



Josef Krautkrämer  
Herbert Krautkrämer

# Werkstoffprüfung mit Ultraschall

Dritte neubearbeitete Auflage

unter Mitarbeit von

W. Grabendörfer · L. Niklas  
R. Frielinghaus · W. Kaule · W. Rath  
H. Schlemm · U. Schlengermann

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1975

Dr. rer. nat. Josef Krautkrämer  
Dr. rer. nat. Herbert Krautkrämer  
Firma Krautkrämer GmbH, Köln

Mitarbeiter

Dr. phil. Werner Grabendörfer  
Dr. phil. Ludwig Niklas  
Dr. Ing. Rainer Frielinghaus  
Dipl.-Ing. Walter Kaule  
Walter Rath  
Dr. rer. nat. Hans Schlemm  
Udo Schlengermann  
alle in Firma Krautkrämer GmbH, Köln

Mit 509 Abbildungen  
und 10 Tafeln im Text

ISBN 978-3-662-13425-2      ISBN 978-3-662-13424-5 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-13424-5

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme der Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Bei Vervielfältigungen für gewerbliche Zwecke ist gemäß § 54 UrhG eine Vergütung an den Verlag zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© by Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1961, 1966 and 1975

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1975

Softcover reprint of the hardcover 3rd edition 1975

Library of Congress Cataloging in Publication Data. Krautkrämer, Josef. Werkstoffprüfung mit Ultraschall. Bibliography: p. I. Ultrasonic testing. I. Krautkrämer, Herbert, joint author. II. Title. TA 417.4. K 7 1975 620.1'1274 74-18027.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buche 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.

**Dem Andenken unseres Vaters**

## Vorwort zur dritten Auflage

Um dem neuesten Stand der Technik gerecht zu werden, mußte die dritte Auflage an vielen Stellen ergänzt, an einigen ganz neu bearbeitet werden. Andere als piezoelektrische Verfahren wurden in Kap. 8 ausgiebig behandelt. Bei den Intensitätsverfahren wurde die Ultraschallholografie in einem eigenen Abschnitt 9.4 erwähnt. Aus Gründen der Systematik wurden Resonanzverfahren im Teil B unter Laufzeitverfahren eingeordnet. Es schien nötig, die Definition von Eigenschaften einer Impuls-Echo-Prüfausrüstung und ihre Messung wesentlich erweitert darzustellen (10.4). Die neueren Gebiete der Impulsspektroskopie (5.6) und der Schallemissionsanalyse (12.) konnten nur sehr kurz Erwähnung finden, da ihre Bedeutung noch umstritten ist. Im Teil C wurden außer vielen Ergänzungen, insbesondere über automatische Prüfanlagen, ein neuer Abschnitt über das Gebiet der Kernreaktorprüfung (28.) eingeschoben, ferner ein kurzer Bericht über Oberflächenhärtemessung (32.4). Eine kritische Behandlung aller wichtigeren Normen in Kap. 33 erschien unmöglich. Sie wurden z. T. bei den wichtigsten Sachgebieten (z. B. für Schweißnahtprüfung in Kap. 26) erwähnt, im übrigen aber in Kap. 33 nur tabellarisch aufgeführt.

Bei der zunehmenden Fülle des Schrifttums war die Auswahl nicht immer leicht, so daß wir Autoren, die ihre Arbeiten vermissen, um Verständnis bitten müssen. Denn trotz aller Kürzungen und Streichungen ist der Umfang des Buches leider wieder gewachsen

Dem Verlag sei für sein Verständnis für diese Tatsache sowie seine wie gewohnt sorgfältige Bearbeitung und Ausstattung herzlich gedankt. Die Erstautoren danken auch den neu hinzugekommenen Bearbeitern einzelner Abschnitte sowie den vielen ungenannten Quellen von Beiträgen.

