



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH
GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG
Zentralabteilung Strahlenschutz

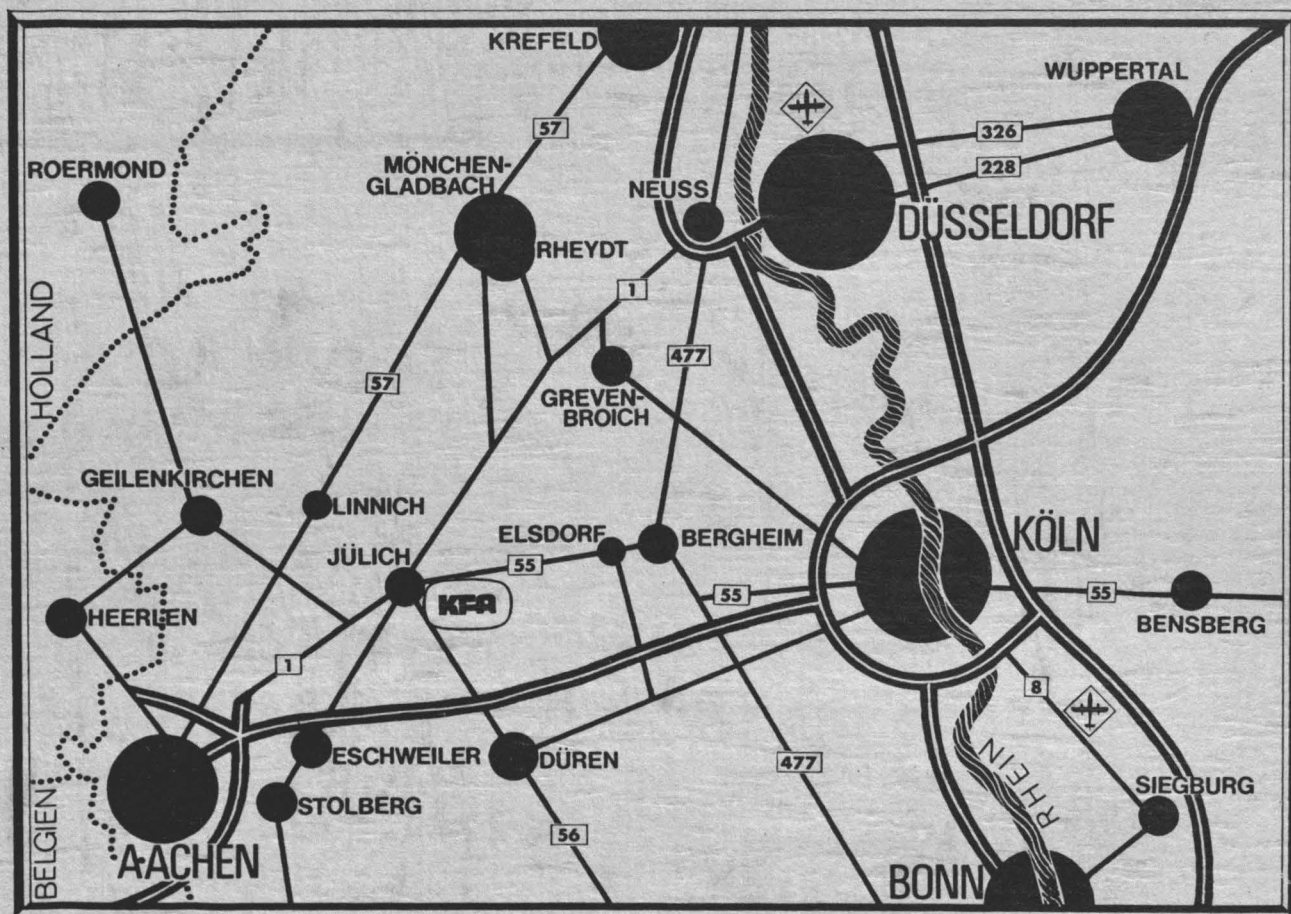
**Absorption von β -Strahlung für
verschiedene Versuchsbedingungen**

von

M. Heinzelmann

Jül - 1219
Juli 1975

Als Manuskript gedruckt



Berichte der Kernforschungsanlage Jülich - Nr. 1219

Zentralabteilung Strahlenschutz Jül - 1219

Dok.: Beta Radiation - Absorption

Im Tausch zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,
Jülich, Bundesrepublik Deutschland

Absorption von β -Strahlung für verschiedene Versuchsbedingungen

von

M. Heinzelmann

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Versuchsanordnung	1
3. Meßergebnisse und Diskussion	3
4. Vergleich mit Massenabsorptionskoeffizienten anderer Autoren	8
5. Änderung der Energie der β -Strahlung durch den Absorber	11
6. Änderung der Winkelverteilung der β -Strahlung durch den Absorber	12
7. Zusammenfassung	16
8. Literaturverzeichnis	17
Tabellen und Abbildungen	19

1. Einleitung

Die Bestimmung der Dosisleistung durch β -Strahlung in der Basalschicht der Epidermis, d.h. unter einer Gewebeschicht von 7 mg/cm^2 (1) bzw. $3\text{-}5 \text{ mg/cm}^2$ (2) ist eine der Aufgaben des Strahlenschutzes. Ist die Hautoberfläche noch geschützt, z.B. durch einen Handschuh, so gilt es die Dosisleistung unter einer Absorberschicht größerer Dicke zu bestimmen. Zur Entwicklung oder Kalibrierung von Meßgeräten, die die Dosisleistung am Meßort unter einer Gewebeschicht von einigen Milligramm pro Quadratzentimeter zu messen gestatten, muß das Absorptionsverhalten der β -Strahlung im Gewebe für die vorliegenden Versuchsbedingungen bekannt sein. Die Absorption der β -Strahlung hängt sehr stark von den Versuchsbedingungen ab, und Angaben einzelner Autoren über die Absorption der β -Strahlung können sich erheblich unterscheiden. Genaue Rechenmethoden zur Bestimmung der Dosisleistung gelten nur für homogene, unbegrenzte Medien. Die Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieser Rechenmethoden sind in der Strahlenpraxis nicht erfüllt, denn dort sind die Grenzflächen Präparat-Luft und Luft-Gewebe immer vorhanden.

Es wird in der folgenden Arbeit die Absorption von β -Strahlung in gewebeäquivalentem Material unter verschiedenen Versuchsbedingungen gemessen. Die Ergebnisse werden mit Rechen- und Meßergebnissen anderer Autoren verglichen, und es wird geprüft, wie weit in der Literatur vorliegende Angaben direkt für die β -Dosimetrie im Strahlenschutz verwendet werden können. Weiter wird untersucht, warum die Absorptionskurven so stark vom verwendeten Versuchsaufbau abhängen. Da hohe Dosisleistungen vor allem in der Nähe radioaktiver Präparate auftreten, beschränken sich die Messungen auf kleine Abstände zwischen Präparat und Extrapolationskammer.

2. Versuchsanordnung

Die Absorptionsmessungen wurden mit einer handelsüblichen Extrapolationskammer*, die im wesentlichen auf der Beschrei-

* Woodhill Graphic Ltd., West Drayton

bung von Loevinger (3) beruht, durchgeführt. Die vordere Elektrode besteht aus einer dünnen, beidseitig mit Aluminium bedampften Kunststoffolie mit dem Flächengewicht 1 mg/cm^2 . Die massive Kollektorelektrode besteht ebenfalls aus Kunststoff, so daß die Kammer für β -Strahlung als Gewebeäquivalent angesehen werden kann. Die Kammer besitzt auswechselbare Kollektorelektroden verschiedener Größe. Es wurde im allgemeinen mit einer Kollektorelektrode von 10 mm Durchmesser gearbeitet. Der in der Ionisationskammer erzeugte Strom wurde mit einem Schwingkondensator-Elektrometer* gemessen. Für die Auswertung wurde der Mittelwert des Stromes aus den Werten bei positiver und negativer Spannung an der vorderen Elektrode gebildet. Die Spannung an der Extrapolationskammer betrug 80 V.

Die radioaktiven Präparate befanden sich in 0,8, 5 bzw. 7 cm Entfernung auf einer speziellen Halterung vor der Extrapolationskammer. Diese Halterung war so konstruiert, daß der Raum hinter dem Präparat von der Halterung nicht erfaßt und das Strahlenfeld durch die Halterung nur geringfügig beeinflußt wurde. Bei einem Teil der Messungen befanden sich die Präparate auf einer 0,5 cm dicken Aluminiumplatte als Rückstreuer. Absorberfolien verschiedener Dicke konnten direkt vor dem Präparat bzw. direkt vor der vorderen Elektrode der Extrapolationskammer angebracht werden. Als Absorber wurden Polycarbonatfolien** verwendet. Es wurde bis zu Absorberdicken von 3,5 mm, entsprechend 455 mg/cm^2 Flächengewicht, gemessen.

Die Messungen wurden mit etwa 100 μCi starken Präparaten der Isotope ^{147}Pm ($E_{\text{max}} = 0,23 \text{ MeV}$), ^{204}Tl ($E_{\text{max}} = 0,765 \text{ MeV}$) und $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ($E_{\text{max}} = 2,24 \text{ MeV}$) ausgeführt. Die Präparate wurden durch Eindampfen einer aktiven Lösung auf einer Hostaphanfolie mit $1,1 \text{ mg/cm}^2$ Flächengewicht hergestellt.

* Typ VA-J-51.1 der RFT Meßelektronik, Dresden

** Makrofol KG der Farbenfabriken Bayer AG, Leverkusen

Mit einer zweiten Hostaphanfolie wurde das Präparat abgedeckt. Die beiden Kunststofffolien wurden durch einen Aluminiumring von 1,6 cm Innendurchmesser und 1 mm Dicke zusammengehalten. Der Aluminiumring nahm vom Ort des radioaktiven Stoffes im Präparat aus gesehen nur etwa 7 % des Raumwinkels ein, und die Streuung der β -Teilchen an diesem Ring wurde vernachlässigt. Die Aktivität der Präparate ist auf ± 10 % genau bekannt.

