

Aufbau und Betrieb eines Infrarot-Mikrospektrometers auf der Basis eines MEMS-FP-Filters

Design and Operation of a Fabry-Pérot-Based MWIR Microspectrometer

Martin Ebermann, Norbert Neumann, InfraTec, Dresden

Zusammenfassung In der IR-Absorptionsspektroskopie gibt es ein großes Potenzial für Mikrospektrometer z. B. für die Mehrkomponentenanalyse in der Gasesstechnik. Es wird ein Mikrospektrometer für den Spektralbereich 3–5 µm vorgestellt, welches auf einem pyroelektrischen Detektor und einem MEMS-Fabry-Pérot-Filter (FPF) basiert. Die Gestaltung des optischen Systems hat großen Einfluss auf das spektrale Auflösungsvermögen und den Signal-Rausch-Abstand

des FP-Spektrometers. ▶▶▶ **Summary** There is a large potential in the field of infrared absorption spectroscopy, particularly if multicomponent mixtures have to be analyzed. A microspectrometer for the spectral range 3–5 µm is presented, which is based on a pyroelectric detector with an integrated MEMS Fabry-Pérot filter. The influence of different optical set-ups on the spectral resolution and the signal-to-noise ratio are discussed.

Schlagwörter MEMS-Fabry-Pérot-Interferometer, MIR-Mikrospektrometer, spektral abstimmbare Infrarot-Detektor, Infrarot-Spektroskopie ▶▶▶ **Keywords** MEMS Fabry-Pérot interferometer, MWIR microspectrometer, tunable infrared detector, infrared spectroscopy

1 Einleitung

Die Infrarot-Absorptionsspektroskopie ist ein bewährtes Messverfahren in der Gasanalyse, aber auch in vielen anderen Anwendungsfeldern, wie z. B. in der Feuer- und Flammensensorik. Typische Infrarot-Messgeräte sind häufig einfach aufgebaut. Sie bestehen aus einer meist breitbandigen Infrarot-Strahlungsquelle, welche eine Probenkammer durchstrahlt (beispielsweise in Form einer Gasküvette). Zur Analyse werden mindestens ein Mess- und Referenzkanal, oft auch noch zusätzliche Kanäle verwendet, deren unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit mit Hilfe von Schmalbandfiltern vorgegeben ist. Die Filterwellenlängen sind auf die Absorptionsbanden, die für die jeweilige Messaufgabe von Interesse sind, fest abgestimmt. In der praktischen Umsetzung werden meist mehrkanalige Detektoren eingesetzt, aber auch Filterräder in Kombination mit einem Einzeldetektor finden noch vielfach Verwendung [1; 2].

Für weitere Fortschritte in dieser sehr etablierten Technologie existieren einige anspruchsvolle und widerstreitende Anforderungen: Um die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messung zu verbessern, insbesondere um Querempfindlichkeiten zu verringern, ist es erforderlich, weitergehende spektrale Informationen zu erfassen. Auf der anderen Seite sollen die Messungen beschleunigt werden. Der Wunsch nach kompakten und portablen Geräten, die auch unter rauen Bedingungen eingesetzt werden können, erzeugt einen starken Druck zur Miniaturisierung. Der oben genannte konventionelle Ansatz, um zusätzliche Spektralkanäle unterzubringen, stößt natürlicherweise an Grenzen. Dabei ist es in der Praxis auch ein großes Problem, eine Vielzahl von Detektorkanälen gleichmäßig und langzeitstabil zu beleuchten. Filterradlösungen dagegen sind kaum miniaturisierbar und hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit oftmals problematisch.

In der Summe der Anforderungen ergibt sich zunehmend der Bedarf nach einem niedrig auflösenden, robusten und kostengünstigen Mikrospektrometer für den mittleren infraroten (MIR) Wellenlängenbereich. Viele Entwicklungen in diese Richtung basieren auf der Miniaturisierung von Gitterspektrometern [3; 4]. Auch im Bereich der Fourier-Transformations-Infrarot-(FT-IR) Spektrometer gibt es derartige Entwicklungen [5]. Einige der bekannt gewordenen Lösungen bieten ein relativ hohes Auflösungsvermögen und messen schnell mit gutem Signal-Rausch-Abstand (SNR). Auf der anderen Seite ist gerade bei diesen Lösungsansätzen das Miniaturisierungs- und Integrationspotenzial nicht sehr hoch.

In der Literatur ist auch schon vielfach über den Einsatz von mikromechanischen Fabry-Pérot-Interferometern (FPI) als durchstimmbare Filter berichtet worden [6–8], in vielen Fällen allerdings mit nur sehr niedriger Finesse und damit stark eingeschränktem spektralen Auflösungsvermögen. Der limitierende Faktor ist hier oft die starke Deformation der Reflektoren, die als dünne, freitragende Schichten mit den Technologien der Oberflächenmikromechanik hergestellt sind. Eine höhere Finesse lässt sich dann oft nur mit einem stark reduzierten optischen Durchsatz erkaufen.

Mit dem hier vorgestellten Ansatz eines Fabry-Pérot-Filters (FPF) in Volumenmikromechanik lassen sich die genannten Probleme umgehen. Die Integration eines MEMS-FPF in einen pyroelektrischen Infrarotdetektor stellt im Prinzip ein kompaktes Spektrometermodul dar [9]. Mit einem solchen spektral durchstimmbaren Detektor ist es zudem möglich, bestehende Gerätedesigns zu adaptieren, um schnell und mit geringem Aufwand zu neuen messtechnischen Lösungen zu gelangen.