Köln, im März 1975

J. und H. Krautkrämer

# Inhaltsverzeichnis\*

<i>Teil A</i>   <i>Physikalische Grundlagen der Ultraschallwerkstoffprüfung</i>	1
1. Wellen . . . . .	1
1.1 Schwingungen und Wellen . . . . .	1
1.2 Wellenarten und Wellenformen . . . . .	4
1.3 Zusammengesetzte und stehende Wellen. Interferenz . . . . .	9
1.4 Einige Formeln und Zahlenwerte . . . . .	13
2. Ebene Schallwellen an Grenzflächen . . . . .	19
2.1 Senkrechter Einfall auf einfache, ebene Grenzflächen . . . . .	19
2.2 Senkrechter Einfall auf mehrfache Grenzflächen. Platte und Spalt . . . . .	22
2.3 Das Brechungsgesetz . . . . .	27
2.4 Die Schalldruckwerte an Grenzflächen . . . . .	28
2.5 Reflexion in einer rechtwinkligen Kante und in einer Ecke . . . . .	37
2.6 Abspaltung von Oberflächen- und Grenzschichtwellen . . . . .	39
2.7 Schallausbreitung in Platten. Plattenwellen . . . . .	39
3. Geometrische Ultraschalloptik . . . . .	42
3.1 Gültigkeitsgrenzen . . . . .	42
3.2 Abstandsgesetz des Schalldrucks für die Kugel- und Zylinderwelle . . . . .	43
3.3* Reflexion und Brechung von Kugelwellen an ebenen Flächen . . . . .	44
3.4* Gekrümmte Grenzflächen als Hohlspiegel und Linsen . . . . .	47
3.5* Kugelwellen im Hohl- und Vollzylinder . . . . .	53
4. Wellenphysikalische Behandlung des Schallfelds, der Schallstrahl . . . . .	58
4.1 Elementare Beschreibung . . . . .	58
4.1.1 Ebene Schwinger . . . . .	58
4.1.2* Fokussierende Schwinger . . . . .	71
4.2* Zonenkonstruktion des Schallfelds . . . . .	76

---

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

4.3 Schallfeld bei ungleichförmiger Erregung des Schwingers und bei Impulsanregung . . . . .	82
5. Echo und Schatten eines Hindernisses im Schallfeld . . . . .	86
5.1 Echo eines ebenen Reflektors senkrecht zur Schallstrahlachse eines Kolbenschwingers (AVG-Diagramm) . . . . .	86
5.2 Schatten eines Kreisscheibenfehlers senkrecht zur akustischen Achse . . . . .	92
5.3 Schrägliegende Fehler. Reflexion durch Randwellen . . . . .	94
5.4 Andere Reflektoren . . . . .	97
5.5 Natürliche Reflektoren. Rauigkeit . . . . .	98
5.6* Einfluß des Reflektors auf die Frequenzverteilung des Impulses . . . . .	101
6. Die Schwächung von Ultraschallwellen in festen Stoffen . . . . .	103
6.1 Absorption und Streuung . . . . .	103
6.2* Die Schwächung in Metallen, Anisotropie und Gußstruktur . . . . .	109
7. Piezoelektrische Verfahren zur Erzeugung und zum Empfang von Ultraschallwellen . . . . .	115
7.1 Der piezoelektrische Effekt . . . . .	115
7.2 Die piezoelektrische Platte als Sender und Empfänger für Ultraschallwellen . . . . .	120
7.3* Der piezoelektrische Wandler bei Impulsanregung . . . . .	128
7.4 Piezoelektrische Stoffe . . . . .	138
8.* Andere Verfahren zum Senden und Empfangen von Ultraschall . . . . .	146
8.1* Mechanische Effekte . . . . .	147
8.2* Thermische Effekte . . . . .	148
8.3* Elektrostatische Verfahren . . . . .	151
8.4* Verfahren, die auf nichtmagnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes beruhen . . . . .	152
8.5* Elektrodynamische Verfahren . . . . .	153
8.6* Magnetostriktive Verfahren . . . . .	158
8.7* Optische Verfahren . . . . .	162
<i>Teil B   Verfahren und Geräte der Ultraschallwerkstoffprüfung . . . . .</i>	
9. Intensitätsverfahren . . . . .	172
9.1 Prinzip, Einteilung und Abgrenzung gegenüber den Laufzeitverfahren . . . . .	172
9.2 Geräte für Intensitätsmessung . . . . .	177
9.3 Geräte für Schallsichtverfahren . . . . .	180
9.4* Ultraschall-Holografie . . . . .	183

