

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 2096

Laboratorium für Isotopentechnik
Fachbereich Physik-Maschinenbau

Die Aktivierung von metallischen Maschinenteilen mit geladenen
Teilchen zur Durchführung von Verschleißmessungen

von

Bernhard Herkert

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

	Seite
1. ZUSAMMENFASSUNG	1
2. EINLEITUNG	2
3. GRUNDLAGEN DER AKTIVIERUNG	2
3.1 Energieverlauf geladener Teilchen im Target	2
3.2 Kernreaktionen, Anregungsfunktion	4
3.3 Die Bestimmung der Tiefenverteilung radioaktiver Isotope	5
3.4 Einfluß von Energieschwankungen des Teilchenstrahls auf die Tiefenverteilung	6
4. AKTIVIERUNG VON MASCHINENTEILEN	6
4.1 Strahleigenschaften, Intensitätsverteilung	6
4.2 Anordnung Abschirmung - Target	7
4.3 Strahlaufweitung	7
4.4 Thermische Belastung bei der Aktivierung	8
5. TIEFENVERTEILUNGEN	9
5.1 Aktivierung, Bestimmung der Tiefenverteilung	9
5.2 Aktivitätsausbeute	11
5.3 Beispiele zur Aktivitätsberechnung	12
6. BILDANHANG	21
7. LITERATUR	46

1. Z U S A M M E N F A S S U N G

Der Bericht befaßt sich mit der Aktivierung einiger technisch wichtiger Metalle. Titan, Chrom, Eisen, Kupfer, Zink, Molybdän, wurden mit Protonen, Deuteronen und α -Teilchen an einem Zyklotron aktiviert. Die geladenen Teilchen mit Energien bis 100 MeV dringen maximal einige Millimeter in das Material ein und erzeugen auf ihrem Weg infolge von Kernreaktionen verschiedene Radionuklide. Die Verteilung dieser Nuklide wurde durch schrittweises Abschleifen dicker Targets ermittelt. Weiterhin werden Angaben über einige Grundlagen der Aktivierung, über die praktische Durchführung von Bestrahlungen an einem Zyklotron sowie über die entstehenden Aktivitäten gemacht. Die Arbeiten werden im Hinblick auf die Durchführung von Verschleißmessungen mit weiteren Materialien fortgesetzt.

The activation of metallic machine parts with charged particles
for wear measurements

A B S T R A C T

The report deals with the activation of various technical important metals. Titanium, Chromium, Iron, Copper, Zinc, Molybdenum had been irradiated with Protons, Deuterons and α -particles on a cyclotron. The charged particles with energies up to 100 MeV generate radionuclides in the activated materials along their penetrating path of a few millimeters. The distribution of these nuclides had been evaluated by stepwise grinding of the thick targets and by measurement of the residual activity. Information is given about some basis on activation, the practical execution of irradiations on a cyclotron and the radioactivities produced. The investigations are being continued with other materials with regard to the application of wear measurements.

2. E I N L E I T U N G

In den letzten Jahren hat die Radionuklidtechnik (RNT) in Maschinenbau und Tribologie einen großen Aufschwung erfahren. Insbesondere das Spektrum der Anwendungen auf dem Gebiet der Verschleißmeßtechnik wurde stark erweitert. Die Meßprinzipien der Verschleißmessung mit Hilfe von Radioisotopen sind in [1], Anwendungsbeispiele in [2-5] beschrieben.

Eine wesentliche Grundlage für diese Expansion bildet die Möglichkeit der Dünnschichtaktivierung von Maschinenteilen mit geladenen Teilchen an einem Beschleuniger. Im Gegensatz zur Aktivierung mit Neutronen an einem Reaktor, bei der ein Teil durchgehend aktiv wird, können mit geladenen Teilchen geeigneter Energie definierte Oberflächen auch größerer Maschinenteile in dünner Schicht aktiviert werden. Der Umgang mit derart aktivierten Teilen ist relativ ungefährlich - die Aktivitäten liegen i.a. in der Größenordnung von einigen zehn bis einigen hundert Mikrocurie.

Der größte Teil der bisherigen Anwendungen bezog sich auf aktiviertes Eisen. Für die Erweiterung der Verschleißmeßtechnik auf andere technisch wichtige Metalle ist zunächst deren Aktivierbarkeit, d.h. die Verteilung der entstehenden Radionuklide sowie ihre Ausbeute, zu untersuchen.

3. G R U N D L A G E N D E R A K T I V I E R U N G

3.1 Energieverlauf geladener Teilchen im Target

Beim Beschuß eines Targets mit den geladenen Teilchen eines Beschleunigers werden die Teilchen durch Wechselwirkungen mit dem Targetmaterial abgebremst. Die Reichweite der Teilchen wird

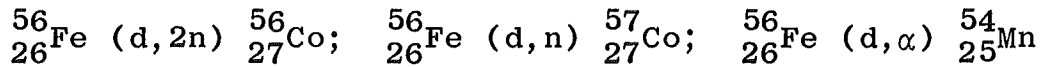
bestimmt vom Targetmaterial, der Anfangsenergie und der Art der Teilchen. Die nachstehend beschriebenen Untersuchungen beziehen sich auf Protonen, Deuteronen und α -Teilchen. Tabelle 1 enthält die mit den Daten des Zyklotrons am Kernforschungszentrum Karlsruhe berechneten [6] Reichweiten für einige wichtige Materialien. Bild 1 zeigt dazu den Verlauf der Energie der Teilchen in den Targetmaterialien. Die Normierung der Eindringtiefe auf die Reichweite gestattet die Darstellung aller Kurven in einem engen Streuband.

Tabelle 1: Reichweiten geladener Teilchen, berechnet

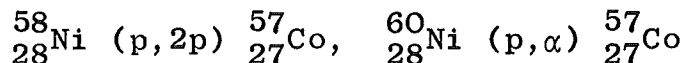
Target	Reichweite X_E in mm		
	Protonen 25,196 MeV	Deuteronen 50,6 MeV	α -Teilchen 100,065 MeV
C	3,388	6,790	3,336
Mg	4,889	9,795	4,808
Al	3,280	6,570	3,225
Si	3,727	7,467	3,665
Ti	2,284	4,574	2,244
V	1,726	3,457	1,696
Cr	1,448	2,900	1,422
Mn	1,436	2,875	1,410
Fe	1,336	2,676	1,312
Co	1,210	2,424	1,188
Ni	1,171	2,344	1,149
Cu	1,226	2,455	1,203
Zn	1,543	3,091	1,515
Nb	1,439	2,881	1,412
Mo	1,221	2,444	1,197
Sn	1,858	3,719	1,821
W	0,817	1,636	0,800
Ir	0,715	1,430	0,700
Pb	1,456	2,913	1,425
Bi	1,686	3,374	1,650

3.2 Kernreaktionen, Anregungsfunktion

Auf dem Weg der Teilchen erfolgen Kernreaktionen mit dem Targetmaterial, wobei Radionuklide gebildet werden. Ein praktisch wichtiger Fall stellt die Bestrahlung von Eisen mit Deuteronen dar:



Es entsteht ein Radionuklidgemisch in der bestrahlten Materialschicht. Die Bildung der einzelnen Nuklide ist abhängig von der Anregungsfunktion $\sigma(E)$, das ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer bestimmten Kernreaktion. Eine Zusammenstellung von 1800 Anregungsfunktionen findet sich in [7], doch sind viele Funktionen noch nicht bekannt. Im allgemeinen enthalten die Veröffentlichungen Anregungsfunktionen für einzelne stabile Targetnuklide. Bei Bestrahlungen für Anwendungen im Maschinenbau kommen jedoch Metalle in natürlicher Isotopenzusammensetzung vor, bestehen also meist aus mehreren stabilen Isotopen. Hier interessiert hauptsächlich Verlauf und Ausbeute der erzeugten Radionuklide, gleichgültig welche unterschiedlichen Reaktionen zu ihrer Bildung führen. Ein bestimmtes Produktnuklid, z.B. ${}^{57}\text{Co}$, kann durch verschiedene Kernreaktionen mit unterschiedlichen stabilen Isotopen eines Elementes gebildet werden, z.B.:



Noch häufiger als reine Metalle finden im Maschinenbau Metallegierungen Verwendung. Bei der Aktivierung einer Legierung kann ein bestimmtes Radionuklid auch aus verschiedenen Elementen erzeugt werden. Als Beispiel sei die Bildung von ${}^{58}\text{Co}$ bei der Aktivierung einer Eisen-Nickel-Legierung mit α -Teilchen erwähnt.

Bei Kenntnis aller für eine bestimmte Aktivierung relevanten Anregungsfunktionen ist eine Abschätzung der entstehenden Aktivität möglich. Wie ein Vergleich der eigenen Untersuchungen mit der zugänglichen Literatur gezeigt hat, ist jedoch die Mehrzahl der hier behandelten Teilchen-Target-Reaktionen nur unvollständig erfaßt.

3.3 Bestimmung der Tiefenverteilung radioaktiver Nuklide

Für die Durchführung von Verschleißmessungen (Durchfluß- und Dünnschichtdifferenzverfahren [1] bzw. für die Festlegung der Aktivierungsbedingungen ist die genaue Kenntnis des Radioaktivitätsverlaufs über der Eindringtiefe erforderlich, im folgenden Tiefenverteilung genannt. Sie kann auf 2 Arten ermittelt werden.

- a) Durch Bestrahlung eines Folienpakets aus dem zu untersuchenden Material und Bestimmung der Aktivität der einzelnen Folien. Das Ergebnis ist die Dichteverteilung der Aktivität (Bild 2, Kurve a).
- b) Durch Bestrahlung eines "dicken" Targets und schichtweises Abschleifen des Targets. Nach jedem Abtrag wird die im dicken Target verbleibende Gesamtaktivität gemessen (Bild 2, Kurve b).

Die Gesamtdicke des Folienpakets bzw. die Länge des dicken Targets muß mindestens der in Tabelle 1 aufgeführten Reichweite X_E entsprechen. Die Dicke einer Folie liegt bei ca. 10 - 100 μm . Die Geometrie der Proben und deren Anordnung bei der Aktivierung wird unter 5.1 erläutert.

In den beiden Kurven von Bild 2 gibt es einen Bereich der Länge K_2 hoher, etwa konstanter spezifischer Aktivität - Kurve a) - entsprechend dem linearen Aktivitätsverlauf der Kurve b). Dieser lineare Bereich wird i.a. für Verschleißmessungen ausgenutzt. Bei der Aktivierung von Maschinenteilen wird dieser Bereich in die Oberfläche der zu aktivierenden Schicht gelegt. Dazu dient eine Abschirmung der Dicke K_1 aus dem gleichen Material bzw. ein anderes Material mit äquivalenter Dicke. In dieser Abschirmung werden die Teilchen bis zur gewünschten Bestrahlungsenergie abgebremst. Falls ein Zyklotron mit variabler Energie zur Verfügung steht entfällt diese Abschirmung. In diesem Fall kann mit Hilfe von Bild 1 die erforderliche Startenergie bestimmt werden (vgl. Beispiel 2 unter 5.3).

3.4 Einfluß von Energieschwankungen des Teilchenstrahls auf die Tiefenverteilung

Die Energie der geladenen Teilchen unterliegt Schwankungen in der Größenordnung von ca. 0,5% der Anfangsenergie. Solche Schwankungen führen zu Veränderungen in der Lage des linearen Bereiches. So wurden für mit Deuteronen bestrahlten Eisentargets Unterschiede in der Lage des linearen Bereiches bis zu 60 μm festgestellt bei einer Gesamtlänge dieses Bereiches von ca. 200 μm . Erste Energiemessungen am Zyklotron zeigen, daß sich die Energie bei Neueinstellungen der Maschine in der angegebenen Weise verändern kann. Man kann jedoch annehmen, daß die Energie während einer mehrstündigen Aktivierung konstant bleibt. Es ist geplant, durch routinemäßige Energiemessungen vor Beginn von Aktivierungen und entsprechende Veränderung der Abschirmdicken K_1 den Einfluß unterschiedlicher Anfangsenergien zu kompensieren.

4. A K T I V I E R U N G V O N M A S C H I N E N T E I L E N

4.1 Strahleigenschaften, Intensitätsverteilung

Der Teilchenstrahl des verwendeten Zyklotrons besitzt eine Intensitätsverteilung ähnlich einer Gauss-Verteilung. Bild 3 zeigt den über die Autoradiographie einer dünnen, punktförmig mit Deuteronen aktivierten Stahlfolie ermittelten Intensitätsverlauf [8] . Die Halbwertsbreite beträgt ca. 5 - 6 mm. Sie kann durch die Einstellung der Strahlrohrlinsen des Zyklotrons nur wenig, um Werte von ca. ± 2 mm verändert werden. Die Form des Strahlquerschnitts ist erfahrungsgemäß von Bestrahlung zu Bestrahlung etwas verschieden. Zur Erzielung einer gleichmäßigen Flächenaktivität in einem Maschinenteil (Target) muß das Teil in engen Schritten vor dem Strahl bewegt werden. Dazu wurde eine Aktivierungsvorrichtung gebaut, mit deren Hilfe eine Reihe

von Bewegungen über Wahlprogramme durchgeführt werden kann (vgl. Bild 4).

4.2 Anordnung Abschirmung - Target

Wie in 3.3 angeführt, wird vor dem zu aktivierenden Teil eine Abbremschicht der Dicke K_1 angeordnet. Diese Abschirmung kann mit dem Teil verbunden, a), oder auch einige Zentimeter entfernt vor dem Teil angebracht sein, b). Im ersten Fall wird die Abschirmung mit dem Teil bewegt (Bild 5). So wurde bisher oft bei zylindrischen Teilen wie Zylinderbüchsen und Lagern verfahren. Im zweiten Fall handelt es sich um eine fest angeordnete Abschirmung, mit der jeweils benötigten Dicke K_1 (Bild 7). Diese Art der Aktivierung ist erforderlich bei Anwendungen, bei denen sich bedingt durch die Bauart oder die Bewegung des Targets der Winkel zwischen Strahl und Target während der Aktivierung verändert. Das gilt z.B. für hypoidverzahnte Zahnräder oder Nockenwellen.

In vielen Fällen werden die Targets so angeordnet, daß Teilchenstrahl und Targetnormale einen Winkel von 0 Grad oder, durch die Geometrie des Targets bedingt, einen kleinen Winkel bilden (z.B. wie in Bild 5). In besonderen Fällen wird das Target absichtlich extrem "schräg" bestrahlt ($\alpha \sim 75^\circ - 85^\circ$), um eine kleinere Eindringtiefe normal zur Targetoberfläche zu erreichen. Gleichzeitig wird eine größere Targetoberfläche vom Strahl erfaßt. Durch diese Maßnahme ergeben sich Vorteile bei den Verschleißmeßverfahren: Erhöhung der Meßempfindlichkeit für das Dünnschichtdifferenzverfahren und Verringerung der Bestrahlungszeiten bzw. Kosten für das Durchflußmeßverfahren.

