Betriebsleistung: 400 kW Parameter der Kurven: Lagerzeit des Brennelementes in [h]



Eingezeichnetes Beispiel : Gegeben : $\Phi_a = 5,5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
 $d = 100 \mu$
 $A'_{\text{spez}} = 8,4 \mu\text{C/cm}^2$
 Gesucht : Bestrahlungszeit t_{bs}

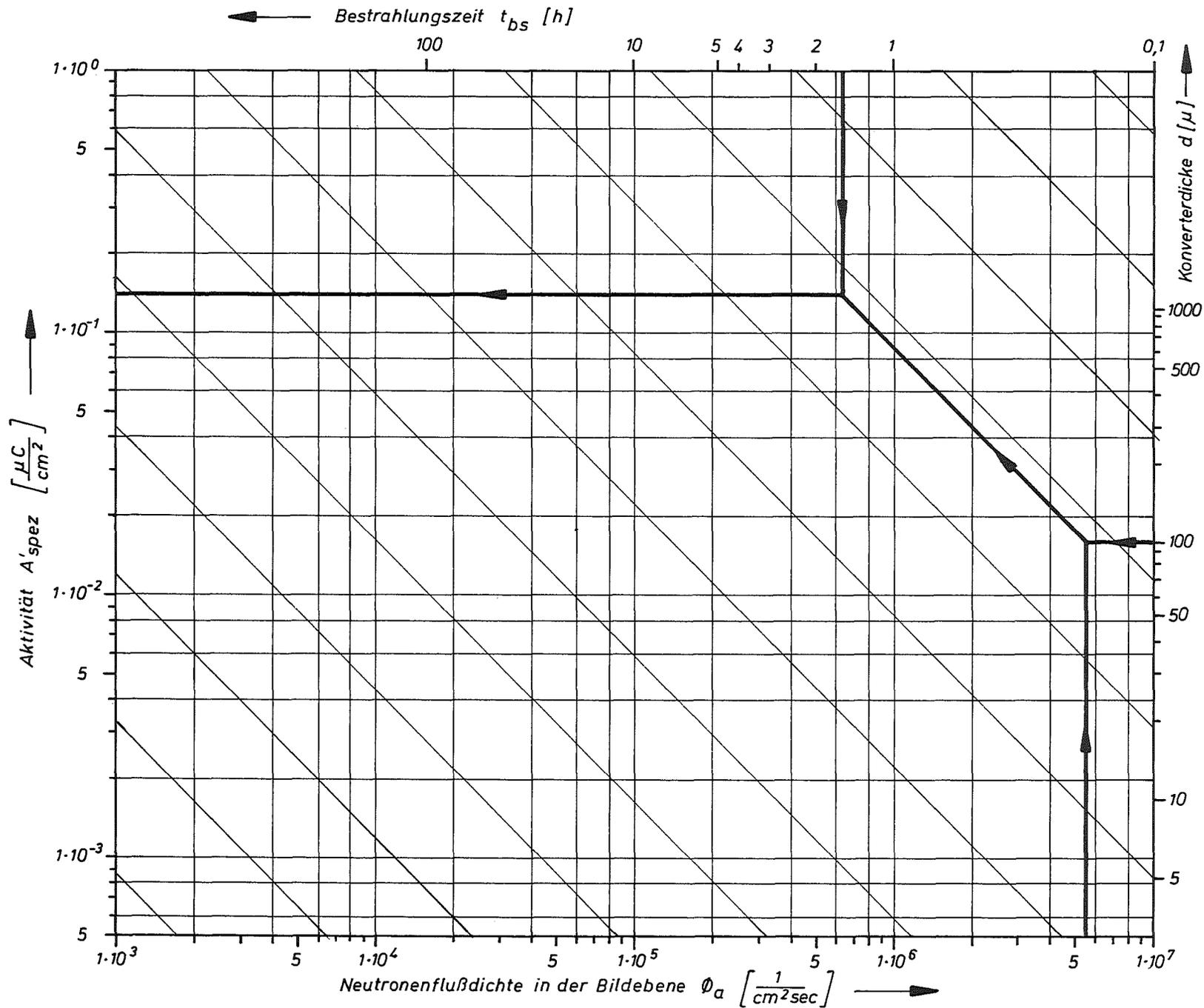
Abb. 8a Nomogramm zur Ermittlung der spezif. Aktivität von Dysprosium - Konvertern



Eingezeichnetes Beispiel: Gegeben : $t_{bl} = 60 \text{ min}$
 $t_w = 10 \text{ min}$
 $E_{spez} = 7 \mu\text{C}\cdot\text{h}/\text{cm}^2$

Gesucht : erforderliche spez. Folienaktivität A'_{spez}

Abb. 8 b Nomogramm zur Ermittlung der spezifischen Aktivitätsstundenzahl für Dysprosium - Konverter



Eingezeichnetes Beispiel :

Gegeben :

$$\phi_a = 5,5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

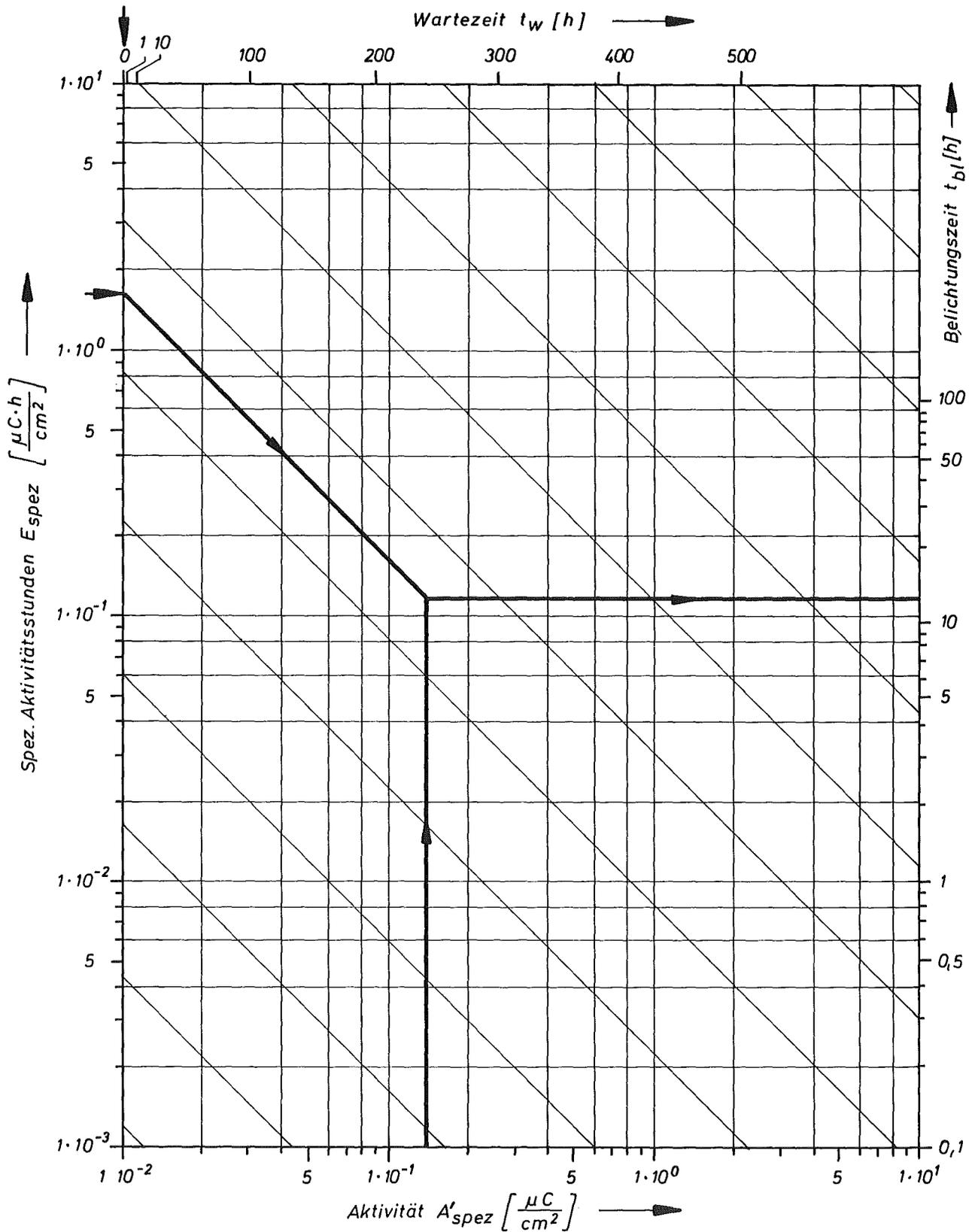
$$d = 100 \mu$$

$$t_{bs} = 100 \text{ min} \approx 1,7 \text{ h}$$

Gesucht : A'_{spez}

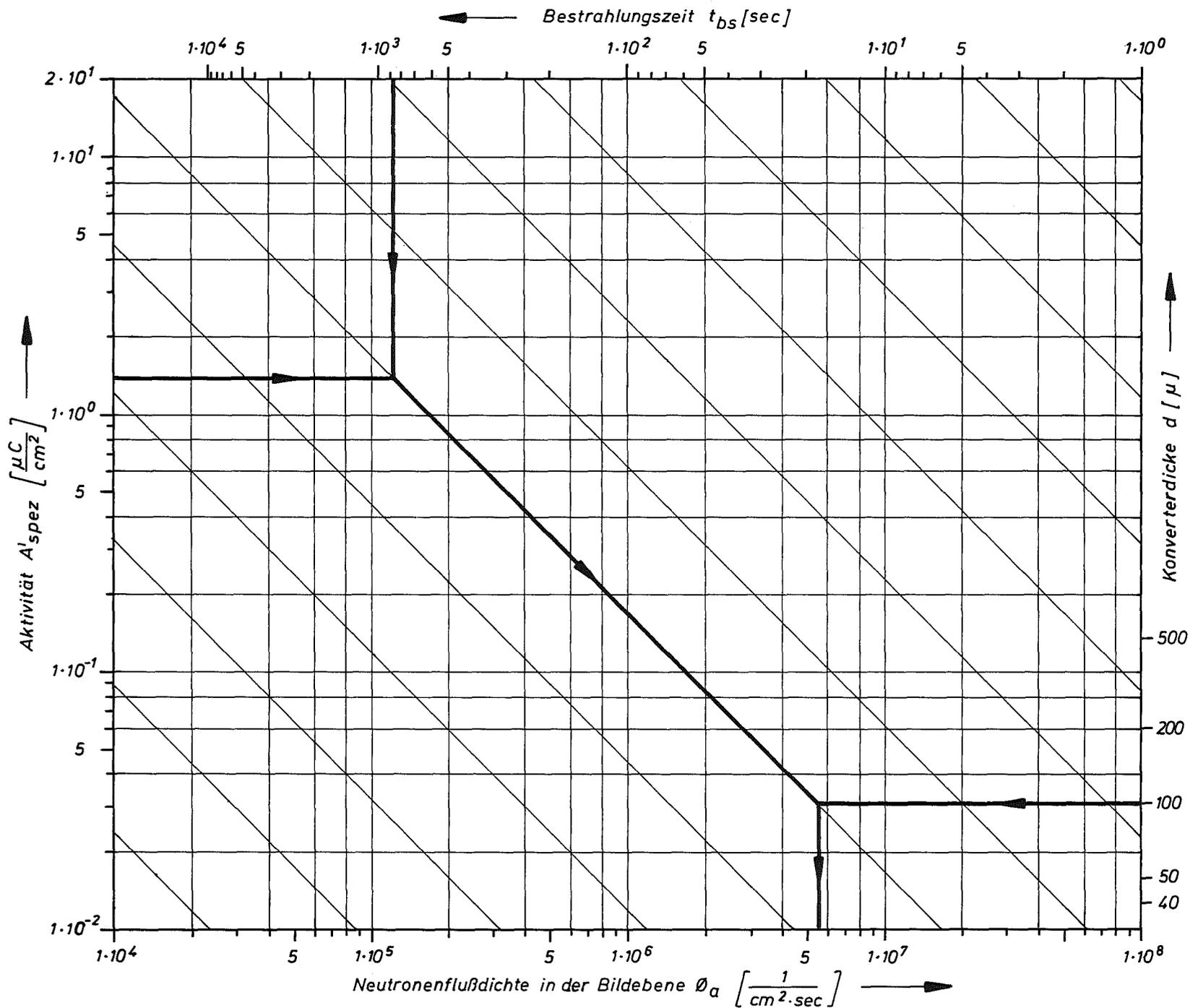
Abb. 9a

Nomogramm zur Ermittlung der spezifischen Aktivität von Gold-Konvertern



Eingezeichnetes Beispiel : Gegeben : $E_{spez} = 1,7 \mu\text{C}\cdot\text{h}/\text{cm}^2$
 $t_w = 0$
 $A'_{spez} = 1,4 \cdot 10^{-1} \mu\text{C}/\text{cm}^2$
 Gesucht : Belichtungszeit t_{bl}

Abb. 9 b Nomogramm zur Ermittlung der spezif. Aktivitätsstunden-
 zahl für Gold-Konverter



Eingezeichnetes Beispiel :

Gegeben :

$$A'_{\text{spez}} = 1,4 \mu\text{C}/\text{cm}^2$$

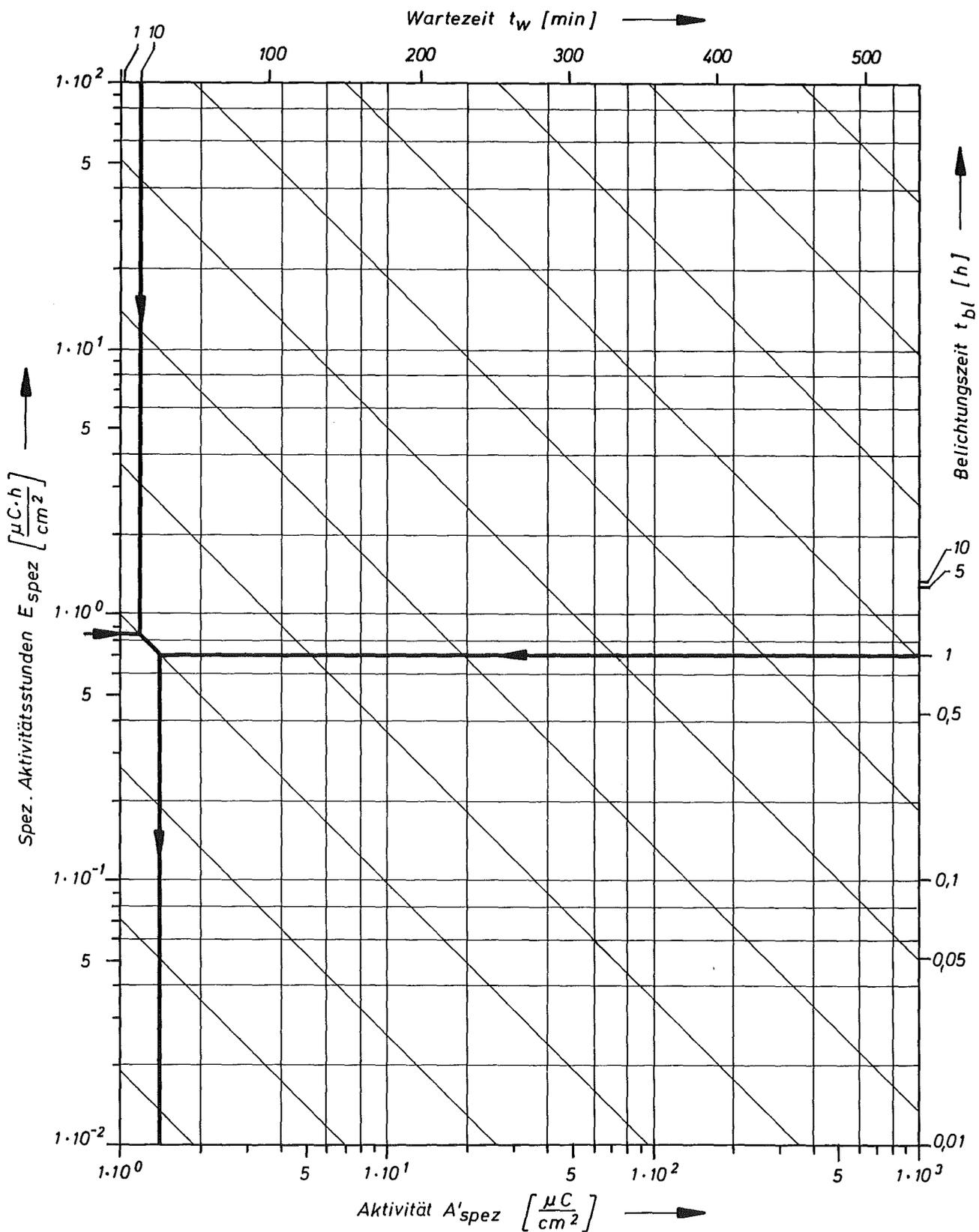
$$t_{\text{bs}} = 2,5 \text{ h}$$

$$d = 100 \mu$$

Gesucht : erforderliche
Flußdichte ϕ_a

Abb. 10 a

Nomogramm
zur Ermittlung der
spezifischen Aktivität
von Indium-Konvertern



Eingezeichnetes Beispiel : Gegeben : $t_w = 10$ min
 $E_{spez} = 0,86 \mu\text{C}\cdot\text{h}/\text{cm}^2$
 $t_{bl} = 1$ h