Zusätzlich zu den Absorptionsmessungen wurde der mittlere Einfallswinkel der β -Strahlung am Ort des Detektors mit einem Endfensterzählrohr bestimmt. Dazu befanden sich Präparat und Zählrohr auf einer optischen Bank frei im Raum. Der Abstand bis zur Decke und zu den Wänden betrug mindestens 2 m. Kunststofffolien verschiedener Dicke und mit einer Ausdehnung von 50 cm x 50 cm konnten direkt vor dem Präparat bzw. dem Zählrohr angebracht werden. Da Makrofol mit dieser Fläche nicht vorhanden war, wurde eine andere Polycarbonatfolie benutzt*. Das Zählrohr** besaß ein Fenster mit einem Flächengewicht von 1,5 bis 2 mg/cm². Seitlich war das Zählrohr von einer 2,5 mm dicken Aluminiumwandung umgeben.

3. Meßergebnisse und Diskussion

In den Abbildungen 1-3 ist an einigen Beispielen gezeigt, wie die Dosisleistung sich als Funktion der Absorberdicke ändert für 2 unterschiedliche Stellungen des Absorbers. Das eine Mal ist der Absorber direkt vor dem Präparat, das andere Mal direkt vor der Extrapolationskammer angebracht. Die Kurven in den Abbildungen sind für die Absorberdicke Null auf 1 normiert. Absorberdicke Null heißt dabei, daß kein zusätzlicher Makrofolabsorber vor dem Präparat bzw. vor der Extrapolationskammer vorhanden ist. Durch die Luftschicht zwischen Präparat und Extrapolationskammer

* Pokalon der Lonza Werke GmbH, Weil

** Valvo, Typ 18526

und die 2 Folien von ca. 1 mg/cm^2 vor dem Präparat und der Extrapolationskammer werden die β -Strahlen auch bei der Angabe "Absorberdicke Null" geschwächt.

Aus den Absorptionskurven für β -Strahlung des $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ und des ^{204}Tl folgt, daß die Dosisleistung anfangs weniger rasch abnimmt, wenn der Absorber vor dem Präparat und nicht vor der Extrapolationskammer angebracht ist. Für größere Absorberdicken verschwindet der Unterschied zwischen diesen beiden Geometrien. Die Meßpunkte schwanken dann statistisch um die gleiche Kurve. Im Gegensatz zu den Messungen beim $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ und beim ^{204}Tl ist für die niederenergetische β -Strahlung des ^{147}Pm kein Unterschied in der Absorptionskurve feststellbar, unabhängig davon, ob der Absorber direkt vor dem Präparat bzw. der Extrapolationskammer angebracht ist (Abb. 1).

Wenn der Absorber vor dem Präparat angebracht ist, kann bei geringen Absorberdicken beim $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ und beim ^{204}Tl die Dosisleistung sogar ansteigen. Ein besonders deutlicher Anstieg der Dosisleistung für geringe Absorberdicken wird festgestellt, wenn das Präparat mit einer dickeren Folie abgedeckt ist, weitere Absorber aber vor der Extrapolationskammer angebracht werden (Abb. 4-5). Daß bei Messung der Kurven Nr. 1 in den Abbildungen 4 und 5 die Präparate mit einem Rückstreuer versehen waren, beeinflußt das Meßergebnis nur unwesentlich. Die Absolutwerte der Dosisleistung bei Absorberdicke Null sind in den Abbildungen 4 und 5 für die Kurven Nr. 1 bzw. Nr. 2 und 3 verschieden, wegen des Zusatzabsorbers vor dem Präparat bei Kurve Nr. 1. Dieser Anstieg der Dosisleistung ist bedeutsam bei allen Absorptionsmessungen, bei denen mit Präparaten gearbeitet wird, die mit einer stärkeren Schutzfolie abgedeckt sind. Die Meßergebnisse müssen dann ganz anders ausfallen als bei unabgedeckten Präparaten.

Die Methoden zur Berechnung der Dosisleistung der β -Strahlung in homogenen, unbegrenzten Medien werden häufig auch in den Fällen benutzt, wenn Grenzflächen zwischen 2 Medien vorhanden sind (4-8), und es soll hier überprüft werden,

welche Fehler bei Anwendung dieser Rechenmethoden in diesem Fall auftreten können. Die Ergebnisse von Dosisleistungsrechnungen von Spencer (9), Loevinger (10) und Sommermeyer (11) stimmen untereinander gut überein, so daß wir unsere Meßergebnisse nur mit Rechnungen nach Spencer (12) verglichen haben. Für die Absorberdicke Null liegen die Meßergebnisse wegen der Rückstreuung der β -Teilchen durch die Kollektorelektrode der Extrapolationskammer für die Strahlung des $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ um 27 % und für die Strahlung des ^{204}Tl um 18 % über den Rechenwerten. Beim ^{147}Pm ließ sich keine Dosiserhöhung durch Rückstreuung im Vergleich mit den Rechenwerten feststellen. Vergleichswerte für die Rückstreuung der Kollektorelektrode einer Extrapolationskammer geben Owen (13) und Pook (14) an. Owen gibt für die Strahlung des ^{147}Pm einen Rückstreufaktor von 0,99 und für die des ^{204}Tl und $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ von 1,11 an. Pook gibt dagegen für die β -Strahlung des $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ den Rückstreufaktor 1,21 an. Der Wert von Pook und die Ergebnisse von Owen für die Strahlung des ^{204}Tl und ^{147}Pm stimmen bei Berücksichtigung der Genauigkeit der bei uns verwendeten Präparate überein. Die Dosisleistung wurde für verschiedene Absorberdicken nach Spencer berechnet. Zur Berechnung wurde die Punktquellen-Dosisfunktion für das gesamte Flächengewicht der Materie zwischen Präparat und Extrapolationskammer benutzt ohne Berücksichtigung vorhandener Grenzflächen. Die Ergebnisse sind zum Vergleich in die Abbildungen 1-3 eingetragen, ebenfalls normiert auf den Wert 1 bei Absorberdicke Null. Aus diesen Abbildungen folgt, daß die berechneten Werte der Dosisleistung in Materie langsamer als die gemessenen Werte abfallen. Für die β -Strahlung des ^{147}Pm sind schon bei Absorberdicken von 13 mg/cm^2 die Rechenwerte um 50 % höher als die Meßwerte. Beim ^{204}Tl und $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ treten erst bei erheblich größeren Absorberdicken solche Unterschiede zwischen Messung und Rechnung auf.

Die Rechenmethoden zur Bestimmung der Dosisleistung der β -Strahlung in homogenen, unbegrenzten Medien lassen sich also nicht ohne weiteres auf inhomogene, begrenzte Medien

übertragen. Auch mit Hilfe der von Cross (15) angegebenen Renormalisierungsfaktoren für die Punktquellendosisfunktion nach Spencer in anderen Medien als Luft können die Meßwerte nicht erklärt werden.

Die Absorption der β -Strahlung in Materie soll sich in guter Näherung für den größten Teil der Absorptionskurve durch eine Exponentialfunktion beschreiben lassen insbesondere dann, wenn die β -Strahlung mit einer Ionisationskammer gemessen wird (16). Es gilt

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{\mu}{\rho} (\rho x)} \quad (1)$$

Dabei ist D bzw. D_0 die Dosisleistung mit bzw. ohne Absorber. $\rho \cdot x$ ist das Flächengewicht des Absorbers, und μ/ρ ist ein scheinbarer Massenabsorptionskoeffizient. Die Meßwerte wurden auf halblogarithmischem Papier aufgetragen, und wo sich mehrere Meßpunkte durch eine Gerade verbinden ließen, wurde aus der Steigung der scheinbare Massenabsorptionskoeffizient bestimmt. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 1-5 zusammengestellt. Gleichzeitig ist in den Tabellen immer der Bereich der Absorberdicken angegeben, für den dieser scheinbare Massenabsorptionskoeffizient gilt. Das ist der Bereich, in dem die Meßpunkte bei Auftragung auf halblogarithmischem Papier um weniger als 10 % von der Geraden abweichen.

Falls der Bereich für den scheinbaren Massenabsorptionskoeffizienten nicht bei der Absorberdicke Null beginnt, werden die Meßpunkte nicht durch Gleichung (1) beschrieben, sondern man kann analog wie bei γ -Strahlung noch einen von der Versuchsanordnung, der Form des Präparates und der Energie der β -Strahlung abhängigen Aufbaufaktor B einführen, so daß gilt:

$$D = D_0 \cdot B \cdot e^{-\frac{\mu}{\rho} (\rho x)} \quad (2)$$

Aus den Messungen mit $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ wurden für die β -Strahlung des Nuklidgemisches scheinbare Massenabsorptionskoeffizienten bestimmt (Tabelle 3) und aus den Meßwerten für größere Absorberdicken scheinbare Massenabsorptionskoeffizienten für die Strahlung des ^{90}Y allein (Tabelle 5). Durch Extrapolation der Meßwerte vom ^{90}Y zu kleinen Absorberdicken und durch Differenzbildung erhält man die scheinbaren Massenabsorptionskoeffizienten für die β -Strahlung des ^{90}Sr (Abb. 6, Tabelle 4). Das ausgewählte Beispiel zeigt die exponentielle Schwächung der β -Strahlung des ^{90}Y nicht besonders deutlich. Diese Abbildung ist deswegen ausgewählt, um den weiter unten ausführlich diskutierten Anstieg des scheinbaren Massenabsorptionskoeffizienten zu demonstrieren.

Für die β -Strahlung des ^{147}Pm (Tabelle 1) hängt der scheinbare Massenabsorptionskoeffizient vom Abstand Präparat-Detektor nicht aber davon ab, ob der Absorber vor dem Präparat oder vor dem Detektor angebracht ist. Für den kleinen Abstand Präparat-Detektor von 8 mm gilt der exponentielle Ansatz (Gleichung 1) bis die Dosisleistung auf 5 % des Anfangswertes abgesunken ist. Für 50 mm Abstand Präparat-Detektor nimmt für Absorberdicken von mehr als 10 mg/cm^2 die Dosisleistung schneller ab, als nach Gleichung (1) erwartet wird. Für 70 mm Abstand Präparat-Detektor ist die Absorptionskurve bei halblogarithmischer Auftragung der Meßwerte keine Gerade, sondern sie ist zur x-Achse gebogen. Die Werte der Tabelle 1 sind für diesen Abstand eine Näherung für die angegebenen Absorberdicken. Für 70 cm Abstand Präparat-Detektor und Absorberdicken von Null bis $6,5 \text{ mg/cm}^2$ lassen sich die Meßwerte auch mit einem scheinbaren Massenabsorptionskoeffizienten von $112 \text{ cm}^2/\text{g}$ beschreiben. Dieses Beispiel zeigt, mit welchen großen Einschränkungen ein Ansatz nach Gleichung (1) oder (2) nur Gültigkeit hat.