4.3 Strahlaufweitung

Beim Durchtritt durch die Abschirmung wird der Strahl aufgeweitet. Diese Aufweitung wurde experimentell untersucht. Hinter einer Abschirmung aus Eisen von $K_1 = 2,2$ mm Dicke (üblicher Wert für die Aktivierung von Eisentargets) wurden in gestuften Abständen von 20 - 500 mm Stahlfolien in einer drehbaren Vorrichtung aktiviert. Die Aktivitätsverteilung in den Folien entspricht der Aufweitung des Deuteronenstrahls. Bild 6 zeigt die

Ergebnisse. So ist die Halbwertsbreite von 6 mm (direkt hinter der Abschirmung) auf 60 mm (30 cm entfernt von der Abschirmung) angewachsen.

Im Falle, daß sich Abschirmung und Folie zusammen 30 cm vom Austrittsfenster befinden, vergrößert sich die Halbwertsbreite von 6 mm auf nur 7 mm. Diese Zusammenhänge sind bei der Durchführung von Aktivierungen mit dem externen Strahl entsprechend zu berücksichtigen. So ist darauf zu achten, daß durch Schutzabdeckungen um die zu aktivierende Fläche die Umgebung nicht unbeabsichtigt aktiviert wird. Die Dicke dieser Schutzabdeckungen ist durch K_3 gegeben (vgl. Bild 2).

4.4 Thermische Belastung bei der Aktivierung

Die dem Target zugeführte Energie wird, abgesehen von dem in diesem Zusammenhang vernachlässigbaren Anteil zur Aktivierung, in Wärme umgewandelt.

Die zugeführte Leistung beträgt $P = E \cdot I$

Beispiel: $E = 50$ MeV Deuteronen

$$I = 1 \mu\text{A} = 6,2418 \cdot 10^{12} \frac{\text{d}}{\text{sec}}$$

$$1 \text{ MeV} = 4,45027 \cdot 10^{-20} \text{ kWh}$$

$$P = E \cdot I \sim 50 \text{ Watt.}$$

Diese Leistung wird aufgeteilt in die Abschirmung und das Target. Bei der Aktivierung von Eisen werden für das Target ca. 18 MeV benötigt, so daß in der Abschirmung 32 Watt und im Target 18 Watt erzeugt werden. Target und Abschirmung müssen während der Aktivierung gekühlt werden. Hierbei hat sich eine Luftkühlung bewährt, bestehend aus einem Gebläse mit $\dot{V} = 16 \text{ m}^3/\text{h}$, wobei die Luft in Schläuchen auf Target und Abschirmung geleitet wird.

Gefährdet durch Überhitzung ist vor allen Dingen die punktförmig beaufschlagte feststehende Abschirmung. Aus diesem Grund ist man dazu übergegangen, wegen seiner guten Wärmeleitung Aluminium als Abschirmmaterial zu verwenden. Größere und bewegte Teile mit guter Wärmeabfuhr, wie z.B. Zylinderbüchsen oder Zahn-

räder können mit hohem Strom bestrahlt werden. Bei punktförmig zu aktivierenden Teilen oder Materialien mit niedrigem Schmelzpunkt muß ein kleinerer Strom gewählt werden. Als grober Anhaltswert für kleine, einige zehn Gramm schwere, gekühlte Eisentargets kann mit einer Temperaturerhöhung von ca. $100 - 150^{\circ}\text{C}/\mu\text{A}$ Deuteronen gerechnet werden. Der am Zyklotron extern erreichbare Strom liegt bei ca. $3 \mu\text{A}$.

5. T I E F E N V E R T E I L U N G E N

5.1 Aktivierung, Bestimmung der Tiefenverteilung

Die unten aufgeführten Tiefenverteilungen sind mit dicken Targets ermittelt worden. Dazu wurden aus dem zu untersuchenden Material (Reinheit 99,9 - 99,99%) Stifte von 2 mm Durchmesser und der Länge größer X_E hergestellt. Der Stifthalter aus Eisen konnte mehrere Stifte nebeneinander aufnehmen, wobei ein kleinerer als der Stiftdurchmesser bestrahlt wurde, um eine Aktivierung der Mantellinie zu vermeiden (Bild 7). Es wurde überprüft, daß die Lage des Stiftes im Strahlquerschnitt unabhängig auf die Tiefenverteilung ist. Es ist somit ohne Einfluß auf die Tiefenverteilung, ob der Stift im Intensitätsmaximum des Strahls oder mit einer geringeren Intensität aktiviert wurde. Für die Aktivierung genügt ein Stromintegral von ca. $5 - 15 \mu\text{A min}$.

Bei den üblichen Aktivierungen zur Durchführung von Verschleißmessungen ist die Kenntnis der Startenergie für den Beginn des linearen Bereichs erforderlich. Für Deuteronen werden oft Startenergien in der Größenordnung von ca. 20 MeV benötigt. Aus diesem Grunde wurden in mehreren Fällen entsprechende Abschirmungen vor den Stift angeordnet, um den Zeitaufwand der Auswertung zu verkleinern. Doch sollen die Untersuchungen auf den ganzen Energiebereich ausgedehnt werden, da sich neue Anwendungsmöglichkeiten abzeichnen und in manchen Fällen auch

eine kostengünstigere Aktivierung möglich wird.

Die aktivierte Probe wurde in einen Kunstharzblock 25 \emptyset x 10 mm eingegossen und in einem Schleifgerät in Schritten von ca. 2/100 mm abgetragen (Bild 8). Die Messung erfolgte an einem Halbleiterdetektor in Verbindung mit einem rechnergesteuerten 4096-Kanal-Impulshöhenanalysator. Dabei war die Probe mit der abgeschliffenen Seite dem Detektor zugewandt. Diese Anordnung entspricht den Gegebenheiten bei Verschleißmessungen nach dem Dünnschichtdifferenzverfahren. Bei der Auswertung ergeben sich als direktes Ergebnis die Impulsraten der einzelnen Peaks eines Spektrums (Bilder 9-26). Aufgetragen ist der Verlauf der Impulsraten (meist für die größten Peaks) des im Material erzeugten Radionuklidgemisches. Aus den zusätzlichen Angaben über Aktivierungs- und Auswertedatum kann abgeschätzt werden, ob in dem dazwischen liegenden Zeitraum entsprechend kurzlebige Isotope bereits abgeklungen waren.

Auf die Angabe der Aktivität (statt der Impulsraten) an dieser Stelle wurde aus folgendem Grund verzichtet: Bei der Aktivierung eines Stiftes wird nur ein Bruchteil des Strahlquerschnitts erfaßt. Es könnte also nur eine Angabe über das Aktivitäts-Mengenverhältnis der einzelnen Radionuklide gegeben werden. Zur Bestimmung der Aktivitätsausbeute müßte der Stift eine größere Stirnfläche besitzen als dem Strahlquerschnitt entspricht. Solche Stifte waren mit den vorhandenen Mitteln nicht auswertbar. Die Ausbeute wurde deshalb getrennt bestimmt (vgl. 5.2 und Tabelle 2).

Im folgenden ist eine Zusammenstellung der bisher gemessenen Tiefenverteilungen gegeben.

Target	gel. Teilchen	Abdeckung (mm) Stahl	Bild-Nummer	Tabelle 2 Seite
Ti	d	2,3	9	16
	p	1,0	10	16
	α	---	11	16
Cr	d	---	12, 12a	16
	p	---	13	16
	α	---	14	17
Fe	d	2,0	15	17
	p	---	16	17
	α	0,5	17	17
Cu	d	2,0	18	18
	p	---	19	18
	α	0,5	20	18
Zn	d	2,0	21	18
	p	---	22	18
	α	---	23	19
Mo	d	2,0	24	19
	p	---	25	19
	α	---	26	20

5.2 Aktivitätsausbeute

Zur Bestimmung der Aktivitätsausbeute wurden ebenfalls dicke Targets aus dem jeweiligen Material bestrahlt. Der Durchmesser dieser Targets war größer als der Strahldurchmesser. Die Ausbeute ist bezogen auf das Stromintegral

$$A = \frac{A_1 \lambda}{I (1 - e^{-\lambda t})} e^{-\lambda t_1}$$

A Ausbeute in $\mu\text{C}/\mu\text{Ah}$, bezogen auf Bestrahlungsende

A_1 Aktivität zur Zeit t_1

λ Zerfallskonstante $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$

I Strom der geladenen Teilchen in μA

t Bestrahlzeit

t_1 Zeit zwischen Bestrahlungsende und Aktivitätsmessung

In der Tabelle 2 ist die Aktivitätsausbeute für die Tiefenverteilungen angegeben. Aus der Zeitangabe zwischen Aktivierung und Messung kann abgeschätzt werden, ob besonders kurzlebige Isotope nicht mehr erfaßt werden. In mehreren Fällen enthält die Tabelle 2 mehr Isotope als in den Tiefenverteilungen angegeben. Das liegt an dem oft längeren Zeitraum zwischen Aktivierung und Bestimmung der Tiefenverteilung. Die Daten für die einzelnen Nuklide können z.B. [9] entnommen werden.

Die Genauigkeit in der Aktivitätsangabe hängt von der Genauigkeit der einzelnen in der Gleichung stehenden Größen ab. Dabei besteht die größte Unsicherheit in der Angabe des Stromintegrals. Da noch keine Einrichtung für die Messung des Stromintegrals vorhanden war, mußte während der Aktivierung in kurzzeitigen Abständen (ca. 1 Minute) der Strom gemessen werden. Die Stromschwankungen innerhalb von ca. 5 Minuten lagen z.T. in der Größenordnung von $\pm 25\%$. Dazu kommen noch Schwankungen in der Anfangsenergie (vgl. 2.4), die in dem meist interessierenden linearen Bereich zu Fehlern in der Gesamtaktivität von weiteren 10 - 15% führen können. Somit handelt es sich bei den Angaben zur Isotopenproduktion nur um ungefähre Anhaltswerte. Bei der Aktivierung von Maschinenteilen werden immer Materialproben zu Eichzwecken mitbestrahlt, vgl. Bild 5, so daß die Genauigkeit von Messungen nicht unter obigen Schwierigkeiten leidet. Die Meßmöglichkeiten am Zyklotron bezüglich Energie und Strom werden zur Zeit noch weiter verbessert.

5.3 Beispiele zur Aktivitätsberechnung

Die bei der Aktivierung eines Targets zu erwartende Aktivität kann mit Hilfe der Tabelle 2 in Verbindung mit den Tiefenverteilungen (Bilder 9 - 26) bestimmt werden. Es gilt:

$$A_2 = \frac{A \cdot I \cdot (1 - e^{-\lambda t})}{\lambda} \quad (1)$$

A_2 Aktivität nach Bestrahlungsende

A Aktivitätsausbeute, siehe Tabelle 2

I, t, λ siehe 5.2

Erfahrungsgemäß ist die Bestrahlzeit für Maschinenteile i.a. kleiner 10% der Halbwertszeit. Dann gilt vereinfacht

$$A_2 \triangleq A \cdot I \cdot t \quad (2)$$

Beispiel 1

gegeben:

Bei einem Maschinenteil aus Titan soll nach dem Dünnschicht-differenzverfahren (DDV, [1]) Verschleiß gemessen werden. Eine Gesamtaktivität von 100 μC ist gefordert.

gesucht:

Welche Teilchenart ist zweckmäßig, wie lange muß aktiviert werden ?

Lösung:

Für die Anwendung des Dünnschichtdifferenzverfahrens ist es i.a. günstig, wenn nur ein einzelnes Radionuklid in der aktivierten Schicht enthalten ist. Deshalb werden Protonen verwendet (Tabelle 2 und Bild 10). Aus Gründen der Erwärmung des Targets soll der Protonenstrom 1,2 μA nicht überschreiten.

Aus Gleichung 2

$$t = \frac{A_2}{A \cdot I} = \frac{100 \mu\text{C}}{330 \frac{\mu\text{C}}{\mu\text{Ah}} \cdot 1,2 \mu\text{A}}$$

$$t = 0,25 \text{ h}$$

=====

$$I = 1,2 \mu\text{A}$$

$$A = 330 \mu\text{C}/\mu\text{Ah}$$

$$A_2 = 100 \mu\text{C}$$

Abdeckung 1,0 mm Fe

Beispiel 2

gegeben:

Eine Lagerwelle aus Stahlguß soll auf einer Fläche von 10 cm^2 mit Deuteronen aktiviert werden. Gefordert ist ein linearer Bereich von 150 μm mit einer spezifischen Aktivität von 0,3 mC/g an ^{56}Co . Der Strom darf 3 μA betragen, da die Welle bewegt und gekühlt wird.

Die Abschirmung sei feststehend.

gesucht:

- a) Wie dick muß die Abschirmung aus Aluminium sein ?
- b) Wie lange muß aktiviert werden ?
- c) Welche Gesamtaktivität entsteht bei Bestrahlungsende ?

Lösung:

Zu a) Aus Bild 15 entnimmt man: Der lineare Bereich endet bei 420 μm Abtrag; $420 \mu\text{m} - 150 \mu\text{m} = 270 \mu\text{m}$. Die gesamte Abdeckung aus Eisen beträgt also $2,0 \text{ mm} + 0,27 \text{ mm} = 2,27 \text{ mm}$. Wegen des hohen Stromes von 3 μA soll eine Abschirmung aus Aluminium verwendet werden. Deren äquivalente Dicke wird folgendermaßen bestimmt.

$$\text{Aus Tabelle 1 für Fe: } X_E = 2,676 \text{ mm} \quad \frac{X}{X_E} = \frac{2,27 \text{ mm}}{2,676 \text{ mm}} = 0,848$$

In Bild 1 ergibt eine Parallele zur Ordinate bei $\frac{X}{X_E} = 0,848$ zwei Schnittpunkte mit den Begrenzungslinien des Streubandes:

$$E_{\text{Al}} = 17,56 \text{ MeV (OZ=13)}$$

$$E_{\text{Pb}} = 15,66 \text{ MeV (OZ=82)}$$

Man interpoliert näherungsweise mit den Ordnungszahlen die für Eisen (OZ=26) geltende Energie. Es ergibt sich $E_{\text{Fe}} = 17,2 \text{ MeV}$.

