

DEUTSCHES ELEKTRONEN-SYNCHROTRON
(DESY)

Hamburg-Gr.Flottbek 1, Flottbeker Drift 56

DESY-Bibliothek

MAZUKED

DESY A 2.60

Hamburg, den 8. April 1960
M 7 - Dr.Ba./Pa.

Strahlenbelastung der Vakuumkammer-Wand

Die im Elektronen-Synchrotron umlaufenden Elektronen senden tangential zu ihrer Bahn elektromagnetische Strahlung aus, die dann in bzw. hinter den Magnetsektoren unter einem Winkel von ca. 4° ($\sin \alpha = \frac{1}{15}$) auf die innere Oberfläche der Ringröhre fällt. Für die Breite der betroffenen Schicht werden 3 mm angenommen, ihre Länge beträgt insgesamt $2\pi \cdot \rho = 200$ m. Der Strahlungsverlust eines Elektrons während eines vollen Beschleunigungsvorganges beträgt bei 7,5 GeV Endenergie (und $B_{\max} = 8,5 \text{ kG}$) : $W_{\text{el}} = 13,2 \text{ GeV}$. Bei 10^{11} El./Puls und 50 Pulsen/sec ergibt sich daraus eine Strahlungsleistung von $1,06 \times 10^4 \text{ W}$, so daß die betroffenen Stellen der Kammerwand eine Bestrahlungsstärke

$$I = \frac{10.600}{20.000 \times 0,3} = 1,77 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} = 1,77 \cdot 10^7 \frac{\text{erg}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$$

erhalten. Rechnet man 1 Arbeitsjahr (300 Tage à 16 h) = $1,73 \times 10^7 \text{ s}$, so ergibt sich die von 1 cm^2 der betroffenen Kammerwand in 1 Jahr absorbierte Energie zu

$$E = I \times 1,73 \times 10^7 = 3,07 \times 10^{14} \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2} .$$

Würde diese Energie innerhalb einer Schichtdicke mit der Masse/Fläche von 1 g/cm^2 gleichmäßig absorbiert werden, so würde dieses betroffene Volumen eine konstante Energie-Dosis von

$$D = 3,07 \times 10^{14} \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2} / 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2} = 3,07 \times 10^{14} \frac{\text{erg}}{\text{g}} = 3,07 \times 10^{12} \text{ rad}$$

erhalten ($\frac{100 \text{ erg}}{\text{g}} = 1 \text{ rad}$). Die Absorption eines breiten Spektrums von Röntgenstrahlen betrifft die obersten Schichten jedoch erheblich stärker als tiefer gelegene. Der tatsächliche Verlauf der absorbierten

Dosis wird im Folgenden unter Zugrundelegung des emittierten Spektrums und des Absorptionskoeffizienten des Wandmaterials berechnet.

Als Wandmaterial wird Porzellan mit einer 1 μ dicken Platinschicht angenommen. Für das Porzellan wird der Absorptionskoeffizient von Aluminium angenommen. Das würde für ein Material aus reinem Al_2O_3 (Dichte = 3,7 g/cm³) eine gute Näherung für das tatsächliche Absorptionsverhalten gegenüber Röntgenstrahlen im interessierenden Quantenenergie-Bereich von ca. 2 bis 150 keV sein, da das Al den überwiegenden Anteil an der Absorption hat und die geringere Absorption des Sauerstoffs durch die größere Dichte ausgeglichen wird.

Auch wenn Al teilweise oder ganz durch Si ersetzt wird, wie es in normalem Hartporzellan bzw. Quarz oder Glas der Fall ist, ändert sich daran wegen der benachbarten Ordnungszahlen nichts Wesentliches.

Der Massenabsorptionskoeffizient $\frac{\mu}{\rho}$ von Al und Pt ist in Bild 1 dargestellt. Dieser ist ohne weiteres für die aus dem einfallenden Strahlenbündel verschwindende Energie maßgebend. Soll jedoch die an ein bestimmtes Volumenelement abgegebene Energie berechnet werden, muß für den Fall, daß die Reichweite R der gebildeten Primärelektronen und der charakteristischen Strahlung (K, L, M oder N-Strahlung) nicht mehr klein genug gegenüber den Maßen des betreffenden Volumenelementes ist, eine Korrektur angebracht werden. Diese muß die durch die Sekundärstrahlungen mit den Nachbarelementen ausgetauschte Energie berücksichtigen. Das ist insbesondere nötig für die Schichten an der Oberfläche wegen der zunächst starken Änderung der absorbierten Energie mit der Schichttiefe und der Grenzschicht-Effekte.

