

1 Einleitung

Die Suche nach neuen Materialien in der Forschung hat in der Vergangenheit einen bedeutenden Beitrag zum Fortschritt in der Technik und in den Natur- und Ingenieurwissenschaften geleistet. In den vergangenen Jahren [73] wurden Untersuchungen zur Wellenausbreitung in Materialien mit sich periodisch ändernden elektrischen bzw. dielektrischen sowie magnetischen Eigenschaften durchgeführt. Das Analogon zu diesen Materialien mit sich periodisch ändernden Eigenschaften lässt sich in der Festkörperphysik bei der periodischen Anordnung von Atomen und Molekülen in Kristallen finden. Ziel der Untersuchung dieser Materialien ist es, sowohl die Effizienz vorhandener Applikationen zu verbessern als auch neue Materialeigenschaften für zukünftige Anwendungen zu erforschen. Dabei wird meist einer der folgenden Ansätze bei den Untersuchungen verfolgt:

- Kontrolle der Wellenausbreitung in Materialien in Abhängigkeit von der Polarisation, der Frequenz und der Ausbreitungsrichtung. Dadurch wird für eine definierte Polarisation bzw. für alle Polarisationen eine Wellenausbreitung in alle bzw. nur in bestimmte Richtungen in einem gewünschten Frequenzbereich bezweckt. Dies ist beispielsweise interessant für die Unterdrückung von parasitären Moden, wie z.B. Substratmoden in ein- bzw. mehrschichtigen Anordnungen oder Parallel-Platten-Moden [14] in gedruckten Schaltungen (z.B. koplanare Leitungen) mit rückseitiger Metallisierung.
- Feldkonzentration bzw. Feldführung nur in Teilbereichen eines Materials. Gedacht wird hier beispielsweise an dielektrische Resonatoren [21].
- Herstellung von Materialien mit neuartigen elektrischen bzw. dielektrischen sowie magnetischen Eigenschaften, z.B. Material mit negativer relativer Permittivität [64].

- Herstellung von neuen bzw. effizienteren Komponenten für die optische Nachrichtentechnik oder Mikrowellentechnik. Wünschenswert wäre es beispielsweise, die spontane Emission in Laserdioden (LD) zu reduzieren, um somit den Schwellenstrom deutlich zu senken und eine hohe Quanteneffizienz und eine lange LD-Lebensdauer zu erreichen. Bei LED ist wünschenswert, die spontane Emission in nicht nutzbare Richtungen zu verhindern. Ein weiteres Beispiel in der Mikrowellentechnik sind Antennen mit hohem Gewinn und bandbreitenoptimierte Antennen [14][17][59].

Die periodische Änderung der Materialeigenschaften, die eine elektromagnetische Welle erfährt, ist mit der periodischen Potentialänderung zu vergleichen, die ein Elektron aufgrund der periodischen Anordnung von Atomen innerhalb einer Kristallstruktur erfährt. Für eine elektromagnetische Welle bzw. ein Photon entspricht eine kleine Dielektrizitätszahl einem hohen Potential. Die periodische Anordnung der Atome in der Kristallstruktur bestimmt die Leitungseigenschaften des Kristalls. Analog dazu wird die Geometrie der sich periodisch ändernden elektrischen bzw. dielektrischen und magnetischen Eigenschaften die Ausbreitungseigenschaften dieser Materialien bestimmen. Ähnlich wie bei Kristallstrukturen, wo es zu Leitungs- und Valenzbändern für Elektronen mit bestimmten Energien kommt, kommt es aufgrund des Streuverhaltens an den periodischen Störungen auch in Materialien mit periodischen Änderungen der Materialeigenschaften zu photonischen bzw. elektromagnetischen Pass- und Stoppbändern für Wellen definierter Frequenzen und Polarisationen. Dabei bestimmt die periodische Fortsetzung (geometrische Gestalt) der elektrischen bzw. dielektrischen und magnetischen Eigenschaften die Abhängigkeit des Stoppbandes von Richtung, Frequenz und Polarisation.

Unterschiede im Verhalten von Elektronen in Kristallstrukturen und elektromagnetischen Wellen in periodischen Strukturen lassen sich vor allem in zwei Punkten feststellen:

- Elektromagnetische Wellen haben Vektorcharakter. Die Banddiagramme für elektromagnetische Wellen sind daher polarisationsabhängig. Elektronische Wellenfunktionen sind Skalare. Solange der Elektronenspin keine Rolle spielt, genügt die Angabe der Energie [43].