Für die β -Strahlung des ^{204}Tl gilt der exponentielle Ansatz sehr gut bis die Dosisleistung auf etwa 7-8 % des Anfangswertes abgesunken ist. Die scheinbaren Massenabsorptionskoeffizienten hängen innerhalb der Fehlergrenzen nicht von der Lage des Absorbers und vom Rückstreuer ab (Tabelle 2).

Die scheinbaren Massenabsorptionskoeffizienten für die β -Strahlung des ^{90}Sr schwanken unsystematisch zwischen den Werten 23,9 und 30,6 cm^2/g (Tabelle 4). Es ist aber zu berücksichtigen, daß diese Werte durch Differenzbildung aus der Absorptionskurve der Strahlung des Nuklidgemisches $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ gewonnen und deshalb nicht so genau sind.

Für die hochenergetische β -Strahlung des ^{90}Y erstrecken sich die Messungen nur bis zu Absorberdicken von 3,5 mm und damit nur auf den Anfang der Absorptionskurve. Die erhaltenen scheinbaren Massenabsorptionskoeffizienten (Tabelle 5) sind erstaunlich niedrig. Für einen Teil der Messungen liegt der Meßpunkt bei der größten gemessenen Absorberdicke unterhalb des durch die Exponentialfunktion mit einem $\mu/\rho \approx 2,5 \text{ cm}^2/\text{g}$ gegebenen Wertes. Bei 2 Kurven - für die Messungen in 50 und 70 mm Abstand zwischen Präparat und Detektor mit dem Absorber vor dem Präparat - lassen sich die letzten Meßpunkte durch eine Exponentialfunktion mit größerem μ/ρ beschreiben (Abb. 6).

Durch einen Aluminium-Rückstreuer wird der scheinbare Massenabsorptionskoeffizient um 10 bis 20 % vergrößert.

4. Vergleich mit Massenabsorptionskoeffizienten anderer Autoren

Massenabsorptionskoeffizienten für β -Strahlen sind häufig veröffentlicht worden. Die scheinbaren Massenabsorptionskoeffizienten hängen u.a. vom Versuchsaufbau, vom Material des Absorbers und vom Nachweisgerät ab. Die Abhängigkeit des scheinbaren Massenabsorptionskoeffizienten von der Kernladungszahl des Absorbers ist für kleine Kernladungszahlen gering (16, 17), so daß Ergebnisse aus Absorptionsmessungen mit Aluminiumfolien ohne weiteres mit unseren Messungen an Polycarbonatfolien verglichen werden können.

Der Einfluß der Versuchsanordnung auf die erhaltenen Werte des scheinbaren Massenabsorptionskoeffizienten kann sehr groß sein. Filonov (18) gibt an, daß der scheinbare Massenabsorptionskoeffizient sich um den Faktor 2 ändern kann, je nachdem ob der Absorber vor dem Präparat oder dem Detektor

angebracht wird. Ein solch großer Unterschied wurde bei unseren Messungen nicht gefunden. Es ist uns nicht bekannt, bei welchen Abständen zwischen Präparat und Detektor Filonov gemessen hat. Filonov benutzt als Detektor aber ein Geiger-Müller-Zählrohr, und er mißt nur für relativ geringe Absorberdicken. Vielleicht sind diese beiden Punkte die Ursache für die besonders starke Abhängigkeit des scheinbaren Massenabsorptionskoeffizienten von der Lage des Absorbers.

Viele Absorptionsmessungen sind mit Geiger-Müller-Zählrohren und nicht mit Ionisationskammern durchgeführt worden. Mit einem Geiger-Müller-Zählrohr wird näherungsweise die Flußdichte und nicht die Dosisleistung bestimmt. Sommermeyer (19) gibt an, daß für β -Spektren mit mittleren Energien bis zu 300 keV der scheinbare Massenabsorptionskoeffizient für die Flußdichte mit dem für die Dosisleistung übereinstimmt. Für β -Spektren mit höheren mittleren Energien nimmt die Flußdichte im Absorber schneller als die Dosisleistung ab, und die Absorptionskurve verläuft nicht mehr nach einem Exponentialgesetz.

In Tabelle 6 sind scheinbare Massenabsorptionskoeffizienten nach Angaben verschiedener Autoren zusammengestellt. Die Werte sind durch Messungen an luft- oder gewebeäquivalentem Material oder an Aluminium gewonnen worden. Als Detektoren wurden sowohl Zählrohre als auch Ionisationskammern benutzt. Vielfach sind die scheinbaren Massenabsorptionskoeffizienten in Form einer Potenzfunktion der Maximalenergie des β -Spektrums angegeben. Die Werte in Tabelle 6 weichen teilweise stark voneinander ab. Einzelne Werte stimmen mit unseren Werten in den Tabellen 1-5 überein, aber für alle 4 Nuklide stimmen unsere Werte nicht mit den Werten eines der Autoren nach Tabelle 6 überein. Insbesondere sind die eigenen Meßergebnisse für ^{90}Y mit Ausnahme des Wertes von einem Autor um den Faktor 2 bis 3 kleiner als die Werte in Tabelle 6. Diese Unterschiede können einerseits mit dadurch verursacht sein, daß wir nur bis zu Schichtdicken von 455 mg/cm^2 gemessen haben, denn unsere Meßkurven beginnen bei Absorberdicken von etwa 300 mg/cm^2 stärker abzufallen. Aus Vergleich

mit unseren Meßwerten würde dann für die Dosisleistung folgen, daß die scheinbaren Massenabsorptionskoeffizienten für die Strahlung des ^{90}Y erst von Schichtdicken oberhalb 300 mg/cm^2 , wenn die Dosisleistung schon auf die Hälfte abgesunken ist, gelten, und für kleinere Absorberdicken liefern Abschätzungen mit den μ/ρ -Werten der Tabelle 6 viel zu kleine Werte. Andererseits fällt aber nach Sommermeyer (19) bei β -Spektren mit hoher Maximalenergie die Flußdichte schneller als die Dosisleistung ab, und die großen scheinbaren Massenabsorptionskoeffizienten gelten für Messungen mit Geiger-Müller-Zählrohren.

Die unterschiedlichen Werte der scheinbaren Massenabsorptionskoeffizienten für andere Nuklide sind durch unterschiedliche Geometrie, unterschiedlichen Aufbau der Präparate (Abb. 4 und 5) und unterschiedliche Nachweisgeräte verursacht. Die eigenen Meßergebnisse für den scheinbaren Massenabsorptionskoeffizienten jetzt - wie vielfach üblich - in Form eines Potenzgesetzes darzustellen, hieße die vorhandenen Funktionen dieser Art um eine zu erweitern, hätte aber sonst wenig Sinn. Ziel dieser Arbeit ist es vielmehr, die Geometrie- und Präparatabhängigkeit von Absorptionsuntersuchungen für β -Strahlung noch einmal zu demonstrieren und gleichzeitig nach einer - zunächst nur qualitativen - Erklärung für die unterschiedlichen Meßergebnisse zu suchen.

Die Abhängigkeit der Absorption der β -Strahlung von der Dicke der Präparatumhüllung (Abb. 4 und 5) demonstriert, wie problematisch es ist, allgemein gültige Umrechnungsfaktoren der gemessenen Dosisleistung in Luft in die Dosisleistung in der Basalschicht der Epidermis für sämtliche Umrechnungen zu empfehlen (25). Dabei können Fehler bis zu 20 % auftreten.

Für Präparate, bei denen die radioaktive Substanz mit einer Folie mit einem Flächengewicht von mehreren mg/cm^2 abgedeckt ist, wurde bei den eigenen Messungen eine Verkleinerung des scheinbaren Massenabsorptionskoeffizienten gefunden (Abb. 4 und 5). Dies steht anscheinend im Widerspruch zu der Angabe bei Sommermeyer (11), der scheinbare Massen-

absorptionskoeffizienten mit dünnen und dicken Präparaten gemessen hat und der für die Strahlung der dünneren Präparate einen kleineren scheinbaren Massenabsorptionskoeffizienten findet. Unsere Messungen lassen sich aber nicht direkt mit diesen Messungen an dicken Quellen vergleichen, denn "dick" heißt, daß die Reichweite der β -Strahlen im Material der Quelle kleiner als die Ausdehnung der Quelle ist. Unsere Präparatabdeckungen sind immer noch dünn im Vergleich zur Reichweite der β -Strahlen.

Die Feststellung von Huq und Mowla (24), daß für Absorberdicken von $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ bis $700 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ keine Absorption auftritt, dürfte auf einem Aufbaueffekt beruhen, der auch bei unseren Messungen dann auftritt, wenn der Absorber oder ein Teil des Absorbers sich vor dem Präparat befinden.

Die nur geringe Änderung des scheinbaren Massenabsorptionskoeffizienten, wenn sich hinter dem Präparat noch ein Rückstreuer befindet, ist auch nach den Ergebnissen von Sommermeyer (19) und Filonov (18) zu erwarten.

5. Änderung der Energie der β -Strahlung durch den Absorber

Zur Erklärung der unterschiedlichen Absorption der β -Strahlung bei unterschiedlicher Versuchsanordnung muß man weitere Eigenschaften des Strahlenfeldes betrachten. Zur Erklärung der Gültigkeit des Exponentialgesetzes für die Absorption der β -Strahlung wurde angenommen, daß das Energiespektrum während der Absorption im wesentlichen konstant bleibt (28). Das stimmt auch in etwa, da die Elektronen niedrigerer Energie schneller absorbiert werden als die Elektronen hoher Energie. So gilt für die β -Strahlung des ^{32}P hinter einem Absorber von $300 \text{ mg}/\text{cm}^2$, daß die mittlere Energie nur um 29 % gesunken ist, obwohl 90 % der β -Teilchen absorbiert sind (29). Genauere Untersuchungen der Energieverteilung der β -Strahlung hinter dünnen Absorbern sind von Brownell (26) durchgeführt worden. Brownell untersuchte das Spektrum der β -Strahlung des ^{32}P nach Absorption in verschiedenen Materialien und unter verschiedenen Austrittswinkeln aus der Absorberoberfläche. Für Absorber aus einem Material geringer

Kernladungszahl (Plexiglas, Aluminium) wurde schon durch sehr dünne Absorberschichten die mittlere Energie der in Vorwärtsrichtung austretenden Teilchen deutlich verringert durch Streuung niederenergetischer β -Teilchen, die ursprünglich unter größeren Winkeln ausgesandt wurden, in die Vorwärtsrichtung. Bei dünnem Absorber aus einem Material hoher Kernladungszahl konnte dagegen die mittlere Energie der β -Strahlung noch ansteigen durch bevorzugte Schwächung der Teilchen mit niedriger Energie. Wenn ein dünner Absorber aus einem Material mit kleiner Kernladungszahl direkt vor dem Präparat die mittlere Energie der β -Teilchen verringert, so folgt aus den Abbildungen 4 und 5, daß die β -Strahlung mit niedrigerer Energie schlechter absorbiert wird. Das ist ein Widerspruch zum normalen Absorptionsverhalten, der nur geklärt werden kann durch Untersuchung mindestens einer weiteren Größe des Strahlenfeldes.