Das momentane Energiespektrum $F(\xi)$ (Strahlungsleistung pro Energieintervall $d\xi$ über der Quantenenergie ξ) bei der Elektronenenergie W ist gegeben durch:

$$F(\xi) \cdot d\xi = \frac{3^{5/2}}{8\pi} \cdot S \cdot \frac{\xi \cdot d\xi}{\xi_c^2} \cdot \int_{\xi/\xi_c}^{\infty} K_{5/2}(\eta) d\eta$$

$$\text{mit } S = \frac{2}{3} \cdot \frac{e^2 \cdot c}{\rho \cdot R} \cdot \left(\frac{W}{mc^2}\right)^4 \quad \text{und} \quad \xi_c = \frac{3}{2} \frac{\hbar \cdot c}{\rho} \cdot \left(\frac{W}{mc^2}\right)^3 = 2,2 \cdot \frac{W(\text{in GeV})^3}{\rho(\text{in g/cm}^3)} [\text{keV}]$$

Das über einen vollen Beschleunigungsvorgang gemittelte Energiespektrum wird erhalten durch die von Tombouljan und Bedo dargestellte Rechnung:

$$W(\epsilon) = W_{\max} \cdot \sin^2\left(\frac{\epsilon}{\gamma}\right)$$

T = volles Beschleunigungsintervall

$$\overline{P}_v(\epsilon) \cdot d\epsilon = \frac{1}{T} \int_0^T P(\epsilon, t) \cdot dt$$

Das $\overline{P}_v(\epsilon)$ und das daraus abgeleitete $F(\epsilon) = \epsilon \cdot \overline{P}_v(\epsilon)$ ist für

$$W_{\max} = 7,5 \text{ GeV}, \quad \beta = 31,7 \text{ m (also } \epsilon_e = 29,5 \text{ keV)}$$

in Bild 2 und 3 dargestellt.

Weiterhin sind in Bild 3 eingetragen die Spektren nach Durchdringen verschiedener Platin- und Aluminiumschichten ($\frac{\mu}{\rho}$ gemäß Bild 1), wobei die durchsetzte Schichtdicke in Strahlrichtung gemeint ist; in dieser Richtung gemessen beträgt also die Pt-Schicht insgesamt $15 \times 1 \mu = 15 \mu$ und die Porzellan- bzw. Quarz-Schicht mindestens $15 \times 0,4 \text{ cm} = 6 \text{ cm}$ (der Faktor 15 ergibt sich daraus, daß der Strahl unter einem Winkel von ca. 4° gegen die Wandoberfläche trifft).

Die Fläche zwischen zwei Kurvenzügen (in Bild 3) gibt den in der dazwischenliegenden Schicht absorbierten Anteil der Gesamtstrahlung wieder. Dieser Bruchteil, dividiert durch die Masse pro Flächeneinheit der betreffenden Schicht, ergibt eine relative Dosis D_{rel} , aus der sich die wahre Dosis D berechnet:

$$D = \frac{1}{100} \times D_{\text{rel}} \times E,$$

wobei E die in einer bestimmten Zeit insgesamt einfallende Strahlungsenergie pro cm^2 ist, z.B. das oben für 1 Jahr errechnete

$$E = 3,07 \times 10^{14} \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2}.$$

Zunächst ist die relative Dosis in Bild 4 a und b in Abhängigkeit vom Weg (in Strahlrichtung) aufgetragen. Zählt man beim hier vorliegenden Fall des schrägen Eindringens die Schichttiefe senkrecht zur Oberfläche, muß auf derselben Darstellung der Absz.-Maßstab um den Faktor 15 gedehnt und der Ordinaten-Maßstab ebenso gedrängt werden.

Unter Berücksichtigung der Reichweiten der gebildeten Primärelektronen und der N- und L-Strahlung des Platins ergibt eine Abschätzung, daß von den 69 % der Gesamt-Strahlung, die in der 1 μ dicken Pt-Schicht absorbiert werden, 13 % zurückgestreut werden, d.h. auf andere Stellen der Kammer-Innenwand gelangen; weitere 6 % verlassen die Pt-Schicht nach der anderen Seite, d.h. sie gelangen in das Porzellan bzw. Quarz. Diese letzteren beiden Anteile enthalten:

- 1) die 13 %: M-Strahlung: ca. 1,5 keV, "Reichweite" ca. 0,35 μ Pt
L-Strahlung: ca. 9 keV, " ca. 3,5 μ Pt
bzw. ca. 25 μ Porzellan
und Elektronen von 1,5 - 10 keV, Reichweite ca.
0,01 - 0,2 μ Pt
- 2) die 6 %: L-Strahlung wie oben
und Elektronen, max. bei ca. 15 keV, Reichweite ca.
3,5 μ Porzellan.

Insgesamt 31 % der ursprünglichen Strahlungsleistung dringt in das Porzellan (Quarz) ein und wird auf der in Frage kommenden Weglänge von mindestens 6 cm praktisch vollkommen absorbiert. Dabei spielt jedoch nun auch Streu-Absorption (Compton-Effekt) eine Rolle, die beim Platin in dem dort maßgebenden Quanten-Energiebereich völlig zu vernachlässigen war. Auf Bild 5a ist dargestellt:

- 1) der Anteil der Streu-Absorption an der Gesamt-Absorption,
- 2) der energetische Anteil der emittierten Streustrahlung und
- 3) der Anteil davon, der die 4 mm dicke Kammerwand noch durchdringt.

