



SIEGFRIED STEEB
UND 11 MITAUTOREN

Zerstörungsfreie Werkstück- und Werkstoff- prüfung

Die gebräuchlichsten Verfahren
im Überblick

5., aktualisierte Auflage

expert ›

Siegfried Steeb

Zerstörungsfreie Werkstück-
und Werkstoffprüfung

Zerstörungsfreie Werkstück- und Werkstoffprüfung

Die gebräuchlichsten Verfahren im Überblick

Prof. Dr. rer. nat., Dr. h. c. Siegfried Steeb

Dr. G. Basler
Prof. Dr. V. Deutsch
Ing. G. Gauss
Ing. A. Griese
Dr. T. W. Güttinger
Dr. Klaus Kolb

Dipl.-Ing. F. Schur
Dr. W. Staib
W. Stein
Dipl.-Ing. M. Vogt
Ing. H. Wezel

5., aktualisierte Auflage



Kontakt & Studium

Band 243

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Wilfried J. Bartz
Dipl.-Ing. Hans-Joachim Mesenholl

expert ›

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Bibliographic Information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the internet at <http://www.dnb.de>

ISBN 978-3-8169-3261-1

- 5., aktualisierte Auflage 2018
- 4., aktualisierte Auflage 2011
- 3., überarbeitete Auflage 2005
- 2., neubearbeitete und erweiterte Auflage 1993
- 1. Auflage 1988

Bei der Erstellung des Buches wurde mit großer Sorgfalt vorgegangen; trotzdem lassen sich Fehler nie vollständig ausschließen. Verlag und Autoren können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

Für Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf Fehler sind Verlag und Autoren dankbar.

Die gescannten Abbildungen stehen leider nicht in optimaler Qualität zur Verfügung; der Verlag hat sich dennoch entschlossen, diese auch bei der Neuauflage im Buch zu belassen, da sie einen Mehrwert an Information für den Leser darstellen.

© 1988 by expert verlag GmbH, Dischingerweg 5, D-72070 Tübingen

Tel.: +49 (0)7071-97556-0, Fax: +49 (0)7071-9797-11

E-Mail: expert@expertverlag.de, www.expertverlag.de

Alle Rechte vorbehalten

Printed in Germany

Covergestaltung: r² - röger & röttenbacher, büro für gestaltung, Leonberg /
Ludwig-Kirn Layout, Ludwigsburg

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Herausgeber-Vorwort

Bei der Bewältigung der Zukunftsaufgaben kommt der beruflichen Weiterbildung eine Schlüsselstellung zu. Im Zuge des technischen Fortschritts und angesichts der zunehmenden Konkurrenz müssen wir nicht nur ständig neue Erkenntnisse aufnehmen, sondern auch Anregungen schneller als die Wettbewerber zu marktfähigen Produkten entwickeln.

Erstausbildung oder Studium genügen nicht mehr – lebenslanges Lernen ist gefordert! Berufliche und persönliche Weiterbildung ist eine Investition in die Zukunft:

- Sie dient dazu, Fachkenntnisse zu erweitern und auf den neuesten Stand zu bringen
- sie entwickelt die Fähigkeit, wissenschaftliche Ergebnisse in praktische Problemlösungen umzusetzen
- sie fördert die Persönlichkeitsentwicklung und die Teamfähigkeit.

Diese Ziele lassen sich am besten durch die Teilnahme an Seminaren und durch das Studium geeigneter Fachbücher erreichen.

Die Fachbuchreihe *Kontakt & Studium* wird in Zusammenarbeit zwischen der Technischen Akademie Esslingen und dem expert verlag herausgegeben.

Mit über 700 Themenbänden, verfasst von über 2.800 Experten, erfüllt sie nicht nur eine seminarbegleitende Funktion. Ihre eigenständige Bedeutung als eines der kompetentesten und umfangreichsten deutschsprachigen technischen Nachschlagewerke für Studium und Praxis wird von der Fachpresse und der großen Leserschaft gleichermaßen bestätigt. Herausgeber und Verlag freuen sich über weitere kritisch-konstruktive Anregungen aus dem Leserkreis.

Möge dieser Themenband vielen Interessenten helfen und nützen.

Dipl.-Ing.Hans-Joachim Mesenholl

Autoren-Vorwort

Vorliegendes Fachbuch erscheint nunmehr in fünfter, aktualisierter Auflage, und es ist festzustellen, daß seit dem Erscheinen der ersten Auflage die Begriffe der
 und vor allem auch der Qualitätssicherung sehr stark an Bedeutung gewonnen haben. Ohne zerstörungsfreie Prüfverfahren kann weder eine
 geung gewährleistet noch eine Qualitätssicherung durchgeführt werden.

In diesem Fachbuch wird ein Überblick über die gebräuchlichsten Methoden der störungsfreien Prüfverfahren gegeben. Es sind dies die Durchstrahlungsmethoden mit Isotopen- und Röntgenstrahlung, das Magnetpulver- bzw. Streuflußverfahren, das Eindringverfahren, das Ultraschallverfahren, das Wirbelstromverfahren und das Schallemissionsverfahren. Eine moderne Technik wäre ohne diese Prüfverfahren kaum denkbar; so umfassen die Anwendungsgebiete die Überprüfung von Behältern und Rohrleitungen, den Motoren-, Schiff-, Kraftwerks-, Flugzeug-, Auto-, Hoch- und Tiefbau, um nur einige zu nennen, in
 Zeit besonders auch den Raketen- und Reaktorbau sowie viele andere Gebiete der Fertigung und Prüfung. Es soll das Ziel dieses Buches sein, ausgehend von den Grundlagen einen möglichst umfassenden Überblick über die zur Durchführung derartiger Untersuchungen zur Verfügung stehenden Geräte und Arbeitsmethoden zu geben. Für jedes der Teilgebiete ist es gelungen, Autoren mit vieljähriger Erfahrung zu gewinnen.

Vorliegendes Buch ist gedacht
für Techniker und Ingenieure in Konstruktion und Fertigung,
für Werkstoffprüfer, Schweißingenieure, Konstrukteure und Physikingenieure,
für Betriebsleiter und Bauingenieure,
für Röntgentechniker, Werkstoff- und Härtungsfachleute,
für Gutachter, Sachverständige und TÜV-Sachverständige,
für alle mit Fragen der Produkthaftung und Qualitätssicherung befaßten Fachleute

Dieses Fachbuch dient als praktisches Nachschlagewerk für das Gebiet freier Werkstück- und Werkstoffprüfung. Es kann weiterhin für Fachhochschul- und Universitäts-Studenten als Studienunterlage sehr empfohlen werden.

