

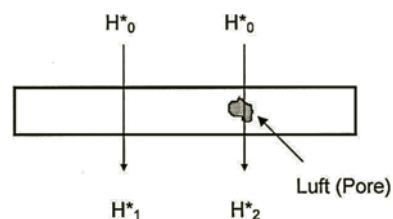
Für die Schwächung von Röntgen- oder Gammastrahlung kann definiert werden [2.1]:

Schwächung bedeutet eine Verringerung der Dosisleistung von Strahlung beim Durchdringen von Materie.

Bei der Durchstrahlungsprüfung werden die Dosis- bzw. Dosisleistungsunterschiede zwischen dem Grundmaterial und der Ungänze in Einstrahlrichtung verglichen. Sind die Unterschiede groß, werden die Ungäenzen deutlich auf dem radiografischen Film abgebildet. Große Unterschiede ergeben sich, wenn die einfallende Strahlung (H^*_0) beim Durchgang durch das Werkstück (H^*_1) von den Ungäenzen so geschwächt werden (H^*_2), dass sie sich gegenüber dem Grundmaterial im Film gut abheben (Abb. 2.1).

Diese Unterschiede in der Dosis zeigen sich als Schwärzungsdifferenzen und sind besonders effektiv nachweisbar, wenn eine genügend hohe Dosisleistung optimal auf den zu untersuchenden Werkstoff, die Wanddicke und die kritische Ungänzengröße abgestimmt ist.

Abb. 2.1 Unterschiedliche Schwächung des Primärstrahlenbündels durch das Grundmaterial und die Ungänze, wobei $H^*_0 > H^*_2$ und $H^*_0 > H^*_1$ ist [2.2].



2.1 Das Schwächungsgesetz

Der Anteil der Primärstrahlung H^* , der nach Absorption und Streuung das Werkstück noch bildzeichnend durchdringt, wird nach dem Schwächungsgesetz (Abb. 2.2) bestimmt durch [2.2]

$$H^* = H^*_0 \times e^{-\mu \times s}$$

Darin bedeuten: $e = 2,718$,
 H^*_0 = Dosisleistung der Primärstrahlung ohne Werkstück, im gleichen Abstand Strahler/Werkstück,
 μ = Schwächungskoeffizient,
 s = Wanddicke.

Der Faktor $e^{-\mu s}$ beschreibt die funktionelle Abnahme der Dosisleistung H^*_0 mit der Dicke s . Die Materialeigenschaften des Werkstoffs (Dichte, Ordnungszahl, Atomgewicht) werden abhängig von der Energie durch den Schwächungskoeffizienten μ ausgedrückt. Mit o.g. Gleichung lässt sich die Dosisleistung H^* für jede Wanddicke berechnen. Die Abnahme der Dosisleistung lässt sich vereinfacht auch in Form von Halbwertsschichten HWS ausdrücken, nachdem die Ausgangsdosisleistung jeweils um die Hälfte abnimmt. HWS-Angaben sind für Strahlenschutzabschätzungen sehr gebräuchlich. Die Streustrahlung wird in dieser Form des Schwächungsgesetzes nicht berücksichtigt. Die Dosisleistung einer Strahlung bei Schwächung durch verschiedene Werkstoffe ist in Abb. 2.3 dargestellt [2.2].

Das Schwächungsgesetz gilt streng genommen nur für monochromatische Strahlung (einer Wellenlänge). Bei Anwendung von Röntgenstrahlung wird aber das gesamte Bremspektrum wirksam, Energien von 0 bis zur Grenzenergie. Auch einige Gammastrahler besitzen mehrere Linien im Energiespektrum. Wird mit solchen Strahlungen der Schwä-

Abb. 2.2 Dosisleistung in Abhängigkeit von der Wanddicke [2.2]. HWS = Halbwertsschicht

