



Karlheinz Schiebold

Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung – Durchstrahlungsprüfung

Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung – Durchstrahlungsprüfung

Karlheinz Schiebold

Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung – Durchstrahlungsprüfung

Ein Lehr- und Arbeitsbuch für Ausbildung
und Prüfpraxis

1. Auflage
mit 252 Bildern und 66 Tabellen

 Springer Vieweg

Autor

Prof. Dr.-Ing. **Karlheinz Schiebold**

Vormals Gründer und Gesellschafter der
LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH, Mülheim an der Ruhr,
LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH, Magdeburg,
LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH, Bremen,
LVQ-WP Prüflabor GmbH, Magdeburg,
LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH & Co.KG, Magdeburg.

ISBN 978-3-662-44668-3

ISBN 978-3-662-44669-0 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-44669-0

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.springer-vieweg.de



Dem Andenken meines Vaters
Prof. Dr.-phil. ERNST SCHIEBOLD
(1894 – 1963)
In dankbarer Verehrung gewidmet
Karlheinz Schiebold

Vorwort

In der Durchstrahlungsprüfung (Radiografie) ist gegenwärtig keine Fachliteratur in Lehrbuchform für Fachleute, Studenten und Teilnehmer an Weiterbildungsmaßnahmen auf dem Markt. Es sind jedoch Fachbücher und zahlreiche Artikel zur Durchstrahlungsprüfung im Zusammenhang mit anderen zerstörungsfreien Verfahren oder als Einzelbeiträge in der Literatur und insbesondere in den Normen und Regelwerken veröffentlicht. Da sich in der Technik viele neue Anwendungsgebiete für dieses Fachgebiet erschlossen haben und die digitale Radiografie immer mehr an Bedeutung gewinnt, erscheint es dem Autor doch zweckmäßig, die Durchstrahlungsprüfung in einem Lehr- und Arbeitsbuch in komplexer Form darzustellen.

Das Buch soll insbesondere dem Vater des Verfassers, Prof. Dr.-phil. Ernst Schiebold gewidmet sein, einem Pionier der Zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, dessen Aktivitäten zur Entwicklung der Werkstofftechnik und speziell der Röntgentechnik Anfang der 30er Jahre des 20. Jahrhunderts erstmals an die Öffentlichkeit kamen und der aus seiner Zeit in der damaligen Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft auch zur Entstehung der Gesellschaft zur Förderung Zerstörungsfreier Prüfverfahren und damit zur Gründung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) beigetragen hat. Er war einer der Initiatoren der Veranstaltung „Die Röntgentechnik in der Materialprüfung“ an der TH Berlin, bei der es um die Erkennung, Klassifikation und Bewertung von Fehlern ging. Diese Untersuchungen hatten allergrößte Bedeutung für die Schweißtechnik im Brücken- und Behälterbau. So war es auch nicht verwunderlich, dass er bereits in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts mit einem Prüfbus über die damals gebauten Autobahnen fuhr und dort die Schweißnähte prüfte. Beteiligt war er auch an der Entwicklung und dem Bau der ersten Röntgen-Grobstruktur Anlagen in Deutschland, die dann ebenfalls in Giessereien und in der Schweißtechnik eingesetzt wurden.

Später war er als Direktor des Amtes für Material- und Warenprüfung (DAMW) in Magdeburg tätig. Von 1953 bis 1963 hat Prof. Ernst Schiebold als ordentlicher Professor und Direktor des Instituts für Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung an der Technischen Hochschule Magdeburg (heute Otto-von-Guericke Universität) in kurzer Zeit eine über die Landesgrenzen hinaus bekannte wissenschaftliche Schule mit dem Schwerpunkt Zerstörungsfreie Prüfung aufgebaut. Aus ihr ging auch sein Sohn Karlheinz hervor, der 1963 sein Studium der Werkstoffkunde und -prüfung abgeschlossen hat. Da zum damaligen Zeit-

punkt keine Planstelle am Institut frei war, ging er in die Industrie und begann sein erstes Arbeitsleben im damaligen VEB Schwermaschinenbau Kombinat Ernst Thälmann Magdeburg (später SKET SMS GmbH), wo er in der komplexen Werkstoffprüfung über 28 Jahre tätig war.

Dort begann die Laufbahn von Karlheinz Schiebold als Gruppenleiter für Ultraschallprüfung und später als Abteilungsleiter für die Zerstörungsfreie (ZfP) und Zerstörende (ZP) Werkstoffprüfung sowie als stellvertretender Hauptmetallurge. Aufgrund der im SKET doch außerordentlich umfassend vorhandenen Metallurgie mit 3700 Mitarbeitern, die in einem Stahlwerk, drei Eisengiessereien, zwei Stahlgießereien, einer Großschmiede, zwei Stahlbaubetrieben und zahlreichen Maschinenbaubetrieben arbeiteten, war ein umfangreiches Betätigungsfeld gegeben. Die Werkstoffprüfung gewann über die Jahre eine immer größere Bedeutung für die Untersuchung metallurgischer Produkte und vermittelte für ihn dadurch unschätzbare Erfahrungswerte. Schiebold war insgesamt 25 Jahre mit seinen Prüfern in den Betrieben unterwegs und bearbeitete zudem Forschungs- und Entwicklungsthemen für die Metallurgie.

Aus diesen Erfahrungswerten konnte er nach der Wende in seinem zweiten Arbeitsleben im aus der LVQ GmbH in Mülheim ausgegründeten eigenen Unternehmen LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH und im Magdeburger von der Treuhand erworbenen Unternehmen LVQ-WP Prüflabor GmbH schöpfen und manchmal unter großem Zeitdruck Unterrichtsmaterialien, wie Skripte, Übungen, Wissensteste und teilweise auch Prüfungen verfassen. Durch die Anerkennung der Firma LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH als Ausbildungsstätte der DGZfP sind solche Unterlagen in der ZfP in sechs Prüfverfahren und 3 Qualifikationsstufen entstanden und in der ZP in 9 Prüfverfahren über fast zwanzig Jahre erfolgreich zur Weiterbildung von Werkstoffprüfern verwendet worden. Das so verfasste Skript der Stufe 3 nach DIN EN 473 und seit 2012 nach DIN EN ISO 9712 zur Durchstrahlungsprüfung, ergänzt durch ausgewählte Inhalte von Beiträgen auf den Jahrestagungen der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, bilden eine wesentliche Grundlage für dieses Buch, das somit auch eine willkommene Hilfe bei der Ausbildung von Werkstoffprüfern der Stufen 2 und 3 auf dem Gebiet der Radiografie sein kann.

Leider ist es in einem solchen Fachbuch nicht möglich, sämtliche Techniken und Anwendungen der Durchstrahlungsprüfung zu beschreiben. So wird auf theoretische Ableitungen, mathematische Methoden, Modellierungen, Simulationen, Tomographie (teilweise) oder Topographie verzichtet. Die Röntgenfeinstruktur und die Radiografie im Bau-, Verkehrswesen und in der Luft- und Raumfahrt sowie die Computer-Tomografie sind nach Ansicht des Autors für sich Fachbücher wert. Analoge Überlegungen gelten für den Strahlenschutz, der unabdingbar für die Durchstrahlungsprüfung ist.

Allen am Entstehen des Buches Beteiligten sei an dieser Stelle gedankt. Besonderer Dank gilt meiner lieben Frau Angelika, meinem Freund und Weggefährten Günter Sokolowski und natürlich auch allen Firmen und Personen, von denen ich bei der Vorbereitung und Ausgestaltung dieses Buches Unterstützung erhielt, und insbesondere den Sponsoren,

die zum Entstehen und Gelingen des Werkes beigetragen haben. Dem Springer-Verlag danke ich für die bei der Herausgabe des Buches stets gute Zusammenarbeit.