Danken möchte ich meinen Herren Mitautoren für zuverlässige und termingerechte Zusammenarbeit, Herrn R. Feucht, Frau B. Jaissle und Frau H. Matischek für die Herstellung der zahlreichen Bildunterlagen sowie Frau I. Urmann für die Durchführung der Schreibarbeiten. Nicht zuletzt gilt mein Dank auch der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., der viele Autoren dieses Bandes als Mitglieder angehören.

S. Steeb

Inhaltsverzeichnis

Herausgeber-Vorwort
Autoren-Vorwort

1	Physikalische Grundlagen der Materialprüfung mittels Durchstrahlungsverfahren	1
	S. Steeb	
1.1	Entstehung von Röntgenstrahlen	3
1.2	Bremsspektren	4
1.3	Entstehung und Eigenschaften von γ -Strahlung	7
1.4	Absorptionsverhalten von Röntgen- und γ -Strahlung	9
1.5	Nachweis von Röntgen- und γ -Strahlung	12
1.5.1	Leuchtschirme	12
1.5.2	Photographische Filme	13
1.5.3	Zählrohre	15
1.6	Fehlererkennbarkeit, Bildgüte (Kontrast, Schärfe)	15
1.6.1	Kontrast	15
1.6.2	Bildschärfe	16
1.7	Radioaktiver Zerfall und Dosisbegriff	20
1.7.1	Zerfallsgesetz	20
1.7.2	Aktivität	20
1.7.3	Dosisbegriff	21
1.7.3.1	Ionendosis I	21
1.7.3.2	Energiedosis D (Absorbierte Dosis)	21
1.7.3.3	Äquivalentdosis D_{RBW}	21
1.8	Strahlenschutz beim Durchstrahlverfahren	24

2	Röntengeräte für die Materialprüfung	28
	G. Basler	
2.1	Durchstrahlungsverfahren	28
2.2	Röntengeräte	28
2.2.1	Wechselspannungsgeräte	29
2.2.2	Gleichspannungsgeräte	29
2.2.3	Röntgenröhren	31
2.3	Manipulatoren	39
2.3.1	Manipulatoren für die Radiographie	41
2.3.2	Manipulatoren für die Radioskopie	44
2.3.3	Manipulatoren für die Radiometrie	47
2.4	Empfänger	48
2.4.1	Fehlererkennbarkeit des Systems	48
2.4.2	Einfluß der Strahlenquelle	50
2.4.3	Einfluß des Prüfobjektes	51
2.4.4	Einfluß des Empfängers	54
2.4.5	Einfluß des Prüfers	56
2.4.6	Empfänger für die radiographische Technik	59
2.4.7	Empfänger für die radioskopische Technik	61
2.4.8	Empfänger für die radiometrische Technik	68
2.4.9	Nachweis von Röntgenstrahlen mit CCD-Detektoren	69
3	Grobstrukturprüfung mit Gammastrahlen	70
	K. Kolb	
3.1	Grundlagen und Methodik der γ -Radiographie	70
3.1.1	Gammastrahlen und ihre Eigenschaften	71
3.1.1.1	Natürliche Gammastrahler	72
3.1.1.2	Künstliche Gammastrahler	73
3.1.1.3	Geräte für die Gammaradiographie	76
3.1.2	Gesichtspunkte bei der Auswahl von Gammastrahlern	85
3.1.3	Nachweis von Gammastrahlung	86
3.1.3.1	Röntgenfilm	86
3.1.3.2	Leuchtschirm	88
3.1.3.3	Zählrohre	89
3.1.4	Schwächung der Gammastrahlen beim Durchgang durch Materie; Durchstrahlbarkeit der Stoffe	89
3.1.5	Grundlage der Filmaufnahmetechnik	91
3.1.6	Bildgüte von Gammaaufnahmen	93
3.1.6.1	Kontrolle und Nachweis der Bildgüte	101
3.1.6.2	Fehlererkennbarkeit	106
3.2	Durchstrahlung von Schweißnähten an Stahlwerkstoffen	107
3.2.1	Schweißverbindungen an ebenen Blechen und Behältern	109
3.2.2	Schweißverbindungen an Druckbehältern	110

3.2.3	Schweißverbindungen an Stahlkonstruktionen	111
3.3	Durchstrahlung von Gußteilen und Schmiedestücken	111
3.4	Durchstrahlung von Nietverbindungen	111
3.5	Durchstrahlung von Nichteisenwerkstoffen	112
3.5.1	Metalle	112
3.5.2	Kunststoffe, Folien	112
3.5.3	Biologie und Botanik	112
3.6	Protokollführung	113
3.7	Beurteilung der Durchstrahlungsbilder	115
3.7.1	Kurzzeichen für die Kennzeichnung von Fehlern	116
3.7.2	Festlegung zulässiger Fehlergrößen und Notensystem	117
3.8	Experimenteller Teil	123
3.8.1	Aufstellung eines Belichtungsdiagrammes für Gamma- und Röntgenstrahlen	123
3.8.2	Bestimmung der Absorptionseigenschaften verschiedener Werkstoffe	126
3.8.3	Strahlenschutz für Werkstoffprüfer, Dosisbegrenzung	126
3.8.4	Vorbereitung einer Durchstrahlungsaufnahme	131
4	Oberflächenrißprüfung nach dem Magnetpulver-Verfahren	133
	G. Gauss	
4.1	Grundlagen der Magnetpulverprüfung	133
4.1.1	Was kann mit dem Magnetpulver-Verfahren geprüft werden?	133
4.1.2	Was kann gefunden werden?	134
4.1.3	Was kann nicht mit Sicherheit gefunden werden?	134
4.1.4	Warum wird eine Fehlerstelle angezeigt?	134
4.1.5	Bei welcher Fehlerlage erfolgt eine Anzeige?	135
4.1.6	Können unter der Oberfläche liegende Einschlüsse aufgefunden werden?	135
4.1.7	Magnetische Induktion, Feldstärke und Leitfähigkeit	136
4.1.8	Weich- und hartmagnetische Werkstoffe	138
4.2	Magnetisierungsverfahren nach DIN 54 130	139
4.2.1	Magnetisierung mittels Stromdurchflutung	140
4.2.1.1	Selbstdurchflutung (Kennzeichen nach DIN 54 130: SS)	140
4.2.1.2	Induktionsdurchflutung (Kennzeichen nach DIN 54 130: SI)	142
4.2.2	Magnetisierung mit stromdurchflossenem Leiter	145
4.2.2.1	Spulenmagnetisierung (Kennzeichen nach DIN 54 130: LS)	145
4.2.2.2	Magnetisierung durch übrige Leiteranordnungen („Hilfsdurchflutung“); (Kennzeichen nach DIN 54 130: LK)	145