2 Durchstimmbarer Detektor

2.1 Grundlagen des Fabry-Pérot-Interferometers

Das klassische Fabry-Pérot-Interferometer ist in Bild 1 dargestellt. Zwei ebene und teildurchlässige Spiegel mit dem Reflexionsgrad R sind im Abstand d parallel zueinander angeordnet und schließen einen optischen Spalt mit der Brechzahl n ein. Auf diese Weise entsteht ein optischer Resonator, in dem Vielstrahlinterferenz auftritt [10].

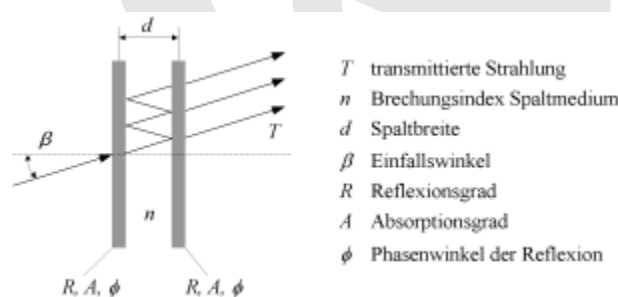


Bild 1 Schematische Darstellung des FPI.

Die Anordnung kann nur von Strahlung passiert werden, für deren Wellenlänge die Resonanzbedingung erfüllt ist (hier vereinfacht unter Vernachlässigung der wellenlängenabhängigen Phasenverschiebung der Reflexion ϕ):

$$\lambda_m = \frac{2nd \cos \beta}{m} \quad (1)$$

Einer der beiden Reflektoren ist beweglich an Federelementen aufgehängt, sodass der Spalt d über einen geeigneten Ansteuermechanismus eingestellt werden kann. Die Transmissionswellenlänge des FPI ändert sich entsprechend der Resonanzbedingung. Das Transmissionspektrum $T(\lambda)$ des FPI (Bild 2) wird durch die Airy-Funktion beschrieben:

$$T(\lambda) = \frac{T_{\max}}{1 + F \sin^2(2\pi n d \frac{1}{\lambda} \cos \beta - \phi)} \quad (2)$$

mit der Peak-Transmission T_{\max} :

$$T_{\max} = \left(1 - \frac{A}{(1-R)}\right)^2 \quad (3)$$

und dem Finesse-Faktor F :

$$F = \frac{4R}{(1-R)^2} \quad (4)$$

Die Zentralwellenlänge (CWL) entspricht der Resonanzbedingung, wobei hier die erste Interferenzordnung genutzt wird ($m = 1$). Die Transmissionsmaxima der höheren Interferenzordnungen werden durch ein zusätzliches Breitbandfilter geblockt.

Die Halbwertsbreite des Interferenzpeaks (FWHM) ist der bestimmende Parameter für das spektrale Auflösungsvermögen eines FP-Spektrometers:

$$FWHM \approx 2d \left(\frac{1-R}{\pi \sqrt{R}} \right) \quad (5)$$

Der Abstand zweier benachbarter Interferenzpeaks stellt den maximal nutzbaren Durchstimmbereich dar; er wird als freier Spektralbereich (FSR) bezeichnet. Die Finesse \tilde{F}_R ist eine Güte-Kennzahl für das FPI. Sie gibt an, wie viele Interferenzpeaks innerhalb des freien Spektralbereichs

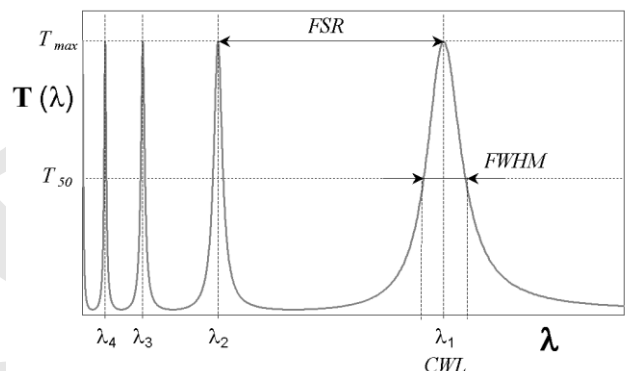


Bild 2 Transmissionspektrum des idealen FPI (Airy-Funktion).

aufgelöst werden können (bezogen auf die Wellenzahl $\bar{\nu}$). Sie ist im Idealfall nur vom Reflexionsgrad R abhängig:

$$\bar{F}_R = \frac{FSR(\bar{\nu})}{FWHM(\bar{\nu})} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (6)$$

2.2 Design und Herstellung

Das Filter wird mit den Technologien der Volumenmikromechanik hergestellt [9]. Dazu werden zunächst die optischen Schichten für die Reflektoren auf zwei getrennten Wafern hergestellt. Diese werden anschließend durch eine Kombination aus Nass- und Trockenätzschritten mechanisch strukturiert und schließlich mit Hilfe einer Zwischenschicht aus SU-8 zusammengefügt. Der Aufbau ist in Bild 3 schematisch im Querschnitt dargestellt. Die hohe Steifigkeit der dicken Reflektorträger hilft, Deformationen gering zu halten. Dadurch kann trotz der großen Filterapertur von $\varnothing 1,9$ mm eine Finesse im Bereich von 40–60 erreicht werden.