10. Impuls-Echo-Verfahren . . . . .	191
10.1 Geschichtliches und Grundlagen . . . . .	191
10.2 Aufbau und Wirkungsweise eines Impuls-Echo-Gerätes . . . . .	195
10.2.1 Kippspannungsteil mit Bildröhre . . . . .	195
10.2.2 Senderteil . . . . .	200
10.2.3 Der Verstärker . . . . .	204
10.2.4 Abstandsskala und Zeitmarken . . . . .	213
10.2.5 Störschutz . . . . .	217
10.3 Die Prüfköpfe . . . . .	217
10.3.1 Normalprüfköpfe . . . . .	217
10.3.2 Winkelprüfköpfe . . . . .	228
10.4 Eigenschaften von Impuls-Echo-Geräten und Prüfköpfen . . . . .	235
10.4.1 Eigenschaften des Bildteils . . . . .	236
10.4.2 Eigenschaften des Verstärkers . . . . .	236
10.4.3 Eigenschaften des Schallfelds . . . . .	241
10.4.4 Der Entfernungsabgleich . . . . .	243
10.5 Geräte für das Impuls-Echo-Verfahren . . . . .	245
10.6 Verfahren und Zusatzgeräte zur elektronischen Daten- verarbeitung . . . . .	247
10.7 Verfahren und Zusatzgeräte zur Dokumentation . . . . .	252
10.8* Frequenzmodulationsverfahren . . . . .	263
11. Laufzeitverfahren . . . . .	265
11.1 Laufzeitverfahren mit Dauerschall (Resonanzverfahren). Grundlagen und Geräte . . . . .	265
11.2 Laufzeitverfahren mit Impulsen . . . . .	270
11.2.1 Vergleichsverfahren. Interferometer . . . . .	270
11.2.2 Frequenzmeßverfahren . . . . .	272
11.2.3 Elektronische Laufzeitmessung . . . . .	279
11.2.4* Phasenmeßverfahren . . . . .	286
12.* Schallemissionsanalyse . . . . .	287
<i>Teil C   Allgemeine Prüftechnik . . . . .</i>	<i>289</i>
13. Ankopplung. Wahl von Prüfkopf und Frequenz . . . . .	289
13.1 Oberflächenzustand und -vorbereitung . . . . .	289
13.2 Gekrümmte Oberflächen . . . . .	291
13.3 Kopplungsmittel . . . . .	293
13.4 Ankopplungskontrolle . . . . .	297
13.5 Ankopplung über Zwischenschichten . . . . .	298
13.6 Ultraschallfrequenz und Prüfkopffart . . . . .	304
14. Störeinfluß von Grenzflächen. Komplizierte Schallwege und Schirmbilder . . . . .	307
14.1 Schallfeldveränderungen durch Grenzflächen parallel zur Strahlachse . . . . .	307



