

Inhaltsverzeichnis

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	v
1. Einleitung	1
1.1. Hintergrund dieser Arbeit	2
1.1.1. Elektromagnetische Hochleistungsimpulse	2
1.1.2. HPEM-Systeme	3
1.1.3. Phased Arrays und Rotman-Linse	5
1.2. Aufgabenstellung und Lösungsansatz	7
2. HPEM-Systeme mit <i>True-Time-Delay</i>-Ansteuerung im Frequenz- und im Zeitbereich	9
2.1. Breitbandige Hochleistungsimpulse	9
2.1.1. Besonderheit bei impulsförmigen Signalen im Zeitbereich	10
2.2. Auswirkungen einer HPEM-Störung	11
2.2.1. Eindringmechanismen	11
2.2.2. Auswirkung auf die Elektronik	12
2.2.3. Notwendige Feldstärken	13
2.2.4. Auswirkung auf den Menschen	14
2.3. Arrayfaktor für Antennengruppen	14
2.3.1. Allgemeine Formulierung	14
2.3.2. Gruppenfaktor einer linearen Antennengruppe	16
2.3.3. Kontinuierliche Quellen	16
2.3.4. Allgemeine Formulierung	17
2.3.5. <i>Beamforming</i> einer linearen Gruppenantenne	18
2.3.6. Antennenansteuerung zum <i>Beamforming</i>	18
2.3.7. <i>Phased Arrays</i>	19
2.3.8. <i>True Time Delay</i>	19
2.3.9. <i>Grating Lobes</i>	20
2.4. Antennensysteme im Zeitbereich	21
2.4.1. Lineare zeitinvariante Systeme	21
2.4.2. Beschreibung einer Antenne als LTI-System	21
2.4.3. Beschreibung von Antennengruppen im Zeitbereich	22
2.5. Gütekriterien im Frequenzbereich	23
2.5.1. Standardabweichung der Gruppenlaufzeit	24
2.6. Gütekriterien im Zeitbereich	24
2.6.1. Spitzenwert der Impulsantwort	24
2.6.2. Zeitliche Halbwertsbreite	25

2.6.3.	Nachschwingen	25
2.6.4.	Impulsverbreiterung	25
2.6.5.	Impulsanstiegszeit	26
3.	Die Rotman-Linse als Realisierung von <i>True-Time-Delay Beamforming</i>	27
3.1.	Einleitung	27
3.2.	Geometrischer Aufbau der Rotman Linse	27
3.2.1.	Luftgefüllte Parallelplattenregion	28
3.2.2.	Mit Substrat gefüllte Parallelplattenregion	31
3.2.3.	<i>Array Ports</i> - Ausgangsports aus der Parallelplattenregion	34
3.3.	Form des <i>Focal Arc</i> - zusätzliche Speisepunkte	34
3.3.1.	<i>Circular Focal Arc</i>	34
3.3.2.	<i>Elliptical Focal Arc</i>	37
3.3.3.	Weitere Formen des <i>Focal Arc</i>	39
3.4.	Form einer Beispielgeometrie und deren Phasenfehler	39
3.4.1.	Variation der Design-Parameter	40
3.4.2.	Phasenfehler der Beispielgeometrie	42
3.5.	Grenzen der strahlenoptischen Überlegungen	42
3.6.	Ein- und Ausspeise-Ports	43
3.6.1.	Richtcharakteristik eines Ports	44
3.7.	Parallelplattenregion	45
3.7.1.	Leistungsübertragung von einem <i>Beam Port</i> zu einem <i>Array Port</i>	45
3.7.2.	Anpassung eines Ports	46
3.8.	Analytisches Systemmodell	47
3.9.	Folgerungen aus dem analytischen Systemmodell	48
3.10.	Systemmodell mit <i>Beamformer</i> und Antennen	49
4.	Entwicklung einer Rotman Linse für den FCC-UWB-Bereich	51
4.1.	Anforderungen	51
4.2.	Mikrostreifenleitung	51
4.2.1.	Effektive Permittivität	51
4.2.2.	Leitungswellenwiderstand	52
4.2.3.	Auftretende Wellen	52
4.2.4.	Dispersion	55
4.3.	Vor-Design anhand des analytischen Systemmodells	55
4.4.	Optimierung mit numerischen Feldsimulationen	57
4.4.1.	Verkopplung der Zuleitungen	59
4.4.2.	Ausrichtung der Ports	60
4.4.3.	Phasenzentrum der Ports	61
4.4.4.	Seitenbereiche	62
4.5.	Untersuchung des Leistungsverhaltens	63
4.5.1.	Verluste in der Linse	63
4.5.2.	Linse innerhalb einer Metallbox	65
4.5.3.	Abstrahlung	65

