

Inhalt

1	Zweck und Anwendungsbereich.....	9
2	Definitionen und Begriffe	9
3	Einleitung	10
4	Grundlagen	13
4.1	Funktionsprinzip.....	13
4.1.1	Schallwellen im Raum	13
4.1.2	Überlagerung von Wellen und deren Interferenz	14
4.1.3	Entstehung Schallfeld und Punktquellensynthese	15
4.1.4	Grundprinzip der Schallfeldsteuerung	20
4.1.4.1	Das Phased-Array als Sender.....	21
4.1.4.2	Das Phased-Array als Empfänger	22
4.1.4.3	Weitere Beispiele zur Schallfeldsteuerung.....	23
4.1.5	Entstehung von Schallfeldern im Detail	24
4.1.5.1	Punktrichtwirkung.....	25
4.1.5.2	Richtwirkung des einzelnen Schwingerelements	26
4.1.5.3	Richtwirkung des Arrays.....	29
4.1.5.4	Die "Gitterkeule"	31
4.1.5.5	Elementabstand und Elementbreite.....	34
4.2	Steuerungs- und Auswertekonzepte.....	34
4.2.1	Berechnung der Steuerzeiten, der „focal laws“	36
4.2.2	Fokussierung.....	39
4.2.3	Akustischer und geometrischer Fokus.....	41
5	Phased-Array-Prüfkopf	43
5.1	Mechanischer Aufbau von Phased-Array-Prüfköpfen	44
5.1.1	Prinzipieller Aufbau	44
5.1.2	Schutzschicht und Vorlaufstrecke	45
5.1.3	Ultraschallwandler	47
5.1.4	Kontaktierung der Wandlerelemente	48
5.1.5	Dämpfung (Backing)	49
5.1.6	Elektrische Anpassung der Element-Impedanz.....	49
5.1.7	Kabel	49
5.1.8	Steckverbindung.....	50
5.1.9	Prüfkopfgehäuse und Prüfkopfführung.....	53
5.1.9.1	Prüfkopfgehäuse.....	53
5.1.9.2	Prüfkopfführung	53
5.1.10	Prüfkopfanpassung an gekrümmten Oberflächen.....	54
5.1.10.1	Angaben in den Regelwerken.....	54
5.1.10.2	Effekte durch gekrümmte Oberflächen	56
5.1.10.3	Verkippen des Prüfkopfes	57
5.1.10.4	Wirkung des Koppelspaltes	58
5.1.10.5	Fokussierung und Defokussierung.....	60
5.1.10.6	Vorsatzkeile, Koppelmittel und Ankopplung.....	62

5.1.11	Bauteilkrümmung aus ultraschalltechnischer Sicht.....	63
5.1.11.1	Außenprüfung zylindrischer Bauteile	63
5.1.11.2	Prüfkopfانpassung und Anforderungen aus Regelwerken	69
5.1.11.3	Außenprüfung sphärisch gekrümmter Bauteile.....	72
5.1.11.4	Innenprüfung zylindrischer Bauteile	72
5.1.11.5	Innenprüfung sphärisch gekrümmter Bauteile	73
5.2	Elektrische Beschreibung von Piezowandlern	73
5.2.1	Ersatzschaltbild des Piezowandlers.....	73
5.2.2	Resonanzverhalten des Piezowandlers	74
5.2.3	Ersatzschaltbilder für Senden und Empfangen.....	76
5.2.4	Elektrische Impedanzanpassung.....	77
5.2.5	Pulsform, Spektrum und Bandbreite	78
5.3	Verschiedene Typen von Array-Prüfköpfen	81
5.3.1	Übersicht.....	81
5.3.2	Lineare Arrays	82
5.3.2.1	Ebene lineare Arrays	82
5.3.2.2	Gekrümmte lineare Arrays.....	86
5.3.2.3	Linienfokussierte lineare Arrays.....	87
5.3.3	Sende-/Empfangs-Arrays (SE-Arrays)	87
5.3.4	Ringarrays	90
5.3.5	Segmentierte Array.....	90
5.3.6	Segmentierte Ringarrays.....	91
5.3.7	Matrixarrays	92
5.4	Kreisrunde Arrays, praktische Gesichtspunkte	94
5.4.1	Schallfeld eines kreisrunden Wandlers.....	94
5.4.2	Nebenkeulen bei kreisförmigen Wandlern	95
5.4.3	Gitterkeulen bei kreisförmigen Wandlern	97
5.4.4	Schalldruck bei kreisförmigen Wandlern.....	97
5.4.5	AVG-Bewertung bei kreisförmigen Wandlern	100
5.4.6	Fokussierung kreisförmiger Ultraschallwandler	103
5.5	Rechteckige Arrays, praktische Gesichtspunkte	109
5.5.1	Schallfeld eines Rechteckwandlers	109
5.5.2	Nebenkeulen bei Rechteckwandlern.....	113
5.5.3	Gitterkeulen bei Rechteckwandlern	114
5.5.4	Winkelschwenk mit einem Rechteckwandler.....	115
5.5.5	Schalldruck längs der Achse bei Rechteckwandlern	119
5.5.6	AVG-Bewertung bei Rechteckwandlern.....	122
5.5.6.1	Ermittlung der Länge der Vorlaufstrecke.....	122
5.5.6.2	Nahfeldlänge ohne Berücksichtigung der Brechung	123
5.5.6.3	Nahfeldlänge bei Berücksichtigung der Brechung.....	124
5.5.6.4	Erstellung des AVG-Diagramm-Parameter	124
5.5.6.5	Beispiel für die Erstellung eines AVG-Diagrammes	124
5.5.7	Fokussierung linearer Arrays.....	127
5.6	Charakterisierung von Phased-Array-Prüfköpfen	133

