



Karlheinz Schiebold

# Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung – Ultraschallprüfung

---

# Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung – Ultraschallprüfung

---

Karlheinz Schiebold

# Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung – Ultraschallprüfung

1. Auflage  
mit 441 Bildern und 100 Tabellen

 Springer Vieweg

*Autor*

Prof. Dr.-Ing. **Karlheinz Schiebold**

Vormals Gründer und Gesellschafter der  
LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH, Mülheim an der Ruhr,  
LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH, Magdeburg,  
LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH, Bremen,  
LVQ-WP Prüflabor GmbH, Magdeburg,  
LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH & Co.KG, Magdeburg.

ISBN 978-3-662-44699-7

ISBN 978-3-662-44700-0 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-44700-0

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)



Dem Andenken meines Vaters  
**Prof. Dr.-phil. ERNST SCHIEBOLD**  
(1894 – 1963)  
In dankbarer Verehrung gewidmet  
Karlheinz Schiebold

---

## Vorwort

Abgesehen davon, dass die Klassiker unter den Ultraschall-Lehrbüchern von J. und H. Krautkrämer [1.1] und von V. Deutsch [1.2] bereits vor über 50 bzw. 40 Jahren verfasst worden sind und sich in der Zwischenzeit mit der Computertechnik und der Elektronik viele neue Anwendungsgebiete und Techniken erschlossen haben, erscheint es dem Autor doch zweckmäßig, die Ultraschallprüfung in einem Lehr- und Arbeitsbuch in komplexer Form darzustellen.

Das Buch soll insbesondere seinem Vater, Prof. Dr.-phil. Ernst Schiebold gewidmet sein, einem Pionier der Zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, dessen Aktivitäten zur Entwicklung der Werkstofftechnik Anfang der 30er Jahre des 20. Jahrhunderts erstmals an die Öffentlichkeit kamen und der aus seiner Zeit in der damaligen Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft auch zur Entstehung der Gesellschaft zur Förderung Zerstörungsfreier Prüfverfahren und damit zur Gründung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) beigetragen hat. Später war er als Direktor des Amtes für Material- und Warenprüfung (DAMW) in Magdeburg tätig. In dieser Funktion führte er die ersten Ultraschallkurse in der DDR ein, die danach von Prof. Dr. Hans-Ulrich Richter mit großem Erfolg fortgesetzt wurden und in denen K. Schiebold 20 Jahre lang mitgewirkt hat.

Von 1953 bis 1963 hat Prof. Ernst Schiebold als ord. Professor und Direktor des Instituts für Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung an der Technischen Hochschule Magdeburg (heute Otto-von-Guericke Universität) in kurzer Zeit eine über die Landesgrenzen hinaus bekannte wissenschaftliche Schule mit dem Schwerpunkt Zerstörungsfreie Prüfung aufgebaut. Aus ihr ging auch sein Sohn Karlheinz hervor, der 1963 sein Studium der Werkstoffprüfung abgeschlossen hat. Da zum damaligen Zeitpunkt keine Planstelle am Institut frei war, ging er in die Industrie und begann sein erstes Arbeitsleben im damaligen VEB Schwermaschinenbau Kombinat Ernst Thälmann Magdeburg (später SKET SMS GmbH), wo er in der komplexen Werkstoffprüfung über 28 Jahre tätig war.

Dort begann seine Laufbahn als Gruppenleiter in der Ultraschalltechnik und später als Abteilungsleiter erhielt er die Zuständigkeit für die gesamte Zerstörungsfreie (ZfP) und Zerstörende (ZP) Werkstoffprüfung. Aufgrund der im SKET doch außerordentlich umfassend vorhandenen Metallurgie mit einem zwei Stahlwerken, drei Eisengiessereien, zwei Stahlgiessereien, einer Großschmiede, zwei Stahlbaubetrieben und zahlreichen Maschinenbaubetrieben war ein umfangreiches Betätigungsfeld gegeben. Die Ultraschallprüfung

gewann über die Jahre eine immer größere Bedeutung für die Untersuchung metallurgischer Produkte und vermittelte für ihn dadurch unschätzbare Erfahrungswerte. Schiebold war insgesamt 25 Jahre mit seinen Prüfern in den Betrieben unterwegs und bearbeitete zudem Forschungs- und Entwicklungsthemen für die Metallurgie in Größenordnungen.

Aus diesen Erfahrungswerten konnte er nach der Wende in seinem zweiten Arbeitsleben im aus der Lehr- und Versuchsgesellschaft für Qualität in Mülheim ausgegründeten eigenen Unternehmen LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH und im Magdeburger von der Treuhand erworbenen Unternehmen LVQ-WP Prüflabor GmbH auch schöpfen und manchmal unter großem Zeitdruck Unterrichtsmaterialien, wie Skripte, Übungen, Wissensteste und teilweise auch Prüfungen schreiben. Durch die Anerkennung der erstgenannten Firma als Ausbildungsstätte der DGZfP sind solche Unterlagen in der ZfP in sechs Prüfverfahren und 3 Qualifikationsstufen entstanden und in der ZP in 9 Prüfverfahren über fast zwanzig Jahre erfolgreich zur Weiterbildung von Werkstoffprüfern verwendet worden. Das so verfasste Skript der Stufe 3 nach DIN EN 473 und jetzt nach DIN EN ISO 9712 zur Ultraschallprüfung, ergänzt durch ausgewählte Inhalte von Beiträgen auf den Jahrestagungen der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, bilden eine wesentliche Grundlage für dieses Buch, das somit auch eine willkommene Hilfe bei der Ausbildung von Werkstoffprüfern der Stufen 2 und 3 auf dem Gebiet der Ultraschallprüfung sein kann.

Leider ist es in einem solchen Fachbuch nicht möglich, sämtliche Techniken und Anwendungen der Ultraschallprüfung zu beschreiben. So wird die Schallemissionstechnik aufgrund ihrer Spezifik nicht ausführlich dargestellt und ebenso wird auf theoretische Ableitungen, mathematische Methoden, Modellierungen und bruchmechanische Bewertungen verzichtet. Die Ultraschallprüfung im Bauwesen und im Eisenbahnwesen ist nach Ansicht des Autors für sich ein Fachbuch wert. Analoge Überlegungen gelten für die Beschreibung von speziellen Festigkeitsuntersuchungen mit Ultraschall, wie z. B. die Einhärtetiefenmessung oder die Untersuchung an faserverstärkten Kunststoffen, Verbundwerkstoffen, spezieller Keramik und Nichteisenmetallen.

Allen am Entstehen des Buches Beteiligten sei an dieser Stelle gedankt. Besonderer Dank gilt meiner lieben Frau Angelika, meinem Freund Prof. Dr.-Ing. Volker Deutsch und meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Winfried Morgner sowie natürlich auch allen Firmen und Personen, von denen ich bei der Vorbereitung und Ausgestaltung dieses Buches Unterstützung erhielt, und insbesondere den Sponsoren, die zum Entstehen und Gelingen des Werkes beigetragen haben.

Dem Springer-Verlag danke ich für die bei der Herausgabe des Buches stets gute Zusammenarbeit.

Mülheim an der Ruhr, Sommer 2014

Prof. Dr.-Ing. Karlheinz Schiebold



### **Benutzungshinweise**

Bilder, Tabellen, Gleichungen und Literaturzitate werden jeweils *innerhalb eines Kapitels* (mit Einer-Nummerierung) fortlaufend gezählt, z.B. Bild 3.10 = 10. Bild im Kapitel 3 (Justierung im Ultraschall-Prüfverfahren); [2.5] = Literaturzitat zu Kapitel 2 (Ultraschallprüfsysteme) im Literaturverzeichnis am Ende eines Kapitels.

