

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1. Zielsetzung und Struktur der Arbeit . . . . .	4
1.2. Stand der Technik . . . . .	5
1.2.1. Gutachten und Stellungnahmen . . . . .	5
1.2.2. Elektromagnetische Feldsimulationen . . . . .	6
1.2.3. Mathematische Beschreibung . . . . .	7
1.2.4. Skalierte Modelle . . . . .	7
1.2.5. Messung mit Drohnen . . . . .	7
1.2.6. Messungen mit der Forschungsflugzeug der Jade Hochschule . . . . .	8
<b>2. Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1. Funktionsweise eines VOR . . . . .	9
2.1.1. Signalstruktur eines VOR . . . . .	9
2.1.2. Radialbestimmung anhand der Aussendung eines VOR . . . . .	11
2.1.3. Diskretes Linienspektrum mit 30 Hz Grundfrequenz . . . . .	11
2.1.4. HF-Signal eines DVOR als diskretes Linienspektrum . . . . .	13
<b>3. Entwicklung der VOR Messhardware</b>	<b>15</b>
3.1. Messhardware . . . . .	15
3.2. Software Defined Radio . . . . .	16
3.2.1. Analoger Empfangsteil . . . . .	16
3.3. Red Pitaya . . . . .	16
3.3.1. Modifikationen am Red Pitaya . . . . .	17
3.4. Frequenznormal . . . . .	18
3.4.1. GPSDO . . . . .	18
3.5. Digitale Signal Vorverarbeitung im FPGA . . . . .	18
3.5.1. Mischen, Filtern und Dezimieren . . . . .	19
3.5.2. Datenübertragung zum Host PC . . . . .	20
3.6. Eigenschaften des Eingangsbandpassfilters . . . . .	20
3.7. Bemessung der Zwischenfrequenz . . . . .	22
3.7.1. Spiegelfrequenz . . . . .	22
3.8. Empfindlichkeit und Großsignalfestigkeit . . . . .	23
3.8.1. Rauschzahl . . . . .	23
3.8.2. IP3 und Übersteuerungsgrenze . . . . .	23
3.8.3. Dynamik . . . . .	24
3.8.4. Nutzbarer Einsatzbereich des SDR . . . . .	25
3.9. Phasenrauschen . . . . .	26
3.9.1. Gemessenes Phasenrauschen des SDR . . . . .	27
3.9.2. Optimierungspotenzial . . . . .	28
3.9.3. Kommerzielle Messhardware ist unzureichend . . . . .	28
3.10. VOR Frequenzkorrektur . . . . .	28
3.10.1. Frequenzkorrektur durch Bodenstation . . . . .	29

<b>4. Durchführung regulärer VOR Vermessung</b>	<b>31</b>
4.1. Forschungsflugzeug Jade One	31
4.1.1. Antennenkonstellation und Empfangscharakteristik	31
4.2. Demodulation der Radialinformation	32
4.2.1. Eingangsbandpass	33
4.2.2. AM-Demodulation	33
4.2.3. FM-Demodulation	33
4.2.4. 30 Hz Bandpassfilter	34
4.3. Charakteristik der FM-Modulation	35
4.3.1. FM-Schwelle	36
4.3.2. FM-Modulationsgewinn	36
4.3.3. Glättungsfilter	36
4.3.4. Mindestempfangsleistung	36
4.4. Radiale- und Orbitale Messflugmanöver	37
4.4.1. Empfangsleistung	37
4.4.2. Erdkrümmung	40
4.4.3. Diskussion der Pegelanforderungen	40
4.5. Rauschen der AM- und FM-Komponente	40
4.5.1. Analytische Beschreibung	41
4.5.2. FM-Schwelle zurückgerechnet auf HF-SNR	43
4.6. Gemessener Winkelfehler	44
4.6.1. Qualität der AM und FM-Komponente	44
4.6.2. Getrennte Analyse von AM- und FM-Komponente	46
4.7. Erwartetes und gemessenes Rauschen der AM-Komponente	50
<b>5. Verbesserung der Referenzphase beim DVOR-Empfang durch Frequenzteilung</b>	<b>53</b>
5.1. Grenzen durch schmalbandige Filterung	53
5.2. Gewinnung der AM-Phase aus der FM-Komponente	53
5.3. Radialunabhängige Spektrallinie der FM-Komponente	54
5.4. Frequenzteilung durch 332	54
5.4.1. Teilungsgewinn	55
5.4.2. Mehrdeutigkeitsproblem	56
5.4.3. Praktische Aspekte	56
5.5. Praktisch nutzbarer Teilungsgewinn	58
5.6. Fazit	59
<b>6. Signalaufbereitung für das Doppler-Kreuzpeilverfahren</b>	<b>61</b>
6.1. Wasserfallpektrum nach der AM-Demodulation	61
6.2. Wasserfallpektrum im IQ-Basisband unkorrigiert	61
6.3. Frequenzkorrektur des DVOR mittels Bodenreferenzstation	62
6.4. Entfernungskorrektur	66
6.5. Mehrwegeausbreitung	67
6.5.1. Einführung eines Koordinatensystems	69
6.6. Positionsbestimmung anhand der Tangente	71
6.6.1. Positionsbestimmung anhand eines Beispiels	72
6.7. Genauigkeit der Positionsbestimmung	73
6.8. Artefakte durch den realen Orbitalflug	76
6.8.1. Auswirkung der Kursabweichung auf den Winkel zum Streuobjekt	78
6.8.2. Praktische Bedeutung der Entfernungskorrektur	79