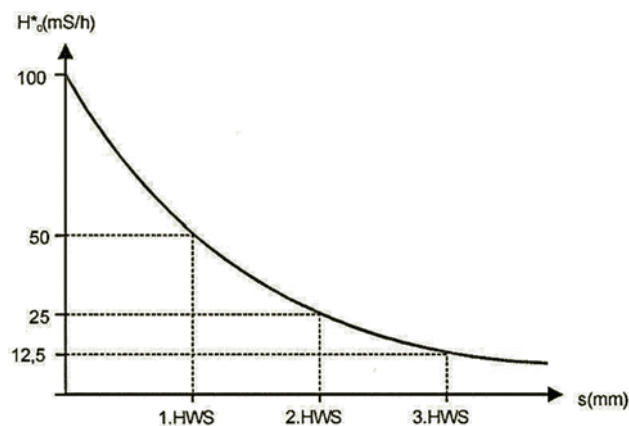
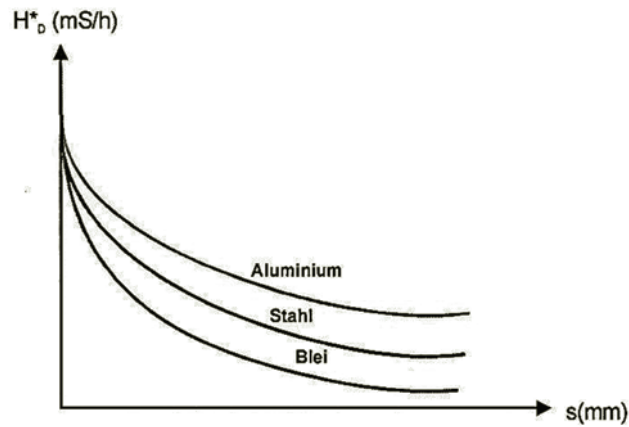


Abb. 2.3 Auswirkungen des Werkstoffs auf die Schwächung bei gleicher Energie [2.2]



chungskoeffizient ermittelt, so stellt man mit zunehmender Wanddicke eine Abnahme des Schwächungskoeffizienten oder größere Durchdringungsfähigkeit fest. Dieser Effekt, „**Aufhärtung**“ genannt, ist die Folge stärkerer Absorption der weichen Strahlungsanteile in den ersten Millimetern des Werkstoffs. Mit zunehmender Dicke wird der Anteil, der Strahlung, der noch durchdringen kann, immer härter und kurzwelliger.

Tabelle 2.1 gibt eine Darstellung ermittelter Schwächungskoeffizienten von Stahl bei Anwendung von Röntgenstrahlung und Gammastrahlung zum Vergleich. Es ist sichtbar, dass die Änderung des Schwächungskoeffizienten mit zunehmender Dicke und zunehmender Grenzenergie geringer wird.

Tab. 2.1 Gesamtschwächungskoeffizienten bei verschiedenen Strahlenenergien [2.2]

Rö - 200 keV		Rö - 300 keV		Rö - 15 MeV		Ir 192 300 - 600 keV		Co 60 1,25 MeV	
s	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s	μ
[mm]	[cm ⁻¹]	[mm]	[cm ⁻¹]	[mm]	[cm ⁻¹]	[mm]	[cm ⁻¹]	[mm]	[cm ⁻¹]
12	1,93	17	1,42	45	0,28	27	0,74	40	0,44
22	1,63	22	1,26	65	0,27	37	0,72	100	0,45
32	1,54	32	1,17	215	0,26	67	0,69	-	-
42	1,43	42	1,10	300	0,24	127	0,67	-	-
47	1,38	52	1,08	-	-	-	-	-	-
52	1,36	62	1,05	-	-	-	-	-	-
-	-	73	1,04	-	-	-	-	-	-
*	1,15	*	0,87	*	0,24	*	0,54	*	0,32

* rechnerischer Wert

2.2 Schwächungskoeffizient und Energieabhängigkeit

Die Abhängigkeit der Eindringtiefen bzw. des Schwächungskoeffizienten von der Energie aus der Strahlung ist recht kompliziert. Aus Abb. 2.4 erkennt man, dass μ mit zunehmender Strahlenenergie stark abfällt, ab 200 keV sehr viel geringer abfällt, um ab 9 MeV wieder anzusteigen. Der Kurvenverlauf des Schwächungskoeffizienten ist aber nur zu interpretieren, wenn man μ als Summe von Absorptionskoeffizient τ , Streukoeffizient σ und Paarbildungskoeffizient π ($\mu = \tau + \sigma + \pi$) betrachtet. Aufgrund der verschiedenen Schwächungsmechanismen zeigt sich auch ein Unterschied in der Dosisleistung bei verschiedenen Strahlenenergien (Abb. 2.5). Absorptionskoeffizient τ , Streukoeffizient σ und Paarbildungskoeffizient π kennzeichnen die Schwächungsmechanismen [2.2].