In diesem Buch werden die *Maßeinheiten* des Internationalen Einheitensystems (SI) einschließlich der daraus abgeleiteten dezimalen Vielfachen und Teile wie Milli, Mega usw. verwendet.





2.1.1.1	Blockschaltbild .....	35
2.1.1.2	Baustufen des US-Gerätes .....	36
2.1.2	Digitalgeräte .....	39
2.1.2.1	Blockschaltbild .....	39
2.1.2.2	Mikroprozessor und Auswertung der Signale .....	39
2.1.3	Allgemeine Einstellungen am Ultraschallgerät nach DIN EN 583-1 .....	39
2.1.4	Generelle Anwendung von digitalen Ultraschallgeräten .....	40
2.2	Prüfköpfe .....	40
2.2.1	Schallfelder .....	40
2.2.1.1	Nahfeld und Fernfeld .....	41
2.2.1.2	Divergenz und Bündeldurchmesser .....	43
2.2.1.3	Schallfeld und Prüfkopfeigenschaften nach DIN EN 583-1 .....	44
2.2.2	Senkrechtprüfköpfe .....	47
2.2.2.1	Normalprüfköpfe .....	47
2.2.2.2	Sende-Empfangs-Prüfköpfe .....	48
2.2.3	Winkelprüfköpfe .....	51
2.2.4	Sonderprüfköpfe .....	53
2.2.4.1	Tauchtechnikprüfköpfe .....	53
2.2.4.2	Fokusprüfköpfe .....	54
2.2.4.3	SEL-und SEK-Prüfköpfe .....	55
2.2.4.4	Oberflächenwellen-Prüfköpfe .....	57
2.2.4.5	Rohrprüfköpfe .....	58
2.2.4.6	Hochtemperaturprüfköpfe .....	59
2.2.4.7	Prüfköpfe zur Trockenankopplung .....	61
2.3	Charakterisierung und Verifizierung der Ultraschallprüfausrüstung .....	61
2.3.1	Ultraschallprüfgerät nach DIN EN 583-1 und DIN EN 12668-1 .....	61
2.3.1.1	Gerätekontrolle nach DIN EN 12668-3 .....	62
2.3.1.1.1	Linearität der Zeitachse .....	62
2.3.1.1.2	Linearität der Verstärkung .....	62
2.3.1.2	Gerätekontrolle nach ASME-Code, Sect. V, Artikel 4 .....	63
2.3.1.2.1	Gerätegrundeinstellung .....	63
2.3.1.2.2	Linearität der Amplitudenregelung .....	63
2.3.1.2.3	Linearität der Bildschirmhöhe .....	63
2.3.1.2.4	Simulatorkontrolle .....	64
2.3.2	Ultraschallprüfköpfe nach DIN EN 583-1 und 12668-2 .....	64
2.3.2.1	Ultraschallprüfkopfkalibrierung nach DIN EN 12668-3 .....	64
2.3.2.1.1	Kontrolle des Schallaustrittspunktes .....	64
2.3.2.1.2	Kontrolle des Einschallwinkels .....	65
2.3.3	Ultraschallprüfkopfkalibrierung nach ASME-Code, Sect. V, Artikel 4 .....	65
2.3.4	Gesamtverifizierung des Prüfsystems nach DIN EN 12668-3 .....	67
2.3.4.1	Äußeres Erscheinungsbild .....	67

2.3.4.2	Prüfempfindlichkeit und Signal-Rausch-Abstand	67
2.3.4.3	Impulsdauer	68
2.3.5	Protokollierung der Kalibrierergebnisse	68
<b>3</b>	<b>Justierung</b>	<b>71</b>
3.1	Justierung mit analogen Ultraschallgeräten	71
3.1.1	Entfernungsjustierung	71
3.1.1.1	Senkrechteinschallung	71
3.1.1.1.1	Normalprüfköpfe	71
3.1.1.1.2	Sende-Empfangs-Prüfköpfe	73
3.1.1.2	Schrägeinschallung	75
3.1.1.2.1	Schallwegjustierung	77
3.1.1.2.2	Justierung im Projektionsabstand	78
3.1.1.2.3	Schallbündelversatz	82
3.1.1.3	Justierung anderer Werkstoffe als Stahl	82
3.1.2	Empfindlichkeitsjustierung	85
3.1.2.1	Echohöhenbewertung	85
3.1.2.2	Logarithmischer Maßstab	85
3.1.2.3	Empfindlichkeitseinstellung	87
3.2	Justierung mit digitalen Ultraschallgeräten	87
3.2.1	Bedienkonzepte	88
3.2.2	Funktionsgruppen	91
3.2.3	Justierung der Entfernungsanzeige	91
3.2.4	Justierung der Empfindlichkeit	96
3.3	Koordinatenfestlegung	96
3.3.1	Festlegung eines Bezugssystems	96
3.3.2	Einschallposition und Einschallwinkel	97
3.3.3	Reflektorlagenbestimmung bei der Senkrechteinschallung	97
3.3.4	Reflektorlagenbestimmung bei der Schrägeinschallung	99
3.3.4.1	Das Fehlerdreieck	99
3.3.4.2	Vorgehensweise für die Koordinatenfestlegung	100
3.3.4.2.1	Festlegung der Längskoordinate	101
3.3.4.2.2	Festlegung der Tiefenkoordinate	101
3.3.4.2.3	Festlegung der Querkoordinate	102
<b>4</b>	<b>Justier- und Vergleichsreflektoren</b>	<b>105</b>
4.1	Begriffsbestimmung	105
4.2	Vorbemerkung	105
4.3	Justierreflektoren	106
4.3.1	Auswahl und Anforderungen	106
4.3.2	Typische Justierreflektoren	106
4.3.2.1	Rückwand	106

4.3.2.2	Kreisbogen .....	107
4.3.2.3	Flachbodenbohrung .....	107
4.3.2.4	Querbohrung .....	108
4.3.2.5	Nut .....	109
4.3.3	Anwendung von Justierreflektoren .....	110
4.4	Typische Justier- und Vergleichskörper .....	111
4.5	Abstands- und Größengesetze für verschiedene Reflektoren .....	120
4.5.1	Abstandsgesetze .....	120
4.5.1.1	Rückwand .....	120
4.5.1.2	Kreisscheibe .....	120
4.5.1.3	Querbohrung .....	121
4.5.1.4	Weitere Vergleichsreflektoren .....	122
4.5.2	Größengesetze .....	123
4.5.2.1	Kreisscheibe .....	123
4.5.2.2	Querbohrung .....	123
4.5.2.3	Kugel .....	123
4.6	Größenbestimmung von Inhomogenitäten nach DIN EN 583-5 .....	126
4.6.1	Beschreibung von Inhomogenitäten .....	126
4.6.1.1	Ortung von Inhomogenitäten .....	126
4.6.1.2	Orientierung von Inhomogenitäten .....	126
4.6.1.3	Beurteilung von Mehrfachanzeigen .....	126
4.6.1.4	Formen von Inhomogenitäten .....	127
4.6.1.5	Maximale Echohöhe von Inhomogenitäten .....	127
4.6.2	Größe von Inhomogenitäten .....	127
4.6.2.1	Techniken mit maximaler Echohöhe .....	127
4.6.2.2	Techniken mit Prüfkopfbewegung .....	128
4.6.2.3	Techniken mit Schallbündelfokussierung .....	129
4.6.2.4	Anwendung mathematischer Algorithmen .....	129
4.6.2.5	Zusatztechniken zur Größenbestimmung .....	129
<b>5</b>	<b>Anzeigenbewertung I (Vergleichskörpermethode)</b> .....	<b>131</b>
5.1	Vergleichskörpermethode .....	133
5.1.1	Direkter Echohöhenvergleich .....	134
5.1.2	Vergleichshöhenverfahren .....	135
5.1.3	Vergleichslinienverfahren .....	135
5.1.4	Anwendung der Vergleichskörpermethode .....	137
5.2	Abtastverfahren .....	137
<b>6</b>	<b>Anzeigenbewertung II (AVG-Methode)</b> .....	<b>143</b>
6.1	Allgemeines AVG-Diagramm .....	143
6.2	Spezielles AVG-Diagramm .....	145
6.2.1	Bezugshöhenverfahren .....	146

