

Josef Krautkrämer  
Herbert Krautkrämer

# Werkstoffprüfung mit Ultraschall

Fünfte, völlig überarbeitete Auflage

unter Mitarbeit von

W. Grabendörfer, R. Frielinghaus, W. Kaule,  
L. Niklas, U. Opara, E. Primbsch, U. Schlengermann,  
H. Seiger, G. Splitt, K. Volkmann

Mit 564 Abbildungen und 10 Tafeln

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo 1986

# Inhaltsverzeichnis

Einleitung . . . . .	1
<i>Teil A   Physikalische Grundlagen der Ultraschallwerkstoffprüfung . . .</i>	<i>4</i>
1 Schallwellen im freien Raum . . . . .	4
1. Schwingungen und Wellen . . . . .	4
1.2 Nichtebene Wellen, Interferenz von Wellen . . . . .	8
1.3 Meßgrößen freier Wellen und Stoffkonstanten . . . . .	12
2 Ebene Schallwellen an Grenzflächen . . . . .	16
2.1 Senkrechter Einfall auf ebene Grenzflächen . . . . .	16
2.2 Senkrechter Einfall auf mehrfache Grenzflächen. Platte und Spalt . . . . .	19
2.3 Das Brechungsgesetz für ebene Wellen, Modenwandel	24
2.4 Die Schalldruckwerte bei Reflexion und Brechung	26
2.5 Modenwandel an Grenzflächen bei einfallenden Schall- bündeln, geführte Wellen . . . . .	34
2.6 Die Schallgeschwindigkeiten der geführten Wellen, Dispersion . . . . .	39
2.7* Randwellen . . . . .	42
2.8 Reflexion in einer rechtwinkligen Kante und in einer Ecke . . . . .	45
3 Geometrische Akustik . . . . .	48
3.1 Gültigkeitsgrenzen . . . . .	48
3.2 Abstandsgesetze für Kugel- und Zylinderwellen . . . . .	48
3.3* Reflexion und Brechung von Kugelwellen an ebenen Grenzflächen . . . . .	50
3.4* Gekrümmte Grenzflächen als Spiegel und Linsen . . . . .	51
3.5* Kugelwellen in Hohl- und Vollzylindern . . . . .	56
4 Wellenphysikalische Behandlung des Schallfelds . . . . .	61
4.1 Elementare Beschreibung . . . . .	61
4.2* Zonenkonstruktion des Schallfelds nach Fresnel . . . . .	64
4.3* Grafische Darstellung von Schallfeldern . . . . .	70
4.4 Schallfeld des ebenen kreisförmigen Kolbenschwingers	73

---

\* Die mit einem Sternchen bezeichneten Abschnitte sind für Anfänger weniger wichtig und können zur Erlernung elementarer Kenntnisse überschlagen werden.

4.5	Schallfelder nichtkreisförmiger Kolbenschwinger . . .	80
4.6	Schallfelder an Grenzflächen und bei Modenwandel	84
4.7*	Fokussierte Schallfelder . . . . .	86
4.8*	Schallfelder bei Impulsanregung und ungleichförmiger Erregung des Schwingers . . . . .	93
5	Echo und Schatten eines Reflektors im Schallfeld . . . . .	98
5.1	Reflexion einer ebenen Welle an einem ebenen Reflektor . . . . .	98
5.2	Echo eines Reflektors, AVG-Diagramm . . . . .	101
5.3	Schatten eines Reflektors . . . . .	107
5.4	Schrägliegende Kreisscheiben- und natürliche Reflektoren . . . . .	109
6	Die Schwächung von Ultraschallwellen in festen Stoffen . . .	113
6.1	Absorption und Streuung . . . . .	113
6.2*	Die Schwächung in Metallen, Anisotropie und Gußstruktur . . . . .	118
7	Piezoelektrische Verfahren zur Erzeugung und zum Empfang von Ultraschallwellen . . . . .	122
7.1	Piezoelektrische Stoffe und ihre Eigenschaften . . . .	122
7.2	Die piezoelektrische Platte als Sender und Empfänger von Ultraschallwellen . . . . .	132
7.3*	Der piezoelektrische Wandler bei Impulsanregung . .	139
8*	Andere Verfahren zum Senden und Empfangen von Ultraschallwellen . . . . .	148
8.1	Mechanische Effekte . . . . .	149
8.2	Thermische Effekte . . . . .	149
8.3	Elektrostatische Verfahren . . . . .	152
8.4	Elektrodynamische Verfahren . . . . .	153
8.5	Magnetostriktive Verfahren . . . . .	157
8.6	Optische Verfahren . . . . .	160