Die Reflektoren sind als dielektrische Schichtstapel mit alternierend hoch- und niedrigbrechenden $\lambda/4$ -Schichten ausgeführt (Bragg-Reflektoren). Die verwendeten Schichtmaterialien, SiO_2 als niedrigbrechende Schicht ($n = 1,38$) und Polysilizium als hochbrechende Schicht ($n = 3,33$), sind voll prozesskompatibel zur üblichen MEMS-Technologie. Bereits mit einem Zweifachstapel $|\text{LH}|^2$ dieser Materialien lässt sich ein relativ breites hochreflektierendes Band erzeugen (Bild 4), allerdings nicht breitbandig genug, um den Spektralbereich

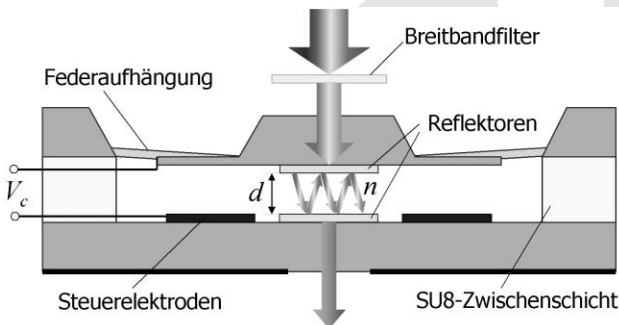


Bild 3 Schematische Querschnittsdarstellung des MEMS-FPF.

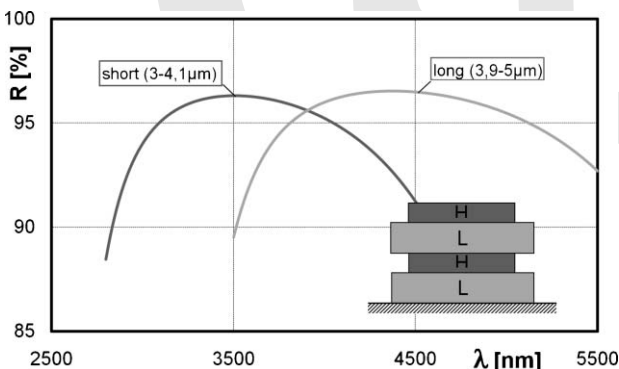


Bild 4 Reflexionsgrad von $\text{SiO}_2/\text{Poly-Si-}|\text{LH}|^2$ -Bragg-Reflektoren für die beiden Wellenlängenbereiche 3–4,1 μm und 3,9–5 μm .

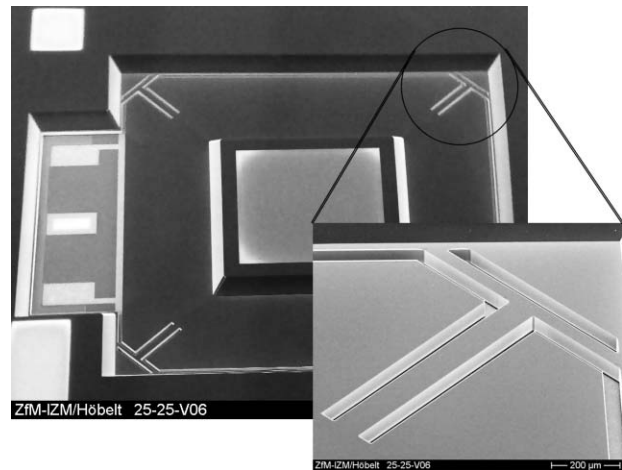


Bild 5 REM-Aufnahme des gesamten Chips und Detailansicht der Federstruktur.

3–5 μm vollständig abdecken zu können. Er wurde deshalb in zwei Teilbereiche mit jeweils ca. 1,1 μm Durchstimmbereich unterteilt.

Einer der wichtigsten Designaspekte für ein FPF ist es, die Parallelität der beiden Reflektoren und damit die Finesse über den gesamten Durchstimmbereich aufrecht-zuerhalten. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Konfigurationen und Formen der Federaufhängung getestet. Die beste Lösung ergab sich mit Einführung einer T-förmigen Federstruktur, die zu einer Stresskompensation in der Chip-Ebene führt und sich zudem einfach herstellen lässt (Bild 5).

2.3 Ansteuerung des FP-Filters

Die Einstellung des optischen Spalts erfolgt elektrostatisch über separate Steuerelektroden, die um das Reflektorgebiet herum angeordnet sind (siehe Bild 3). Durch Anlegen der Steuerspannung V_c wird eine elektrostatische Kraft aufgebaut, die zu einer Verringerung des Spaltes und damit der Zentralwellenlänge führt. Im quasi-statischen Betrieb ergibt sich die typische nichtlineare Kennlinie, dargestellt in Bild 6. Die benötigten Steuerspannungen betragen derzeit bis zu 33 V.

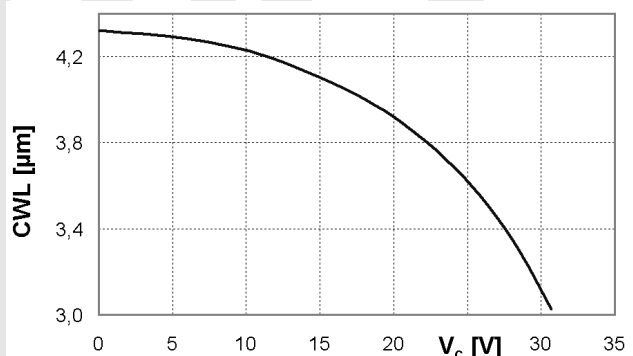


Bild 6 Typische Steuerkennlinie für den quasi-statischen Betrieb.

Tabelle 1 Spektrale Filtereigenschaften.

	short LFP-3041L-337	long LFP-3950L-337
Spektralbereich	3–4,1 μm	3,9–5 μm
Halbwertsbreite	80 \pm 20 nm	100 \pm 20 nm
Peak-Transmission		> 50%
Out-of-band-Blockung		< 0,5%
Finesse		40–60

gemessen mit FT-IR-Spektrometer, Auflösung 8 cm^{-1} , Divergenzwinkel $\pm 4^\circ$

2.4 Spektrale Performance

Zwei Filtertypen mit verschiedenen optischen Designs für die beiden Teilbereiche von 3–4,1 μm (short) und 3,9–5 μm (long) werden derzeit als serienreife Bauelemente angeboten. In Tabelle 1 sind die wichtigsten spektralen Parameter aufgelistet. Dies sind typische Werte, die in der Serienfertigung erreicht werden.