4.2.3	Jochmagnetisierung (Kennzeichen nach DIN 54 130: Dauermagnet JD, Elektromagnet JE)	147
4.3	Bei der Magnetpulverprüfung verwendete Stromarten sowie die Feldstärkemessung	148
4.3.1	Stromarten nach DIN 54 130 für die Magnetpulverprüfung	148
4.3.2	Feldstärke bei der Magnetpulverprüfung	152
4.3.2.1	Festlegung der erforderlichen magnetischen Feldstärken bei der Durchführung einer Magnetpulverprüfung	152
4.3.2.2	Kontrolle der erforderlichen Magnetisierungsfeldstärke	152
4.3.3	Flußdichte bei der Magnetpulverprüfung	154
4.3.3.1	Messung der magnetischen Flußdichte (Induktion)	154
4.4	Kombinierte Magnetisierungsverfahren; Vielkreismagnetisierung	155
4.4.1	Kombination von zwei Gleichfeldern	155
4.4.2	Kombination eines Gleichfeldes mit einem Wechselfeld	155
4.4.3	Kombination von zwei phasenverschobenen Wechselfeldern	157
4.4.3.1	Wechselstromjoch	158
4.4.3.2	Spulenmagnetisierung	159
4.4.4	Vielkreis-Magnetisierung	160
4.5	Entmagnetisierung	161
4.6	Rißprüfmittel	167
4.6.1	Magnetpulver als Indikator magnetischer Streufelder	167
4.6.2	Trockenpulver	168
4.6.3	Naßverfahren – nicht fluoreszierend	168
4.6.4	Naßverfahren – fluoreszierend	170
4.6.5	Kontrolle des Rißprüfmittels	170
4.6.5.1	Beim Neuansatz	170
4.6.5.2	Nach mehrstündiger Prüfung	171
4.7	UV-Beleuchtungseinrichtungen	171
4.8	Visuelle Sichtkontrolle	174
4.9	Automatisierte Rißprüfung durch das Rißdetektionssystem „OPTO-TEC“	175

5 Magnetische Streuflußprüfung mit Sondenabtastung zur zerstörungsfreien Prüfung ferromagnetischen Materials 178

A. Griese

5.1	Das Streufluß-Prüfverfahren	178
5.2	Grundlagen des Streufluß-Verfahrens mit Gleichfeld- magnetisierung	179
5.2.1	Beispiele	189

6.2	Apparative und verfahrenstechnische Grundlagen	236
6.2.1	Ultraschallerzeugung; piezoelektrischer Effekt	236
6.2.2	Verfahren der Ultraschallprüfung	237
6.2.2.1	Durchschallungsverfahren	239
6.2.2.2	Impuls-Echo-Verfahren	239
6.2.3	Prüfköpfe	241
6.2.3.1	Eigenschaften	241
6.2.3.2	Schallfeld	245
6.2.3.3	Aufbau der Prüfköpfe	247
6.2.3.3.1	Senkrechteinschallung	247
6.2.3.3.1.1	Normalprüfkopf	247
6.2.3.3.1.2	SE-Prüfkopf	248
6.2.3.3.2	Schrägeinschallung	251
6.2.3.3.2.1	Winkelprüfkopf	251
6.2.3.3.2.2	Plattenwellen-Prüfkopf	259
6.2.3.3.2.3	Oberflächenwellen-Prüfkopf	261
6.2.4	Ultraschall-Prüfgeräte	261
6.2.4.1	Grundgerät	261
6.2.4.1.1	Sendeleistung bzw. Impulsstärke	263
6.2.4.1.2	Empfindlichkeit bzw. Verstärkung	263
6.2.4.1.3	Schwellwert bzw. Unterdrückung	263
6.2.4.1.3.1	Nichtlinearer Schwellwert	263
6.2.4.1.3.2	Lineare Schwellwertregelung	263
6.2.4.1.4	Hüllkurve bzw. Echoform	264
6.2.4.1.5	HF-Darstellung	264
6.2.4.1.6	Meßlänge bzw. Abbildungsmaßstab	265
6.2.4.1.7	Verschiebung bzw. Nullpunkt	265
6.2.4.1.8	Schallgeschwindigkeitssteller	265
6.2.4.2	Monitore	266
6.2.4.2.1	Signalmonitor	266
6.2.4.2.2	Proportionalmonitor	267
6.2.4.2.3	Universalmonitor	267
6.2.4.2.4	Laufzeitmonitor	267
6.2.4.2.5	Integriermonitor	267
6.2.5	Sondergeräte	268
6.2.5.1	Diodenfeld-Anzeige	268
6.2.5.2	Getaktete Verstärkung	268
6.2.5.3	Frequenzvariabler CS-Sender	269
6.2.5.4	Wanddickenmeßgeräte	269
6.2.5.5	Geräte mit Mikrorechner	269
6.2.5.5.1	Analog-digitale Geräte	270
6.2.5.5.2	Rein digitale Geräte	270
6.3	Anwendungstechnische Grundlagen	271
6.3.1	Prüfgerechte Konstruktion	272