Gesucht : erforderliche Folienaktivität

Abb. 10 b Nomogramm zur Ermittlung der spezif. Aktivitätsstundenzahl für Indium - Konverter

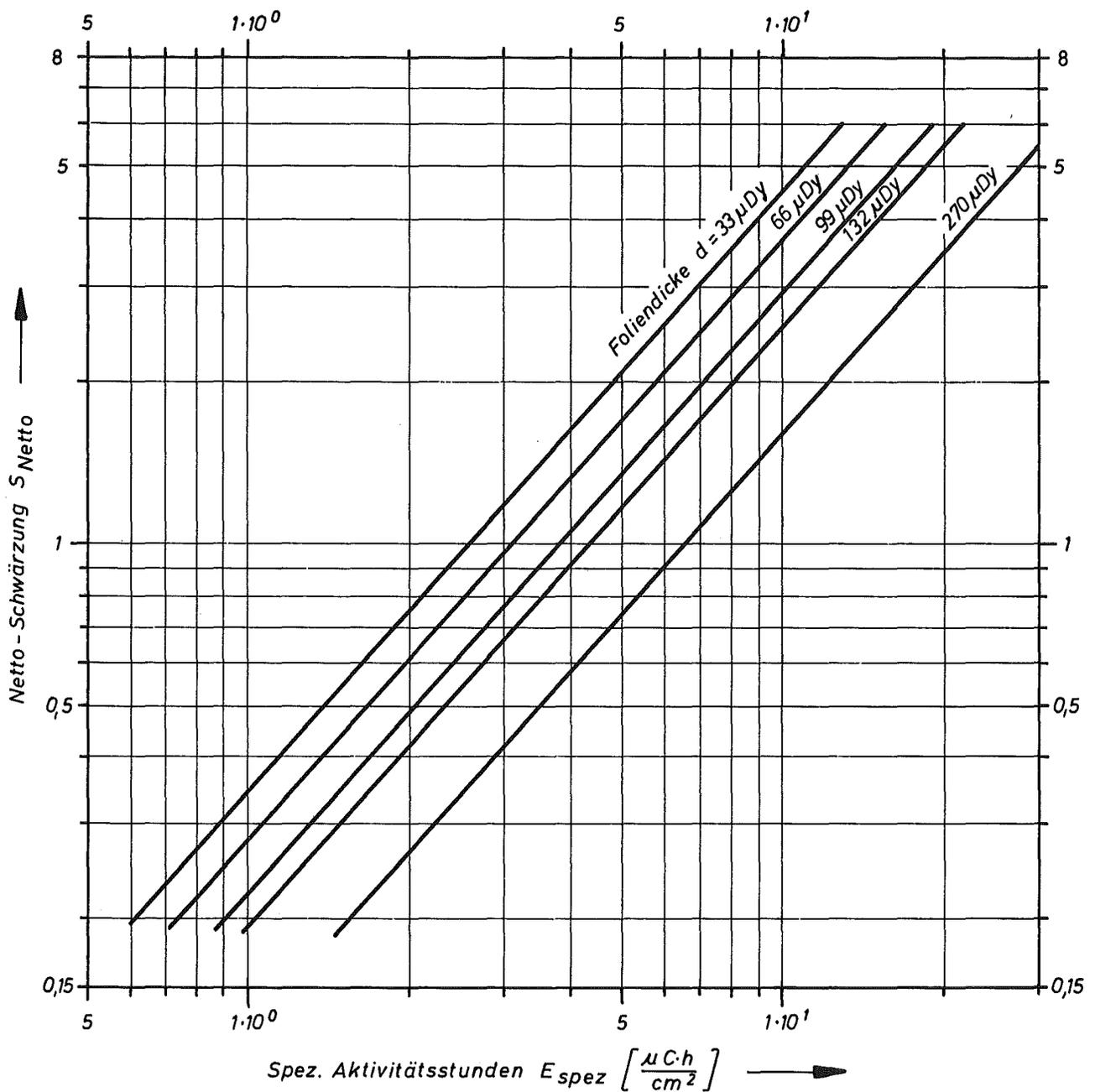


Abb. 11a Schwärzung von Structurix-D2-Filmen durch Dysprosium-Konverter als Funktion der spezif. Aktivitätsstundenzahl

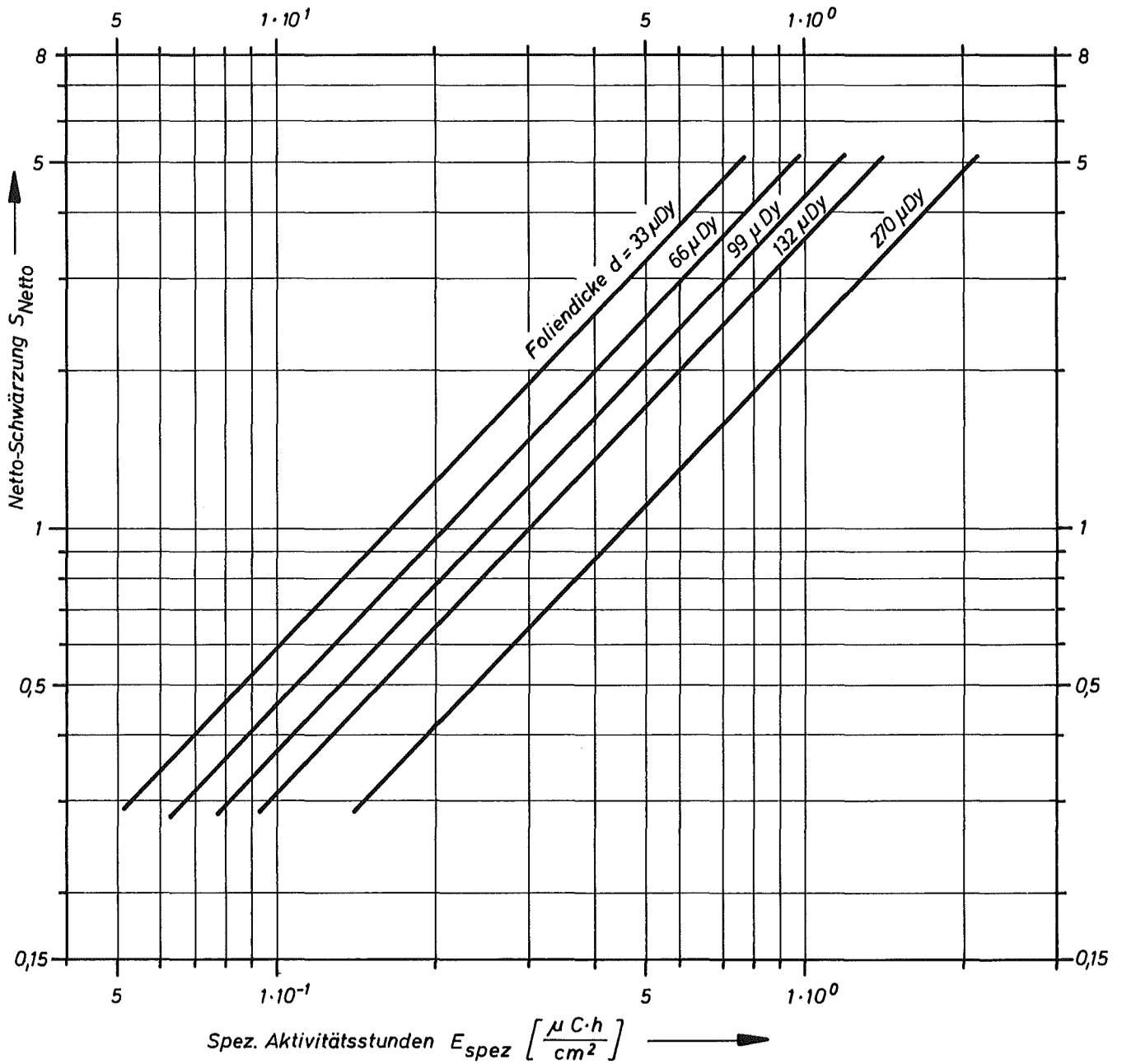


Abb. 11 b Schwärzung von Structurix - D7-Filmen durch Dysprosium-Konverter als Funktion der spez. Aktivitätsstundenzahl

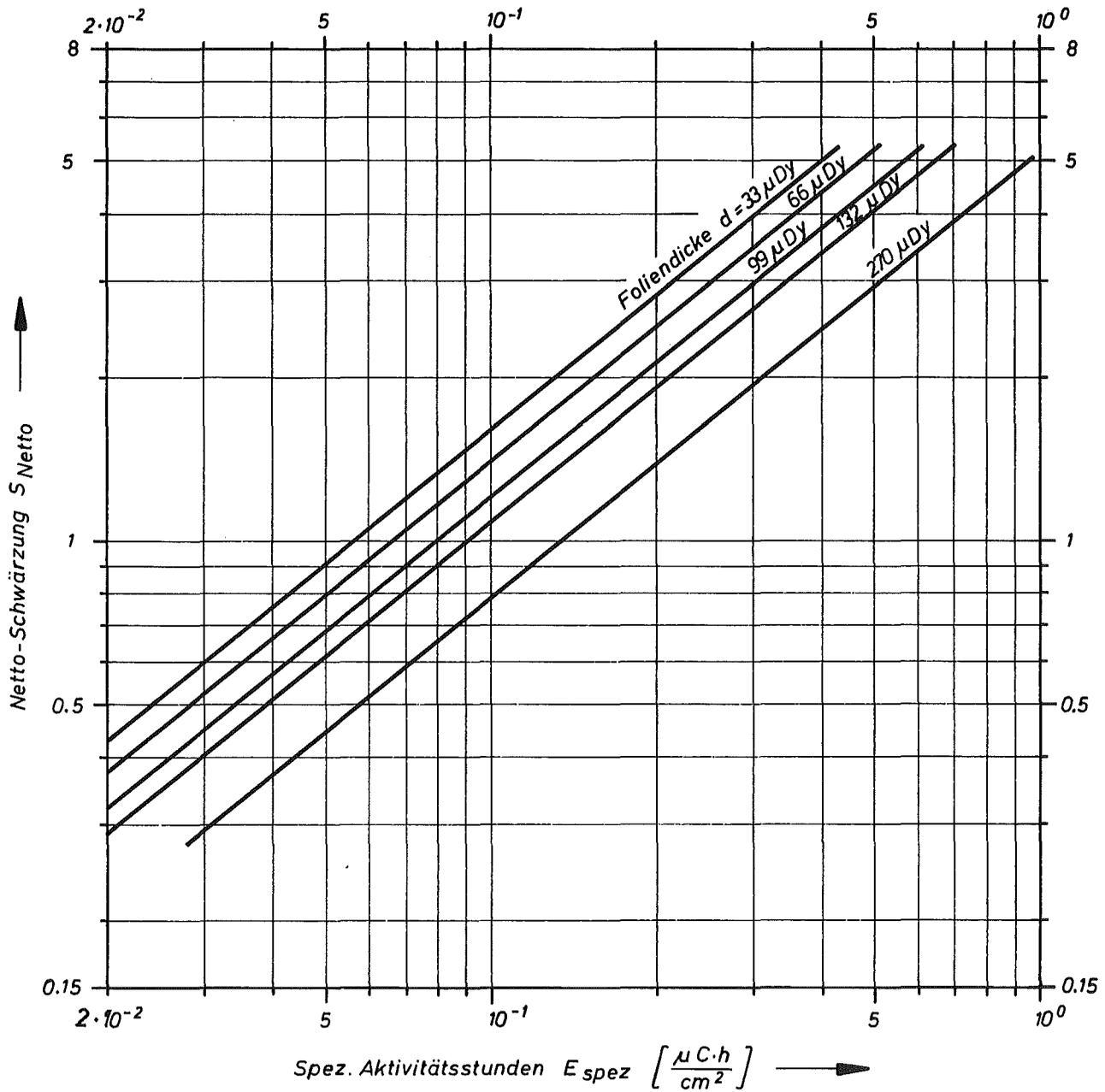


Abb. 11c Schwärzung von Osray-Filmen durch Dysprosium -
 Konverter als Funktion der spez. Aktivitätsstundenzahl

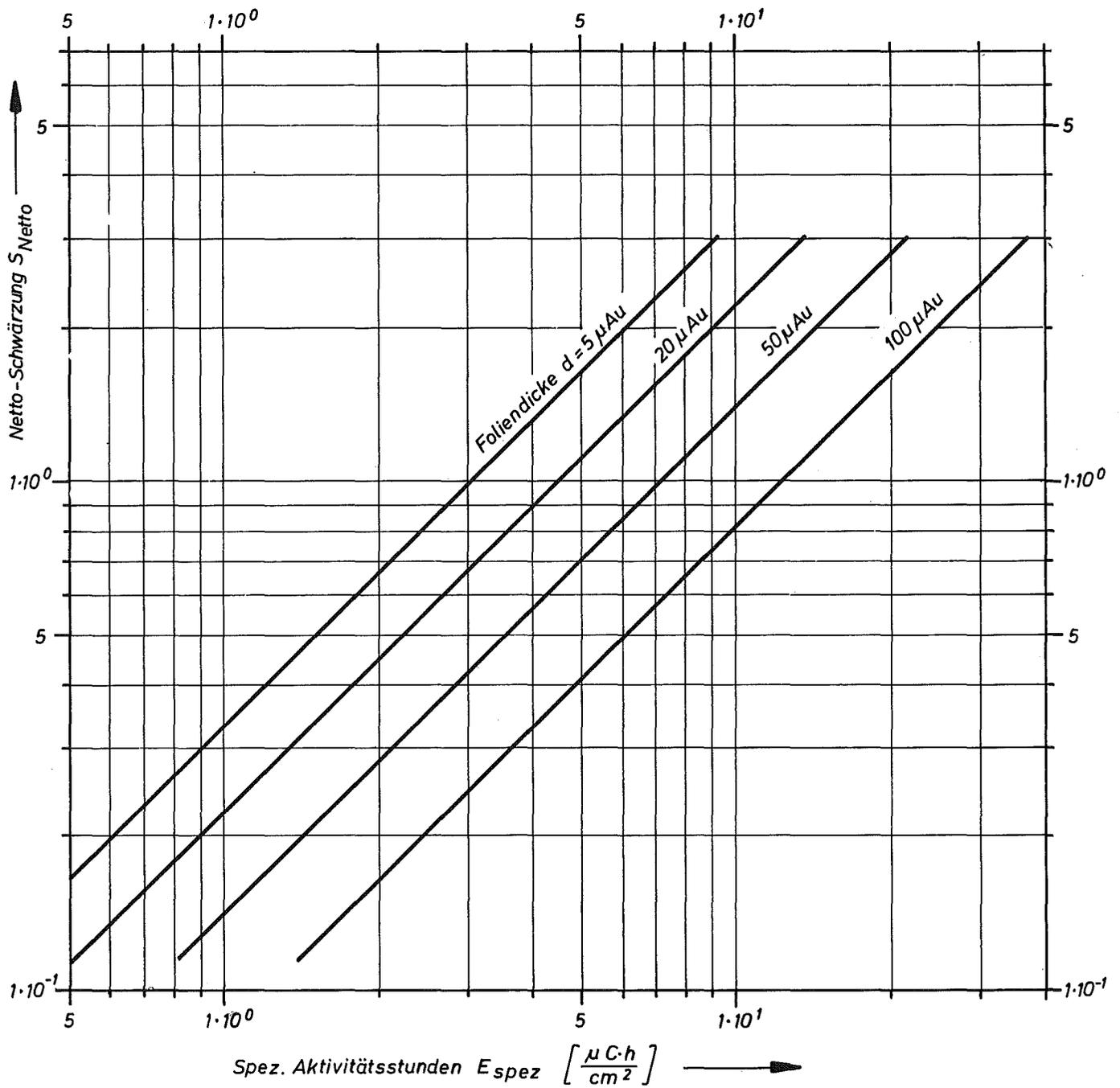


Abb. 12a Schwärzung von Structurix - D2-Filmen durch Gold-Konverter als Funktion der spez. Aktivitätsstundenzahl