Sowohl die Peak-Transmission als auch die Halbwertsbreite variieren etwas innerhalb des Durchstimmbereichs des Filters. Außerdem weisen auch das zusätzliche Breitbandfilter und das pyroelektrische Element des Detektors eine gewisse spektrale Charakteristik auf. Die spektrale Empfindlichkeit der gesamten Detektoreinheit setzt sich demnach aus verschiedenen Anteilen zusammen, muss aber aus Anwendersicht als Ganzes betrachtet werden. Sie wird gegen einen Referenzdetektor mit einer flachen spektralen (wellenlängenunabhängigen) Empfindlichkeit gemessen und als Spektrum der „relativen spektralen Empfindlichkeit“ (relative spectral response) angegeben. In Bild 7 ist ein Beispiel für den Detektortyp LFP-3041L-337 angegeben.

2.5 Pyroelektrischer Detektor

Der integrierte pyroelektrische Detektor basiert auf der bewährten LiTaO_3 -Technologie. Er besitzt ein $2 \times 2 \text{ mm}^2$ großes Sensorelement, ein ebenso großes antiparallel geschaltetes Kompensationselement und er arbeitet im Strombetrieb (Transimpedanzverstärker) [11]. Dazu ist ein extrem rauscharmer CMOS-Operationsverstärker mit

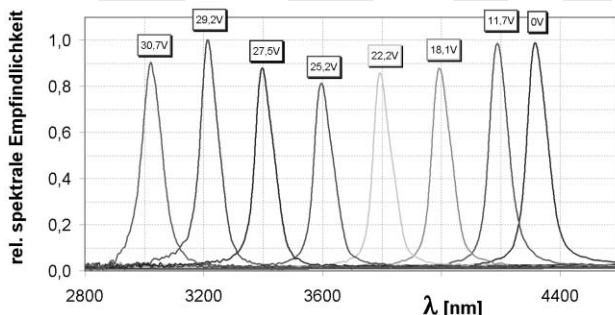


Bild 7 Spektrale Empfindlichkeit eines FP-Detektors Typ „short“ bei verschiedenen Steuerspannungen, gemessen mit FT-IR-Spektrometer, Auflösung 8 cm^{-1} , Divergenzwinkel $\pm 4^\circ$.

Tabelle 2 Detektoreigenschaften.

	ohne FPF	mit FPF
Rauschen [$\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$]	65	65
Empfindlichkeit [kV/W]	120	2,5
Knickfrequenz der Empfindlichkeit [Hz]	≈ 60	≈ 60
Spez. Detektivität [$\text{cm Hz}^{1/2}/\text{W}$]	$3,7 \times 10^8$	$7,7 \times 10^6$

gemessen mit 400- $^\circ\text{C}$ -Schwarzstrahler, 10 Hz

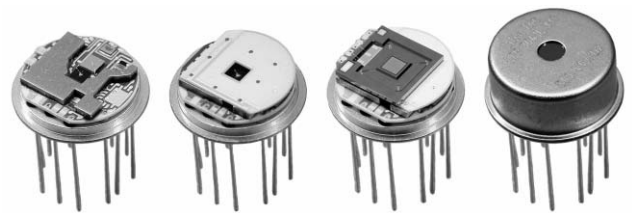


Bild 8 Aufbaustadien des FP-Detektors (v. l. n. r.: Detektor mit pyroelektrischen Sensorelementen und Verstärkerschaltkreis, mit zusätzlicher elektr. Schirmung, mit montiertem FPF, gehäuseter Detektor mit Breitbandfilter).

niedriger Verlustleistung integriert. Der Detektor weist eine große spezifische Detektivität und eine hohe Empfindlichkeit bis zu einigen zehn Hertz auf. Die wichtigsten Detektorparameter sind in Tabelle 2 zum Vergleich ohne und mit FP-Filter aufgelistet.

Der Detektorschaltkreis reagiert aufgrund der hohen Impedanzen sehr empfindlich auf die Einkopplung elektrischer Störsignale. Es war daher entscheidend, eine sorgfältige Schirmung der Filteransteuerung gegen den Detektorschaltkreis zu realisieren. Ein weiteres wichtiges Detail der Detektorkonstruktion ist die mechanisch spannungsfreie Montage des FP-Filters. Bild 8 zeigt das Innere eines FP-Detektors in verschiedenen Aufbaustadien.

3 Spektrometer-Design

Der Grundaufbau für ein FPF-basiertes Mikrospektrometer ähnelt dem eines konventionellen NDIR-Analysators. Er besteht im Wesentlichen aus einer breitbandigen Infrarot-Strahlungsquelle, vorzugsweise direkt (elektrisch) moduliert, einer Probenkammer und dem durchstimmbaren Detektor. Außerdem wird eine Betriebselektronik zur Ansteuerung von Filter und Strahler und zur Verarbeitung der Detektorsignale benötigt. Allerdings sind bei der Auswahl des Strahlers und beim Design des optischen Systems einige spezielle Aspekte zu beachten.

Ein Grundprinzip, welches in der Spektroskopie fast immer gilt, zeigt sich auch hier: Eine hohe spektrale Auflösung und ein hoher optischer Durchsatz (d.h. hoher SNR) sind diametrale Anforderungen. In der Praxis muss für jeden Anwendungsfall ein geeigneter Kompromiss gefunden werden. Im Falle des FP-Filters ist die Abhängigkeit der Filterbandbreite von der Kollimation bzw. dem Divergenzwinkel des einfallenden

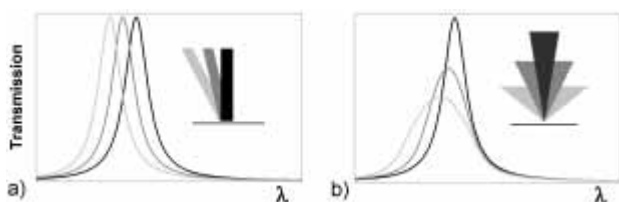


Bild 9 Einfluss von Einfalls- und Divergenzwinkel: (a) negative Winkeldrift der CWL; (b) Drift und Verbreiterung des Transmissionspeaks mit Divergenzwinkel.