Abb. 2.4 Abhängigkeit des Schwächungskoeffizienten von der Energie in Stahl [2.2]

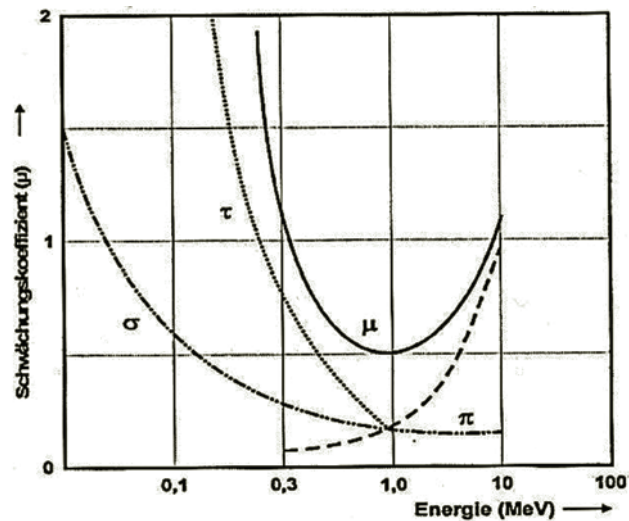
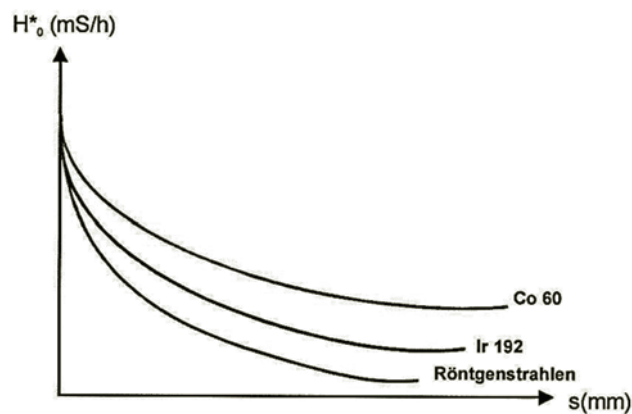


Abb. 2.5 Auswirkungen der Strahlenenergie auf die Schwächung bei gleichem Werkstoff [2.2]



2.3 Schwächungsmechanismen

2.3.1 Absorption (Photo-Effekt)

Strahlung (Photonen) niedriger Energie, die auf Elektronen in der Atomhülle vorzugsweise kernnahe trifft, überträgt seine Energie vollständig auf das Elektron, so dass dieses vom Atomverband getrennt, also absorbiert wird. Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten des Photo-Effektes nimmt mit steigender Ordnungszahl zu und mit steigender Energie ab (Abb. 2.6). Diese Erscheinung tritt sowohl in dem zu untersuchenden Objekt, als auch in den Folien und im Film auf.

2.3.2 Streuung (Compton-Effekt)

Steigt die Energie der einfallenden Strahlung, so überträgt die Röntgen- oder Gammastrahlung einen Teil ihrer Energie auf das Elektron, die Strahlung wird langwelliger und

Abb. 2.6 Absorptionseffekt
(Photoelektrischer Effekt) [2.3]

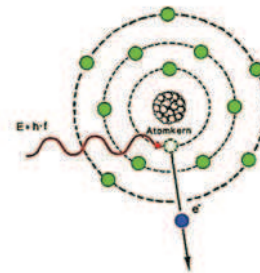
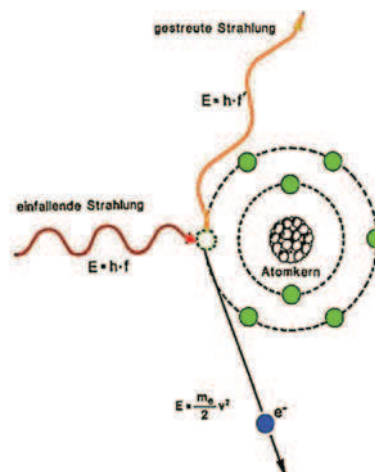


Abb. 2.7 Compton-Effekt
[2.3]



ändert ihre Richtung (Abb. 2.7). Das Elektron wird aus dem Atomverband herausgeschlagen. Dieser Effekt wird nach dem Physiker Compton, der diesen Effekt nachwies, benannt.