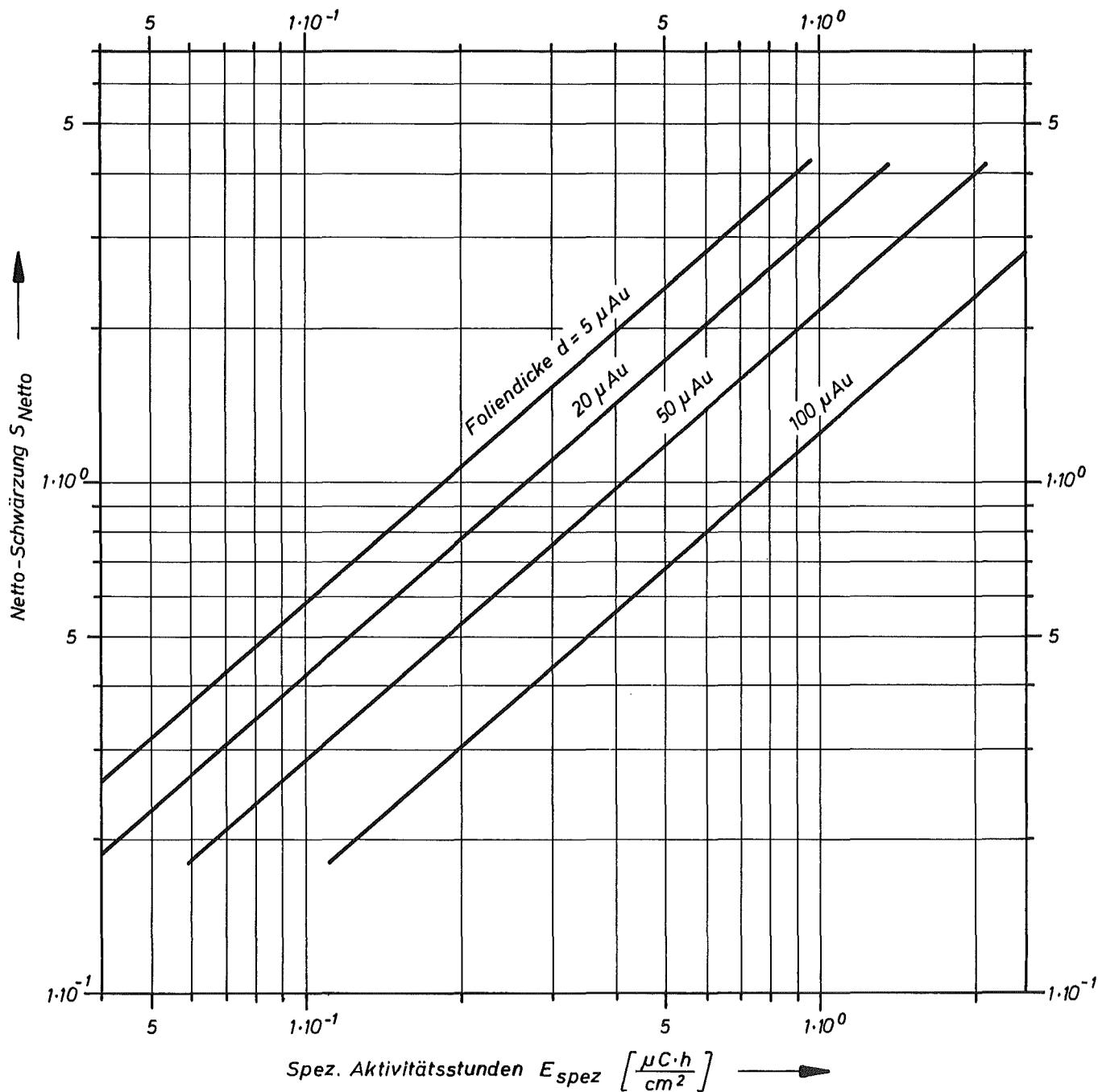


Abb. 12 b Schwärzung von Structurix-D7-Filmen durch Gold-Konverter als Funktion der spezif. Aktivitätsstundenzahl

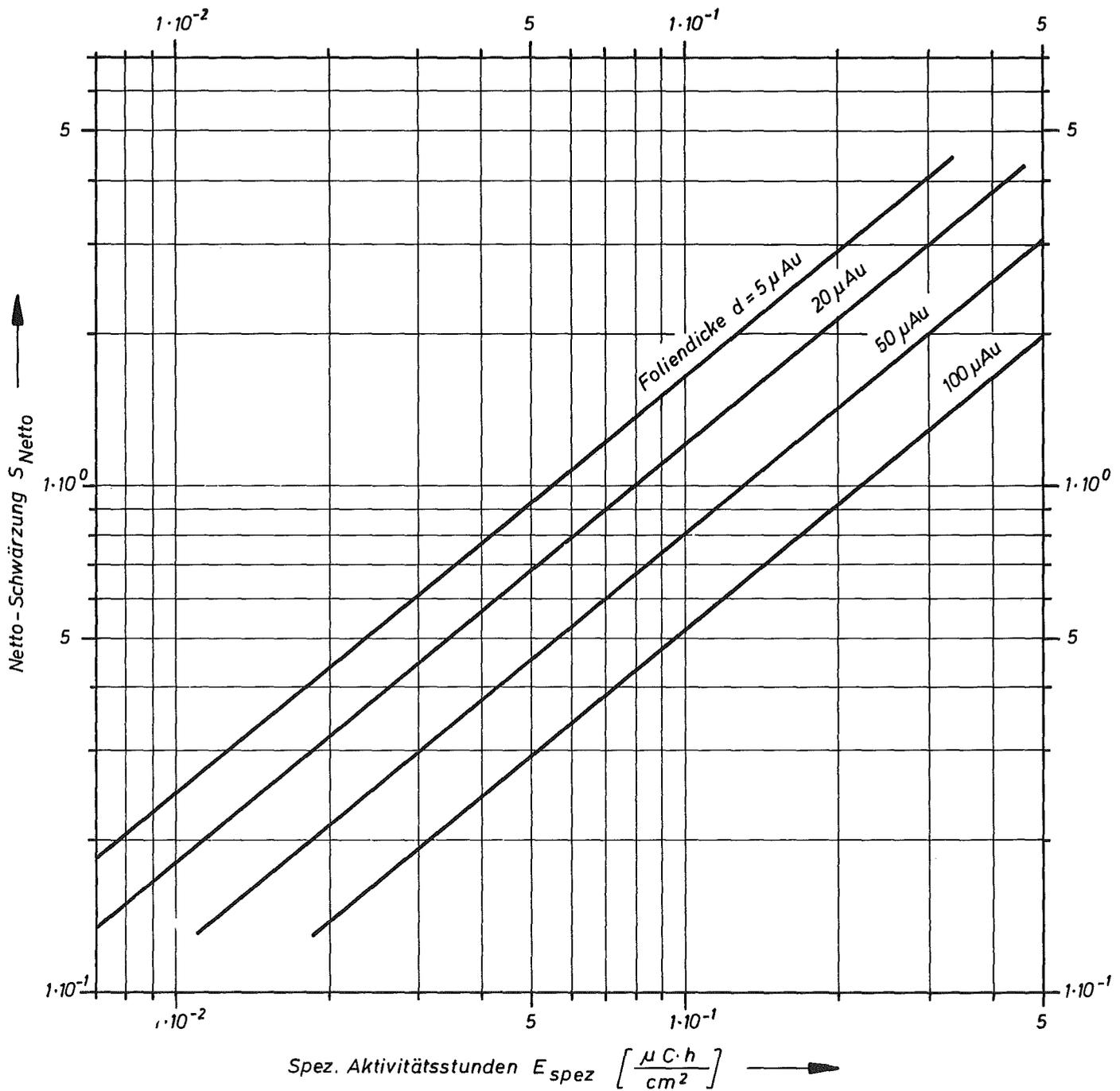


Abb. 12c Schwärzung von Osray - Filmen durch Gold - Konverter als Funktion der spezif. Aktivitätsstundenzahl

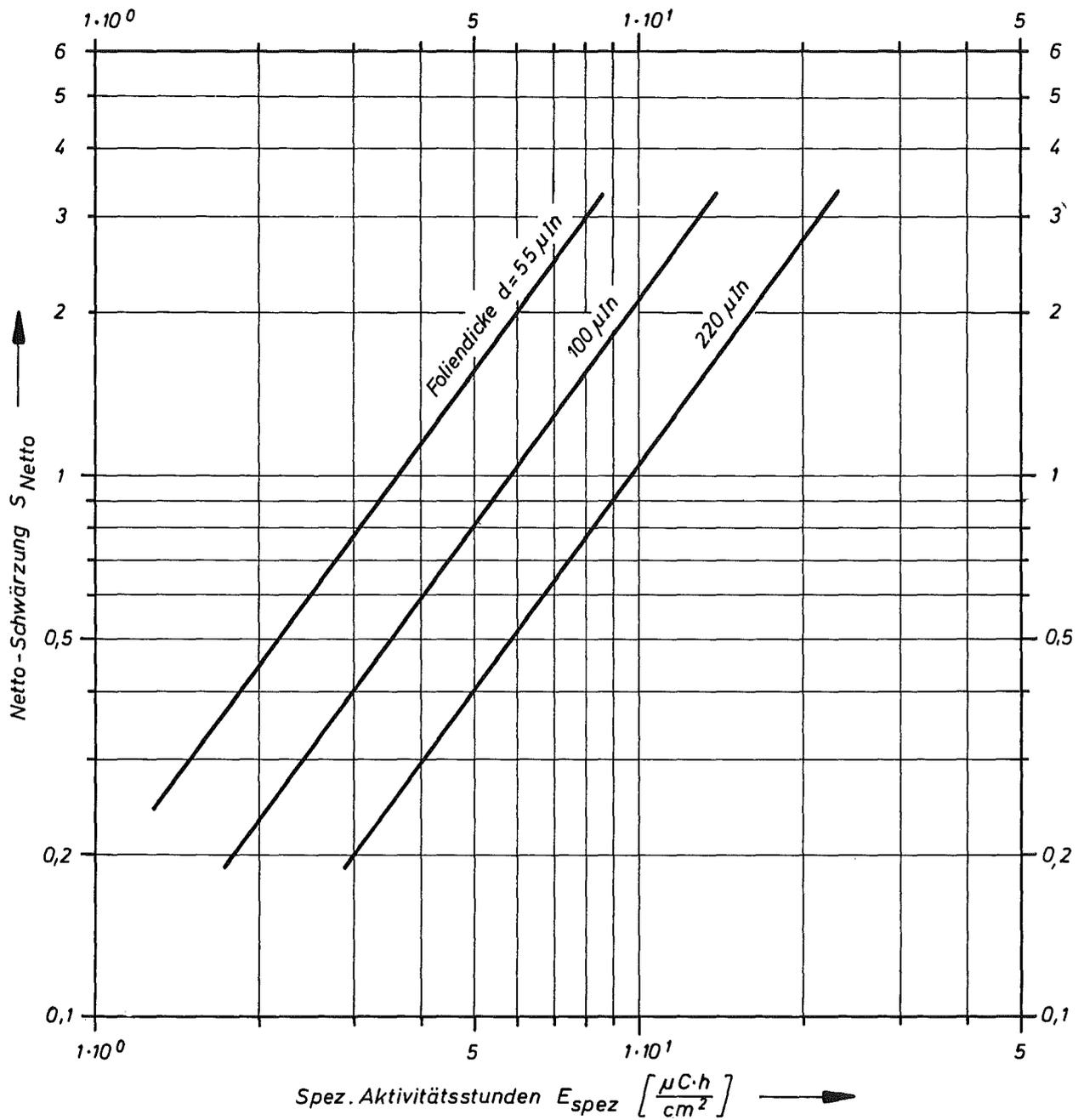


Abb. 13a Schwärzung von Structurix - D2-Filmen durch Indium-Konverter als Funktion der spez. Aktivitätsstundenzahl

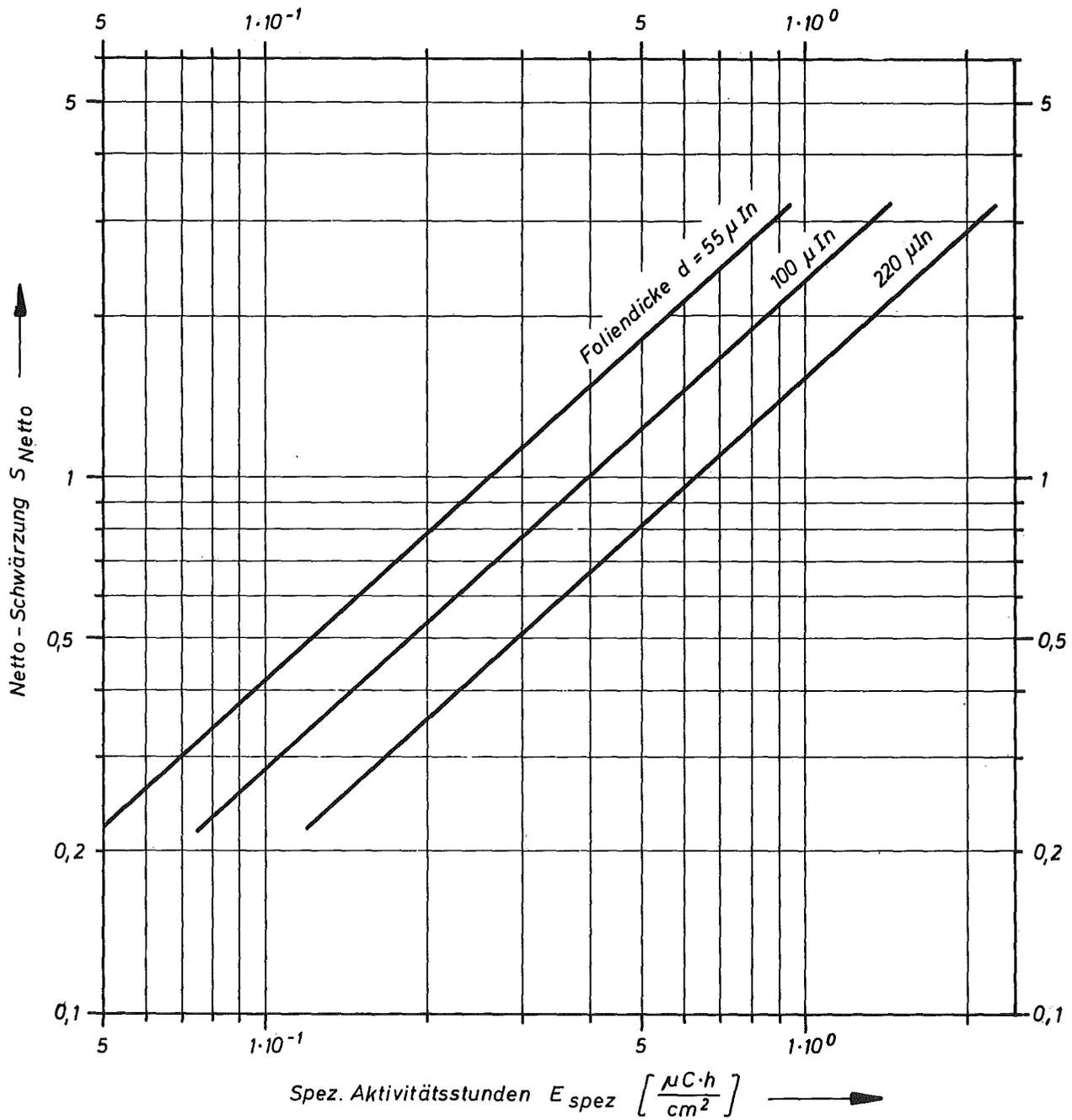


Abb. 13 b Schwärzung von Structurix - D7 - Filmen durch Indium - Konverter als Funktion der spezifischen Aktivitätsstundenzahl

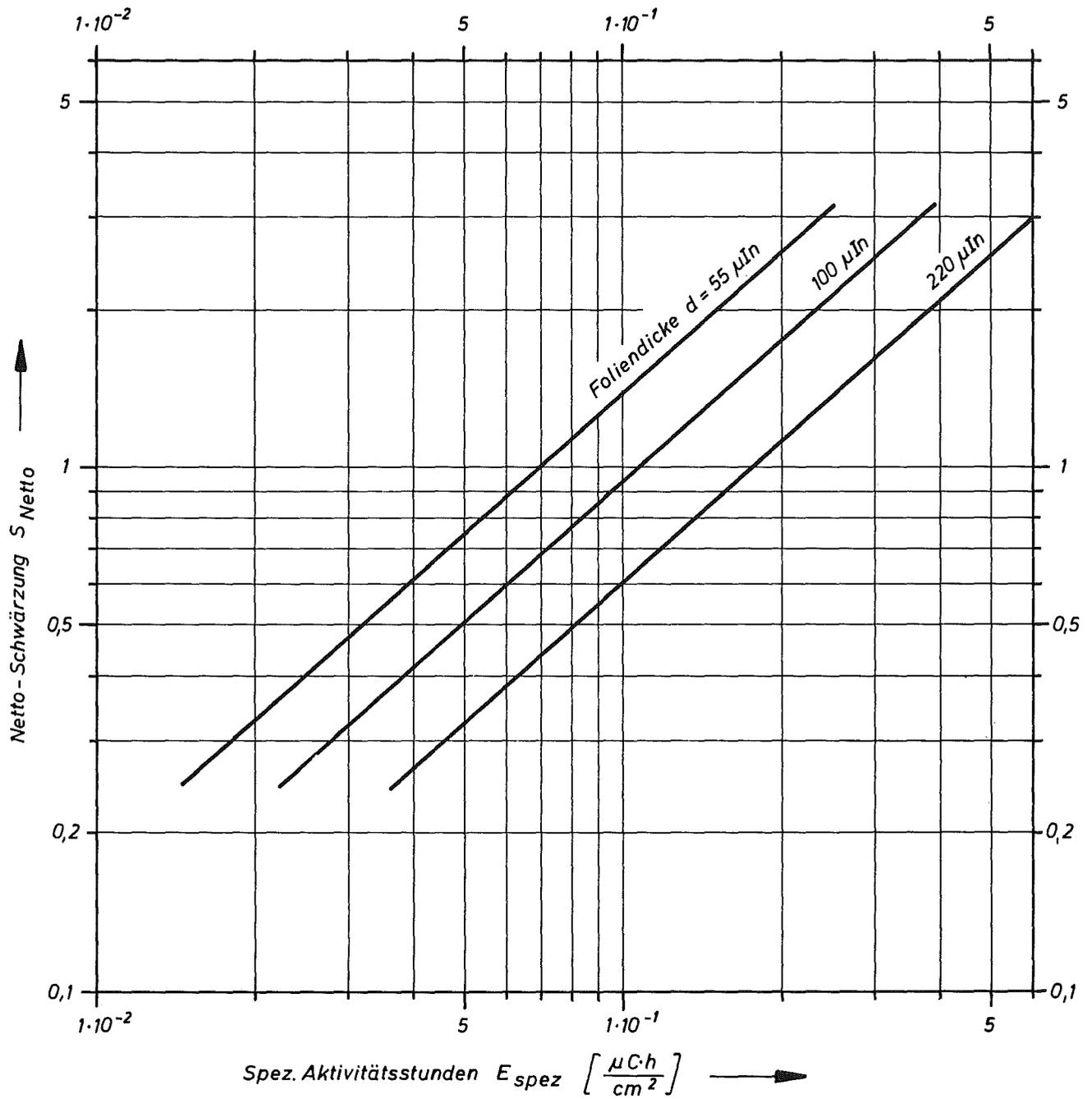


Abb. 13c Schwärzung von Osray-Filmen durch Indium-Konverter als Funktion der spezif. Aktivitätsstundenzahl