Strahlenbündels problematisch. Schräg einfallende, kollimierte Strahlung führt zu einer negativen Drift der Zentralwellenlänge (Bild 9a). Den allgemeinen Fall stellt ein unkollimiertes Strahlenbündel mit einem gewissen Divergenzwinkel und einem Intensitätsprofil dar. Das resultierende Transmissionsspektrum kann dann als Überlagerung von Einzelspektren angesehen werden, die sich aus kollimierten Teilstrahlbündeln unterschiedlicher Einfallswinkel und Intensitäten ergeben. Zusätzlich zur Verschiebung der Zentralwellenlänge (stets zu kürzeren Wellenlängen) ergibt sich eine Erhöhung der Filterbandbreite (Bild 9b).

Um die Strahldivergenz möglichst niedrig zu halten und trotzdem einen akzeptablen optischen Durchsatz zu erzielen, kann ein IR-Strahler mit Kollimationsoptik verwendet werden. Für die hier beschriebenen Untersuchungen wurde ein Dünnschicht-Membranstrahler mit integriertem Parabolreflektor der Firma Intex eingesetzt (MIRL 17-900). Als weitere Maßnahme zur Erhöhung des Auflösungsvermögens kann eine zusätzliche Blende vor dem Detektor angebracht werden. Diese kann zwei Funktionen erfüllen: Zum einen lässt sich schräg einfallende Stör- und Streustrahlung abblocken, die beispielsweise durch Innenwandreflexionen in der Probenkammer auftreten kann. Wird der Blendendurchmesser unter $\varnothing 1,9$ mm reduziert, so wird das Filter selbst abgeblendet. Dadurch kann der Einfluss der zwar geringen, aber stets vorhandenen Reflektorverkrümmung und Schiefstellung noch etwas verringert werden, allerdings zum Preis eines dramatisch abnehmenden optischen Durchsatzes. Ein bezüglich des spektralen Auflösungsver-

mögens optimierter Prinzipaufbau („High Resolution“) ist in Bild 10a dargestellt.

Die Maximierung des optischen Durchsatzes („High SNR“) wird durch den Einsatz fokussierender Elemente erreicht (Bild 10b). Das geht jedoch immer mit einem großen Divergenzwinkel und einer entsprechenden Reduzierung der spektralen Auflösung einher.

4 Testmessungen

Es wurden Testmessungen mit verschiedenen optischen Konfigurationen angestellt, um den Zusammenhang zwischen dem Signal-Rausch-Abstand und der spektralen Auflösung praktisch zu untersuchen. Das spektrale Auflösungsvermögen R ist definiert als:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{CWL}{FWHM} \quad (7)$$

Als Referenzprobe für die Messungen diente eine 0,4 mm dicke Polystyrolfolie (PS), wie sie üblicherweise als Wellenlängenstandard zur Kalibration von FT-IR-Spektrometern eingesetzt wird. In Bild 11 sind zwei Spektren aus den Testmessungen dargestellt.

Die Zusammenfassung aller Ergebnisse zeigt Bild 12. Bei Verwendung eines Al-Spiegels mit $f/1,4$ konnte ein $SNR \approx 8000 : 1$ und eine Auflösung von $R \approx 45$ erzielt werden. Die beste gemessene Auflösung lag bei $R \approx 75$, wobei ein kollimierter Strahl mit $\varnothing 1$ mm verwendet wurde. Dies kann als die theoretisch erreichbare Obergrenze angesehen werden: Die Filterbandbreite wird hier praktisch nur noch vom Reflexionsgrad der Spiegel bestimmt. Der SNR sank in dieser Konfiguration auf $\approx 300 : 1$. Die Auflösung von 8 cm^{-1} der FT-IR-Vergleichsmessung (Bild 11) entspricht etwa $R = 300 \dots 400$.

Beim Einsatz eines spektral durchstimmbaren pyroelektrischen Detektors sind verschiedene Betriebsarten und Auswerteverfahren anwendbar. Je nach Einsatzfall ergeben sich unterschiedliche Vorteile gegenüber konventionellen Messverfahren mit Ein- oder Mehrkanaldetektoren. Zwei grundlegend unterschiedliche Verfahren sollen im Folgenden anhand von Beispielmessungen näher erläutert werden.

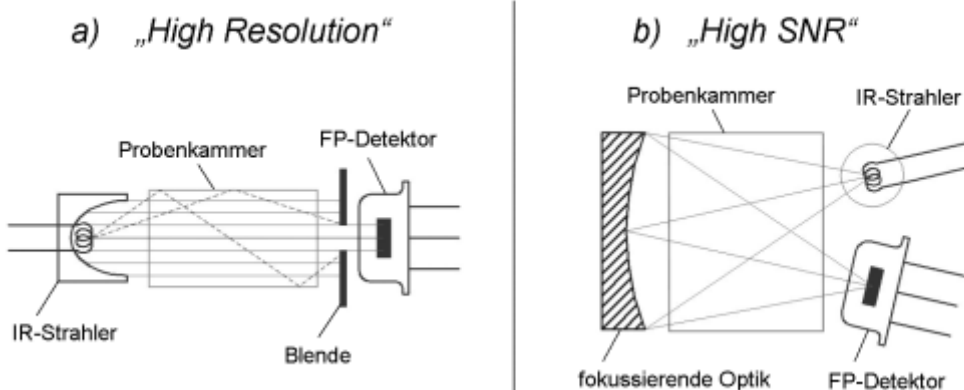


Bild 10 Grundprinzipien des optischen Designs für ein FP-Spektrometer: (a) auflösungsoptimiert; (b) durchsatzoptimiert.

