
Ultraschalltechnik

Grundlagen und Anwendungen

Inhaltsverzeichnis

PU

1.	Zur Physik des Ultraschalls	
1.1.	<i>Ultraschall als ein Teil der Akustik</i>	15
1.2.	<i>Wellenausbreitung in elastischen Medien</i>	16
1.2.1.	Wellengleichung	16
1.2.2.	Wellenarten und Wellenformen	18
1.2.2.1.	Räumliche Ausbreitung der Wellen in unbegrenzten Medien	18
1.2.2.2.	Harmonische Wellen	20
1.2.2.3.	Longitudinal- und Transversalwellen	21
1.2.2.4.	Stehende Wellen	22
1.2.2.5.	Wellenarten begrenzter fester Körper	23
1.3.	<i>Schallfeldgrößen</i>	24
1.3.1.	Schallgeschwindigkeit	24
1.3.1.1.	Schallgeschwindigkeit in flüssigen und gasförmigen Medien	25
1.3.1.2.	Grenzverhalten der Schallgeschwindigkeit	26
1.3.1.3.	Schallgeschwindigkeit in festen Körpern	27
1.3.2.	Schallschnelle und akustisches Potential	28
1.3.3.	Schallwechseldruck	28
1.3.4.	Schallimpedanz	28
1.3.5.	Energiegrößen des Schallfelds	29
1.4.	<i>Schallausbreitung an Grenzschichten</i>	32
1.4.1.	Reflexion und Brechung	32
1.4.2.	Schalldurchgang durch eine Platte	34
1.4.3.	Schallausbreitung an gekrümmten Grenzflächen	36
1.5.	<i>Schallschwächung</i>	37
1.6.	<i>Beugung</i>	40
1.7.	<i>Streuung</i>	41
1.7.1.	Einzelkörperstreuung	42
1.7.2.	Vielkörperstreuung	45
1.7.2.1.	Kohärente Streuung	45
1.7.2.2.	Inkohärente Streuung	45
1.8.	<i>Echoprinzip und DOPPLER-Effekt</i>	46
1.9.	<i>Elektromechanische Analogiebeziehungen</i>	47
1.10.	<i>Nichtlineare Schallausbreitung</i>	49
1.10.1.	RAYLEIGHscher Schallstrahlungsdruck	49
1.10.2.	LANGVINScher Schallstrahlungsdruck	49
1.10.3.	Wellenaufsteilung	50
1.10.4.	Kavitation	51

UE

2.	Ultraschallerzeugung	
2.1.	<i>Einführung</i>	52
2.2.	<i>Mechanische Ultraschallerzeugung</i>	53
2.3.	<i>Thermische Verfahren</i>	53
2.4.	<i>Optische Verfahren</i>	53
2.5.	<i>Elektrodynamische Verfahren</i>	54
2.6.	<i>Elektromechanische Verfahren</i>	54
2.6.1.	Elektrostatische Wandler	54
2.6.2.	Piezelektrische Werkstoffe und elektromechanische Wandler	54
2.6.2.1.	Piezelektrizität	54
2.6.2.2.	Piezelektrische Materialien	64
2.6.2.3.	Elektromechanische Kopplung piezelektrischer Wandler	68
2.6.2.4.	Piezelektrischer Resonator	71
2.6.3.	Magnetische Wandler	75
2.6.4.	Piezomagnetische Werkstoffe	75
2.7.	<i>Technische Ausführung elektroakustischer Wandler und Bauelemente</i>	78
2.7.1.	Allgemeines	78
2.7.2.	Piezelektrische Bauelemente	80
2.7.3.	Impulsschallwandler	88
2.7.3.1.	Allgemeines	88
2.7.3.2.	Anpassung	89
2.7.3.3.	Technischer Wandleraufbau	95
2.7.3.4.	Multielementwandler	96
2.7.4.	Piezomagnetische Schallwandler	99
2.8.	<i>Schallfeld flächenhafter Strahler</i>	100
2.8.1.	Interferenzfeld einer Kolbenmembran	100
2.8.2.	Nah- und Fernfeld	101
2.8.3.	Fernfeld eines Kolbenschwingers	102
2.8.4.	Fernfeld von Gruppenstrahlern	105
2.8.5.	Empfangscharakteristik	106
2.8.6.	Schallfokussierung und Amplitudentransformation	115
2.9.	<i>Elektronik der Ultraschallerzeugung</i>	115
2.9.1.	Kleinsignale für Werkstoffprüfung, medizinische Diagnostik und andere meßtechnische Anwendungen	115
2.9.2.	Leistungsschallerzeugung für Materialbearbeitung und Ultraschalltherapie	115