6. Änderung der Winkelverteilung der β -Strahlung durch den Absorber

Als weitere Eigenschaft des Strahlenfeldes wurde der mittlere Einfallswinkel der β -Teilchen als Funktion des Abstandes von der Strahlenquelle für verschiedene Rückstreuer und für verschiedene Lagen eines Absorbers untersucht.

Die Richtungsverteilung der Elektronen ändert sich stark mit zunehmender Entfernung vom Präparat, weil die Elektronen leicht gestreut werden. Von einer gewissen Schichtdicke an ändert sich die Form der Kurve der Richtungsverteilung nicht mehr (vollständige Diffusion). Der mittlere Einfallswinkel beträgt dann $30-34^\circ$ (30°). Es werden aber auch noch etwas größere Werte des mittleren Einfallswinkels gemessen (19). So ist der mittlere Einfallswinkel auf eine Ebene senkrecht zur Verbindungslinie zum Präparat in Luft in 1 m Abstand von einer ^{32}P -Quelle ($E_{\text{max}} = 1,71 \text{ MeV}$) rund 15° , in 2 m Abstand rund 30° und in 4 m Abstand rund 40° . Bei ^{131}I ($E_{\text{max}} = 0,61 \text{ MeV}^*$) ist in 1 m Entfernung und bei ^{35}S ($E_{\text{max}} = 0,167 \text{ MeV}$) schon in 14 cm Abstand ein Wert von 40°

* Maximalenergie des Partialspektrums, das in 87 % aller Zerfälle ausgesandt wird.

für den mittleren Einfallswinkel erreicht (19). Messungen des mittleren Einfallswinkels für die β -Strahlung radioaktiver Präparate als Funktion der Lage eines Absorbers (Absorber direkt vor dem Präparat bzw. Absorber vor dem Nachweisgerät) sind uns nicht bekannt, und entsprechende Messungen wurden hier durchgeführt.

Nach Sommermeyer und Wächter (19) kann der mittlere Einfallswinkel von β -Teilchen an einem Punkt bestimmt werden mit einem Zählrohr, welches ein ebenes, vollständig für β -Strahlen durchlässiges Fenster besitzt. Ist $Z_{//}$ die Zählrate, wenn die Fensternormale in Richtung des Strahlenfeldes weist und $Z_{\perp}$, wenn sie senkrecht zur Symmetrieachse des Strahlenfeldes verläuft, so ist der mittlere Winkel, den die β -Teilchen mit der Achse des Strahlenfeldes bilden, gegeben durch

$$\operatorname{tg} \bar{\alpha} = \pi \cdot \frac{Z_{\perp}}{Z_{//}} \quad (3)$$

Voraussetzung für die Gültigkeit der Formel ist, daß die Richtungsverteilung der β -Teilchen achsialsymmetrisch ist zur Normalen des Zählrohrfensters und daß die β -Teilchen nur von vorn auf das Zählrohr fallen.

Die mit Hilfe von Gleichung (3) gemessenen Werte mit einem $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ Präparat sind in den Abbildungen 7 und 8 aufgetragen. Aus Abbildung 7 folgt, daß der mittlere Einfallswinkel deutlich davon abhängt, ob ein Absorber vor dem Präparat oder dem Detektor angebracht wird. Wenn der Absorber vor dem Detektor angebracht wird, ist innerhalb der Fehlergrenzen die Richtungsverteilung der β -Strahlung genau so, als wenn die Strahlung eine entsprechend größere Luftschicht durchlaufen hätte. Die Meßpunkte ohne Absorber und mit Absorber vor dem Zählrohrfenster liegen in Abbildung 7 auf derselben Kurve. Wenn dagegen der Absorber vor dem Präparat angebracht wird, ändert sich der mittlere Einfallswinkel in Abhängigkeit von der Absorberdicke nur wenig, und der mittlere Einfallswinkel ist kleiner, als wenn der Absorber vor dem Zählrohr angebracht ist.

Abbildung 8 zeigt, daß der mittlere Einfallswinkel der β -Teilchen durch einen Rückstreuer hinter dem Präparat nur geringfügig vergrößert wird.

Die Bestimmung des mittleren Einfallswinkel ist mit verschiedenen Fehlern behaftet. Die Folie von $1,5\text{-}2\text{ mg/cm}^2$ vor dem Zählrohr absorbiert einige Elektronen. Die seitliche Wand des Zählrohres ist für Elektronen nicht völlig undurchlässig. Ein Teil der β -Strahlen hoher Energie kann die Seitenwand durchdringen. Einige β -Strahlen werden aus dem Raum hinter dem Zählrohr zurückgestreut, und die verwendete Absorberfolie von $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ ist seitlich nicht unendlich ausgedehnt. Diese Faktoren beeinflussen die Werte von $\tan \bar{\alpha}$, sie ändern aber nicht wesentlich das Ergebnis, daß bei einem Absorber direkt vor dem Präparat der mittlere Einfallswinkel kleiner ist, als bei einem Absorber vor dem Detektor.

Der am Ende des vorigen Kapitels herausgestellte scheinbare Widerspruch, daß bei einem Absorber direkt vor dem Präparat die β -Strahlung mit etwas erniedrigter mittlerer Energie weniger leicht absorbiert wird als die β -Strahlung mit der ursprünglichen Energie, kann durch die andere Richtungsverteilung der β -Strahlung erklärt werden. Durch den Absorber direkt vor dem Präparat werden die β -Strahlen in Vorwärtsrichtung gebündelt und deswegen nicht so leicht absorbiert. Wird jetzt zusätzlich zu dem Absorber direkt vor dem Präparat ein weiterer Absorber vor dem Detektor, der in diesem Fall eine flache Ionisationskammer bzw. eine Extrapolationskammer sein soll, angebracht, so wird außer einer weiteren Absorption der etwas gebündelte Strahl wieder zerstreut. Die β -Strahlen legen in dem flachen Detektor im Mittel einen etwas weiteren Weg zurück, und die abgegebene Energie im Detektor wird erhöht. Die Dosisleistung kann trotz der etwas größeren Absorberdicke noch ansteigen, wenn die Vergrößerung des mittleren Weges in dem Detektor die Absorption vor dem Detektor überwiegt (Abbildung 4 und 5).

Da durch einen Rückstreuer hinter dem Präparat der mittlere Einfallswinkel der β -Strahlen wenig geändert wird, wird durch den Rückstreuer der Massenabsorptionskoeffizient nur geringfügig geändert.

Ein kleinerer mittlerer Einfallswinkel der β -Strahlen bei Messungen mit einem Absorber direkt vor dem Präparat im Vergleich zu Messungen mit dem Absorber vor dem Detektor ist nicht bis zu beliebig großen Absorberdicken vorhanden, da von einer bestimmten Dicke des Absorbers ab vollständige Diffusion sich einstellt, wo die Richtungsverteilung der β -Strahlung sich nicht mehr ändert. Unsere Messungen des mittleren Einfallswinkels sind nicht bis zu diesen Absorberdicken durchgeführt, bei den Absorptionsmessungen (Abbildung 2 und 3) wurde aber für große Absorberdicken festgestellt, daß die Dosisleistung unabhängig von der Lage des Absorbers ist.

Nach den Messungen von Sommermeyer (19) hat sich für die niederenergetische β -Strahlung des ^{35}S schon für geringe Entfernungen vom Präparat die vollständige Diffusion eingestellt. Wir haben für die niederenergetische Strahlung des ^{147}Pm festgestellt, daß die Absorptionskurven unabhängig von der Lage des Absorbers sind.

Der mittlere Einfallswinkel der β -Strahlen ist hinter dünnen Absorbern wesentlich für die weitere Absorption der Strahlung. Dosimeter für β -Strahlung sind von einer endlich dicken Hülle umgeben und besitzen eine endliche Ausdehnung. Die Absorption in dieser Hülle und die Energieabgabe im empfindlichen Volumen des Dosimeters hängen von der Winkelverteilung der β -Strahlung ab. Damit ist die Anzeige eines Dosimeters für gleiche Dosisleistung und gleiche Energieverteilung der β -Strahlung abhängig vom mittleren Einfallswinkel der β -Strahlung, d.h. von der Versuchsanordnung und von der Form des verwendeten Präparats. Herrmann (30) hat schon vor längerer Zeit auf die unterschiedlichen Werte der Empfindlichkeit bei "Distanz-" und "Kontakteichung" von Filmdosimetern hingewiesen. Allgemeiner läßt sich feststellen, daß die Empfindlichkeit eines Dosimeters für die β -Strahlung eines bestimmten Nuklids von der Versuchsanordnung abhängt und daß deswegen Empfindlichkeitsangaben verschiedener Autoren für ein Dosimeter nur mit Vorbehalt verglichen werden können, wenn nicht die Versuchsanordnung in

beiden Fällen identisch ist. Von der Anzeige eines Dosimeters auf die Dosisleistung in der Basalschicht der Epidermis zu schließen, wenn die Hautdosisleistung für eine Person an dieser Stelle im Strahlenfeld bestimmt werden soll, ist ohne größere Fehler nur möglich, wenn das Dosimeter eine Umhüllung besitzt, die ebenso dick ist, wie die für Strahlung unempfindliche Schicht der Epidermis und wenn das empfindliche Volumen des Dosimeters sehr klein ist.

7. Zusammenfassung

Die Absorption der β -Strahlung wird in gewebeäquivalentem Material für verschiedene Versuchsanordnungen gemessen, und die Ergebnisse werden mit denen in der Literatur verglichen. Es wird gezeigt, daß die Form der Absorptionskurve durch eine Abdeckung des Präparates stark verändert wird. Eine qualitative Erklärung der unterschiedlichen Absorption der β -Strahlung bei unterschiedlicher Versuchsanordnung konnte anhand der gemessenen mittleren Einfallswinkel der β -Strahlung gegeben werden. Auf den Einfluß der Präparatumhüllung und der Versuchsanordnung bei der Eichung von Dosimetern wird hingewiesen.