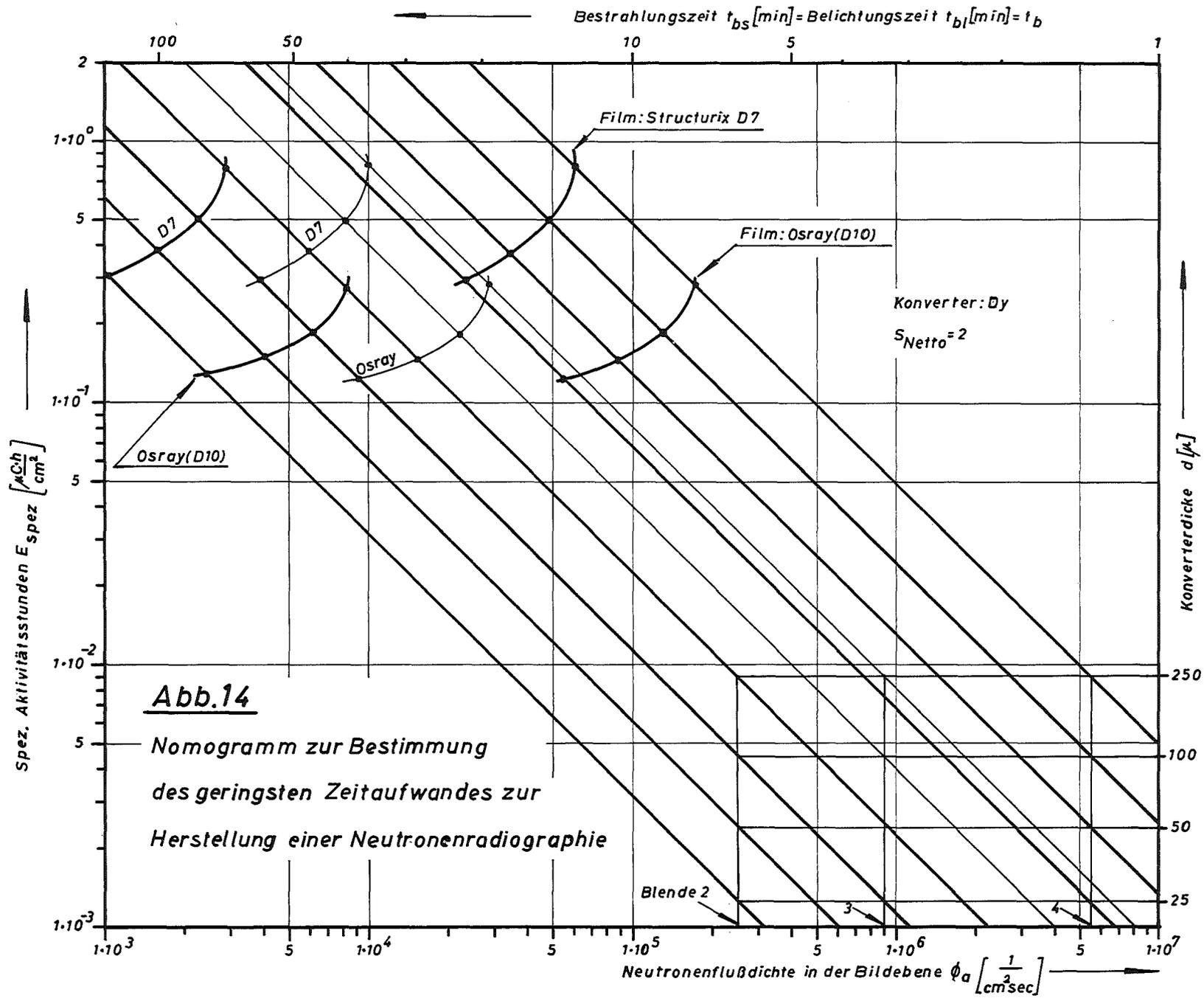
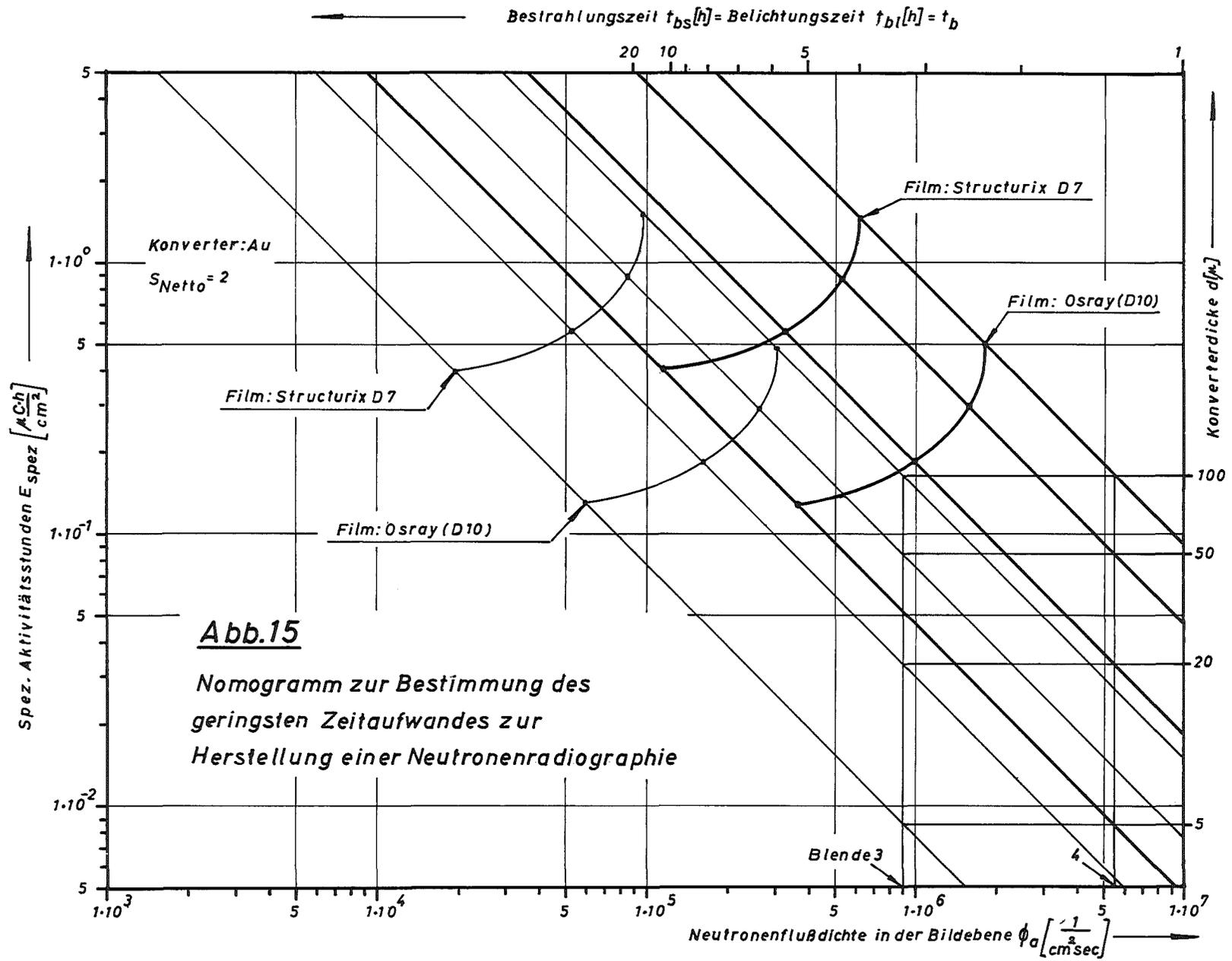


Abb.14

Nomogramm zur Bestimmung
des geringsten Zeitaufwandes zur
Herstellung einer Neutronenradiographie



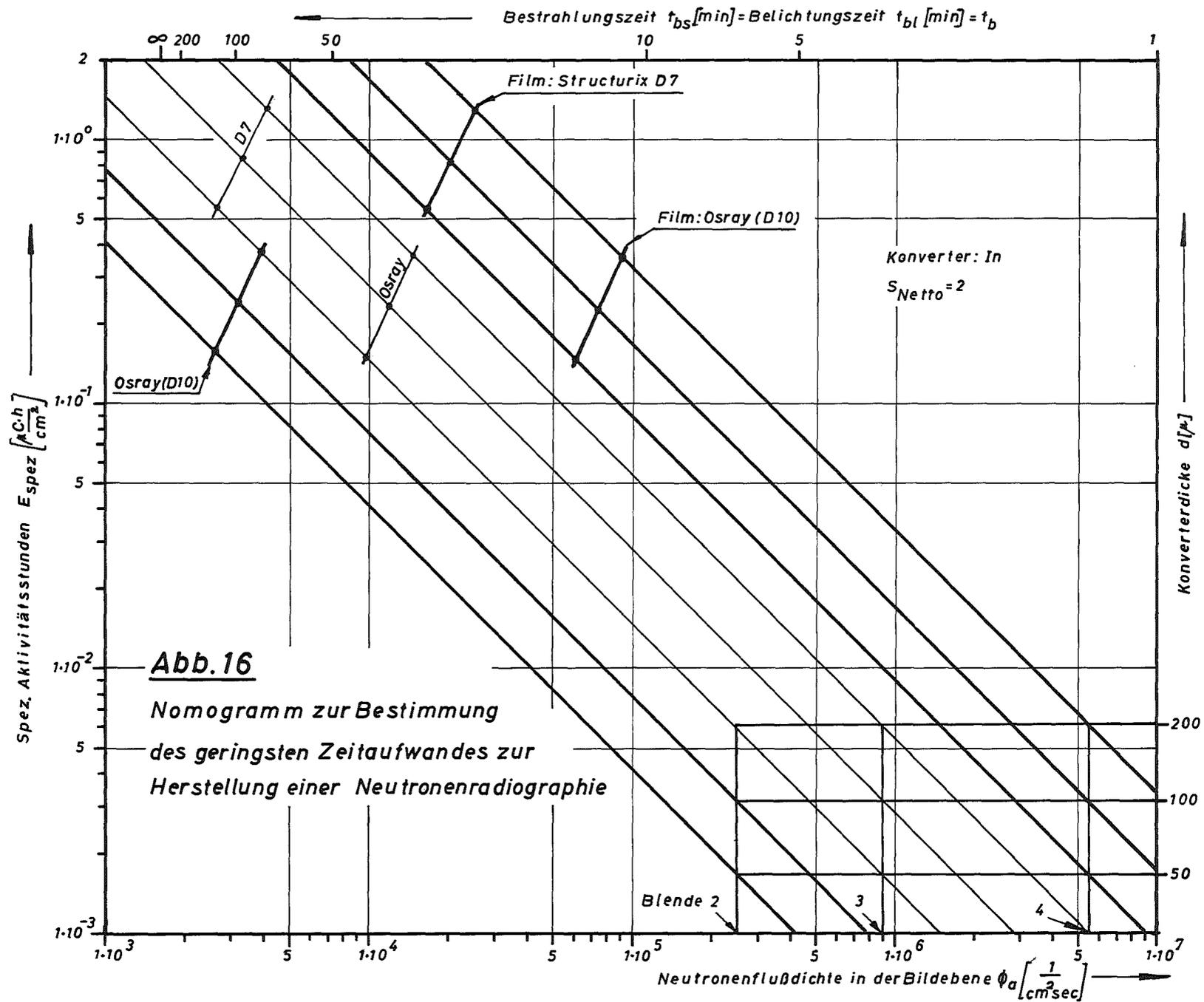
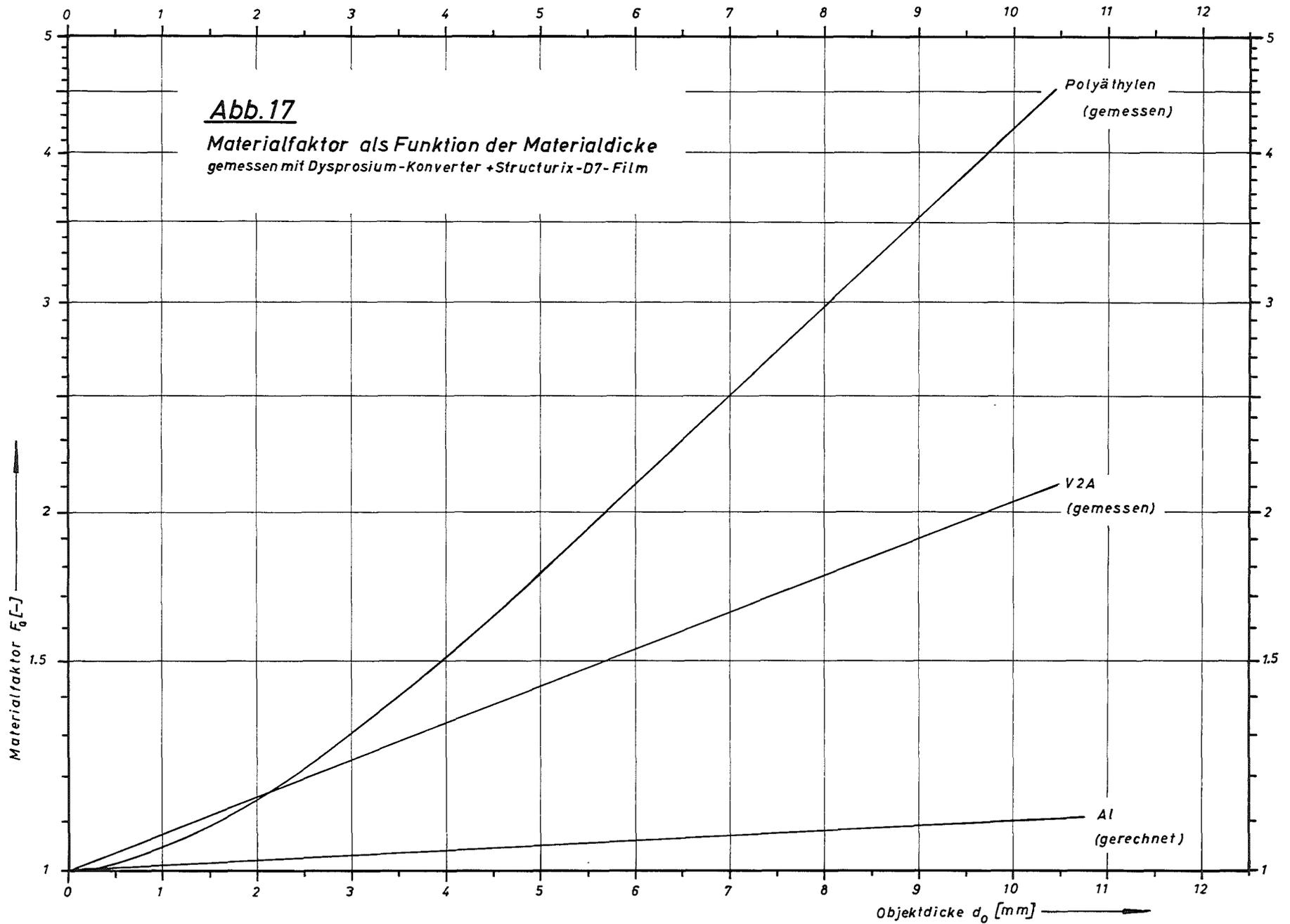


Abb. 16

Nomogramm zur Bestimmung
des geringsten Zeitaufwandes zur
Herstellung einer Neutronenradiographie



