

# Zusammenfassung

Eliane Flück

Ph.D. thesis, June 20, 2003

Photonische Kristalle sind eine neue Sorte von Materialien, deren Brechungsindex mindestens entlang einer Richtung periodisch variiert (Gitter). Die optischen Eigenschaften von Licht (elektromagnetische Wellen) mit einer Wellenlänge von der Grössenordnung der Gitterkonstante sind somit direkt abhängig von der Kristallgeometrie. Die Periodizität des Brechungsindex verursacht eine so genannte Bandstruktur mit verbotenen Frequenzbändern, in einer oder mehreren Richtungen, für welche das Licht perfekt reflektiert wird. Die Erforschung lokaler optischer Eigenschaften wird durch Nahfeldmethoden ermöglicht, welche das sich im Kristall befindende Licht messen können. Mit dieser Methode kann der direkte Einfluss der Kristallgeometrie auf die Ausbreitung des Lichtes gemessen werden. Im Gegensatz zu solch lokalen Messtechniken liefern Fernfeldmethoden ein räumlich gemitteltes optisches Signal. Zum Beispiel können die Qualität des Kristalls sowie Effekte von verbotenen Frequenzbändern mit Reflektionsmessungen bestimmt werden. Die mit den zwei komplementären Messtechniken errungenen Erkenntnisse, Nahfeld- und Fernfeldmethode, liefern ein Gesamtbild der optischen Eigenschaften der photonischen Kristalle.

In Kapitel 1 wird eine Einführung in die Theorie der photonischen Kristalle gegeben. Anhand des einfachen Beispiels eines unendlich ausgedehnten, eindimensionalen photonischen Kristalls wird die Bandstruktur erklärt, welche die optischen Eigenschaften des Lichtes im Material beschreibt. Danach werden zwei spezielle Strukturen, eine freihängende zweidimensionale photonische Kristallmembran und ein dreidimensionaler Kristall, aufgebaut aus Latexkugeln, erläutert. Im zweiten Teil des Kapitels werden die Methoden diskutiert, womit die Kristalle, die in dieser Arbeit untersucht worden sind, hergestellt wurden. Für die Fabrikation von verschiedenen Strukturen von jeglicher Grösse (im Nanometerbereich) und Form und in gewünschter periodischer Anordnung, wird ein fokussierter Ionenstrahl (FIB) genutzt. Die hochenergetischen Ionen prallen auf die Oberfläche und schießen Material weg. Somit kann eine Struktur bestehend aus einer periodischen Anordnung von zwei verschiedenen Materialien (z.B. Luft und Glas) hergestellt werden. Zur Herstellung von grossflächigen und vor allem zweidimensionalen Kristallen werden

meistens holographische Methoden genutzt. Mit diesen wird der Photoresist be-  
lichtet und mit weiteren Verarbeitungsvorgängen kann eine freihängende Membran  
mit periodisch angeordneten Löchern hergestellt werden. Die dreidimensionalen  
Kristalle bestehen aus Latexkugeln, die selber einen Kristall formen. Die Kristalle  
weisen ein dicht gepacktes Gitter (flächenzentriert kubisch) auf und zeigen ver-  
botene Frequenzbänder in verschiedenen Kristallrichtungen.

Photonische Kristalle können mit verschiedenen Methoden, Nahfeld- und Fern-  
feldmethoden, untersucht werden. Meistens befinden sich beide, Detektor und  
Lichtquelle, im fernen Feld. Wir haben solche Fernfeldmethoden genutzt um  
die verbotenen Frequenzbänder sowohl in der zweidimensionalen photonischen  
Kristallmembran als auch im dreidimensionalen Kristall zu vermessen. Ausserdem  
wurde eine vom Einfallswinkel des Lichtes abhängige Reflektionsmethode genutzt,  
um Licht an so genannte resonante Kristallmoden der photonischen Kristallmem-  
bran zu koppeln. Desweiteren werden in dieser Dissertationsarbeit zwei verschieden  
Nahfeldmethoden angewandt: ein “photon scanning tunnelling microscope (PSTM)”  
und ein “near-field scanning optical microscope (NSOM)”. In der ersten Methode  
wird eine zugespitzte Glasfaser als Detektor genutzt, in der zweiten Methode dient  
sie als punktförmige Lichtquelle. Die Herstellung der nahfeld Glasfasern (Spitzen)  
wird beschrieben. Danach werden die zwei Nahfeldmethoden im Detail erklärt. In  
beiden Messaufstellungen ist ein dreidimensionaler Messmodus eingebaut, so dass  
Näherungs- und Zurückziehkurven gemessen werden können. Als Besonderheit ist  
es mit unserem PSTM möglich, die Phase des Lichtes in einem Material zu messen.  
Somit werden zugleich drei Signale detektiert: die Intensität und die Phase des  
Lichtes in der Struktur sowie die Topographie der Struktur.