---

6.2.1.1	Allgemeines	146
6.2.1.2	Vorgehensweise	146
6.2.1.3	Entfernungsjustierung	147
6.2.1.4	Empfindlichkeitsjustierung	147
6.2.1.5	Anzeigenbewertung	148
6.2.2	Bezugslinienverfahren	149
6.2.2.1	Allgemeines	149
6.2.2.2	Vorgehensweise	150
6.2.2.3	Entfernungsjustierung	150
6.2.2.4	Empfindlichkeitsjustierung	151
6.2.2.5	Anzeigenbewertung	153
6.2.3	Transferkorrektur bei Senkrechtprüfköpfen	153
6.2.4	Transferkorrektur bei Winkelprüfköpfen	153
6.2.5	Schallschwächungskorrektur bei Senkrechtprüfköpfen	155
6.2.6	Schallschwächungskorrektur bei Winkelprüfköpfen	156
6.2.6.1	Pauschal durch eine Transferkorrektur	156
6.2.6.2	Wegabhängige Berücksichtigung der Schallschwächung	157
6.2.6.3	Schallschwächungsmessung am Beispiel der Schweißnahtprüfung	158
6.3	AVG-Vorsatzskalen	160
6.4	AVG-Verfahren mit Phased-Array	160
<b>7</b>	<b>Ankopplungstechnik</b>	<b>161</b>
7.1	Ankopplung	161
7.2	Oberflächenzustand nach DIN EN 583	161
7.3	Kopplungsmittel	163
7.4	Ankopplungstechniken	164
7.4.1	Kontakttechnik	164
7.4.2	Fließwassertechnik	166
7.4.2.1	Spalttechnik	166
7.4.2.2	Kühlkammertechnik	166
7.4.2.3	Strahltechnik	167
7.4.2.4	Tauchtechnik (Pfüzentechnik)	168
7.5	Ankopplungskontrolle	170
7.6	Abtastgeschwindigkeit nach DIN EN 583-1	171
<b>8</b>	<b>Wanddickenmessung</b>	<b>173</b>
8.1	Messungen mit Analoggeräten	173
8.1.1	Einfachmessung	173
8.1.2	Mehrfachechomethode	175
8.1.3	SE-Prüfköpfe	176
8.2	Messungen mit Digitalgeräten	177

8.2.1	Senkrechtprüfkopf ohne Vorlaufstrecke	179
8.2.2	Senkrechtprüfkopf mit Vorlaufstrecke	180
8.2.3	SE-Prüfköpfe	181
8.3	Einflussgrößen und Grenzen der Wanddickenmessung	182
8.3.1	Messgenauigkeit	182
8.3.1.1	Prüfsystemabhängige Faktoren	182
8.3.1.2	Prüfbereich	182
8.3.1.3	Ablesefehler	183
8.3.1.4	Echoamplitudeneinstellung	183
8.3.1.5	Linearitätsabweichungen	184
8.3.2	Werkstückeinflüsse	185
8.3.3	Werkstoffeinflüsse	185
8.3.4	Temperatureinfluss	186
8.3.5	Zusammenfassung	188
8.4	Spezielle Anwendungen der Wanddickenmessung	189
8.4.1	Beschichtete Oberflächen	189
8.4.2	Glasfaserverstärkte Kunststoffe	190
8.4.3	Offshore-Messungen	192
8.4.4	Wanddickenmessungen bei höheren Temperaturen	193
8.5	Wanddickenmessung nach ASME-Code	194
<b>9</b>	<b>Prüfung von Grobblechen, Stäben, gewalztem Halbzeug</b>	<b>197</b>
9.1	Prüfung von Grobblechen nach SEL-072	197
9.2	Prüfung von Grobblechen nach DIN EN 10160	200
9.2.1	Flächenprüfung der Klassen $S_0$ und $S_1$	200
9.2.2	Flächenprüfung der Klassen $S_2$ und $S_3$	201
9.2.3	Randzonenprüfung	201
9.2.4	Empfindlichkeitsjustierung und Ungänzengrößenbestimmung	201
9.2.5	Abnahmekriterien	201
9.3	Prüfung von Grobblechen nach DIN EN 10307	203
9.3.1	Prüfklassen	204
9.3.2	Flächen- und Randzonenprüfung	204
9.3.3	Zulässigkeitskriterien	205
9.4	Prüfung von Grobblechen nach ASME-Code	205
9.5	Prüfung von Stäben aus Stahl nach DIN EN 10308	207
9.5.1	Prüfzeitpunkt und -umfang	207
9.5.2	Prüfsystem, Justierung und Durchführung der Prüfung	209
9.5.3	Bewertung von Anzeigen	210
9.6	Prüfung von gewalztem Halbzeug	212
9.6.1	Automatisierte Ultraschallprüfung v. Band/Blech	
	n. DIN EN ISO 10893-9	212
9.6.1.1	Prüfzeitpunkt und -umfang	212

---

9.6.1.2	Prüfsystem, Justierung und Durchführung der Prüfung . . .	213
9.6.1.3	Bewertung von Anzeigen . . . . .	214
9.6.2	Prüfung von gewalztem Halbzeug nach SEP 1920 . . . . .	215
9.6.3	Prüfung von gewalztem Halbzeug nach ASME-Code . . . . .	215
9.7	Prüfanlagen und Auswertung der Prüfergebnisse . . . . .	216
<b>10</b>	<b>Prüfung von Rohren . . . . .</b>	<b>221</b>
10.1	Nahtlose Rohre . . . . .	221
10.1.1	Fehlerarten . . . . .	221
10.1.2	Manuelle Prüfung . . . . .	222
10.1.3	Automatische Prüfanlagen . . . . .	224
10.1.4	Prüfung nach DIN EN ISO 10893-10 . . . . .	234
10.1.4.1	Prüfverfahren . . . . .	234
10.1.4.2	Bezugsstandards . . . . .	234
10.1.4.3	Einstellung und Überprüfung der Prüfanlage . . . . .	234
10.1.4.4	Zulässigkeitsbedingungen . . . . .	234
10.1.5	Prüfung nach SEP 1915 . . . . .	235
10.1.6	Prüfung nach SEP 1918 . . . . .	237
10.1.7	Prüfung nach ASME-Code . . . . .	238
10.2	Geschweißte Rohre . . . . .	239
10.2.1	Prüfanordnungen . . . . .	240
10.2.2	Automatische Prüfanlagen . . . . .	240
10.2.3	Prüfung nach DIN EN ISO 10893-11 . . . . .	243
10.2.3.1	Prüfverfahren . . . . .	244
10.2.3.2	Bezugsstandards, Einstellung und Überprüfung der Prüfanlage . . . . .	244
10.2.3.3	Zulässigkeitsbedingungen . . . . .	244
10.2.4	Prüfung nach SEP 1916 . . . . .	244
10.2.5	Prüfung nach SEP 1917 . . . . .	245
10.2.6	Prüfung nach ASME-Code . . . . .	245
10.3	Spezielle Rohrprüfungen nahtloser und geschweißter Stahlrohre . . . . .	246
10.3.1	Automatis. Ultraschalldickenprüfung v. Rohren n. DIN EN ISO 10893-12 . . . . .	246
10.3.1.1	Prüfverfahren . . . . .	246
10.3.1.2	Bezugsstandards, Einstellung und Überprüfung der Prüfanlage . . . . .	246
10.3.1.3	Zulässigkeitsbedingungen . . . . .	246
10.3.2	Automatisierte Rohrprüfung auf Dopplungen und der Rohrenden nach DIN EN ISO 10893-8 . . . . .	246
10.3.2.1	Prüfung auf Dopplungen . . . . .	247
10.3.2.1.1	Prüfverfahren . . . . .	247