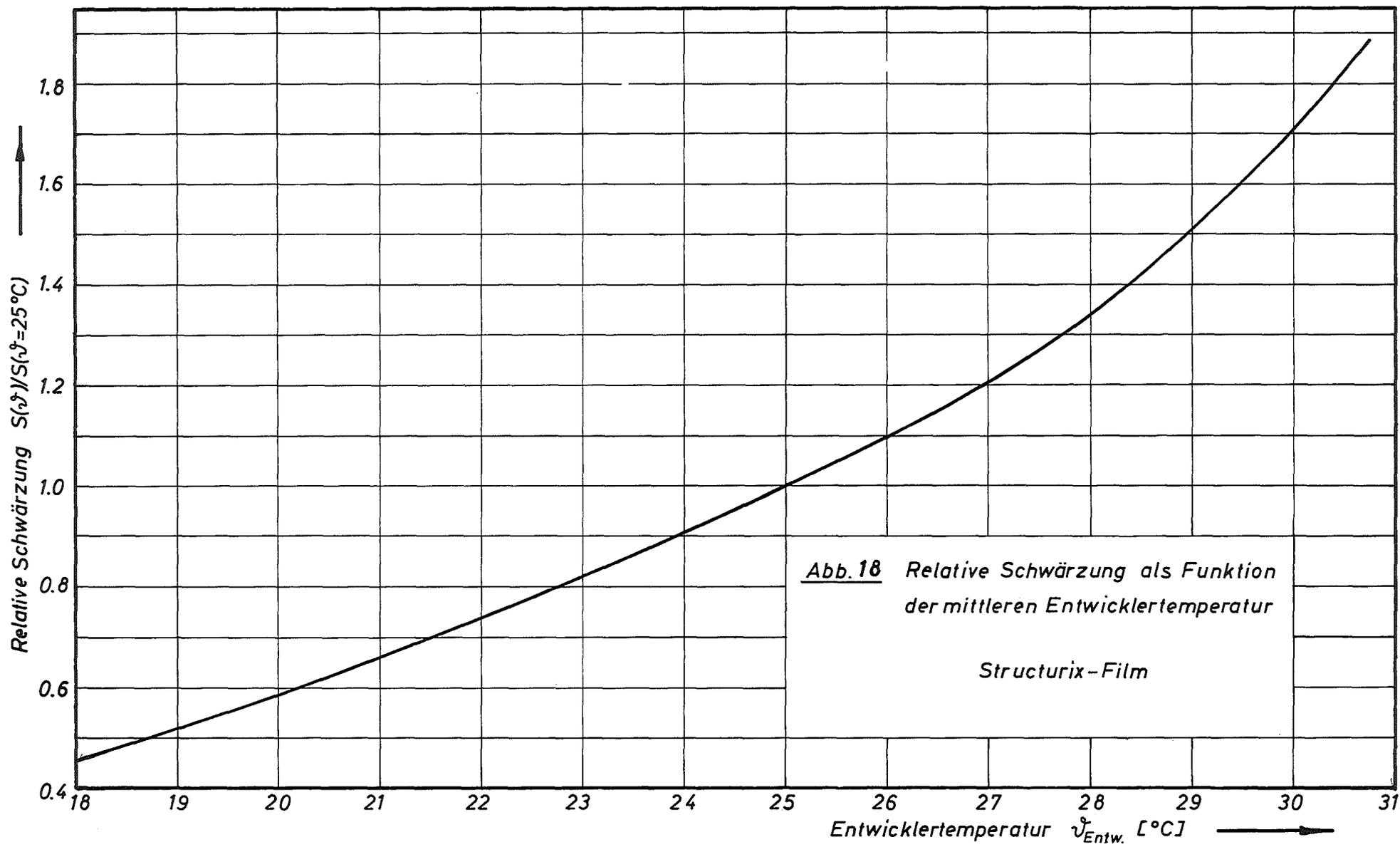
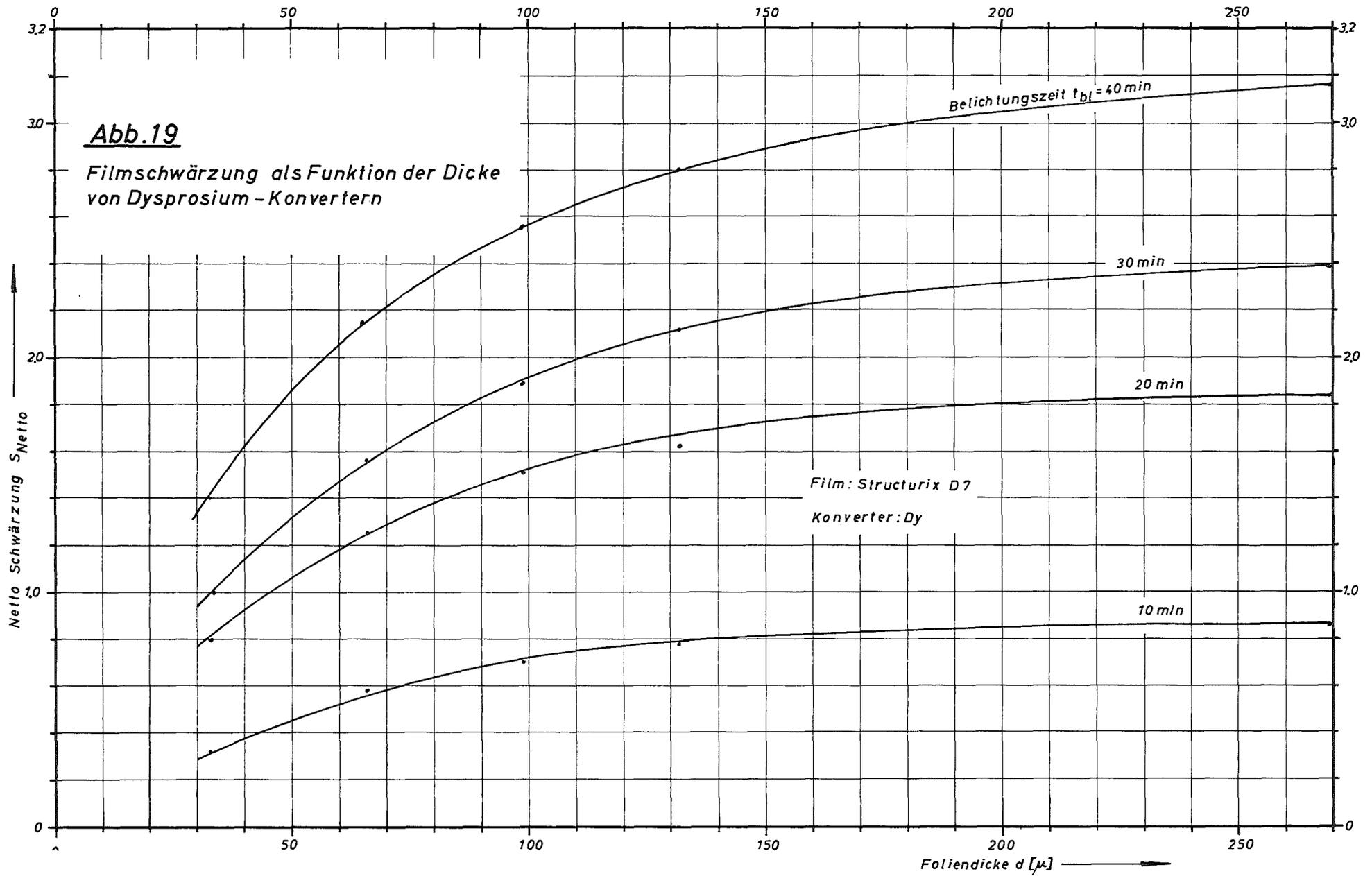
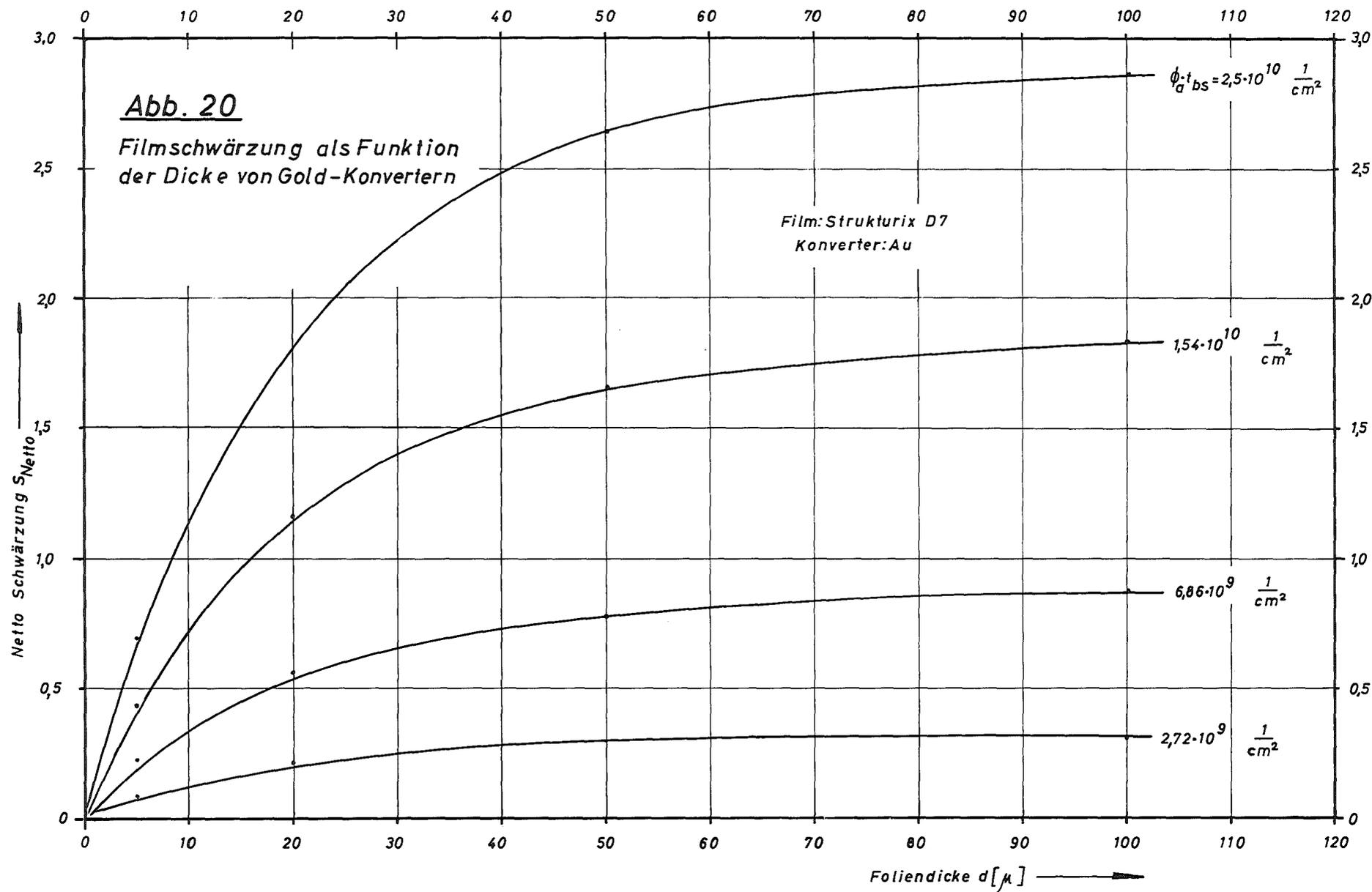
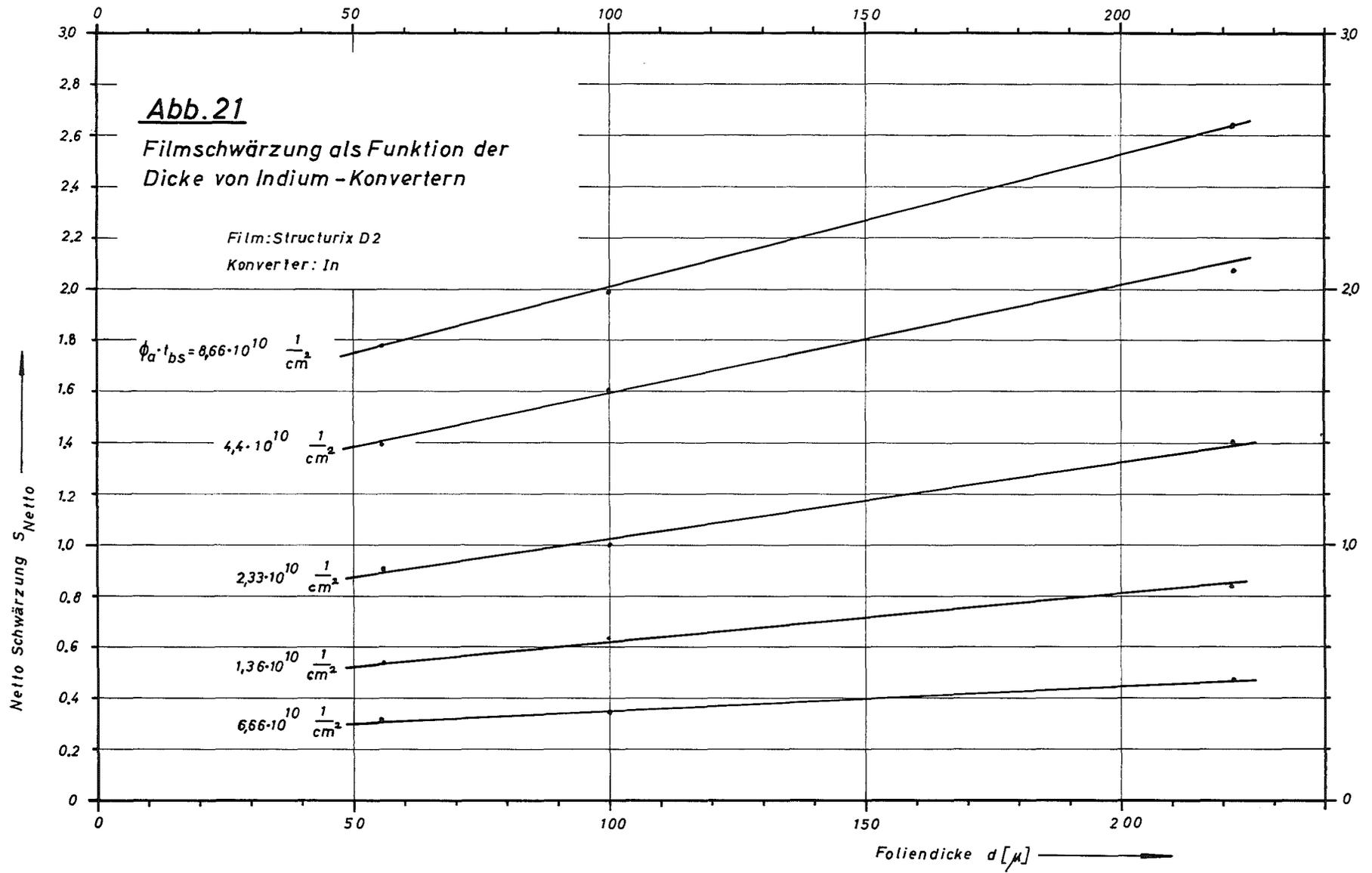