Die Compton-Streuung von γ -Quanten dient auch zur Kontrolle des Füllstandes von flüssigen Medien in Rohrleitungen [2.4].

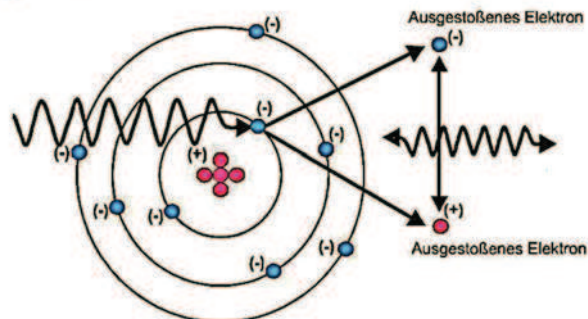
Prallt ein Photon gegen die Elektronenhülle und wird ohne Energieverlust aus seiner Richtung gelenkt, so spricht man von der Rayleigh-Streuung. Bei Energien unter 100 kV spielen die Streumechanismen keine entscheidende Rolle in der Radiographie.

2.3.3 Paarbildung

Für sehr hohe Energien (Beschleuniger oder Co 60) verringert sich der Anteil des Compton-Effektes (σ) erheblich, Absorption (τ) findet kaum noch statt, es überwiegt der Paarbildungseffekt (π). Die Paarbildung setzt Energien $> 1,02$ MeV voraus, und findet in Kernnähe statt. Ein $1,02$ MeV-Photon bildet je 1 Positron und 1 Elektron, bei höherer Energie als $1,02$ MeV werden den Teilchen größere Energiebeträge ungleichmäßig zugeliefert. Die Energie des Elektrons wird durch Abbremsung im Feld in Bremsstrahlung umgesetzt. Das Positron verschmilzt mit einem Elektron der Atomhülle unter Freisetzung von zwei entgegengesetzten Photonen von $0,51$ MeV, sog. Vernichtungsstrahlung (Abb. 2.8).

Abb. 2.8 Paarbildungseffekt [2.3]

Röntgenstrahlen 1,02 MeV



2.4 Schwächungskoeffizient und Werkstoffabhängigkeit

Abb. 2.9 zeigt die Abhängigkeit des Schwächungskoeffizienten von der Energie für verschiedene Werkstoffe. Die Größen Dichte ρ , Atomgewicht A und Ordnungszahl Z kennzeichnen die unterschiedlichen Materialien. Der Schwächungskoeffizient μ setzt sich aus den Teilkoeffizienten τ , σ und π zusammen. Die Materialgrößen wirken in unterschiedlicher Weise auf die Teilkoeffizienten:

$$\tau \sim \frac{\rho}{A} \times Z^3 \times \frac{1}{E^3},$$

$$\sigma \sim \frac{\rho}{A} \times Z \times \frac{1}{E},$$

$$\pi \sim \frac{\rho}{A} \times Z^3 \times E.$$

Die Absorption von Röntgenstrahlung in Materie ist ein komplexer Prozess, der sich aus den dargestellten Streuprozessen zusammensetzt. In Abb. 2.10 ist der Anteil der Prozesse bei verschiedenen Energien auf dem gesamten Schwächungskoeffizienten abgebildet.

Stoffe großer Ordnungszahl besitzen sowohl hohe Anteile im Bereich der Absorption und Streuung als auch bei der Paarbildung. Für Stoffe mit niedriger Dichte und Ordnungszahl kommt offensichtlich als Schwächung nur Absorption und Streuung infrage. Für gebräuchliche Energien (bis 1 MeV) kann das in Tabelle 2.2 angegebene Schwächungsverhalten der Werkstoffe angenommen werden.

2.5 Aufbaufaktor und Streuverhältnis

Bei der Behandlung des Schwächungsgesetzes wurde nur der Teil der Dosisleistung, der bildzeichnend das Werkstück verlässt, betrachtet, die absorbierte Energie wurde als vernichtet angesehen. Es verlässt aber ein Teil dieser Energie das Werkstück als langwellige Röntgenstrahlung, ungerichtet und mit niedriger Energie, die Streustrahlung.

Diese Streustrahlung ist unerwünscht. Sie verschlechtert die Bildqualität, erhöht die Grundschwärzung auf dem Film und überdeckt die Abbildung kleiner Ungängen. Mess-

Abb. 2.9 Schwächungskoeffizienten für verschiedene Werkstoffe [2.3].