Meinen Mitarbeitern, Herrn H. Brandenburg und Herrn W. Haschke danke ich für die Durchführung der Messungen.

8. Literaturverzeichnis

- (1) ICRP Publication 2, Pergamon Press, Oxford 1959
- (2) Whitton, J.T., RD/B/R 1934 (1971)
- (3) Loevinger, R., Rev.Sci.Instrum. 24, 907 (1953)
- (4) Gibson, J.A.B. und J.U.Ahmed,
Technical Report Series No. 150,
IAEA, Wien 1973
- (5) Henson, P.W., Brit.J.Radiol. 46, 645 (1973)
- (6) Marshall, M. und J.Docherty,
Phys.Med.Biol. 16, 503 (1971)
- (7) Playle, T.S. und W.N.Walker, RD/B/N 1107 (1968)
- (8) Whitehouse, W.J., AERE-R 5679 (1968)
- (9) Spencer, L.V., National Bureau of Standards
Monograph No. 1 (1959)
- (10) Loevinger, R., Radiology, 66, 55 (1956)
- (11) Sommermeyer, K. und H.Opitz,
Atomkernenergie 4, 404 (1959)
- (12) Cross, W.G., AECL-2793 (1967)
- (13) Owen, B., Phys.Med.Biol. 18, 355 (1973)
- (14) Pook, E.A. und T.M.Francis,
Phys.Med.Biol. 20, 147 (1975)
- (15) Cross, W.G., Phys.Med.Biol. 13, 611 (1968)
- (16) Evans, R.D., The Atomic Nucleus, New York,
Toronto, London, p.627-628 (1955)
- (17) Thümmel, H.-W., Isotopenpraxis 9, 331 (1973)
- (18) Filonov, B.O., I.E.Shimanovich und M.M.Pavlyuchenko,
Doklady Akad.Nauk BSSR 13, 414 (1969)
- (19) Sommermeyer, K. und K.-H.Wächter,
Z.angew.Phys. 5, 242 (1953)

- (20) Sommermeyer, K. und K.-H. Wächter,
Z. angew. Phys. 8, 53 (1956)
- (21) Brown, St. L., AD 625 359 (1965)
- (22) Gleason, G. I., E. D. Taylor und D. L. Tabern,
Nucleonics 8, 12 (1951)
- (23) Price, J., Nuclear Radiation, New York 1958
- (24) Huq, M. S. und G. Mowla, Health Phys. 18, 734 (1970)
- (25) British Committee on Radiation Units and
Measurements
Phys. Med. Biol. 19, 748 (1974)
- (26) Brownell, G. L., Nucleonics 10, No. 6, 30 (1952)
- (27) Herrmann, D., Nukleonik 8, 320 (1966)
- (28) Fournier, G. und M. Guillot,
Actualities Sci. et Ind. 57 (1933)
- (29) Walinder, G., FOA Rep. 6, No. 7 (1972)
- (30) Bothe, W., Handbuch d. Physik 22, 2, p. 23 (1933)

Tabelle 1: Scheinbare Massenabsorptionskoeffizienten für ^{147}Pm β -Strahlung

Abstand Quelle-Detektor (mm)	Absorber vor dem Detektor		Absorber vor der Quelle		Bemerkungen
	μ/ρ (cm^2/g)	Flächengewicht des Absorbers für dieses μ/ρ (mg/cm^2)	μ/ρ (cm^2/g)	Flächengewicht des Absorbers für dieses μ/ρ (mg/cm^2)	
8	-	-	165	< 19	
50	121	< 10,5	129	< 13	
70	153	2,6 - 10	153	2,6 - 10	
50	153	< 13	151	< 13	Messung mit 5 mm Al-Rück- streuer hinter der Quelle

Tabelle 2: Scheinbare Massenabsorptionskoeffizienten für ^{204}Tl β -Strahlung

Abstand Quelle-Detektor (mm)	Absorber vor dem Detektor		Absorber vor der Quelle		Bemerkungen
	μ/ρ (cm^2/g)	Flächengewicht des Absorbers für dieses μ/ρ (mg/cm^2)	μ/ρ (cm^2/g)	Flächengewicht des Absorbers für dieses μ/ρ (mg/cm^2)	
8	-	-	20,0	26 - 105	
50	19,7	< 130	20,2	< 130	
70	21,2	< 130	19,3	4 - 130	
50	19,3	< 130	20,0	< 130	Messung mit 5 mm Al-Rück- streuer hinter der Quelle

Tabelle 3: Scheinbarer Massenabsorptionskoeffizient für die β -Strahlung des Nuklidgemisches $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

Abstand Quelle-Detektor (mm)	Absorber vor dem Detektor		Absorber vor der Quelle		Bemerkungen
	μ/ρ (cm^2/g)	Flächengewicht des Absorbers für dieses μ/ρ (mg/cm^2)	μ/ρ (cm^2/g)	Flächengewicht des Absorbers für dieses μ/ρ (mg/cm^2)	
8	-	-	21,8	< 13	Messung mit 5 mm Al-Rück- streuer hinter der Quelle
50	18,9	< 26	12,3	2,6 - 65	
70	13,0	< 65	12,8	5,2 - 65	
50	28,8	< 13	12,7	< 65	

Tabelle 4: Scheinbarer Massenabsorptionskoeffizient für die β -Strahlung
des Nuklids ^{90}Sr

Abstand Quelle-Detektor (mm)	Absorber vor dem Detektor		Absorber vor der Quelle		Bemerkungen
	μ/ρ (cm^2/g)	Flächengewicht des Absorbers für dieses μ/ρ (mg/cm^2)	μ/ρ (cm^2/g)	Flächengewicht des Absorbers für dieses μ/ρ (mg/cm^2)	
8	-	-	29,0	< 52	
50	25,5	< 65	25,3	2,6 - 52	
70	23,9	< 65	30,6	14 - 65	
50	30,1	< 65	25,4	< 40	Messung mit 5 mm Al-Rück- streuer hinter der Quelle

Tabelle 5: Scheinbarer Massenabsorptionskoeffizient für die β -Strahlung
des Nuklids ^{90}Y

Abstand Quelle-Detektor (mm)	Absorber vor dem Detektor		Absorber vor der Quelle		Bemerkungen
	μ/ρ (cm^2/g)	Flächengewicht des Absorbers für dieses μ/ρ (mg/cm^2)	μ/ρ (cm^2/g)	Flächengewicht des Absorbers für dieses μ/ρ (mg/cm^2)	
8	-	-	2,74	130 - 390	
50	2,43	100 - 325	2,89	100 - 260	
50	-	-	4,72	260 - 420	
70	2,50	130 - 390	1,80	100 - 200	
70	-	-	4,65	200 - 450	
50	2,79	130 - 450	3,08	130 - 320	Messung mit 5 mm Al-Rück- streuer hinter der Quelle

Tabelle 6: Scheinbare Massenabsorptionskoeffizienten μ/ρ für β -Strahlen
nach Angaben verschiedener Autoren

Nuklid	$E_{\beta\max}$ (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)						
¹⁴⁷ Pm	0,23	-	90,8 ³⁾	141,5 ⁴⁾	183,2 ⁵⁾	139,5 ⁶⁾	155,4 ⁷⁾	109,6 ⁸⁾
⁹⁰ Sr	0,536	22 ¹⁾	34,61 ³⁾	41,49 ⁴⁾	54,64 ⁵⁾	41,47 ⁶⁾	50,42 ⁷⁾	33,52 ⁸⁾
²⁰⁴ Tl	0,765	13,5-14,6 ¹⁾	23,07 ³⁾	24,77 ⁴⁾	32,86 ⁵⁾	24,94 ⁶⁾	31,42 ⁷⁾	20,37 ⁸⁾
⁹⁰ Y	2,27	(< 3,5) ²⁾	6,78 ³⁾	5,12 ⁴⁾	6,94 ⁵⁾	5,26 ⁶⁾	7,39 ⁷⁾	4,44 ⁸⁾

- 1) Nach Sommermeyer (20)
- 2) Nach Sommermeyer (19) für ³²P. Für ⁹⁰Y muß wegen der höheren Maximalenergie der Wert für μ/ρ kleiner sein.
- 3) Nach Evans (16), $\mu/\rho = 17 \cdot E^{-1,14}$
- 4) Nach Roesch, zitiert bei Brown (21) $\mu/\rho = 16,8 \cdot E^{-1,45}$
- 5) Nach Konenko, zitiert bei Brown (21) $\mu/\rho = 22,4 \cdot E^{-1,43}$
- 6) Nach Gleason (22), $\mu/\rho = 17 \cdot E^{-1,43}$
- 7) Nach Price (23), $\mu/\rho = 22 \cdot E^{-1,33}$
- 8) Nach Huq (24), $\mu/\rho = 14 \cdot E^{-1,40}$