Dieser letzte Anteil beträgt etwa 4 % der einfallenden Strahlung. Das in Bild 5b dargestellte Spektrum dieser Streustrahlung erhält man durch Multiplikation der Kurve 3 mit dem Spektrum der ins Porzellan

(Quarz) einfallenden Strahlung (Bild 3, Kurve "15/μ Pt").

Die Dosisleistung dieser Streustrahlung aus dem Ring berechnet sich wie folgt:

$$4 \% \text{ von } 1,06 \times 10^4 \text{ W} = 424 \text{ W,}$$

betroffene Länge: 200 m, also werden pro cm Ringröhre $2,1 \times 10^{-2}$ W Streustrahlung emittiert.

Das ergibt beispielsweise in 1 m Abstand vom Ring an den betroffenen Stellen eine Bestrahlungsstärke:

$$I = \frac{2,1 \times 10^{-2} \text{ W/cm}}{630 \text{ cm}} = 3,3 \times 10^{-5} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

oder

$$I = 330 \frac{\text{erg}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$$

Im Energiebereich von 50 bis 200 keV entsprechen $3300 \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2} = 1 \text{ r}$, also ist die Dosisleistung in 1 m Entfernung vom Ring

$$0,1 \text{ r/s} = 6 \text{ r/min.}$$

Die o.a. relativen Dosen für Platin und Porzellan (Quarz) sind zusammen in Bild 6 noch einmal doppelt-log. aufgetragen.

Der rechte Ordinaten-Maßstab gibt die Absolutwerte der pro Arbeitsjahr absorbierten Dosis in "rad" gemäß

$$D = \frac{1}{100} \cdot D_{\text{rel}} \left[\frac{1}{\text{g/cm}^2} \right] \times 3,07 \times 10^{14} \left[\frac{\text{erg}}{\text{cm}^2} \right] = D_{\text{rel}} \times 3,07 \times 10^{10} \text{ [rad]}$$

an. Danach erhält:

die Platin-Oberfläche	:	3×10^{15}	rad/Jahr
die oberste, 0,5 μ dicke Porzellanschicht:	:	5×10^{13}	rad/Jahr
und die folgende Porzellanschicht maximal:	:	1×10^{13}	rad/Jahr
in 2 mm unter der Oberfläche	:	$\leq 10^{11}$	rad/Jahr.

Zur Veranschaulichung dieser Werte ist in der folgenden Tabelle angegeben, wie diese Dosen durch Elektronenbeschuss bis zur jeweiligen Tiefe nachgemacht werden können. Dabei ist in grober Näherung angenommen worden, daß die Elektronen auf ihrer gesamten Reichweite eine gleichbleibende Dosis erzeugen:

bis zur Schichttiefe von	durch Elektr. Energie	verlangte Dosis	zu erreichen durch	die der tatsächlichen mittl. Bestr. Stärke entspr. Stromdichte beträgt
0,1 μ Pt	6 keV	3×10^{15} rad	300 $\frac{\text{mA} \cdot \text{Std}}{\text{cm}^2}$	62 $\frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$
0,3 "	11,5 "	1×10^{15} "	155 "	32 "
1,0 "	25 "	3×10^{14} "	71 "	15 "
0,1 mm Porz.	140 "	7×10^{12} "	4,2 "	0,9 "
1 " "	600 "	$2,5 \times 10^{12}$ "	3,4 "	0,7 "

Bei einer derartigen Untersuchung ist sehr zu beachten, daß die Elektronenenergie etwa mit der Quantenenergie der tatsächlichen Strahlung übereinstimmt, damit hierbei nicht andere Prozesse auftreten können als bei der Synchrotronstrahlung. Das ist, wie die Tabelle erkennen läßt, bei den ersten vier Positionen hinreichend der Fall; bei den 600 keV-Elektronen jedoch schon nicht mehr. Diese überschreiten die Grenzenergie von ca. 160 keV, oberhalb welcher schon Gefügeänderungen im Porzellan oder Quarz (wegen ihres Sauerstoffanteiles) zu erwarten sind. Diese Grenzenergie ergibt sich aus der experimentell gut bestätigten Bedingung, daß die stoßenden Elektronen auf ein Atom im Gitter mindestens etwa 25 eV übertragen müssen; danach ist $E_{\text{grenz}} \approx 10 \cdot A$ [keV]; A = Atomgewicht. (Z. B. für Germanium mit A = 72 wurde ein Schwellenwert von 650 keV gefunden, von dem ab die Elektronenbestrahlung eine mit weiterer Energiesteigerung stark anwachsenden Leitfähigkeitsschwund bewirkte.)