- Die Elektron-Elektron-Wechselwirkung ist in Kristallstrukturen nicht allgemein vernachlässigbar [41][44]. Bei elektromagnetischen Feldern, die beispielsweise aus mehreren Photonen bestehen, spielt die Photon-Photon-Wechselwirkung keine Rolle, solange die Photonenenergien klein sind und das Material als linear angesehen werden kann.

Der Entwurf und die Herstellung periodischer Strukturen im optischen sowie im mikrowellentechnischen Bereich erfordern zunächst ein passendes numerisches Analysewerkzeug, um die “Cut-and-try-Methode” [74] zu vermeiden. Mit Hilfe des Analysewerkzeugs können die Banddiagramme ermittelt werden. Erst im nächsten Schritt wird man sich der Herstellung der Strukturen mit der erforderlichen Genauigkeit widmen können. Im optischen Bereich, wo periodische Strukturen für Telekommunikationskomponenten (z.B. optische Vielkanalsysteme, auch wavelength division multiplexing (WDM) [33] genannt) bei der Wellenlänge $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ (Frequenz $f = 193 \text{ THz}$) gebraucht werden, liegen Genauigkeitsanforderungen bei der Herstellung der Strukturen (z.B. Ringfilter) im 10-nm-Bereich. Dies macht die Herstellung langwierig und schwierig. Außerdem ist die Charakterisierung dieser Strukturen im optischen Bereich schwieriger als im Mikrowellenbereich. Diese Probleme im optischen Bereich führen zu einer begrenzten Anzahl an teuren Untersuchungen und einem verlangsamten physikalischen Erkenntnisgewinn.

Im Rahmen dieser Arbeit wird erstmalig der folgende Ansatz verfolgt: Da die Maxwell-Gleichungen, die dem physikalischen Verhalten dieser periodischen Strukturen zugrunde liegen, skalierbar sind und gleiche physikalische Zusammenhänge sowohl für optische Strukturen als auch für Mikrowellenstrukturen vorhersagen, schafft eine Übertragung der optischen Strukturen in den Mikrowellenbereich, beispielsweise in den Frequenzbereich um 10 GHz, Abhilfe. Diese Skalierung ermöglicht eine hohe Anzahl von Untersuchungen und damit einen raschen und preisgünstigen Erkenntnisprozess. Die integrierten optischen Komponenten wie auch die dielektrischen Strukturen bei $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$ werden, bei Verwendung von Materialien gleicher relativer Dielektrizitätskonstanten im optischen sowie im Mikrowellenbereich, um den Faktor 20000 im Mikrowellenbereich vergrößert: Auf diese Weise betragen die Genauigkeitsanforderungen nur noch 0,2 mm anstelle von 10 nm im optischen Bereich.

Ziel dieser Arbeit ist die theoretische und experimentelle Untersuchung von periodischen Strukturen sowohl für den Mikrowellenbereich als auch modellhaft für den optischen Bereich. Im Mikrowellenbereich lassen sich das im optischen Bereich verwendete Siliziumdioxid (Brechzahl $n = 1,45$) durch Teflon (PTFE, $n = 1,48$) und Silizium ($n = 3,44$) durch keramikgefülltes Teflon ($n = 3,3$ für RT Duroid 6010, $n = 3,03$ für TMM10) ersetzen.

Bei der periodischen Strukturierung der elektrischen bzw. dielektrischen und magnetischen Eigenschaften lassen sich die folgenden drei Fälle unterscheiden:

1. Eine eindimensional (1D) periodische Struktur. Darunter wird eine periodische Fortsetzung der elektrischen bzw. dielektrischen oder magnetischen Eigenschaften entlang einer Richtung verstanden. Als Beispiel ist eine mehrschichtige Anordnung (Abb. 1.1) mit einer zwischen ϵ_1 und ϵ_2 alternierenden Permittivität geeignet. In der Abb. 1.1 handelt es sich um einen Bragg-Spiegel [51] mit wechselnden Schichten, die jeweils eine Viertelwellenlänge dick sind.