Der Schnittpunkt einer Parallelen zur Abszisse bei dieser Energie mit der Begrenzungslinie für Aluminium ergibt $\frac{X}{X_E} = 0,852$. Aus Tabelle 1 für Al: $X_E = 6,57 \text{ mm}$ $X = 0,852 \cdot 6,57 \text{ mm} = 5,59 \text{ mm}$.
=====

Zu b)

Masse der Schicht mit konstanter spezifischer Aktivität:

$$M = F \cdot t \cdot \rho = 10 \text{ cm}^2 \cdot 0,015 \text{ cm} \cdot 7,8 \text{ g/cm}^3 = 1,17 \text{ g}.$$

Aus Bild 15 entnimmt man, daß im Bereich zwischen 270 μm und 420 μm ca. 32% der Gesamtaktivität an ^{56}Co enthalten sind. Somit folgt für die Bestrahlungsdauer nach Gl. 2:

$$t = \frac{A_2}{A' \cdot I}$$

$$A_2 = A_{\text{spez}} \cdot M \text{ mit } A_{\text{spez}} = 300 \mu\text{C/g}$$

$$A' = A \cdot 0,32 \text{ mit } A = 58 \mu\text{C}/\mu\text{Ah}$$

$$t = \frac{300\mu\text{C} \cdot 1,17 \text{ g} \cdot \mu\text{Ah}}{\text{g} \cdot 58\mu\text{C} \cdot 0,32 \cdot 3\mu\text{A}} = \underline{\underline{6,3 \text{ h}}}$$

Unberücksichtigt ist bei dieser Rechnung geblieben, daß aufgrund der Intensitätsverteilung des Strahls zur Erreichung einer gleichmäßigen Aktivität eine etwas größere Fläche als die eigentliche "Nutzfläche" aktiviert werden muß. Dabei sind entsprechende Schutzabdeckungen vorzusehen (vgl. Bild 5). In vielen Fällen ist ein Zuschlag zur Bestrahlungszeit von ca. 20 - 50% erforderlich.

Zu c)

Die Gesamtaktivität wird aus Bild 15 in Verbindung mit Tabelle 2 bestimmt. Maßgebend sind die Werte bei dem Abtrag von 270 μm .

Es ergeben sich für ^{56}Co 54%; ^{57}Co 86%; ^{58}Co 80% geschätzt; ^{54}Mn 78%.

$$^{56}\text{Co}: A_2 = 58 \mu\text{C}/\mu\text{Ah} \cdot 0,54 \cdot 3\mu\text{A} \cdot 6,3 \text{ h} = \underline{\underline{592 \mu\text{C}}}$$

$$^{57}\text{Co}: A_2 = 10 \mu\text{C}/\mu\text{Ah} \cdot 0,86 \cdot 3\mu\text{A} \cdot 6,3 \text{ h} = \underline{\underline{162 \mu\text{C}}}$$

$$^{58}\text{Co}: A_2 = 1 \mu\text{C}/\mu\text{Ah} \cdot 0,8 \cdot 3\mu\text{A} \cdot 6,3 \text{ h} = \underline{\underline{15 \mu\text{C}}}$$

$$^{54}\text{Mn}: A_2 = 1,1\mu\text{C}/\mu\text{Ah} \cdot 0,78 \cdot 3\mu\text{A} \cdot 6,3 \text{ h} = \underline{\underline{16 \mu\text{C}}}$$

Tabelle 2 Aktivitätsausbeute bei der Aktivierung mit geladenen Teilchen

Target	geladene Teilchen	Abschirmung vor dem Target (mm) Eisen	Anfangsenergie (MeV)	Zeit zwischen Aktivierung und Messung (Tage)	Entstehende Isotope	Halbwertszeit (Tage)	Ausbeute bezogen auf Bestrahlungs- ende ($\mu\text{C}/\mu\text{Ah}$)
Ti	d	2,3	16	15	^{48}V ^{46}Sc	16 84	130 4,5
Ti	p	1,0	11	8	^{48}V	16	330
Ti	α	---	100	9	$^{44\text{m}}\text{Sc}$ ^{46}Sc ^{47}Sc ^{48}V ^{51}Cr	2,44 84 3,43 16 27,8	335 14 144 161 26
Cr	d	---	50	15 15 15 172 172	^{51}Cr ^{52}Mn ^{48}V ^{54}Mn ^{46}Sc	27,8 5,7 16 303 84	1360 960 190 3 2,5
Cr	p	---	25	14	^{51}Cr ^{52}Mn ^{48}V	27,8 5,7 16	565 390 14

Tabelle 2 Aktivitätsausbeute bei der Aktivierung mit geladenen Teilchen

Target	geladene Teilchen	Abschirmung vor dem Target (mm) Eisen	Anfangsenergie (MeV)	Zeit zwischen Aktivierung und Messung (Tage)	Entstehende Isotope	Halbwertszeit (Tage)	Ausbeute bezogen auf Bestrahlungs- ende ($\mu\text{C}/\mu\text{Ah}$)
Cr	α	---	100	9	^{51}Cr	27,8	195
					^{52}Mn	5,7	370
					^{54}Mn	303	6
					^{48}V	16	68
					^{47}Sc	3,43	15
Fe	d	2	22	15	^{56}Co	77	58
					^{57}Co	270	10
					^{58}Co	71	1,1
					^{54}Mn	303	1
Fe	p	---	25	8	^{56}Co	77	122
					^{57}Co	270	1,2
					^{52}Mn	5,7	74
Fe	α	0,5	76	9	^{56}Co	77	14,2
					^{57}Co	270	13,4
					^{58}Co	71	37
					^{52}Mn	5,7	53
					^{54}Mn	303	3,1

Tabelle 2 Aktivitätsausbeute bei der Aktivierung mit geladenen Teilchen

Target	geladene Teilchen	Abschirmung vor dem Target (mm) Eisen	Anfangsenergie (MeV)	Zeit zwischen Aktivierung und Messung (Tage)	Entstehende Isotope	Halbwertszeit (Tage)	Ausbeute bezogen auf Bestrahlungs- ende ($\mu\text{C}/\mu\text{Ah}$)
Cu	d	2	22	19	^{65}Zn	245	22
Cu	p	---	25	14	^{65}Zn	245	15
Cu	α	0,5	76	9	^{65}Zn	245	16
					^{57}Co	270	0,5
					^{58}Co	71	2,9
					^{67}Ga	3,25	190
					^{67}Cu	2,5	31
Zn	d	2	22	15	^{65}Zn	245	19,5
					^{67}Ga	3,25	440
					^{67}Cu	2,54	140
Zn	p	---	25	14	^{65}Zn	245	30
					^{67}Ga	3,25	710
					^{67}Cu	2,54	180

Tabelle 2 Aktivitätsausbeute bei der Aktivierung mit geladenen Teilchen

Target	geladene Teilchen	Abschirmung vor dem Target (mm) Eisen	Anfangsenergie (MeV)	Zeit zwischen Aktivierung und Messung (Tage)	Entstehende Isotope	Halbwertszeit (Tage)	Ausbeute bezogen auf Bestrahlungs- ende ($\mu\text{C}/\mu\text{Ah}$)
Zn	α	---	100	≥ 9	^{65}Zn	245	21
					^{67}Ga	3,25	580
					^{67}Cu	2,54	80
					^{69}Ge	1,66	520
					^{58}Co	71	6
					^{57}Co	270	1,1
Mo	d	2	22	≥ 19	$^{95\text{m}}\text{Tc}$	61	8,6
					^{96}Tc	4,35	510
					$^{92\text{m}}\text{Nb}$	10,16	6
					^{95}Nb	35	2,1
Mo	p	---	25	≥ 14	$^{95\text{m}}\text{Tc}$	61	21
					^{96}Tc	4,35	595
					$^{92\text{m}}\text{Nb}$	10,16	3,8
					^{95}Nb	35	2,2
					^{88}Zr	85	0,32

Tabelle 2 Aktivitätsausbeute bei der Aktivierung mit geladenen Teilchen

Target	geladene Teilchen	Abschirmung vor dem Target (mm) Eisen	Anfangsenergie (MeV)	Zeit zwischen Aktivierung und Messung (Tage)	Entstehende Isotope	Halbwertszeit (Tage)	Ausbeute bezogen auf Bestrahlungs-ende ($\mu\text{C}/\mu\text{Ah}$)
Mo	α	---	100	≥ 20	$^{95\text{m}}\text{Tc}$	61	1,95
					^{96}Tc	4,35	286
					$^{92\text{m}}\text{Nb}$	10,16	4,2
					^{95}Nb	35	1,5
					^{88}Zr	85	4,8
					^{89}Zr	3,29	110
					^{97}Ru	2,88	385

6. B I L D A N H A N G

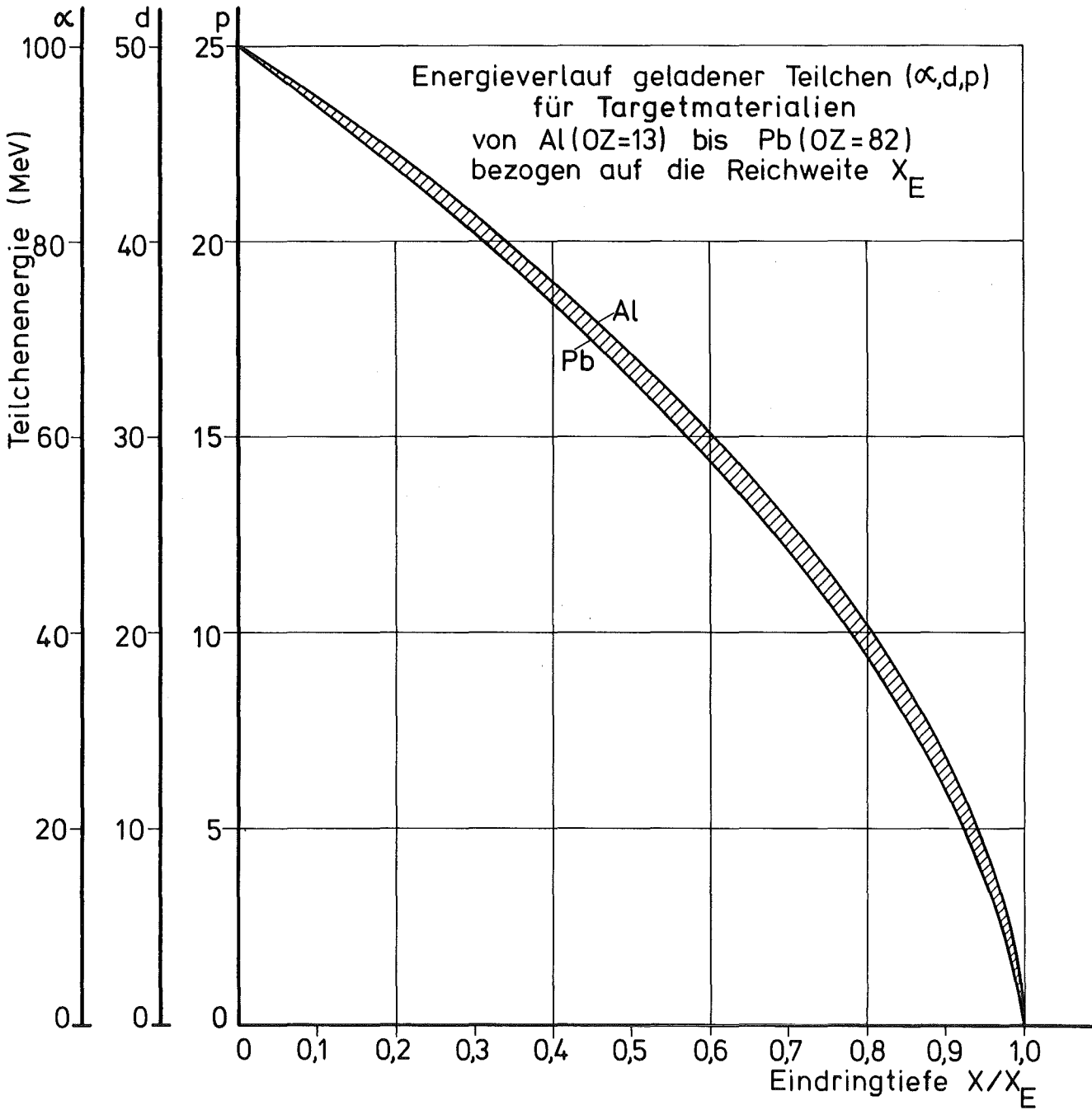
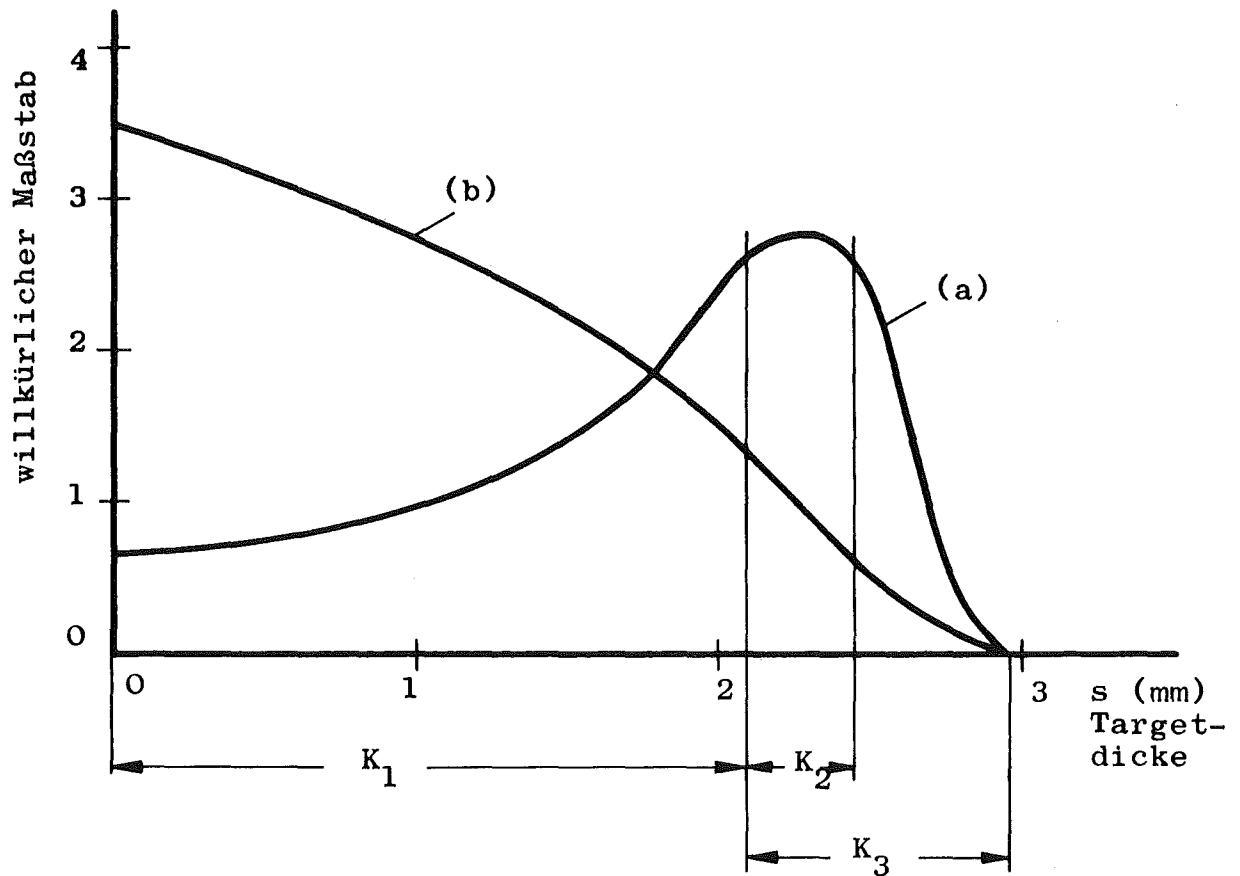


