

Zerstörungsfreie Werkstück- und Werkstoffprüfung

Die gebräuchlichsten Verfahren im Überblick

Prof. Dr. Dr.h.c. Siegfried Steeb

Dr. G. Basler

Prof. Dr. V. Deutsch

Ing. G. Gauss

Ing. G. Griese

Dr. T. Güttinger

Dr. K. Kolb

Dipl.-Ing. F. Schur

Dr. W. Staib

W. Stein

Dipl.-Ing. M. Vogt

Ing. H. Wezel

3., überarbeitete Auflage
Mit 368 Bildern



Kontakt & Studium
Band 243

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Wilfried J. Bartz

Technische Akademie Esslingen

Weiterbildungszentrum

Dipl.-Ing. Elmar Wippler, expert verlag

expert^ylverlag

Inhaltsverzeichnis

Herausgeber- Vorwort
Autoren-Vorwort

Physikalische Grundlagen der Materialprüfung mittels Durchstrahlungsverfahren

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 1	21
1.7.3.2	Energiedosis D (Absorbierte Dosis)	21
1.7.3.3	Äquivalenzdosis DRBW	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
3	Grobstrukturprüfung mit Gammastrahlen	70
	K. Kolb	
3.1	Grundlagen und Methodik der γ -Radiographie	70
3.1.1	Gammastrahlen und ihre Eigenschaften	71
3.1.1.2	Künstliche Gammastrahler	73
3.1.1.3	Geräte für die Gammadiagnostik	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	113
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 54130	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 _A	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

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 Prüf köpfe	247
6.2.3.3.1	Senkrechteinschal lung	247
6.2.3.3.1.1	Normalprüf köpf	247
6.2.3.3.1.2	SE-Prüfkopf	248
6.2.3.3.2	Schrägeinschallung	251
6.2.3.3.2.1	Winkelprüf köpf	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 Schallumlenkung	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	„Pfützentechnik“	280
6.3.3.2	Werkstückoberfläche	282
6t.3.3.2.1	Rauhigkeit	282
6t.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

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	Amplitudenenbewertung 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 Einfalt	319
7.4.2.2	Dreiecksreflexion	321
7.4.2.3	Wellenumwandlung 29°/61°	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 (TeilM)	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	388
9.3.2.1	Allgemeine Forderungen	388
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	412
9.5.5.2.1	Einfachprüfungen mit Fuchsin und Methylenblau	413
9.5.5.2.2	Eindringprüfung mit gefilterten Teilchen	413
9.5.5.2.3	Vorwässerungsmethode	414
9.5.5.2.4	Lösungsmittelfreies Eindringprüfsystem	414
9.6	Hilfsmittel für die Durchführung am Arbeitsplatz	415
9.6.1	Übersicht	415
9.6.2	Prüf technische Hilfsmittel	415
9.6.2.1	Forderungen an die Sichtbedingungen	415
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
11.2.1y	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-Förderplatt- formen	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	562
	Autorenverzeichnis	571