Zu derartiger Beeinflussung des Ausgangsmaterials, die sich durch Änderung der Leitfähigkeit, Dichte, Wärmeausdehnung usw. bemerkbar macht, sind also nur die energiereichsten Quanten der Synchrotron-Strahlung in der Lage. Ihre Zahl ($< 10^{19}$ pro cm^2 und Arbeitsjahr, vergl. Bild 2) ist sicher zu klein, um zu nennenswerten Effekten zu führen. Für Neutronen, die etwa um einen Faktor 100 wirksamer sind als Elektronen der fraglichen Energie, wurde eine Dichteabnahme von Quarz um 10 % erst bei 10^{20} Neutronen pro cm^2 gemessen.

Danach dürften auch die auf die Kammerwand treffenden energiereichen Strahl-Elektronen in dieser Hinsicht keine wesentlichen Effekte bewirken, selbst dann nicht, wenn alle eingeschossenen Elektronen auf die Wand in einer Fläche von ca. 6000 cm^2 (S. 6) treffen würden und ihre Wirksamkeit derjenigen von Neutronen gleichkommt. Ihre Zahl kann auch unter diesen Annahmen $1,5 \cdot 10^{17}$ pro cm^2 und Arbeitsjahr nicht übersteigen.

G. Bathow

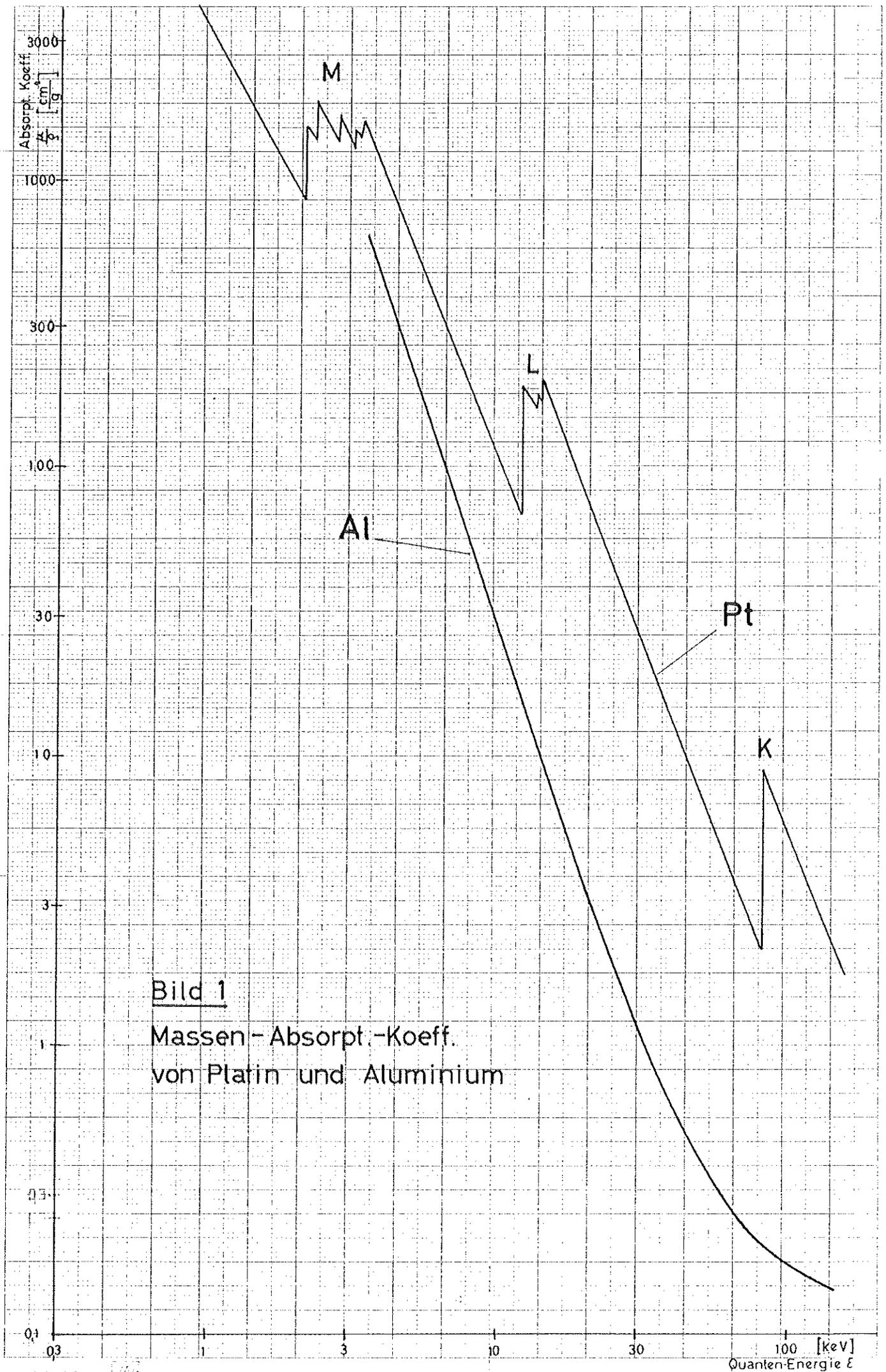
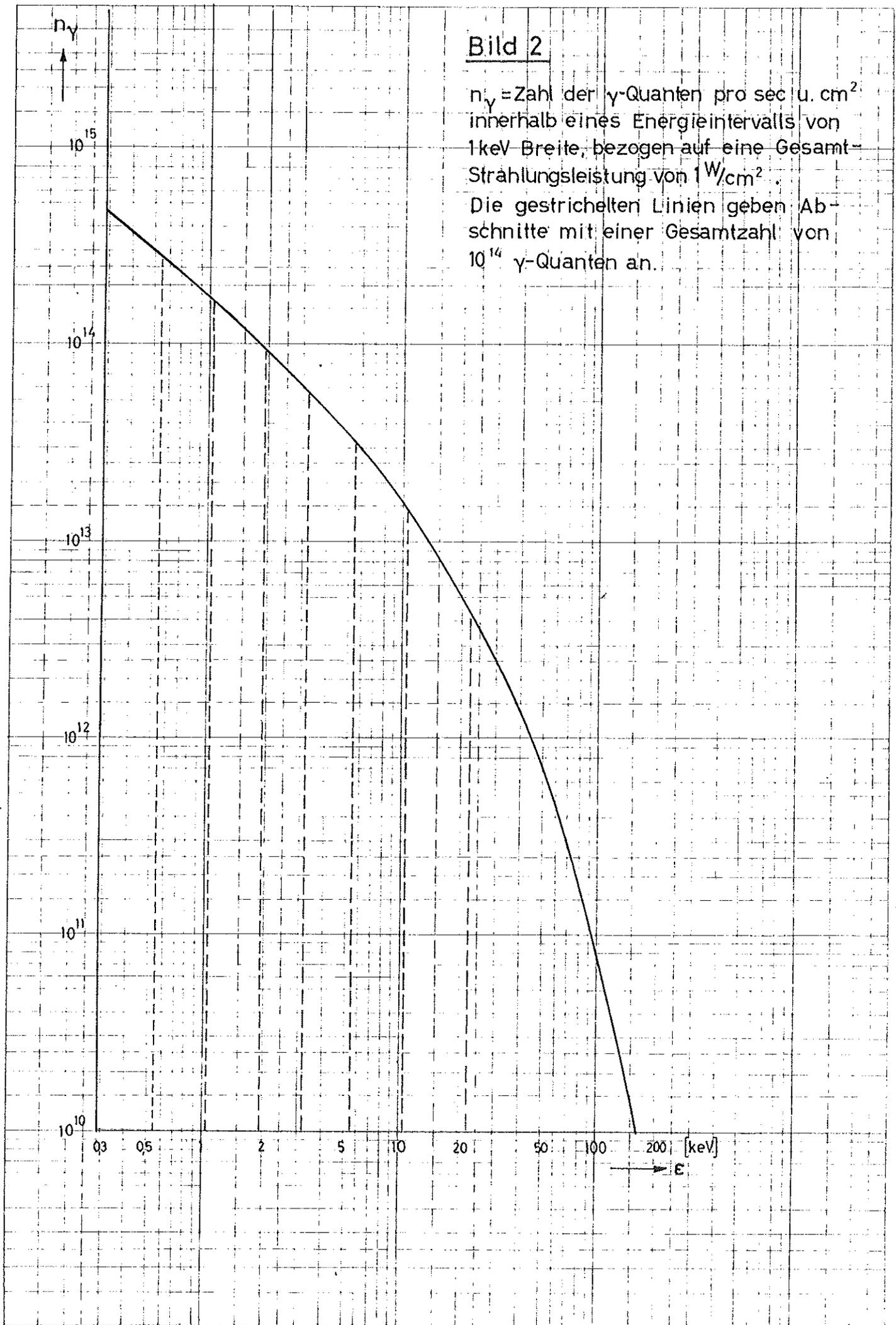


Bild 1
 Massen-Absorpt.-Koeff.
 von Platin und Aluminium

Bild 2

n_γ = Zahl der γ -Quanten pro sec u. cm^2 innerhalb eines Energieintervalls von 1keV Breite, bezogen auf eine Gesamtstrahlungsleistung von $1 \text{ W}/\text{cm}^2$.

Die gestrichelten Linien geben Abschnitte mit einer Gesamtzahl von 10^{14} γ -Quanten an.