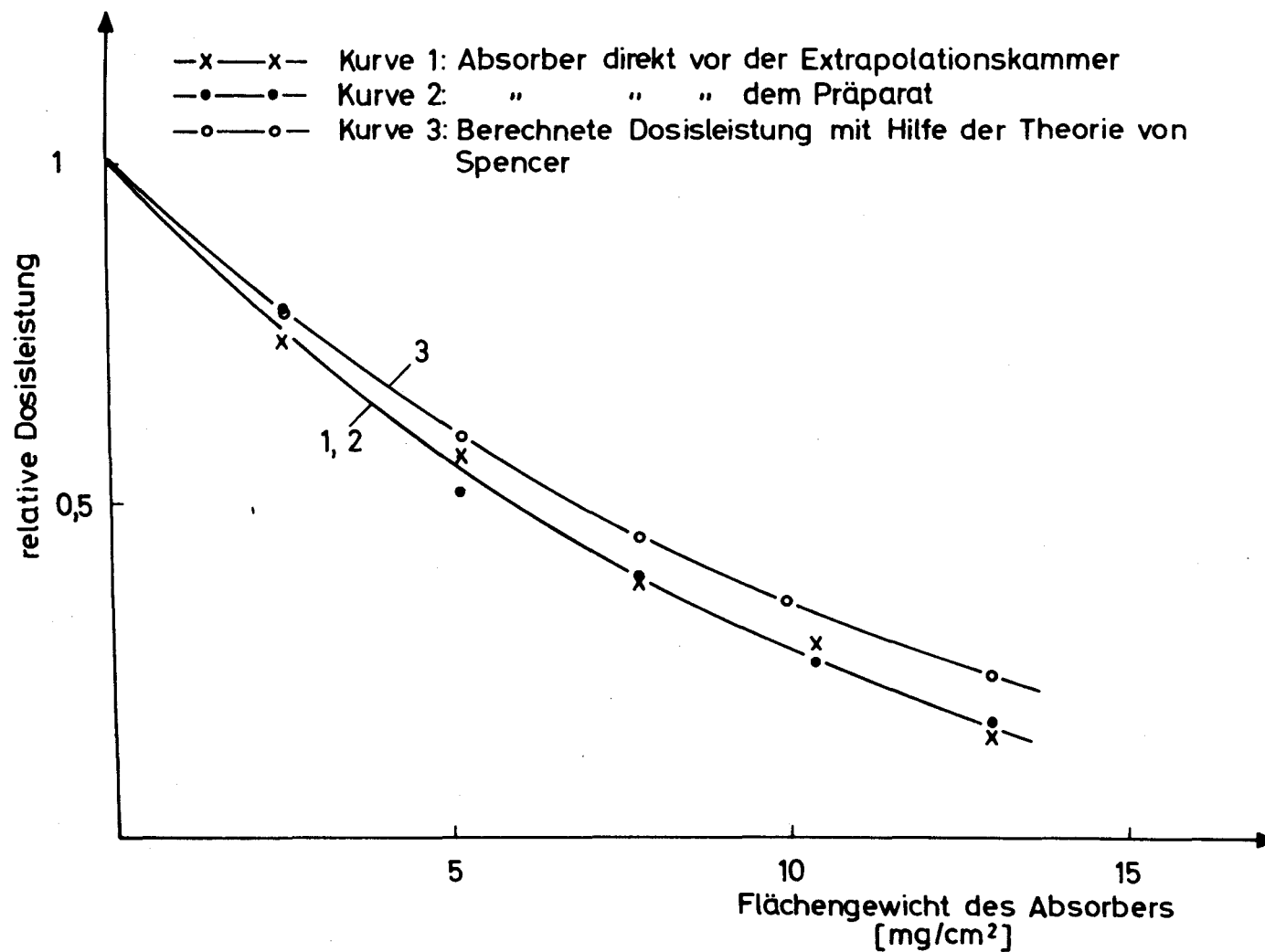


Abb. 1: Dosisleistung in 50 mm Abstand von einem ¹⁴⁷Pm β - Strahler in Abhängigkeit vom Flächengewicht eines zwischengeschalteten Absorbers
Absorber: Polycarbonatfolie Makrofol

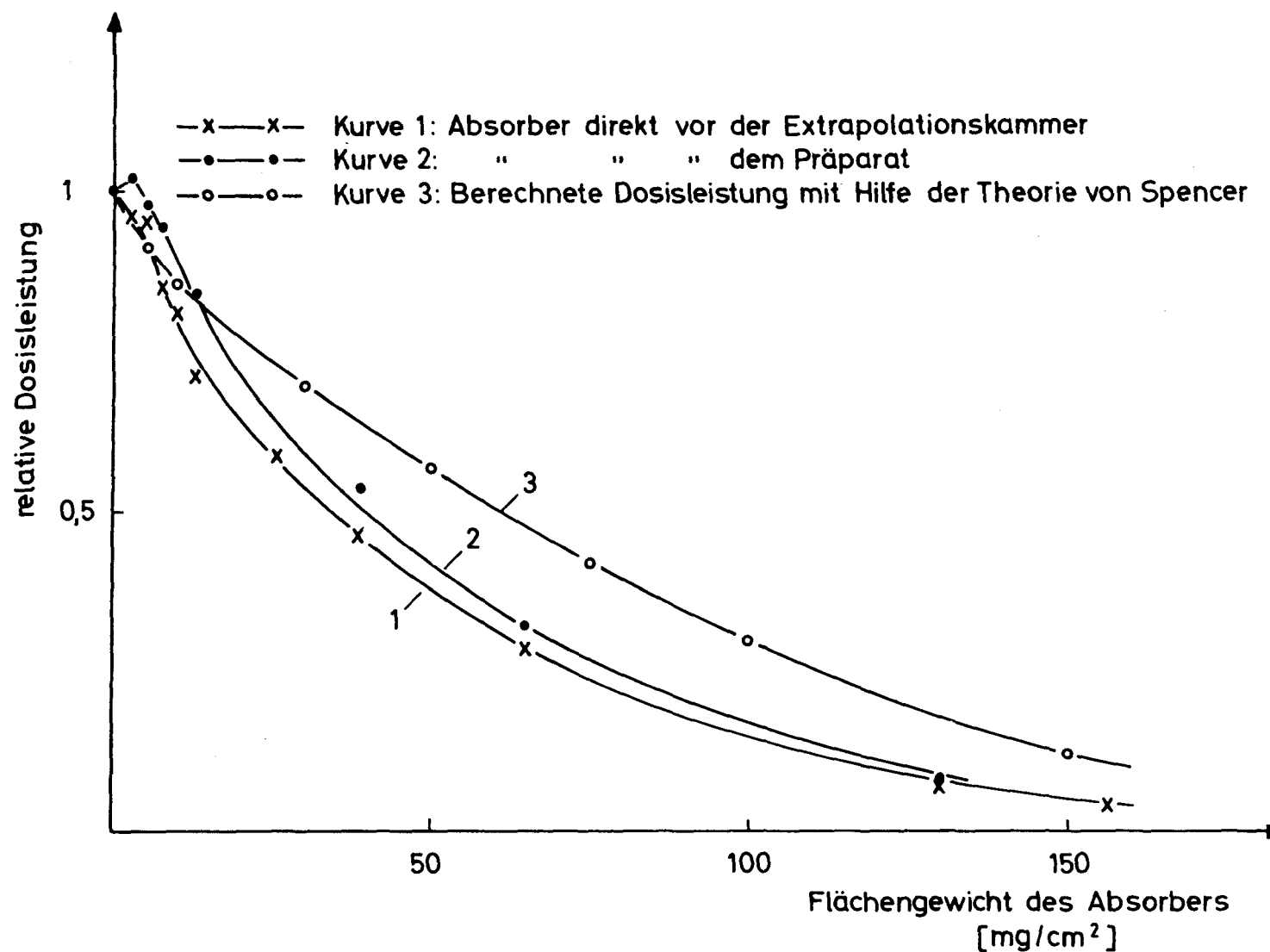


Abb. 2: Dosisleistung in 70 mm Abstand von einem ^{204}Tl β -Strahler in Abhängigkeit vom Flächengewicht eines zwischengeschalteten Absorbers
Absorber: Polycarbonatfolie Makrofol

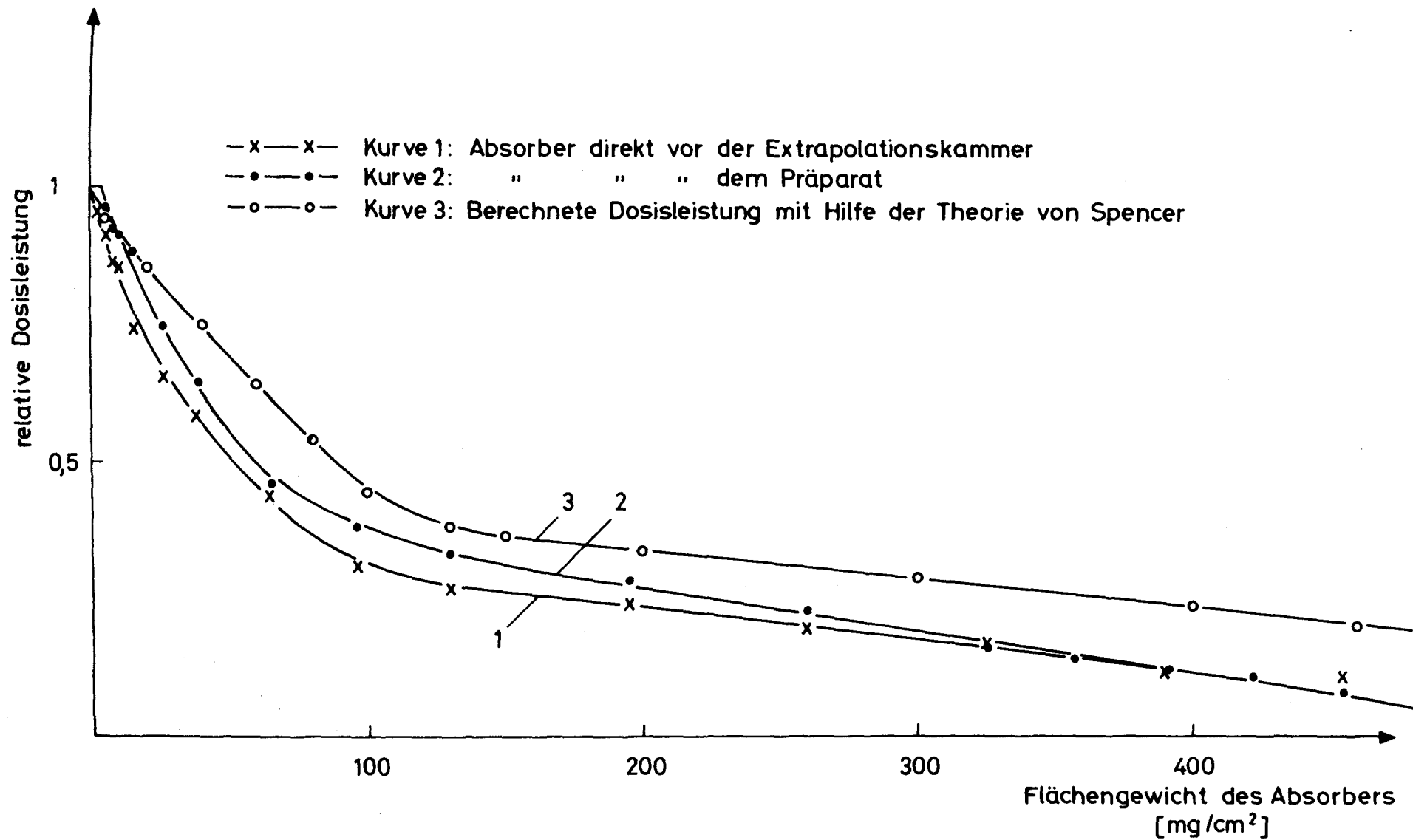


Abb. 3: Dosisleistung in 50 mm Abstand von einem $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β -Strahler in Abhängigkeit vom Flächengewicht eines zwischengeschalteten Absorbers für 2 verschiedene Absorberstellungen
 Absorber: Polycarbonatfolie Makrofol