Mülheim an der Ruhr, Sommer 2014

Prof. Dr.-Ing. Karlheinz Schiebold



Benutzungshinweise

Bilder, Tabellen, Gleichungen und Literaturzitate werden jeweils *innerhalb eines Kapitels* (mit Einer-Nummerierung) fortlaufend gezählt, z.B. Abb. 3.10 = 10. Abb. im Kapitel 3 (Gerätetechnik); [7.5] = Literaturzitat zu Kapitel 7 (Belichtungsgrößen) im Literaturverzeichnis am Ende des Buches im Kapitel 15.

In diesem Buch werden die *Maßeinheiten* des Internationalen Einheitensystems (SI) einschließlich der daraus abgeleiteten dezimalen Vielfachen und Teile wie Milli, Mega usw. verwendet.

Inhaltsverzeichnis

Einführung	1
1 Physikalische Grundlagen und Gerätetechnik	3
1.1 Begriffe, Atomaufbau, Radioaktive Isotope, Ionisation	3
1.2 Röntgen- und Gammastrahlung	6
1.2.1 Erzeugung von Röntgenstrahlung	6
1.2.2 Entstehung von Gammastrahlung	10
1.2.3 Alpha-, Beta- und Neutronenstrahlung	14
1.3 Strahlenwirkungen	14
1.3.1 Ionisierende Wirkungen	14
1.3.2 Fotochemische Wirkungen	15
1.3.3 Fluoreszierende Wirkungen	15
1.3.4 Biologische Wirkungen	15
2 Schwächung	17
2.1 Das Schwächungsgesetz	18
2.2 Schwächungskoeffizient und Energieabhängigkeit	20
2.3 Schwächungsmechanismen	21
2.3.1 Absorption	21
2.3.2 Streuung	21
2.3.3 Paarbildung	22
2.4 Schwächungskoeffizient und Werkstoffabhängigkeit	22
2.5 Aufbaufaktor und Streuverhältnis	23
2.6 Spezifischer Kontrast und Strahlenkontrast	27
3 Gerätetechnik	31
3.1 Prüfeinrichtungen für Gammastrahlen	31
3.2 Röntgeneinrichtungen	36
3.2.1 Gleichspannungsanlagen	36
3.2.2 Halbwellenanlagen	38
3.2.3 Röntgenröhren und Zubehör	39

3.3	Strahlenmessgeräte	43
3.3.1	Dosismessgeräte	43
3.3.2	Dosisleistungsmessgeräte	44
3.3.3	Dosisleistungswarngeräte	45
4	Spezielle Durchstrahlungstechniken	49
4.1	Digitale Durchstrahlungsprüfung	49
4.1.1	Digitalisierung vorhandener Filme	51
4.1.2	Speicherleuchtstofftechnik	51
4.1.3	Digitale Sensoren	53
4.1.4	Digitale Bildverarbeitung und Bildqualität	55
4.1.5	Anwendungsbeispiele	57
4.2	Radioskopie (Durchleuchtung)	61
4.2.1	Grundprinzip der Radioskopie	62
4.2.1.1	Strahlenbildentstehung	62
4.2.1.2	Bildübertragung	64
4.2.2	Radioskopiesysteme in der Anwendung	65
4.3	Bewegungsdurchstrahlung	68
4.4	Mechanisierte und automatisierte digitale Durchstrahlungsprüfung	70
5	Filme, Folien, Detektoren	75
5.1	Filme	75
5.1.1	Filmaufbau und -typen	75
5.1.2	Photolytischer Prozess (Produktion)	76
5.1.3	Filmeigenschaften	76
5.1.3.1	Empfindlichkeit und Filmfaktor	77
5.1.3.2	Gradient, Schwärzung und Gradation	77
5.1.3.3	Körnigkeit (Granulation)	79
5.1.3.4	Gradient-Rausch-Verhältnis (Auflösungsvermögen)	79
5.1.3.5	Innere Unschärfe	80
5.1.4	Filmklassifizierung	82
5.2	Folien	83
5.2.1	Wirkungsweise von Folien	83
5.2.2	Folienarten	83
5.3	Digitale Detektoren	84
5.3.1	Klassifizierung der Techniken	84
5.3.2	Kompensationsprinzipie	85
5.3.3	Detektorsysteme	85
5.3.4	Metallfolien	86
5.3.5	Metallfilter und Blenden (Kollimatoren)	86
5.3.6	Geometrische Vergrößerungstechnik	86
5.3.7	Verarbeitung der digitalen Technik	86

5.3.7.1	Scannen und Auslesen der digitalen Bilder	86
5.3.7.2	Kalibrierung der Detektoren	87
5.3.7.3	Defekte Detektoren	87
5.3.7.4	Bildverarbeitung und -auswertung	87
5.3.8	Bildgüteprüfkörper für die digitale Technik	87
5.3.9	Bildunschärfe bei digitalen Detektoren	87
5.3.10	Grauwerte und Signal-Rausch-Verhältnisse	87
5.4	Filmverarbeitung	88
5.4.1	Entwicklungsprozess	88
5.4.2	Zwischenwässerung	90
5.4.3	Fixierung	90
5.4.4	Endwässerung	90
5.4.5	Filmtrocknung	90
5.5	Kontrolle der Filmverarbeitung	91
5.5.1	Kontrolle der Schleierschwärzung	91
5.5.1.1	Kontrolle des Schleiers durch Entwicklung	91
5.5.1.2	Kontrolle des Schleiers durch Dunkelkammerbeleuchtung	92
5.5.2	Kontrolle der Dunkelkammereinrichtung	92
5.5.3	Kontrolle der Filmentwicklung	93
5.5.4	Kontrolle der Zwischenwässerung und des Stoppbades	93
5.5.5	Kontrolle des Fixierbades	94
5.5.6	Kontrolle der Endwässerung	94
5.6	Filmfehler	94
5.7	Filmauswertung	96
5.7.1	Betrachtungsbedingungen	98
5.7.2	Filmschwärzung	99
5.7.3	Kontrast	100
5.8	Lagerung belichteter Filme	100
5.9	Filmbehandlung in Entwicklermaschinen	101
5.10	Entsorgung	104
6	Bildqualität	107
6.1	Aufnahmeparameter	107
6.1.1	Geometrische Unschärfe	107
6.1.1.1	Brennfleckabmessung	109
6.1.1.2	Einstrahlgeometrie	109
6.1.1.3	Abstand Strahler und Prüfgegenstand	112
6.1.1.4	Abstand Prüfgegenstand und Film	113
6.1.1.5	Abstand Fehler und Film	113
6.1.1.6	Bewegung des Prüfgegenstandes	113
6.1.2	Subjektkontrast	113
6.1.2.1	Strahlenenergie	113

