

# **Der Einfluss von Windparks auf Drehfunkfeuer und Radar-Anlagen durch Mehrwegeausbreitung**

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

**Dr.-Ing.**

genehmigte Dissertation  
von

Dipl.-Ing. Sergei Sandmann  
geboren am 18.08.1984 in Omsk, Russland

# Inhaltsverzeichnis

## Abkürzungs-/Symbolverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Stand der Forschung . . . . .	3
1.2.1	Analytischer Ansatz . . . . .	4
1.2.2	Messtechnischer Ansatz . . . . .	5
1.2.3	Messtechnisch skaliertes Ansatz . . . . .	6
1.2.4	Numerischer Ansatz . . . . .	7
1.3	Struktur der Arbeit . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Elektromagnetische Feldsimulationsmethoden</b>	<b>11</b>
2.1	Method of Moments . . . . .	13
2.2	Multi Level Fast Multipole Method . . . . .	14
2.3	Geometrical Optics und Uniform Theory of Diffraction . . . . .	16
2.4	Physical Optics und Physical Theory of Diffraction . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Doppler-Drehfunkfeuer</b>	<b>22</b>
3.1	Funktionsweise und Störprinzipien . . . . .	23
3.2	Herleitung der Berechnungsvorschrift für die Zielgröße . . . . .	28
3.2.1	Theoretische Berechnungsvorschrift der Zielgröße . . . . .	29
3.2.2	Transformation in den Frequenzbereich und Diskretisierung . . . . .	32
3.2.3	Ermittlung der erforderlichen Simulationsschritte . . . . .	34
3.2.4	Demodulation der Signale und Ausgabe der Bearing-Werte . . . . .	40
3.3	Minimierung des numerischen Aufwandes . . . . .	42
3.3.1	Separate Berechnung der Modulationssignale . . . . .	44
3.3.2	Überführung der Berechnung ins Basisband . . . . .	45
3.3.3	Zyklische Demodulation . . . . .	48
3.4	Validierung durch Messungen . . . . .	54
3.5	DVOR-Störungsmuster von Windenergieanlagen . . . . .	58
3.6	Unsicherheitsbetrachtungen . . . . .	62

<b>4 Konventionelle Drehfunkfeuer</b>	<b>70</b>
4.1 Funktionsweise und Störprinzipien . . . . .	71
4.2 Herleitung der Berechnungsvorschrift für die Zielgröße .	76
4.2.1 Theoretische Berechnungsvorschrift der Zielgröße	77
4.2.2 Transformation in den Frequenzbereich und Diskretisierung . . . . .	80
4.2.3 Ermittlung der erforderlichen Simulationsschritte	81
4.2.4 Demodulation der Signale und Ausgabe der Bearing-Werte . . . . .	84
4.3 Minimierung des numerischen Aufwandes . . . . .	84
4.3.1 Separate Berechnung der Modulationssignale . .	86
4.3.2 Überführung der Berechnung ins Basisband . . .	87
4.3.3 Zyklische Demodulation . . . . .	90
4.4 Validierung durch Messungen . . . . .	95
4.5 CVOR-Störungsmuster von Windenergieanlagen . . . .	98
4.6 Unsicherheitsbetrachtungen . . . . .	101
<b>5 Radar</b>	<b>108</b>
5.1 Impuls-Radar . . . . .	109
5.1.1 Funktionsweise und Störprinzipien . . . . .	109
5.1.2 Numerische Berechnung des Radar-Echos . . . .	110
5.1.3 Validierung . . . . .	113
5.1.4 Unsicherheitsbetrachtungen . . . . .	113
5.2 Pulskompressions-Radar . . . . .	117
5.2.1 Funktionsweise und Störprinzipien . . . . .	117
5.2.2 Numerische Berechnung und Validierung . . . .	118
5.2.3 Unsicherheitsbetrachtungen . . . . .	121
5.3 Moduliertes Dauerstrich-Radar . . . . .	121
5.3.1 Funktionsweise und Störprinzipien . . . . .	122
5.3.2 Numerische Berechnung des Radar-Echos . . . .	125
5.3.3 Validierung . . . . .	129
5.3.4 Unsicherheitsbetrachtungen . . . . .	134
5.4 Unmoduliertes Dauerstrich-Radar . . . . .	136
5.4.1 Funktionsweise und Störprinzipien . . . . .	137
5.4.2 Numerische Berechnung des Radar-Echos . . . .	137
5.4.3 Validierung . . . . .	139
5.4.4 Unsicherheitsbetrachtungen . . . . .	139
<b>6 Zusammenfassung</b>	<b>141</b>

**Anhang**

<b>A</b>	<b>Ergänzungen zum Inhalt</b>	<b>A-145</b>
A.1	Repräsentative Windenergieanlage . . . . .	A-145
A.2	Validierungsszenario „DVOR HLZ“ . . . . .	A-146
A.3	Validierungsszenario „DVOR KLF“ . . . . .	A-149
A.4	DVOR-WEA-Parameterstudie . . . . .	A-151
A.5	3D-Berechnung der DVOR-Fehlerausbreitung . . . . .	A-158
A.6	Überlagerung von DVOR-Störungen . . . . .	A-160
A.7	CVOR-WEA-Parameterstudie . . . . .	A-165
A.8	Validierungsszenario „CVOR NIE T-Profil“ . . . . .	A-173
A.9	Validierungsszenario „CVOR NIE $\Gamma$ -Profil“ . . . . .	A-174
A.10	Radar-Validierung für $\gamma = 40^\circ$ . . . . .	A-175
A.11	Radar-Validierung für $\gamma = 0^\circ$ . . . . .	A-176
<b>B</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>A-177</b>
<b>C</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>A-182</b>
<b>D</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>A-183</b>