Bild 1

Aktivität

a) Dichte $\frac{dA}{ds}$

b) Gesamt $A(s)$



- a) Aktivitätsdichte, ermittelt mit Folienpaket
- b) Verlauf der Gesamtaktivität, mit dickem Target bestimmt

K_1 Abschirmdicke

K_2 Linearer Bereich

K_3 Dicke der aktiven Schicht im Target

Bild 2 Tiefenverteilung, schematisch

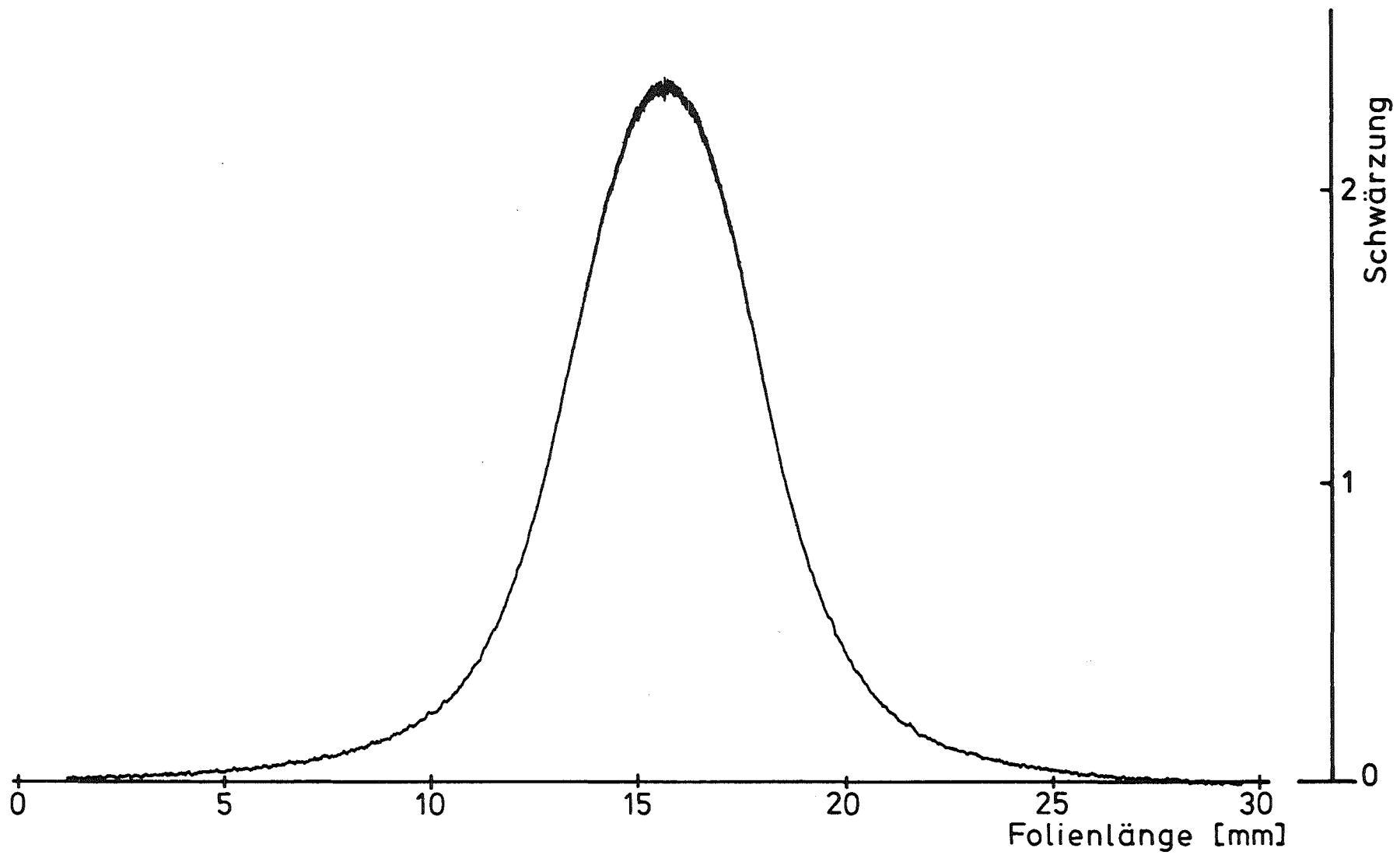


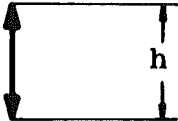
Bild 3 Intensitätsverteilung des Strahls geladener Teilchen



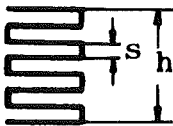
1) Drehung 360°



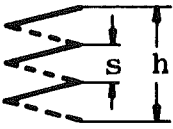
2) Winkeldrehung $6^\circ < \alpha < 355^\circ$



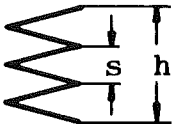
3) Hub $6 \text{ mm} < h < 120 \text{ mm}$



4) Zeile aus 2) und 3) $s = 0,5; 1; 2 \text{ mm}$
 $6 \text{ mm} < h < 120 \text{ mm}$



5) Schraubenlinie aus 1) und 3) $1 \text{ mm} < s < 5 \text{ mm}$
 $6 \text{ mm} < h < 120 \text{ mm}$



6) Zick-Zack-Bewegung aus 2) und 3)
 $1 \text{ mm} < s < 5 \text{ mm}$
 $6 \text{ mm} < h < 120 \text{ mm}$

Bild 4 Prinzipskizze der Bewegungen des Bestrahlungsgerätes

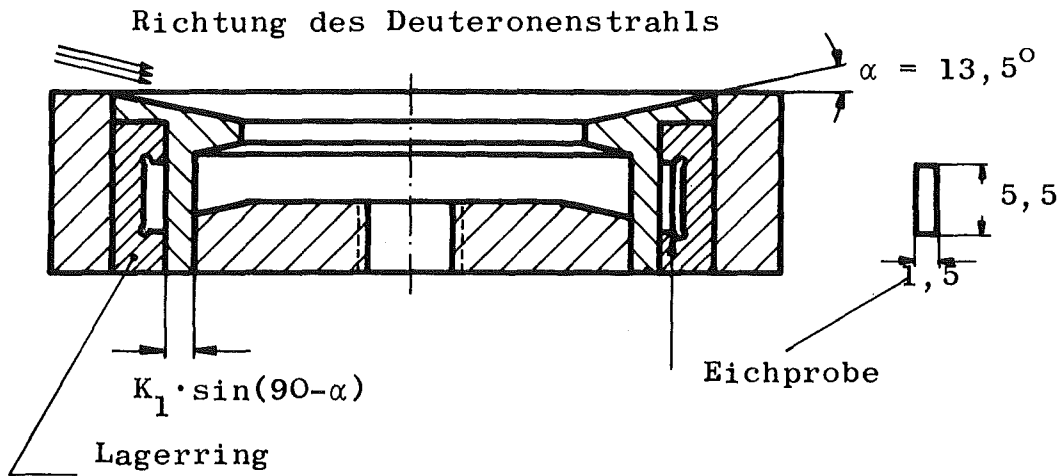


Bild 5 Vorrichtung zur Aktivierung der Lauffläche eines Rollenlager-Außenrings

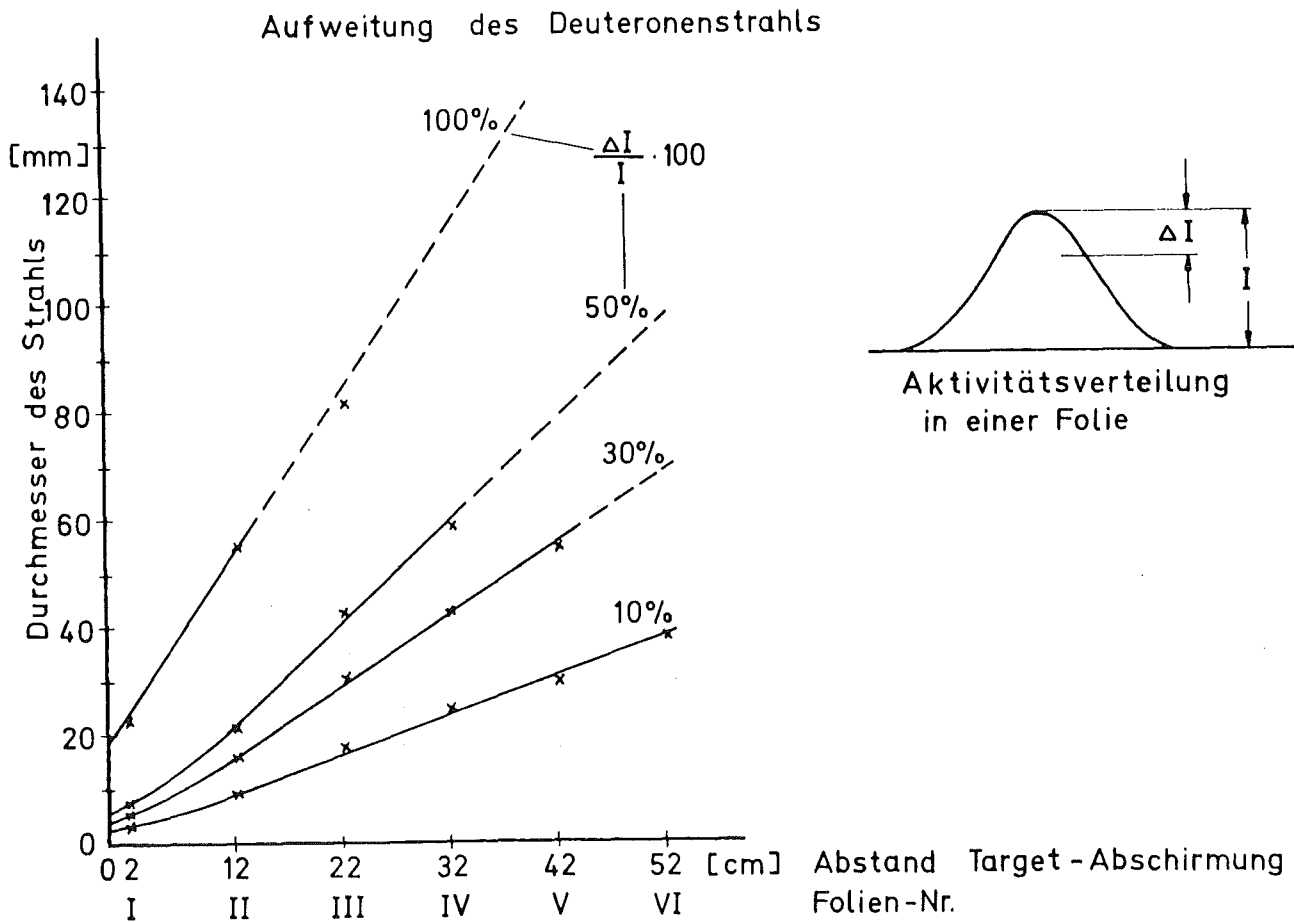


Bild 6 Aufweitung des Deuteronenstrahls in Abhängigkeit vom Abstand zur Abschirmung

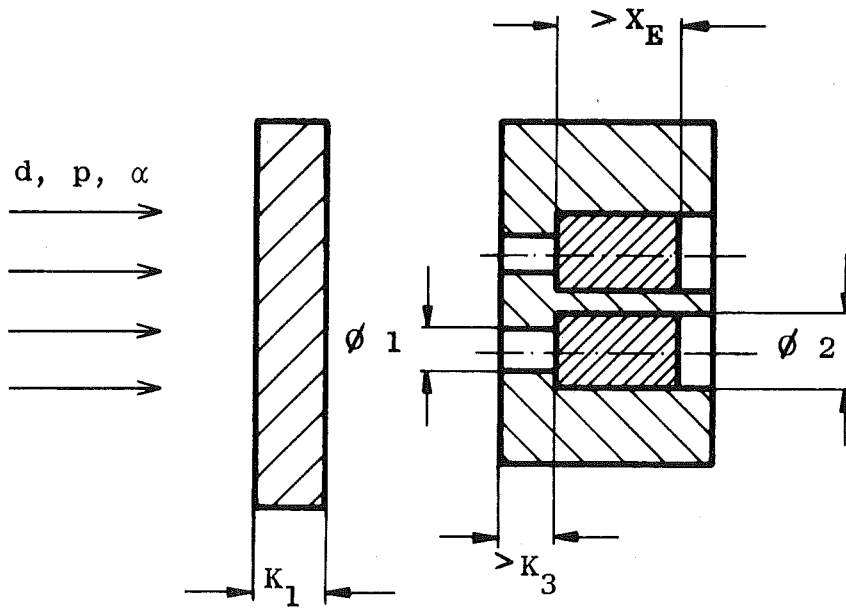


Bild 7 Aktivierung von Stiften (dicken Targets) zur Bestimmung der Tiefenverteilung