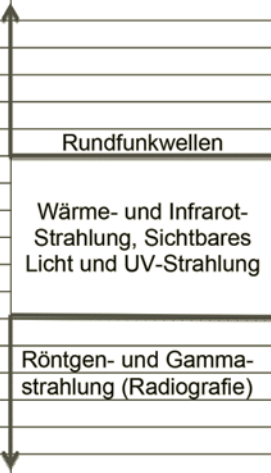
6.1.2.2	Einstrahlgeometrie	114
6.1.2.3	Blenden und Filter	114
6.1.2.4	Streustrahlung	114
6.1.2.5	Wanddicke und Dichte im Prüfgegenstand	115
6.2	Film-Folien-Kombination	116
6.2.1	Innere Unschärfe und Gesamtunschärfe einer Aufnahme	116
6.2.2	Filmkontrast	117
6.2.3	Film-/Folieneigenschaften	117
6.2.3.1	Auflösungsvermögen	117
6.2.3.2	Filmkörnigkeit	118
6.3	Bildgüteprüfkörper und ihre Anwendung	118
6.3.1	Drahtsteg-Bildgüteprüfkörper	119
6.3.2	Stufen-Loch-BPK	120
6.3.3	Doppeldrahtsteg-BPK	122
6.3.4	Platten-Loch-Penetrationsmeter	126
6.3.5	Drahtpenetrationsmeter	128
6.3.6	Penetrationsmeterwerkstoffe	129
6.3.7	Bildgütestufen („sensitivity levels“)	131
6.3.8	Abschirmung gegen nicht das Bild zeichnende Strahlung	134
7	Belichtungsgrößen	137
7.1	Schwärzungskurven	137
7.2	Belichtungsdiagramme	138
7.2.1	Werkstoffkorrektur	139
7.2.2	Schwärzungskorrektur	139
7.2.3	Abstandskorrektur	143
7.2.4	Filmkorrektur	143
7.2.5	Erstellung von Belichtungsdiagrammen	143
7.3	Belichtungsschieber	149
8	Objektumfang	151
8.1	Mehrfilmtechnik	152
8.1.1	Prinzip und Verfahren der Mehrfilmtechnik	152
8.1.2	Mehrfilmtecnicaufnahmen	154
8.2	Kontrastminderung durch höhere Strahlungsenergie oder Aufhärtung	157
8.3	Wanddickenausgleich	158
9	Geometrische und spezielle Aufnahmeanordnungen	161
9.1	Geometrische Unschärfe	161
9.2	Film-Fokus-Abstand, f_{\min}	164
9.3	Aufnahmeanordnungen	167
9.3.1	Aufnahmeanordnungen nach DIN EN ISO 17636-1 und -2	167

9.3.2	Aufnahmeanordnungen nach DIN EN 12681	173
9.3.3	Aufnahmeanordnungen nach ASME-Code	176
9.4	Spezielle Aufnahmeanordnungen	178
9.4.1	Karusselaufnahmetechnik	178
9.4.2	Vergrößerungstechnik	181
9.4.3	Stereotechnik	182
9.4.4	Brennfleckaufnahmen	183
9.4.4.1	Röntgenröhren	183
9.4.4.2	Gammastrahler	183
10	Spezielle Strahlenquellen und -empfänger	187
10.1	Spezielle Strahlenquellen	187
10.1.1	Der Resonanzumwandler („Resonance Transformer“)	187
10.1.2	Der Linearbeschleuniger	187
10.1.3	Das Betatron	191
10.1.4	Neutronenradiographie	193
10.1.5	Durchstrahlungsprüfung mit Mikrofokusröhren	194
10.1.6	Durchstrahlungsprüfung mit Computer-Tomografie (CT)	196
10.2	Spezielle Strahlenempfänger	196
10.2.1	Durchleuchtungsprüfung	196
10.2.2	Xeroradiografie	199
10.2.3	Röntgenbildverstärker	199
10.2.4	Colorradiografie	200
10.2.5	Computer-Tomographie (CT)	200
11	Spezielle Werkstoffe	203
11.1	Werkstoffe, Ordnungszahlen, Dichte und Schwächungskoeffizienten	203
11.2	Durchstrahlung von Werkstoffen niedriger Ordnungszahl	205
11.2.1	Leichtmetalle	205
11.2.2	Kunststoffe	208
11.3	Durchstrahlung von Werkstoffen hoher Ordnungszahl	210
12	Prüfung von Gussstücken	213
12.1	Gussfehler	213
12.1.1	Lunker und Mikrolunker	213
12.1.2	Warmrisse	215
12.1.3	Poren	216
12.1.4	Sand- und Schlackeneinschlüsse	216
12.1.5	Kernstützen	216
12.2	Durchstrahlungsprüfung an Gussstücken nach DIN EN 12681	217
12.2.1	Prüfklassen	217
12.2.2	Film-Fokus-Abstand, f_{\min}	217

12.2.3	Wahl der Röhrenspannung und der Strahlenquelle	220
12.2.3.1	Röntgenstrahler	220
12.2.3.2	Andere Strahlenquellen	220
12.2.3.3	Energieauswahl nach ASME-Code	220
12.2.4	Anforderungen an die Filmschwärzung	222
12.2.5	Auswahl der Film-Folien-Kombination	223
12.2.6	Auswertbarer Bereich, Anzahl der Teilaufnahmen	223
12.2.7	Erhöhung des Objektaufmaßes	224
12.2.8	Filmkennzeichnung, Überlappung von Aufnahmen	225
12.2.9	Bildgütenachweis	226
12.2.10	Verminderung der Streustrahlung	227
12.2.10.1	Filter und Blenden	227
12.2.10.2	Vermeidung von Streustrahlung	227
12.2.11	Filmbetrachtungsbedingungen	227
12.3	Ungängenklassifizierung und -beurteilung	228
12.3.1	ASME-Code	228
12.3.2	DIN EN 12681	230
13	Prüfung von Schweißverbindungen	237
13.1	Aufbau von Schweißnähten	237
13.2	Stoß- und Fugenformen	237
13.3	Fertigungs- und Prüffolge einer Schweißnaht	241
13.4	Schweißnahtfehler	243
13.4.1	Flächenhafte Fehler	243
13.4.2	Volumenhafte Fehler	245
13.5	Anzeigenformen	246
13.6	Durchführung von Durchstrahlungsprüfungen nach DIN EN ISO 17636-1 und -2 und DIN EN ISO 10893-6 und -7	249
13.6.1	Prüfklassen	249
13.6.2	Film-Fokus-Abstand, f_{\min}	249
13.6.3	Wahl der Strahlenquelle und Energieauswahl	252
13.6.4	Anforderungen an die Filmschwärzung	254
13.6.5	Auswahl der Film-Folien-Kombination	255
13.6.6	Auswertbarer Bereich, Anzahl der Teilaufnahmen	255
13.6.7	Erhöhung des Objektaufmaßes	257
13.6.8	Filmkennzeichnung, Überlappung der Aufnahmen	258
13.6.9	Bildgütenachweis	259
13.6.10	Abschirmung gegen nicht bildzeichnende Strahlung	259
13.7	Ungängenklassifizierung und -beurteilung nach	261
13.7.1	DIN EN ISO 10675-1	262
13.7.2	AD-Merkblatt HP 5/3	264
13.7.2.1	Anwendungsbereich, Prüfverfahren und Prüfumfang	264

13.7.2.2 Prüftechnische Festlegungen	265
13.7.2.3 Zulässigkeiten	265
13.7.3 Vergleichsaufnahmen im Atlas des IIW	268
13.7.4 Vergleichsaufnahmen im DVS-Atlas	269
14 Normen, Regelwerke, Verfahrensbeschreibungen, Prüfanweisungen	273
14.1 Normen und Regelwerke	273
14.2 Verfahrensbeschreibungen	275
14.3 Prüfanweisungen, Spezifikationen	282
15 Sachverzeichnis	289

Energie	Wellenlänge λ	m	
	10 km	10^4	
	1 km	10^3	
	100 m	10^2	
	10 m	10^1	
	1 m	1	
	10 cm	10^{-1}	
	1 cm	10^{-2}	
	1 mm	10^{-3}	
	100 μm	10^{-4}	
	10 μm	10^{-5}	
	1 μm	10^{-6}	
	100 nm	10^{-7}	
100 eV	10 nm	10^{-8}	
1 keV	1 nm	10^{-9}	
10 keV	0,1 nm	10^{-10}	
100 keV	0,01 nm	10^{-11}	
1 MeV	0,001 nm	10^{-12}	
10 MeV	1 XE	10^{-13}	
100 MeV	0,1 XE	10^{-14}	
	0,01 XE	10^{-15}	



Übersicht über die elektromagnetische Strahlung [A]

