

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Korrespondenz zwischen Strahlen- (basierend auf geometrischer Optik) und Wellenbeschreibungen (basierend auf Lösungen der Maxwell-Gleichungen) für einen speziellen Typ optischer Mikrokavität, die deformierte Mikroscheibe, untersucht – sowohl in Fällen, wo sie erfolgreich angewandt werden kann, als auch in Fällen, wo dies misslingt. Strahlensimulationen werden numerisch durch Bestimmung der Schnittpunkte eines Lichtstrahls mit der Kavitätsberandung durchgeführt, während für die Berechnung der optischen Moden die Helmholtzgleichung mit Hilfe der Randelementmethode gelöst wird. Die Untersuchung der Strahlen-Wellen-Korrespondenz ist mathematisch äquivalent zur Korrespondenz zwischen quantenmechanischer und klassischer Beschreibung eines quantenmechanischen Systems. Für Systeme mit chaotischer klassischer Dynamik gehören Untersuchungen dieser Korrespondenz ins Gebiet des Quantenchaos offener Systeme, ein derzeit aktives Forschungsgebiet, für das optische Mikrokavitäten ein interessantes Modellsystem darstellen.

Optische Mikrokavitäten haben diverse Anwendungen unabhängig von der Tatsache, dass sie Modellsysteme für Quantenchaos sind, unter anderem als Resonatoren für Mikrolaser, als Einzelphotonenquellen und als optische Filter. Für viele Anwendungen sind einerseits lange Lebensdauern der optischen Moden und andererseits gerichtete Ausstrahlung im Fernfeld wünschenswert; allerdings ist es im Allgemeinen schwierig, beide Bedingungen gleichzeitig zu erfüllen.

Eine spezielle Mikroscheibenform, die optische Moden mit gerichteter Ausstrahlung und langen Lebensdauern unterstützt, wird in dieser Arbeit vorgestellt: Eine Mikroscheiben-Kavität mit elliptischem Querschnitt und einer Kerbe (“Notch”) der Größenskala der Wellenlänge am Rand. Mit Hilfe eines Strahlenmodells, das Streuung an der Kerbe mit Kollimation der Strahlen im Fernfeld kombiniert, kann verstanden werden, wie die Kombination von langer Lebensdauer mit gerichteter Ausstrahlung zustandekommt: Strahlen, die am Rand entlang laufen (entsprechend sogenannten Flüstergalerie- (“whispering-gallery”-) Moden), werden irgendwann an der Kerbe gestreut. Der gegenüberliegende Kavitätsrand wirkt dann wie eine Linse für die gestreuten Strahlen und parallelisiert sie im Fernfeld. Strahlenberechnungen des Fernfeldes stimmen hier gut mit Wellenberechnungen überein; die Richtionalität des Fernfeldes in Abhängigkeit von Parametern (Exzentrizität, Größe der Kerbe, Brechungsindex, ...) wird untersucht. Mikroscheiben-Kavitäten mit Kerbe sind bereits von Kooperationspartnern in der Gruppe von Prof. Dr. Federico Capasso an der Universität Harvard experimentell realisiert und als Resonatoren für Quantenkaskadenlaser verwendet worden. Strahlen- und Wellenberechnungen des Fernfeldes stimmen auch gut mit den experimentell bestimmten Fernfeldern überein.

Man kann jedoch erwarten, dass Strahlenmodelle versagen, wenn die Kavitätsmoden entsprechende Wellenlänge die Längenskala der Kavität erreicht. Schon jetzt ist es möglich, Kavitäten mit Größen im Bereich der Wellenlänge herzustellen; da Strahlenmodelle häufig verwendet werden, um die Struktur der Moden und das Fernfeld zu verstehen, ist es wichtig, die sich in diesem Fall ergebenden Abweichungen von der Strahlen-Wellen-Korrespondenz zu untersuchen. Beispiele für solche Abweichungen und das entsprechende Versagen der Strahlen-Wellen-Korrespondenz werden in dieser Arbeit gegeben. Eine Lösung für dieses Problem, die es erlaubt, die Einfachheit von Strahlenmodellen beizubehalten, ist die Erweiterung des Strahlenmodells durch den Einbau von Korrekturen durch Welleneffekte; solche Wellenkorrekturen sind der Goos-Hänchen-Shift (GHS) und das Fresnel-Filtern. Die Berechnung dieser Korrekturen und ihr Einbau in die Strahlenbeschreibung deformierter Mikroscheiben-Kavitäten ist ein Hauptpunkt dieser Arbeit; die Ergebnisse der resultierenden erweiterten Strahlendynamik werden mit Wellenrechnungen verglichen und auf experimentell bestimmbare Größen wie Fernfelder angewandt. Ein Effekt macht sich bei Projektion von optischen Moden, die periodischen Bahnen von Lichtstrahlen in der Kavität entsprechen, auf den Phasenraum bemerkbar. Wo man Übereinstimmung der Phasenraum-Positionen von periodischer Bahn und optischer Mode erwarten würde, werden Verschiebungen beobachtet, was bisher jedoch nicht erklärt werden konnte. In dieser Arbeit werden solche Verschiebungen im Rahmen der erweiterten Strahlendynamik analytisch berechnet und mit Daten aus der Literatur und eigenen Modenberechnungen verglichen, wobei sich eine gute Übereinstimmung ergibt.

Da die Ergebnisse des erweiterten Strahlenmodells mit dem Verhältnis von Wellenlänge zu Kavitätsgröße skalieren, kann es nicht nur in optischen Mikrokavitäten, sondern auch in Mikrowellen-Kavitäten untersucht werden. Mikrowellen-Kavitäten bieten hier einen gewissen Vorteil, da elektrische Felder in Mikrokavitäten kaum hochaufgelöst messbar sind, während dies im Fall von Mikrowellen leicht gelingt. Hier kann also z.B. der GHS in einer Kavität direkt gemessen werden. Solche Messungen des GHS in Mikrowellenkavitäten, die bei einem Aufenthalt in Prof. Dr. Hans-Jürgen Stöckmanns Arbeitsgruppe an der Universität Marburg durchgeführt wurden, werden in dieser Arbeit vorgestellt. Dabei wird ein Strahl, der einer ebenen Welle ähnelt (gerade Wellenfronten, Breite deutlich größer als eine Wellenlänge) durch Überlagerung von Kugelwellen, die von Mikrowellen-Antennen ausgestrahlt werden, erzeugt. Solche Strahlen können wiederum überlagert werden, und die Strahlversetzung (entsprechend dem GHS) bei Reflexion am Kavitätsrand wird bestimmt. Durch Erzeugung von Strahlen mit unterschiedlichen Einfallswinkeln kann die Abhängigkeit des GHS vom Einfallswinkel untersucht und mit numerischen Berechnungen verglichen werden. Im Rahmen der experimentellen Fehler ergibt sich eine gute Übereinstimmung.