

# Aufbau eines statischen low-cost Fourierspektrometers

Dipl.-Ing. Oliver Buse, Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Nienburgerstr. 17, 30167 Hannover, Leibniz Universität Hannover, oliver.buse@imr.uni-hannover.de

## Kurzfassung

Mithilfe eines 5-Achs-Ultrapräzisionsbearbeitungszentrums soll ein Mikrostufenspiegel für ein neuartiges, statisches Fouriertransformationsspektrometer hergestellt werden. Die Vorteile der konventionellen Fourier-Spektroskopie, wie hohes Auflösungsvermögen und Miniaturisierbarkeit können so mit der Robustheit moderner Mikrogritterspektrometer kombiniert werden. Für Low-Cost-Anwendungen soll der gefräste Mikrospiegel mithilfe der Heißpräganlage HEX03 in Kunststoff vervielfältigt werden.

## 1 Einleitung

Das Haupteinsatzgebiet von Spektrometern ist die optische Spektroskopie. Unter optischer Spektroskopie versteht man die Gesamtheit aller qualitativen und quantitativen Analyseverfahren, die auf Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung mit Materie beruhen. Der Wellenlängenbereich liegt dabei zwischen 200 nm des fernen Ultraviolett (UV) und erstreckt sich über den tatsächlich sichtbaren Bereich (VIS) bis ins nahe Infrarot (NIR) bei ungefähr 2500 nm [5]:



**Bild 1** sichtbares Spektrum

Jedes Atom oder Molekül tritt spezifisch mit elektromagnetischer Strahlung in Wechselwirkung, wodurch sich für jede Probe sozusagen ein spektraler „Fingerabdruck“ ergibt. Die optische Spektroskopie unterteilt sich in die Bereiche Absorption, Reflexion, Streuung und Lumineszenz. Entsprechend dieser Gliederung wird eine Wechselwirkung zwischen Materie und elektromagnetischer Strahlung auf unterschiedliche Weise erzeugt. Durch die Auswertung des aufgenommenen Spektrums der Probe können somit Erkenntnisse über deren Zusammensetzung gewonnen werden. Die klassische Spektroskopie wird vorwiegend mit hochauflösenden Labor- und Prozessspektrometern durchgeführt. Daneben steigt die Nachfrage nach miniaturisierten, robusten und kostengünstigen Geräten kontinuierlich.

## 2 Einsatz von Spektrometern

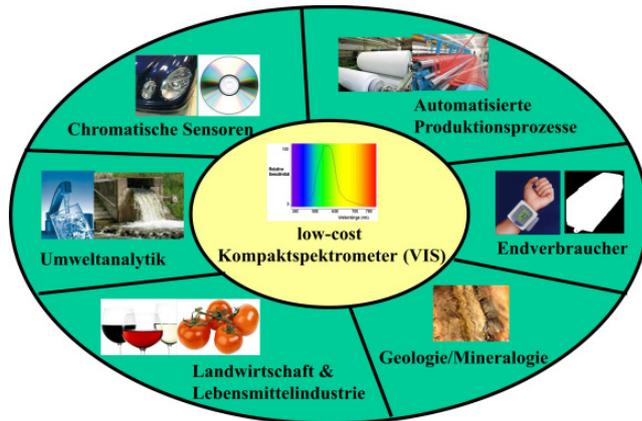
Die optische Spektroskopie ist ein fester Bestandteil der Analytik in unterschiedlichsten Bereichen wie der Physik, Chemie, Biologie, Medizin und den Materialwissenschaften. Als Vorteile dieser Verfahren gelten die kontakt-

lose Messung, die zerstörungsfreie Prüfung oftmals ohne Veränderung oder Vorbereitung der Probe, die Analyse von Proben in jedem Aggregatzustand sowie die Möglichkeit zur Bestimmung sich zeitlich ändernder Eigenschaften [2].