<b>7. Doppler-Kreuzpeilverfahren</b>	<b>81</b>
7.1. Überlagerung mehrerer Signalpfade . . . . .	81
7.2. Separation durch Filterung . . . . .	82
7.2.1. Frequenzverschiebung . . . . .	84
7.2.2. Informationsgehalt nach der Signaltrennung . . . . .	85
7.3. Eigentliche Kreuzpeilung . . . . .	86
7.3.1. Mehrdeutigkeit . . . . .	87
7.3.2. Bedingungen für infrage kommende Lösungen . . . . .	88
7.3.3. Praktische Bedeutung der Mehrdeutigkeit . . . . .	89
7.4. Genauigkeit der Peilung . . . . .	89
7.4.1. Mathematische Beschreibung der Peilung . . . . .	90
7.4.2. Unsicherheitbeiträge . . . . .	91
7.4.3. Parameter zur Beschreibung der Ellipse . . . . .	93
7.4.4. Zahlenbeispiel . . . . .	95
7.4.5. Praktisch erreichte Genauigkeit . . . . .	96
7.5. 3D Lösungsraum . . . . .	97
7.5.1. Fehler durch Projektion . . . . .	98
7.5.2. Abschätzung des resultierenden Fehlers . . . . .	100
7.6. FM-Demodulation durch Kreuzkorrelation . . . . .	101
7.6.1. Analyse im linearen IQ-Basisband . . . . .	102
7.6.2. Kreuzkorrelation . . . . .	103
7.6.3. Charakteristik der Kreuzkorrelationsfunktion . . . . .	104
7.6.4. Radialbestimmung durch Korrelation . . . . .	105
7.6.5. Überlagerung mehrerer Signale . . . . .	108
7.6.6. Vergleich zur konventionellen FM-Demodulation . . . . .	109
7.6.7. Gleiche AM-Phase für alle Streuobjekte . . . . .	110
7.6.8. Praktische Berechnung mittels Optimalfilter . . . . .	110
7.7. Gauß-Fenster . . . . .	111
7.7.1. Rauschbandbreite . . . . .	112
7.7.2. Praktisch verwendetes Korrelationsfilter . . . . .	113
7.8. Analyse durch Synthese . . . . .	115
7.8.1. Analyse eines Zeitausschnittes . . . . .	117
7.8.2. Steilheit der Peilstrahlen zueinander . . . . .	120
7.8.3. Praktisch erreichte Genauigkeit . . . . .	121
7.9. Automatisierte Erstellung einer Clutter-Map . . . . .	122
7.9.1. Korrelationsnebenmaxima . . . . .	123
7.10. Öffnungswinkel von Streuobjekten . . . . .	124
7.10.1. Worst Case Abschätzung . . . . .	127
7.11. Nutzung des Trägerphasenterms zur genaueren Positionsbestimmung . . . . .	127
7.12. Korrelationsmethode nur auf DVOR anwendbar . . . . .	128
7.13. Maß für die Reflektivität . . . . .	128
7.13.1. Friis-Übertragungsgleichung . . . . .	129
7.13.2. Radargleichung . . . . .	129
7.13.3. dBsm . . . . .	131
7.13.4. Störwirkung eines Streuobjekts . . . . .	131
7.13.5. Störwirkung von WEA . . . . .	131
7.14. Mathematische Winkelfehlermodellierung . . . . .	132
7.14.1. Praktische Verwendung . . . . .	133

*Inhaltsverzeichnis*

<b>Anhang A. Anhang</b>	<b>135</b>
A.1. Herleitungen zum Kegelschnitt . . . . .	135
A.1.1. Zwischenbeweis . . . . .	139
A.2. Zweidimensionale Kreuzkorrelation . . . . .	139
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>143</b>
<b>Abstract</b>	<b>147</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>149</b>