W = Wolfram;
Pb = Blei;
Cu = Kupfer;
Fe = Eisen;
Al = Aluminium

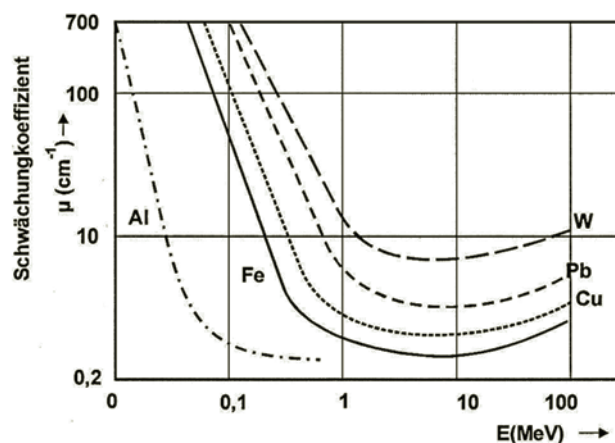
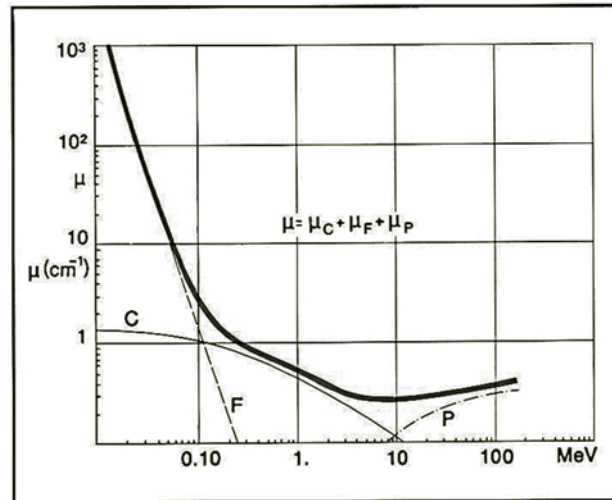


Abb. 2.10 Gesamtschwächungskoeffizient für Stahl in Abhängigkeit von der Strahlungsenergie [2.3].
 C = Compton-Streuung,
 F = Photoeffekt,
 P = Paarbildung



Tab. 2.2 Schwächungsverhalten verschiedener Werkstoffe [2.2]

zunehmende Schwächung, Absorption	↑	Uran Wolfram Blei Kupfer Eisen Beton Aluminium Magnesium Wasser	↓	zunehmende Streuung

technisch ist die Erfassung des Verhältnisses von Streustrahlungsintensität zur Primärstrahlenintensität als Streuverhältnis k mittels Film möglich (Abb. 2.11). Dazu wird ein Prüfstück mit einem breiten Strahlenbündel durchstrahlt und auf dem Film die Schwärzung aus dem Primärstrahlenbündel D_1 festgestellt. Unter gleichen Bedingungen wird im Zentralstrahl mit einem starken Bleiklotz eine zweite Aufnahme angefertigt. Hinter dem Bleiklotz wird die Schwärzung D_2 bestimmt; sie ist das Ergebnis der zeitlich einfallenden, ungerichteten Streustrahlung aus dem Werkstück. Die Intensität der Dosisleistung H_{streu}^* zu H_{prim}^* ergibt das Streuverhältnis.

$$\frac{H_{\text{streu}}^*}{H_{\text{prim}}^*} = \frac{D_2}{D_1 - D_2} = k \text{ mit } 1 + k \text{ als Aufbaufaktor.}$$

Abb. 2.11 Die Methode v. Möller und Weeber zur Streustrahlenmessung [2.3]