Hauptanwendungsfelder sind beispielsweise die Diagnostik in der Biologie, Medizin, Geologie, Lebensmittelchemie sowie die Umweltanalytik. Die Wasseranalytik bietet allein zahlreiche Einsatzmöglichkeiten bei der Beurteilung von Grundwasser, Abwasser, Prozesswasser oder Trinkwasser in der Lebensmittelindustrie. Besonders für die mobile Diagnostik werden robuste und kompakte Spektrometer mit geringeren Auflösungen gegenüber den Laborvarianten eingesetzt. Des Weiteren finden Spektrometer zunehmend in der Farbanalyse als Spektralfotometer Anwendung. In der Automatisierungstechnik werden üblicherweise Dreibereichs-Farbsensoren eingesetzt, die auf einer Anordnung von rot, grün und blau filternden Fotodioden basieren. Eine Probe wird mit Weißlicht bestrahlt und das remittierte Licht über die farbfilternden Fotodioden aufgenommen. Anhand der jeweils gemessenen Intensitäten kann dann eine Auswertung erfolgen. Dieses Verfahren ist allerdings bei hochpräzisen Farbunterscheidungen oft zu ungenau.

Für die Qualitäts- und Prozesssicherung in der Druck-, Papier-, Lebensmittel- und Textilindustrie, in Fertigungsstraßen zur Herstellung von Kunststofffußbodenbelägen oder Furnieren sowie in Lackierprozessen werden dagegen Spektralfotometer zur Farbkontrolle eingesetzt. Sie werden ebenfalls zur exakten Farbbestimmung beim Überstreichen von Vandalismusschäden (wie z. B. Graffiti) an Fassaden eingesetzt. Selbst witterungsbedingte Farbänderungen können somit berücksichtigt und kostenintensive Komplettanstriche vermieden werden. Dabei wird das Spektrum des remittierten Lichts mit dem Referenzspektrum der Weißlichtquelle verglichen. Die Objektfarbe kann somit präzise aus den reflektierten bzw. absorbierten Wellenlängen im Spektrum ermittelt werden. Im Vergleich zu den in der Laborspektroskopie eingesetzten Spektrometern sind auch hier bereits relativ geringe Auflösungen ausreichend. Generell unterscheiden sich Spektralfoto-

meter von reinen Spektrometern durch die Auswertung des aufgenommenen anhand des Vergleichs mit dem Referenzspektrum.



**Bild 2** Einsatzgebiete kompakter Spektrometer

Darüber hinaus werden Spektrofotometer auch für die Beurteilung des Reifegrads landwirtschaftlicher Produkte, wie z. B. Äpfel, Tomaten oder Kaffee eingesetzt. Neben der rein äußerlichen Farbbestimmung, die früher über Farbtafeln erfolgte, werden hierbei ebenfalls innere Qualitätsmerkmale wie der Chlorophyllgehalt ermittelt. Aus dem Spektrum des Prüflings kann somit der Erntezeitpunkt unter Feldbedingungen präzise bestimmt werden. Spektrofotometer kommen auch in der Lebensmittelindustrie u.a. bei den Herstellungsprozessen von Wein oder Sekt zum Einsatz. Anhand der Farbentwicklung, Zusammensetzung und des Säuregehalts können die Qualität und Reifegrad bestimmt und Verunreinigungen identifiziert werden.