Einführung

Die *Durchstrahlungsprüfung* (nach den international üblichen Abkürzungen für die verschiedenen Prüfverfahren mit RT bezeichnet) ist ein *zerstörungsfreies* Verfahren der Materialprüfung, welches sich vom Funktionsprinzip her als ein eigenständiges Verfahren in die Reihe der anderen etablierten zerstörungsfreien Prüfverfahren

- Akustische Prüfung UT
- Magnetische und elektrische Prüfung MT
- Eindringprüfung PT
- Sichtprüfung VT
- Wirbelstromprüfung ET

einordnet, wobei als *zerstörungsfreies* Prüfverfahren (ZfP, engl. NDT/Nondestructive Testing) in Anlehnung an DIN EN ISO 17025 nach [0.1] definiert werden kann:

Technischer Vorgang zur Bestimmung eines oder mehrerer vorgegebener Qualitätskennwerte eines Werkstoffes oder Erzeugnisses gemäß vorgeschriebener Verfahrensweise, wobei die dazu genutzte Energie (z.B. als Wellen- oder Teilchenstrahlung, elektrisches, magnetisches oder elektromagnetisches Feld, mechanische Schwingungen oder Wellen, Licht, Wärmestrahlung u.a.) in Wechselwirkung mit dem Material tritt, ohne dass dadurch dessen Eigenschaften oder das vorgesehene Gebrauchsverhalten (Beanspruchungsart, -höhe und -dauer) unzumutbar beeinträchtigt werden.

Neben den o.g. werden oft auch solche Verfahren bzw. Untersuchungsmethoden den zerstörungsfreien Prüfverfahren zugeordnet, die traditionell bzw. nach der vorstehenden Begriffsdefinition nicht in diese Kategorie einzuordnen sind oder sich wissenschaftlich verselbstständigt haben, wie z.B. die Röntgen-Feinstrukturuntersuchung, die röntgenographische Spannungsmessung, die Spektralanalyse, die akustische Emission, Verformungsmessungen, Rauheitsmessung u.a. [0.2].

In diesem Fachbuch werden DIN EN ISO-Normen des gegenwärtigen Standes 2014 zitiert, um die Fachleute zu befähigen, ohne die Normen detailliert zu lesen, diese in ihrer

täglichen Arbeit umsetzen zu können. Deshalb sind entsprechende Erläuterungen zu den Texten, Tabellen und Bildern in den Normen eingearbeitet worden.

Der ASME-Code wird ausführlich behandelt, weil diese amerikanische Druckgeräte-Richtlinie nur in englischer Sprache angeboten wird und weil sich die Ausführungen in den für die Praxis wichtigen Kapiteln doch wesentlich von den DIN EN ISO-Normen unterscheiden. Vor allem Firmen, die ASME-Inspektionen für ihre Produkte bestehen müssen, können sich mit den Erläuterungen zum ASME-Code eventuell besser auf solche Inspektionen vorbereiten.

Literatur

[0.1] Mc Master, Nondestructive Testing Handbook, ASNT 1959

[0.2] DGZfP Kursprogramm 2013

Seit etwa 120 Jahren, seit Conrad Wilhelm Röntgen 1895, kennt man Röntgenstrahlen (engl. X-Ray) als elektromagnetische Strahlung großer Durchdringungsfähigkeit. Während das Licht, ebenfalls eine elektromagnetische Strahlung, nur durchsichtige Stoffe durchdringt, können Röntgen- und Gammastrahlen undurchsichtige feste Werkstoffe durchdringen und Aufschluss über verborgene innere Unregelmäßigkeiten, Hohlräume und Einschlüsse geben. Damit sind sie hervorragend geeignet, in der Werkstoffprüfung Aussagen über Ungängen und volumenhafte innere Fehler von Werkstücken zu treffen. Als Ungängen werden im physikalischen Sinne unganze mit freien Grenzflächen versehene Unregelmäßigkeiten beschrieben, für die noch keine Einschränkungen der Verwendbarkeit des Prüfgegenstandes wie bei einem Fehler vorhanden sind. Kenntnisse ihrer Eigenschaften, ihrer Erzeugung, ihres Nachweises sowie des Schutzes vor ihnen, die Gesundheit schädigenden Wirkungen, sind dafür notwendige Voraussetzungen.

1.1 Begriffe, Atomaufbau, Radioaktive Isotope, Ionisation

Man unterscheidet die in ihrer Wirkung gleichen Röntgen- und Gammastrahlen nach ihrer Entstehungsweise. Die Röntgenstrahlung wird über Beschleunigung von Elektronen im Vakuum von Röntgenröhren und Abbremsung der Elektronen am Material des Anodenwerkstoffs erzeugt. Die Gammastrahlung entsteht durch den Kern-Zerfall radioaktiver Stoffe.

Quantitativ werden Röntgen- oder Gammastrahlung durch die Dosis H erfasst. Die Einheit ist das Sievert [Sv]. Eine Dosisleistung H^* als Dosis H pro Zeiteinheit t ergibt sich zu

$$H^* = H/t \text{ [Sv/h]}.$$

Die Wirkung der Dosis auf den Menschen beschreibt die Äquivalentdosis, die Wirkung auf Materie die Ionendosis. Zur Ermittlung der Körperdosis wird die Personendosis gemessen.

Die Personendosis ist mit Dosimetern zu messen, die bei einer von der zuständigen Behörde bestimmten Messstelle anzufordern sind. Die Dosimeter sind an einer für die Strahlenexposition als repräsentativ geltenden Stelle des Körpers, in der Regel an der Vorderseite in Brusthöhe, zu tragen. Für eine Person der Bevölkerung beträgt der Grenzwert der effektiven Dosis 1 mSv im Kalenderjahr. Für beruflich strahlenexponierte Personen beträgt dieser Grenzwert 20 mSv im Kalenderjahr.

Der Energiebereich der Röntgen- und Gammastrahlung (Abb. 1.1) beginnt bei etwa 10 KeV, was einer sehr weichen Strahlung entspricht, mit einer Wellenlänge λ von 0,1 nm ($\lambda = 10^{-10}$ m) und geht bis zu technisch möglichen Energien von 100 MeV (ultraharte Strahlung) mit Wellenlängen $\lambda = 10^{-14}$ m. Aus dem radioaktiven Zerfall entstehende Gammastrahlung verwendet man in der Defektoskopie[ehb1] ab ca. 200 KeV (Yb 169) bis ca. 1,2 MeV (Co 60). In der Durchstrahlungsprüfung mit Röntgenanlagen arbeitet man mit Energien ab 100 KeV bis 450 KeV; mit Beschleunigern oberhalb 400 KeV bis 15 (25, 30) MeV.

Stoffe geringer Dichte und Ordnungszahl (Luft) werden leichter von Strahlung durchdrungen als solche hoher Dichte und Ordnungszahl (Eisen). Zum Schutz vor Röntgen- und Gammastrahlung sind vorrangig Stoffe hoher Ordnungszahl, Atomgewicht und Dichte (Blei, angereichertes Uran, Wolfram) geeignet. Das Durchdringungsvermögen der Strahlung erhöht sich mit zunehmender Energie. Dabei nimmt die Wellenlänge λ in dem Maße ab, in dem die Frequenz f zunimmt ($c = \lambda \times f$). Die Lichtgeschwindigkeit $c = 300.000$ km/s ist eine absolute Grenze für die Strahlungsausbreitungsgeschwindigkeit.