*Teil B | Verfahren und Geräte der Ultraschallwerkstoffprüfung . . . . .* 168

9	Übersicht und historische Entwicklung . . . . .	168
9.1	Tabellarische Übersicht . . . . .	168
9.2	Die historische Entwicklung . . . . .	170
10	Das Impulsechoverfahren, Aufbau und Wirkungsweise eines Impulsechogeräts . . . . .	176
10.1	Grundlagen . . . . .	176
10.2	Grundfunktionen eines Impulsechogeräts . . . . .	179
10.2.1	Blockschaltbild der Grundfunktionen . . . . .	179

10.2.2	Die Bildröhre . . . . .	179
10.2.3	Der Taktgenerator und die Zeitbasis . . . . .	180
10.2.4	Der Sender . . . . .	184
10.2.5	Der Empfänger . . . . .	186
10.3	Spezielle Funktionen für automatisierte Auswertung	189
10.3.1	Die Torschaltungen . . . . .	189
10.3.2	Die Rückwandechoabsenkung . . . . .	193
10.3.3	Registrierverstärker, Spitzenwertspeicher . . . . .	193
10.3.4	Tiefenausgleich, tiefenabhängige Blende . . . . .	194
10.3.5	Wanddickenmeßzusätze . . . . .	196
10.3.6	Zusatzgeräte und Verfahren zur Dokumentation . . . . .	197
10.4	Die Prüfköpfe . . . . .	200
10.4.1	Einschwinger-Senkrechtprüfköpfe . . . . .	200
10.4.2	Einschwinger-Winkelprüfköpfe . . . . .	210
10.4.3	Sender-Empfänger-(SE)-Prüfköpfe . . . . .	217
10.4.4	Prüfköpfe für spezielle Anwendungen . . . . .	220
10.5	Eigenschaften von Impulsehochgeräten und Prüfköpfen	221
10.5.1	Allgemeine Eigenschaften . . . . .	221
10.5.2	Anwendungsspezifische Eigenschaften . . . . .	222
10.5.3	Überprüfung der Eigenschaften . . . . .	224
	10.5.3.1 Eigenschaften des Bildteils . . . . .	225
	10.5.3.2 Eigenschaften des Verstärkers . . . . .	225
10.5.4	Prüfkopfdaten und Schallfeldeigenschaften	229
10.6	Geräte für das Impulsehochverfahren und ihre Hersteller	235
10.7*	Frequenzmodulationsverfahren . . . . .	237
10.8*	Verfahren zur Anzeigenverbesserung eines Impulsehochgeräts . . . . .	238
11	Laufzeitverfahren . . . . .	240
11.1	Zeitmeßverfahren . . . . .	240
11.1.1	Interferometermethode . . . . .	241
11.1.2	Integrationsverfahren . . . . .	242
11.1.3	Auszählverfahren . . . . .	244
11.2	Geräte für das Laufzeitverfahren . . . . .	245
11.2.1	Wanddickenmessung bei guten Oberflächen	247
11.2.2	Restwanddickenmessung . . . . .	251
11.3	Frequenzmeßverfahren . . . . .	254
11.3.1	Schmalbandige (Resonanz-)Verfahren . . . . .	254
11.3.2	Breitbandige Verfahren . . . . .	256
11.4	Weitere Laufzeitverfahren . . . . .	259
12	Schattenverfahren (Intensitäts- oder Durchschallungsverfahren) . . . . .	260
13	Bild- und Rekonstruktionsverfahren . . . . .	262
13.1*	Das Reliefverfahren . . . . .	263
13.2*	Ultrasonovision (RCA-Kamera) . . . . .	264