UM

3.	Ultraschallstrahlungsmesstechnik	
3.1.	<i>Allgemeines</i>	116
3.2.	<i>Mechanische Verfahren</i>	119
3.2.1.	Qualitative Verfahren zum Ultraschallnachweis	119
3.2.2.	Schallschnellempfänger	119
3.2.3.	Schallstrahlungsdruckempfänger	120
3.2.3.1.	Allgemeines	120

3.2.3.2.	Schallstrahlungsdruckwaagen	120
3.2.3.3.	Kugelradiometer	122
3.2.3.4.	Auftriebsmethode	123
3.2.3.5.	Flüssigkeitssprudel	124
3.3.	<i>Thermische Verfahren</i>	124
3.3.1.	Kalorimeter	124
3.3.2.	Thermosonden	125
3.3.3.	Cholesterische Flüssigkristalle	126
3.4.	<i>Elektromechanische Wandler</i>	127
3.4.1.	Piezoelektrische Hydrofone	127
3.4.1.1.	Charakteristische Parameter	127
3.4.1.2.	Konstruktiver Aufbau	127
3.4.1.3.	Eichung	129
3.4.2.	Kapazitive Wandler	132
3.4.3.	Elektrodynamische Wandler	133
3.5.	<i>Optische Verfahren</i>	134
3.5.1.	Lichtbeugung	134
3.5.1.1.	RAMAN-NATH-Beugung	135
3.5.1.2.	BRAGG-Reflexion	136
3.5.1.3.	Beugung im Übergangsbereich	138
3.5.1.4.	Weitere Verfahren	138
3.5.2.	Schlierentechnik	139
3.5.3.	Holografische Methoden	139
3.5.4.	Nematische Flüssigkristalle	140
3.6.	<i>Chemische Verfahren</i>	141
3.6.1.	Ultraschallvibrationspotentiale	141
3.6.2.	Sonochemische Reaktionen	141



4.	Zerstörungsfreie Materialprüfung	
4.1.	<i>Grundlagen der zerstörungsfreien Materialprüfung</i>	143
4.1.1.	Aufgaben und Methodik	143
4.1.2.	Ungängen	144
4.1.3.	Prüfverfahren	144
4.2.	<i>Grundlagen der Ultraschallmaterialprüfung</i>	146
4.2.1.	Überblick	146
4.2.2.	Prüfverfahren	146
4.2.2.1.	Durchschallungsverfahren	146
4.2.2.2.	Reflexionsverfahren	148
4.2.2.3.	Emissionsverfahren	149
4.2.3.	Prüftechnik	152
4.2.3.1.	Kopplungstechnik	152
4.2.3.2.	Einschall- bzw. Empfangsrichtung (Ortungstechnik)	152
4.3.	<i>Prüfsystem</i>	153
4.3.1.	Überblick	153
4.3.2.	Ultraschallprüfgerät	153
4.3.3.	Prüfkopf	161
4.3.4.	Datenträger	173