14.2	Nebenechos durch abgespaltene Transversalwellen . . .	311
14.3	Dreieckreflexionen . . . . .	314
14.4	61°-Reflexion . . . . .	316
14.5	Schirmbilder bei Prüfung einer Platte . . . . .	318
14.6	Störechos durch Oberflächenwellen . . . . .	324
15.	Prüftechnik mit Transversal-, Oberflächen- und Plattenwellen	326
15.1	Transversalwellen . . . . .	326
15.2	Oberflächenwellen . . . . .	332
15.3	Plattenwellen . . . . .	336
16.	Form- und Größenbestimmung von Fehlstellen . . . . .	338
17.	Störungen durch fremde Hochfrequenz- und Ultraschall- quellen . . . . .	344
18.	Organisation der Prüfung, Personal- und Ausbildungsfragen	348
19.	Prüfanlagen und Auswertung der Prüfergebnisse . . . . .	353
<i>Teil D   Spezielle Prüfaufgaben</i> . . . . .		357
20.	Bearbeitete Prüfstücke aus Metall in Einzelbeispielen . . .	357
20.1	Schwere Schmiedestücke . . . . .	357
20.2	Bearbeitete Maschinenteile . . . . .	372
21.	Eisenbahnmaterial . . . . .	382
21.1	Achswellen . . . . .	382
21.2	Schienen . . . . .	389
21.3	Sonstiges Eisenbahnmaterial . . . . .	398
22.	Bleche und Bänder . . . . .	401
22.1	Mittel- und Grobbleche . . . . .	401
22.2	Bänder und Feinbleche . . . . .	416
23.	Halbzeug . . . . .	430
23.1	Stangen . . . . .	430
23.2	Knüppel . . . . .	438
23.3	Drähte . . . . .	441
24.	Rohre . . . . .	442
25.	Gußstücke . . . . .	462

26. Schweißverbindungen . . . . .	470
26.1 Stumpfschweißnähte . . . . .	470
26.1.1 Allgemeines zur Prüfmethode . . . . .	470
26.1.2 Blechdicke, Schallwinkel und Prüffrequenz . . . . .	475
26.1.3 Fehlerortungsverfahren . . . . .	478
26.1.4 Fehlerart, -form und -größe . . . . .	487
26.1.5 Registrierung und Automatisierung . . . . .	490
26.2 Kehlnähte . . . . .	500
26.3 Punktschweißungen . . . . .	505
26.4 Andere Schweißnahtformen . . . . .	506
27. Niet-, Klebe- und Schrumpfverbindungen . . . . .	510
27.1 Nietlochprüfung . . . . .	510
27.2 Schichtverbindungen durch Löten, Kleben, Plattieren . . . . .	512
27.3 Schrumpfsitze . . . . .	521
28. Kernreaktoren . . . . .	523
29. Metallische Werkstoffe und ihre besonderen Prüfaufgaben . . . . .	531
29.1 Stähle . . . . .	531
29.2 Stahlguß . . . . .	533
29.3 Gußeisen . . . . .	534
29.4 Leichtmetalle . . . . .	541
29.5 Buntmetalle . . . . .	544
29.6 Andere Nichteisenmetalle . . . . .	546
29.7 Sintermetalle . . . . .	547
30. Prüfaufgaben bei nichtmetallischen Prüfstücken . . . . .	549
30.1 Keramik und Glas . . . . .	549
30.2 Kunststoffe . . . . .	554
30.3 Gummi . . . . .	558
30.4 Gestein, Schleifscheiben und Kohle . . . . .	559
30.5 Beton . . . . .	562
30.6 Holz und Leder . . . . .	567
30.7 Speck und Fleisch . . . . .	569
31. Lage-, Form- und Füllstandsbestimmung . . . . .	574
32. Meßverfahren mit Ultraschall . . . . .	578
32.1 Wand- und Schichtdickenmessung . . . . .	578
32.2 Schallgeschwindigkeitsmessung . . . . .	584
32.3 Schallschwächungs- und Schallstreuungsmessungen . . . . .	592
32.4 Oberflächenhärtemessung . . . . .	600
33. Normung . . . . .	603
Anhang . . . . .	609
Literaturverzeichnis . . . . .	623
Sachverzeichnis . . . . .	659

## Einleitung

Die Lehre vom Schall, die Akustik, beschreibt die Vorgänge der mechanischen Schwingungen und ihre Ausbreitung in festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffen. Im leeren Raum gibt es keinen Schall, weil es die Materieteilchen selbst sind, welche schwingen, im Gegensatz etwa zu den Lichtschwingungen oder Hochfrequenzschwingungen, bei denen der elektrische und magnetische Zustand des Raumes an sich schwingt. Durch eine Schallwelle in Luft wird ein kleines Luftvolumen aus seiner Ruhelage heraus hin- und herbewegt, während eine Lichtwelle keinen Einfluß auf seinen Zustand der Ruhe oder Bewegung hat.