13.3*	Der piezoelektrische, optisch-akustische Wandler (parametrischer Bildwandler) . . . . .	265
13.4*	Abbildung durch Bragg-Beugung . . . . .	265
13.5*	Das Schlierenverfahren . . . . .	266
13.6*	Bilderzeugung mit Hilfe des fotoelastischen Effekts . . . . .	266
13.7*	DUVD-Verfahren . . . . .	266
13.8*	Akusto-optische Flüssigkristallwandler . . . . .	267
13.9*	Das Schallsichtgerät nach Pohlman . . . . .	268
13.10*	Die Sokolov-Kamera . . . . .	268
13.11*	Die pyroelektrische Kamera . . . . .	271
13.12	Abtastverfahren mit Ultraschallimpulsen . . . . .	271
13.12.1	B- und C-Bild-Darstellung, ALOK-Verfahren . . . . .	271
13.12.2	Das SAFT-, P-Scan- und SUTAR-Verfahren . . . . .	274
13.12.3	Gruppenstrahlungsverfahren, digitales B-Bild-Gerät nach Kino; Tomografie . . . . .	276
13.13	Ultraschallmikroskopie, SLAM- und SAM-Verfahren . . . . .	279
13.14	Die akustische Holografie . . . . .	280
13.14.1	Grundlagen . . . . .	280
13.14.2*	Das holografische Reliefverfahren . . . . .	283
13.14.3	Piezoelektrisches Abtasten nach Amplitude und Phase . . . . .	284
13.14.4	Numerische Rekonstruktion . . . . .	286
13.14.5	Die Linienholografie, das HOLOSAFT-Verfahren . . . . .	287
14	Die Schallemissionsanalyse (SEA) . . . . .	289
Teil C	Allgemeine Prüftechnik . . . . .	292
15	Die Ankopplung . . . . .	292
15.1	Oberflächenzustand und -vorbereitung . . . . .	292
15.2	Gekrümmte Oberflächen . . . . .	293
15.3	Kopplungsmittel . . . . .	296
15.4	Ankopplungskontrolle . . . . .	299
15.5	Ankopplung über Zwischenschichten, Wasserspaltankopplung und Tauchtechnik . . . . .	300
16	Störeinfluß von Grenzflächen, komplizierte Schallwege und Schirmbilder . . . . .	306
16.1	Schallfeldveränderungen durch Grenzflächen parallel zur Strahlachse . . . . .	306
16.2	Nebenechos durch abgespaltene Transversalwellen . . . . .	310
16.3	Dreieckreflexionen . . . . .	313
16.4	61°-Reflexion . . . . .	315
16.5	Schirmbilder bei Prüfung einer Platte . . . . .	317
16.6	Störanzeigen durch Oberflächenwellen . . . . .	321

17	Prüftechnik mit winklig zur Oberfläche eingeschallten Wellen	323
17.1	Winklig eingeschallte Longitudinalwellen . . . . .	323
17.2	Longitudinal-Kriechwellen . . . . .	325
17.3	Transversalwellen . . . . .	326
17.4	Oberflächenwellen . . . . .	333
17.5	Plattenwellen . . . . .	336
18	Störungen durch fremde Hochfrequenz- und Ultraschallwellen	338
19	Fehlernachweis und -beurteilung . . . . .	342
19.1	Fehlersuchen und Echozüchten, Prüfkopfwahl . . .	342
19.2	Bestimmung des Ersatzreflektors, Testfehler und AVG-Diagramm . . . . .	343
19.3	Ausmessen großer Reflektoren, Abtasten und Echodynamik . . . . .	349
19.4	Mehrfrequenzverfahren, Echophase und Spektroskopie . . . . .	356
20	Organisation der Prüfung, Personal- und Ausbildungsfragen	359
21	Prüfeinrichtungen und -anlagen . . . . .	364

*Teil D | Spezielle Prüfaufgaben* . . . . . 370

22	Werkstücke für den allgemeinen Maschinenbau . . . . .	371
22.1	Freiform-Schmiedestücke . . . . .	371
22.2	Wiederkehrende Prüfungen . . . . .	378
22.3	Mechanisierte Prüfeinrichtungen . . . . .	382
22.4	Sonstige Maschinenteile . . . . .	389
23	Eisenbahnmaterial . . . . .	398
23.1	Radsatzwellen . . . . .	398
23.2	Schienen . . . . .	403
23.3	Sonstiges Eisenbahnmaterial . . . . .	411
24	Bleche und Bänder . . . . .	415
24.1	Mittel- und Grobbleche . . . . .	415
24.2	Bänder und Feinbleche . . . . .	429
25	Halbzeug . . . . .	438
25.1	Stangen . . . . .	438
25.2	Knüppel . . . . .	442
25.3	Drähte . . . . .	446
26	Rohre . . . . .	447

