

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einführung

1.1	Wirbelstromprüfung – ein Verfahren der zerstörungsfreien Materialprüfung	13
1.2	Wie funktioniert die Wirbelstromprüfung?	14
1.3	Was kann die Wirbelstromprüfung?	16

2 Physikalische Grundlagen

2.1	Gleichstrom und Magnetfeld	17
2.1.1	Stromstärke, Spannung, elektrische Leistung	17
2.1.2	Gleichstromwiderstand, spezifischer Widerstand, elektrische Leitfähigkeit	18
2.1.3	Das Magnetfeld von Magneten und Gleichströmen	20
2.1.4	Magnetfeld von Spule und geradem Leiter. Magnetische Feldgrößen	21
2.2	Stoffe im Magnetfeld	24
2.2.1	Dia-, Para- und Ferromagnetismus	24
2.2.2	Die Magnetisierungskurve (Hysteresiskurve) ferromagnetischer Stoffe	27
2.2.3	Feldstärkeabhängigkeit der Permeabilität	31
2.2.4	Entmagnetisierungsfaktor. Scherung der Magnetisierungskurve	33
2.3	Elektromagnetische Induktion. Wechselstrom	35
2.3.1	Induktionsgesetz	35
2.3.2	Selbstinduktion	36
2.3.3	Wechselstrom	38
2.3.4	Wechselstromwiderstand (Impedanz)	40

3 Grundlagen der Wirbelstrom-Prüfverfahren

3.1	Erzeugung und Eigenschaften von Wirbelströmen	43
3.1.1	Wirbelstromerzeugung durch Wechselfeldmagnetisierung	43
3.1.2	Eindringtiefe der Wirbelströme. Skineffekt	44
3.2	Das Tastspulen-Verfahren	46
3.2.1	Vorbemerkungen	46
3.2.2	Wirkung der Prüfkörper-Wirbelströme auf die Prüfspulenimpedanz	46
3.2.3	Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit (Legierung). Abhebeeffekt	48
3.2.4	Prüfung auf Materialfehler (Risse)	49
3.2.5	Einfluss der Prüffrequenz auf die Anzeigeempfindlichkeit	50
3.3	Das Durchlaufspulen-Verfahren	52
3.3.1	Feldstärke- und Wirbelstromverdrängung in zylindrischen Prüfkörpern. Wechselstrompermeabilität	52
3.3.2	Effektive Permeabilität, Grenzfrequenz, Arbeitskonstante	53
3.3.3	Wirkung der Prüfkorpereigenschaften auf die Durchlaufspule	56
3.3.4	Qualitätsprüfung nichtferromagnetischer zylindrischer Teile	58
3.3.5	Qualitätsprüfung ferromagnetischer zylindrischer Teile	60
3.3.6	Fehlerprüfung zylindrischer Teile	62
3.3.7	Qualitäts- und Fehlerprüfung von Rohren	64
3.3.8	Prüfung von Kugeln und kurzen Teilen	68
3.4	Das Verfahren mit Gabelspule (Transmissions-Verfahren)	69
3.4.1	Prinzip der Wirbelstromprüfung mittels Gabelspule	69
3.4.2	Das Durchlassvermögen T als analoge Größe zur effektiven Permeabilität	70
3.4.3	Eine Tastspulenanordnung nach dem Prinzip der Gabelspule	72

4	Spulen, Sonden, Sensoren	
4.1	Spulenarten	73
4.1.1	Durchlaufspulen	73
4.1.2	Tastspulen	74
4.1.3	Transmissions-Tastspulen (Gabelspulen)	74
4.1.4	Segmentspulen (Sattelspulen)	75
4.1.5	Flächenspulen	75
4.1.6	Wirbelstrom-Array-Techniken	76
4.1.7	Rotiersensoren	76
4.2	Spulenanordnungen	78
4.2.1	Absolutspulen	78
4.2.2	Differenzspulensystem mit Fremdvergleich	81
4.2.3	Differenzspulensystem mit Selbstvergleich	82
4.3	Spulenschaltungen	83
4.3.1	Parametrische Schaltung	83
4.3.2	Transformatorschaltung	83
4.3.3	Brückenschaltung	84
4.4	Spuleneffekte	84
4.4.1	Abhebeeffect (Lift-Off-Effekt)	84
4.4.2	Kipp- und Neigungseffekt	85
4.4.3	Kanteneffekt	85
4.4.4	Werkstoffeffekt	85
4.4.5	Fehlereffekt	86
4.5	Magnetfeldmessung mit Förster-Sonden und Hall-Generatoren	86
4.5.1	Förster-Sonde	86
4.5.2	Hall-Generator	88
5	Wirbelstrom-Prüfgeräte und Zubehör	
5.1	Gerätetechnischer Grundaufbau	89
5.2	Universal-Wirbelstromprüfgeräte	90
5.2.1	Blockschaltbild	90
5.2.2	Baugruppen	90
5.2.3	Filter	91
5.2.4	Abtaste	94
5.3	Volldigitale Prüfgeräte	97
6	Signaldarstellung und Prüfempfindlichkeit	
6.1	Anzeigearten	100
6.1.1	Instrumentenanzeige	100
6.1.2	X-Y-Darstellung (Punktdarstellung)	101
6.1.3	Y-t-Darstellung (zeitlineare Darstellung)	103
6.2	Signalauswertetechniken	104
6.2.1	Betragsauswertung	104
6.2.2	Phasenauswertung	104
6.2.3	Komponentenauswertung	105
6.2.4	Korrelationsverfahren	105
6.3	Störgrößen – Maßnahmen zur Reduzierung und Unterdrückung	105
6.3.1	Abhebeeffect (Lift-Off-Effekt)	106
6.3.2	Kipp- und Neigungseffekt	107