Unterscheidet man solche mechanischen Bewegungen in Materie, die wenigstens eine Zeitlang regelmäßig wiederkehren, also periodisch sind, durch die Anzahl der Perioden in der Sekunde voneinander, so können wir einen Bereich abgrenzen, in dem sich unser Ohr zum Nachweis eignet: Wir hören den Schall, wenn er durch die Luft oder unseren Körper an unser Ohr gelangt. Dazu darf seine Frequenz weder zu tief noch zu hoch sein: Unter etwa 10 Hz (Hertz, d.h. Schwingungen je Sekunde) hören wir keinen Ton, auch nicht mehr über etwa 15000 bis 20000 Hz. (Das erstere ist allerdings nur dann richtig, wenn es sich um eine sinusförmige Schwingung handelt. Andere Formen zerlegt das Ohr in Obertöne, wodurch die Schwingung als Ton- oder Knallfolge hörbar wird.)

Ähnlich wie man im Bereich der Lichtwellen die unserem Auge nicht mehr wahrnehmbaren, höheren Frequenzen als *Ultra-Violett* bezeichnet, hat man die Schallwellen über 20000 Hz als *Ultraschall* abgegrenzt. Entsprechend dem *Infrarot* hat man auch für die Schallfrequenzen unter 10 Hz den Namen *Infraschall* vorgeschlagen. Die Einteilung ist willkürlich an das menschliche Ohr gebunden. Andere Nachweis- und Erzeugungsmethoden haben völlig andere Grenzen.

Ultraschallwellen treten in der Natur und im täglichen Leben recht häufig und mitunter auch mit solchen Intensitäten auf, daß wir von Glück sagen können, wenn unser Ohr durch sie nicht auch noch belästigt wird, z. B. bei Dampfpfeifen. Eine rotierende Schleifscheibe erzeugt beim Bearbeiten von Werkstücken außer dem hörbaren Geräusch intensive Ultraschallwellen, sogar noch im Bereich der hohen Frequenzen, die man

für die Werkstoffprüfung benutzt, nämlich über 100 000 Hz (100 kHz, Kilohertz) bis 10 000 000 Hz (10 MHz, Megahertz).

Die zahlreichen Anwendungen von Schall- und Ultraschallwellen in der Technik teilt man in zwei Gruppen ein: Ähnlich wie in der Medizin die Röntgenbestrahlung zu zwei ganz verschiedenen Zwecken dient, nämlich therapeutisch zur Wirkung auf das durchstrahlte Gewebe (Krebsbestrahlung) und diagnostisch zur Untersuchung des Zustands (Lungendurchleuchtung), wird auch der Schall einmal zur Wirkung auf einen bestimmten Stoff und zweitens zum Nachweis eines Zustands benutzt. Im ersten Fall dient die Energie der Schallwelle z. B. zum Herausschleudern von Schmutzteilchen aus den Gewebefasern beim Waschen, zum Ablösen von Fremdteilchen von einer Oberfläche beim Reinigen, zum Ablösen von Stoffteilchen beim Bohren, zum Überwinden der Oberflächenspannung beim Emulgieren, zum Durchmischen und vielen weiteren Anwendungen der mechanischen Energie. Das ist seine *energetische* Anwendung. In anderen Fällen ist die Energie der Schallwelle nur soweit vonnöten, wie sie zur Übertragung eines genügend deutlichen Signals dient, z. B. bei einer Lautsprecherübertragung, zur Schiffsortung in der See, zum Loten der Meerestiefe, zur Ortung von Fischschwärmen und zur Prüfung von Werkstoffen auf ihren Zustand, z. B. auf mechanische Fehler, auf ihre Dicke, auf ihre elastischen Konstanten und ihren metallurgischen Zustand. Das ist die *diagnostische* Anwendung, von der in diesem Buch die Werkstoffprüfung behandelt wird.