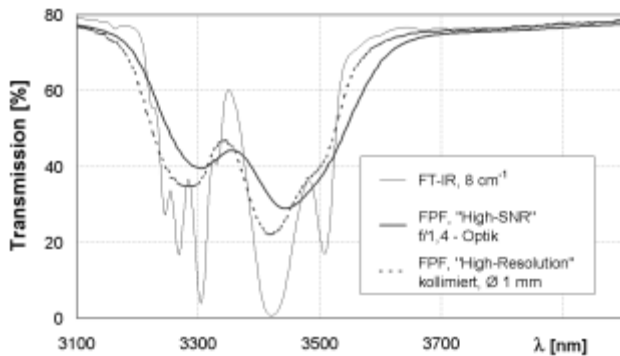


Bild 11 Transmissionssmessungen einer PS-Folie in verschiedenen Konfigurationen: durchsatzoptimiert, auflösungsoptimiert und Vergleichsspektrum (FT-IR).

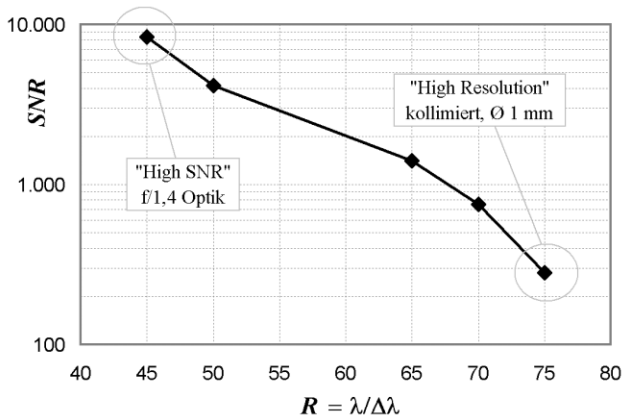


Bild 12 SNR versus spektrale Auflösung R mit verschiedenen optischen Konfigurationen.

4.1 Step-Scan-Modus

Diese Methode entspricht im Grundprinzip dem herkömmlichen Messverfahren. Es wird eine gleichförmig modulierte Strahlungsquelle verwendet, die Auswertung des Detektorsignals erfolgt mit Hilfe der Lock-in- bzw. FFT-Technik. Zusätzlich dazu wird nun zwischen den einzelnen Messpunkten die Filterwellenlänge sequenziell eingestellt, bis das vollständige Spektrum erfasst ist. Die benötigte Messdauer hängt einerseits vom Wellenlängenbereich und der Schrittweite, also der Anzahl der Stützstellen im Spektrum, und von der jeweils benötigten Einstellzeit des Filters ab. Diese liegt je nach Schrittweite und Wellenlänge im Bereich 20–500 ms. Außerdem gehen natürlich Modulationsfrequenz und Integrationszeit, die für einen gewünschten SNR benötigt werden, in die Messdauer ein.

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Testmessungen sind im Step-Scan-Modus durchgeführt worden. Für eine Messung im Bereich 3–4 μm mit 100 Stützstellen, einer spektralen Auflösung von $R \approx 65$ und einem Signal-Rausch-Abstand von $\text{SNR} \approx 1300 : 1$ wurden ca. 20 s benötigt.

4.2 Sweep-Modus

Ein pyroelektrischer Detektor kann nur mit modulierter Strahlung eingesetzt werden. Üblicherweise wird deshalb

ein Chopper verwendet oder der Strahler wird direkt moduliert (gepulst). Im Gegensatz dazu kann nun das Filter kontinuierlich durchgestimmt werden, wobei eine Modulation entsprechend der spektralen Transmission der Messstrecke erfolgt. Diese Betriebsart hat das Potenzial, Messungen deutlich zu beschleunigen, da das Filter innerhalb kurzer Zeit ($< 1 \text{ s}$) komplett durchgestimmt werden kann. Ein weiterer großer Vorteil ist, dass bei Bedarf wesentlich leistungsstärkere Strahler eingesetzt werden können, da die Notwendigkeit der direkten Modulation entfällt. In speziellen Fällen kann sogar auf einer „heißen“ Probe direkt gemessen werden. Bei schnellem dynamischen Betrieb müssen allerdings verschiedene nichtlineare Effekte bei der Ansteuerung des Filters berücksichtigt werden.

Bild 13 zeigt als Beispiel für den Sweep-Modus die Messung von Methan (2,2 Vol %) in Transmission. Der Strahler wird unmoduliert (DC) betrieben und das Filter wird kontinuierlich und näherungsweise linear über den Bereich 3,1–3,8 μm durchgestimmt. Das vom Detektor generierte Signal enthält außer dem Gleichanteil alle spektralen Informationen. Bei der Analyse muss das dynamische Verhalten von Filter und Detektor beachtet werden. Mit Hilfe geeigneter Kalibrierungsverfahren und spezieller mathematischer Methoden lässt sich aus dem Detektorsignal das originale Transmissionsspektrum rekonstruieren.

Es gibt zahlreiche Anwendungsfälle in der IR-Spektroskopie, bei denen es weit mehr auf Geschwindigkeit als auf absolute Genauigkeit bzw. die quantitative Bestimmung bestimmter Substanzen ankommt. Die Detektion bzw. Überwachung eines dünnen Ölfilms auf einem Stahlsubstrat ist ein solches Beispiel, ein anderes die Trennung von Kunststoffen bei der Müllsortierung. Es ist in diesen Fällen oft ausreichend, das Vorhandensein einer bestimmten Absorptionsbande festzustellen und die Strahlungsintensität an ein oder zwei benachbarten Referenzwellenlängen zu vergleichen. Der Sweep-Modus ist für solche Messaufgaben das Mittel der Wahl.