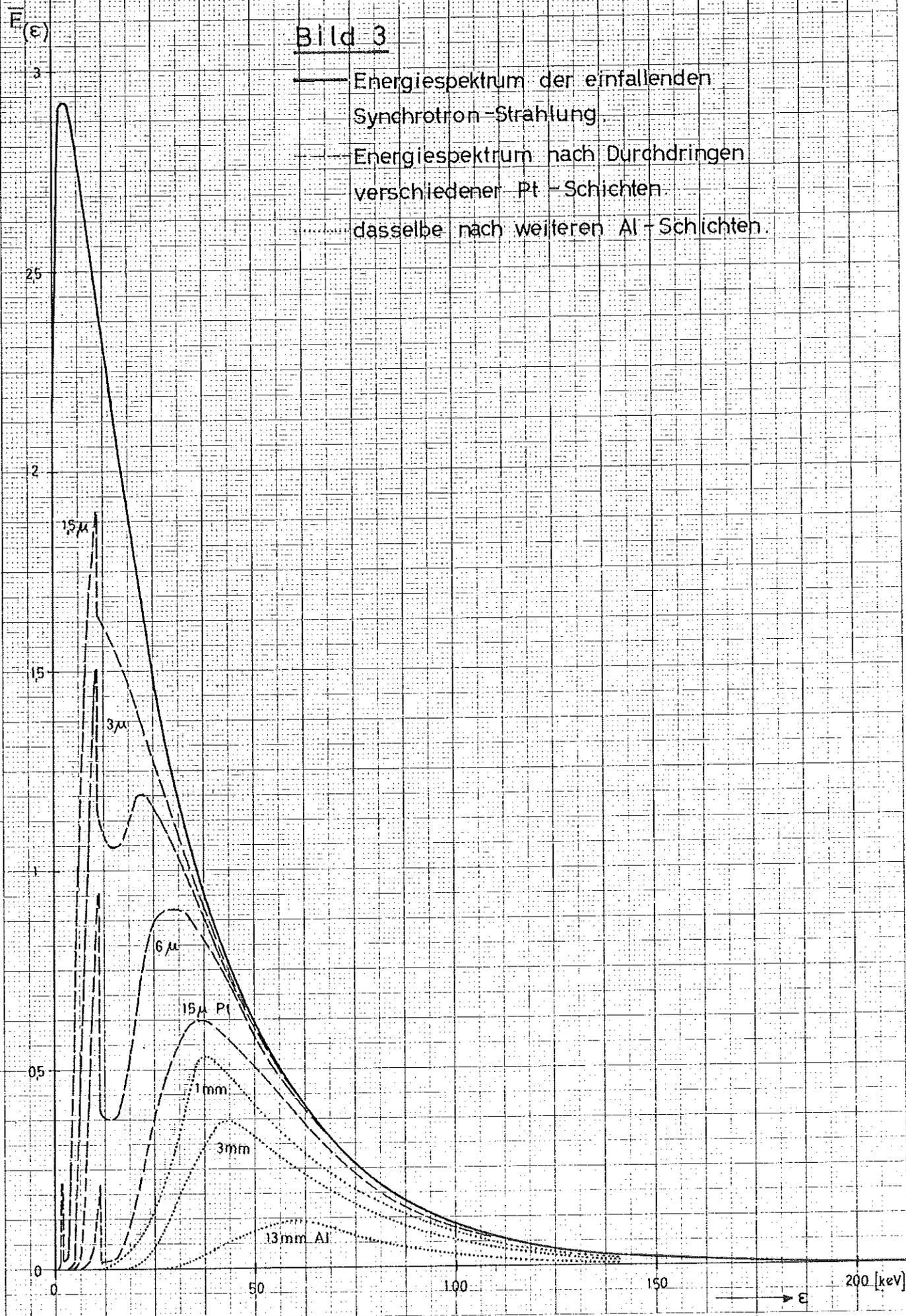


Bild 4a

Relative absorbierte Dosis in der Platinschicht

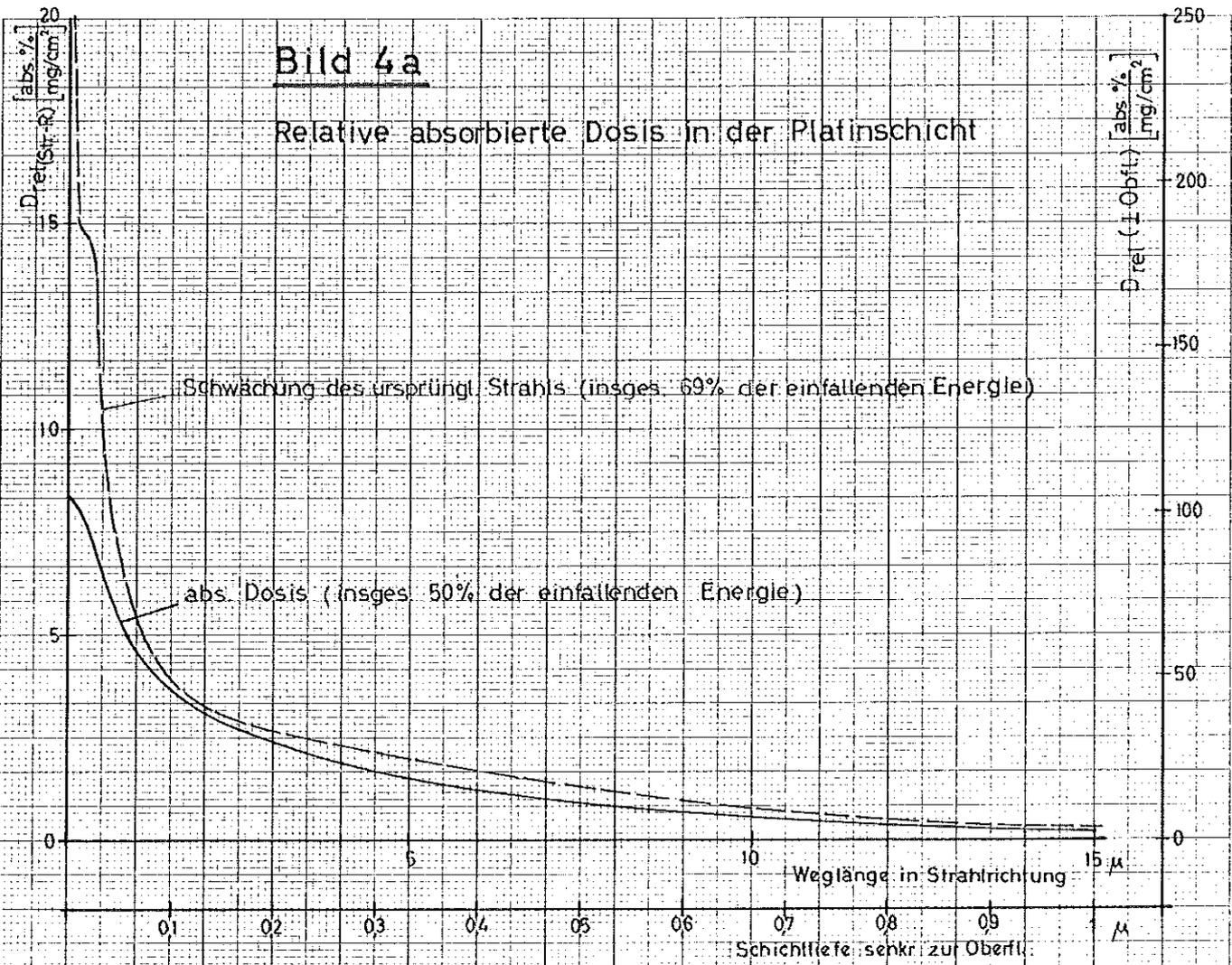


