

Optisches Hydrophon basierend auf photonischen Kristallen

Timm Schaer^{1,2}, Mirco Imlau²

¹ ATLAS Elektronik GmbH, 28309 Bremen, Sebaldsbrücker Heerstraße 235, Deutschland, E-Mail: timm.schaer@atlas-elektronik.com

² Universität Osnabrück, Fachbereich Physik, 49076 Osnabrück, BarbarasträÙe 7, Deutschland, E-Mail: mimplau@uni-osnabrueck.de

Einleitung

In der vorliegenden Arbeit werden die Möglichkeiten zur optischen Schalldruckmessung in Flüssigkeiten mittels photonischer Kristalle präsentiert.

Photonische Kristalle sind Metamaterialien mit einer Strukturgröße im Bereich von ca. 100 nm bis zu ca. 400 nm und liegen somit im Bereich der Lichtwellenlänge. Ein natürlicher photonischer Kristall ist der Opal, welcher aus Kieselgelkugeln in dichtester Kugelpackung besteht. Das optische Verhalten der Struktur wird vom Abstand der Ebenen und dem jeweiligen Brechungsindex der Materialien bestimmt. Photonische Kristalle haben die Eigenschaft, dass sie je nach interner Struktur ein typisches optisches Transmissions- und Reflexionsspektrum haben. Wellenlängenbereiche, in denen keine Transmission möglich ist, heißen photonische Bandlücke.

Ein Effekt zur Schalldruckmessung ist die Ausnutzung der Reflexion unter einem bestimmten Einstrahlwinkel. Das Reflexionsverhalten wird durch die Bragg-Bedingung beschrieben und hängt von der internen Struktur des Kristalls ab. Der Schalldruck verändert in diesem Fall die Bragg-Bedingung und somit das Reflexionsverhalten. Aus dieser Größe kann die Information über den Schalldruck gewonnen werden.

Es wird ein theoretischer Einblick gegeben und die Ansätze zur physikalischen Realisierung gezeigt.

Aufbau der photonischen Kristalle

Photonische Kristalle wurden 1972 erstmalig von Bykov [1] beschrieben und werden je nach Strukturierung in verschiedene Klassen eingeteilt [2]. Der Opal ist ein wichtiger Vertreter der photonischen Kristalle. Eine solche Struktur kann künstlich aus vielen unterschiedlichen Ma-

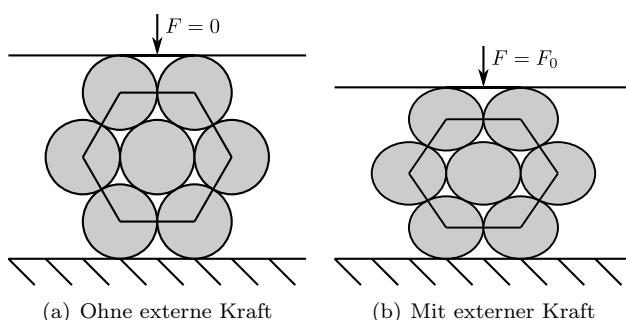


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines photonischen Kristalls in Opalstruktur ohne und mit externem Druck.

terialien erzeugt werden. Ein Herstellungsverfahren für photonische Kristalle aus Polymethylmetacrylat-Kugeln (kurz: PMMA-Kugeln) wurde von Oertel et. al. [3] vorgestellt. Hierbei werden die PMMA-Kugeln in wässriger Lösung synthetisiert und anschließend in einer Petrischale sedimentiert. Bei dieser Herstellungsmethode entsteht eine homogene Schichtung der Kugeln erst nach ca. 100 Schichten. Somit zeigt nur die Oberseite das typische Reflexionsverhalten eines photonischen Kristalls, welches in Abbildung 2 dargestellt ist. Der interne homogene Aufbau ist in Abbildung 1(a) dargestellt.