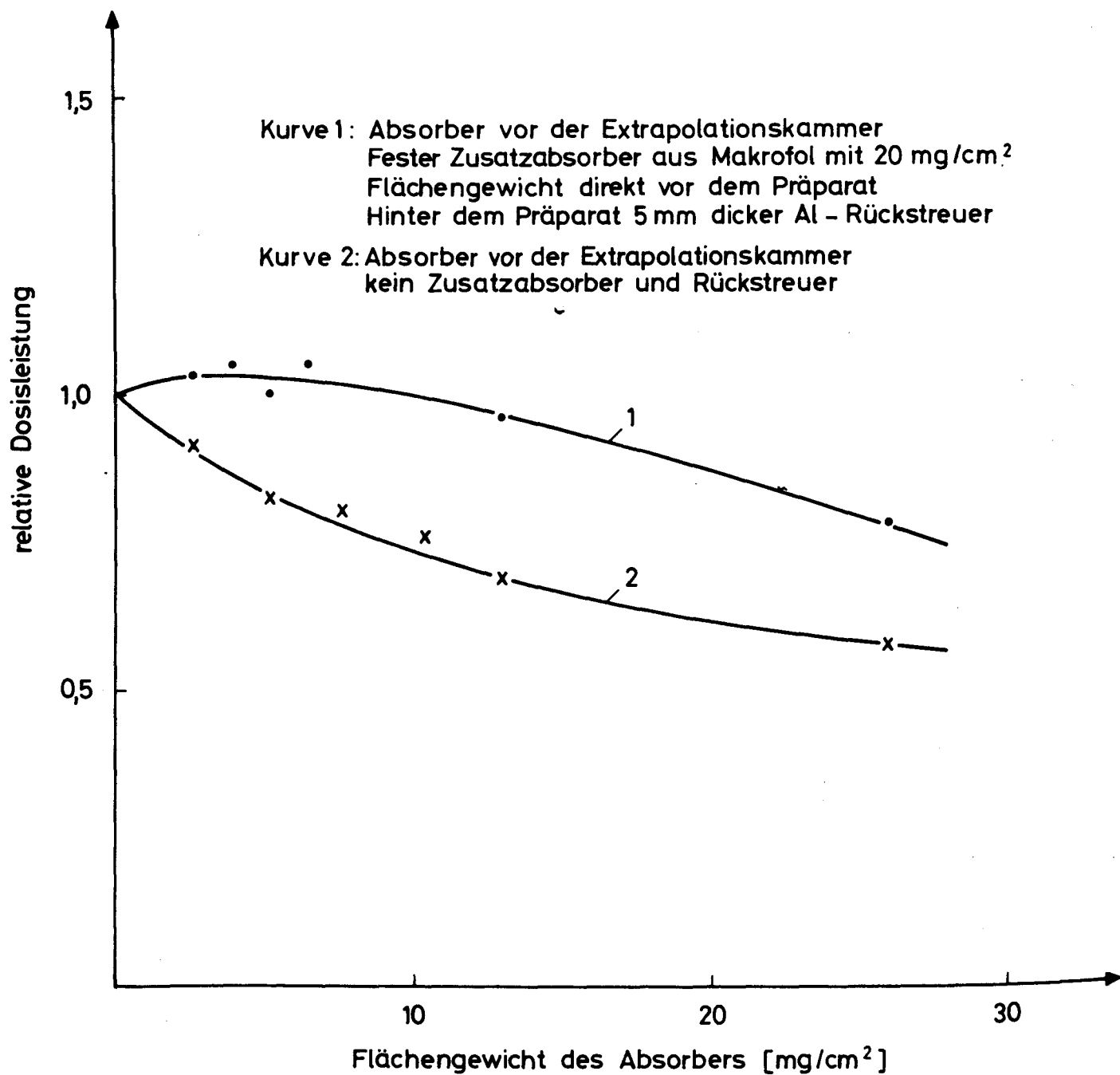


Abb. 4: Einfluß einer Folie vor dem Präparat auf den Verlauf der Absorptionskurve für ^{204}Tl β -Strahlung

Abstand Präparat-Extrapolationskammer: 50 mm

Absorber: Polycarbonatfolie Makrofol

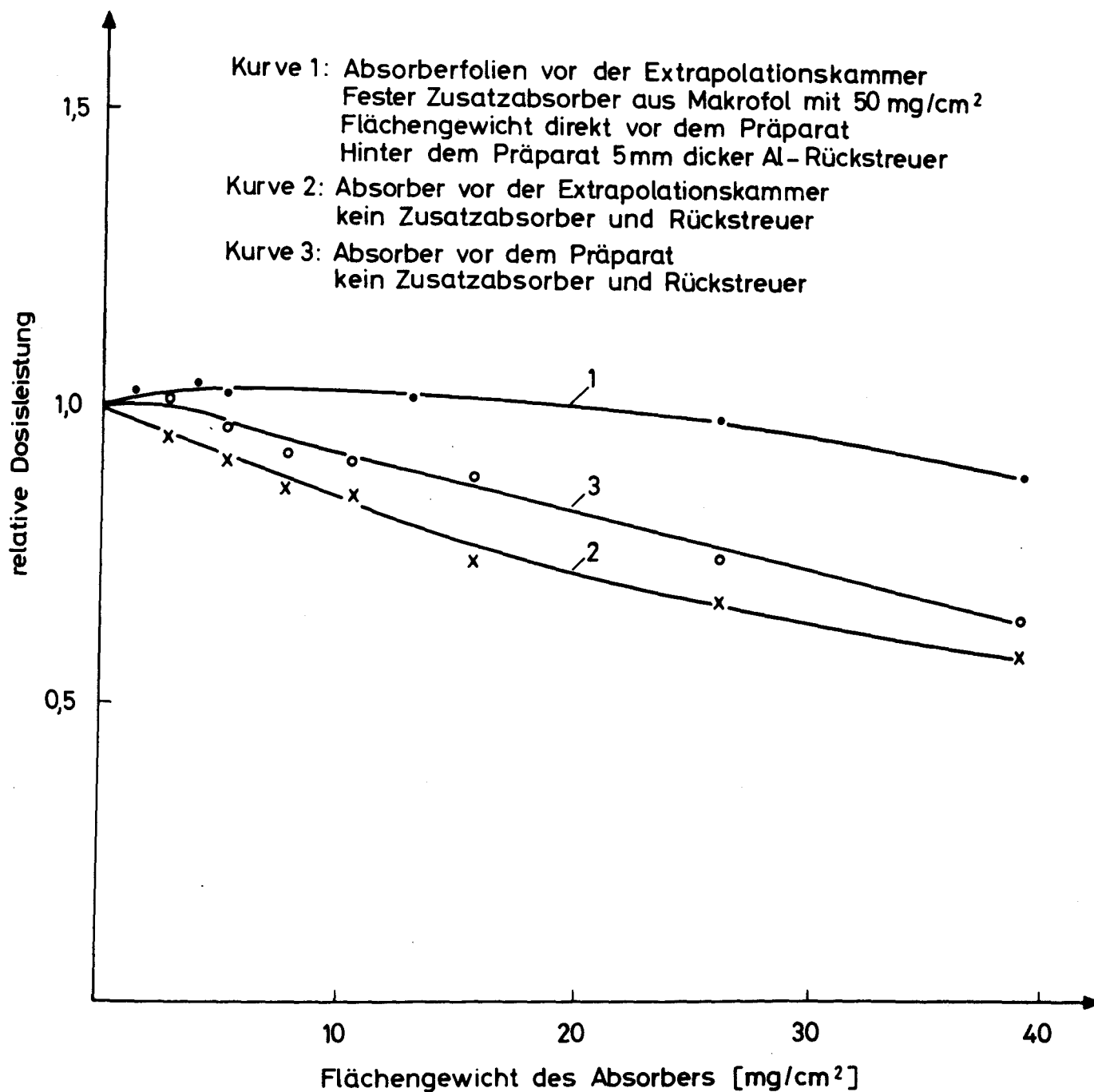


Abb. 5: Einfluß einer Folie vor dem Präparat auf den Verlauf der Extrapolationskurve für $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β -Strahlung