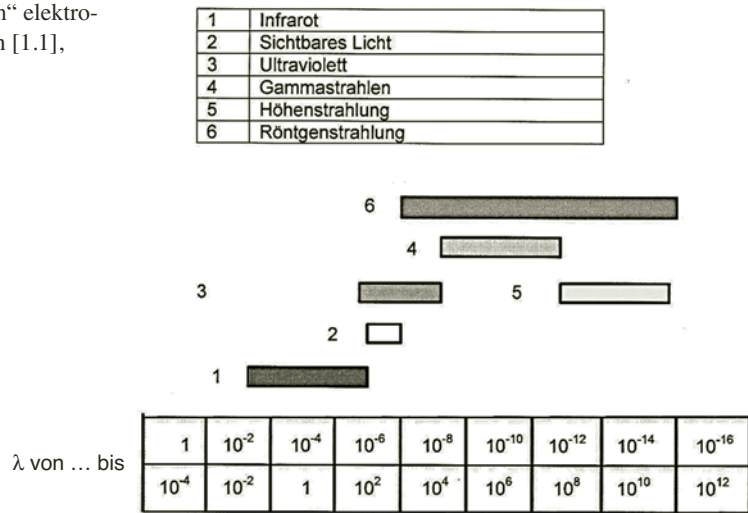
Folgende Eigenschaften lassen sich feststellen:

- Die Durchdringungsfähigkeit der Röntgen- und Gammastrahlung steigt mit zunehmender Energie, zunehmender Frequenz und abnehmender Wellenlänge.
- Röntgen(Rö)- und Gamma(γ)-Strahlung breiten sich geradlinig mit Lichtgeschwindigkeit aus. Im Gegensatz zur Teilchenstrahlung (α , β) werden sie von Magnetfeldern nicht abgelenkt.
- Der Werkstoff (Ordnungszahl, Atomgewicht, Dichte) beeinflusst die Durchdringungsfähigkeit.
- Röntgen- und γ -Strahlung schwärzen einen fotografischen Film und ionisieren Luft. Sie können lebende Zellen beschädigen oder zerstören.

Folgende Elementarteilchen werden unterschieden:

- Protonen: besitzen positive Ladung und relativ große Masse,
- Neutronen: sind ohne elektrische Ladung und haben die gleiche Masse wie Protonen,
- Elektronen: besitzen negative Ladung und eine sehr viel kleinere Masse als Protonen.

Abb. 1.1 „Spektrum“ elektromagnetischer Wellen [1.1], [1.13]

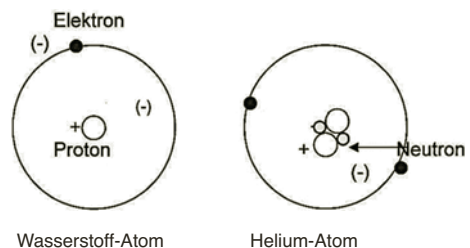


In den Atomen sind zahlreiche Elementarteilchen enthalten, deren Zahl und Anordnung die Atomart festlegen lassen. Die schwereren Elementarteilchen (Protonen und Neutronen) befinden sich im Kern, die leichteren (Elektronen) auf Umlaufbahnen um den Kern, die man Elektronenhüllen nennt. Die Elektronen werden durch die Anziehungskräfte der Protonen in ihren Umlaufbahnen gehalten. Die Zahl der Protonen und der Elektronen ist ausgeglichen, so dass die Atome nach außen elektrisch neutral sind.

Beispiele:

Ein Wasserstoff-Atom besteht aus einem Proton und einem Elektron, ein Helium-Atom aus 2 Protonen und 2 Neutronen im Kern und 2 Elektronen in der Hülle (Abb. 1.2)

Abb. 1.2 Wasserstoff-Atom, Helium-Atom [1.1]



Bei einer bestimmten Atomart (Element) kann die Anzahl der Neutronen schwanken. Man bezeichnet die Atome derselben Elemente mit unterschiedlichen Neutronenzahlen als **Isotope**. Maßgebend für die Charakterisierung der Isotope einer Atomart sind die Ordnungszahl **Z** (= Zahl der Protonen) und die Massenzahl **M** (= Zahl der Protonen und Neutronen). Anstelle der Ordnungszahl wird auch ein Kurzzeichen zur Kennzeichnung eines Elements eingesetzt, wie z.B.:

H – Wasserstoff	Ir – Iridium,
He – Helium	Co – Kobalt,
Be – Beryllium	Cs – Caesium,
Fe – Eisen.	

Zur Beschreibung eines Elements, wie z.B. dem Wasserstoff, wird die jeweilige Massenzahl hinzugefügt:

${}_1\text{H}$ = Wasserstoff mit 1 Proton

${}_2\text{H}$ = Wasserstoff mit 1 Proton + 1 Neutron (auch Deuterium genannt).

${}_3\text{H}$ = Wasserstoff mit 1 Proton + 2 Neutronen (auch Tritium genannt).

Da Isotope Elemente mit unterschiedlichen Neutronenzahlen sind, kennzeichnet die Anzahl der Neutronen ihren Zustand. Weil ein Atomkern jedoch nur eine begrenzte Zahl von Neutronen entsprechend der Zahl der vorhandenen Protonen aufnehmen kann, begegnet er einer zu hohen Zahl von Neutronen durch Verwandlung von Neutronen in Protonen. Er versucht seinen Zustand zu stabilisieren. Dabei sendet er Beta- (Elektronen) und Gamma-Strahlung („überschüssige“ Energie) aus. Dies geschieht bei natürlichen Isotopen, wie z.B. Radium oder Uran. Ein Isotop kann also stabil oder instabil sein. Instabile Isotope werden auch als „radioaktiv“ bezeichnet.

In der Werkstoffprüfung braucht man künstliche Isotope, um eine genügend hohe Strahlenmenge pro Zeit zur Verfügung zu haben. Solche Isotope, wie z.B. Ir 192, Co 60, Se 75 werden in einem Kernreaktor durch Neutronenbeschuss hergestellt, die vorher stabilen Isotope werden dabei aktiviert und instabil. DIN EN ISO 17636 gibt folgenden Dickenbereich des Prüfgegenstandes für Gamma- und Röntgenstrahler ab 1 MeV Grenzenergie für Stahl, Kupfer und Nickel-Basis-Legierungen an (Tabelle 1.1).

Ein Ion ist ein elektrisch geladenes Atom, welches aus einer seiner Atomhüllen ein Elektron verloren hat und somit ein Proton mehr aufweist. Das Herauslösen von Elektronen aus den Atomen kann durch Wärme, Licht oder elektromagnetische Strahlung erfolgen. Man bezeichnet deshalb diesen Vorgang auch als Ionisation. Die Ionisation ist demzufolge auch an die Röntgen- oder Gammastrahlung gebunden, so dass man diese als „ionisierende Strahlung“ bezeichnet. Besondere Bedeutung hat die Ionisation für die Messgeräte im Strahlenschutz, wie z.B. bei der Ionisationskammer.

1.2 Röntgen- und Gammastrahlung

1.2.1 Erzeugung von Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlung wird erzeugt, indem Elektronen in einer evakuierten Glas- oder Keramikröhre von der Kathode (–) durch Anlegung einer Hochspannung zur Anode (+) beschleunigt werden. Die Anode besteht aus einem Grundkörper aus Kupfer, in dem sich ein

Tab. 1.1 Dickenbereich des Prüfgegenstandes für Gamma- und Röntgenstrahler für Stahl, Kupfer und Nickel-Basis-Legierungen [1.2]

Strahlenquelle	Durchstrahlte Dicke w (mm)	
	Klasse A	Klasse B
Tm 170	$w \leq 5$	$w \leq 5$
Yb 169 ^a	$1 \leq w \leq 15$	$2 \leq w \leq 12$
Se 75 ^b	$10 \leq w \leq 40$	$14 \leq w \leq 40$
Ir 192	$20 \leq w \leq 100$	$20 \leq w \leq 90$
Co 60	$40 \leq w \leq 200$	$60 \leq w \leq 150$
Röntgenstrahlen mit Energien von 1 MeV - 4 MeV	$30 \leq w \leq 200$	$50 \leq w \leq 180$
Röntgenstrahlen mit Energien von 4 MeV - 12 MeV	$w \geq 50$	$w \geq 80$
Röntgenstrahlen mit Energien über 12 MeV	$w \geq 80$	$w \geq 100$

a Für Aluminium und Titan ist die durchstrahlte Dicke des Werkstoffs $10 < w < 70$ für Klasse A und $25 < w < 55$ für Klasse B.

b Für Aluminium und Titan ist die durchstrahlte Dicke des Werkstoffs $35 < w < 120$ für Klasse A.

fester Körper (Target) aus Wolfram befindet, das die Elektronen abbremst und damit die Röntgenstrahlung auslöst. Die Energie der dabei entstehenden Röntgenstrahlung ist umso größer, je höher die Beschleunigung durch die angelegte Hochspannung ist. Der Wirkungsgrad der Röntgenröhre beträgt bei 200 kV allerdings nur 1%, d.h. 99% der Energie werden in Wärme und 1% in Röntgenstrahlung umgewandelt.