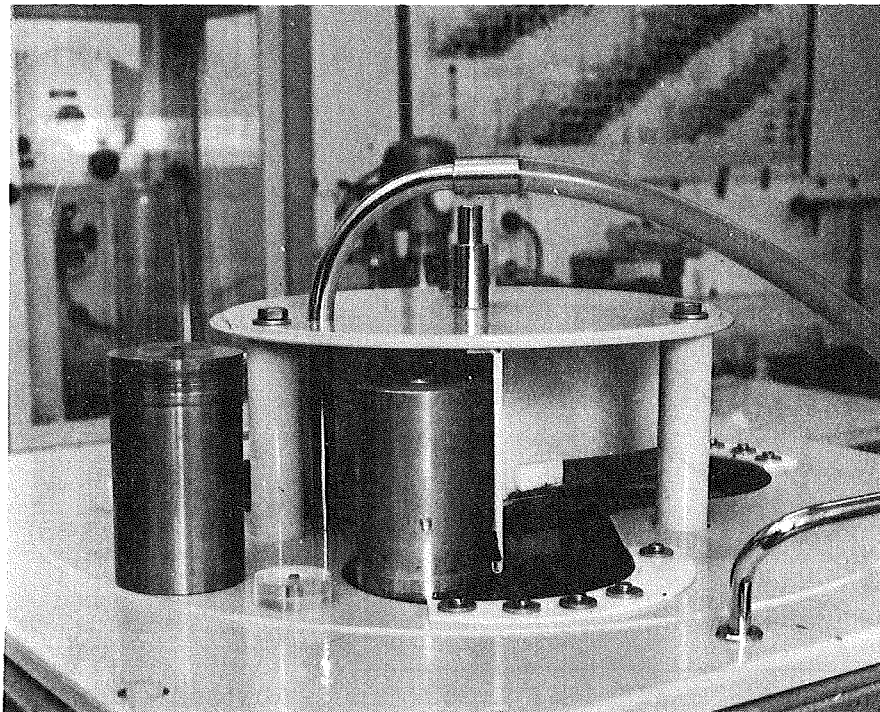


Bild 8 Abschleifen von dicken Targets

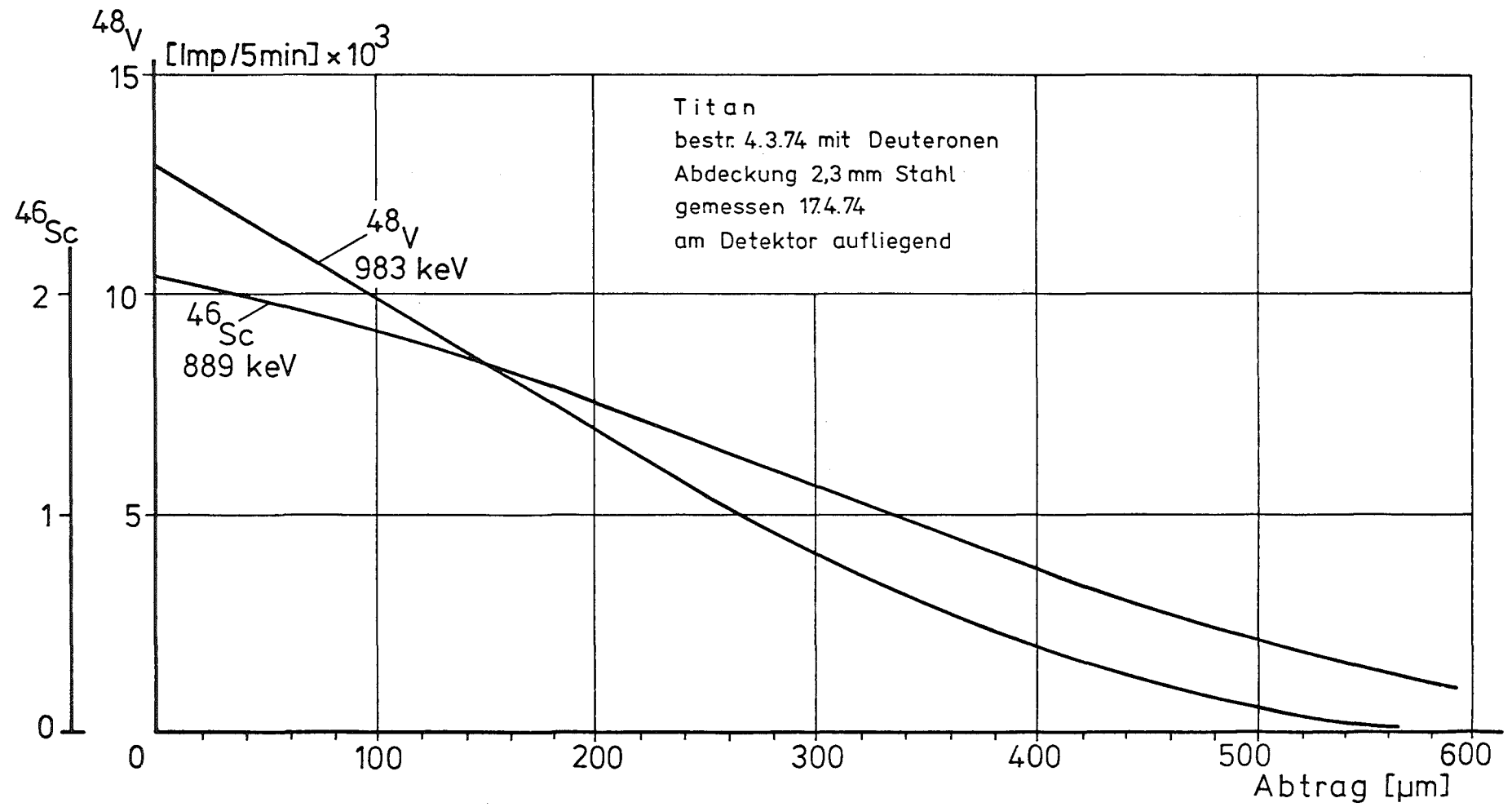


Bild 9

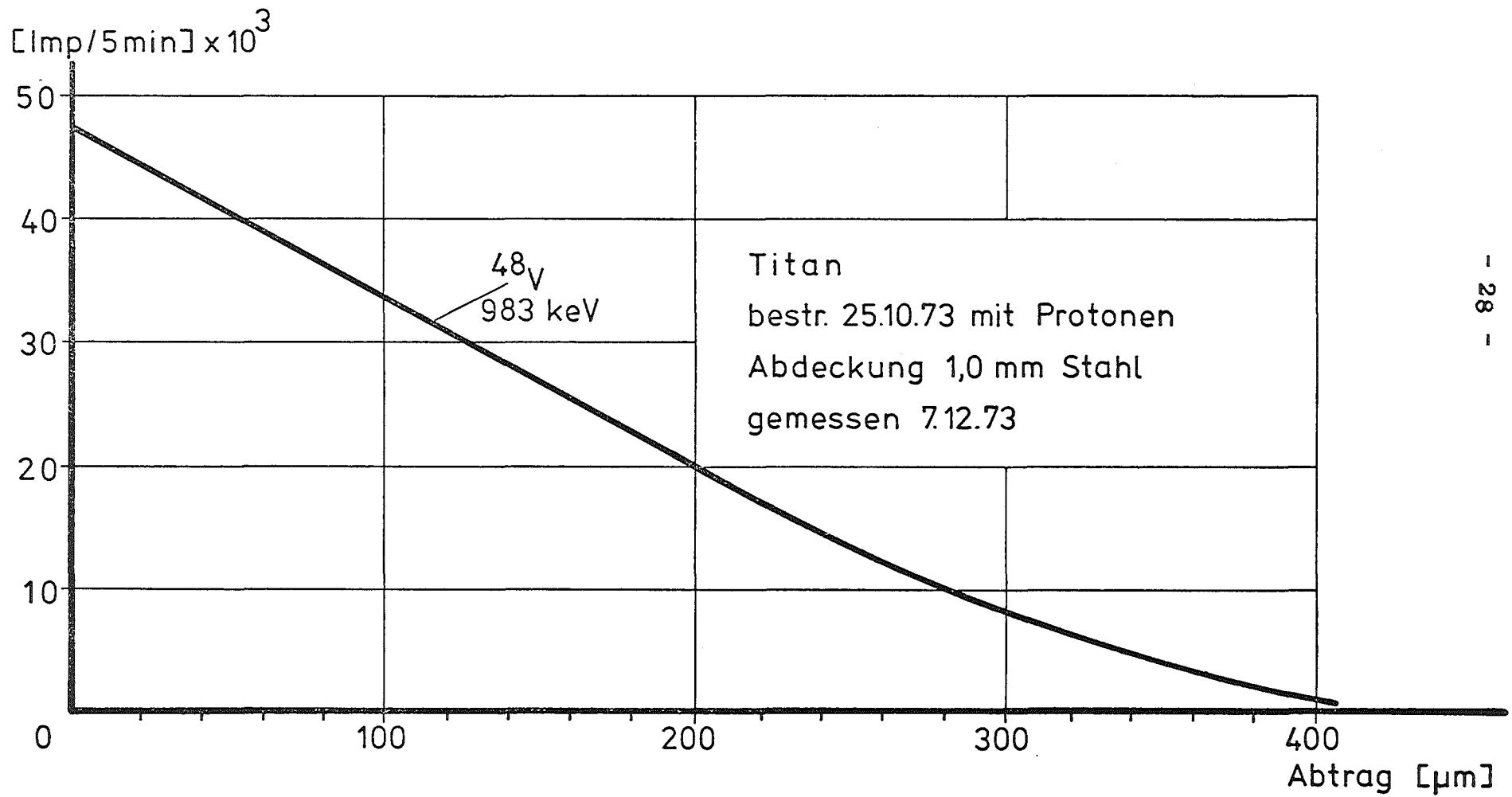


Bild 10

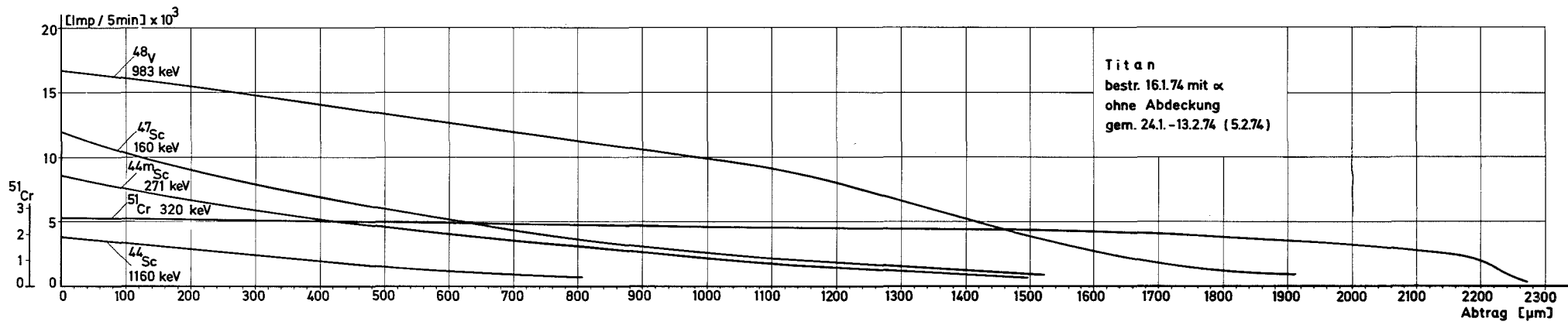


Bild 11

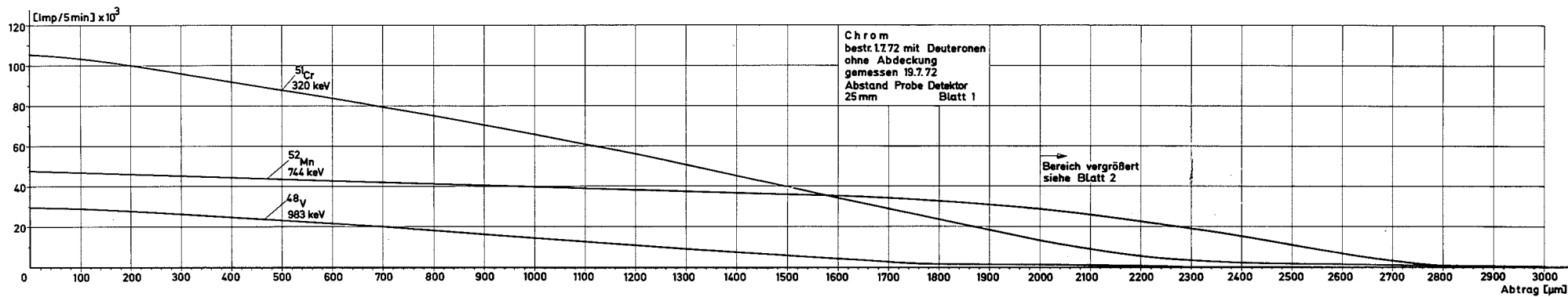


Bild 12

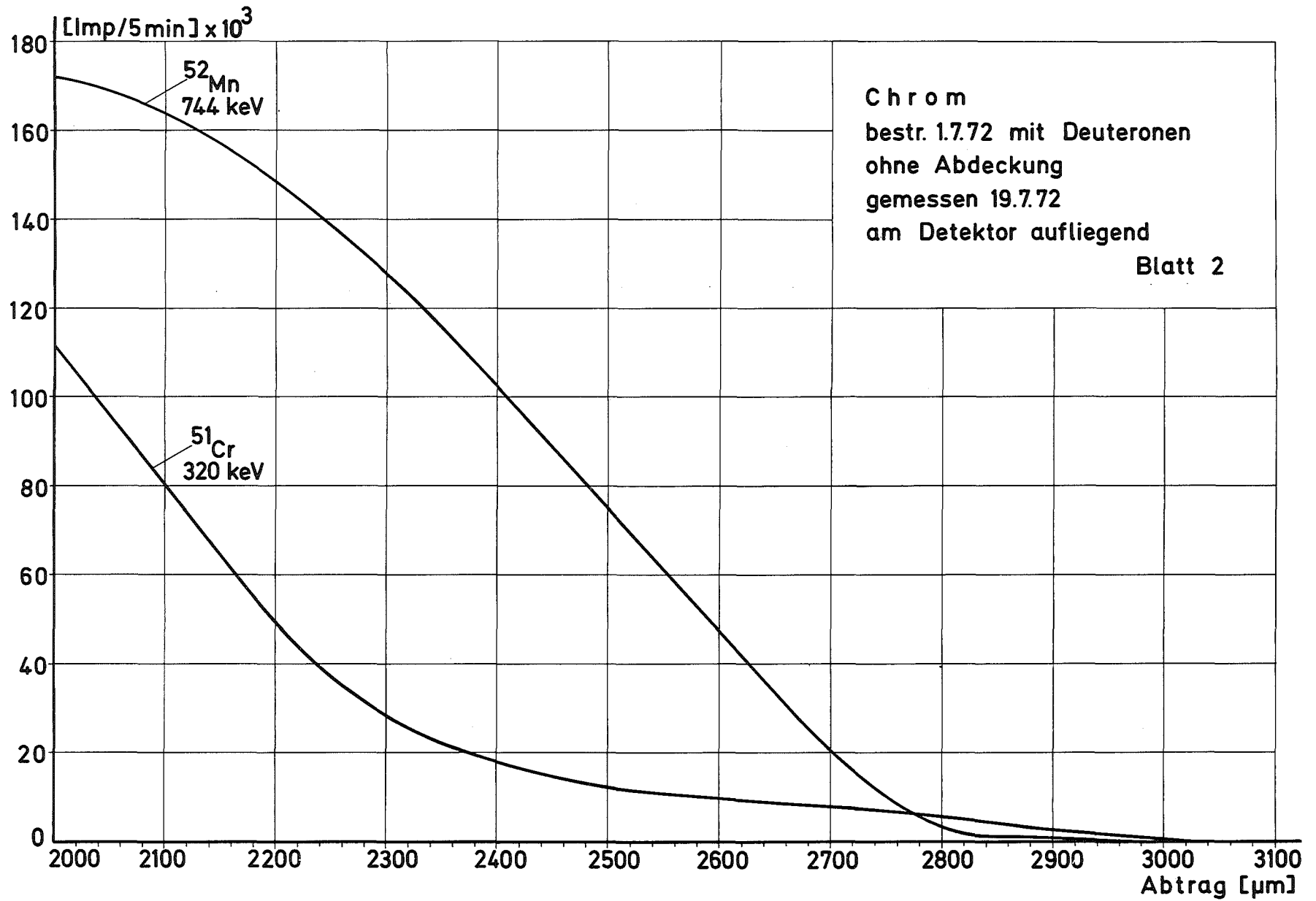


Bild 12a

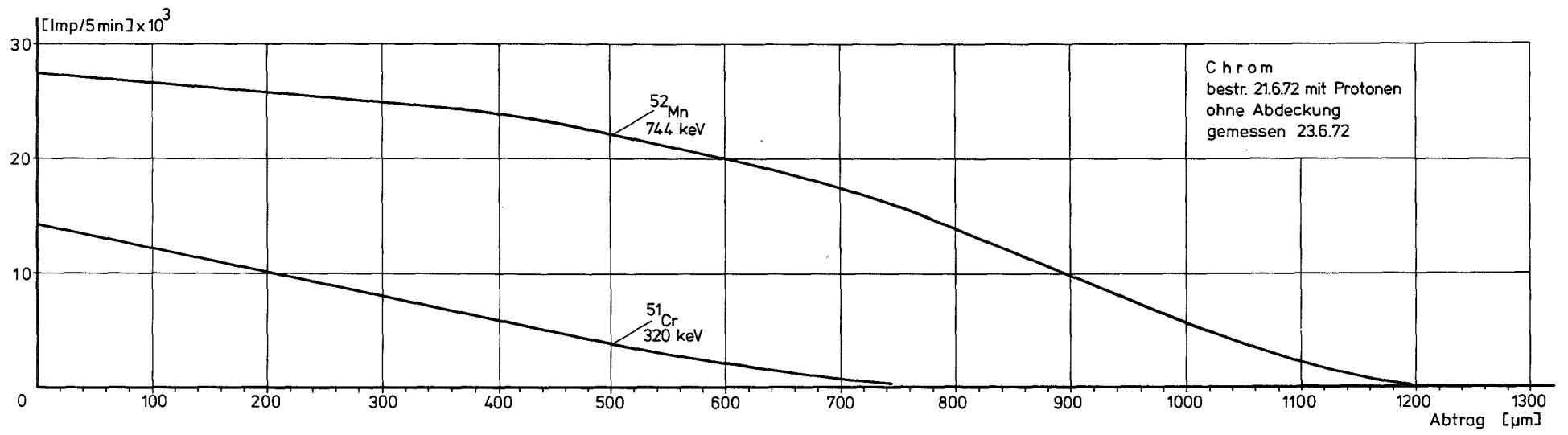


Bild 13

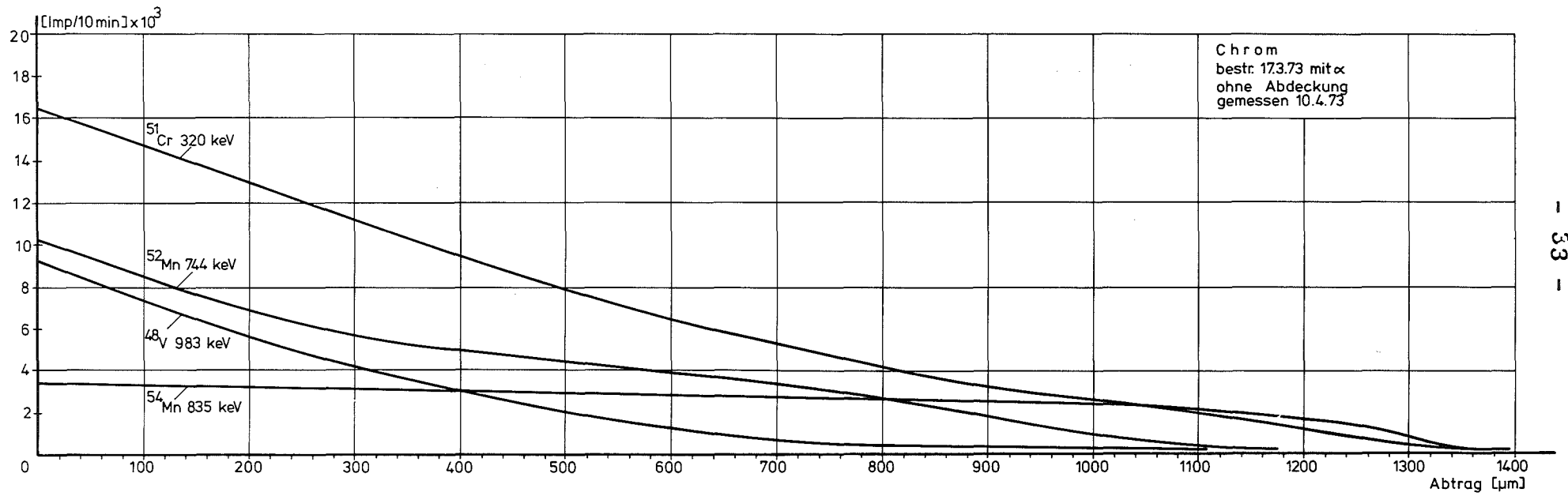


Bild 14

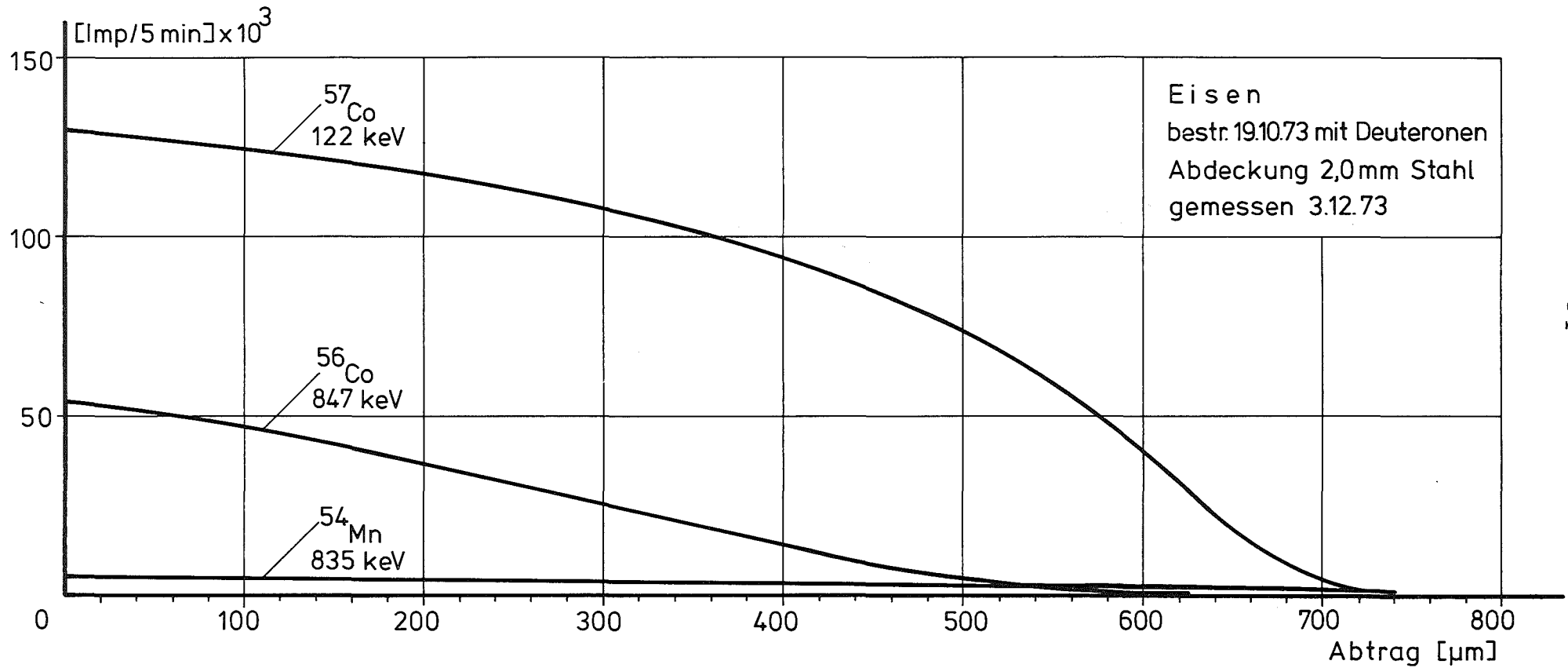


Bild 15

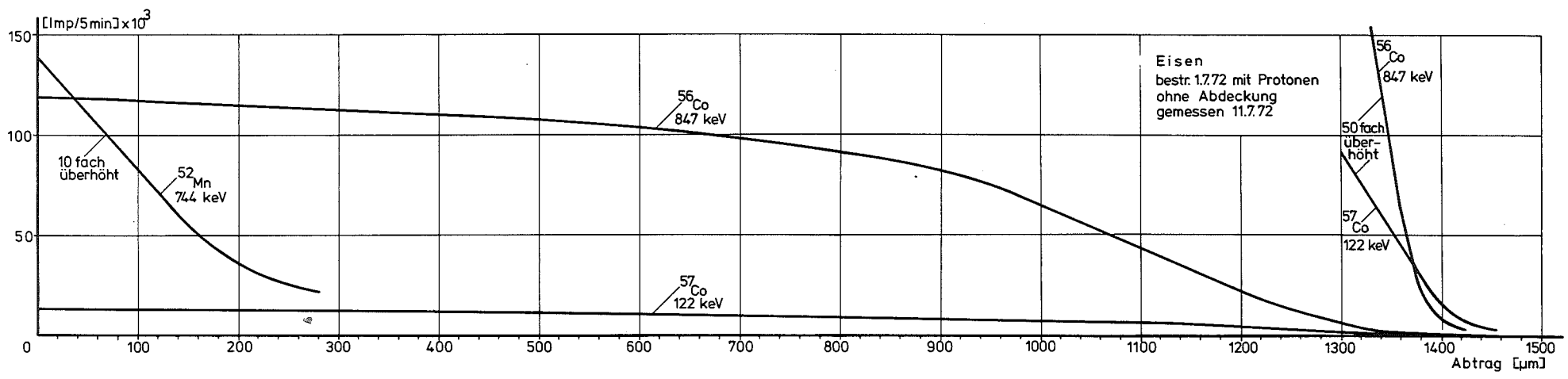


Bild 16

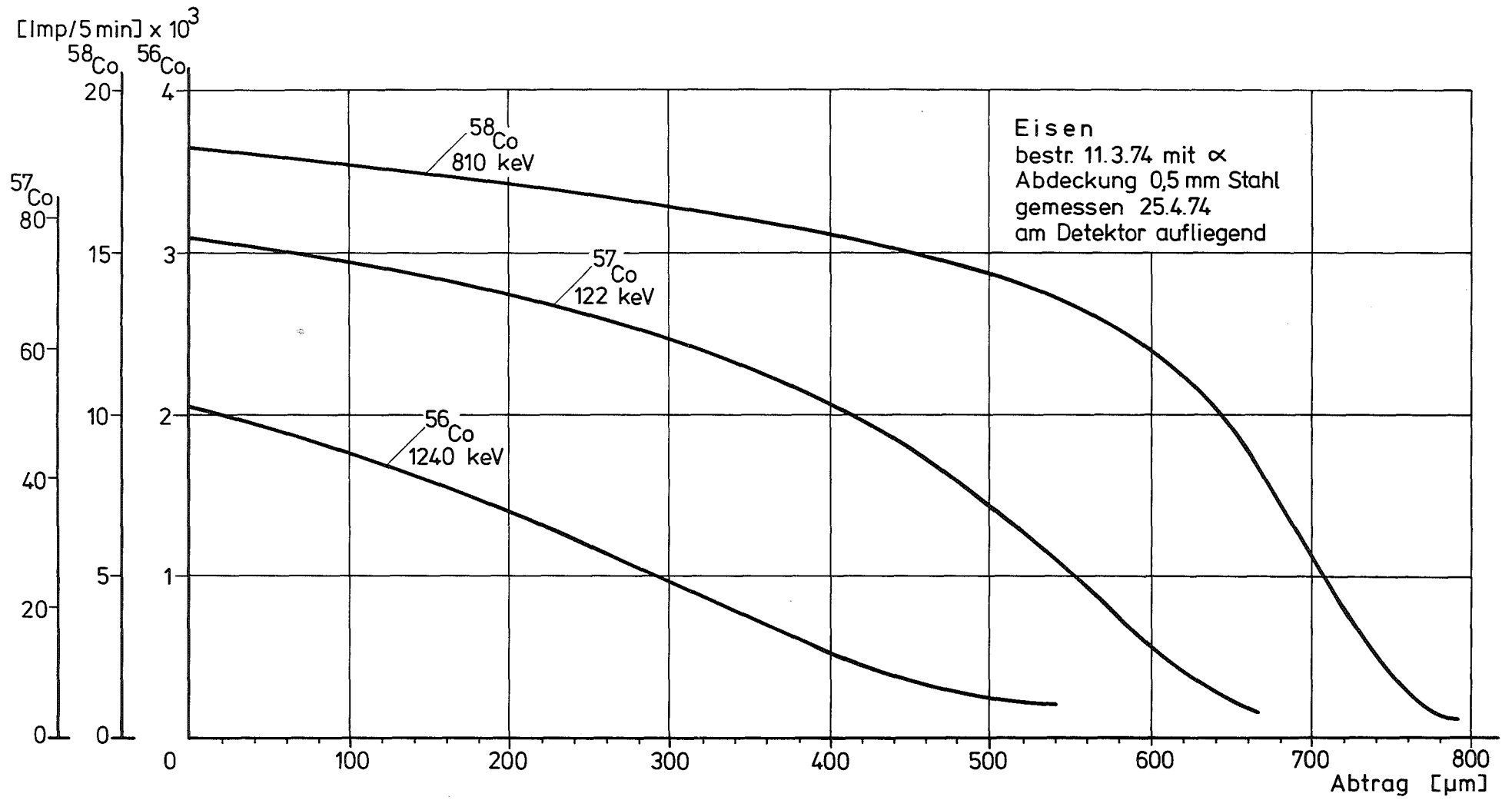


Bild 17