10.3.2.1.2	Bezugsstandards, Einstellung und Überprüfung der Prüfanlage .....	247
10.3.2.1.3	Zulässigkeitsbedingungen .....	248
10.3.2.2	Rohrendenprüfung .....	248
<b>11</b>	<b>Prüfung von Schmiedestücken .....</b>	<b>251</b>
11.1	Herstellungsbedingte Fehler .....	251
11.1.1	Fehler vom Gießprozess .....	251
11.1.2	Fehler aus dem Verformungsprozess .....	252
11.1.3	Fehler vom Wärmebehandlungsprozess .....	255
11.2	Prüftechnik .....	257
11.2.1	Prüfzeitpunkt .....	257
11.2.2	Prüftechnische Kriterien .....	257
11.2.3	Manuelle, mechanisierte und automatisierte Prüfung .....	258
11.3	Prüfung nach SEP 1921 .....	263
11.3.1	Prüfumfang und -zeitpunkt .....	263
11.3.2	Prüfsystem, Justierung und Durchführung der Prüfung .....	263
11.3.3	Bewertung von Anzeigen .....	263
11.4	Prüfung nach DIN EN 10228-3 .....	266
11.4.1	Prüfumfang und -zeitpunkt .....	266
11.4.2	Prüfsystem, Justierung und Durchführung der Prüfung .....	269
11.4.3	Bewertung von Anzeigen .....	269
11.5	Prüfung nach ASME-Code .....	270
11.5.1	Prüfumfang und -zeitpunkt .....	271
11.5.2	Prüfsystem, Justierung und Durchführung der Prüfung .....	272
11.5.3	Bewertung von Anzeigen .....	274
<b>12</b>	<b>Prüfung von Gussstücken .....</b>	<b>277</b>
12.1	Herstellungsbedingte Fehler .....	277
12.2	Prüfbarkeit und Prüftechnik .....	279
12.2.1	Stahlguss .....	279
12.2.2	Gusseisen .....	280
12.3	Prüfung von Stahlguss für allgemeine Verwendung n. DIN EN 12680-1 .....	284
12.3.1	Prüfumfang und -zeitpunkt .....	284
12.3.2	Prüfverfahren, Prüfsystem, Justierung und Durchführung der Prüfung .....	284
12.3.3	Bewertung von Anzeigen .....	285
12.4	Prüfung v. Stahlguss für hochbeanspruchte Bauteile n. DIN EN 12680-2 ..	288
12.4.1	Prüfsystem, Justierung und Durchführung der Prüfung .....	288
12.4.2	Bewertung von Anzeigen .....	289
12.5	Prüfung nach ASME-Code .....	290



12.5.1	Prüfumfang und -zeitpunkt .....	290
12.5.2	Prüfsystem, Justierung und Durchführung der Prüfung .....	291
12.5.3	Bewertung von Anzeigen .....	292
12.6	Prüfung von Gusseisen mit Kugelgraphit nach DIN EN 12680-3 .....	292
12.6.1	Prüfsystem, Justierung und Durchführung der Prüfung .....	292
12.6.2	Bewertung von Anzeigen .....	292
12.7	Prüfung von Gussstücken aus Gusseisen mit Kugelgraphit nach SEP 1924 .....	294
12.7.1	Prüfumfang und -zeitpunkt .....	294
12.7.2	Prüfsystem, Justierung und Durchführung der Prüfung .....	294
12.7.3	Bewertung von Anzeigen .....	295
<b>13</b>	<b>Prüfung von Schweißverbindungen .....</b>	<b>297</b>
13.1	Der Aufbau von Schweißnähten .....	297
13.2	Stoß- und Fugenformen .....	298
13.3	Mechanisierte und automatisierte Prüfung .....	300
13.4	Schweißnahtfehler .....	301
13.4.1	Flächenhafte Fehler .....	301
13.4.2	Volumenhafte Fehler .....	302
13.4.3	Einteilung von Ungängen an Metallen nach DIN EN ISO 6520 ..	303
13.4.4	Bestimmung des Anteils von Ungängen an Metallen nach EN ISO 5817 .....	307
13.5	Spezielle Schweißverfahren .....	308
13.5.1	Engspaltschweißen .....	308
13.5.2	Widerstandspunktschweißen .....	310
13.6	Ultraschallprüfung von Schmelzschweißverbindungen n. DIN EN 12062 .....	315
13.6.1	Prüfumfang und Zeitpunkt .....	316
13.6.2	Auswahl des Prüfverfahrens und Durchführung der Prüfung .....	316
13.6.3	Bewertung von Anzeigen .....	317
13.7	Prüfung nach AD-Merkblatt HP 5/3 (2000) und Anlage HPO .....	317
13.7.1	Prüfumfang und -zeitpunkt .....	317
13.7.2	Prüfsystem, Justierung und Durchführung der Prüfung .....	318
13.7.3	Bewertung von Anzeigen .....	318
13.8	Prüfung nach Druckgeräterichtlinie DIN EN 13445-5 .....	323
13.8.1	Prüfverfahren und Prüfumfang .....	323
13.8.2	Bewertung von Anzeigen .....	323
13.9	Prüfung nach DIN EN ISO 11666, 17640 und 23279, DIN EN ISO 5817 .....	324
13.9.1	Prüfumfang und -zeitpunkt .....	324
13.9.2	Prüfsystem, Justierung und Durchführung der Prüfung .....	325
13.9.3	Bewertung von Anzeigen .....	327
13.10	Ultraschallprüfung von Schweißnähten nach KTA 3201.3 .....	330
13.10.1	Prüfumfang und -zeitpunkt .....	330
13.10.2	Prüfsystem, Justierung und Durchführung der Prüfung .....	331