4.3.5.	Scanning- bzw. Transporteinrichtungen	176
4.3.6.	Prüfanlagen	178
4.4.	<i>Schallausbreitung</i>	181
4.4.1.	Schallfeld	181
4.4.2.	Makroungängen	182
4.4.2.1.	Axiale Abhängigkeit	183
4.4.2.2.	Laterale Abhängigkeit (Richtcharakteristik)	186
4.4.3.	Mikroungängen	187
4.5.	<i>Allgemeine Prüftechnologie</i>	193
4.5.1.	Überblick	193
4.5.2.	Prüfforderungen	193
4.5.3.	Prüfsystem	204
4.5.3.1.	Grundgleichung des Impulsschall-Echoreflexionsverfahrens	204
4.5.3.2.	Justierung	205
4.5.4.	Prüfling	209
4.5.4.1.	Geometrie	209
4.5.4.2.	Formeinfluß	210
4.5.4.3.	Werkstoff	216
4.5.5.	Bestimmung der Ungängenparameter	220
4.5.6.	Makroungängen	221
4.5.6.1.	Position	221
4.5.6.2.	Orientierung	221
4.5.6.3.	Größe	223
4.5.6.4.	Art	227
4.5.6.5.	Wand- und Schichtdicken	232
4.5.7.	Mikroungängen	232
4.6.	<i>Spezielle Prüftechnologie</i>	233

UD

5.	Medizinische Ultraschalldiagnostik	
5.1.	<i>Einführung</i>	252
5.2.	<i>Allgemeine Grundlagen</i>	253
5.3.	<i>Zur Schallerzeugung und -ausbreitung</i>	254
5.4.	<i>A-Bild-Verfahren</i>	256
5.5.	<i>B-Bild-Verfahren</i>	257
5.5.1.	Prinzipielle Arbeitsweise	257
5.5.2.	Abtast-(Scanning-)Methoden	257
5.6.	<i>C-Bild-Verfahren</i>	263
5.7.	<i>Spezielle Scanapplikatoren</i>	264
5.8.	<i>Duplexscanner</i>	265
5.9.	<i>Durchschallungssysteme</i>	265
5.10.	<i>TM-Bild-Verfahren</i>	265
5.11.	<i>Signalverarbeitung bei der Echobildgewinnung und -auswertung</i>	266
5.11.1.	Bildqualität	266
5.11.2.	Signalverarbeitung	268

5.11.2.1.	Laufzeitabhängige Verstärkung	270
5.11.2.2.	Zeilenzahl, Bildfrequenz und Eindringtiefe	271
5.11.3.	Auflösungsvermögen	272
5.11.4.	Fehlerquellen	272
5.12.	<i>Medizinische Anwendungen der Echographie</i>	275
5.12.1.	Prinzipiell durch Ultraschallverfahren erzielbare Aussagen	275
5.12.2.	A-Bild-Untersuchungen	276
5.12.3.	B-Bild-Untersuchungen	279
5.12.3.1.	Geburtshilfe	279
5.12.3.2.	Weichteildiagnostik	280
5.12.3.3.	Echobildauswertung	282
5.12.3.4.	Gewebecharakterisierung mittels Ultraschallparameter	286
5.13.	<i>Ultraschallspektroskopie</i>	287
5.14.	<i>Echokardiographie</i>	290
5.15.	<i>DOPPLER-Diagnostik</i>	291
5.15.1.	Allgemeines	291
5.15.2.	Blutdruckmessung mit Hilfe des DOPPLER-Strömungsdetektors	292
5.15.3.	Medizinische CW-DOPPLER-Diagnostik	292
5.15.4.	Impuls-DOPPLER-Verfahren	300
5.15.5.	Medizinischer Einsatz des Impuls-DOPPLER-Verfahrens	305

ON

6.	Ortung und Navigation mit Unterwasserschall	
6.1.	<i>Schallausbreitung im Meer</i>	308
6.2.	<i>Unterwasserstörungen</i>	312
6.3.	<i>Schallwandler für Unterwasserortung</i>	314
6.4.	<i>Anwendung von Unterwasserschallsignalen</i>	316
6.4.1.	Allgemeines	316
6.4.2.	Echolotung	318
6.4.3.	Seitensichtsonar	319
6.4.4.	Suchstrahlsonar	319
6.4.5.	Abtastsonar	320
6.4.6.	RDT-Sonar	320
6.4.7.	DOPPLER-Sonar	320

MK

7.	Weitere Meß-, Kontroll- und Ortungsverfahren mit Ultraschall	
7.1.	<i>Verfahren zur Messung der Schallgeschwindigkeit und -absorption in Flüssigkeiten und Festkörpern</i>	324
7.1.1.	Allgemeines	324
7.1.2.	Experimentelle Technik	326
7.1.2.1.	Reverberationsverfahren	327
7.1.2.2.	Resonanzzellen	328
7.1.2.3.	Ultraschallinterferometer	329
7.1.2.4.	Impulsverfahren	330
7.1.2.5.	Optisches Verfahren	332
7.1.2.6.	Torsionsquarzkristall	332
7.1.2.7.	Reflexionstechniken	333