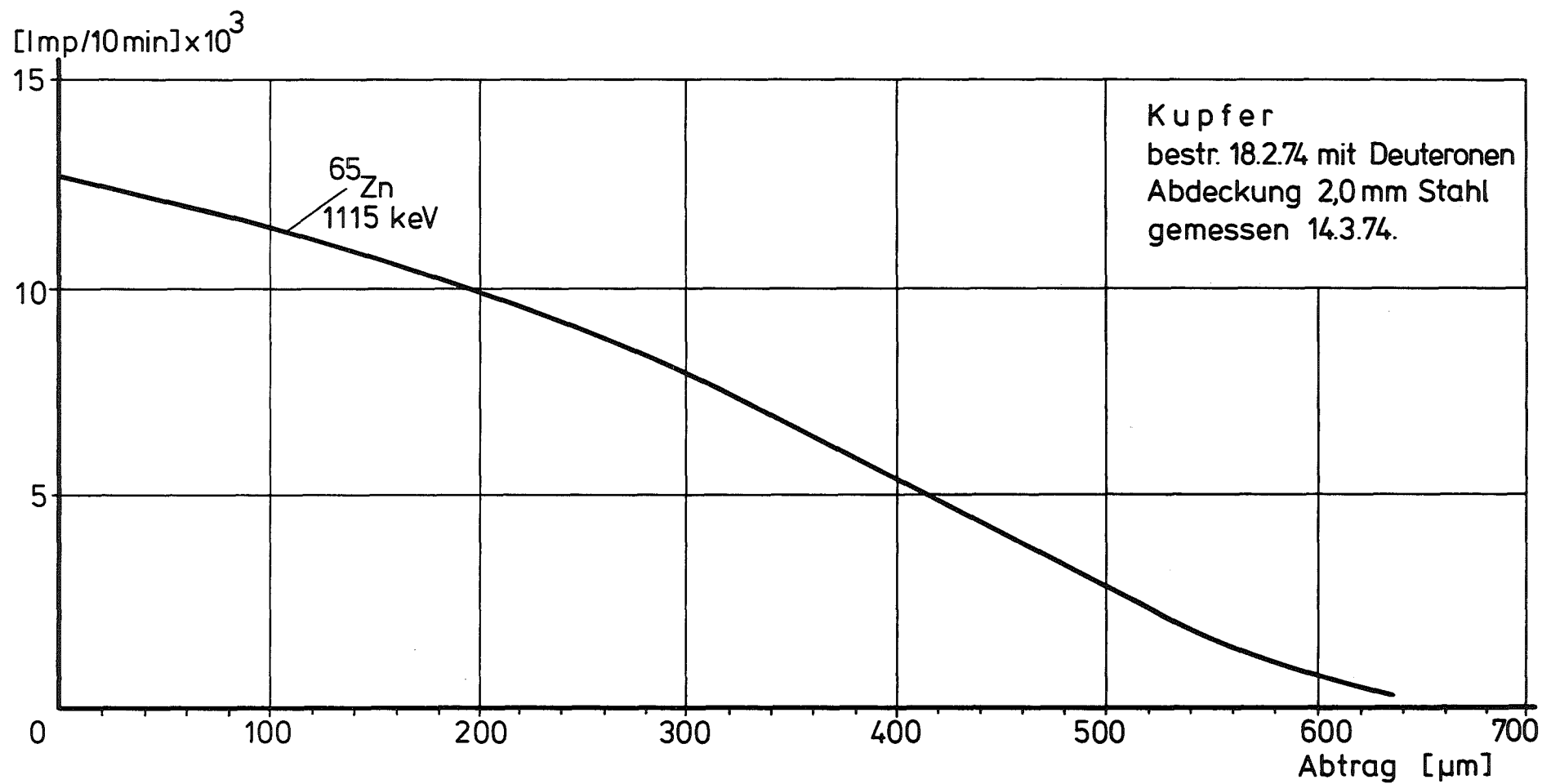


Bild 18

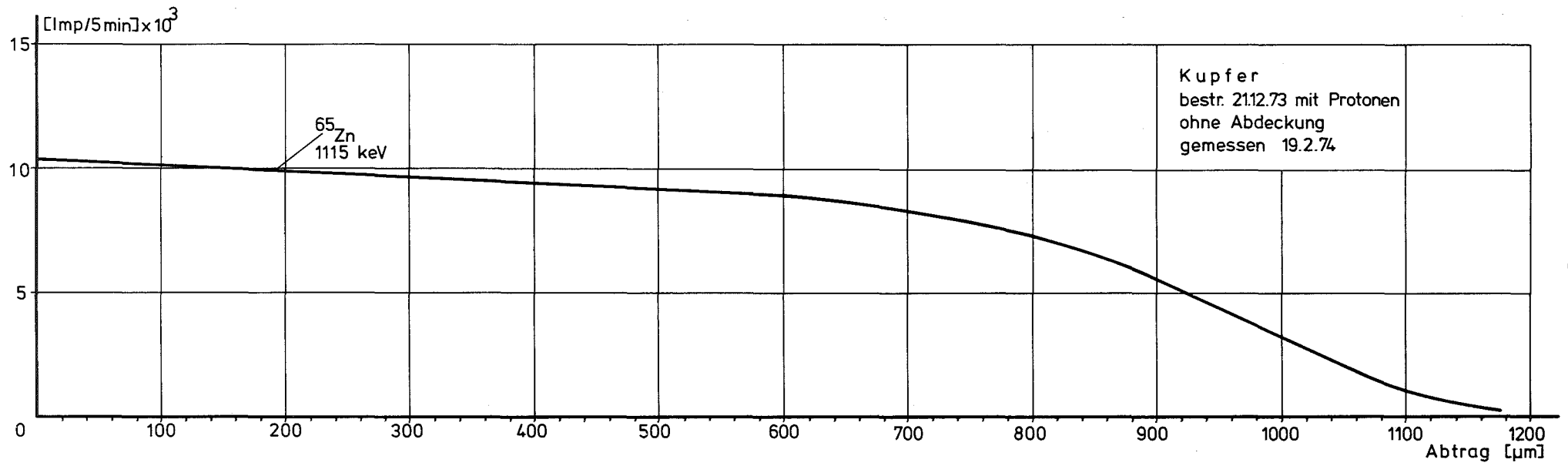


Bild 19

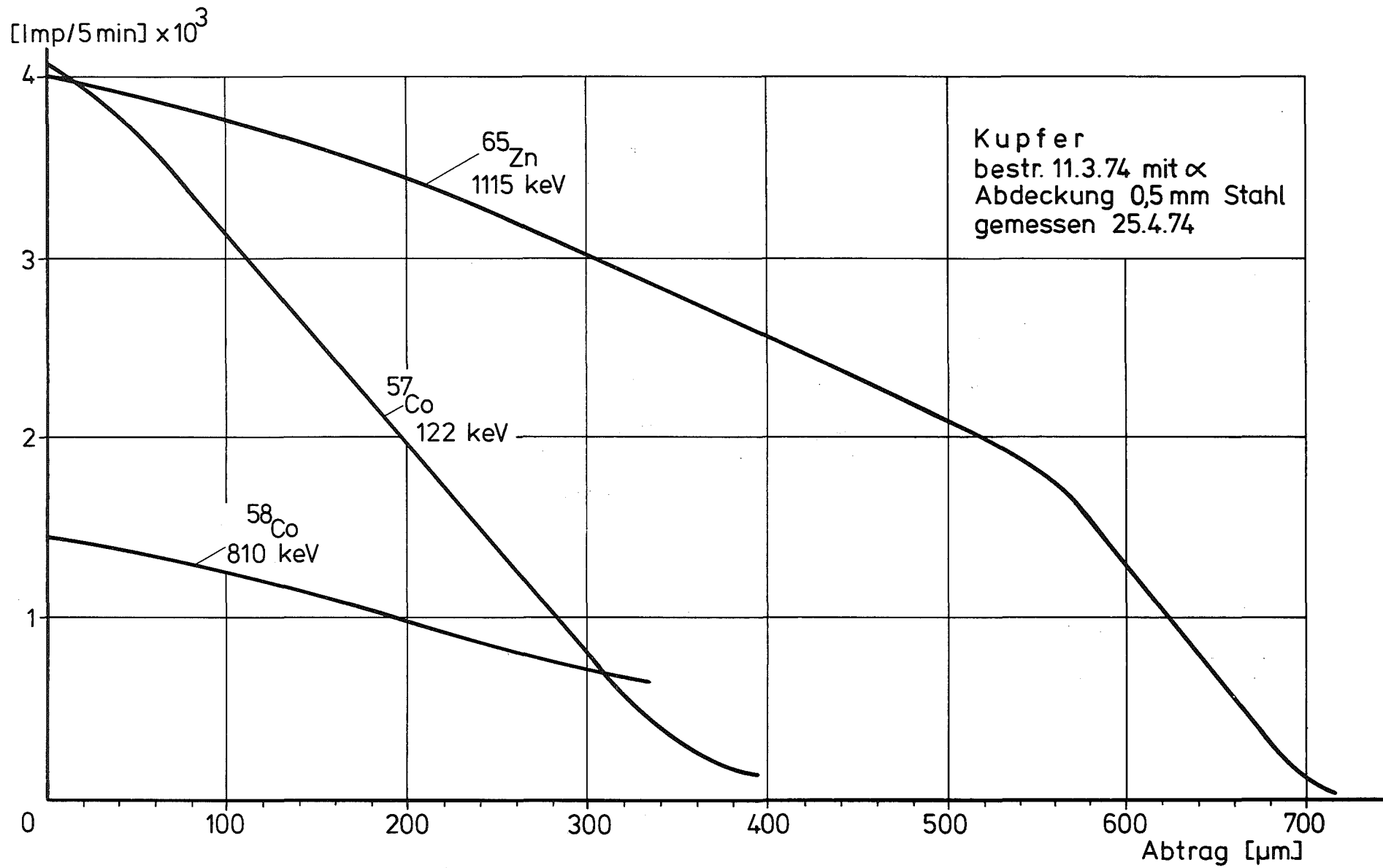


Bild 20

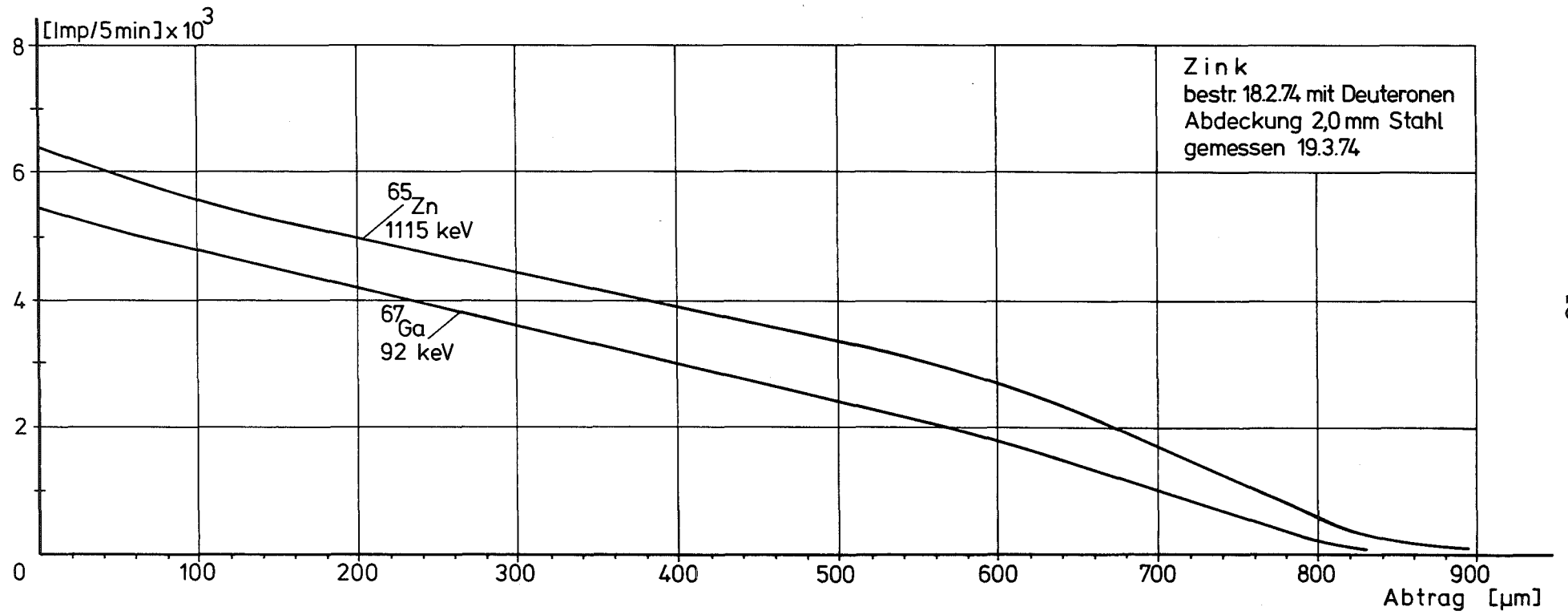


Bild 21

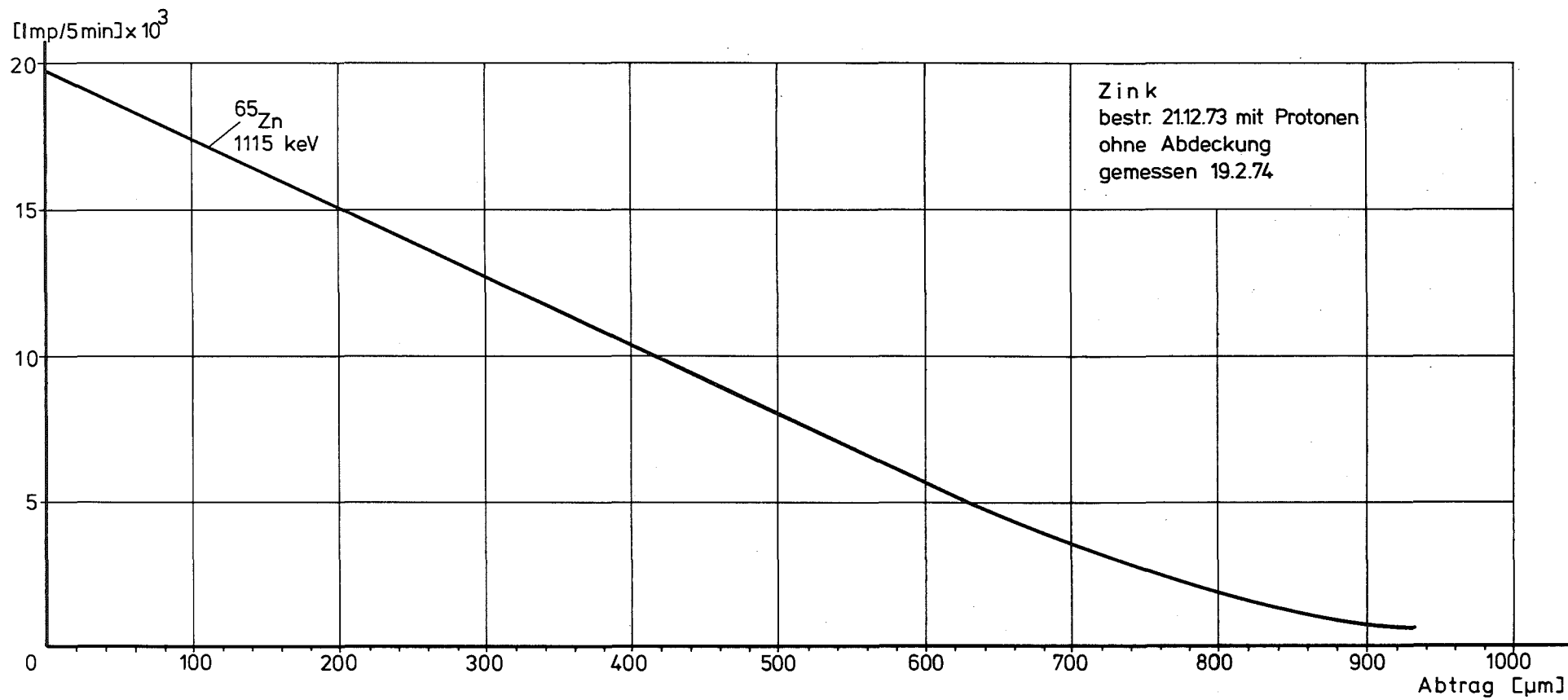


Bild 22

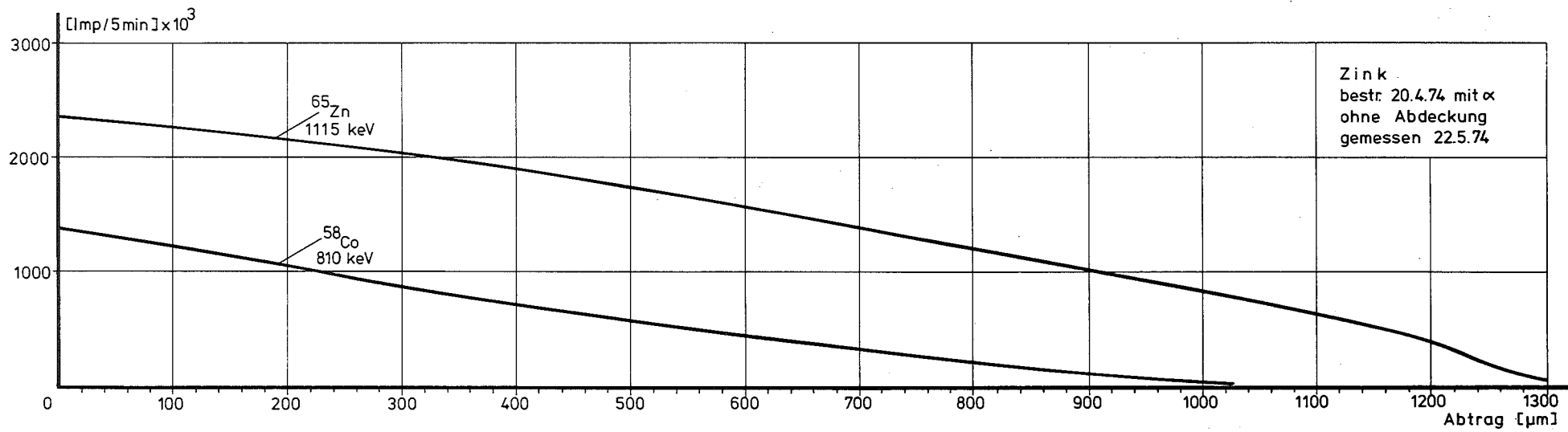


Bild 23

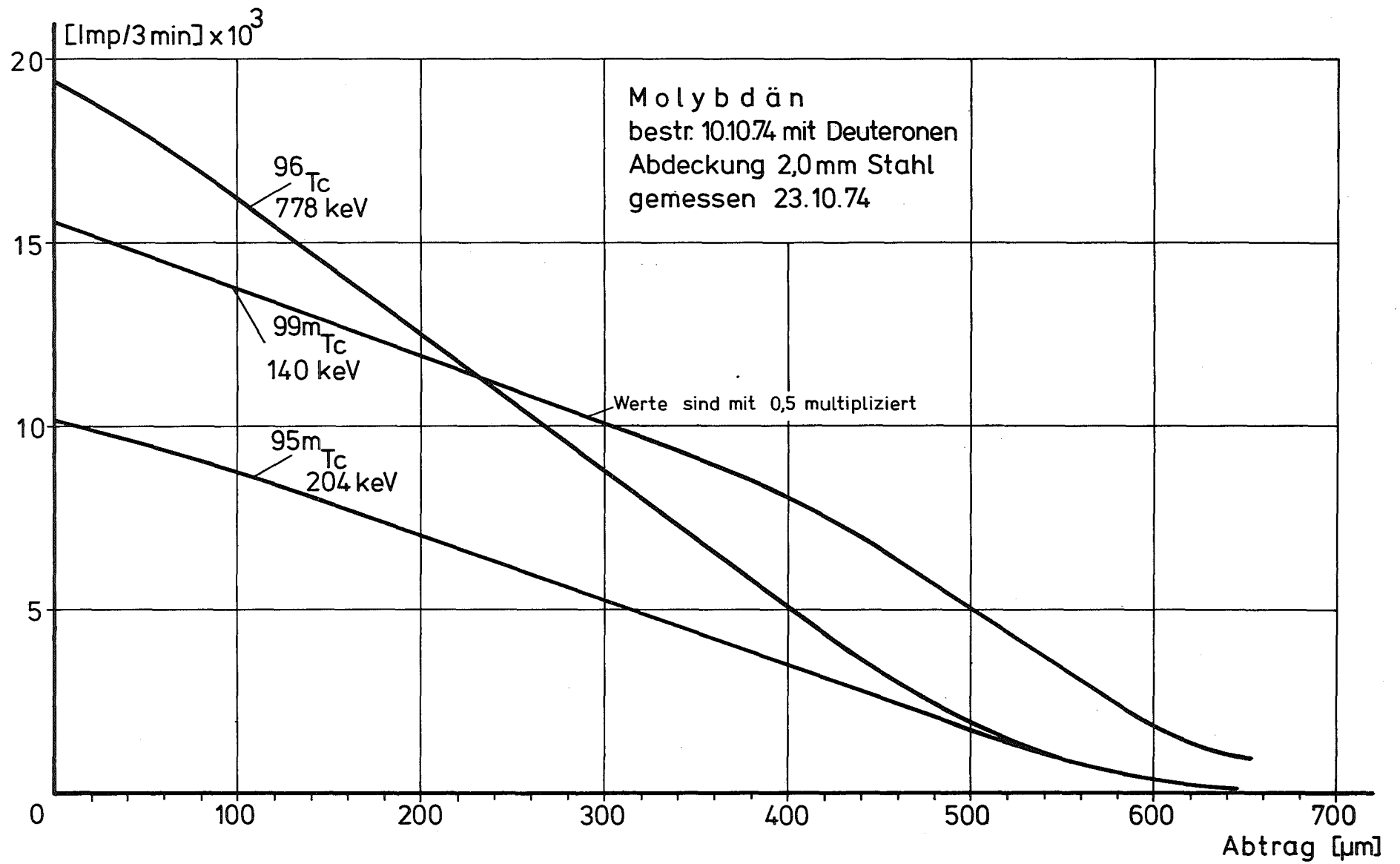


Bild 24

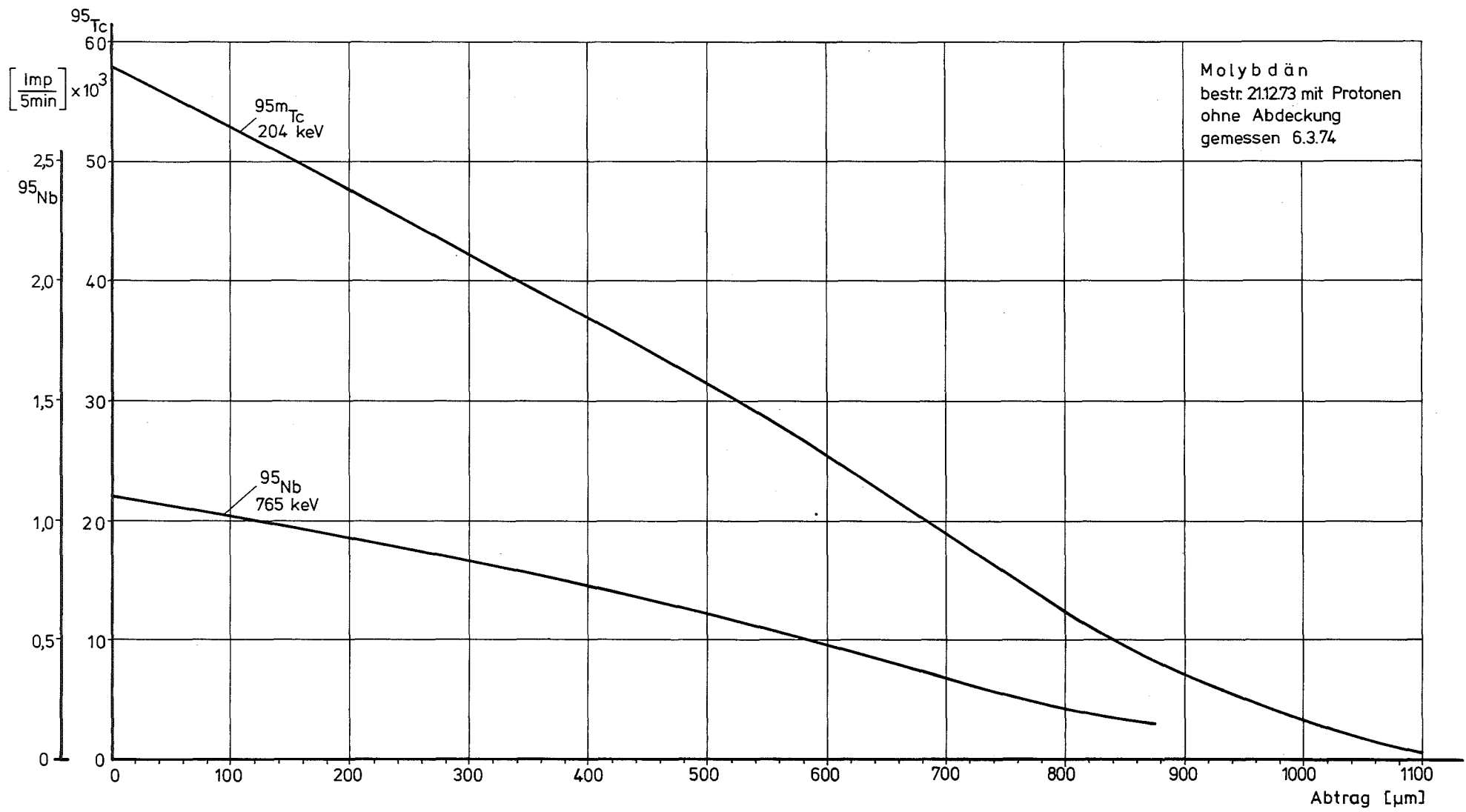


Bild 25

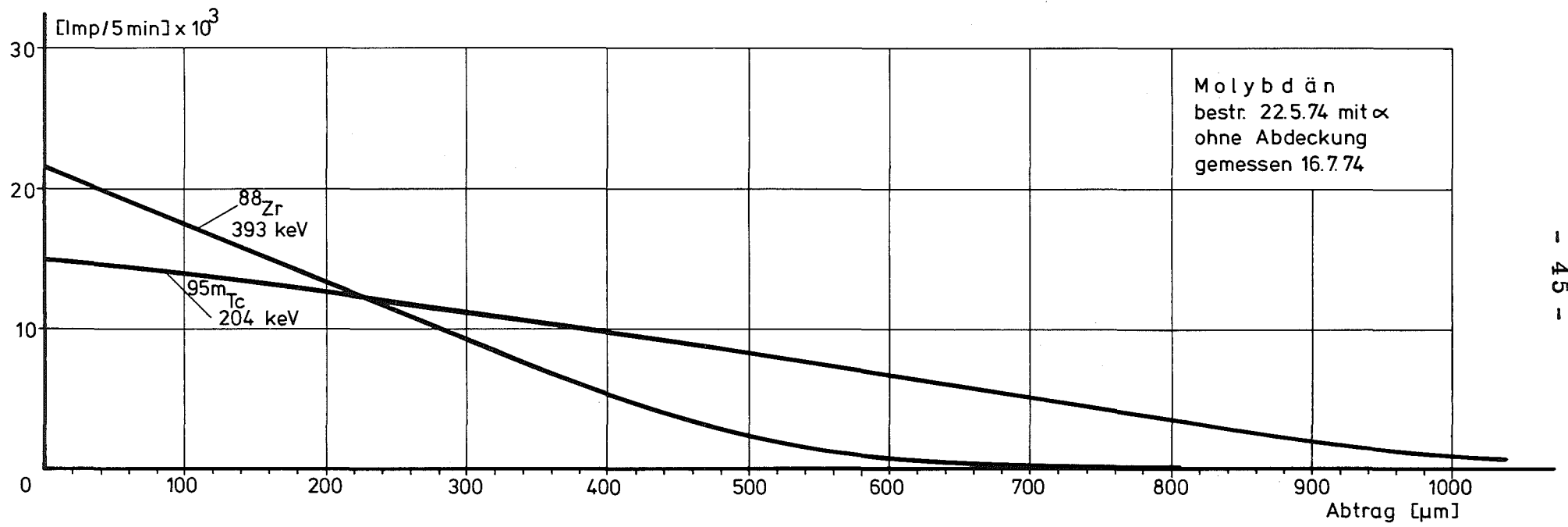


Bild 26

7. L I T E R A T U R

1. Gervé Die wichtigsten Verschleißmeßmethoden der Isotopentechnik
Kerntechnik 14, 204-209, 1972
