

**Der Einsatz  
von Wirbelströmen  
für die  
Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung**

**Dieter Stegemann**

**em. ord. Professor Dr.-Ing.  
Fakultät für Maschinenbau  
Leibniz-Universität Hannover**

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>Vorwort</b> .....	<b>1</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>5</b>
1.1 Was sind Wirbelströme? .....	5
1.2 Warum lassen sich Wirbelströme für zerstörungsfreie Prüfungen einsetzen? .....	6
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>7</b>
2.1 Kenngrößen .....	7
2.1.1 Elektrische Spannung .....	7
2.1.2 Elektrischer Strom .....	9
2.1.3 Elektrischer Widerstand .....	9
2.1.4 Magnetische Felder .....	11
2.1.4.1 Magnetische Feldstärke .....	11
2.1.4.2 Magnetische Flussdichte .....	14
2.1.5 Induktivität .....	18
2.1.6 Impedanzebene .....	24
2.2 Magnetismus .....	29
2.2.1 Atomistische Deutung .....	29
2.2.2 Quantitative Erfassung .....	32
2.3 Wirbelstromverfahren .....	43
2.3.1 Arbeitsprinzip .....	43
2.3.2 Sondenarten .....	44
2.3.3 Eindringtiefe .....	46
2.3.4 Ähnlichkeitsgesetz .....	53
2.3.5 Effektivwertfunktion .....	56
2.3.6 Ortskurven .....	59
2.3.6.1 Signaldarstellung .....	59
2.3.6.2 Frequenzortskurve .....	67
2.3.6.3 Leitfähigkeitsortskurve .....	70
2.3.6.4 Abstandsortskurve .....	77
2.3.6.5 Phasentrennverfahren .....	80
2.3.6.6 Permeabilitätsortskurve .....	82
2.3.7 Sondenschaltungen .....	86
2.3.8 Gerätetechnik .....	93
2.3.9 Mehrfrequenzverfahren .....	96
2.3.10 Harmonische Analyse von Wirbelstromsignalen .....	98
2.3.11 Impuls-Wirbelstrom-Verfahren .....	102
2.3.12 Fernfeld-Verfahren .....	109
2.3.13 Bildgebende Wirbelstromprüfung .....	116
<b>3 Anwendungen</b> .....	<b>117</b>
3.1 Vorbereitungen .....	117
3.2 Rohrprüfung .....	118
3.3 Schweißnahtprüfung .....	122
3.4 Werkstoff-Charakterisierung .....	125

3.5	Schichtdickenmessung .....	152
3.6	Spezialgebiete .....	153
3.7	Verzeichnis von Anwendungen .....	154
<b>4</b>	<b>Sondenauslegung .....</b>	<b>159</b>
4.1	Messanordnung .....	159
4.2	Langgestreckte Durchlaufsonden .....	160
4.3	Sonden unterschiedlicher Geometrie .....	167
4.4	Helmholtz-Spule .....	177
<b>5</b>	<b>Wirbelstrommodelle .....</b>	<b>181</b>
5.1	Ausgangsgleichungen .....	181
5.2	Modell für Außendurchlaufsonde mit Rundstab als Prüfkörper .....	185
5.2.1	Berechnung des Magnetfeldes .....	185
5.2.2	Berechnung der Wirbelstromdichte .....	194
5.2.3	Einführung der Effektivwertfunktion .....	198
5.2.4	Ähnlichkeitsgesetz .....	208
5.2.5	Berechnung von Sondensignalen .....	209
5.2.6	Berechnung von Ortskurven .....	219
5.2.6.1	Frequenzortskurven .....	219
5.2.6.2	Leitfähigkeitsortskurven .....	222
5.2.6.3	Abstandsortskurven .....	224
5.2.6.4	Permeabilitätsortskurven .....	226
5.2.7	Fehlstellenbestimmung .....	230
5.2.7.1	Nichtferromagnetische Werkstoffe .....	231
5.2.7.2	Ferromagnetische Werkstoffe .....	234
5.3	Modell für Außendurchlaufsonde mit zylindrischem Rohr als Prüfkörper .....	236
5.3.1	Berechnungsgrundlage .....	236
5.3.2	Berechnung von Sondensignalen .....	241
5.3.3	Berechnung von Ortskurven .....	244
5.3.3.1	Frequenzortskurven .....	244
5.3.3.2	Leitfähigkeitsortskurven .....	246
5.3.3.3	Abstandsortskurven .....	246
5.3.3.4	Permeabilitätsortskurven .....	247
5.3.4	Fehlstellenbestimmung .....	248
5.3.4.1	Nichtferromagnetische Rohre .....	249
5.3.4.2	Ferromagnetische Rohre .....	252
5.4	Vergleich von Messungen und Modellergebnissen .....	254
5.4.1	Außendurchlaufsonde ohne Werkstoff .....	255
5.4.2	Außendurchlaufsonde mit Rundstab .....	257
5.4.3	Außendurchlaufsonde mit Rohr .....	262
<b>6</b>	<b>Bezeichnungen .....</b>	<b>267</b>
<b>7</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>271</b>
<b>8</b>	<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>351</b>