Das Bild 14 zeigt als exemplarische Lösung die Messung einer 10 μm dicken Polyethylen-Folie (PE-LD- bzw. Frischhaltefolie) in Transmission, welche eine starke Absorptionsbande bei 3,45 μm besitzt. Die FP-

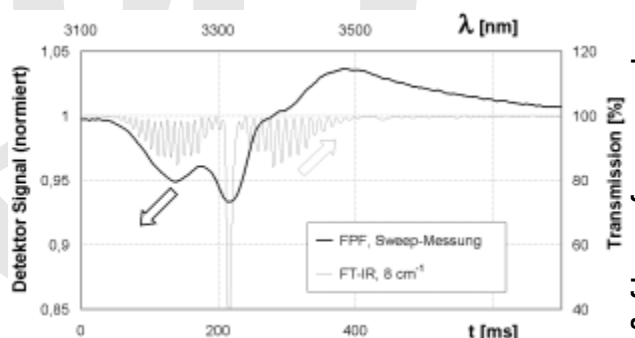


Bild 13 Beispiel für eine Messung im Sweep-Modus (2,2 Vol % Methan; Transmissionsspektrum FT-IR, 8 cm^{-1} , dünne Kurve).

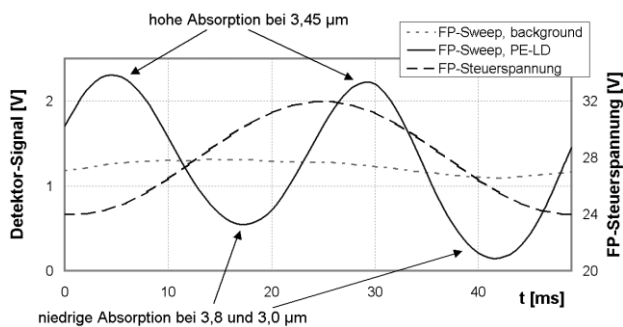


Bild 14 Beispiel für schnelle Sweep-Messung (PE-LD-Folie, 10 µm dick, 20 Hz).

Steuerspannung wird sinusförmig im Bereich 24–32 V mit 20 Hz moduliert (gestrichelte Kurve), sodass sich eine sinusähnliche Modulation der Filterwellenlänge im Bereich 3,0–3,8 µm ergibt. Ohne die Probe im optischen Pfad kommt es zu einer schwachen Modulation des Detektorsignal, welche dem Gerätespektrum entspricht (gepunktete Kurve – background). Mit der Probe erscheinen zwei starke Maxima im Signal (durchgezogene Kurve), hervorgerufen durch das zweifache Überstreichen der Absorptionsbande bei 3,45 µm. Die Minima im Signal entsprechen der niedrigen Absorption bei 3,0 µm und 3,8 µm und können als Referenzen herangezogen werden.

Die nutzbare spektrale Auflösung hängt im Sweep-Modus auch von der Bandbreite des Detektors ab; sie sinkt deshalb bei größeren Scan-Geschwindigkeiten. In Messaufgaben, bei denen es auf eine hohe Auflösung und eine schnelle Messung ankommt, bietet sich der Einsatz einer IR-Photodiode an. Um das Potenzial einer solchen Konfiguration zu demonstrieren, wurden Messungen mit einem Stand-alone-FP-Filter (Transmissions-Package) und einem gekühlten Indium-Arsenid-Detektor (Judson J12TE2) durchgeführt.

Bild 15 zeigt die Messung einer PS-Folie (vergleiche Bild 12). Nach Abziehen eines Signal-Offsets lässt sich aus dem Quotienten der Signale mit Probe (PS-Folie) und ohne Probe (background) die Transmission direkt berechnen. Sie ist hier noch als Zeitsignal dargestellt (Transmissionssignal). Das Durchstimmen des Filters ist auch hier nicht ideal linear. Das lässt sich

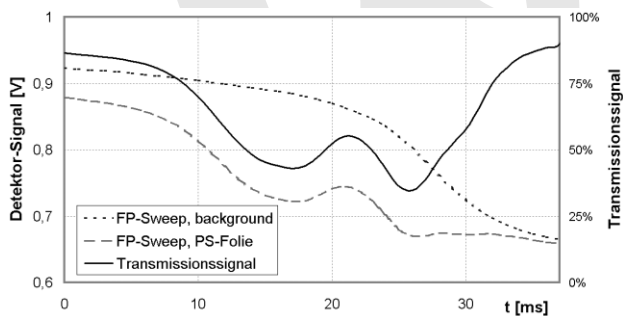


Bild 15 Beispiel für schnelle Sweep-Messung einer PS-Folie mit Stand-alone-FPF und InAs-Diode (–30 °C).

wiederum rechnerisch korrigieren, wodurch man das originale Transmissionsspektrum erhält. Im Gegensatz zur Step-Scan-Messung (Bild 12) ist diese Messung in 50 ms abgeschlossen.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein neuartiges Spektrometermodul vorgestellt, das auf einem in Volumenmikromechanik hergestellten, elektrostatisch abstimmbaren Fabry-Pérot-Filter basiert, welches in einen pyroelektrischen Detektor integriert ist. Dieser spektral durchstimmbare Detektor ist die Basis für eine neue Klasse leistungsfähiger, kompakter und kostengünstiger Infrarot-Mikrospektrometer. Anhand von verschiedenen Applikationsbeispielen der IR-Absorptionsspektroskopie konnte der flexible Einsatz demonstriert werden. Abhängig vom optischen Aufbau betrug der SNR bis zu 8000 : 1. Das spektrale Auflösungsvermögen erreichte bis zu $R = 75$. Mit dem Sweep-Modus eröffnen sich neue Möglichkeiten in der Verwendung von pyroelektrischen Detektoren, insbesondere um Messungen zu beschleunigen oder die Modulation auf der Strahlerseite zu umgehen. Neue Anwendungsgebiete für das FP-Mikrospektrometer liegen in der medizinischen Diagnostik, der Sicherheitstechnik und in der industriellen Prozessüberwachung.