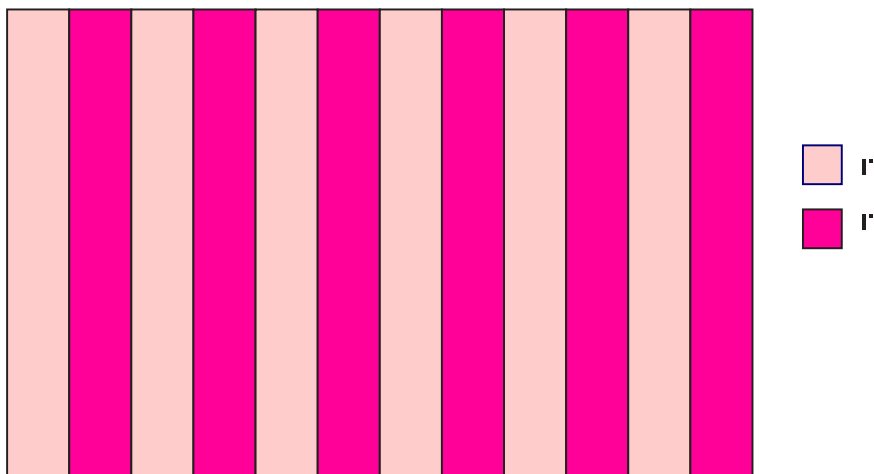


Abb. 1.1: Vorderansicht einer eindimensional periodischen Struktur

2. Eine zweidimensional (2D) periodische Struktur. In diesem Fall ändern sich die elektrischen bzw. dielektrischen oder magnetischen Eigenschaften des Materials periodisch in einer Ebene. In der zu dieser Ebene senkrechten Richtung ist das Material homogen. Ein 2D-Array von in z -Richtung unendlich langen Metallpfosten (siehe Abb. 1.2) kann hier

als Beispiel gegeben werden.

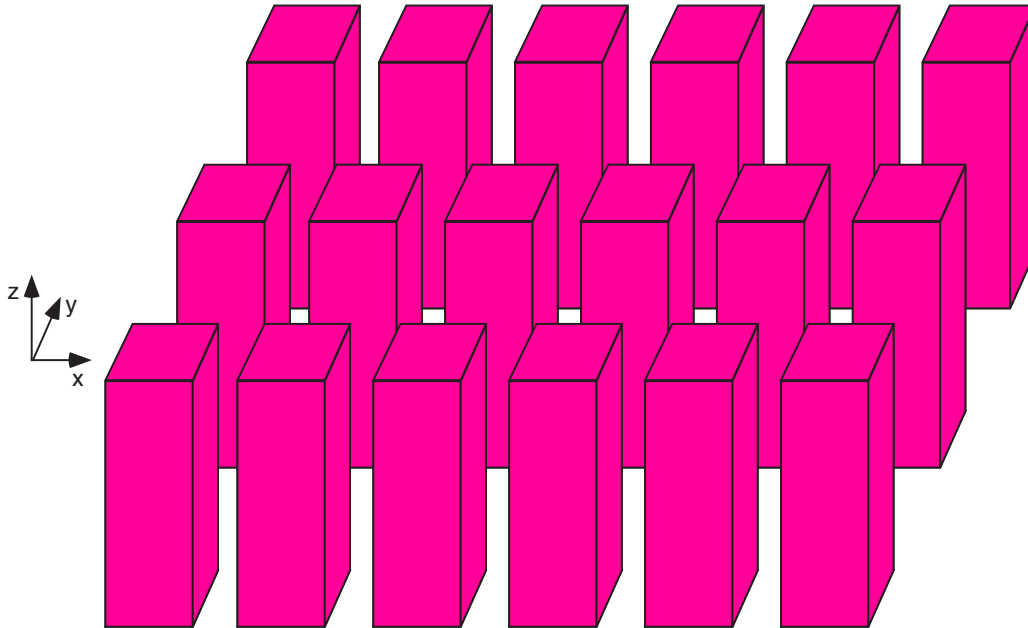


Abb. 1.2: 2D-periodische Struktur am Beispiel von Metallpfosten

3. Eine dreidimensional (3D) periodische Struktur. Hierunter wird eine periodische Fortsetzung der elektrischen bzw. dielektrischen oder magnetischen Eigenschaften des Materials im Raum bzw. in drei Richtungen x , y und z verstanden. Ein Beispiel ist eine dreidimensionale Anordnung dielektrischer Materialien (Abb. 1.3). (Diese Anordnung erinnert an den Würfel des bekannten Spiels „Rubik’s cube“)

Bei der 1D-periodischen Struktur lässt sich eine Bandlücke nur bei einer Wellenausbreitung entlang der Richtung mit der periodischen Fortsetzung der Eigenschaften erreichen. Analog kann eine Bandlücke bei der 2D-periodischen Struktur nur in der Ebene mit der periodischen Fortsetzung der Eigenschaften existieren. Bei der 3D-periodischen Struktur lässt sich eine Bandlücke für alle Raumrichtungen realisieren.