Bild 4b

Rel. abs. Dosis im Porzellan bzw. Quarz

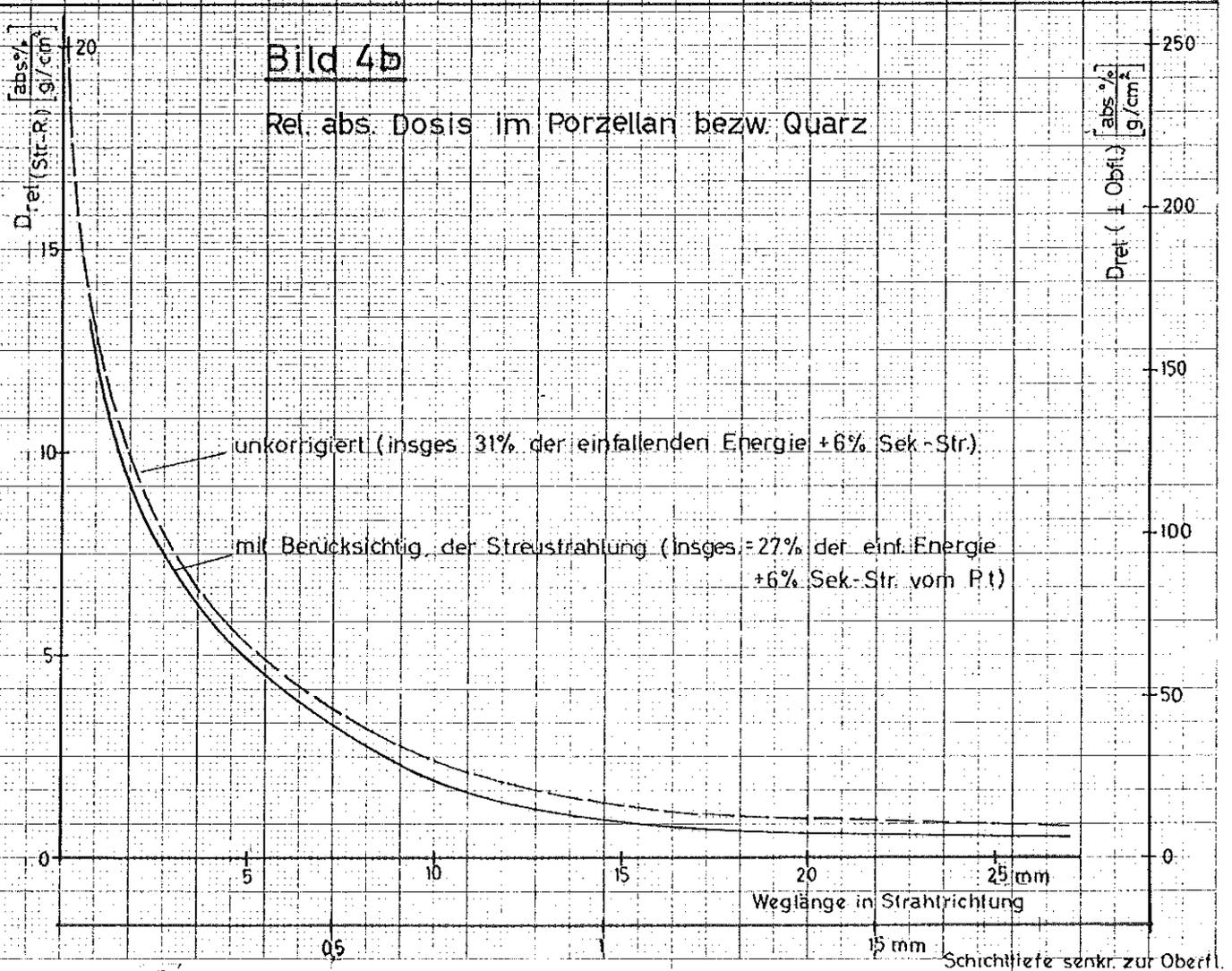


Bild 5a

Anteil der Compton-Streuung bei