4.6.	Auftretende Moden	66
4.7.	Vermessung eines Prototyps	67
4.7.1.	Abmessungen des Prototyps	68
4.7.2.	Messung der S-Parameter	68
4.7.3.	Messung mit einer Antennengruppe	72
4.7.4.	Zeitbereichsmessung und Auswertung der Gütekriterien	76
4.8.	Bewertung der Messergebnisse	79
4.9.	Technische Alternativen für <i>True Time Delay</i>	81
5.	Entwicklung einer antipodalen Vivaldiantenne für HPEM-Systeme	83
5.1.	Ultrabreitbandige, impulsabstrahlende Antennen für hohe Leistung	83
5.1.1.	TEM-Hornstrahler mit linearer Taperung	83
5.1.2.	TEM-Hornstrahler mit exponentieller Taperung	84
5.1.3.	<i>Impulse Radiating Antenna</i> (IRA)	84
5.1.4.	Antipodale Vivaldi-Antenne	85
5.2.	Geometrie der antipodalen Vivaldi-Antenne	86
5.3.	Untersuchungen zur Verbesserung des Abstrahlverhaltens	87
5.3.1.	Einsatz unterschiedlicher Substratmaterialien	87
5.3.2.	Unterschiedliche Antennenlängen	89
5.3.3.	Kreisförmiges Substrat in Abstrahlrichtung	90
5.4.	Untersuchungen zur Minimierung von rückfließenden Strömen	92
5.4.1.	Optimierung der Schlitzöffnungsrate r_v	93
5.4.2.	Abrundung der Flügelaußenseiten	94
5.4.3.	Resonanzstreifen in den Flügeln	94
5.4.4.	Absorbermaterial auf den Flügeln	98
5.4.5.	Resistiver Abschluss am Schlitzleitungsende	98
5.5.	Prototyp im Frequenzbereich 240 MHz bis 5 GHz	101
5.5.1.	Verlustabschätzung	104
5.5.2.	Zeitbereichgütekriterien	104
6.	Entwicklung einer Rotman-Linse für HPEM-Systeme und Verifikations-	107
	messungen	
6.1.	Anforderungen	107
6.2.	Vor-Design anhand des analytischen Systemmodells	107
6.3.	Analytische Optimierung der Rotman-Linse	109
6.4.	Optimierung mit numerischen Feldsimulationen	109
6.5.	Untersuchung der Leistungsbelastbarkeit	111
6.5.1.	Verluste in der Linse	111
6.5.2.	Hohe Leistungen und hohe Spannungen	114
6.6.	Auftretende Moden	115
6.7.	Herstellung und Vermessung eines Prototypen	120
6.7.1.	Aufbau der HPEM-Linse	120
6.7.2.	Messung der S-Parameter	123
6.7.3.	Zeitbereichsmessung und Auswertung der Gütekriterien	123

7. Systembetrachtung	129
7.1. Eingangspuls	129
7.1.1. Spektrum	129
7.1.2. Einfluss der Pulswiederholfrequenz	132
7.2. Strahlschwenkung der Vivaldi-Antennengruppe mit der Rotman-Linse als Speisernetzwerk	133
7.3. Reichweite	134
7.4. Zeitbereichsergebnisse für das Vivaldi-Antennenarray mit Rotman-Linse	136
7.5. Fazit	138
8. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	141
Literaturverzeichnis	145
A. Anhang	153
A.1. <i>Zeropadding</i> im Frequenzbereich	153
A.2. Definition der Antennenübertragungsfunktion [FB98], [SW05]	153
A.3. Spektren verschiedener Pulsformen	156
A.4. Berechnung der spektralen Leistungsdichte [MAT08]	159
A.5. Entstehung von <i>Grating Lobes</i> [Zwi09]	159
A.6. Mikrostreifenleitungen [KG79], [Thu07]	160
A.7. Maximale Leistungsübertragung über Mikrostreifenleitungen	160
A.8. Dämpfung einer Mikrostreifenleitung [Thu07]	161
A.9. Berechnung des normierten elektrischen Feldes im Zeitbereich	162
A.10. Entfaltung	163
A.11. Weitere S-Parameter der UWB-Linse	164
A.12. Zeitbereichsmessung der UWB Rotman-Linse	166
A.13. S-Parameter der HPEM Rotman Linse (Simulation)	168
A.14. S-Parameter der HPEM Rotman-Linse (Messung)	171
A.15. Zeitbereichsmessung der HPEM Rotman-Linse	175