6.3.2	Festlegung der Prüftechnik	272
6.3.2.1	Einkopftechnik	273
6.3.2.2	Einkopftechnik mit Schallumlendung	273
6.3.2.3	Winkelspiegel	273
6.3.2.4	Tandemtechnik	274
6.3.2.5	Deltatechnik	274
6.3.2.6	Präferenzen	274
6.3.3	Schallübergang ins Werkstück	275
6.3.3.1	Ankoppeltechnik	275
6.3.3.1.1	Direktkontakt	275
6.3.3.1.2	Fließwasserankopplung	276
6.3.3.1.3	Tauchtechnik	276
6.3.3.1.4	„Pflützentechnik“	280
6.3.3.2	Werkstückoberfläche	282
6.3.3.2.1	Rauhigkeit	282
6.3.3.2.2	Krümmung	283
6.3.3.2.3	Belag	284
6.3.4	Auswahl des Prüfkopfes	284
6.3.4.1	Wahl der Prüffrequenz	284
6.3.4.2	Wahl des Frequenzspektrums und der Impulsform	286
6.3.4.2.1	Schmales Spektrum – längere (breitere) Impulse	287
6.3.4.2.2	Vergrößerte Bandbreite – kürzere (schmalere) Impulse	287
6.3.4.2.3	Extrem große Bandbreite – kürzeste Impulse	287
6.3.4.3	Wahl der Schwinger- bzw. Prüfkopfgröße	288
6.3.4.4	Fokussierung	290

7 Bewertung von Ultraschall-Prüfbefunden 292

V. Deutsch und M. Vogt

7	Bewertungsgrundlagen	292
7.1	Gerätejustierung	292
7.1.1	Entfernungsjustierung	293
7.1.2	Empfindlichkeitsjustierung	294
7.2	Bewertungsverfahren	295
7.2.1	Laterale (seitliche) Ortung	295
7.2.2	Echolaufzeit	296
7.2.3	Echoform	296
7.2.4	Echodynamik	296
7.2.5	Echoamplitude	302
7.2.5.1	Amplitudenbewertung für Fehler größer als der Schallbündeldurchmesser	302
7.2.5.1.1	Randabtastung über Fehlerecho	302

7.2.5.1.2	Randabtastung über Rückwandecho	304
7.2.5.2	Amplitudenbewertung für Fehler kleiner als der Schallbündeldurchmesser	304
7.2.5.2.1	AVG-Verfahren	306
7.2.5.2.2	Vergleichskörper-Methode	310
7.3	Qualitätskontrollen	313
7.3.1	Schallgeschwindigkeitsmessungen	313
7.3.2	Schallschwächungsmessungen bzw. -vergleiche	315
7.3.2.1	Beurteilung der Absorption	315
7.3.2.2	Beurteilung der Streuverluste	315
7.4	Fehldeutungsmöglichkeiten	315
7.4.1	Ungünstige Prüfanordnung	318
7.4.1.1	Zurückspringende Kanten	318
7.4.1.2	Umwegechos	318
7.4.1.3	Vorlaufstrecke	319
7.4.2	Wellenphysikalische Ursachen	319
7.4.2.1	Streifender Einfall	319
7.4.2.2	Dreiecksreflexion	321
7.4.2.3	Wellenumwandlung $29^\circ/61^\circ$	321
7.4.2.4	Entartete Wellentypen	323
7.4.2.4.1	Oberflächenwellen	324
7.4.2.4.2	Kriechwellen	324
7.4.2.4.3	Plattenwellen	324
7.4.2.4.4	Stabwellen	325
7.4.3	Gerätetechnische Ursachen: Phantomechos	325
7.4.4	Personelle Aspekte	325
7.5	Verwendbarkeitskriterien	327
7.5.1	Im Planungsstadium: Prüfgerechte Konstruktion	327
7.5.2	Beurteilung durch Fachpersonal	327
7.5.3	Voruntersuchungen mit erhöhtem Prüfaufwand	327
7.5.4	Zerstörende Untersuchungen	327
7.5.5	Sinngemäße Anwendung ähnlicher Prüfvorschriften	327
7.5.6	Orientierung an der Reklamationsrate	328
7.5.7	Festlegung der Beurteilungskriterien mit dem Abnehmer	328
7.6	Prüfbericht	328
7.6.1	Allgemeine Angaben	329
7.6.2	Angaben zur Prüftechnik	329
7.6.3	Ergebnisse der Prüfung	330
7.7	Grundlagen der Automatisierung	330

8	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung auf Materialfehler nach dem Wirbelstromverfahren	334
	H. Wezel	
8.1	Allgemeines	334
8.2	Theorie oder: Wie funktioniert die Wirbelstrom-Prüfung?	335
8.2.1	Wirbelströme	335
8.2.2	Wechselstrom, -Spannung und komplexe Impedanz	336
8.2.3	Spulensysteme	337
8.2.4	Mathematische Modellbeschreibung	343
8.2.5	Impedanz der Spule	344
8.2.6	Ähnlichkeitsgesetz der Wirbelstromprüfung	346
8.2.7	Eindringtiefe	349
8.2.8	Effektive Eindringtiefe	351
8.2.9	Einflußgrößen	351
8.3	Gerätetechnik	355
8.4	Praktische Durchführung einer Wirbelstrom-Prüfung	364
8.4.1	Anwendungsbereiche	364
8.4.2	Verwechslungsprüfung	366
8.4.3	Einstellstandards, Vergleichskörper, Testfehler, Prüfnormen	366
8.5	Zusammenfassung	370
9	Eindringprüfung	371
	W. Stein	
9.1	Einführung in das Verfahren	371
9.1.1	Aufgabe der zerstörungsfreien Prüfung	371
9.1.2	Einführung in die Prüfung mit Eindringverfahren	372
9.1.2.1	Historischer Überblick	372
9.1.2.2	Prinzip des Verfahrens	373
9.1.2.3	Anwendungsbereich	374
9.1.3	Prüfmittel-Systeme	375
9.1.3.1	Einteilung und Bezeichnung	375
9.1.3.2	Prüfmittel	377
9.1.3.2.1	Eindringmittel	377
9.1.3.2.2	Zwischenreiniger	377
9.1.3.2.3	Entwickler	379
9.2	Durchführung der Prüfung (Teil 1)	379
9.2.1	Verfahrensbezogene Festlegungen (Übersicht)	379
9.2.2	Festlegungen in einer Prüfanweisung	380
9.2.3	Durchführung der Prüfung nach DIN 54 152 Teil 1	380
9.2.3.1	Vorreinigung	381
9.2.3.1.1	Mechanische Vorreinigung	381

