

Miniaturisiertes low-cost Fourierspektrometer für ein mikrooptisches Blutanalysestystem

Oliver Buse*, Günter Beichert**, Arne Kraft*, Eduard Reithmeier*

*Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Hannover, Nienburger Str. 17, 30167 Hannover

**Günter Beichert Holo-Support, Turmstr. 17, 30982 Pattensen, Germany

mailto: oliver.buse@imr.uni-hannover.de

In vielen Bereichen der Messtechnik, Umweltanalytik und Medizin werden kleine, robuste und mobile Spektrometer für den sichtbaren Spektralbereich benötigt, die über keine beweglichen Teile verfügen und sich durch eine geringe Leistungsaufnahme auszeichnen. Verfügbar sind Gitterspektrometer, deren Effizienz und Auflösungsvermögen mit zunehmendem Grad der Miniaturisierung jedoch stark abnehmen. Unser Interesse richtet sich daher auf Fourierspektrometer. Wie das nachfolgende Konzept zeigt, besitzen sie aufgrund technologischer Vorteile ein größeres Miniaturisierungspotenzial.

1 Motivation

Bezüglich der Anwendungen des miniaturisierten Spektrometers für den sichtbaren Spektralbereich denken wir besonders an die nicht invasive Messung von Remissionsspektren von durchblutetem Gewebe, aus denen sich die Blutsauerstoffsättigung bestimmen lässt [1]. Zur Bestimmung der lokalen Sauerstoffsättigung wird das remittierte Licht einer weißen LED spektral zerlegt und das Extinktionsspektrum berechnet (Abb. 2). Mit Hilfe bekannter, sättigungsabhängiger Referenzspektren kann dann auf den Sättigungsgrad geschlossen werden. Abb. 1 zeigt neben den Referenzspektren für oxy- und deoxygeniertes Hämoglobin auch andere wichtige Lichtabsorber im Gewebe, wie DOPA-Melanin und Bilirubin, die bei der Berechnung der Sauerstoffsättigung berücksichtigt werden müssen:

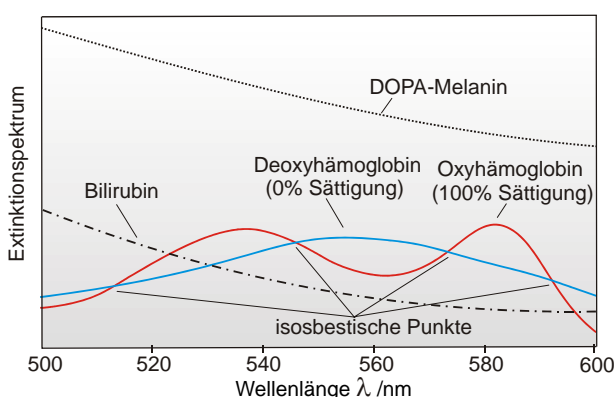


Abb. 1 wichtige Lichtabsorber im Gewebe

Durch die Erhöhung der spektralen Auflösung des Fourierspektrometers gegenüber einem derzeit eingesetzten, kommerziellen Gitterspektrometers ist eine sicherere Bestimmung der Blutsauerstoffsättigung möglich.

2 Aufbau des Messsystems

Das Fourierspektrometer (Abb.2) beruht auf dem klassischen Michelson-Interferometer, das in folgender Weise modifiziert wird: Anstelle eines beweglichen Spiegels in einem Interferometerarm wird zur Erzeugung eines optischen Gangunterschiedes zwischen den Strahlwegen in den beiden Interferometerarmen ein Spiegel gekippt und das sich dabei räumlich ausbildende Interferenzstreifenmuster wird von einer Fotodiodenzeile detektiert.

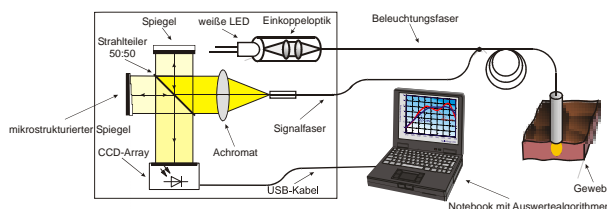


Abb. 2 Messaufbau des Fourierspektrometers am Beispiel eines Blutanalysestystems

Der Kippwinkel des Spiegels darf aus mehreren Gründen nicht zu groß gewählt werden:

- reduzierte Überlappung der Teilstrahlbündel auf der Fotodiodenzeile ist gleichzusetzen mit Informationsverlust im Spektrogramm
 - bei gegebener räumlicher Kohärenz der Beleuchtung wirken sich verkippte Teilstrahlbündel negativ auf den Interferenzkontrast aus
 - der Kippwinkel wirkt sich direkt auf die Interferenzstreifendichte aus. Er darf damit nicht größer gewählt werden, als es für die Spektrogrammabtastung durch die Fotodiodenpixel förderlich ist.
- Andererseits wäre für ein möglichst großes Auflösungsvermögen des Spektrometers ein großer Gangunterschied bzw. ein großer Kippwinkel anzustreben.

Unser Konzept sieht vor, von der linearen Detektion des Interferenzstreifenmusters mit einer Fotodiodezeile überzugehen auf die zweidimensionale Detektion mit einem Fotodiodenarray (Bildsensor, CCD-Array bzw. CMOS-Array). Es können nun beispielsweise mehrere in der Tiefe gestaffelte Kippspiegel (Stufenspiegel) angeordnet werden, sodass trotz kleiner Kippwinkel große Gangunterschiede erzeugt werden. Der zur Zeit eingesetzte Stufenspiegel ist im Abschnitt 5 näher beschrieben.