In Kapitel 3 werden verschieden mit FIB hergestellte eindimensionale photoni-  
sche Strukturen mit dem PSTM untersucht. Das optische Feld von Licht rund um  
15 Löcher und 15 Schlitze in einem Wellenleiter wird gezeigt. Wir finden eine ste-  
hende Welle im Wellenleiter vor der periodischen Struktur, die durch Interferenz  
zwischen einkommendem und reflektiertem Licht aufgebaut wird. In der Struktur  
selber nimmt die Intensität ab. Der Verlust des Lichtes durch die Struktur kann  
positionsabhängig bestimmt werden. Der Abfall der Intensität in der Struktur  
zeigt eine Wellenlängenabhängigkeit. Wir finden, dass die Intensität schneller ab-  
nimmt für kürzere Wellenlängen als für längere. Diese Verhalten lässt vermuten,  
dass die Verluste durch Beugung erzeugt werden. Hinter den 15 Schlitzen wird  
ein unerwarteter wellenlängenabhängiger Wiederaufbau der Intensität im Wellen-  
leiter beobachtet. Auch hier ist Interferenz verantwortlich für dieses aperiodische  
Intensitätsmuster des Lichtes. Die Interferenz entsteht zwischen Licht, welches sich  
durch die periodische Struktur hindurch ausbreitet und Licht, welches am unter-  
liegenden Substrat reflektiert wird. Die Tatsache, dass Licht am Substrat reflek-  
tiert wird und somit den photonischen Kristall umgeht, ist eine wichtige Erkennt-

nis für die Silizium-auf-Isolator Technologie, da photonische Kristalle basierend auf dieser Technologie Überspracheffekte aufweisen könnten. Als nächster Schritt wurde die Phase des Lichtes rund um 15 Löcher in einem Wellenleiter gemessen. Im Bereich der Löcher verändert die lokale Phase wegen der Änderung des Brechungsindex (Luft anstelle Glas). Allgemein sieht man, dass die Löcher das Licht in Kugelwellen zurückstreuen. Diese Kugelwellen interferieren mit dem einkommenden Licht, wodurch ein komplexes Phasennmuster mit Singularitäten und Sprüngen hervorgerufen wird. Anhand der gemessenen komplexen Intensitäts- und Phasennmuster wird die Wichtigkeit der Nahfeldmethoden (PSTM) deutlich, denn für Fernfeldmethoden bleiben diese Informationen des Lichtes verborgen. Im letzten Abschnitt von Kapitel 3 wird die dreidimensionale Messmöglichkeit demonstriert. Am Beispiel von Lichtbeugung an zwei Schlitzen werden abfallende (evanescente) und laufende Wellenanteile voneinander getrennt. Die dreidimensionale Messtechnik ermöglicht es, die Entstehung von Phasensingularitäten zu beobachten. Für einen Wellenleiter der 4 Moden leitet, bilden wir die Entstehung von zwei gekoppelten Singularitäten für zunehmenden Spitze zu Substrat Abstand ab.