2. Gervé Radionuklidtechnik im Maschinenbau
Sonderdruck des Laboratoriums für Isotopentechnik, Kernforschungszentrum Karlsruhe
3. Herkert Bestimmung des Verschleißes und der Kinematik schnelllaufender Wälzlager mit Hilfe radioaktiver Isotope
KFK 1567, Februar 1972
Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe
4. Kaiser Der Einfluß verschiedener Kolbenring- und Nutformen sowie der Nutwerkstoffe auf den Ring- und Nutverschleiß in einem 6-Zylinder Dieselmotor
KFK 1568, Februar 1972
Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe
5. Katzenmeier Das Verschleißverhalten und die Tragfähigkeit von Gleitlagern im Übergangsbereich von der Vollschmierung zu partiellem Tragen
KFK 1569, Februar 1972
Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe
6. Kronenberger Private Mitteilung aus noch nicht veröffentlichter Arbeit
7. Keller, Lange, Münzel, Pfennig Excitation Functions for Nuclear Reactions
Landolt-Börnstein Group I, Volume 5, Part. b. Springer Verlag 1973
8. Ladisch Die Anwendung der Autoradiographie bei der Qualitätskontrolle bestrahler Maschinenteile
Diplomarbeit 1974, Laboratorium für Isotopentechnik
9. Lederer, Hollander, Perlmann Table of Isotopes
John Wiley and Sons, Inc.