

Dipl.-Ing. Heike Laqua, Garching

**Berührungslose
Geschwindigkeitsmessung
von Straßen- und
Schienenfahrzeugen
mit Mikrowellensensoren**

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

Nr. **543**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Meßprinzipien	3
2.1	Der Dopplereffekt	3
2.2	Der Speckleeffekt	6
3	Systemtheoretisches Modell der Signalentstehung	11
3.1	Grundlagen der skalaren Beugungstheorie	11
3.1.1	Freiraumausbreitung eines Feldes von einer gaußförmig belegten Apertur	13
3.1.2	Sende- und Empfangsgeometrie für einen allgemeinen Radarsensor	17
3.2	Statistisches Modell der Streuung elektromagnetischer Wel- len an wenig rauhen Oberflächen	19
3.2.1	Definition der wenig rauhen Oberfläche	19
3.2.2	Beschreibung mittels Störungsrechnung	21
3.2.3	Bewertung des Störungsansatzes	25
3.3	Demodulation	26
3.3.1	Inkohärente Demodulation	26
3.3.2	Kohärente Demodulation	28
4	Statistik der Signale	30
4.1	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Signale	30
4.2	Leistungsdichtespektrum des Dopplersignals	33
4.3	Kreuzkorrelationsfunktion der Specklesignale	41
5	Schätzung einer eindimensionalen Geschwindigkeitskompo- nente	52
5.1	Dopplerverfahren	52
5.1.1	Systematische Fehler	53

5.1.2	Minimaler zufälliger Fehler der Doppler-Geschwindigkeitsschätzung	57
5.1.3	Dopplerfrequenzschätzung durch Nulldurchgangszählung	60
5.1.3.1	Aufbau des Zählers	60
5.1.3.2	Varianz der Schätzung	62
5.1.4	Geschwindigkeitsschätzung mit Frequenztrackern . .	66
5.1.4.1	Funktionsprinzip	66
5.1.4.2	Varianz des Frequenztrackers	69
5.2	Speckleverfahren	76
5.2.1	Systematische Fehler	77
5.2.2	Minimaler zufälliger Fehler der Speckle-Geschwindigkeitsschätzung	81
5.2.3	Geschwindigkeitsschätzung mit dem Laufzeitkorrelationsverfahren	86
5.2.3.1	Funktionsweise des Laufzeitkorrelators . . .	86
5.2.3.2	Varianz der Laufzeitschätzung	90
5.3	Vergleich der Verfahren	94
6	Schätzung eines zweidimensionalen Geschwindigkeitsvektors	96
6.1	Dopplerverfahren	96
6.1.1	Sensorkonfiguration	96
6.1.2	Systematische und zufällige Fehler	97
6.2	Speckleverfahren	99
6.2.1	Sensorkonfiguration	99
6.2.2	Systematische und zufällige Fehler	104
7	Meßergebnisse	106
7.1	Messung der Längsgeschwindigkeit eines Kraftfahrzeugs . .	106
7.1.1	Meßergebnisse mit dem Dopplersensor	106

7.1.2	Meßergebnisse mit Specklesensoren	111
7.1.3	Vergleich der Verfahren	115
7.2	Messung der Geschwindigkeit und des Schwimmwinkels im Kraftfahrzeug	116
7.2.1	Meßergebnisse mit dem Specklesensor	116
7.3	Messung der überfahrenen Wegstrecke eines Schienenfahrzeugs	120
8	Zusammenfassung	125
A	Anhang	127
A.1	Anhang zu Abschnitt 4.3	127
A.2	Anhang zu Abschnitt 7.2	130
	Symbolverzeichnis	133
	Literatur	137