In Kapitel 4 wird eine freihängende photonische Kristallmembran mit Fernfeldmethoden untersucht. Die Messmethode ermöglicht die Kopplung von einfallendem Licht an resonante Moden der Membran. Wird ein solcher Mode angeschlagen, ist ein schmales Kennzeichen im Reflexionsspektrum zu erkennen. Ein solches Kennzeichen wird durch Interferenz zwischen Licht, welches verschiedenen optische Wege zurücklegt, hervorgerufen. Die zwei verschiedenen optischen Wege sind die direkte Reflektion des Lichtes an der Membran und Reflektion von Licht, welches für kurze Zeit an einen resonanten Mode koppelt. Aus der Frequenzposition des Kennzeichens kann ein Teil der Bandstruktur der photonischen Kristallmembran rekonstruiert werden. Wir finden eine ausgezeichnete Übereinstimmung der Messresultate mit Simulationen. In der zweiten Hälfte von Kapitel 4 wird die Form des Kennzeichens genauer untersucht. Dafür wenden wir eine Theorie an, welche ursprünglich für inelastische Streuung von Elektronen an einem Heliumatom entwickelt wurde. Wir haben diese Theorie für Photonen (Licht) umgeschrieben und können damit die Messdaten beschreiben. Wir finden, dass die Kennzeichen sehr schmal sind, was auf eine hohe Qualität der Struktur zurückschließen lässt. Zusätzlich führt die Theorie einen Kopplungsparameter  $q$  ein, welcher als das Verhältnis zweier Übergangswahrscheinlichkeiten definiert ist. Für parallel (TM) polarisiertes Licht beobachten wir eine Umkehrung des Vorzeichens von  $q$ . Die Umkehrung bedeutet, dass sich die Phase in einem der zwei optischen Wege ändert. Eine mögliche Erklärung wäre eine Phasenänderung von Licht im direkt reflektierten optischen Weg. Wenn der Einfallswinkel von Licht durch den sogenannten Brewster-Winkel gedreht wird, ändert sich die Phase von TM polarisiertem Licht. Bemerkenswert ist, dass unsere mögliche Erklärung die Annahme

eines effektiven Brechungsindex und eines Brewster-Winkels für eine photonische Kristallmembran macht.

In Kapitel 5 untersuchen wir die Übertragung von Licht aus einer punktförmigen Lichtquelle, welches in einen dreidimensionalen Kristall eingekoppelt wird, sich darin fortpflanzt und schliesslich auf einen Detektor im Fernfeld fällt. Diese Übertragung ist mit dem NSOM für verschiedene Wellenlängen (optische Frequenzen) gemessen worden. Für hohe Frequenzen wird das Licht besser in den Kristall gekoppelt, wenn die NSOM Spitze sich über einer Kugel befindet. Für tiefe Frequenzen beobachten wir das Umgekehrte, mehr Licht kommt durch den Kristall wenn die Spitze zwischen den Kugeln ist. Wenn sich ein Defekt in der Kristalloberfläche befindet, wird die lokale Kopplung vom Licht stark beeinträchtigt. Für tiefe Frequenzen (ausgenommen Frequenzen im verbotenen Frequenzband) wird mehr Licht durch den Defekt in den Kristall gekoppelt, für hohe Frequenzen und für Frequenzen im verbotenen Frequenzband wird wenig Licht an der Stelle des Defekts in den Kristall gekoppelt. Ausserdem beobachten wir, dass es möglich ist mit einem NSOM Defekte, welche sich einige Lagen unter der Kristalloberfläche befinden, aufzuspüren. Untersuchungen der Nahfeldkopplung in Näherungs- und Zurückziehkurven weisen auf verbotene Frequenzbänder hin. Für Frequenzen im verbotenen Frequenzband finden wir einen zweimal längeren exponentiellen Abfall des Lichtes gegenüber dem Abfall von Licht mit andere Frequenzen. Ausserdem zeigen die Kurven eine grössere Amplitudenmodulation für Frequenzen rund um das verbotene Frequenzband. Die Nahfeldmethode erlauben Untersuchungen des komplexen Kopplungsmechanismus von Licht zu einem dreidimensionalen photonischen Kristall.

In dieser Dissertationsarbeit beschreiben wir verschiedene optische Eigenschaften von photonischen Kristallstrukturen. Durch Beobachtungen der lokalen Fortpflanzung des Lichtes können Verluste in Intensität und Brechungsindex des Materials bestimmt werden. Messungen der Phase des Lichtes enthüllen ein komplexes Netzwerk von Interferenzen, wodurch unter anderem Phasensingularitäten entstehen. Beide Methoden, Nahfeld und Fernfeld, wurden genutzt zur Untersuchung der Kopplung des Lichtes in einen photonischen Kristall. Resonante Moden, welche in zweidimensionalen Kristallen angeschlagen werden können, zeigen eine sogenannte  $q$ -Umkehrung des Kopplungsparameters  $q$ . Die Nahfeldkopplung von Licht aus einer punktförmigen Lichtquelle ist orts- und frequenzabhängig. Diese Kopplung kann durch Kristalldefekte stark beeinflusst werden.