Neben diesen vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten der optischen Spektroskopie werden Spektrometer auch in konfokal-chromatischen Wegsensoren eingesetzt. Das Funktionsprinzip beruht dabei auf der Dispersion. Für eine mit Weißlicht durchstrahlte Linsenanordnung ergeben sich aufgrund ihrer dispersiven Wirkung farb- bzw. wellenlängenabhängige Brennweiten. Weißlicht wird über einen Lichtwellenleiter in den Messkopf des Sensors geführt. Sende- und Empfangsoptik sind dabei im Messkopf identisch. Die Stirnseite des Lichtwellenleiters im Sensorkopf dient als Punktlichtquelle und gleichzeitig als Lochblende für den Detektor, um möglichst nur die Reflexion im Brennpunkt zu erfassen. Das reflektierte Licht wird im gleichen Wellenleiter empfangen und über einen Faserkoppler zum Spektrometer geführt, mit dessen Hilfe die Fokus-Wellenlänge bzw. -Spektralfarbe ermittelt werden kann. Für bekannte wellenlängenabhängige Ablenkungswinkel des Linsensystems können die jeweiligen Brennweiten bestimmt werden. Jeder Wellenlänge im Spektrum wird somit ein bestimmter Abstand zum reflektierenden Messobjekt zugeordnet. Es erlaubt dabei eine hochpräzise und berührungslose Messung auf spiegelnden und selbst diffusen Oberflächen. Darüber hinaus können einseitige Dickenmessungen von transparenten Medien und Beschichtungen, Füllstandermittlungen oder Rauheits-

bestimmungen ausgeführt werden. Besonders die Schichtdickenmessung bietet zahlreiche Einsatzmöglichkeiten, u.a. bei der CD-Herstellung oder Beschichtung von Glas und Folien.

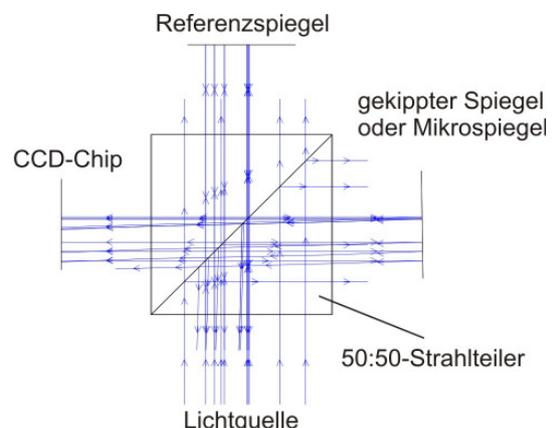
### 3 Projektziele und Vorgehen

In der optischen Messtechnik sind so genannte Mikrogitterspektrometer heutzutage nicht mehr wegzudenken. Hergestellt wird das Herzstück eines solchen Spektrometers, das sog. Beugungsgitter, auf speziellen Maschinen, sog. Ultrapräzisionsbearbeitungszentren. Das Institut für Mess- und Regelungstechnik (IMR) plant die Anschaffung eines solchen Bearbeitungszentrums mit dessen Hilfe es möglich sein wird eine Vielzahl von mikrotechnischen Bauteilen mit durchaus optischer Oberflächengüte herzustellen, die dann mithilfe der Heißpräganlage HEX03 in Kunststoff vervielfältigt werden können, so wie es beispielsweise bei Optiken von CD- und DVD-Playern üblich ist. Eine Oberfläche besitzt „optische Qualität“, falls eine spiegelnde Reflexion beim Auftreffen elektromagnetischer Wellen möglich ist. Nach dem Rayleighkriterium gilt eine Oberfläche als spiegelnd, wenn die Ungleichung