6.3.3	Kanteneffekt	108
6.3.4	Werkstoff- und Fehlereffekt	108
6.3.5	Frequenzwahl	108
6.3.6	Phasenselektion	109
6.3.7	Permeabilität als Störgröße	110
6.4	Prüfempfindlichkeit	110
6.4.1	Zur Definition der Prüfempfindlichkeit	111
6.4.2	Testkörper zur Beurteilung des Signalaufklärungsvermögens	113
6.4.3	Kontrollkörper zur Beurteilung der Eigenschaften von Spulen	114
6.4.4	Kalibrier- und Kontrollkörper in der praktischen Wirbelstromprüfung	117

7 Anwendungsgebiete der Wirbelstromprüfung

7.1	Prüfung auf Werkstoffeigenschaften	124
7.1.1	Vorbemerkungen	124
7.1.2	Messung von Koerzitivfeldstärke und Restmagnetisierung (Prüfung auf Gefüge- und Legierungsänderungen, Härte, Festigkeit u.a.)	125
7.1.3	Messung der elektrischen Leitfähigkeit (Prüfung auf Legierungsreinheit, Gefüge, Härte u.a.)	130
7.1.4	Verwechslungs- und Gefügeprüfung (Gefüge, Wärmebehandlung, Festigkeit, Härtetiefe, Randentkohlung u.a.)	134
7.1.5	Ferritgehaltbestimmung	135
7.1.6	Prüfung auf Korrosion	135
7.1.7	Einfluss von Wärmebehandlung und mechanisch-technologischen Eigenschaften von Stählen auf deren Magnetisierungskurve	135
7.1.8	Störfaktoren bei der Prüfung auf Werkstoffeigenschaften	137
7.2	Prüfung auf Materialfehler (Ungänzen)	138
7.2.1	Zylindrische und kugelförmige Prüfteile	138
7.2.2	Flächenförmige Teile	141
7.2.3	Offene und verdeckte Oberflächenfehler	142
7.2.4	Fehlerarten und Fehlersignale	144
7.2.5	Automatisierung des Prüfprozesses	147
7.2.6	Prüfung von Rohren in der Fertigung	149
7.2.7	Drahtprüfung	150
7.2.8	Prüfung von Stangenmaterial	153
7.2.9	Prüfung von Schienen	154
7.2.10	Prüfung von Wärmetauschern	157
7.2.11	Einflussgrößen auf das Wirbelstromsignal (Zusammenfassung)	161
7.3	Dimensionsprüfung	163
7.3.1	Schichtdickenmessung	163
7.3.2	Maßkontrolle	168
7.3.3	Wanddickenmessung	169
7.3.4	Risstiefenbestimmung	169

8 Sonderverfahren

8.1	Oberwellenanalyse. Barkhausen-Rauschen	171
8.1.1	Zerstörungsfreie Ermittlung mechanisch-technologischer Kennwerte	171
8.1.2	Oberwellenanalyse von Wirbelstromsignalen	172
8.1.3	Methode des Barkhausen-Rauschens	176

8.2	Impuls-Wirbelstrommethode	181
8.2.1	Beschreibung des Funktionsprinzips	181
8.2.2	Bandpositionierung und Banddickenmessung	183
8.2.3	Wanddickenmessung (Rohrleitungen, Bodenbleche)	184
8.2.4	Prüfung auf Korrosionsschäden	185
8.3	Fernfeld-Wirbelstromprüfung	187
8.3.1	Prinzip der Fernfeld-Technik	187
8.3.2	Sensorauslegung	189
8.3.3	Einflüsse auf die Prüfempfindlichkeit	189
8.3.4	Sensoren	190
8.3.5	Schattenwurf und Double Exciter	192
8.3.6	Prüfmöglichkeiten und Grenzen	193
8.4	Inspektion von Flächen. Array-Technik	195
8.4.1	Rotier- und Tellersensoren	195
8.4.2	Scanner-Systeme	197
8.4.3	Wirbelstromarrays. X-Probe	198
8.4.4	SLOFEC TM -Verfahren	203
9	Wirbelstromprüfung nach Normen und Regelwerken	
9.1	Normen und Regelwerke	205
9.1.1	Definitionen. Prüfstrategie	205
9.1.2	Verfahrensbezogene Regelwerke	205
9.1.3	Objektbezogene Regelwerke	206
9.2	Wirbelstromprüfung an Rohren	207
9.2.1	Prüfung nach DIN 54141, Teil 3	207
9.2.2	Prüfung nach EN 10246, Teil 1	208
9.2.3	Prüfung nach EN 10246, Teil 2	210
9.2.4	Prüfung nach EN 10246, Teil 3	212
9.2.5	Prüfung nach SEP 1914	214
9.2.6	Prüfung nach SEP 1917	216
9.2.7	Prüfung nach SEP 1925	218
9.2.8	Prüfung nach ASME-Code	219
9.3	Wirbelstromprüfung an Schweißverbindungen nach EN 1711	220
9.3.1	Prüfausrüstung	220
9.3.2	Durchführung der Prüfung	221
9.3.3	Typische Anzeigen bei der Prüfung von Schweißverbindungen	223
9.4	Prüfanweisungen und Verfahrensbeschreibungen	224
9.4.1	Inhalt von Prüfanweisungen	224
9.4.2	Inhalt von Verfahrensbeschreibungen	226
9.5	Protokollierung und Dokumentation der Prüfergebnisse	231
9.5.1	Erläuterung kontrollpflichtiger Angaben. Prüfprotokolle	231
9.5.2	Beurteilung und Entscheidungsfindung	232
9.5.3	Dokumentation	232
	Literaturverzeichnis	234
	Sachwortverzeichnis	245