der Absorption im Aluminium.

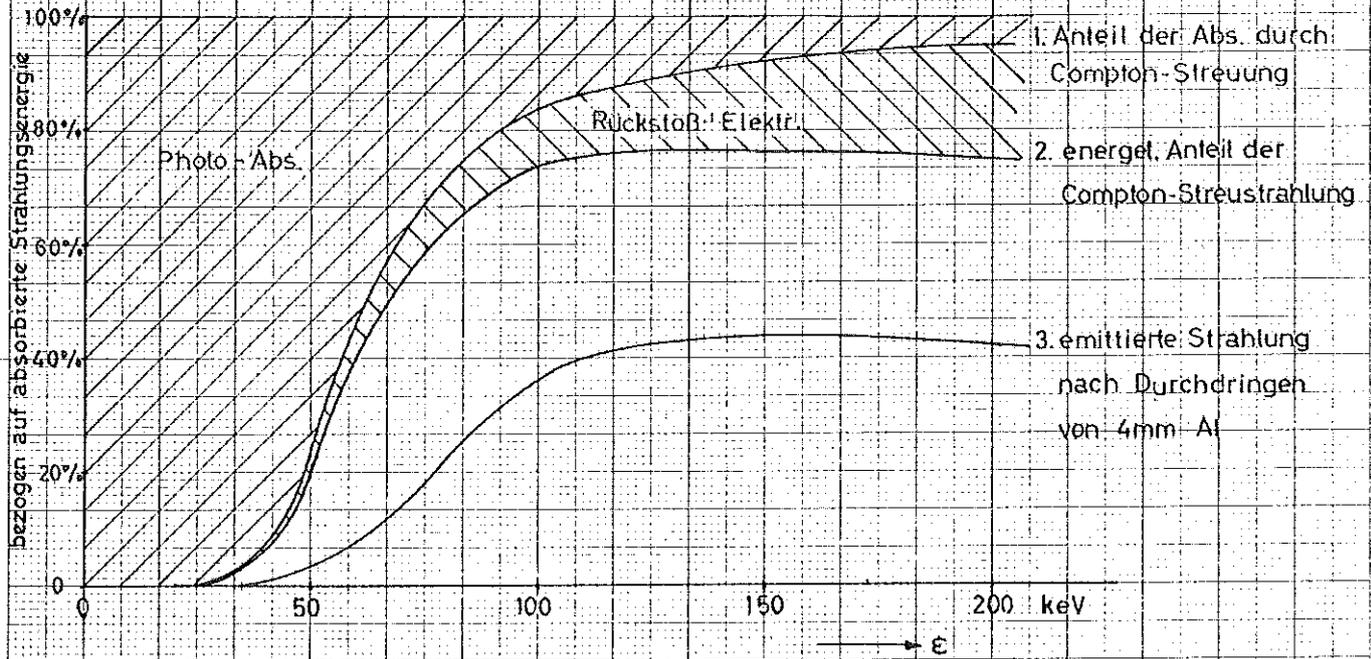


Bild 5b

Spektrum der Streustrahlung, die die Ringröhre verläßt.