13.10.3	Bewertung von Anzeigen	331
13.11	Ultraschallprüfung von Schweißnähten nach ASME-Code	332
13.11.1	Prüfumfang und -zeitpunkt	332
13.11.2	Prüfsystem, Justierung und Durchführung der Prüfung	333
13.11.3	Bewertung von Anzeigen	333
<b>14</b>	<b>Besondere Prüftechniken I (Spezielle Bauteile)</b>	<b>337</b>
14.1	Gekrümmte Bauteile	337
14.1.1	Schallfeldveränderungen	337
14.1.2	Prüfkopfanpassung nach DIN EN 583-2	338
14.1.2.1	Geometrieklassen für Prüfobjekte	338
14.1.2.2	Prüfköpfe mit Anpassung in Längsrichtung	339
14.1.2.2.1	Konvexe Prüffläche	339
14.1.2.2.2	Konkave Prüffläche	339
14.1.2.3	Prüfköpfe mit Anpassung in Querrichtung	340
14.1.2.3.1	Konvexe Prüffläche	340
14.1.2.3.2	Konkave Prüffläche	340
14.1.2.4	Prüfköpfe mit Anpassung in Längs- und Querrichtung	340
14.1.2.5	Prüfkopfanpassung nach ASME-Code	340
14.1.3	Auswahl des Einschallwinkels	341
14.1.4	Entfernungsjustierung	342
14.1.5	Empfindlichkeitsjustierung	345
14.2	Plattierte Bauteile	346
14.2.1	Herstellung von Plattierungen	346
14.2.2	Kriterien für prüftechnische Festlegungen	346
14.2.3	Justierung und allgemeine Prüftechnik	348
14.2.3.1	Prüfung auf Bindefehler im Interface mit Senkrechtprüfkopf	348
14.2.3.2	Prüfung auf Risse und Schlackeneinschlüsse mit Winkelprüfkopf	350
<b>15</b>	<b>Besondere Prüftechniken II (Spezielle Techniken)</b>	<b>353</b>
15.1	Tandem- und LLT-Technik	353
15.1.1	Tandemtechnik	353
15.1.1.1	Prüftechnik	353
15.1.1.2	Prüfzonen	354
15.1.1.3	Entfernungsjustierung	354
15.1.1.4	Empfindlichkeitsjustierung	357
15.1.2	LLT-Technik	357
15.2	TOFD-Technik	361
15.2.1	Einführung	361
15.2.2	Prinzip des Verfahrens	361

---

15.2.3	Prüftechnik und Einstellung des Prüfsystems	364
15.2.4	Anwendungen der TOFD-Technik	368
15.2.5	Vorteile, Grenzen und Akzeptanzkriterien der TOFD-Technik	370
15.3	Gruppenstrahlertechnik (Phased Array)	374
15.3.1	Prüfgerätesysteme	374
15.3.2	Anwendungen der Phased-Array-Technik	379
15.3.3	Fehlerrekonstruktion und -klassifizierung	384
15.3.4	Vor- und Nachteile der Phased-Array-Technik	387
15.4	Prüfung bei höheren Temperaturen	387
15.4.1	Einleitung	387
15.4.2	Ultraschallankopplung	387
15.4.2.1	Kontaktlose Verfahren	388
15.4.2.1.1	Magnetostriktive Verfahren	388
15.4.2.1.2	Piezoelektrische Verfahren	390
15.4.2.1.3	Elektromagnetische Verfahren	390
15.4.2.1.4	Thermoakustische Verfahren	393
15.4.2.2	Ultraschallankopplung im Kontaktverfahren mit Ankopplungsmitteln	393
15.4.2.3	Ultraschallankopplung im Kontaktverfahren ohne Ankopplungsmittel	396
15.4.3	Ultraschallausbreitung	397
15.4.4	Prüfung von Schmiedeblocken bei höheren Temperaturen	400
15.5	Luftschall-Technik	405
15.5.1	Einführung	405
15.5.2	Prüftechnik	406
15.5.2.1	Kapazitive Prüfköpfe	406
15.5.2.2	Piezokomposite Prüfköpfe	406
15.5.2.3	Prüfsysteme	408
15.5.3	Prüfverfahren	410
15.5.4	Anwendungen	411
<b>16</b>	<b>Besondere Prüftechniken III (Spezielle Werkstoffe)</b>	<b>415</b>
16.1	Austenitische Werkstoffe	415
16.1.1	Physikalische Grundlagen	415
16.1.2	Prüftechnik	416
16.1.2.1	Fokussierung des Schallbündels	416
16.1.2.2	Longitudinalwellen-Winkelprüfköpfe	416
16.1.2.3	Breitbandige hochbedämpfte Prüfköpfe	416
16.1.2.4	Schmalbandsendertechnik	417
16.1.2.5	Signalverarbeitungstechnik	417
16.1.3	Anwendungen	418
16.2	Gusswerkstoffe	420

---

16.2.1	Stahlformguss	420
16.2.2	Gusseisen	422
16.2.3	Schalenhartguss	424
16.3	Kunststoffe	428
16.3.1	Zielstellung für Ultraschallprüfungen	428
16.3.2	Justierung und Justierkörper	429
16.3.3	Bewertung	431
<b>17</b>	<b>Normen, Regelwerke, Prüfanweisungen, Verfahrensbeschreibungen, Protokollierung, Dokumentation</b>	<b>435</b>
17.1	Normen, Regelwerke	435
17.2	Prüfanweisungen	439
17.3	Verfahrensbeschreibungen	443
17.4	Protokollierung und Dokumentation	451
<b>18</b>	<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>457</b>

---

# Einführung

Die *Ultraschallprüfung* (nach den international üblichen Abkürzungen für die verschiedenen Prüfverfahren mit UT bezeichnet) ist ein *zerstörungsfreies* Verfahren der Materialprüfung, welches sich vom Funktionsprinzip her als ein eigenständiges Verfahren in die Reihe der anderen etablierten zerstörungsfreien Prüfverfahren

- Magnetische und elektrische Prüfung MT  
(magnetischer Streufluss, Haftkraft, elektrisches Potenzial)
- Eindringprüfung PT  
(Eindringprüfung)
- Radiografische Prüfung RT  
(Röntgen-, Gamma- und Neutronenstrahlen)
- Wirbelstromprüfung ET  
(Elektromagnetische Prüfung)
- Sichtprüfung VT  
(visuelle Prüfung, optische Prüfung, Endoskopie)

einordnet, wobei als *zerstörungsfreies* Prüfverfahren (ZfP, engl. NDT/Nondestructive Testing) in Anlehnung an DIN EN ISO 17025 nach [0.1] definiert werden könnte:

*Technischer Vorgang zur Bestimmung eines oder mehrerer vorgegebener Qualitätskennwerte eines Werkstoffes oder Erzeugnisses gemäß vorgeschriebener Verfahrensweise, wobei die dazu genutzte Energie (z.B. als Wellen- oder Teilchenstrahlung, elektrisches, magnetisches oder elektromagnetisches Feld, mechanische Schwingungen oder Wellen, Licht, Wärmestrahlung u.a.) in Wechselwirkung mit dem Material tritt, ohne dass dadurch dessen Eigenschaften oder das vorgesehene Gebrauchsverhalten (Beanspruchungsart, -höhe und -dauer) unzumutbar beeinträchtigt werden.*

Neben den o.g. werden oft auch solche Verfahren bzw. Untersuchungsmethoden den zerstörungsfreien Prüfverfahren zugeordnet, die traditionell bzw. nach der vorstehenden Begriffsdefinition nicht in diese Kategorie einzuordnen sind oder sich wissenschaftlich

verselbstständigt haben, wie z.B. die Röntgen-Feinstrukturuntersuchung, die röntgenographische Spannungsmessung, die Spektralanalyse, die akustische Emission, Verformungsmessungen, Rauheitsmessung u.a. [0.2]

In diesem Fachbuch werden DIN EN ISO-Normen des gegenwärtigen Standes 2014 zitiert, um die Fachleute zu befähigen, ohne die Normen detailliert zu lesen, die Normen in ihrer täglichen Arbeit umsetzen zu können. Deshalb sind entsprechende Erläuterungen zu den Texten, Tabellen und Bildern in den Normen eingearbeitet worden.