Um die Eigenschaften periodischer Strukturen zu ermitteln, wurden im Rahmen dieser Arbeit diverse Programme entwickelt. Außerdem kamen kommerzielle Programmpakete wie „High Frequency Structure Simulator“ (HFSS) und „Ensemble“ zum Einsatz. HFSS ist ein Programmpaket, das auf der Finiten-

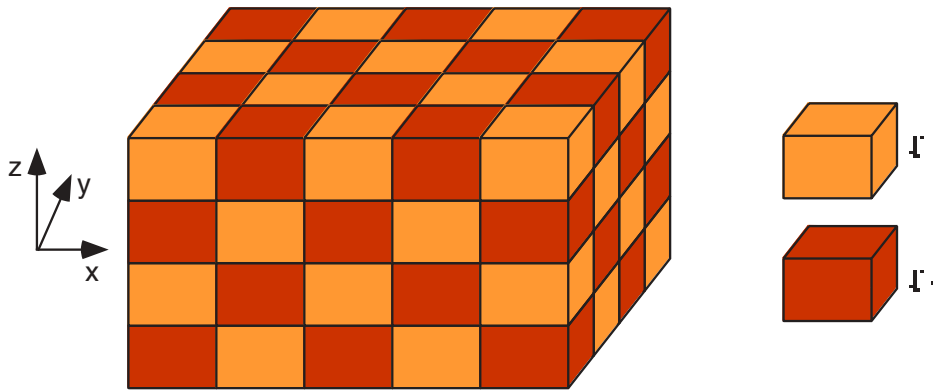


Abb. 1.3: Dreidimensional periodische Struktur

Elemente-Methode (FEM) [60][35] basiert. Diese Methode wird in der Literatur neben anderen Methoden wie der Finiten-Differenzen-Methode im Zeitbereich (FDTD) [5] oft zur Berechnung periodischer Strukturen eingesetzt. Eine weitere Methode, die oft zur Berechnung 1D-periodischer Strukturen verwendet wird, ist die Modenkopplungstheorie [63][25].

In dieser Arbeit wurden 1D- und 2D-periodische Strukturen (quasi-)unendlicher und endlicher Abmessung wie in Abb. 1.4a, 1.4b, 1.5a, 1.5b mit dem Ziel untersucht, neuartige Komponenten für die optische Nachrichtentechnik und die Mikrowellentechnik zu entwickeln und zu charakterisieren.

Für den optischen Bereich wurden Mikrowellenmodelle von optischen Komponenten untersucht. Diese Komponenten sind mit Hilfe von Defekten innerhalb einer periodischen Struktur definiert: z.B. ein Ringresonator (siehe Abb. 1.6a), ein Streifenwellenleiter (siehe Abb. 1.6b) und ein dielektrisches Notchfilter (auch Bandsperrfilter genannt, siehe Abb. 1.7a).

Im Mikrowellenbereich wurden Bandsperrfilter (siehe Abb. 1.4a), Koplarnleitungen mit 2D-periodischer Struktur endlicher Dicke (siehe Abb. 1.7b) sowie planare koplarnarg gespeiste Antennen (siehe Abb. 1.8a, Abb. 1.8b) für den Einsatz in konventionellen sowie in optisch gesteuerten Antennensystemen gebaut.

Optisch gesteuerte Antennensysteme [28][29][16][14][17][20] sind als eine Alternative zu konventionellen Antennensystemen zu sehen. Sie bieten neben der Überlegenheit der Glasfaser gegenüber Mikrowellenleitungen (z.B. koaxiale Kabel) bezüglich Verlust, Dispersion und Bandbreite [34] eine elegante Mög-



a



b

Abb. 1.4: a) Untersuchte Mikrostreifenleitung mit kreisförmigen Aperturen in der Massenmetallisierung als 1D-periodische Struktur; b) Untersuchte dielektrische Streifenleitung mit zylinderförmigen Bohrungen als 1D-periodische Struktur

lichkeit zur verlustarmen Verbindung von Kontrollstation und Basisstation, zur Reduktion der elektromagnetischen Kopplung der Antennenelemente, zur Realisierung von echten Zeitverzögerungen [20] (*engl.*: true-time delay (TTD)) und breitbandigen Phasenschiebern [13], zur Bandbreitenerhöhung und zur Gewichtsreduktion der Antennensysteme.

Im Kapitel 2 werden die für das Verständnis der theoretischen Zusammenhänge in den Kapiteln 3, 4 und 5 notwendigen Begriffe definiert. Außerdem werden die Grundlagen sowie die betrachteten Geometrien und Materialparameter eingeführt. Anschließend beinhaltet Kapitel 3 folgende Schwerpunkte:

- Entwurfsrichtlinien zur Dimensionierung von 1D-periodischen Strukturen aus kreisförmigen Aperturen in der Massemetallisierung einer Mikrostreifenleitung werden für Mikrowellen-Anwendungen herausgearbeitet.