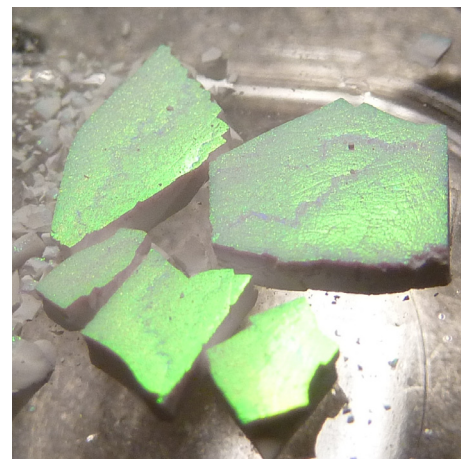


Abbildung 2: Grünliches Schimmern auf der Kristalloberfläche.

Optisches Verhalten

Zur einfacheren Beschreibung des optischen Verhaltens in Reflexion muss die Opalstruktur in ein äquivalentes Schichtmodell übertragen werden. Aufgrund der dichtesten Kugelpackung und der nicht punktuellen Berührung der PMMA-Kugeln innerhalb des Opals ergibt sich das Verhältnis zwischen PMMA und Luft mit 0,8 zu 0,2. Das optische Verhalten eines photonischen Kristalls in Reflexion kann näherungsweise über die Bragg-Bedingung für periodisch angeordnete Materialien beschrieben werden. In Abbildung 3 ist das vereinfachte Schichtmodell dargestellt.

Je nach Einfallswinkel α_{ein} ergibt sich eine Wellenlänge, die optimal reflektiert wird. Dieser Fall ist gegeben, sobald die optische Weglänge zwischen den Punkten A und D und die optische Weglänge zwischen den Punkten A, B und C ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge λ ist. Gleiches muss auch für den Pfad über die Punkte A, B, E, F und G gelten. Eine phasengleiche Überlagerung aller drei Pfade ist nicht grundsätzlich gegeben. Dieses Mo-

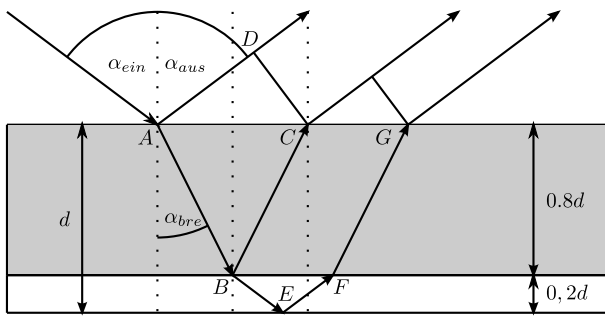


Abbildung 3: Aufbau des vereinfachten Schichtmodells des Kristalls.

dell ist nur für den senkrechten Lichteinfall geeignet und zeigt sehr gute Übereinstimmung mit dem Experiment [4]. Bei leicht schrägem Lichteinfall kann dieses Modell näherungsweise angewendet werden.

Sobald externer Druck auf die Struktur ausgeübt wird, kommt es zu einer Verformung der PMMA-Kugeln oder einfacher als Modell ausgedrückt, zu einer Verschiebung der Schichten. Somit ist die Bragg-Bedingung nicht mehr erfüllt und es kommt zu einer Abnahme der Reflektivität unter dem vorgegebenen Winkel α_{ein} und Lichtwellenlänge λ .

In Abbildung 4 ist das Reflexionsspektrum des photonischen Kristalls dargestellt. Hier zeigen sich zwei steile Flanken der Reflektivität bei Wellenlängen von ca. $\lambda_1 = 680 \text{ nm}$ und $\lambda_2 = 726 \text{ nm}$.

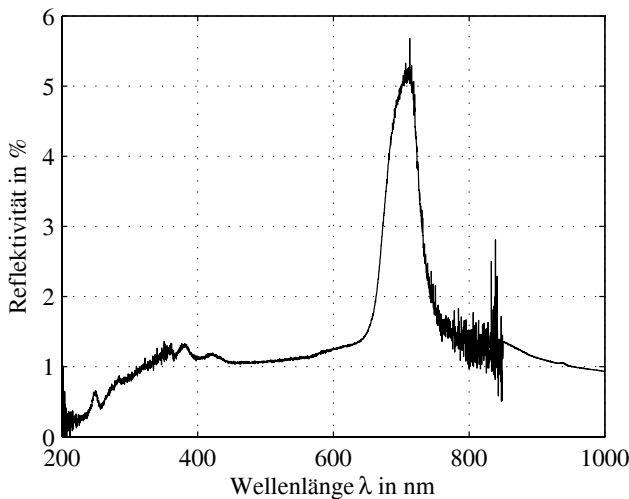


Abbildung 4: Reflexionsspektrum des photonischen Kristalls gemessen mit einem Spektrometer. Als Referenz wurde ein Spektralton (Weißlichtdiffusor) genommen.