Zur Feststellung von mechanischen Eigenschaften eines Stoffs ist eine mechanische Methode die direkte und naheliegende. Um einen Riß in einer Achse festzustellen, kann man sie so weit auf Zug oder Biegung beanspruchen, daß der Riß sich durch einen Bruch kundtut. Das ist ein mechanisches, aber leider zerstörendes Prüfverfahren. Schall und Ultraschall liefern dafür zerstörungsfreie Verfahren, im Grunde auch mit mechanischer Beanspruchung unter Druck- und Zugkräften, Scher- oder Biegekräften, aber von so geringen Größen, wie sie in den verschiedenen Wellenarten benutzt werden. Damit sei nicht gesagt, daß etwa ein indirektes Prüfverfahren, z. B. ein magnetisches, durch Nachweis der am Riß auftretenden Kraftlinien, nicht u. U. besser geeignet wäre, wenn der Zusammenhang zwischen der mechanischen Eigenschaft des Prüflings und dem jeweiligen physikalischen Mittel, wie Magnetismus, Elektrizität, Strahlung usw., eindeutig ist.

Wenn man von der Einschränkung *Ultra* absieht, hat der Schall bereits seit langem Verwendung zur Werkstoff-, genauer zur Werkstückprüfung gefunden: Man kann grobe innere Fehler in Schmiede- und Gußstücken leicht am veränderten Klang beim Anschlagen mit dem Hammer finden, eine auch heute noch benutzte Methode. Jede Hausfrau weiß, daß man eine Tasse durch Anschlagen auf einen Sprung prüft. Daher darf

wohl mit Recht behauptet werden, daß die Schallprüfung eines der ältesten zerstörungsfreien Prüfverfahren auf nicht direkt sichtbare Fehler ist, weil sich sicher schon die Erfinder der Keramik seiner bedient haben werden. Durch die Mittel der modernen Elektronik ist es zugleich eines der jüngsten und vielseitigsten Verfahren geworden.

Der Übergang vom Hörschall zum Ultraschall wurde durch die neuen elektrischen Erzeugungs- und Empfangsmethoden möglich, die den Hammer und das Ohr ersetzen. Während die von einem Hammerschlag angeregte Eigenschwingung eines Stücks nur sehr wenig vom Hammer, aber weitgehend von der Form des Stücks und der Anschlagstelle abhängt (Glocke), kann man mit elektrischen Schallerzeugern die Frequenz vorgeben. Bei höheren Frequenzen wird die Wellenlänge einer Schwingung im umgekehrten Verhältnis kleiner, schließlich sogar sehr klein gegenüber den Abmessungen unserer Prüflinge. Dann kann man diese Wellen gebündelt, ungestört durch Form und Abmessungen des Stücks in dieses hineinstrahlen wie Licht mit einem Scheinwerfer. Das Stück wird auf diese Weise *durchschallt*, wie es bereits im Sprachgebrauch heißt.

Auf diese Weise hat zuerst SOKOLOV 1929 Werkstücke durchschallt und darin Materialfehler festgestellt, die sich durch eine Abnahme der durchgelassenen Schallstärke im Vergleich zu einer fehlerfreien Stelle anzeigten. Im Jahr 1942 übertrug FIRESTONE als erster das aus der Schiffs-ortung und der Meerestiefenlotung bekannte Echolot auf die Werkstoffprüfung. Nach 1945 hat das Verfahren den Schritt in die Praxis getan, begünstigt durch den immer dringenderen Bedarf an zerstörungsfreien Prüfverfahren.