Abb. 18 Relative Schwärzung als Funktion der mittleren Entwicklertemperatur

Structurix-Film







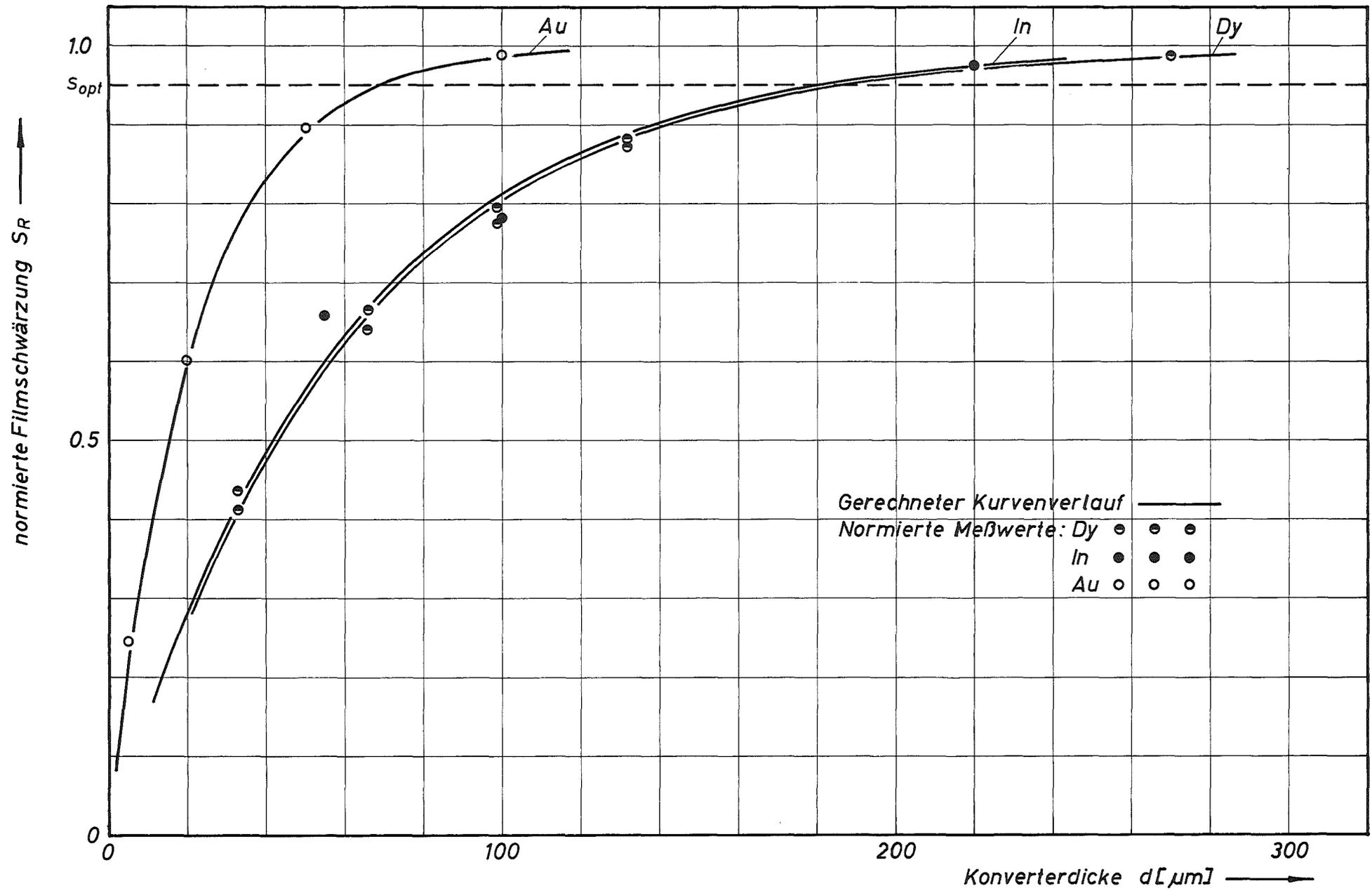
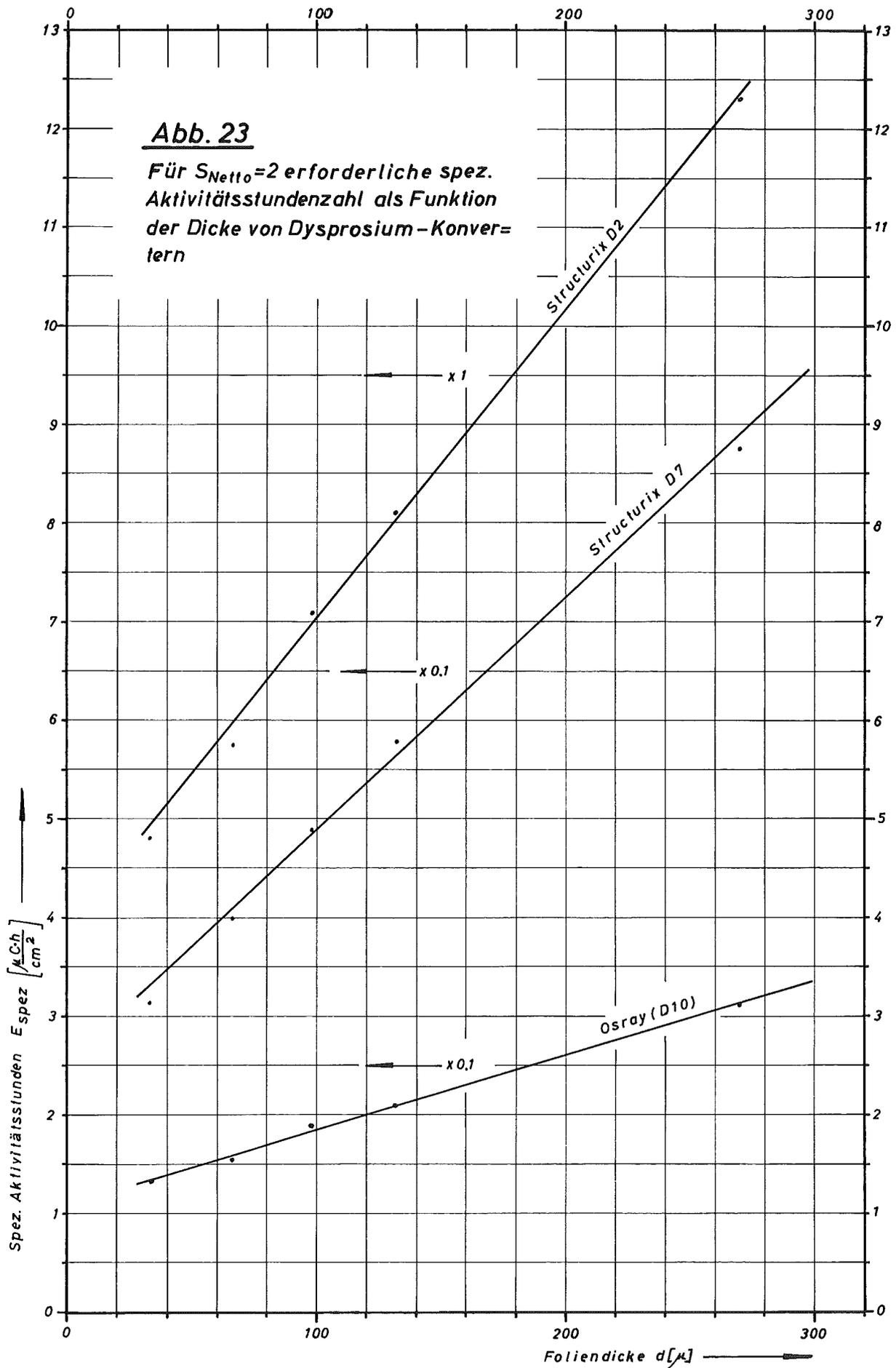
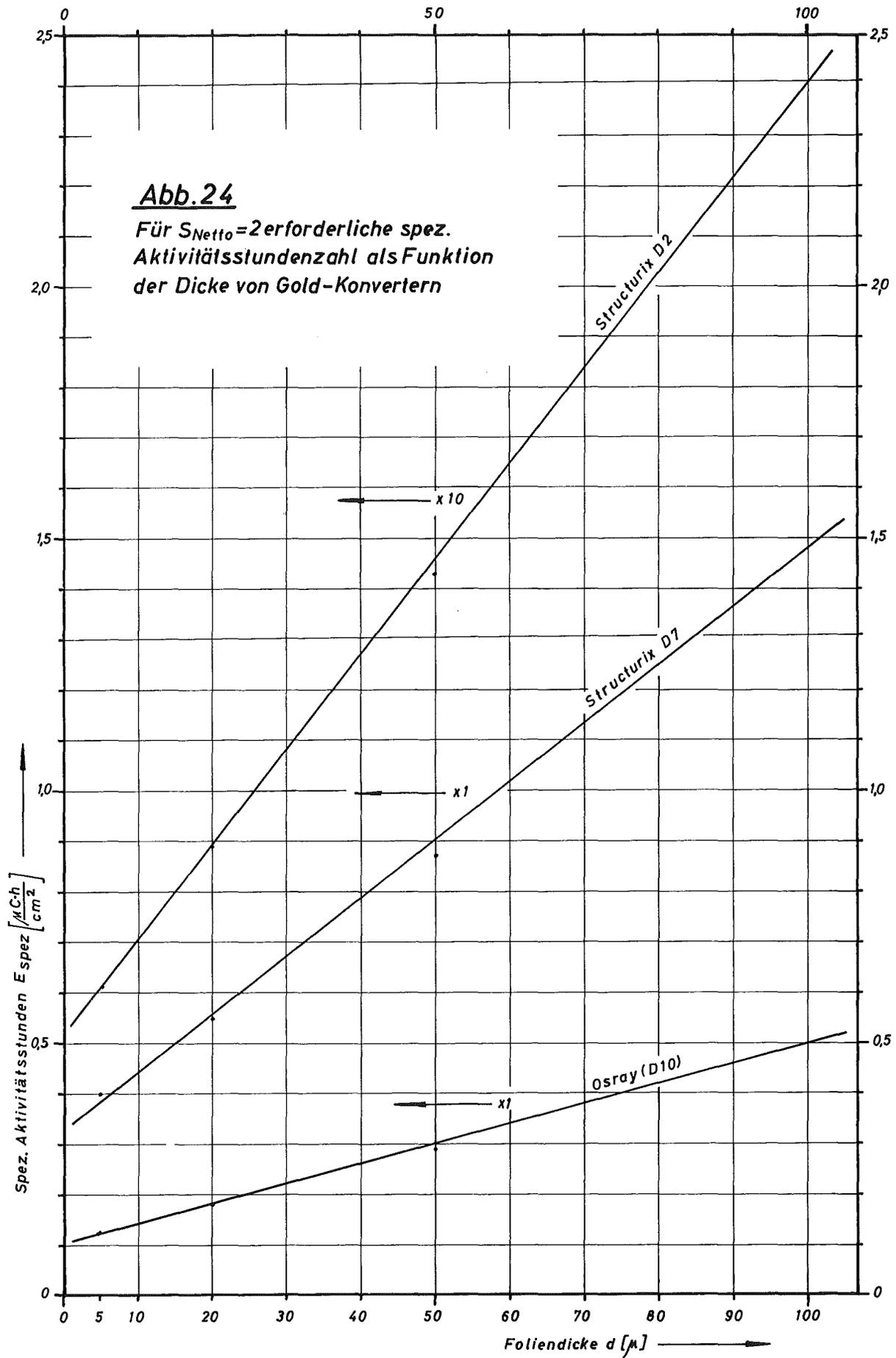
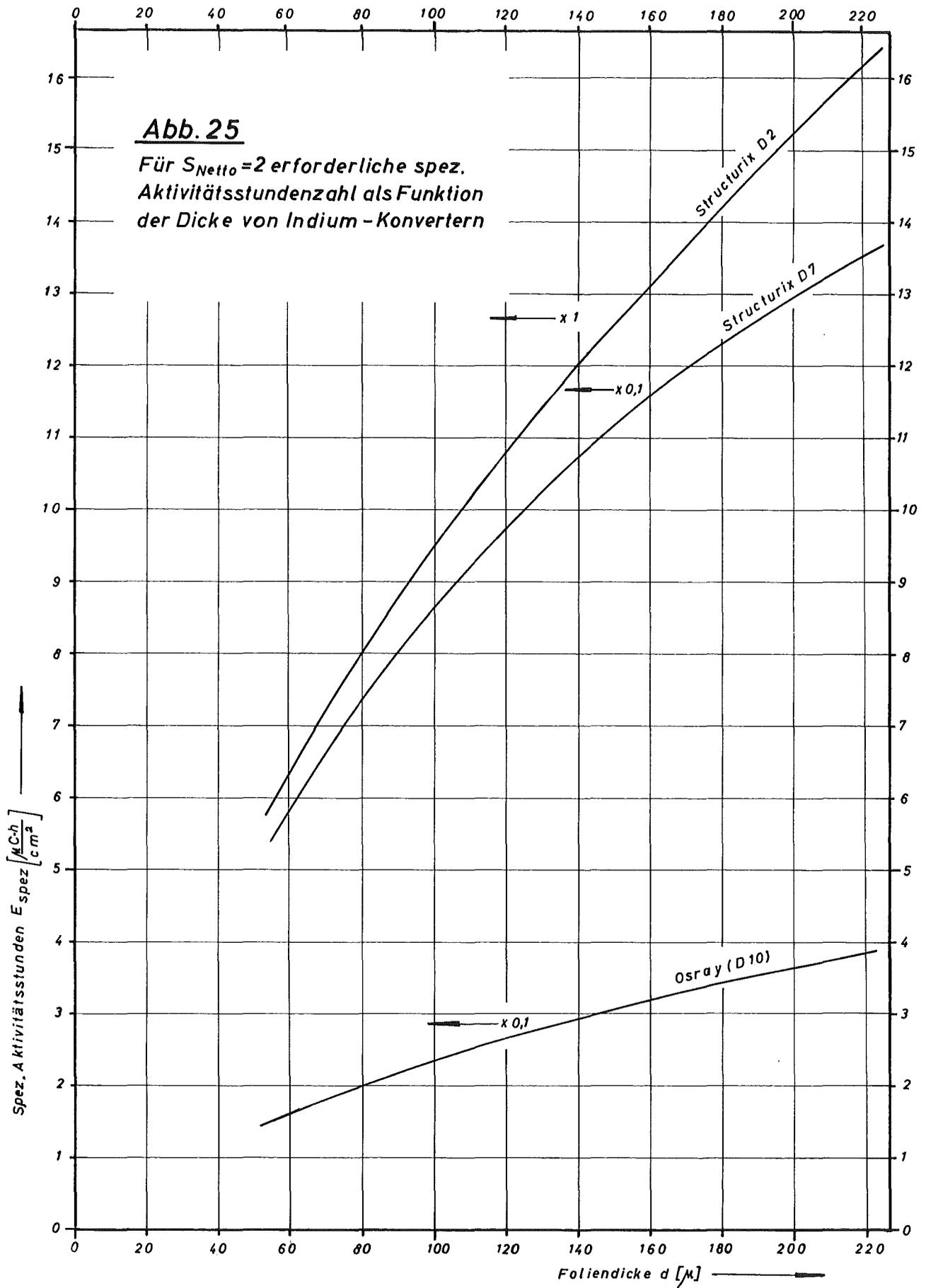
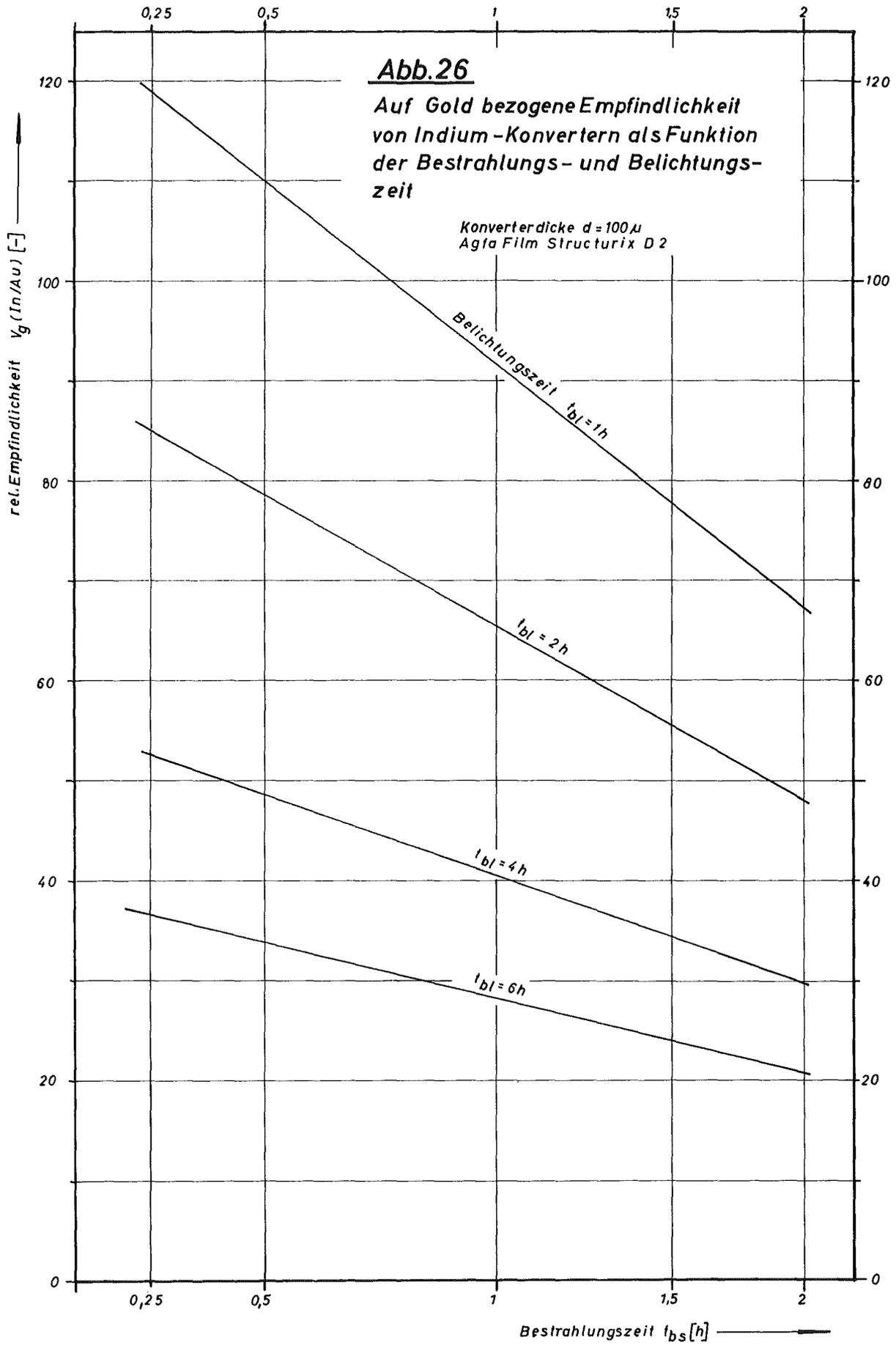


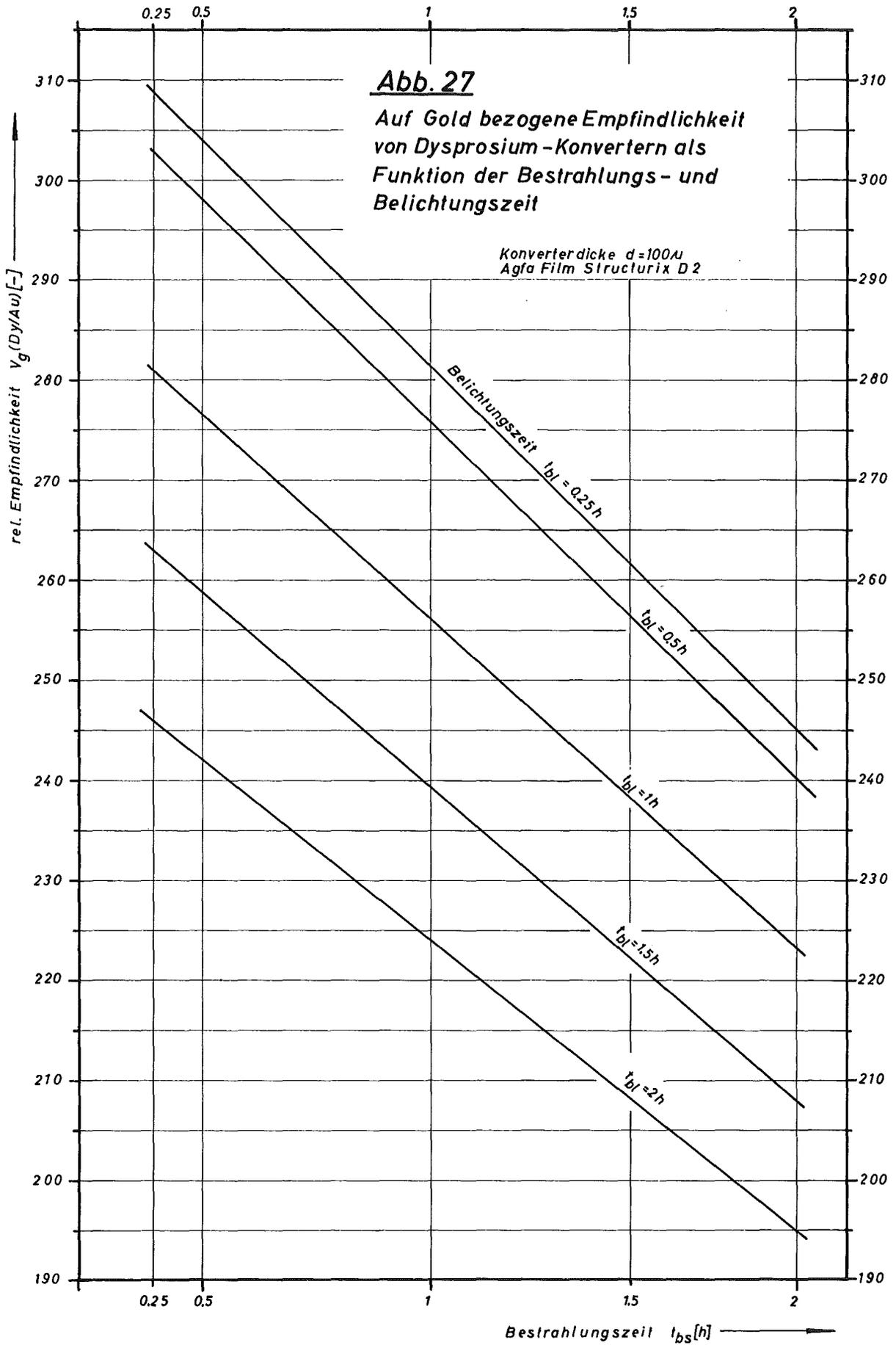
Abb.22 Gerechnete und gemessene normierte Filmschwärzung als Funktion der Dicke verschiedener Konverter

