

# Kapitel 1

---

## Einleitung

Licht als Informationsträger wird bereits intensiv genutzt. Durch eine einzige Glasfaserleitung lassen sich beispielsweise gleichzeitig mehrere Millionen ISDN-Telefongespräche mittels Lichtsignalen übermitteln [1]. Verstärkt wird der Bedarf an Übertragungsbandbreite durch den steigenden Anteil der Datenübertragung gegenüber reinen Sprachdiensten, beispielsweise durch die vermehrte Verbreitung und Nutzung des Internets mit seinen immer aufwändigeren Inhalten wie Video-On-Demand oder nicht lokaler Datenspeicherung. Daher verlangt die Kommunikationsindustrie nach immer komplexeren optischen Komponenten [2].

Analog zur Elektronik kann dies durch die Integration mehrerer Schaltkreise auf einem Chip gelöst werden. Verglichen mit den elektronischen Integrationsmöglichkeiten stecken die optischen heute allerdings noch in den Kinderschuhen. Während sich beispielsweise in einem Itanium-Mikroprozessor von Intel unglaubliche 77 Millionen Transistoren pro Quadratzentimeter vereinen, kann auf der gleichen Fläche in planarer Silizium-Oxinitrid-Technik gerade mal ein einziger Wellenlängenkoppler untergebracht werden [3].

Hier bieten sich Photonische Kristalle als künstliche, optische Halbleiter an. Photonische Kristalle haben ähnliche Eigenschaften für Photonen, wie konventionelle Halbleitermaterialien sie für Elektronen zeigen. Die Funktionalität von Halbleitern beruht auf der Ausbildung von verbotenen Energiebereichen für Elektronen. Analog bilden sich in Photonischen Kristallen verbotene Frequenzbereiche für Photonen, auf denen basierend bereits zahlreiche Anwendungen vorgeschlagen worden sind. Unter anderem wur-

den fortschrittliche Komponenten für die optische Datenübertragung wie ultraschnelle Halbleiterlaser [4] und kleine Demultiplexer [5] vorgeschlagen und experimentell demonstriert.

Basierend auf der Größe einer einfachen Frequenzweiche lässt sich eine Integrationsdichte von mehreren Millionen Bauelementen pro Quadratzenimeter in einem optischen Photonischen Kristallchip prognostizieren [3]. Obwohl selbst diese hohe Zahl immer noch weit entfernt von den Integrationsdichten in der Elektronik ist, stellt sie doch eine deutliche Verbesserung der derzeitigen Integrationsdichten für optische Komponenten dar.

Eine Möglichkeit, die Photonischen Kristalle für vielfältige Einsatzmöglichkeiten zu funktionalisieren, ist die Verwendung von absichtlich eingebrachten Defekten im Photonischen Kristall. Diese Defekte fungieren als optische Resonatoren und können Licht für kurze Zeitdauern speichern. Derartige Resonatoren, insbesondere solche mit hohen Güten, die Licht verhältnismäßig lange speichern können, wurden in dieser Arbeit hergestellt und untersucht. Dabei werden die Resonatoren in Kapitel 2 vorgestellt und ihre theoretischen Eigenschaften anhand eines neuen Resonatordesigns diskutiert. In Kapitel 3 wird auf ihre Herstellung aus Galliumarsenid eingegangen.

Die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten werden in den folgenden Kapiteln diskutiert. Diese sind vielfältig. So können die Resonatoren beispielsweise die Frequenzverschiebungen eines Signals, die sich durch chromatische Dispersion in Glasfasern ausbilden, ausgleichen. Oder sie können zwei Lichtsignale relativ zueinander zeitlich verschieben und somit als Verzögerungslinie fungieren. Derartige Anwendungen erfordern Kenntnisse der Dispersion der Resonatoren und entsprechende Experimente werden in Kapitel 4 behandelt.

Ein anderes mögliches Anwendungsgebiet erschließt sich durch die hohe Sensitivität der Resonatoren gegenüber Umgebungsänderungen. So genügt schon die Änderung des Umgebungsgases oder -drucks um eine messbare Verschiebung der Resonanzfrequenz hervorzurufen. Insbesondere die kleinen Ausmaße der Bauteile machen dies interessant. Da der eigentliche Resonator nur wenige Quadratmikrometer groß ist, lässt sich ei-

ne für optische Messverfahren sehr hohe räumliche Auflösung realisieren. Derartige Messungen und weitergehende Optimierungen der Resonatoren werden in Kapitel 5 diskutiert.

Die oben genannten Beispiele profitieren von ihrer Umsetzung in der Photonischen Kristallvariante insoweit, dass sie teilweise erheblich kleiner als ihre konventionellen Pendants sind und damit hohe Integrationsdichten aufweisen können. In der Wechselwirkung zwischen Photonenemitter und Resonator spielt die Ausdehnung der Resonatoren, bzw. das Volumen der Lichtmode im Resonator, hingegen eine erhebliche Rolle und wirkt sich nicht nur in der Minituarisierung, sondern auch in den physikalischen Eigenschaften aus. So skaliert beispielsweise die Emissionsrate eines Emitters in einem Resonator mit dessen inversen Modenvolumen. Kleinere Modenvolumen bedeuten also höhere Emissionsraten, wobei die Emission nur in eine Mode koppelt und so zusätzlich gezielt aufgesammelt werden kann. Hier eröffnen Photonische Kristallresonatoren im Gegensatz zu makroskopischen Bauteilen neue, ihnen eigene Experimente und Anwendungsgebiete.

Die Photonenemitter für Photonische Kristalle aus Halbleitern sind zumeist Quantenpunkte. Diese werden an zufälliger Position in den Halbleiter gewachsen, so dass der räumliche Überlapp eines spektral passenden Quantenpunkts zum Resonator nicht gewährleistet ist, sondern statistisch durch große Zahlen an Resonatoren sichergestellt werden muss. Dies führt jedoch zu einer kleinen Ausbeute an Systemen in denen genau ein Quantenpunkt mit einem Resonator wechselwirkt. Dieses Problem wird in Kapitel 6 eingehend diskutiert und ein Lösungsvorschlag vorgestellt. Dabei wird ein Verfahren entwickelt, Quantenpunkte an vorher bekannter Position aufzubringen, und in Kenntnis dieses Ortes können Photonische Kristallresonatoren relativ zu einem einzigen Quantenpunkt positioniert werden. Die Kontrolle über den räumlichen Überlapp erhöht nicht nur die Ausbeute an räumlich koppelnden Quantenpunkten, sondern überträgt sich auch in die spektrale Ausbeute, die sich ebenfalls erhöht. Die räumliche und spektrale Kopplung eines einzigen Quantenpunkts an einen Photonischen Kristallresonator ist eine Möglichkeit einen effizienten Einzelphotonenemitter zu konstruieren. Derartige Einzelphotonenquellen können in

der Quantenkryptographie zur physikalisch sicheren Datenübertragung eingesetzt werden [6].