9.2.3.1.2	Chemische Vorreinigung	383
9.2.3.1.3	Sonstige Verfahren	384
9.2.3.2	Trocknung	384
9.3	Durchführung der Prüfung, Teil 2	385
9.3.1	Eindringvorgang	385
9.3.1.1	Aufbringen des Eindringmittels	385
9.3.1.2	Prüftemperatur	387
9.3.1.3	Eindringdauer	387
9.3.2	Zwischenreinigung	389
9.3.2.1	Allgemeine Forderungen	389
9.3.2.2	Art der Zwischenreinigung	390
9.3.2.2.1	Allgemeines	390
9.3.2.2.2	Lösemittel als Zwischenreiniger	392
9.3.2.2.3	Wasser als Zwischenreiniger	393
9.3.2.2.4	Nachemulgierbare Eindringmittel	394
9.3.2.2.5	Kontrolle der Zwischenreinigung	397
9.3.2.3	Trocknungsvorgang	397
9.4	Durchführung der Prüfung, Teil 3	399
9.4.1	Entwicklungsvorgang	399
9.4.1.1	Wirkungsweise des Entwicklers	399
9.4.1.2	Entwicklerarten	400
9.4.1.2.1	Trockenentwickler	401
9.4.1.2.2	Naßentwickler	401
9.4.1.3	Entwicklungsdauer	403
9.4.2	Inspektion	404
9.4.3	Nachreinigung	405
9.5	Handhabung spezieller Prüfsysteme	406
9.5.1	Allgemeiner Hinweis	406
9.5.2	Anwendung von Farbeindringmitteln (Rot-Weiß-Verfahren)	406
9.5.3	Anwendung von wasserabwaschbaren fluoreszierenden Eindringmitteln	408
9.5.4	Nachemulgierbare fluoreszierende Eindringmittel	408
9.5.5	Spezielle Prüfsysteme	410
9.5.5.1	Fluoreszierendes Farbeindringmittel	410
9.5.5.2	Eindringprüfung an keramischen Werkstoffen	413
9.5.5.2.1	Einfachprüfungen mit Fuchsin und Methylenblau	414
9.5.5.2.2	Eindringprüfung mit gefilterten Teilchen	414
9.5.5.2.3	Vorwässerungsmethode	415
9.5.5.2.4	Lösungsmittelfreies Eindringprüfsystem	415
9.6	Hilfsmittel für die Durchführung am Arbeitsplatz	416
9.6.1	Übersicht	416
9.6.2	Prüftechnische Hilfsmittel	416
9.6.2.1	Forderungen an die Sichtbedingungen	416
9.6.2.2	UV-Licht: Eigenschaften, Erzeugung, Kontrolle	417

9.6.2.2.1	UV-Strahlung und ihre Umwandlung in sichtbares Licht durch Fluoreszenz	417
9.6.2.2.2	Die Erzeugung der UV-Strahlung, UV-Lampen	418
9.6.2.2.3	Kontrolle der Lampen	419
9.6.2.2.3.1	Allgemeiner Hinweis	419
9.6.2.2.3.2	Indirekte Messung der UV-Strahlung	420
9.6.2.2.3.3	Direkte Meßmethoden	421
9.6.2.3	Prüfraum	422
9.6.3	Sicherheit am Arbeitsplatz	422
9.6.4	Umweltschutzmaßnahmen	423
9.7	Kontrolle der Prüfdurchführung	423
9.7.1	Nachweis und Kontrolle der Wirksamkeit von Prüfsystemen	423
9.7.2	Kontrollen am Arbeitsplatz	424
9.7.2.1	Allgemeiner Hinweis	424
9.7.2.2	Kontrollkörper zum Nachweis der Anzeigeempfindlichkeit	425
9.7.2.2.1	Chromplattierte Vergleichsstücke	425
9.7.2.2.2	Kontrollkörper nach DIN 54 152 Teil 3	425
9.7.2.2.3	Testkörper mit künstlichem Spalt	427
9.7.2.3	Beurteilung der Testmethoden	428
9.8	Vorschriften, Normen, Verfahrensbeschreibungen	428
9.9	Typische Fehleranzeigen; Automatisierung	430
9.9.1	Typische Fehleranzeigen	430
9.9.2	Automatisierung	432
9.10	Dichtigkeitsprüfung	434
9.11	Neuere Entwicklungen bei der Eindringprüfung im Zusammenhang mit dem Umweltverhalten der Prüfsysteme	435
10	Manuelle Fehlerprüfung mit dem Wirbelstromverfahren	436
	F. Schur und T. W. Güttinger	
10.1	Einleitung	436
10.2	Grundlagen des Wirbelstromverfahrens	438
10.3	Problemlösung mit Wirbelstrom	442
10.4	Einsatzbeispiele	456
10.5	Neue Technologien	460
11	Schallemissionsverfahren	465
	W. Staib	
11.1	Einleitung	465
11.2	Physikalische Grundlagen	467
11.2.1	Schallemissionserzeugung	467

11.2.2	Wellenausbreitung	467
11.3	Meßtechnische Grundlagen	468
11.3.1	Schallaufnehmer	468
11.3.2	Erscheinungsformen der elektrischen Meßsignale	469
11.4	Meßwerterfassung und -Auswertung	470
11.4.1	Einkanalige Meßwerterfassung	470
11.4.2	Mehrkanalige Meßwerterfassung	474
11.5	Vor- und Nachteile der Schallemissionsanalyse	478
11.6	Praktische Anwendungen	478
11.6.1	Zugversuche mit Prüfmaschinen	478
11.6.2	Bruchmechanische Versuche mit Prüfmaschinen	479
11.6.3	Überwachung von Schweißvorgängen	481
11.6.4	Überwachung der Wärmebehandlung bei keramischen Werkstoffen	482
11.6.5	Prüfung von Druckbehältern und Rohrleitungen	482
11.6.6	Rißüberwachung an off-shore Erdöl/Erdgas-Förderplattformen	485
11.6.7	Weitere Anwendungen der Schallemission	487
11.7	Geräte	487
12	Anwendung und Kombination von Prüfverfahren in der Luftfahrt	490
	F. Schur	
12.1	Einleitung	490
12.2	Systematik der Überwachung	490
12.3	Auswahlkriterien für die Prüfverfahren	491
12.4	Vergleich der Prüfverfahren	493
12.5	Anwendungsbeispiele	500
12.5.1	Sichtkontrolle	501
12.5.2	Eindringverfahren	506
12.5.3	Magnetpulververfahren	509
12.5.4	Wirbelstromverfahren	513
12.5.5	Ultraschallverfahren	534
12.5.6	Durchstrahlungsverfahren	544
12.5.7	Schallemission	550
12.6	Verfahrensgrenzen	553
	Literaturverzeichnis	555
	Sachregister	573
	Autorenverzeichnis	582