Abb. 1.3 zeigt den Aufbau einer Röntgenröhre schematisch und Abb. 1.4 in der Ansicht [1.3], [1.4].

Beim Abbremsen des Elektronenstroms am Targetmaterial sind folgende Prozesse zu beobachten:

1. Beim Auftreffen von Elektronen auf die Elektronenhülle der Target-Atome werden Elektronen der Hülle herausgeschlagen und ein Teil der Energie auf die so erzeugten

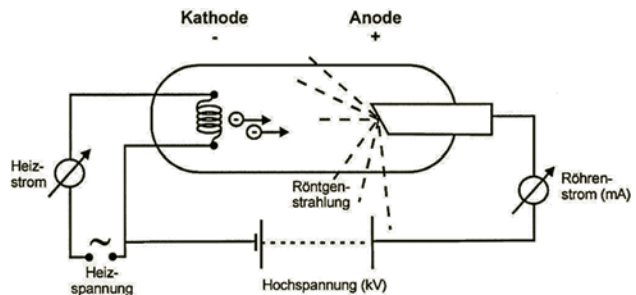
Abb. 1.3 Prinzipbild einer Röntgenröhre [1.3]

Abb. 1.4 Ansicht einer Röntgenröhre [1.4]

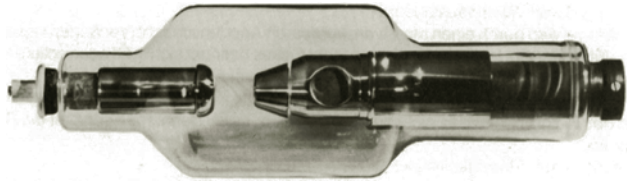
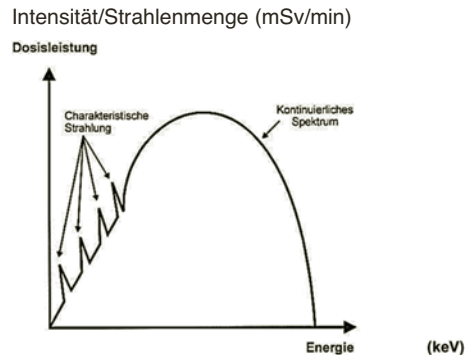


Abb. 1.5 Röntgenstrahlungsspektrum [1.3]



freien Elektronen übertragen. Dies geschieht so oft, bis nur noch ein kleiner Energieanteil vorhanden ist und als UV-, Licht- oder Wärmestrahlung abgeführt wird.

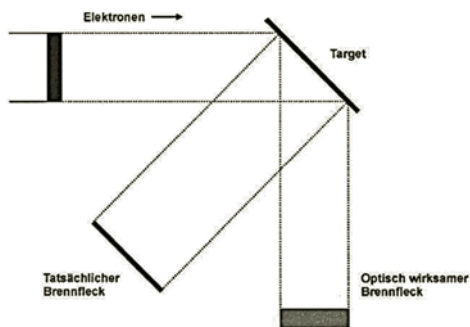
2. Beim Abbremsen der Elektronen im positiven elektrischen Feld des Atomkerns wird die frei werdende Energie vom Atomkern aufgenommen und sofort wieder emittiert. Die entstehende Strahlung weist bei vollständigem Abbremsen des gesamten Elektronenstromes höchstens dessen Energie auf, die die Grenzenergie darstellt. Die Strahlenenergie ist jedoch meistens geringer als die Energie der Elektronen vor dem Abbremsvorgang. Die entstehende Strahlung ist daher ein Spektrum aus vielen Energien, das man Bremspektrum nennt.

Das gesamte Spektrum der Röntgenstrahlung (Abb. 1.5) enthält kontinuierliche und charakteristische Anteile. Während die kontinuierlichen Anteile durch die beschriebene Wechselwirkung mit dem Atomkern hervorgerufen werden, entstehen die charakteristischen Anteile durch Kollision mit kernnahen Hüllenelektronen. Dabei werden scharf definierte Strahlenanteile hoher Intensität und relativ niedriger Energie erzeugt.

Das Spektrum wird verändert durch

- a) eine Erhöhung des Röhrenstroms (mA), der mehr Elektronen und damit mehr Strahlung pro Zeit sowie eine höhere Dosisleistung hervorbringt, wobei die Grenzenergie (Spannung) unverändert bleibt,
- b) eine Erhöhung der Spannung, die zu einer Erhöhung der Grenzenergie führt, wobei gleichzeitig auch mehr Elektronen aus der Heizwendel herausgesaugt werden, so dass sich die Dosisleistung ebenfalls erhöht.

Abb. 1.6 Wirksame Brennfleckabmessung [1.3], [1.4]



Eine wichtige Größe hinsichtlich des Wirkungsgrades der von der Röntgenröhre abgegebenen Strahlung ist die Brennfleckgröße. Da das Target unter einem bestimmten Winkel zur Richtung des Elektronenstromes stehen muss, um die Strahlung seitlich aus der Röhre herauszuführen, kann der „optisch wirksame Brennfleck“ auch nur kleiner als der „wahre tatsächliche Brennfleck“ sein (Abb. 1.6). Die Brennfleckgröße ist insbesondere durch die große Wärmeentwicklung beim Abbremsen des Elektronenstromes begrenzt. Zur guten Wärmeableitung ist das Target in einem Kupferblock eingelassen, der gekühlt wird. Das Target selbst besteht aus Wolfram, das einen hohen Schmelzpunkt besitzt, also thermisch hoch belastbar ist.

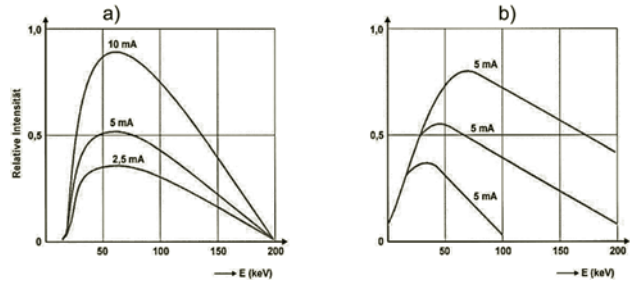
Röntgenröhren werden üblicherweise mit jeweils zwei Brennfleckgrößen ausgestattet, einerseits für die Radiografie und andererseits für die Radioskopie. Es gibt aber auch schon Röntgengeräte mit variablem Brennfleck zwischen 70 und 300 μm [1.5].