27	Gußstücke . . . . .	463
28	Schweißnahtprüfung . . . . .	473
28.1	Stumpfschweißnähte . . . . .	473
28.1.1	Allgemeines zur Prüfmethode . . . . .	473
28.1.2	Blechdicke, Schallwinkel, Prüffrequenz . . . . .	477
28.1.3	Fehlerortungsverfahren . . . . .	479
28.1.4	Fehlergröße, -form und -art . . . . .	485
28.1.5	Mechanisierung und Registrierung . . . . .	487
28.1.6	Austenitische Schweißnähte . . . . .	494
28.1.7	Kunststoffschweißnähte . . . . .	500
28.2	Kehlnähte . . . . .	503
28.3	Punktschweißungen . . . . .	506
28.4	Andere Schweißnahtformen . . . . .	508
29	Prüfung von Verbindungen und Verbundwerkstoffen . . . . .	510
29.1	Nietlochprüfung . . . . .	510
29.2	Schichtverbindungen durch Löten, Kleben, Plattieren . . . . .	511
29.3	Schicht- und Verbundwerkstoffe . . . . .	516
29.4	Lagerschalenprüfung . . . . .	518
29.5	Schrumpfsitzprüfung . . . . .	519
30	Reaktorprüfung (Kernkraftwerke) . . . . .	522
30.1	Reaktordruckbehälter . . . . .	523
30.1.1	Druckwasserreaktor . . . . .	525
30.1.2	Siedewasserreaktor . . . . .	525
30.1.3	Zylindrischer Teil von Reaktordruck- behältern, kombiniertes Vielkopfsystem . . . . .	526
30.1.4	Stützenprüfung . . . . .	529
30.1.5	Bolzenlöcher und Muttern . . . . .	530
30.1.6	Bolzenprüfung . . . . .	531
30.1.7	Lochfeldprüfung . . . . .	531
30.2	Ultraschallelektronik für die Reaktorprüfung . . . . .	533
30.3	Rechnerauswertung . . . . .	536
30.4	Reflektoranalyse . . . . .	537
30.5	Andere Primärkreiskomponenten . . . . .	538
30.6	Reaktorprüfung in den USA . . . . .	538
30.7	Zuverlässigkeit der Prüfung . . . . .	539
30.8	Reaktorprüfung in Japan . . . . .	540
30.9	Reaktorprüfung in Großbritannien . . . . .	540
30.10	Reaktorprüfung in Frankreich . . . . .	541
30.11	Reaktorprüfung im RGW-Bereich . . . . .	541
30.12	Reaktorprüfung mit Schallemissionsanalyse (SEA) . . . . .	542
30.12	Ultraschallprüfung von Schnellbrutreaktoren . . . . .	542
31	Metallische Werkstoffe und ihre besonderen Eigenschaften für die Ultraschallprüfung . . . . .	543
31.1	Stähle . . . . .	543
31.2	Stahlguß . . . . .	544

31.3	Gußeisen . . . . .	545
31.4	Leichtmetalle . . . . .	552
31.5	Buntmetalle . . . . .	554
31.6	Andere Nichteisenmetalle . . . . .	556
31.7	Sintermetalle . . . . .	557
32	Prüfaufgaben bei nichtmetallischen Werkstoffen . . . . .	559
32.1	Keramik und Glas . . . . .	559
32.2	Kunststoffe . . . . .	562
32.3	Gummi . . . . .	564
32.4	Gestein, Schleifscheiben, Kohle und Graphit . . . . .	565
32.5	Beton . . . . .	567
32.6	Holz und Leder . . . . .	569
32.7	Speck und Fleisch . . . . .	570
33	Ultraschallprüfung durch Messung von Werkstückeigenschaften . . . . .	573
33.1	Wand- und Schichtdickenmessung . . . . .	573
33.2	Schallgeschwindigkeitsmessung . . . . .	579
33.3	Schallschwächungs- und Schallstreuungsmessung . . . . .	584
33.4*	Härteprüfung (Kleinlast) . . . . .	592
34	Normung . . . . .	597
	Anhang . . . . .	605
	Literaturverzeichnis . . . . .	621
	Sachverzeichnis . . . . .	700