

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einleitung.....	9
2 Materialien mit negativem Brechungsindex	13
2.1 Identifizierung negativ brechender Medien	13
2.1.1 Reelle Materialparameter.....	13
2.1.2 Verallgemeinerung für komplexe Materialparameter.....	17
2.2 Entropiebedingung bei negativem Brechungsindex	21
2.3 Die Randbedingungen.....	23
2.3.1 Randbedingungen für die Feldgrößen.....	23
2.3.2 Randbedingungen für die Wellenvektoren	25
2.3.3 Fresnel Koeffizienten.....	27
2.4 Negative Brechung.....	28
2.4.1 Planparallele Linsen.....	28
2.4.2 Umkehr der Eigenschaften gewöhnlicher Linsen	31
2.5 Die perfekte Linse	33
2.5.1 Evaneszente Wellen	33
2.5.2 Begrenzung der Auflösung gewöhnlicher Linsen.....	35
2.5.3 Die linkshändige Planplatte als perfekte Linse	36
2.5.4 Einschränkungen in der Praxis.....	39
2.6 Historischer Überblick	40
3 Metamaterialien	43
3.1 Grundkonzept und Definition eines Metamaterials	43
3.2 Dielektrische Metamaterialien	45
3.2.1 Metalle als Materialien mit negativer Permittivität	45
3.2.2 Die „Thin Wire“ Struktur.....	47
3.2.3 Die „Cut-Wire“ Struktur	52

3.3 Magnetische Metamaterialien	54
3.3.1 Metallische Zylinder.....	54
3.3.2 Der „Split-Ring Resonator“.....	58
3.3.3 Draht- und Plattenpaare als magnetische Metamaterialien	60
3.4 Metamaterialien mit einem negativen Brechungsindex	62
3.4.1 Linkshändige Metamaterialien für Mikrowellen.....	63
3.4.2 Negativ brechende Materialien bei optischen Frequenzen.....	64
3.4.2.1 Die „Cut-Wire Pair“ Struktur für negative Brechung	64
3.4.2.2 Die Fischnetz Struktur.....	65
3.5 Analyse und Charakterisierung von Metamaterialien.....	66
3.5.1 Interpretation der Transmissions- und Reflexionskurven	66
3.5.2 Bestimmung der Parameter mit Hilfe interner Felder	68
3.5.2.1 Die Feldmittlungsmethode.....	68
3.5.2.2 Bestimmung der Parameter über den internen Feldverlauf.....	69
3.5.3 Inversion der Streuparameter	71
3.5.3.1 Die klassische Inversionsmethode.....	72
3.5.3.2 Die erweiterte Inversionsmethode.....	75
4 Die Doppel-Kreuz Struktur	77
4.1 Geometrischer Aufbau und Funktionsprinzip	77
4.2 Numerische Verifikation des negativen Brechungsindex	78
4.3 Realisierung des Metamaterials im Mikrowellenbereich.....	85
4.3.1 Einfluss des Hintergrundmaterials	86
4.3.2 Anpassung der Strukturparameter	90
4.3.3 Experimentelle Bestätigung der negativen Refraktion.....	92
4.3.3.1 Implementierung des Metamaterials und des Messaufbaus	92
4.3.3.2 Experimentelle Ergebnisse	95
4.4 Adaption der Geometrie für Wellen im Terahertz-Bereich	100
4.4.1 Fabrikation der Doppel Kreuze	101
4.4.2 Numerische und experimentelle Ergebnisse	104
4.4.3 Parameterstudien	110

5 Funktionselemente für Terahertz-Strahlung	119
5.1 Doppelbrechende Metamaterialien	119
5.1.1 Inhomogene Kreuze	119
5.1.1.1 Vorstellung und Bestätigung der prinzipiellen Funktionalität.....	119
5.1.1.2 Entwurf einer kompakten $\lambda/4$ -Verzögerungsplatte.....	123
5.1.2 Drahtpaare	125
5.1.2.1 Untersuchung der doppelbrechenden Eigenschaften	126
5.1.2.2 Konstruktion ultrakompakter Verzögerungsplatten.....	128
5.1.3 Mäander Verzögerungssplatten im THz-Bereich.....	132
5.2 Schaltbare Metamaterialien.....	137
5.2.1 Elektrisch schaltbare Kreuze.....	138
5.2.1.1 Layout und Funktionsprinzip	138
5.2.1.2 Elektrische Charakterisierung des Bauteils.....	140
5.2.1.3 Transmissionsverhalten des schaltbaren Metamaterials	143
5.2.2 Optisch schaltbare Metamaterialien.....	148
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	155
7 Summary	159
8 Anhang.....	161
8.1 Liste häufig verwendeter Abkürzungen	161
8.2 Literaturverzeichnis.....	161