In Mikrofokusröhren ist der Brennfleck auf 5 bis 300 μm festgelegt. Für kleinere Brennflecke gibt es keine entsprechende Norm. Um noch kleinere Brennflecke zuverlässig zu charakterisieren, benutzt man die Durchstrahlungsaufnahme eines Liniengitters, wobei deren Spaltbreite im Bereich des Brennfleckdurchmessers liegt und ein Grauwertprofil senkrecht zum Verlauf der Gitterspalten zur iterativen Berechnung des Brennfleckprofils verwendet wird [1.6]. Die Brennfleckvermessung von Röntgenröhren kann auch mit Speicherfolien erfolgen [1.7]. In Ermangelung geeigneter Messvorschriften oder Normen für die Größenbestimmung von Mikrobrennflecken wurden in der BAM Messverfahren entwickelt, die aus der geometrischen Unschärfe der Röntgenaufnahme eines schwer durchstrahlbaren Objektes und einem Kreuz aus Platindraht [1.8] und schließlich auch durch Anwendung der Kantenmethode diese Größe ermittelt [1.9]. Nach der Norm DIN 12543-1 [1.10] sind die Brennflecke von industriellen Röntgenröhren mit einem speziellen Brennfleckscanner zu vermessen. Der Scanner bietet u.a. den Vorteil, auch im oberen Spannungsbereich bis 450 kV zuverlässige Ergebnisse zu liefern, ohne dass Positionierfehler auftreten [1.11].

In Abb. 1.7 ist schematisch der Einfluss einer Änderung des Röhrenstroms und der Röhrenspannung auf das Bremsspektrum dargestellt [1.3].

Bei Änderung des Röhrenstromes ändert sich die Intensität des Bremsspektrums. Die Grenzenergie und die Lage des Intensitätsmaximums bleiben unverändert. Bei einer Än-

Abb. 1.7 Änderungen des Bremspektrums bei [1.3]. a) Änderung des Röhrenstromes, b) Änderung der Röhrenspannung



derung der Röhrenspannung ändern sich sowohl Grenzenergie und Lage des Intensitätsmaximums als auch die Intensität der Strahlung.

1.2.2 Entstehung von Gammastrahlung

Gammastrahlung entsteht im Gegensatz zur Röntgenstrahlung aus einzelnen diskreten Kernzerfallsprozessen. Während also Röntgenröhren kontinuierliche Spektren aussenden, enthalten die Energiespektren von radioaktiven Isotopen diskrete Linienspektren. Abb. 1.8 zeigt die Energiespektren der wichtigsten in der Werkstoffprüfung verwendeten Präparate [1.4].

Röntgenstrahlung (Rö-Strahlung) und Gammastrahlung (γ -Strahlung) können hinsichtlich ihrer radiografischen Wirksamkeit verglichen werden. Es entspricht eine Ir 192-Strahlung einer Rö-Strahlung mit einer Grenzenergie von ca. 600 keV und eine Co 60-Strahlung einer Rö-Strahlung mit einer Grenzenergie von ca. 2500 keV. Die äquivalenten Grenzenergien sind für die Auswahl der geeigneten Strahlenquelle in der Praxis wichtig.

Neben der Art eines radioaktiven Präparates sind in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung insbesondere seine Aktivität und seine Halbwertszeit von Bedeutung. Unter Aktivität eines Isotops versteht man die Zahl der Atomkern-Zerfälle pro Sekunde. Zur Realisierung rationeller Belichtungszeiten sind Isotope mit 37 bis 3.700 Milliarden Zerfällen pro Sekunde notwendig. Daher wird die Einheit „Bequerel (Bq)“ benutzt.

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ Zerfall pro Sekunde.}$$

Vor Einführung der SI Einheiten war noch eine andere Einheit im Gebrauch: das Curie (Ci). Für die Umrechnung gilt:

$$1 \text{ Ci} \cong 37 \text{ GBq.}$$

Für die Werkstoffprüfung benötigt man hohe Aktivitäten, aber auch möglichst kleine Brennflecke zur scharfen Abbildung. Kenngröße einer hohen Aktivität bei kleiner Masse ist die spezifische Aktivität in (Gbg/g).

Abb. 1.8 Energiespektren der in der Werkstoffprüfung verwendeten Präparate [1.4]

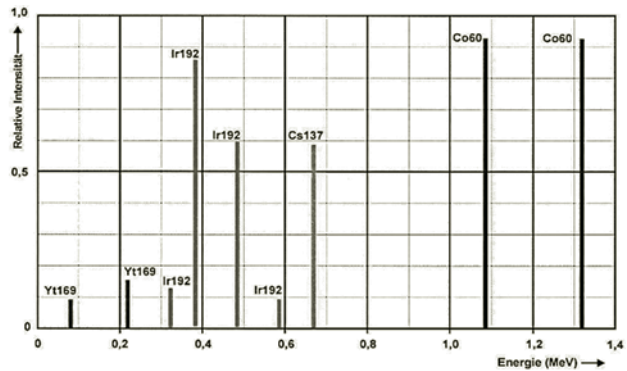
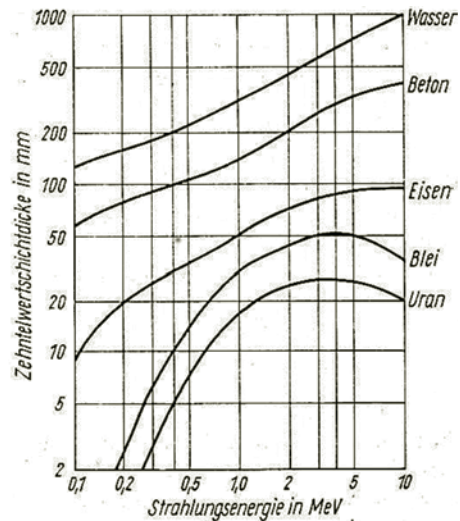


Abb. 1.9 Zehntelwertschichtdicken einiger Werkstoffe in Abhängigkeit von der Strahlungsenergie [1.13]



Da jedes radioaktive Atom nur einmal zerfallen kann, nimmt die Gesamtzahl der radioaktiven Atome in einer bestimmten Menge eines Stoffes ständig ab. Damit nimmt die Aktivität eines radioaktiven Stoffes ab. Die Geschwindigkeit, mit der diese Aktivitätsabnahme erfolgt, ist für jeden radioaktiven Stoff charakteristisch. Als Maß für diese Aktivitätsabnahme während einer bestimmten Zeit wird die sog. **Halbwertszeit** verwendet.

Die Halbwertszeit (HWZ) ist die Zeit, in der die Aktivität eines bestimmten Isotops auf die Hälfte ihres Ausgangswertes abnimmt.

Im gleichen Sinne wird manchmal auch die sog. **Zehntelwertszeit** eines radioaktiven Stoffes angegeben. Die Zehntelwertszeit ist analog dazu die Zeit, in der die Aktivität auf ein Zehntel abgenommen hat. Abb. 1.9 zeigt die Zehntelwertschichtdicken einiger Werkstoffe in Abhängigkeit von der Strahlungsenergie [1.13].

Aus der Angabe der Halbwertszeit eines Strahlers und seiner Aktivität kann noch nichts über die Intensität der Gammastrahlung ausgesagt werden. Die Größe, die diese Aussage erlaubt, ist die sog. **Dosisleistungs- oder Gammakonstante (Γ)**.

Tab. 1.2 Dosisleistungskonstanten verschiedener Strahler [1.3], [1.4]

Strahler	Halbwertszeit	$\Gamma_1 = \frac{\text{mSv} \times \text{m}^2}{\text{h} \times \text{GBq}}$
Yb 169	31 Tage	0,049
Ir 192	74 Tage	0,17
Se 75	119 Tage	0,072
Co 60	5,2 Jahre	0,35

Tab. 1.3 Dosisleistungskonstanten von Röntgenanlagen [1.12]

Röntgenröhre einer Gleichspannungsanlage nach DIN 54113-3	$\Gamma_R = \frac{(\text{mSv} \times \text{m}^2)}{(\text{min} \times \text{mA})}$
100 KV	2.0
150 KV	6.5
200 KV	13.0
250 KV	20.0
300 KV	30.0
350 KV	40.0
400 KV	50.0

Jeder radioaktive Stoff hat, wie Tabelle 1.2 zeigt, eine bestimmte für ihn charakteristische Dosisleistungskonstante.