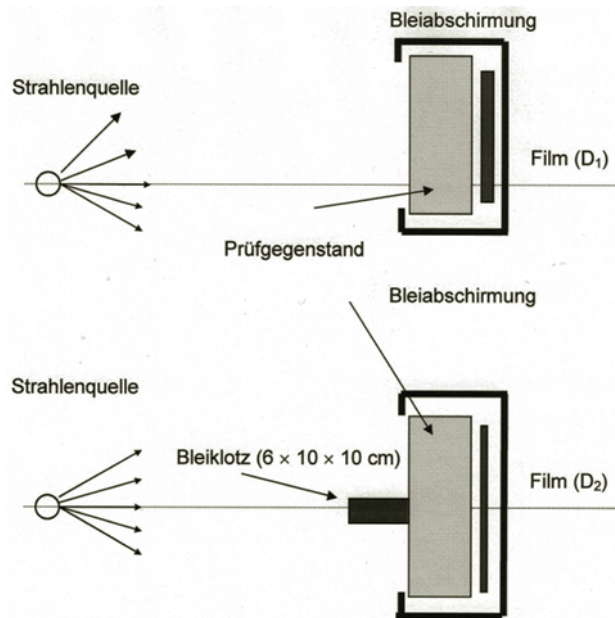
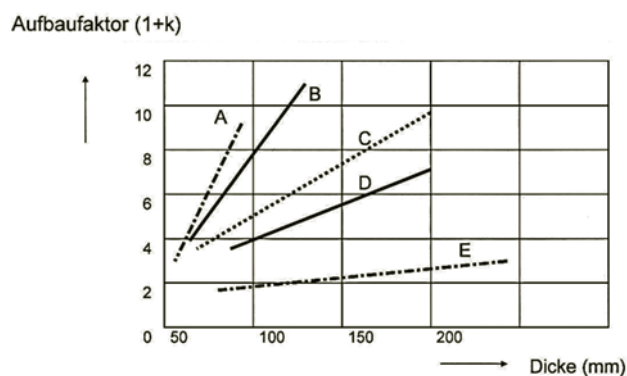


Abb. 2.12 Aufbaufaktoren von Röntengeräten [2.2].
 A = 200 kV Röntgenstrahlung;
 B = 400 kV Röntgenstrahlung;
 C = 1 MV Röntgenstrahlung;
 D = 2 MV Röntgenstrahlung;
 E = 5 MV Röntgenstrahlung



In Abb. 2.12 sind Aufbaufaktoren für verschiedene Strahlenarten aufgetragen. Ein Vergleich von Kurve A (Röntgen, 200 kV) und Kurve E (Röntgen, 5 MeV) zeigt, dass der Streustrahlenanteil mit steigender Wanddicke für kleine Strahlenenergien bedeutend schneller ansteigt als für große. Das gleiche Bild ergibt sich beim Vergleich von Isotopen (Abb. 2.13). Bei den nach Regelwerk für die jeweiligen Wanddicken zulässigen Strahlenenergien wäre der Streustrahlenanteil um ein Vielfaches höher als der Primärstrahlenanteil.

Deshalb vermindert man in der Praxis den Streustrahlenanteil durch Verwendung von Folien (Abb. 2.14) [2.2]. Ein Vergleich der Kurven A (Röntgen, 200 kV ohne Folie) und E (Röntgen, 200 kV mit Folie) zeigt, dass die Verwendung von Folien das Streuverhältnis massiv

beeinflusst und die Anwendung der Röntgenstrahlen für die industrielle Radiografie technischer Wanddicken überhaupt erst möglich hat.

Wenn mehrere Werkstücke gleichzeitig auf einer Aufnahme dargestellt werden sollen, können Bleibleche oder auch Metallbleche als Zwischenfilter zwischen die Werkstücke gelegt werden, um die Streustrahlung zu vermindern (Abb. 2.15).

Abb. 2.13 Aufbaufaktoren von Gammastrahlern in Stahlplatten [2.2]

Ir 192 = 317 keV; 486 keV;
 Ca 137 = 500 keV; 1200 keV;
 Co 60 = 1173 keV; 1332 keV.

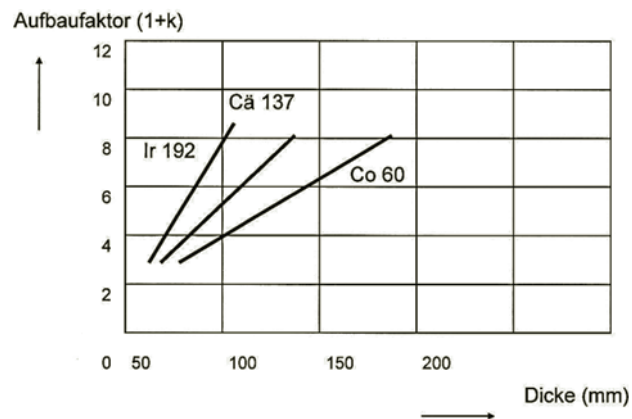


Abb. 2.14 Aufbaufaktoren von Röntgenstrahlern bei Verwendung von Bleifolien.