$$R_a < \frac{\lambda}{16\cos(\theta)}$$

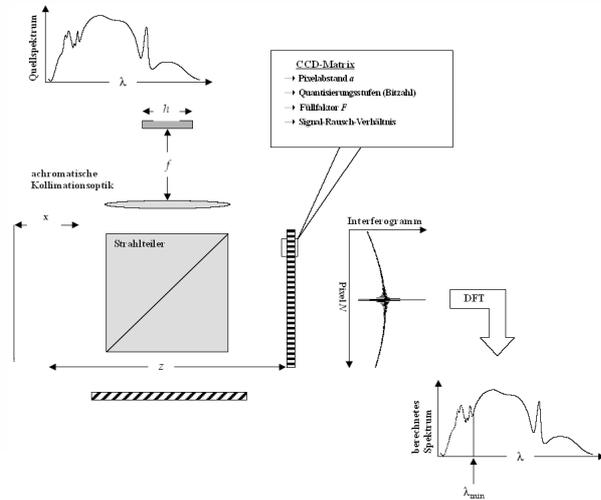
erfüllt ist [3], wobei  $R_a$  den arithmetischen Mittenrauwert der Oberfläche,  $\lambda$  die Wellenlänge der einfallenden elektromagnetischen Strahlung und  $\theta$  den Einfallswinkel beschreiben. Die Ungleichung verdeutlicht die Abhängigkeit der "optischen Qualität" von der Wellenlänge  $\lambda$ . Für den sichtbaren Bereich der elektromagnetischen Strahlung werden Oberflächen mit optischer Qualität in der Literatur meist ab Mittenrauwerten kleiner 15 nm angegeben.

Mithilfe eines fünffachen Ultrapräzisionsbearbeitungszentrums soll der erforderliche Mikrospiegel für ein statisches Fouriertransformationsspektrometer für den sichtbaren Wellenlängenbereich hergestellt werden. Das Funktionsprinzip basiert hierbei auf einem klassischen Michelson-Interferometer:



**Bild 3** Modell eines Michelson-Interferometers

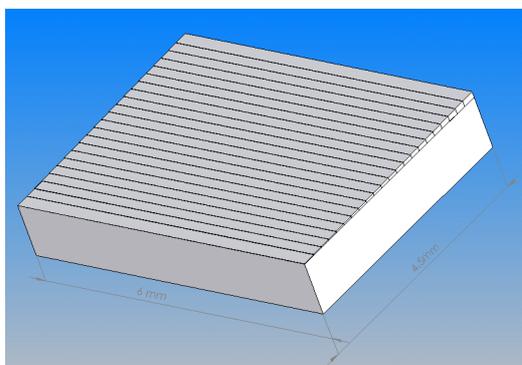
Detektoren in konventionellen FT-Spektrometern zeichnen durch das Verfahren eines Spiegels innerhalb eines Interferometerarms ein eindimensionales Intensitätsprofil (Interferogramm) in Abhängigkeit der Spiegelposition auf. Über die Fouriertransformation kann aus der aufgenommenen Intensität das zugehörige Spektrum der eingehenden Strahlung berechnet werden:



**Bild 4** Berechnung des eingestrahelten Spektrums

Die Vorteile der konventionellen FT-Spektrometer, wie ihr hohes Auflösungsvermögen und ihre Miniaturisierbarkeit sollen durch den Einsatz eines statischen Spiegelsystems mit der Robustheit moderner Gitterspektrometer kombiniert werden. Anstelle der üblicherweise eingesetzten Piezo-Aktoren für das Verfahren eines Spiegels wird nun ein zweidimensionales Spiegelsystem (Mikrospiegel) eingesetzt, das den notwendigen Gangunterschied flächig erzeugt. Das dadurch entstehende zweidimensionale Interferenzstreifenmuster wird mit einem CCD-Detektor erfasst. Langfristiges Ziel ist dabei die kostengünstige Replikation des Mikrospiegels mittels Heißprägen zur Entwicklung eines low-cost FT-Spektrometers [1].

Die kleinsten lateralen Strukturabmessungen des entworfenen Spiegels liegen derzeit zwischen 200 und 400  $\mu\text{m}$ , während die Höhenunterschiede bei etwa 5  $\mu\text{m}$  liegen:

