

Entwicklung eines miniaturisierten Spektrometers für den optischen Wellenlängenbereich

Sebastian Smarzyk*, Katharina Strathmann*, Oliver Lass*, Matthias Haupt*

*Jade Hochschule, Friedrich-Paffrath-Str. 101, 26389 Wilhelmshaven

sebastian.smarzyk@jade-hs.de

Im Projekt „MiniSpectral“ wird an der Jade Hochschule ein miniaturisiertes Spektrometer entwickelt, das beispielweise in der analytischen Chemie eingesetzt werden kann. Das Konzept basiert auf einer polymerbasierten Optik, die in der Grundform einem Rowland-Kreis ähnelt und sämtliche Funktionen eines herkömmlichen Spektrometers ohne separate Linsensysteme erfüllt.

1 Einführung

Die Analyse des optischen Spektrums von Materie ermöglicht Rückschlüsse auf deren chemische und molekulare Zusammensetzung. Bei der Untersuchung beispielsweise von Lebensmitteln, Blut oder Medikamenten können miniaturisierte mobile Spektrometer eine zeitsparende Alternative oder Ergänzung zu klassischen stationären Spektrometern in Laboren darstellen.

Das Hauptziel des Projektes besteht darin, eine polymerbasierte Optik in nur einem Herstellungsschritt zu realisieren, indem moderne Spritzgusstechnik und speziell entwickelte innovative Werkzeuge verwendet werden. Diese Arbeit konzentriert sich auf die detaillierte Erläuterung der grundlegenden Funktionen und des aktuellen Entwicklungsstands des miniaturisierten Spektrometers.

2 Funktionsweise

Das Spektrometer baut auf der grundlegenden Idee eines Rowland-Kreises [1] auf. Die dreidimensionale Kuppelform der Optik ermöglicht eine effiziente Lichtführung und somit ein verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis (S/N) [2]. Durch die Geometrie der Kuppel und des konkaven Beugungsgitters können sämtliche Funktionen eines Spektrometers erfüllt werden wodurch bisher erforderliche Einzelkomponenten wie aufwendige Linsensystem komplett entfallen.

Abbildung 1 veranschaulicht das Funktionsprinzip des Spektrometers: Licht gelangt durch eine Eingangsfaser in die polymerbasierte Kuppel mit dem Radius r . Am Ende der Kuppel befindet sich ein verspiegeltes, konkaves Dispersionsgitter mit einem Radius von $2r$. Das Gitter zerlegt das Licht in seine einzelnen Wellenlängen und reflektiert es zurück in die Polymerkuppel. Durch das Rowland-Kreis Radiusverhältnis von 2 zu 1 fokussieren sich die Strahlen auf der Oberfläche der Kuppel. Eine Detektorzeile ist an der Oberfläche der Kuppel platziert, um

das in einzelne Wellenlängen zerlegte Licht zu detektieren und für weitere Analysen zu nutzen.

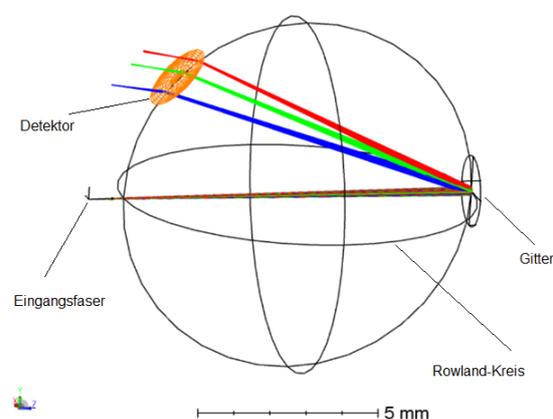


Abb. 1 Mit Ansys Zemax erstellte erste Simulation zur Veranschaulichung des Konzeptes des Spektrometers: Die Optik des Spektrometers basiert auf einer polymerbasierten Kuppel, die einen Radius r aufweist. Auf dieser Kuppel ist ein verspiegeltes Gitter aufgebracht, das einen Krümmungsradius von $2r$ besitzt.

3 Umsetzung

Erste Simulationen wurden mit der Raytracing Software Ansys Zemax OpticStudio vorgenommen. In Abbildung 1 sind exemplarisch drei Wellenlängen (400 nm, 550 nm, 600 nm) sowie ein Rowland-Kreis-Radius von 10 mm dargestellt. Die Eintrittsöffnung des Spektrometers hat einen Durchmesser von 1 mm, der mit dem Durchmesser einer Standard-SI-Polymerfaser (POF) übereinstimmt. Sowohl die Kuppel als auch das Gitter bestehen in dieser Simulation aus PMMA. Für die Verspiegelung des Gitters erweist sich Aluminium als vielversprechendes Material, da es die Reflektivität im sichtbaren Spektralbereich erhöht [3]. Das Gitter verfügt über eine Liniendichte von 1000 Linien/mm.