A = 200 kV ohne Folie;
 B = 400 kV ohne Folie;
 C = 200 kV Bleifolie 0,05 mm;
 D = 400 kV Bleifolie 0,05 mm;
 E = 200 kV Bleifolie 0,3 mm

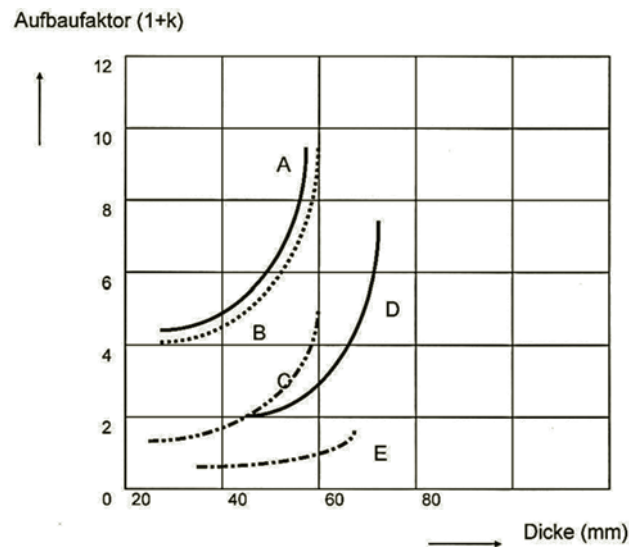
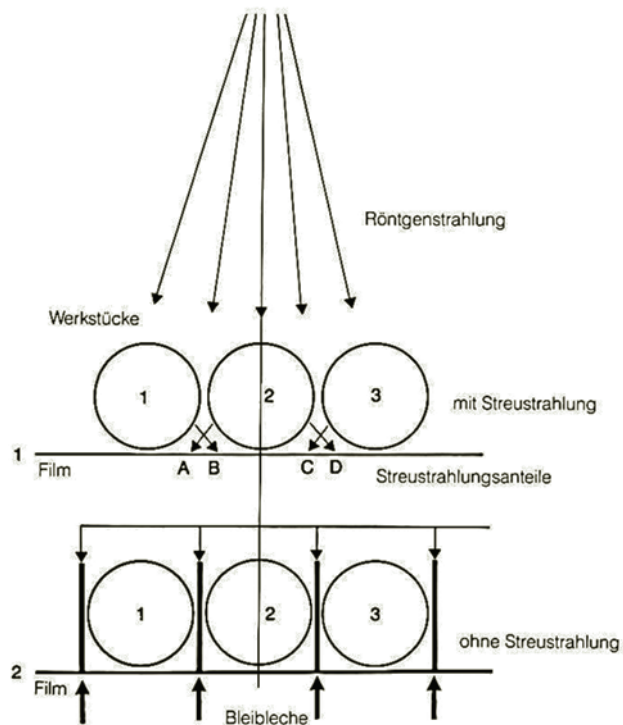


Abb. 2.15 Zwischenlagen von Bleiblechen bei der Durchstrahlungsprüfung von zylindrischen Bauteilen [2.3]



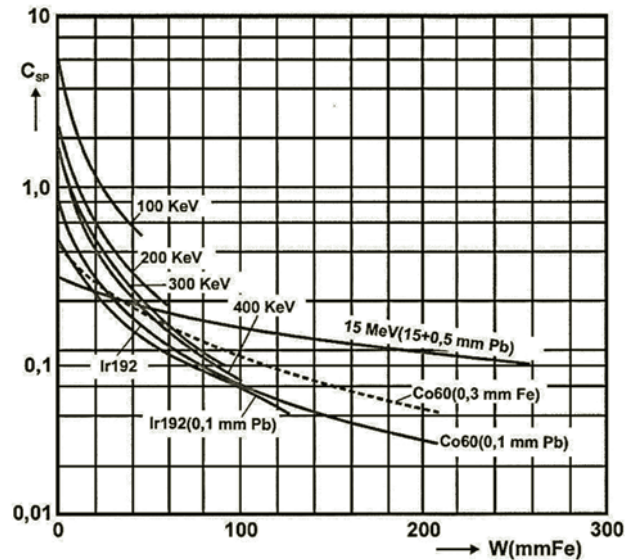
2.6 Spezifischer Kontrast und Strahlenkontrast