1 Physikalische Grundlagen der Materialprüfung mittels Durchstrahlungsverfahren

S. Steeb

Bevor wir uns dem eigentlichen Thema des Kapitels 1 zuwenden, sei ausgeführt, daß das vorliegende Fachbuch das Ziel hat, die wichtigsten Methoden der Materialprüfung vorzustellen, d. h. also einen Überblick zu geben über den Einsatzbereich der verschiedenen Methoden, ihre gegenseitige Abgrenzung und Überlappung. Nicht behandelt werden sollen mechanische Eigenschaftsprüfungen wie Härtetests, Zugversuche, Bruchversuche, Schlagversuche, Wechselbeanspruchungsversuche und Kriechversuche. Die zu behandelnden Methoden sind in Bild 1.1 in schematischer Weise zusammengestellt, wobei eine Einteilung nach A) „Elektromagnetische“ Prüfverfahren und B) „Akustische Prüfverfahren“ getroffen wurde:

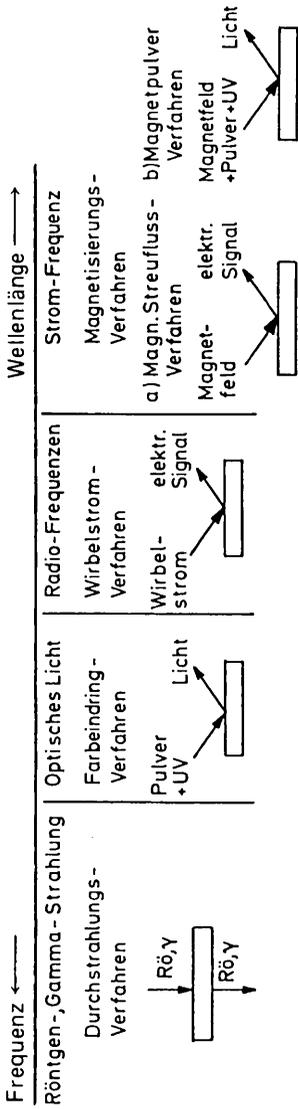
A) „Elektromagnetische“ Prüfverfahren

1. Magnetisierungsverfahren (Technische Stromfrequenzen)
 - a) Mag. Streuflußverfahren
 - b) Magnetpulververfahren
2. Wirbelstrom-Verfahren (Radio-Frequenzen)
3. Farbeindring-Verfahren (Optisches Licht)
4. Durchstrahlungs-Verfahren (Röntgen-Frequenzen bzw. Gamma-Frequenzen)

B) „Akustische“ Prüfverfahren

1. Ultraschall-Verfahren
2. Schallemissions-Verfahren

A) Elektromagnetische Prüfverfahren



B) Akustische Prüfverfahren



Bild 1.1: Zusammenstellung der in diesem Fachbuch behandelten Prüfverfahren

Bei den Verfahren A 1, 2, 4 und B 1 wird eingestrahlt und das resultierende Signal (durchgegangener Strahl etc.) beobachtet und interpretiert. Bei A 3 dringt ein Farbstoff in die Fehlstelle ein und macht diese dadurch sichtbar. Bei B 2 werden die durch äußere Kräfte im Material erzeugten Geräusche beobachtet.

Das Ziel soll sein, die Grundlagen der Verfahren aufzuzeigen und ein Gespür dafür zu vermitteln, wann wo welches Verfahren einzusetzen ist.

Daß Prüfverfahren notwendig sind, ist klar. Zum Teil machen in manchen Industriezweigen, wie z. B. im Flugzeugbau oder Turbinenbau, die Prüfkosten heutzutage schon einen beträchtlichen Prozentsatz aus (20 % der Herstellungskosten) und es lohnt sich deshalb schon, sich intensiv mit den verschiedenen Prüfmethoden auseinanderzusetzen. Dabei stellt sich dann heraus, daß die Frage nach dem günstigsten Verfahren nicht auf ein „entweder . . . oder . . .“ hinausläuft, sondern durchaus häufig auf ein „sowohl . . . als auch . . .“:

Z. B. ist der Nachweis von Oberflächenrissen mit den Durchstrahlungsmethoden eine etwas unsichere Sache und deswegen ergibt sich fast automatisch die Kombination der Durchstrahlungsverfahren mit dem Magnetpulververfahren oder dem Eindringverfahren. Oder man hat die Kombination einer Vorprüfung mit Ultraschall und danach einer Röntgendurchstrahlung für den Fall, daß ein mit Ultraschall aufgefundener Fehler näher charakterisiert werden soll. Durch derartige Kombinationen kann eine wesentliche Senkung der Prüfkosten erreicht werden. Oder man deckt schon während der Entstehungsphase mit der Schallemissionsmethode Fehler auf und untersucht diese dann z. B. nach dem Ultraschallverfahren.

Zu Beginn des Kapitels 1 über die Grundlagen der Durchstrahlungsverfahren ist festzuhalten, daß das Prinzip der Durchstrahlungsprüfung darin besteht, den Prüfkörper einer intensiven Strahlung auszusetzen und die durchgegangene Strahlung zu beobachten. Dabei wird dann der Effekt der Strahlungsschwächung eine Rolle spielen: Die verschieden starke Schwächung der verschiedenen Teile des Prüfkörpers liefert uns die gewünschte Information.

1.1 Entstehung von Röntgenstrahlen

Bild 1.2 zeigt in schematischer Weise das Prinzip einer Röntgenröhre. In dieser emittiert ein in einem Vakuumgefäß durch Stromdurchfluß erhitzter Heizfaden Elektronen. Diese werden zur Anode hin mittels einer Hochspannung U (Angabe in kV) beschleunigt. Beim Aufprall auf der Anode entstehen Röntgenstrahlen. Diese kann man auf zwei Arten beschreiben.