Der ASME-Code wird ausführlich behandelt, weil diese amerikanische Druckgeräte-Richtlinie nur in englischer Sprache angeboten wird und weil sich die Ausführungen in den für die Praxis wichtigen Kapiteln doch wesentlich von den DIN EN ISO-Normen unterscheiden. Vor allem Firmen, die ASME-Inspektionen für ihre Produkte bestehen müssen, können sich mit den Erläuterungen zum ASME-Code eventuell besser auf solche Inspektionen vorbereiten.

---

## Literatur

[0.1] Mc Master, Nondestructive Testing Handbook, ASNT 1959

[0.2] DGZfP Kursprogramm 2013

---

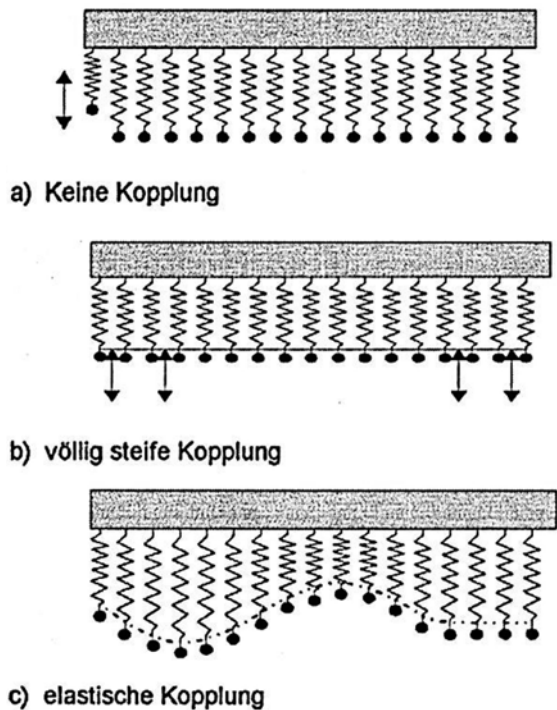
## 1.1 Ultraschallwellen

**Die Welle ist die räumliche Ausbreitung einer Schwingung.** Voraussetzung für die räumliche Ausbreitung ist eine elastische Kopplung der schwingenden Massenteilchen. Ein Beispiel dafür, wie aus einer Schwingung eine Welle entsteht, ist in Abb. 1.1 dargestellt. Dabei werden eine Reihe von gleichen nebeneinander aufgehängten Federpendeln abgebildet.

In Abb. 1.1a besteht zwischen den Federpendeln keine Kopplung. Wenn man eines dieser Pendel zu Schwingungen anregt, schwingt es allein, während die anderen in Ruhelage bleiben. Es kann somit seine Schwingungsenergie nicht auf die anderen Pendel übertragen. Die Pendel in Abb. 1.1b haben eine steife Kopplung, z.B. durch Verbindung der Pendel mit einer starren Stange. Wird irgendein Pendel zu Schwingungen angeregt, so schwingen sofort alle anderen Pendel mit gleicher Amplitude, da sich jedes Pendel nur auf und ab, jedoch nicht seitwärts bewegen kann. Bei einer elastischen Kopplung (Abb. 1.1c wie bei einem Gummiband) übertragen sich die Schwingungen mit einer bestimmten Geschwindigkeit nach und nach auf alle übrigen Pendel, wenn ein Pendel in Schwingungen versetzt wird. Damit kommt es zu einer Wellenausbreitung.

Ähnlich wie bei diesem Gedankenexperiment lassen sich alle in der Natur vorkommenden Wellenausbreitungsvorgänge ableiten. Einzelne Massenteilchen führen eine Schwingung aus. Durch elastische Kräfte wird die Bewegung auf andere Teilchen übertragen. **Bei der Wellenausbreitung findet ein Energietransport, jedoch kein Massentransport statt.** Während die Wellenberge in Abb. 1.1c die ganze Pendelkette von links nach rechts durchlaufen, bleibt die Bewegung der Pendel um die Ruhelage beschränkt. Die Schwingung eines Körpers, wie z.B. des im Prüfkopf eingebauten Schwingers bzw. Wandlers, teilt sich der Materie in der Umgebung, d.h. im angekoppelten Werkstück, mit. Dabei entsteht eine Folge von Verdichtungen und Verdünnungen in Richtung der schallerzeugenden Materie. **Die Ausbreitung von Schwingungen in Form von Schallwellen ist also**

**Abb. 1.1** Ausbreitung von Schwingungen längs einer Pendelkette [1.1], [1.5]



im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen (Radiowellen, Licht) an das Vorhandensein von Materie gebunden.

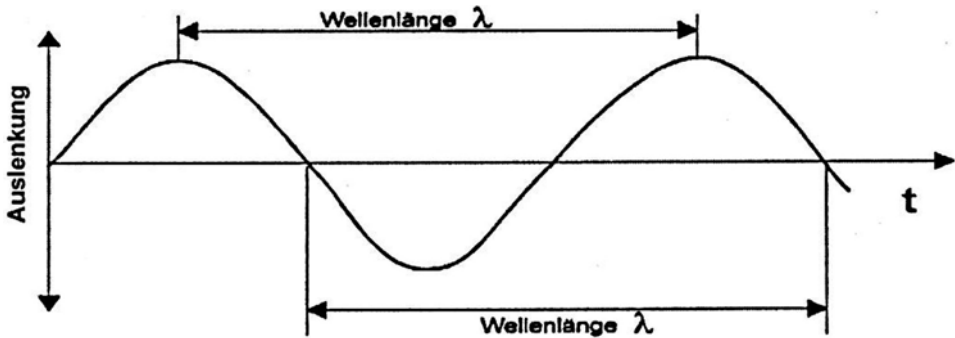
### 1.1.1 Ausbreitungsgeschwindigkeit (Schallgeschwindigkeit)

Als Ultraschallgeschwindigkeit bezeichnet man die Geschwindigkeit, mit der sich eine Welle in einem bestimmten Medium ausbreitet. Sie wird bezogen auf die Phasenlage der Schwingung und folglich auch Phasengeschwindigkeit genannt. **Die Schallgeschwindigkeit hängt von den elastischen Eigenschaften und der Dichte des Mediums ab. Damit ist die Schallgeschwindigkeit  $c$  eine Materialkonstante, die in m/s oder km/s gemessen wird.**

### 1.1.2 Wellenlänge

Als Wellenlänge  $\lambda$  wird der räumliche Abstand zwischen zwei benachbarten Orten gleichen Schwingungszustandes bezeichnet (Abb. 1.2 und nachstehende Gleichungen). Damit sind zwei Teilchen gemeint, die mit gleicher Phase schwingen.





**Abb. 1.2** Definition der Wellenlänge [1.1], [1.2]

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ oder } c = \lambda \times f.$$

mit  $c$  = Schallgeschwindigkeit der sich ausbreitenden Welle im Medium,  
 $f$  = Frequenz des verwendeten Schwingers.

Diese Gleichung gilt sowohl für Longitudinalwellen als auch für Transversalwellen.

### Rechenbeispiel:

Für einen Senkrechtprüfkopf (Frequenz  $f = 2$  MHz) soll die Wellenlänge in Stahl berechnet werden.

