

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
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 Feldsumationen	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
2. Grundlagen	9
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
3. Entwicklung der VOR Messhardware	15
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. Datenübertagung 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

4. Durchführung regulärer VOR Vermessung	31
4.1. Forschungsflugzeug Jade One	31
4.1.1. Antennenkonstellation und Empfangscharakteristik	31
4.2. Demodulation der Radialinformation	32
4.2.1. Eingangs-Bandpass	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-Modulationsgewinns	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
5. Verbesserung der Referenzphase beim DVOR-Empfang durch Frequenzteilung	53
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
6. Signalaufbereitung für das Doppler-Kreuzpeilverfahren	61
6.1. Wasserfallspektrum nach der AM-Demodulation	61
6.2. Wasserfallspektrum 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

7. Doppler-Kreuzpeilverfahren	81
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. Unsicherheitsbeiträge	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

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