

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 Verzögerungsplatten 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 |