Abstand Präparat - Absorber: 50 mm
Absorber: Polycarbonatfolie Makrofol

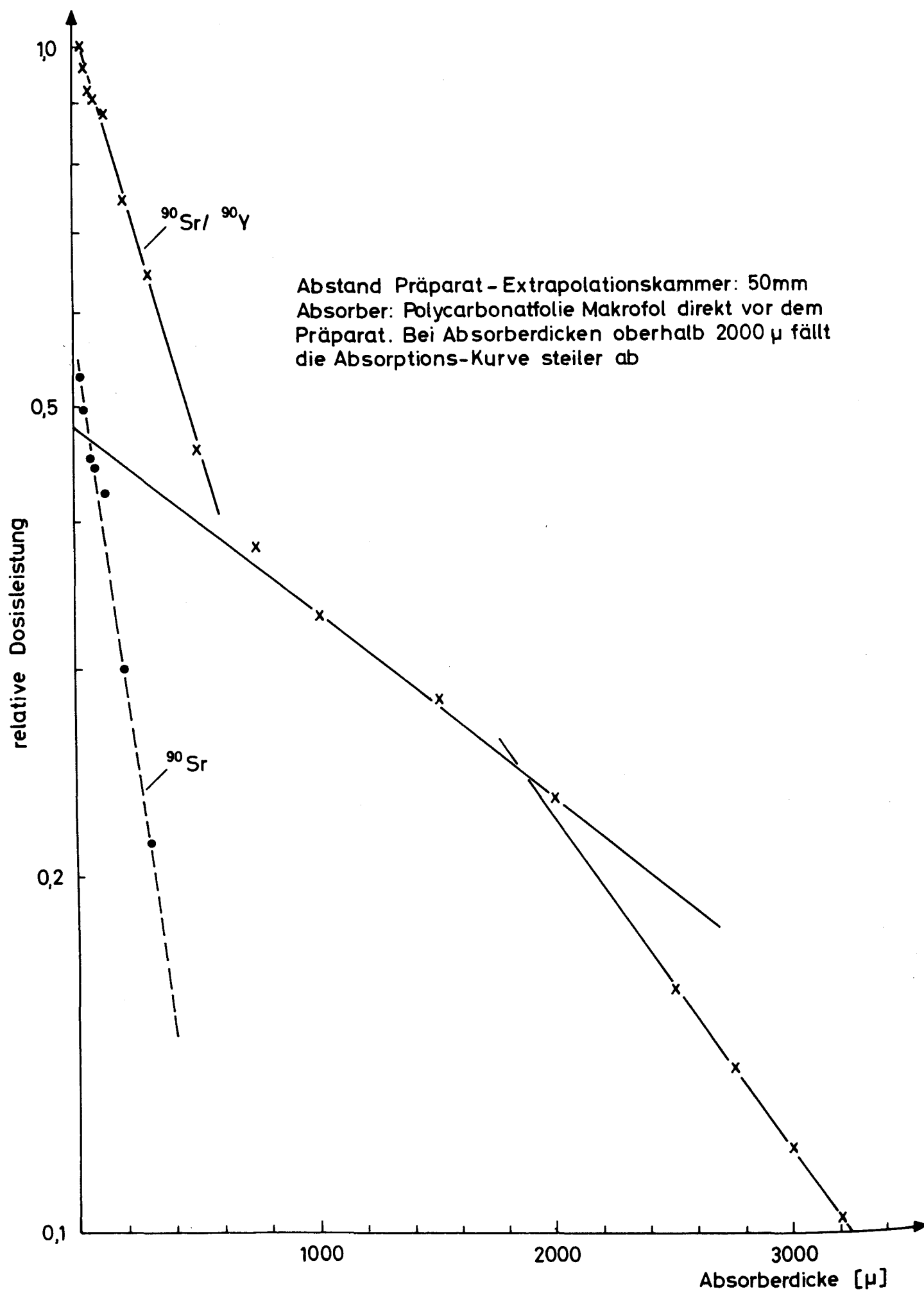


Abb. 6: Absorptionskurve der $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β -Strahlung in halblogarithmischer Darstellung und durch Differenzbildung gewonnene Kurve für die ^{90}Sr β -Strahlung

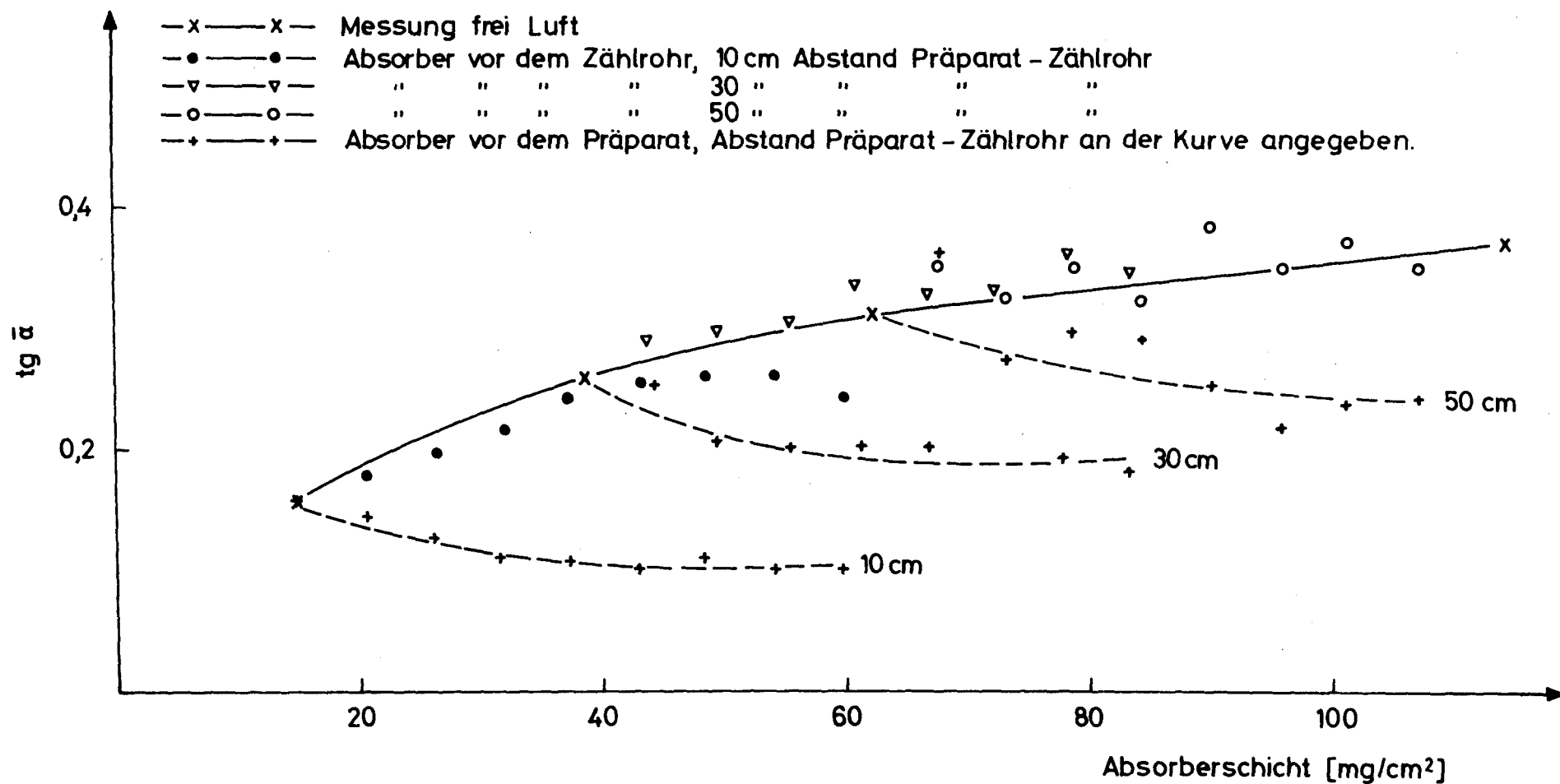


Abb.7: Tangens des mittleren Winkels der β -Teilchen eines $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ Präparates mit der Achse des Strahlenfeldes für verschiedene Absorberdicken und verschiedene Stellungen des Absorbers
Absorber: Polycarbonatfolie Pokalon

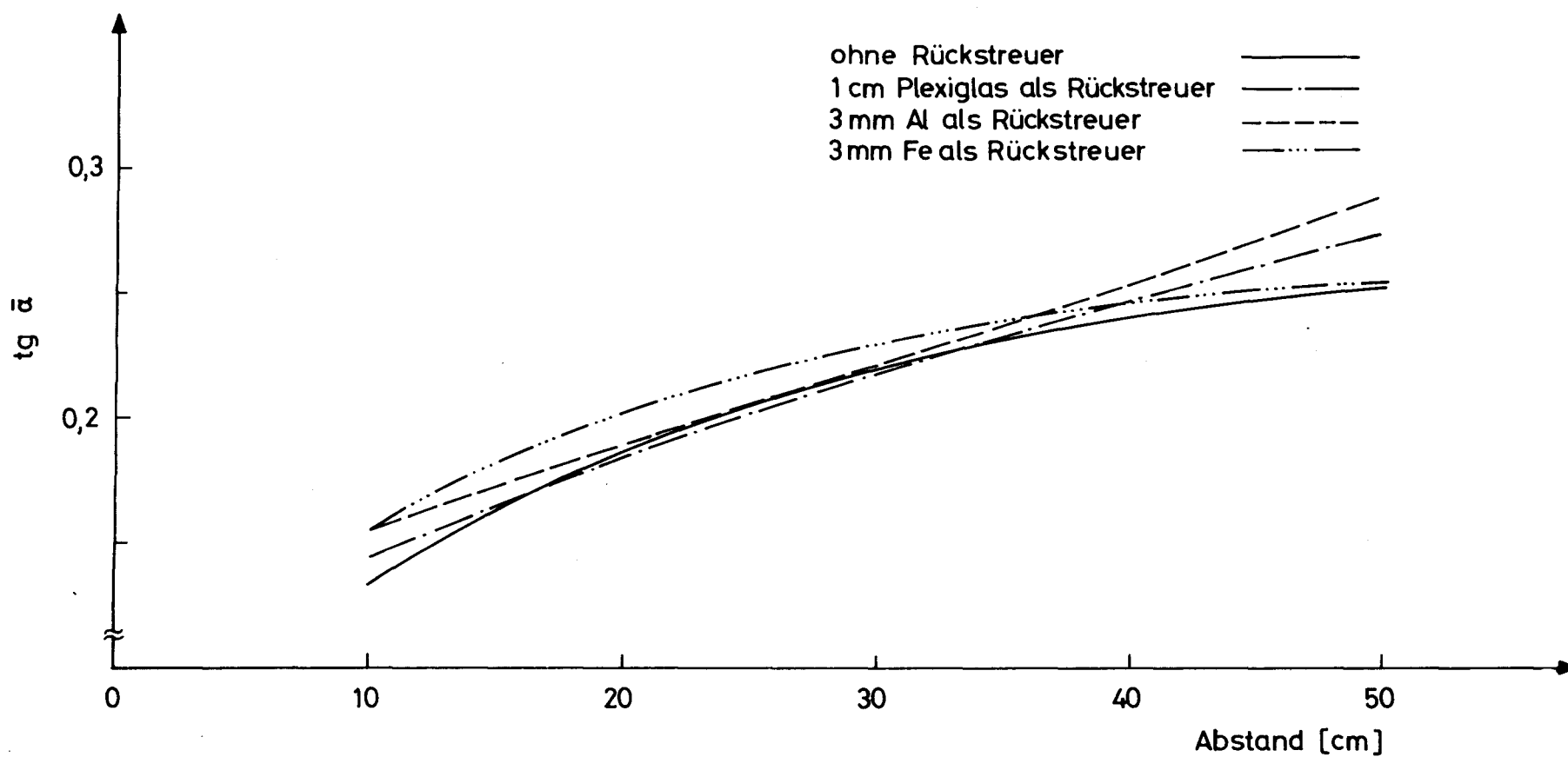


Abb. 8: Tangens des mittleren Winkels der β -Teilchen eines $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ Präparates in Luft mit der Achse des Strahlenfeldes bei verschiedenen Rückstreuern