Gegeben:  $f = 2$  MHz,  $c_{\text{Stahl}} = 5920$  m/s    Gesucht:  $\lambda = ?$

### Lösung:

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

$$\lambda = \frac{5920 \text{ m/s}}{2 \text{ MHz}} \text{ oder } \frac{5,92 \times 10^6 \text{ mm/s}}{2 \times 10^6 \text{ Hz}} = 2,96 \text{ mm}$$

Die Wellenlänge in Stahl für eine Frequenz von 2 MHz beträgt somit ca. 3 mm. Dieser Wert gilt aber nur für eine bestimmte Wellenart. Die Nachweisgrenze der kleinsten nachweisbaren Ungänze ist unter anderem abhängig von der Wellenlänge. Theoretisch kann davon ausgegangen werden, **dass diese Nachweisgrenze etwa in der Größenordnung von 0,2 bis 0,5 Wellenlängen liegt**, d.h. dass bei einer Wellenlänge von 3 mm der kleinste noch nachweisbare Reflektor eine Größe von 0,6 bis 1,5 mm haben kann.

In Tab. 1.1 sind typische Wellenlängen für Stahl in Abhängigkeit von der Wellenart und der Prüffrequenz zusammengestellt.

**Tab. 1.1** Typische Wellenlängen für Stahl mit den Nachweisgrenzen [1.2]

Wellenart	Wellenlängen und Nachweisgrenzen in mm für Frequenzen von				
	0,5 MHz	1 MHz	2 MHz	4 MHz	6 MHz
Longitudinalwelle	11,84	5,92	2,96	1,48	0,98
Nachweisgrenze	2,4 bis 6	1,2 bis 3	0,6 bis 1,5	0,3 bis 0,75	0,2 bis 0,5
Transversalwelle	6,51	3,25	1,63	0,81	0,54
Nachweisgrenze	1,3 bis 3,2	0,7 bis 1,6	0,3 bis 0,8	0,2 bis 0,4	0,1 bis 0,3

Aus Tabelle 1.1 wird ersichtlich, **dass die Wellenlänge umso kleiner wird, je größer die Prüffrequenz ist.**

Tabelle 1.2 zeigt einige Werte für die Schallgeschwindigkeit und die Dichte und damit auch für den Schallwellenwiderstand ( $Z$ ) verschiedener Stoffe, der das Produkt aus Schallgeschwindigkeit und Dichte darstellt ( $Z = \rho \times c$ ).

### 1.1.3 Wellenarten

Grundsätzlich können sich Ultraschallwellen überall dort ausbreiten, wo Massenteilchen eines Stoffes für die Ausführung elastischer Schwingungen zur Verfügung stehen. Die schwingenden Teilchen des den Ultraschall übertragenden Werkstoffes sind dabei elastisch gekoppelt. Die Ausbreitung von Schallwellen ist in Gasen, Flüssigkeiten und in festen Stoffen möglich, dagegen **nicht in einem Vakuum**, weil dort keine Schwingungsträger vorhanden sind.

Ultraschallwellen können sich auf verschiedene Arten ausbreiten und es können verschiedene Wellenarten mit unterschiedlichen Eigenschaften eingesetzt werden, z.B. in Senkrecht- und Winkelprüfköpfen. Die gebräuchlichsten Wellenarten in der Ultraschallprüfung werden nachstehend dargestellt.

#### 1.1.3.1 Longitudinalwellen (Kompressionswellen = Druckwellen)

**Bei der Longitudinalwelle (Abb. 1.3) liegt die Schwingungsrichtung der Teilchen in der gleichen Ebene wie die Ausbreitungsrichtung der Welle, d.h. Schwingungs- und Ausbreitungsrichtung stimmen überein bzw. liegen parallel zueinander.**

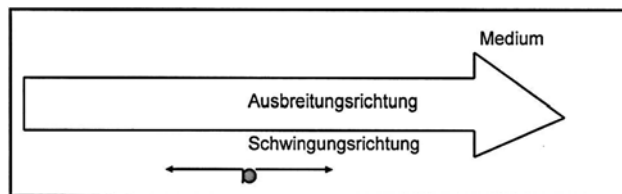
**Longitudinalwellen können sich dadurch in festen, flüssigen und gasförmigen Medien ausbreiten.** Als Beispiel soll die in Abb. 1.4 abgebildete Pendelkette gezeigt werden, wobei die Pendel an so langen Fäden hängen, dass bei einer kleinen seitlichen Auslenkung die Pendel praktisch nur horizontal schwingen. Es entsteht eine Welle, die sich ebenfalls nur in horizontaler Richtung ausbreitet.

**Tab. 1.2** Schallgeschwindigkeit, Dichte und Schallwellenwiderstand (Z) verschiedener Stoffe [1.8], [1.9]

Werkstoff	Schallgeschwindigkeit			Schallwellenwiderstand (Z in kg/m <sup>2</sup> s)**
	Longitudinalwelle * (c <sub>L</sub> in m/s)	Transversalwelle * (c <sub>T</sub> in m/s)	Dichte (ρ in kg/m <sup>3</sup> )	
Wasser	1480	-	1,0	1,5
Plexiglas	2740	1120	1,18	3,2
Bariumtitanat	5200-5400	-	5,3	27,6
Quarkristall	5760	-	2,7	15,3
Stahl	5920	3250	7,85	5,1
Grauguss lamellar	3800-5000	2000-2600	7,2	30
Grauguss vermicular	5000-5400	2500-2800	7,2	36
Grauguss globular	5400-5900	2800-3200	7,2	40
Aluminium	6300	3080	2,7	17,0
Bronze	3500	2200	8,8	31,0
Kupfer	4700	2260	8,9	42,0
Messing	4400	2200	8,6	37,0
Kunststoff	2500	1200	1,1	2,4
Beton	3000-4830	2000-2400	1,8-2,5	5,4-12,1

\* abhängig vom Gefügestand

\*\* Näherungswerte

**Abb. 1.3** Longitudinalwelle [1.1], [1.6]

In Abb. 1.5 wird die Erzeugung von Longitudinalwellen in Luft durch eine schwingende Membran schematisch dargestellt.

In der unmittelbaren Nachbarschaft der Membran wird die Luft im Rhythmus der Membranschwingungen abwechselnd komprimiert und verdünnt. Es kommt zur Ausbreitung

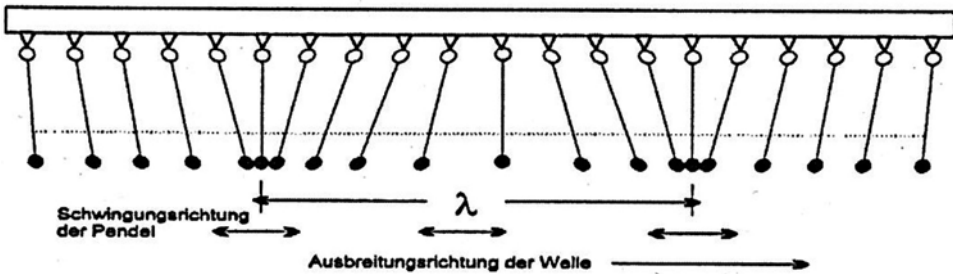


Abb. 1.4 Pendelkette zur Veranschaulichung der Longitudinalwelle [1.1], [1.4]