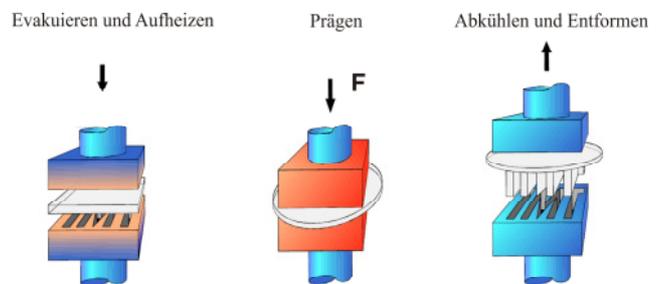


**Bild 5** CAD-Modell des Mikrospiegels

Besonders durch die notwendige optische Oberflächengüte sowie die geringen Steigungen der Strukturen zur Erzeugung des Gangunterschieds ist der Einsatz des Mikrofräsens mit Hartmetall-Werkzeugen nicht geeignet. Durch die Ultrapräzisionszerspanung mit rechteckig oder v-förmig facettierten Werkzeugen aus Diamant können die gewünschten Treppenprofile in optischer Qualität durch Fly-Cutting, Hobeln, End-Milling oder das außeraxiale Drehen gefertigt werden.

## 4 Vervielfältigung

Mit der Heißpräganlage HEX 03 des IMR sollen kostengünstige Kopien des gefrästen Mikrospiegels in Kunststoff (PMMA) angefertigt werden, die anschließend mit Aluminium beschichtet werden, um als Spiegel zu fungieren. Der Prozess des Heißprägens gliedert sich dabei in Aufheiz-, Präge- und Abkühlphase und stellt eine verhältnismäßig einfache und kostengünstige Technologie dar:



**Bild 6** Heißprägeprozess

Als Ausgangsmaterial kommen im Allgemeinen vorgeformte Halbzeuge zum Einsatz. Zu Beginn wird das Halbzeug auf die untere Werkzeughälfte in der Plattenpresse gelegt. Nach einem ersten Schließen des Werkzeugs wird der Werkzeughohlraum evakuiert, um spätere Luft einschüsse beim Prägen zu vermeiden. Es folgt eine Aufheizung der Prägehälften oberhalb der Glasübergangstemperatur des Polymers über die Heizkanäle im Werkzeug. Nach Abschluss der Heizphase wird der obere Prägeeinsatz des Werkzeugs auf das Halbzeug gesenkt. In der Prägephase wird der weiter beheizte Formeinsatz in den nun viskoelastischen Formstoff gedrückt. Während der abschließenden Abkühlphase wird das Werkzeug unter Beibehaltung der Prägekraft abgekühlt und das umgeformte Halbzeug anschließend entformt [4].

## 5 Zusammenfassung

Mithilfe der Ultrapräzisionsbearbeitung ist es möglich Werkstoffe so zu bearbeiten, dass sie eine spiegelnde Oberfläche besitzen. Auf einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum soll ein Mikrospiegel für ein statisches Fourierspektrometer gefräst werden, das in vielen Bereichen der optischen Messtechnik eingesetzt

werden kann und einige Vorteile gegenüber klassischen Gitterspektrometern besitzt. Da die Herstellung des Mikrospiegels sehr aufwendig, kosten- und zeitintensiv ist, soll der Spiegel dann in einem Heißprägeprozess vervielfältigt werden. Die abgeformte Kopie muss anschließend beispielsweise mit Aluminium beschichtet werden, um als Spiegel zu fungieren.

## 6 Literatur

- [1] Buse, O. : Entwicklung eines low-cost Fourierspektrometers, Tagungsband des ersten Workshops für Optische Technologien, PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, 2008
- [2] Henze, N.: Spektroskopie und Spektrometer: Grundlegende Begriffe und Prinzipien, Optik und Photonik: 2006, S. 56-60
- [3] Horbach, J.: Verfahren zur optischen 3D-Vermessung spiegelnder Oberflächen, Karlsruhe. Universitätsverlag, 2007
- [4] Menz, W., Mohr, J., Paul, O.: Mikrosystemtechnik für Ingenieure, Weinheim Wiley-Verlag, 2005
- [5] Schmidt, W.: Optische Spektroskopie: Eine Einführung (2. Auflage), Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2000