Aufgrund ihrer großen Verbreitung sind Bildsensoren (Kameramodule) äußerst kostengünstig und in der Regel billiger als eine einzelne Fotodiodezeile. Hier werden Modelle mit USB-Schnittstelle bevorzugt. Die Stromversorgung der Module erfolgt aus dem Akku eines angeschlossenen Notebooks oder Pocket-PCs.

3 Auflösungsvermögen und Spiegeldesign

Mit dem Einsatz eines strukturierten Spiegels soll ein maximaler Gangunterschied s_{max} im Michelson-Interferometer erzeugt werden, der mit dem erzielbaren Wellenlängenaufhebungsvermögen $\delta\lambda$ in folgendem Zusammenhang steht:

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{s_{max}} \quad (1)$$

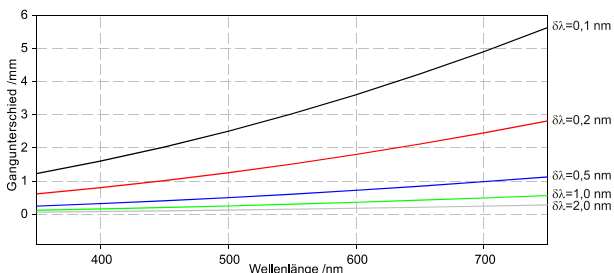


Abb. 3 erforderlicher Gangunterschied

Gangunterschiede bis 3 mm sind derzeit denkbar, d.h. Auflösungen bis zu 0,2 nm sollten realisierbar sein. Mit feiner werdenden Strukturen auf dem Spiegel (Verringerung der Stufenbreite), gewinnt die Beugung an den Strukturkanten an Einfluss, die den Interferenzkontrast mindert.

Vergleichbare Mikro-Gitterspektrometer erreichen Auflösungen von 3 bis 10 nm.

4 Farbbildsensor

Mit einem Farbbildsensor kann das Fourierspektrum in drei sich überlappende Wellenlängenbereiche aufgespalten werden. Dadurch wird eine effektive Steigerung der Dynamik des Sensors erwartet. Abb. 4 zeigt ein mit dem Stufenspiegel erzeugtes Fourierspektrum einer Gasentladungslampe und die Zerlegung in die drei RGB-Farbkanäle.

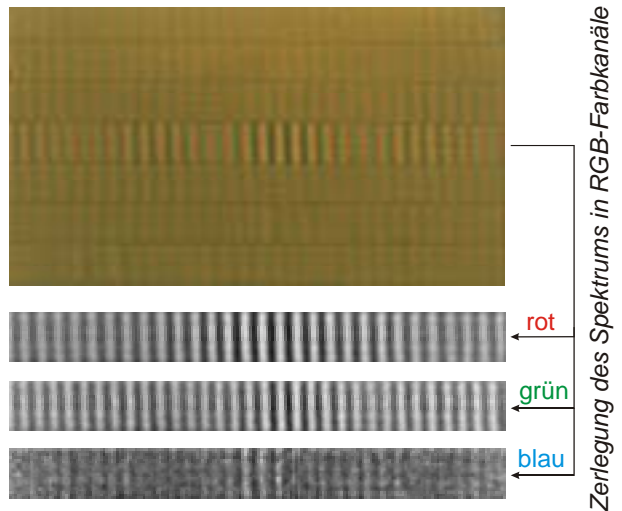


Abb. 4 Fourierspektrum einer Gasentladungslampe

5 Mikrostrukturierter Spiegel

Für den oben beschriebenen Spektrometereinsatz wurde von der Firma Kugler (<http://www.kugler-precision.com/>) ein Stufenspiegel im Mikrofräsverfahren aus Metall hergestellt (Abb. 5).

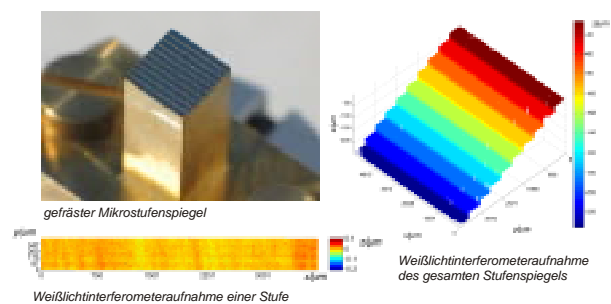


Abb. 5 mikrostrukturierter Stufenspiegel

Im Hinblick auf ein low-cost Spektrometer steht der direkte Einsatz des mikrogefrästen Stufenspiegels im Widerspruch. Der Vollmetallspiegel soll als Prägestempel in einer Heißpräganlage eingesetzt werden, wobei der Spiegel in Kunststoff (PMMA) detailgetreu abgeformt wird. Diese Verfahren bietet die Möglichkeit der kostengünstigen Vervielfältigung mikrostrukturierter Bauteile.

6 Ausblick

Im Hinblick auf die Erzeugung großer Gangunterschiede und stetiger Fourierspektren wird das Spiegeldesign simuliert und optimiert. Die strukturierten Spiegel sollen mit Hilfe einer Heißpräganlage kostengünstig vervielfältigt werden.

7 Literatur

- [1] G. Ehret: „Optisches Mikromesssystem zur Bestimmung der lokalen Blutsauerstoffsättigung“, Dissertation, Universität Hannover, Shaker-Verlag