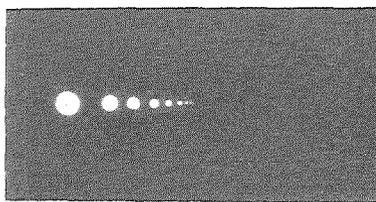




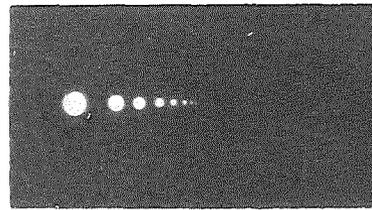




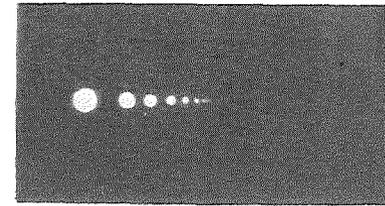




28a



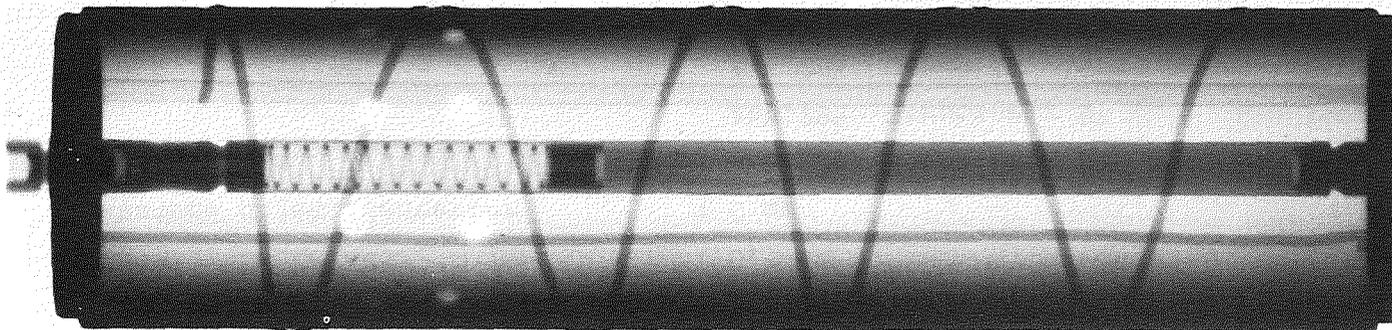
28b



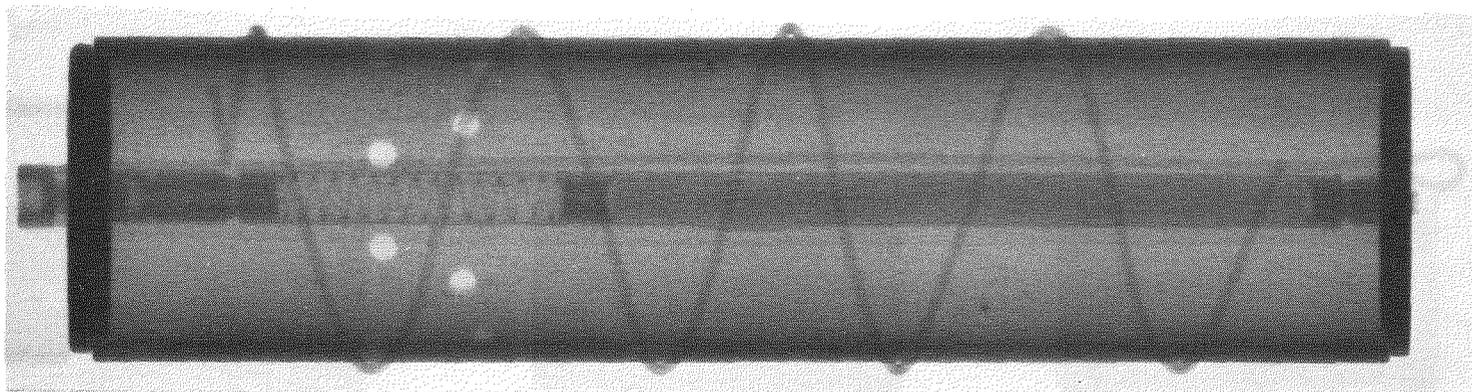
28c

Abb.28a-c Neutronenradiographie einer Kadmiumlochblende

Durchmesser der Bohrungen	:	3 , 2 , 1,5 , 1 , 0,8 , 0,5 , 0,3 , 0,2 , 0,1 mm
Stegbreite zwischen den Bohrungen	:	3 , 1,75 , 1,5 , 1 , 0,8 , 0,5 , 0,3 , 0,2 mm
Kadmiublechdicke	:	0,3 mm
Abstand Objekt/Konverter	:	0 mm
Röntgenfilm	:	Abb.28a Strukturix D4 Abb.28b Strukturix D7 Abb.28c Osray DW

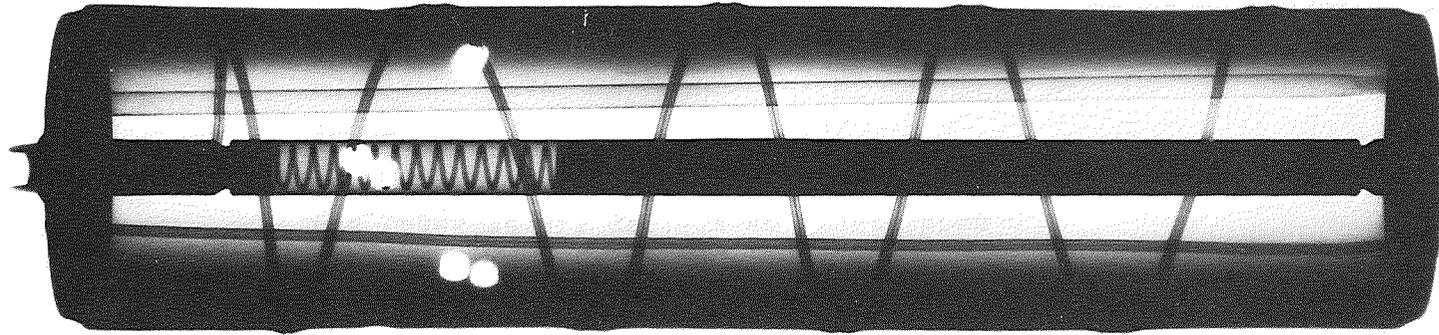


29a Blende 3, D_y 270 μ , $t_{bs}=60$ min, $t_w=11$ min, $t_{bl}\hat{=}\infty$, D4-Film

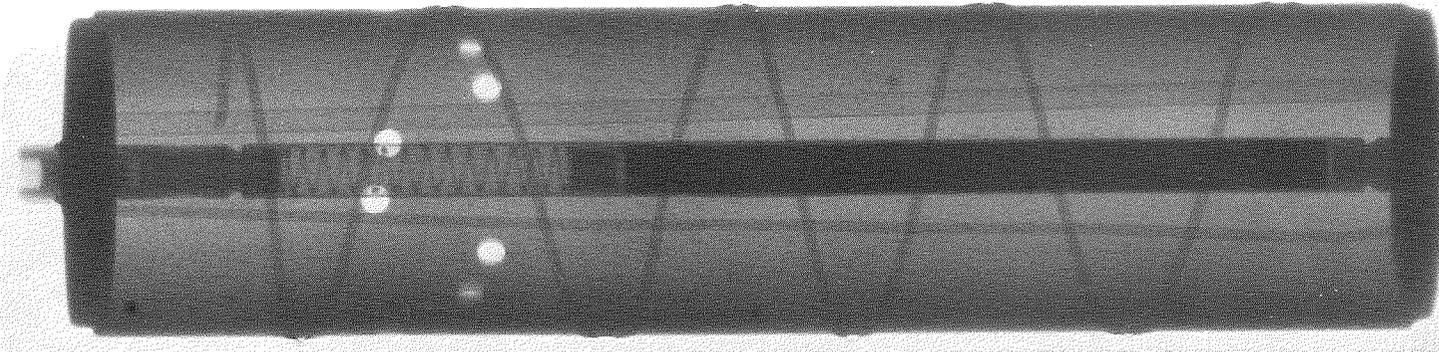


29b Blende 2, D_y 270 μ , $t_{bs}=240$ min, $t_w=12$ min, $t_{bl}\hat{=}\infty$, D2-Film

Abb.29a u. b Neutronenradiographie eines Objektes mit geplatztem Uranstabcan

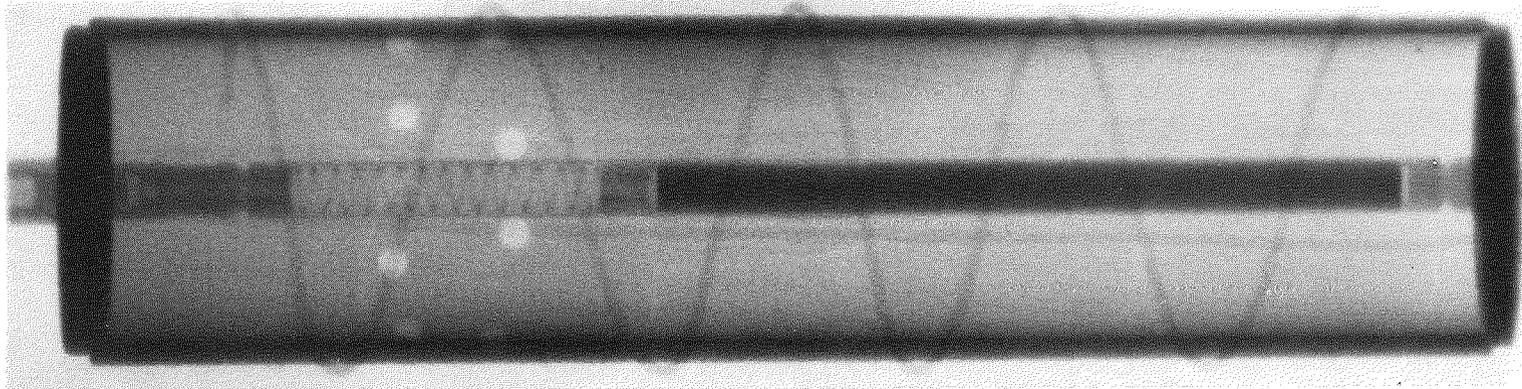


30a $U=140$ kV, $I=5$ mA, $t_{bs}=6$ min



30b $U=150$ kV, $I=2,5$ mA, $t_{bs}=30$ sec, Brennfleck $1,8$ mm², Fokus/Film-Abstand= 970 mm

Abb. 30a u. b Röntgenaufnahmen eines Objektes mit geplatzttem Uranstabcan



Strahlleistung in 50 cm Abstand vom Fokus: 150 R/min

Brennfleck: 0,1 x 0,2 mm²

Fokus/Film-Abstand: 150 cm

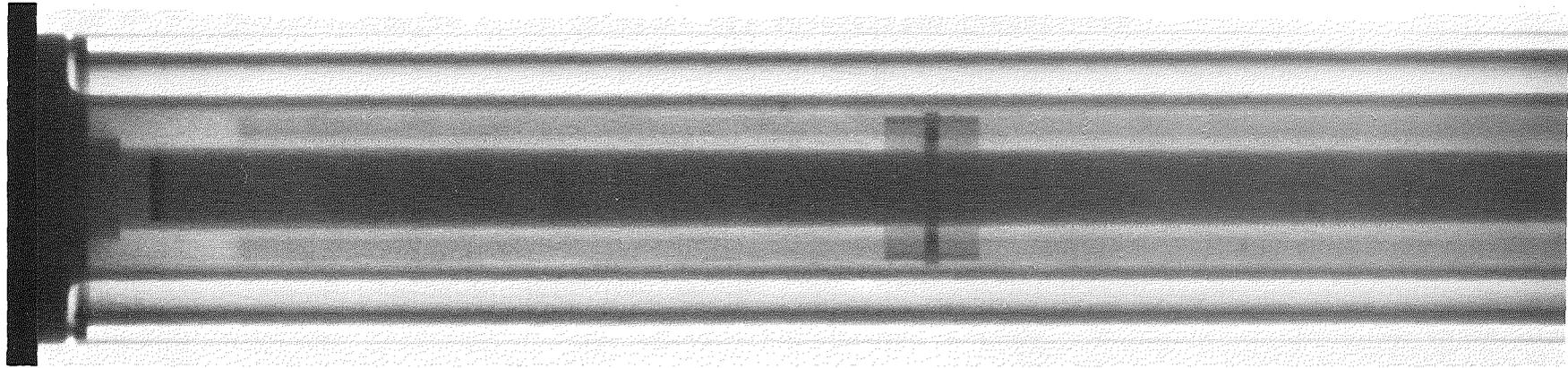
Bestrahlungszeit: 9 min

Maximale Gammaenergie: 18 MeV

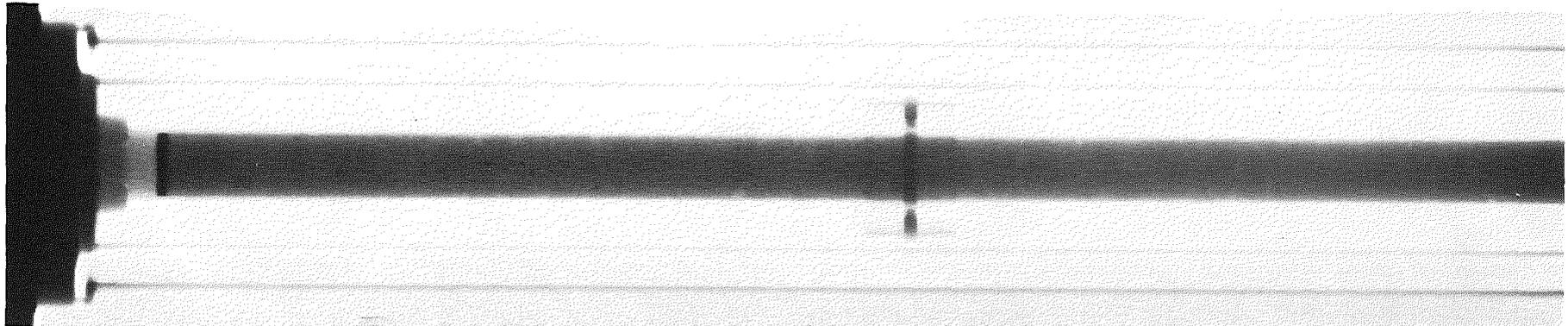
Homogenisator zwischen Objekt u. Film

Film: Kodak M hinter Tantalfolie

Abb.31 Betatronaufnahme eines Objektes mit geplatzttem Uranstabcan

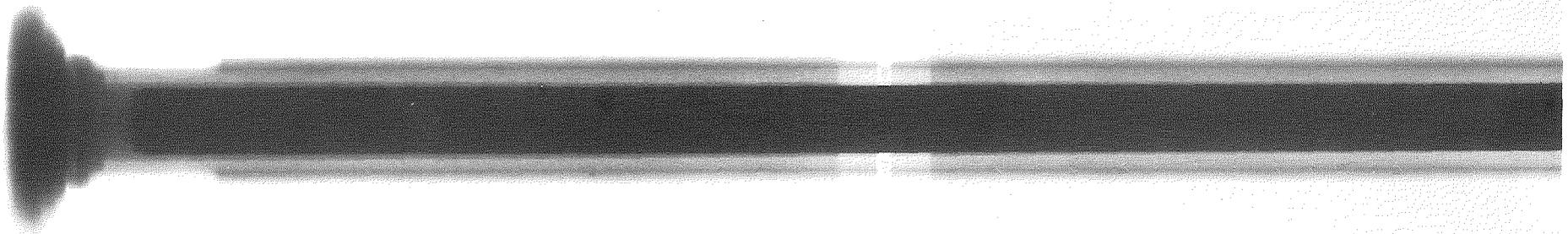


32a Blende 3, $Dy\ 270\ \mu$, $t_{bs}=240\ \text{min}$, $t_w=10\ \text{min}$, $t_{bl}\hat{=}\infty$, D2-Film