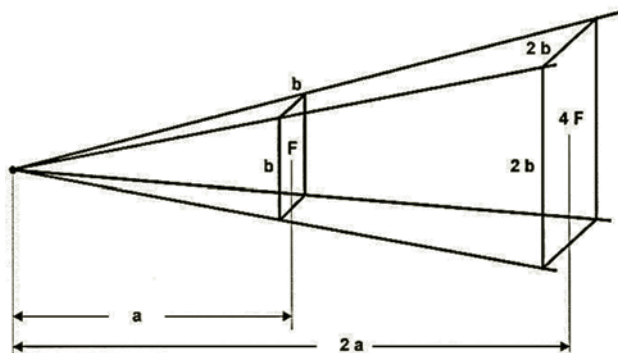
Auch für Röntgenstrahler ist die Dosisleistungskonstante (Γ_R) definiert. Analog zu den Gammastrahlern gibt die Dosisleistungskonstante einer Röntgenröhre die Dosisleistung in einem Meter Abstand vom Brennfleck bei 1mA Röhrenstrom an. In Tabelle 1.3 sind die Dosisleistungskonstanten für eine Gleichspannungsanlage mit unterschiedlichen Betriebsspannungen zusammengestellt.

Soll die Dosisleistung eines Gammastrahlers in beliebiger Entfernung und mit beliebiger Aktivität errechnet werden, gilt das **Abstandsquadratgesetz** (Abb. 1.10):

$$H^* = \Gamma \times \frac{A}{a^2} \left[\frac{\text{mSv} \times \text{m}^2 \times \text{GBq}}{\text{h} \times \text{GBq} \times \text{m}^2} \right] \text{mSv/h,}$$

Der quadratische Zusammenhang zwischen Entfernung von der Strahlenquelle und Dosisleistung rührt daher, dass im Allgemeinen die verwendeten Strahlenquellen als punktförmig anzusehen sind. Bei der Abstrahlung von einer punktförmigen Quelle nimmt, wie

Abb. 1.10 Erläuterung des Abstandsquadratgesetzes [1.4] mit A = Aktivität, a = Abstand, Γ = Dosisleistungskonstante.



in Abb. 1.10 schematisch dargestellt, die bestrahlte Fläche mit dem Quadrat der Entfernung zu. Da die Intensität umgekehrt proportional zur ausgestrahlten Fläche ist, nimmt sie quadratisch zur Entfernung von der Strahlenquelle ab. Im Beispiel hat danach ein Iridium-Strahler mit einer Aktivität von 750 GBq (20 Ci) im Abstand von 1m von der Strahlenquelle eine Dosisleistung von 100 mSv/h. Bei einer Verdopplung des Abstandes auf 2m verringert sich die Dosisleistung auf ein Viertel, d.h. auf 25 mSv/h. Bei einer Vergrößerung des Abstandes um den Faktor 10, das entspricht der Vergrößerung des Abstandes von einem auf zehn Meter, verringert sich die Dosisleistung um den Faktor 100 auf 1 mSv/h.

Die Dosisleistungskonstanten für Gammastrahler und Röntgenröhren unterscheiden sich lediglich darin, dass bei Gammastrahlern die Bezugsgröße für die Intensität die Aktivität in Bq und bei Röntgenröhren der Röhrenstrom in mA ist. Allerdings ist zu beachten, dass die Dosisleistung bei Gammastrahlern in mSv/h und bei Röntgenröhren in mSv/min angegeben wird. Die Dosisleistungskonstante der Röntgenröhren ist natürlich sehr stark abhängig von der eingestellten Röhrenspannung. Es muss daher angegeben werden, für welche eingestellte Hochspannung der jeweilige Wert gilt. Normalerweise wird die zugehörige Röhrenspannung als Index an das Formelzeichen für die Dosisleistungskonstante angegeben, z.B. $\Gamma_{300\text{ kV}}$. Weiterhin ist die Dosisleistungskonstante einer Röntgenröhre bestimmter Bauart nicht auf eine andere übertragbar, da der Aufbau der Röntgenröhre einen wesentlichen Einfluss auf die Dosisleistungskonstante hat.

Da es sich auch bei den in der Durchstrahlungsprüfung verwendeten Röntgenröhren um annähernd punktförmige Brennflecke handelt, gilt hier ebenfalls das Abstandsquadratgesetz. Es lautet in Bezug auf die Dosisleistung:

$$H^* = \Gamma_R \cdot \frac{I}{a^2} \left[\frac{\text{mSv} \times \text{m}^2 \times \text{mA}}{\text{min} \times \text{mA} \times \text{m}^2} \right] \text{mSv} / \text{min}.$$

Will man die tatsächliche Dosisleistung in einem bestimmten Abstand für eine bestimmte Aktivität ausrechnen, so muss man eine Abnahme der Dosisleistung mit dem Quadrat des Abstandes und eine lineare Zunahme der Dosisleistung mit der Aktivität berücksichtigen. Der Zusammenhang der Abnahme der Dosisleistung mit dem Quadrat des Abstandes ist

Tab. 1.4 Eigenschaften von Alpha-, Beta- und Neutronenstrahlung [1.3]

Teilchenart	Ladung	Reichweite
Alphastrahlung	elektrisch positiv (Protonen + Neutronen)	geringe Eindringtiefe
Betastrahlung	elektrisch negativ (Elektronen)	geringe Eindringtiefe
Neutronenstrahlung	elektrisch neutral (Neutronen)	größere Eindringtiefe

auch für die praktische Prüfung wichtig, wenn der Abstand des Prüfobjekts (Film!) vom Brennfleck der Röhre oder des Isotops verändert wird. Die für die Schwärzung des Films notwendige Dosisleistung oder Belichtungsgröße H^*_{neu} verhält sich zur bekannten Dosisleistung H^*_{alt} wie [1.4]:

$$\frac{H^*_{\text{neu}}}{H^*_{\text{alt}}} = \frac{a_{\text{alt}}^2}{a_{\text{neu}}^2} \quad \text{oder} \quad H^*_{\text{neu}} = H^*_{\text{alt}} \times \frac{a_{\text{alt}}^2}{a_{\text{neu}}^2}$$

mit a_{alt} = alter Abstand und a_{neu} = neuer Abstand.

1.2.3 Alpha-, Beta- und Neutronenstrahlung

Bei diesen Strahlungsarten handelt es sich um Teilchenstrahlung und nicht um elektromagnetische Strahlung. Deshalb haben die Teilchen eine begrenzte Reichweite und werden je nach Art, Ladung und Bewegungsenergie vom Medium sehr schnell und vollständig absorbiert. Die Eigenschaften dieser Strahlungsarten sind in Tabelle 1.4 zusammengestellt.

Neutronenstrahlung unterliegt aufgrund der Neutralität der Ladung weder Anziehungs- noch Abstoßungskräften und hat demzufolge einen geringeren Energieverlust (Schwächung) und damit auch eine etwas größere Eindringtiefe als Alpha- und Betastrahlen.

1.3 Strahlenwirkungen

1.3.1 Ionisierende Wirkungen

In den vorhergehenden Vorträgen wurde bereits auf die ionisierende Wirkung der Strahlung hingewiesen. Die Ionisationswirkung stellt für den Strahlungsnachweis die wesentlichste Methode dar, da ionisierende Vorgänge schon bei sehr niedrigen Energien nachweisbar sind, eine Abhängigkeit der Zahl der Ionisationsvorgänge von der Strahlungsintensität (Dosisleistung) besteht und in bestimmten Fällen auch die Zahl der Ionisations-