7.2.	<i>Ultraschalloptische Abbildung</i>	335
7.2.1.	Allgemeines	335
7.2.2.	Schallsichtverfahren	335
7.2.3.	Akustische Holografie	339
7.2.4.	Ultraschallmikroskopie	341
7.2.4.1.	Allgemeines	341
7.2.4.2.	Verfahren	342
7.3.	<i>Ultraschall-Füllstandsmeßeinrichtungen</i>	347
7.4.	<i>Ultraschallschranken</i>	350
7.5.	<i>Ultraschalltraumüberwachungen</i>	351
7.6.	<i>Fernsteuerung mit Ultraschall</i>	351
7.7.	<i>Ultraschallbewegungsdetektor</i>	353
7.8.	<i>Blindenleitgeräte</i>	354
7.9.	<i>Ultraschallmessungen in der Tierzucht</i>	354
7.10.	<i>Methoden zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit in Flüssigkeiten</i>	357
7.11.	<i>Temperaturmessungen</i>	357
7.12.	<i>Dichtemessungen</i>	357
7.13.	<i>Viskosität in Flüssigkeiten</i>	357
7.14.	<i>Elastizität fester Körper</i>	359
7.15.	<i>Porosität, Korngröße, Härte.</i>	360
7.16.	<i>Nachweis von Schmutz- oder Gasparkeln in Flüssigkeiten</i>	360
7.17.	<i>Gas-Lecksuche</i>	360

LV

8.	Leistungsschallverfahren	
8.1.	<i>Allgemeines</i>	361
8.2.	<i>Technik</i>	365
8.2.1.	Allgemeines	365
8.2.2.	Ultraschallreinigung	365
8.2.3.	Desintegration	369
8.2.3.1.	Allgemeines	369
8.2.3.2.	Desintegratoren	371
8.2.3.3.	Extraktion	373
8.2.3.4.	Dispergierung	374
8.2.3.5.	Emulgierung	374
8.2.3.6.	Aerosole	375
8.2.3.7.	Agglomeration	376
8.2.4.	Beeinflussung von Prozessen im Labor und bei industriellen Anwendungen	376
8.2.4.1.	Metallurgie	376
8.2.4.2.	Chemische Industrie	377
8.2.4.3.	Wärmeübertragungsprozesse	377
8.2.4.4.	Textil- und Papierindustrie	378
8.2.4.5.	Lebensmittelindustrie	378
8.2.4.6.	Entschäumung	379
8.2.4.7.	Abwasserbehandlung	379
8.2.4.8.	Wirkung und Aufwand beim Einsatz von Ultraschallenergie	379

8.2.5.	Materialbearbeitung	380
8.2.5.1.	Spangebende Materialbearbeitung	380
8.2.5.2.	Spanlose Formgebung	385
8.2.5.3.	Schweißen von Metallteilen	387
8.2.5.4.	Schweißen von Plastteilen	391
8.2.5.5.	Löten	395
8.3.	<i>Medizin</i>	396
8.3.1.	Medizinische Ultraschalltherapie	396
8.3.1.1.	Wirkungen	396
8.3.1.2.	Dosierung	397
8.3.1.3.	Applikationsformen	398
8.3.1.4.	Einsatzgebiete	398
8.3.2.	Chirurgie	399
8.3.3.	Ultraschalltherapiegeräte	399
8.3.4.	Inhalationstherapie mit Ultraschallaerosolen	400
8.4.	<i>Ultraschall in der Biologie</i>	401

An	9. Anhang: Allgemeine Ultraschallgrößen	402
-----------	---	-----

Lv	Literaturverzeichnis	409
-----------	--------------------------------	-----

Sv	Sachwortverzeichnis	432
-----------	-------------------------------	-----

Nv	Normenverzeichnis	438
-----------	-----------------------------	-----