Durchführung des Versuches

Der Opal aus PMMA wurde zwischen zwei Objektträger aus Glas gelegt und auf die nichtreflektive Seite Druck mittels eines piezoelektrischen Elementes gegeben. Die Ansteuerung erfolgt über einen Funktionsgenerator mit nachgeschaltetem Hochspannungsverstärker. Der Laserstrahl mit einer Wellenlänge von $\lambda = 672 \text{ nm}$ liegt auf der ansteigenden Flanke (siehe Abbildung 4) und wird

unter einem Winkel von ca. 24° auf den photonischen Kristall geleitet. Die Intensität der Reflexion wird mit einer Photodiode aufgenommen und auf einem Oszilloskop dargestellt. Als Triggersignal dient das Steuersignal für das piezoelektrische Element.

Ergebnisse

In Abbildung 5 sind die Ergebnisse der Druckmessung dargestellt. Es zeigt sich eine eindeutige Änderung der Reflektivität des photonischen Kristalls auf die Druckpulse, die mittels eines piezoelektrischen Elementes auf den Kristall gegeben werden. Das überlagerte Rauschen ist Abbildung 5 ist das Eigenrauschen der Lichtquelle.

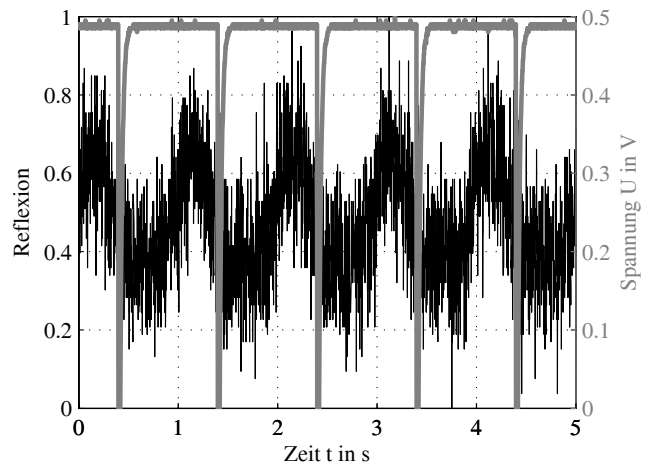


Abbildung 5: Messung der Druckreaktion des photonischen Kristalls bei periodischer Anregung mit Pulsen. In Grau ist das Anregungssignal und in Schwarz das Messsignal dargestellt.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, dass sich photonische Kristalle für die Schalldruckmessung eignen. In den folgenden Schritten muss das System genauer charakterisiert und weiter optimiert werden.

Literatur

- [1] Bykov, V.P.: Spontaneous emission in a periodic structure, Soviet Physics JETP, American Institute of Physics, 1972, Vol. 35, pp. 269
- [2] Sukhoivanov, Igor A. und Guryev, Igor V.: Photonic Crystals – Physics and Practical Modeling, 1. Auflage, Springer Verlag, 2009
- [3] Oertel, Anke; Lengler, Cornelia; Walther, Thomas; Haase, Markus: Photonic Properties of Inverse Opals Fabricated from Lanthanide-Doped LaPO4 Nanocrystals, Chemistry of Materials, 2009, Vol.21, No. 16, pp. 3883-3888
- [4] Oertel, Anke: Eigenschaften lumineszierender Nanopartikel in kolloidaler Lösung und in mikrooptischen Strukturen, Dissertation im Fachbereich Biologie/Chemie der Universität Osnabrück, 2010