Für den Nachweis einer kleinen Ungänge im Werkstoff ist entscheidend, welche Dosisleistungsdifferenz oder Schwärzungsdifferenz (Film) noch erreicht werden kann. Dabei sind Werkstoff und Strahlenenergie die bestimmenden Faktoren. Für eine optimale Abbildung müsste die Schwächung der Strahlung groß ($E \downarrow, \rho \uparrow$) und die erzeugte Streustrahlung geringer sein ($E \uparrow, \rho \uparrow$). Da bei großer Schwächung aber auch viel Streustrahlung entsteht und mit hoher Energie die Schwächung geringer wird, sind diese Betrachtungen widersprüchlich und ein Kompromiss notwendig. Dieser Kompromiss besteht im Erreichen eines großen Verhältnisses:

$$\frac{\text{Schwächungskoeffizient}}{\text{Aufbaufaktor}} = \frac{\mu}{1 + K} = C_{\text{sp}} \text{ (spezifischer Kontrast).}$$

Der spezifische Kontrast ist groß, wenn bei möglichst großer Schwächung der Streustrahlungsanteil gering ist. Außerdem wird aber der spezifische Kontrast noch von der durchstrahlten Wanddicke beeinflusst, da der Anteil der Streustrahlung (Aufbaufaktor) mit steigender Wanddicke wächst. Abb. 2.16 stellt den spezifischen Kontrast von Eisen für verschiedene Energien in Abhängigkeit von der durchstrahlten Dicke dar.

Abb. 2.16 Spezifischer Kontrast C_{sp} [2.3]



Bei **kleinen Wanddicken** (bis 40 mm) ist aufgrund des großen Schwächungsbeiwerts und des relativ niedrigen Aufbaufaktors der spezifische Kontrast groß bei niedrigen Strahlenenergien; d.h. die Röhre ist besser geeignet als der Gammastrahler.

Bei sehr **großen Wanddicken** (> 60 mm) ist zwar der Schwächungsbeiwert klein, das Streuverhältnis für hohe Strahlenenergien aber so klein, dass sich für Co 60 und Linearbeschleuniger günstige spezifische Kontraste ergeben. Erst bei Strahlenenergien über 15 MeV steigen auch die Schwächungskoeffizienten wieder an. Zwischen 40 und 60 mm sind Ir 192, Co 60 und 400 kV Röntgenstrahlung gleichwertig, so dass man aufgrund der einfachen Anwendbarkeit Ir 192 vorzieht.

Der **Strahlenkontrast**, ist das von Nutzstrahlung und Streustrahlung optimal mögliche Dosisleistungsverhalten. Er beschreibt die Dosisleistungsunterschiede hinter dem Werkstück und hängt dann vom spezifischen Kontrast (C_{sp}) und den Wanddickenunterschieden (Δs) ab.

$$C_s = C_{sp} \times \Delta s$$

Der spezifische Kontrast gilt für eine bestimmte Energie und Wanddicke eines Werkstoffs. Er gibt die Möglichkeit der Auswahl von Strahlenquellen bzw. Energien in Abhängigkeit von der zu durchstrahlenden Wanddicke. Häufig finden sich in Regelwerken auch Forderungen nach der Einhaltung der Grenzenergie. Bezogen auf eine abzubildende Wanddickendifferenz Δs spricht man vom Strahlenkontrast C_s . Dieser Strahlenkontrast wird häufig, da er mit den subjektiven Eigenschaften des Prüfstücks und der Energie verbunden ist, auch als Subjektkontrast bezeichnet.

Literatur

- [2.1] Eisenkolb, Kurzmann, Einführung in die Werkstoffkunde, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Band VI, 1970;
- [2.2] Schiebold, Skript RT 3 LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH;
- [2.3] Agfa-Gevaert NV. Industrielle Radiografie 1990;
- [2.4] Gerl, Ameil, Rost, Schmid, Radiometrische Füllstand-Kontrolle an Rohrleitungen, DGZfP-Jahrestagung Weimar 2002;
- [2.5] Sauerwein, Link, Weinlich, Vereinheitlichung der europäischen Normen und die Konsequenzen für Gammagrafieveräte, DGZfP-Jahrestagung Garmisch-Partenkirchen 1993;