Ein Industriepartner wird die Gitter für die geplanten Demonstratoren herstellen und hat in vorherigen

Tests erfolgreich Gitterstrukturen mit einer Dichte von bis zu 1600 Linien/mm erzeugt.

Das spektrale Auflösungsvermögen hängt vorrangig von der Größe der Eintrittsöffnung und der Liniendichte des Gitters ab. Es kann mithilfe des Rayleigh-Kriteriums bestimmt werden:

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = nN \quad (1)$$

Mit λ der Wellenlänge, n der Beugungsordnung, N der Anzahl der beleuchteten Linien und $\Delta\lambda$ der Spektralauflösung. [4]

Bei einer Liniendichte von 1000 Linien/mm und einer Wellenlänge von 550 nm wird so in der ersten Beugungsordnung ein maximales spektrales Auflösungsvermögen von 0,55 nm erreicht. Das Erreichen des Zieles eines spektralen Auflösungsvermögens von unter 1 nm ist realistisch.

Das Gitter der in Abbildung 1 dargestellten Simulation wird mithilfe der klassischen Gittergleichung

$$g \sin(\alpha_n) = n\lambda \quad (2)$$

simuliert. Wobei g die Gitterkonstante ist und α_n der zur Beugungsordnung gehörende Ablenkwinkel. Eigenschaften des Gitters, die über die Liniendichte hinausgehen, wie beispielweise die Ausrichtung des Gitters in einer gewölbten Struktur oder das Blazing des Gitters werden hier nicht mit berechnet. Um diese wichtigen Aspekte zu berücksichtigen müssen im nächsten Simulationsschritt komplexe wellenoptische Simulationen durchgeführt werden.

Zusätzlich zur Durchführung der Simulationen werden auch Materialtests wie Absorptions- und Transmissionsmessungen sowie Temperaturtests durchgeführt. Mithilfe dieser Tests soll bewertet werden welcher Kunststoff sich am besten für die Herstellung der Kuppel und des Gitters des Spektrometers eignet.

4 Ausblick

Im Anschluss an die Simulationen und Laborvor- tests erfolgt die Herstellung von ersten Demonstratoren. Dabei wird die Kuppel mithilfe modernster Spritzgusstechnik in einem einzigen Arbeitsschritt gefertigt werden. Die Herstellung der Gitter an der Oberfläche der Polymerkuppel soll mit Ultrapräzisionsbearbeitung (UPB) erfolgen. Hierbei handelt es sich um eine Fertigungstechnik, bei der mit Diamantwerkzeugen sehr kleine Schichten der Oberfläche des Materials abgetragen werden. Mit UPB lassen sich hochpräzise Strukturen mit einer Toleranzabweichung im Sub-Mikrometerbereich erzeugen. Sie eignet sich, um sphärische und asphärische

Oberflächen in hoher optischer Qualität herzustellen. [5]

Die ersten so gefertigten Demonstratoren werden im Labor untersucht und charakterisiert. Die Ergebnisse werden dann mit den Simulationen verglichen. Mithilfe dieser Erkenntnisse sollen die Parameter der Optik und die Produktionsabläufe optimiert werden, um die nachfolgende Generation von Spektrometern zu verbessern. Dadurch wird es in naher Zukunft möglich sein, ein erstes voll funktionsfähiges, polymerbasiertes, miniaturisiertes Spektrometer herzustellen.

Literatur

- [1] Henry a. Rowland. XXIX. „On concave gratings for optical purposes“. *Philosophical Magazine Series 5*, 16(99):197_210, sep 1883.
- [2] S. Höll, M. Haupt, and U. H. P. Fischer, "Design and development of an injection-molded demultiplexer for optical communication systems in the visible range," *Appl. Opt.* 52, 4103-4110 (2013)
- [3] G. Hass and J. E. Waylonis. Optical constants and reflectance and transmittance of evaporated Aluminium in the Visible and Ultraviolet. *Journal of the Optical Society of America*, 51(7):719, 1961.
- [4] Zinth, Wolfgang and Zinth, Ursula. "4.5 Anwendungen von Beugung und Interferenz". *Optik: Lichtstrahlen - Wellen - Photonen*, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2011, pp. 197-223.
- [5] W.B. Lee und B.C.F. Cheung. *Surface Generation in Ultraprecision Diamond Turning: Modelling and Practices*. Engineering Research Series (REP). Wiley, 2003. isbn: 9781860583988.