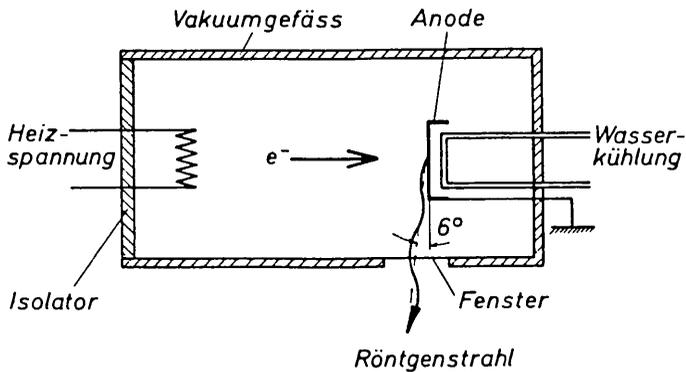


Bild 1.2: Röntgenröhre, schematisch

- Als elektromagnetische Welle. Wellenlängenangabe in \AA ($1 \text{\AA} = 10^{-8} \text{ cm}$) oder in nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10 \text{\AA}$) oder
- als Aufeinanderfolge von einzelnen Röntgenquanten („Blitzen“), deren jedes eine bestimmte Energie aufweist. Angabe der Energie in Elektronenvolt (eV). Die Energie von 1 eV besitzt ein Elektron nach Durchlaufen einer Spannung von 1 Volt. $1 \text{ keV} = 1000 \text{ eV}$.

1.2 Bremspektren

Ein Spektrum ist immer eine Darstellung einer Intensität über der Wellenlänge λ oder über der Energie E , wobei wir uns erinnern, daß es zwischen diesen beiden Größen eine reziproke Beziehung gibt:

$$E [\text{keV}] = \frac{12,34}{\lambda [\text{\AA}]} \quad (1.1)$$

Das Spektrum der Röntgenstrahlung besteht einmal aus der sogenannten Eigenstrahlung, welche für die Röntgenbeugung (vgl. Band 144 der vorliegenden Fachbuchreihe) und für die Röntgenfluoreszenzanalyse (vgl. Band 196 der vorliegenden Fachbuchreihe) eine überragende Bedeutung hat, hier jedoch nur erwähnt werden soll und zum zweiten aus der Bremsstrahlung. Diese entsteht durch Abbremsung der Elektronen im Anodenmaterial. Anhand der schematischen Darstellung von Bild 1.3 seien wichtige Eigenschaften des Bremspektrums beschrieben.

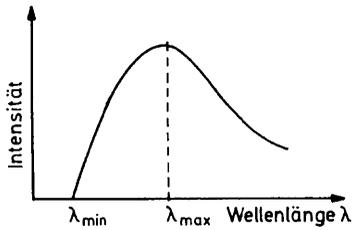


Bild 1.3:
Bremspektrum, schematisch

Die kleinste Wellenlänge λ_{\min} entsteht dadurch, daß die betreffenden Elektronen ihre Energie in einem einzigen Akt abgeben und daß diese Energie vollständig in ein Röntgenquant überführt wird. Entsprechend Glg. (1.1) folgt für die minimale Wellenlänge λ_{\min} :

$$\lambda_{\min} [\text{Å}] = \frac{12,34}{E_{\lambda_{\min}} [\text{keV}]}$$

Die Zahl der keV entspricht derjenigen der Beschleunigungsspannung U in kV an der Röhre. Für die Wellenlänge λ_{\max} , bei der das Bremspektrum seinen maximalen Wert annimmt, gilt:

$$\lambda_{\max} = (1,3 \text{ bis } 1,8) \cdot \lambda_{\min} \quad (1.2)$$

dem entspricht

$$V_{\lambda_{\min}} = (1,3 \text{ bis } 1,8) \cdot V_{\lambda_{\max}} \quad (1.3)$$

und das bedeutet, daß die dem Bremsbergmaximum entsprechende Spannung $V_{\lambda_{\max}}$ um 77 % bis 55 % unterhalb der entsprechenden Röhrenspannung $V_{\lambda_{\min}}$ liegt.

Festzuhalten bleibt, daß die Lage des Bremsberges unabhängig ist von der Beschaffenheit des Anodenmaterials. Sie hängt lediglich ab von der Röhrenspannung. Dieses geht deutlich hervor aus Bild 1.4, wo fünf Bremspektren abgebildet sind entsprechend den Spannungen von 20 kV, 30 kV, 35 kV, 40 kV und 50 kV.

Die integrale Intensität I unter einem Bremsberg kann folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$I \approx i \cdot V^2 \cdot Z \left[\frac{\text{Röntgenquanten}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right] \quad (1.4)$$

mit i = Röhrenstrom, d. h. Stromstärke des von der Kathode zur Anode fließenden Elektronenstromes

V = Röhrenspannung, d. h. Spannung zwischen Kathode und Anode

Z = Ordnungszahl des Anodenmaterials

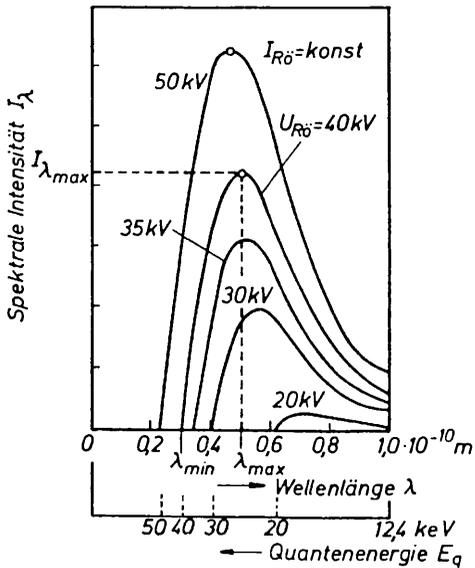


Bild 1.4: Bremspektrum für verschiedene Beschleunigungsspannungen

Da die Leistung (= Strom · Spannung) einer Röhre stets vorgegeben ist, kann Glg. (1.4) auch so dargestellt werden:

$$\text{Intensität} \propto \text{Leistung} \cdot \text{Spannung} \cdot \text{Ordnungszahl} \quad (1.5)$$

Da in Glg. (1.4) die Spannung quadratisch eingeht, ist klar, daß für die Herstellung intensiver Strahlung die Steigerung der Hochspannung viel bringt.