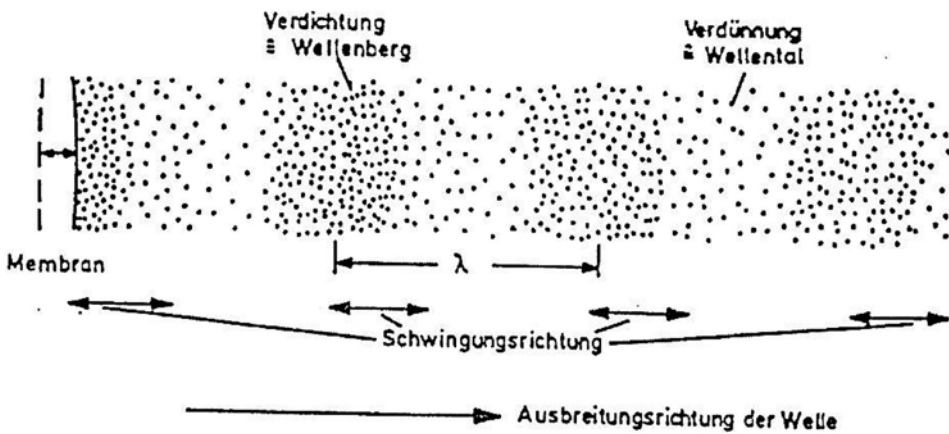


Abb. 1.5 Erzeugung von Longitudinalwellen in Luft [1.1], [1.2], [1.3], [1.5]

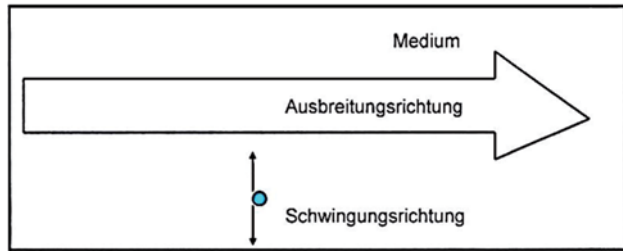
von Longitudinalwellen in Gestalt abwechselnder Überdruck- und Unterdruckzonen, die dadurch zu erklären sind, dass die von der Membran in Bewegung gesetzten Moleküle ihre Bewegung durch Stoß auf die weiter entfernten Moleküle übertragen.

### 1.1.3.2 Transversalwellen (Scherwellen)

Bei der Transversalwelle (Abb. 1.6) liegt die Bewegungsrichtung der Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Die Wellenausbreitung längs der elastisch gekoppelten Federpendel in Abb. 1.1c ist ein Beispiel dafür. Die einzelnen Pendel schwingen in vertikaler Richtung, während sich die Welle von links nach rechts in horizontaler Richtung ausbreitet.

Transversalwellen können sich dadurch nur in festen Medien ausbreiten. Eine Ausbreitung in Gasen oder Flüssigkeiten ist nicht möglich, da diese nur Druckkräfte, nicht jedoch auch Scherkräfte übertragen können, d.h. ihr Schubmodul ist gleich Null.

**Abb. 1.6** Transversalwelle  
[1.1], [1.2], [1.6]



Bei Stahl sind die Schallgeschwindigkeit und damit auch die Wellenlänge der Transversalwelle etwa halb so groß wie die der Longitudinalwelle. Dadurch lassen sich mit der Transversalwelle kleinere Reflektoren als mit vergleichbaren Longitudinalwellen nachweisen.

### 1.1.3.3 Oberflächenwellen (Rayleighwellen)

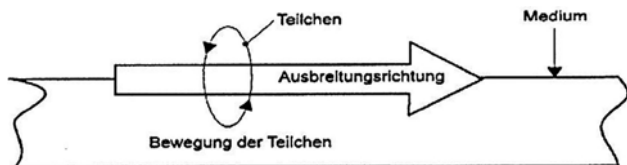
Ab einem bestimmten Einschallwinkel wandelt sich die Transversalwelle in eine Oberflächenwelle, auch **Rayleighwelle** genannt, um. Diese Wellenart **breitet sich mit einer elliptischen Teilchenbewegung nur entlang der Oberfläche mit einer Eindringtiefe von etwa einer Wellenlänge aus** (Abb. 1.7). **Sie wird deshalb auch Oberflächenwelle genannt.** Die Schallgeschwindigkeit beträgt das 0,9 – fache der Transversalwelle. Somit ist diese Wellenart aufgrund der sich kleiner ergebenden Wellenlänge noch empfindlicher als eine vergleichbare Transversalwelle.

Die Rayleighwelle hat die Fähigkeit, auch an gekrümmten Oberflächen entlang zu laufen, wenn der Krümmungsradius größer als die Wellenlänge ist und wird zum Nachweis von Oberflächenrisen genutzt (Abb. 1.8).

### 1.1.3.4 Plattenwellen (Lambwellen)

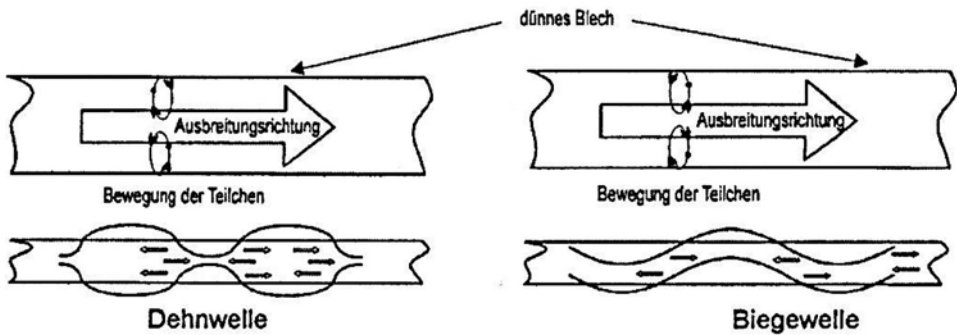
Die Plattenwelle wird auch Lambwelle genannt und hat die Eigenschaft, sich durch sehr dünne Bleche, deren Dicke in der Größenordnung der Wellenlänge liegt ( $< 5 \text{ mm}$ ), auf

**Abb. 1.7** Rayleighwelle [1.1],  
[1.2], [1.6]



**Abb. 1.8** Nachweis von Oberflächenrisen mit Hilfe von Oberflächenwellen [1.2]





**Abb. 1.9** Plattenwellen (Lambwellen) [1.1], [1.2], [1.6]

zwei verschiedene Arten in Abhängigkeit von der Blechdicke, von der Prüfkopffrequenz und vom Einschallwinkel auszubreiten (Abb. 1.9).

Die **symmetrische Form der Plattenwelle** (auch **Dehnwelle genannt**) und auch die **unsymmetrische Form** (auch **Biegewelle genannt**) breiten sich entlang der Platte (Feinblech) mit **elliptischer Teilchenbewegung an beiden Oberflächen aus** (Prüffläche und Gegenfläche). Lambwellen erfassen daher immer die komplette Wanddicke und sind im Ungängenbereich sehr unempfindlich, da jeder Reflektor sich störend auf die Symmetrie der Welle auswirkt.

Alle oben genannten Wellenarten werden sämtlich für die Ultraschallprüfung eingesetzt. Ihre Auswahl richtet sich nach ihrer besonderen Eignung für das jeweils vorliegende Prüfproblem. Nach der Häufigkeit ihrer Anwendung haben Longitudinal- und Transversalwellen die größte Bedeutung.

## 1.2 Verhalten der Wellen an Grenzflächen

### 1.2.1 Grenzflächen senkrecht zur Schallrichtung.

Trifft eine Schallwelle senkrecht unter einem Winkel von  $90^\circ$  auf eine Grenzfläche zweier Materialien, d.h. zweier Grenzen zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten, dann wird ein Teil dieser Welle unter demselben Winkel reflektiert, während ein anderer Teil senkrecht in das Material eindringt (Abb. 1.10). Der Schalldruck hängt dabei vom Reflexions- und Durchlässigkeitsfaktor ab.