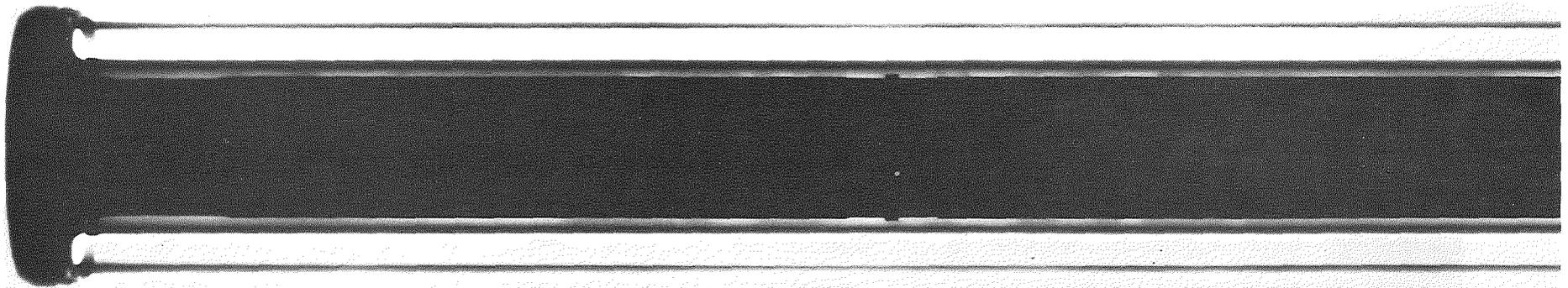


32b Blende 3, $Dy\ 270\ \mu$, $t_{bs}=183\ \text{min}$, $t_w=11\ \text{min}$, $t_{bl}\hat{=}\infty$, D4-Film

Abb. 32a u. b Neutronenradiographie eines Objektes mit abgesetztem Uranstabcan



33a



33b

$U=250$ kV, $I=5$ mA, $t_{\text{bS}}=5$ min, D4-Film

Abb. 33a u. b Röntgenaufnahme eines Objektes mit abgesetztem Uranstabcan

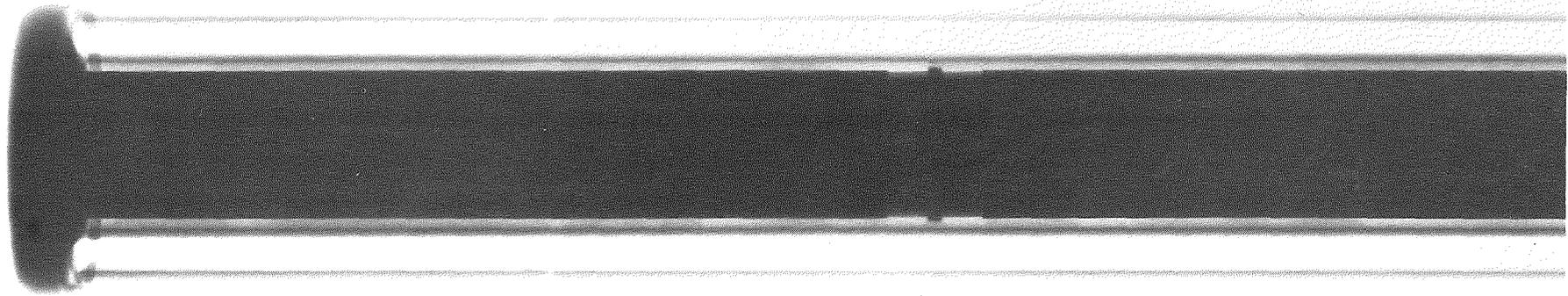


Abb.34a Röntgenaufnahme eines Objektes mit abgesetztem Uranstabcan
U=400 kV, I=10 mA, $t_{bS}=1,5$ min, Brennfleck=4 x 4 mm², Fokus/Film-Abstand=970 mm

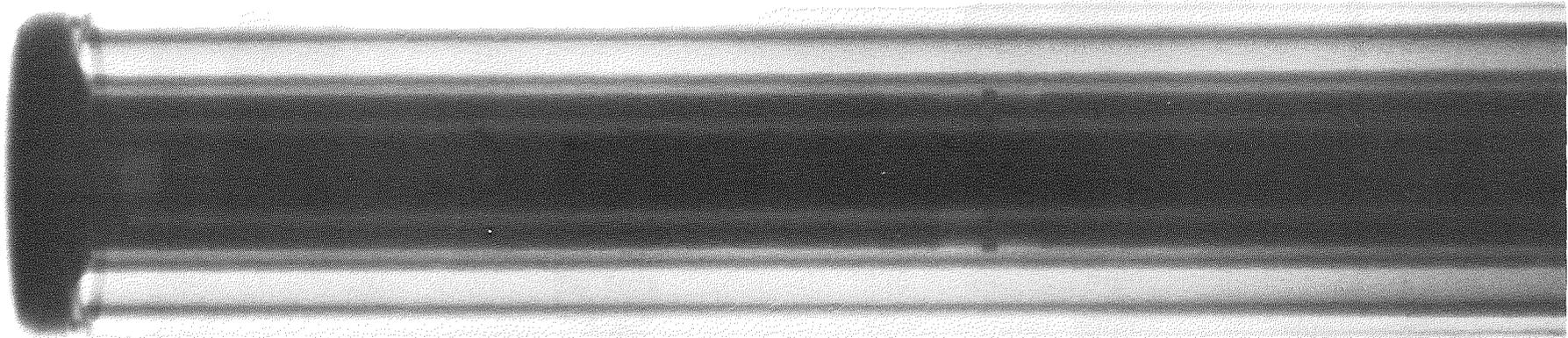
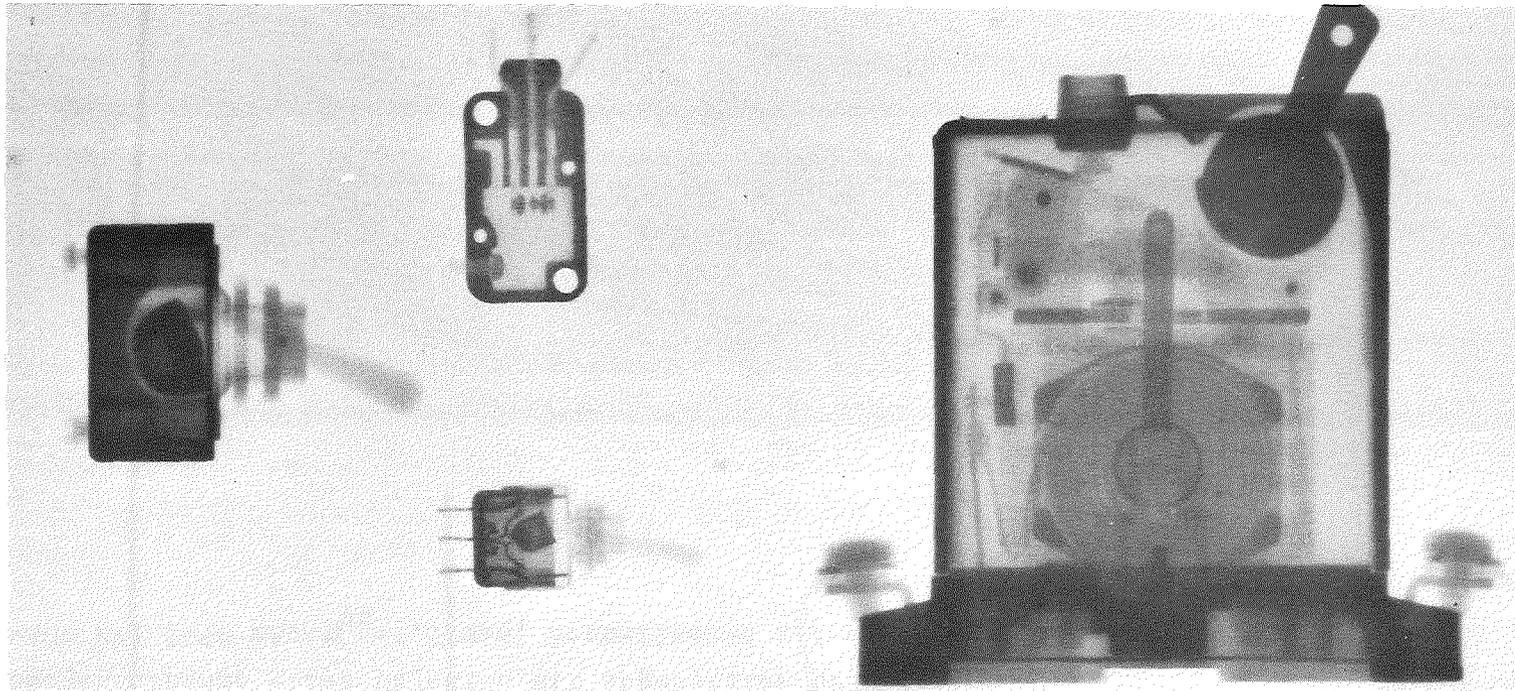


Abb.34b Betatronaufnahme Parameter wie bei Abb.30



Blende: 3

Bestrahlungszeit $t_{bs} = 200$ min

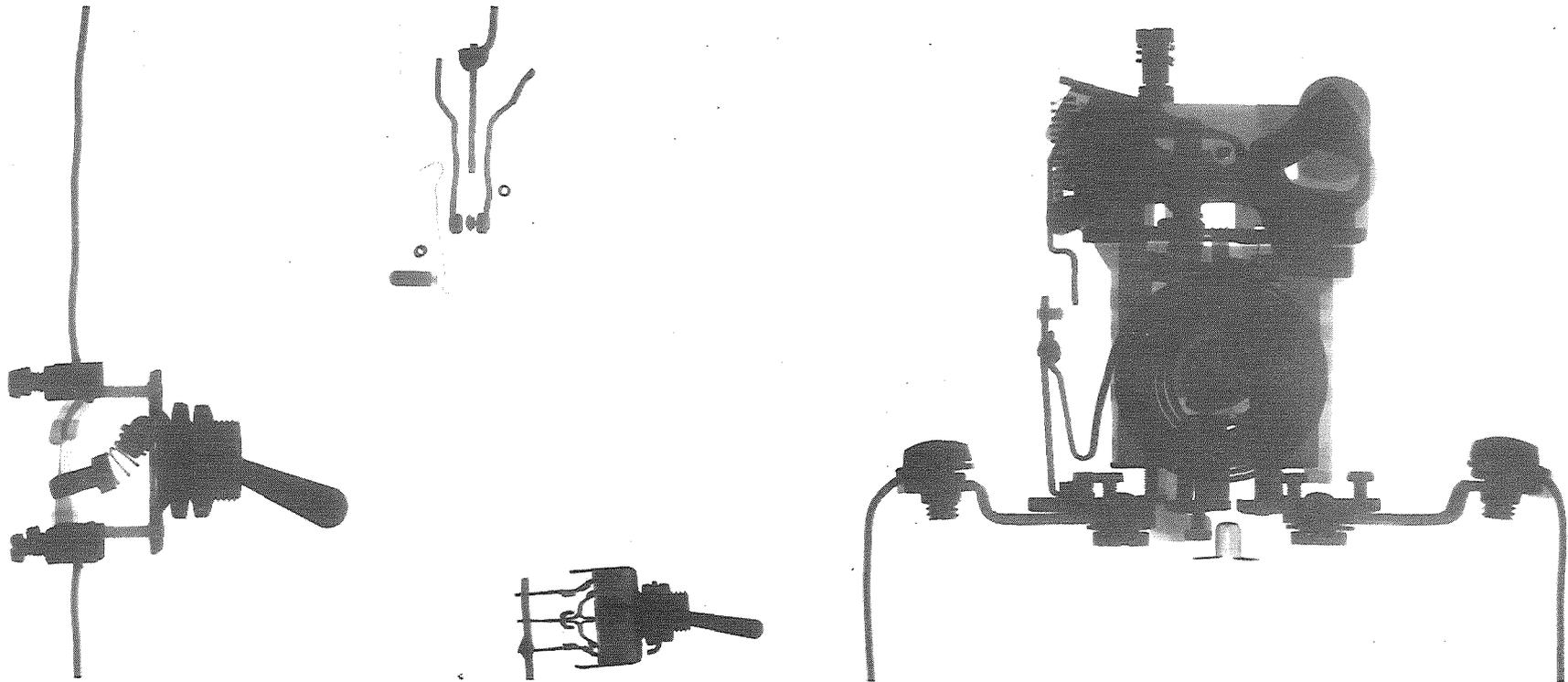
Belichtungszeit $t_{bl} = 182$ min

Konverter: Dy 270μ

Wartezeit $t_w = 12$ min

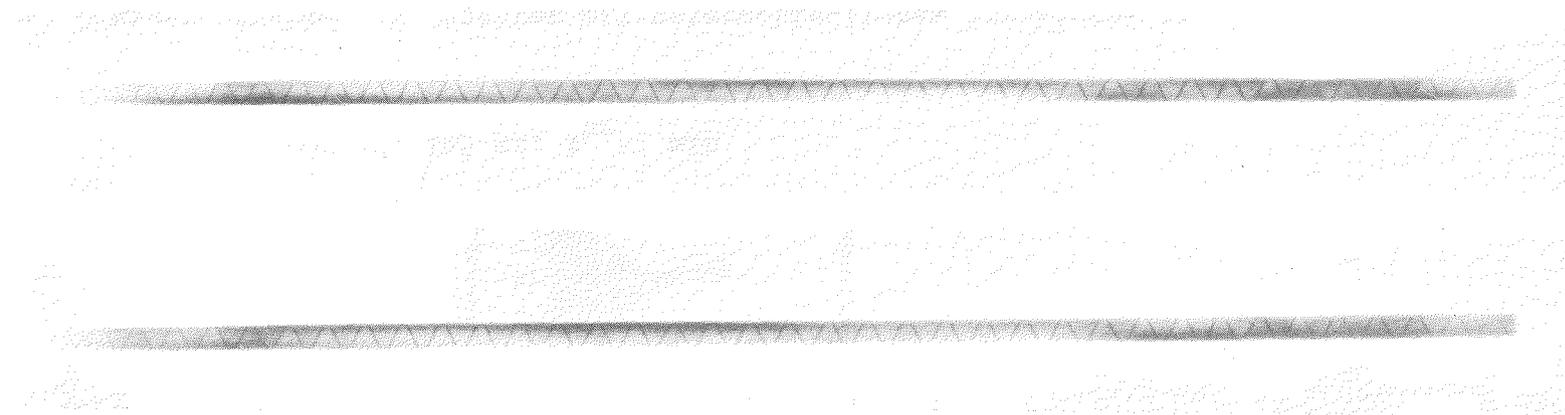
D2-Film

Abb. 35a Neutronenradiographie von Objekten mit unterschiedlichem Strukturmaterial



$U=65 \text{ kV}$, $I=5 \text{ mA}$, $t_{\text{BS}}=1 \text{ min}$

Abb. 35b Röntgenaufnahme von Objekten mit unterschiedlichem Strukturmaterial



Blende 4, D_y 270 μ , t_{bs} = 75min, $t_w \approx 10$ min, $t_{bl} \hat{=} \infty$, D4-Film

Untere Aufnahme wie obere, jedoch Objekt 90 $^\circ$ um Längsachse gedreht

Abb. 36a Neutronenradiographie eines bornitridisolierten Heizleiters

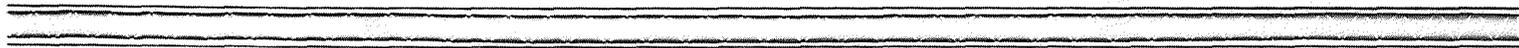


Abb. 36b Röntgenaufnahme eines bornitridisolierten Heizleiters

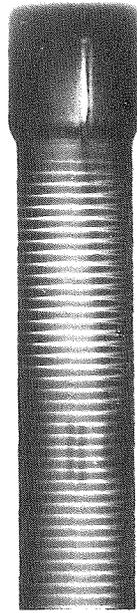


Abb. 37 a

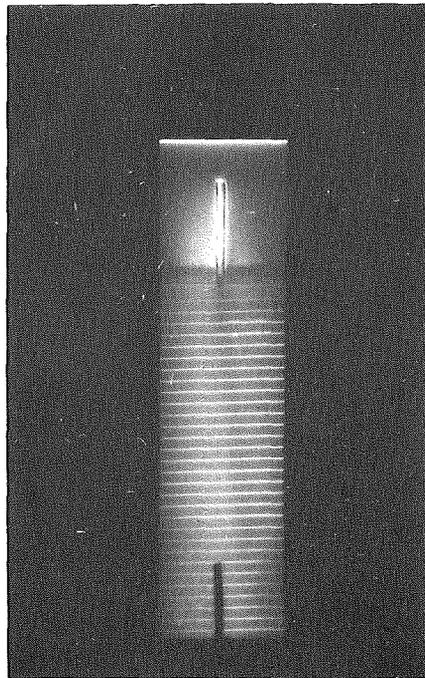


Abb. 37 b

Abb.37a u. b Neutronenradiographie eines kadmierten Gasführungs-
rohres des Projektes FR2/26

Aufnahmeparameter: siehe Abschnitt 6.6