Der in Glg. (1.4) auftretende Begriff der Intensität ist definiert als die Strahlungsenergie E_{ges} , welche während der Bestrahlungszeit t auf eine Fläche F auftritt.

$$I = \frac{E_{\text{ges}}}{F} \quad (1.6)$$

Die gesamte Energie setzt sich zusammen aus der Zahl n der aufgetroffenen Energiequanten und der Quantenenergie E jedes einzelnen Quants, so daß gilt:

$$I = \frac{n \cdot E}{F} \quad (1.7)$$

In laxer Sprachweise läßt man üblicherweise die Quantenenergie weg und bezeichnet als Intensität die Zahl der Quanten pro Fläche. Die Fläche ist üblicherweise die Eintrittsblende eines Zählers.

Zusammenfassend ist also festzustellen, daß Röntgenstrahlung eine elektromagnetische Strahlung ist, die durch Abbremsen von Elektronen entsteht, welche dabei mit den Elektronen der Elektronenhüllen der Atome sowie mit deren positiv geladenen Kernen wechselwirken. Die Form des Bremsspektrums wird durch die Röhrenspannung gegeben; seine Höhe zudem noch durch die Ordnungszahl des Anodenmaterials.

1.3 Entstehung und Eigenschaften von γ -Strahlung

Im Gegensatz zu der soeben behandelten Röntgenstrahlung entstammt die γ -Strahlung den Kernen der betreffenden Atome. Dazu muß der Kern durch Bestrahlung oder Beschuß angeregt werden. Er wird dann nach gewisser Zeit wieder in den Grundzustand zurückkehren. So wird z. B. durch Neutronenbestrahlung in einem Atomreaktor aus dem stabilen Kobalt-Isotop Co^{59} das angeregte Isotop Co^{60} erzeugt, welches dann wieder zu Co^{59} zerfällt unter Emission von γ -Strahlung. In diesem Zusammenhang sind zwei Bemerkungen nicht unangebracht:

- I) Ohne Atomreaktoren gäbe es keine effektiven radioaktiven Isotope zur Durchführung von γ -Durchstrahlungsprüfungen und im übrigen auch nicht für die Strahlentherapie, mit welcher schon unzähligen Patienten große Hilfe zuteil wurde.
- II) Die Bildung radioaktiver Substanzen ist nur möglich durch Neutronen-Bestrahlung, niemals durch γ -Bestrahlung. Durch γ -Bestrahlung wird also keine Radioaktivität angeregt, weshalb dann z. B. auch die Entkeimung von Lebensmitteln durch γ -Bestrahlung eine in dieser Hinsicht garantiert unschädliche Angelegenheit ist.

Die Charakterisierung der γ -Strahlung erfolgt durch Angabe von deren Energie. Außerdem wird meist auch noch die Halbwertszeit des betreffenden Strahlers sowie seine Aktivität angegeben.

In Bild 1.5 erkennt man die gegenseitige Stellung der γ - und Röntgenstrahlen innerhalb des Spektrums der elektromagnetischen Strahlung. Sowohl für die γ - als auch die Röntgenstrahlung gilt die reziproke Beziehung Glg. (1.1) zur Umrechnung von Quantenenergie und Wellenlänge.

Die Röntgen- und γ -Strahlung haben ähnliche Eigenschaften. Für die Grobstrukturuntersuchung am wichtigsten ist die Tatsache, daß sie zwar Fest-

Tabelle 1.1: Wichtige Kenngrößen radioaktiver Strahlenquellen zur Durchstrahlungs-Untersuchung.
Für die Einheit der Dosisleistungskonstante folgt nach Kapitel 1.7:

$$1 \frac{\text{m rem} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{m Ci}} = 0,27 \frac{\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{Bq}}$$

	Tm - 170	Ir - 192	Cs - 137	Co - 60
Erzeugung	(n, γ)	(n, γ)	Spaltprodukte	(n, γ)
Halbwertszeit	127 d	74,5 d	33 a	5,26 a
E_{β} [MeV]	0,968 / 0,884	0,67 / 0,54 / 0,24	0,51	0,31
Wichtigste E_{γ} [MeV]	0,084	0,47 / 0,31 / 0,26	0,66	1,17 / 1,33
Dosisleistungskonstante [$\frac{\text{m rem} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{m Ci}}$]	0,004	0,54	0,367	1,35
Halbwertdicke für Blei [mm]	0,3	2,6	8	13
Anwendungsbereich für Stahl [mm]	.. 15	6 .. 80	30 .. 100	40 .. 180

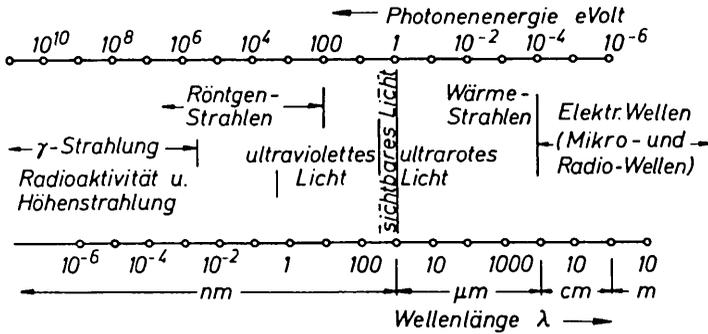


Bild 1.5: Übersicht über das elektromagnetische Spektrum mit Wellenlängen- und Energieskala

körper durchdringen können, aber selbstverständlich auch von Festkörpern in der Intensität geschwächt werden.

Die für die Grobstruktur wichtigsten vier Isotope sind mit ihren charakteristischen Daten in Tabelle 1.1 zusammengestellt. Der in Tabelle 1.1 auftauchende Begriff der Dosiskonstante wird in Kapitel 1.7 näher erläutert werden. Dort werden auch die Einheiten m rem und Ci (Curie) zur Sprache kommen.

1.4 Absorptionsverhalten von Röntgen- und γ -Strahlung

Anhand des in Bild 1.6 dargestellten Absorptionsexperimentes sei die Strahlungsabsorption behandelt. Ein Körper der Dicke x werde mit gerichteter Strahlung der Intensität I_0 bestrahlt. Dann gilt für die durchgegangene Intensität I :

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (1.7)$$

mit μ = Schwächungskoeffizient

e = Basis des natürlichen Logarithmus = 2,71828