

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> | 4 |
| 1 Schallwellen im freien Raum | 4 |
| 1. Schwingungen und Wellen | 4 |
| 1.2 Nichtebeine 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 Schallbündeln, 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 Vollzyindern | 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.

X Inhaltsverzeichnis

| | | |
|--|--|-----|
| 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 |
| <i>Teil B Verfahren und Geräte der Ultraschallwerkstoffprüfung</i> | 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 | Zusatzeräte 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 Impulsechogeräten 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 Impulsechoverfahren und ihre Hersteller | 235 |
| 10.7* | Frequenzmodulationsverfahren | 237 |
| 10.8* | Verfahren zur Anzeigenverbesserung eines Impulsechogeräts | 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 | Gruppenstrahlerverfahren, 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 |
| <i>Teil C Allgemeine Prüftechnik</i> | | 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 |
| <i>Teil D Spezielle Prüfaufgaben</i> | 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 Reaktordruckbehältern, kombiniertes Vielkopfsystem | 526 |
| 30.1.4 | Stutzenprüfung | 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 |