6	Gerätetechnik, Systemtechnik und Visualisierung.....	135
6.1	Einleitung	135
6.2	Struktur und Aufbau von Phased-Array-Geräten	137
6.2.1	Sender	144
6.2.2	Empfänger.....	145
6.2.3	Digitalisierung, Verzögerung, Signalverarbeitung	145
6.2.4	Sonderfunktionen.....	150
6.2.4.1	Tiefenausgleich.....	150
6.2.4.2	Winkelkorrigierte Verstärkungsanpassung	150
6.2.4.3	Dynamische Anpassung der Parameter.....	151
6.2.4.4	Dynamische elektronische Fokussierung.....	151
6.2.4.5	Dynamische Apertur Belegung.....	151
6.2.5	Triggerung und Ortsbezug.....	152
6.2.6	Steuerung.....	152
6.2.7	Weitere Signalverarbeitung.....	152
6.3	Gerätekonzepte und deren Umsetzung.....	153
6.4	Gerätetechnische Anforderungen und Profile.....	154
6.5	Technische Grenzen und Einfluss der Parameter.....	155
6.6	Visualisierung von Phased-Array-Prüfergebnissen	155
6.6.1	Konzepte zur Visualisierung	155
6.6.2	Visualisierung für spezielle Anwendungen	159
6.7	Aspekte für Modellierung und Simulation	161
6.8	Bezug zu Normen.....	162
7	Anwendung der Phased-Array-Technik.....	163
7.1	Einsatzbereiche der Phased-Array-Technik.....	163
7.1.1	Grundlagen	163
7.1.2	Phased-Array-Prüfung, wann, wie und warum?	163
7.1.3	Manuelle Prüfung.....	163
7.1.4	Automatisierte Ultraschallprüfung	166
7.2	Auswahlprozess für Phased-Array-Prüfköpfe	167
7.2.1	Analyse der Prüfaufgabe	168
7.2.2	Grobes Prüfkonzept.....	169
7.2.3	Auswahl der Prüftechnik	170
7.2.4	Auswahl der Prüffrequenz	171
7.2.5	Auswahl der Bandbreite (Impulslänge)	172
7.2.6	Bestimmung der Nahfeldlänge und der Apertur	172
7.2.7	Keilwinkel und Vorlaufstreckenlänge	173
7.2.8	Auswahl der Elementanzahl.....	173
7.3	Auswahl eines geeigneten Prüfkopfs	174
7.4	Betrieb eines Phased-Array-Systems	178
7.4.1	Bauteilgeometrie	178
7.4.2	Betrachtung der Prüfgeschwindigkeit	179
7.5	Betriebsmodus bei der Prüfung einer Schweißnaht	181
7.6	Manuelle Schweißnahtprüfung.....	184

7.7	Justierung und Vergleichskörper	186
7.8	Berechnung von Verzögerungszeiten	190
7.9	Qualifizierung nach DIN EN ISO 18563-3	192
7.9.1	Einleitung	192
7.9.2	Systemqualifizierung für die manuelle Prüfung	193
7.10	Systemqualifizierung für die automatisierte Prüfung	200
7.11	Wesentliche Elemente einer Prüfanweisung	200
7.11.1	Prüfanweisungen und Prüfspezifikationen	200
7.11.2	Prüfanweisung	202
7.11.3	Prüfspezifikation	203
7.11.3.1	Erstellung einer Prüfspezifikation	205
8	Beispiele aus der Prüfpraxis	207
8.1	Einleitung	207
8.2	Manuelle Phased-Array-Prüfung	208
8.2.1	Prüfung von Kehlschweißnähten	208
8.2.2	Prüfung von aufgeschweißten Bolzen	210
8.2.3	Prüfung von Rohrschweißnähten	211
8.3	Automatisierte Prüfung	213
8.3.1	Prüfung von nahtlosen Rohren	213
8.3.2	Prüfung von Schweißnähten an Schiffsblechen	219
8.3.3	Automatisierte Prüfung von Luftfahrtkomponenten	225
8.4	Prüfung mit großem Winkelbereich	230
8.4.1	Prüfung von Radsatzvollwellen	230
8.5	Prüfung an komplexen Geometrien	233
8.5.1	Prüfung von Kurbelwellen-Lagerdeckeln	233
8.5.2	Prüfung von Stabstahl	236
8.5.3	Adaptive Prüfung gewalzter Stahlknüppel	242
8.6	Phased-Array und SAFT	249
9	Bezug zu Normen und Regelwerke	253
9.1	Begriffe für die Phased-Array-Prüftechnik	253
9.2	Charakterisierung und Verifizierung gemäß Norm	253
9.2.1	DIN EN ISO 18563-1, Phased-Array-Prüfgeräte	253
9.2.2	DIN EN ISO 18563-2, Phased-Array-Prüfköpfe	254
9.2.3	DIN EN ISO 18563-3, Phased-Array-Prüfsysteme	254
9.3	Normen für die Phased-Array-Anwendung	255
9.4	Normung eines Kalibrierkörpers	256
10	Literatur	257
10.1	Referenzierte Literatur im Handbuch	257
10.2	Weitere, nicht referenzierte Literatur	260
11	Erläuterungen zu Begriffen und Bezeichnungen	269
12	Verzeichnis der Tabellen	276
13	Abbildungsverzeichnis	277