Literatur

- [1] J. Staab: *Industrielle Gasanalyse*. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 1994.
- [2] H. Günzler, H.-U. Gremlich: *IR-Spektroskopie*. Wiley-VCH, Weinheim, 2003.
- [3] S. H. Kong, D. D. L. Wijngaards, R. F. Wolffenbuttel: Infrared micro-spectrometer based on a diffraction grating. In: *Sens. Actuators A* **92-1**, 88–95, 2001.
- [4] T. Otto, R. Saupe, A. Weiss, V. Stock, O. Throl, W. Grählert, S. Kaskel, H. Schreck, T. Gessner: MEMS analyzer for fast determination of mixed gases. In: *Proc. SPIE*, **7208**, 2009.
- [5] T. Sandner, H. Schenk, H. Lakner, A. Kenda, W. Schenk: Einsatz translatorischer MOEMS-Aktoren für FTIR-Spektrometer. In: *Proc. MikroSystemTechnik KONGRESS 2007*, VDE-Verlag, 2007, pp 485–488.
- [6] D. Rossberg: Silicon micromachined infrared sensor with tunable wavelength selectivity for application in infrared spectroscopy. In: *Sens. Actuators A* **47**, 413–416, 1995.
- [7] J. Antoszewski, A. Keating, K. Winchester, T. Nguyen, D. Silva, C. Musca, J. Dell, O. Samardzic, L. Faraone: Tunable Fabry-Pérot filters operating in the 3 to 5 µm range for infrared micro-spectrometer applications. In: *Proc. SPIE*, **6186**, 618608, 2006.
- [8] M. Noro, K. Suzuki, N. Kishi, H. Hara, T. Watanabe, and H. Iwaoko: CO₂/H₂O gas sensor using tunable Fabry-Pérot filter with wide wavelength range. In: *Proc. IEEE MEMS 2003 Conf.*, pp 319–322, 2003.
- [9] N. Neumann, M. Ebermann, S. Kurth, K. Hiller: Tunable infrared detector with integrated micromachined Fabry-Pérot filter. In: *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS* **7(2)**, 021004-01–021004-9, 2008.
- [10] J. M. Vaughan: *The Fabry-Pérot Interferometer*. IOP Publishing Ltd., Bristol, 1989.
- [11] N. Neumann, H. Sänze, M. Heinze: Pyroelektrische Detektoren mit integriertem Operationsverstärker für hohe Modulationsfrequenzen. In: *tm – Technisches Messen* **73/2**, 85–89, 2006.

Manuskripteingang: 16. September 2009, zur Veröffentlichung angenommen: 17. März 2010



Dipl.-Ing. Martin Ebermann schloss 2005 sein Studium der Elektrotechnik an der TU Dresden als Dipl.-Ing. ab und ist seitdem Mitarbeiter für Forschung und Entwicklung im Geschäftsbereich Sensorik der InfraTec GmbH. Seine Hauptarbeitsgebiete sind die Entwicklung von pyroelektrischen Infrarot-Detektoren und optischen Mikrosystemen wie durchstimmbare MEMS-FP-Filter.

Adresse: InfraTec GmbH, Gostritzer Str. 61–63, 01217 Dresden, Tel: +49 (0351) 871 8625, Fax: +49(0351) 871 8727,
E-Mail: m.ebermann@infrotec.de



Dr. Norbert Neumann arbeitet seit mehr als 25 Jahren auf dem Gebiet der Infrarotdetektoren. Er schloss 1979 sein Studium in Elektronik-Technologie und Feingerätebau als Dipl.-Ing. ab. 1984 promovierte er zum Dr.-Ing. und habilitierte sich 1991 auf dem Gebiet der Festkörperelektronik. Schwerpunkte seiner wissenschaftlichen Arbeit an der TU Dresden waren Infrarotdetektoren, pyroelektrische Arrays und ferroelektrische Dünnschichten. Gegenwärtig ist er Leiter für Forschung und Entwicklung im Geschäftsbereich Sensorik der Firma InfraTec, die er 1991 mitgegründet hatte.

Adresse: InfraTec GmbH, Gostritzer Str. 61–63, 01217 Dresden, Tel: +49 (0351) 871 8625, Fax: +49 (0351) 871 8727,
E-Mail: n.neumann@infrotec.de

Vorschau auf Heft 7–8/2010

In unserem nächsten Heft finden Sie unter anderem folgende Themen:

- *Feil, P., Mayer, W., Kraus, T., Migliaccio, C., Menzel, W.*: Abbildung mit Millimeterwellen-Sensoren für Industrie- und Sicherheitsanwendungen
- *Dennicke, E., Armbrrecht, G., Rolfes, I.*: Präzise Radarfüllstandmessungen in Schwallrohren
- *Ebelt, R., Miller, H., Vossiek, M.*: Ein Mikrowellensensornetzwerk zur räumlichen Fahrzeug-zu-Fahrzeug- und Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Ortung

Weitere Informationen über geplante Hefte, ausführliche Informationen über die in den letzten Heften der **tm** erschienenen Beiträge sowie Hinweise für Autoren finden Sie im Internet unter <http://www.tm-technisches-messen.de>.