

M. Sc. Yunqiang Wang, Kassel

**Trennung der Einflußgrößen
von Wirbelstromsensoren
durch Signalverarbeitung
mit Hilfe von Feldunter-
suchung und Modellierung**

Reihe **8**: Meß-, Steuerungs-
und Regelungstechnik

Nr. **557**

Inhaltverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen des Wirbelstromsensors	7
2.1	Ursachen und Wirkung	7
2.2	Skineffekt und Eindringtiefe	8
2.3	Proximity-Effekt	9
2.4	Temperatureinfluß	9
3	Theoretische Untersuchung der Spulenimpedanz	11
3.1	Feld- und Diffusionsgleichungen	11
3.2	Spulenimpedanz mit Einzelwindung	13
3.2.1	Berechnungsmodell,	13
3.2.2	Feldproblem eines Kreisstroms	14
3.2.3	Feldproblem eines Kreisstroms mit Dämpfungsobjekt	22
3.2.4	Analytische Darstellung der Spulenimpedanz	26
3.2.5	Diskussion der Ergebnisse	29
3.3	Spulenimpedanz mit mehreren Lagen und Windungen	32
3.3.1	Eine Lage mit N Windungen	32
3.3.2	Mehrere Lagen mit je N Windungen	33
3.4	Vergleich der theoretischen Berechnung mit Meßergebnissen	35
4	Finite-Elemente-Methode zur Untersuchung einer Wirbelstromspule mit Ferrit- kern	40
4.1	Berechnungsmodell	40
4.2	Ergebnisse	42
4.3	Vergleich der Berechnung mit Messungen	46
5	Modellierung eines Wirbelstromsensors mittels Ersatzschaltung	51
5.1	Physikalisches Modell	51
5.2	Parameterberechnung	53

5.3	Frequenzdifferenz $\Delta\omega$ bei Doppelmessungen	58
5.4	Beispiel	61
5.5	Gültigkeit der Modellierung	68
5.6	Trennung des Temperaturgangs des Drahtwiderstands von den Meßgrößen	69
5.7	Materialeinfluß	77
6	Trennung des Meßabstands vom Material des Meßobjekts	81
6.1	Meßvorgang	81
6.2	Kompensationsfahren zur Unterdrückung des Materialeinflusses	83
6.2.1	Kompensation mit zwei verschiedenen Materialien	83
6.2.1.1	Kompensation der Materialabhängigkeit bei einem Abstand a_0	85
6.2.1.2	Arbeitsbereich mit reduzierter Materialabhängigkeit	87
6.2.2	Weitere mögliche mathematische Kompensationsfunktionen	93
6.2.3	Kompensation mit anderen Meßgrößen	95
6.2.4	Untersuchungen mit verschiedenen metallischen Materialien	98
6.2.4.1	Nichtferromagnetische Metalle	98
6.2.4.2	Ferromagnetische Metalle	102
6.2.4.3	Ferro- und nichtferromagnetische Metalle	107
6.2.5	Empfindlichkeit	108
6.2.6	Realisierung bei einem induktiven Näherungsschalter	109
6.2.6.1	Funktionsweise eines induktiven Näherungsschalters	110
6.2.6.2	Elektronische Schaltung und Ergebnisse	111
6.2.6.3	Erhöhung der Empfindlichkeit	118
6.3	Mathematisches Iterationsverfahren	119
6.3.1	Prinzip	121
6.3.2	Speicherung der Meßkurven	122
6.3.3	Ergebnisse und Fehleruntersuchung	122
6.4	Technische Realisierung	124

6.4.1	Meßschaltung	124
6.4.2	Unterdrückung des Temperaturgangs	127
6.5	Vergleich der komplexen Impedanzmessung mit der Gütemessung . . .	127
7	Trennung mehrerer physikalischer Parameter	129
7.1	Trennung des Meßabstands von einer weiteren geometrischen Größe . .	129
7.1.1	Meßaufbau	129
7.1.2	Unterdrückung des Durchmesserinflusses	130
7.1.3	Iterationsverfahren	133
7.2	Trennung von vier physikalischen Parametern	133
7.2.1	Prinzip	134
7.2.2	Schätzung der Permeabilität μ_r und Leitfähigkeit σ einer Metallplatte	140
7.2.3	Technische Realisierung	140
8	Zusammenfassung und Ausblick	141
9	Anhang	145
A.1	Herleitung der elektrischen Parameter im Ersatzmodell ohne Meßobjekt	145
A.2	Herleitung der elektrischen Parameter im Ersatzmodell mit Meßobjekt	148
10	Literatur	152