

Kalibrierung und Justage von durchstimmbaren IR-Detektoren mit Hilfe von Festkörperetalons

Marc Metin Wetterer¹, Martin Ebermann¹, Jens Lienig²

¹InfraTec GmbH, Gostritzer Straße 61-63, 01217 Dresden

²Technische Universität Dresden, Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design, Helmholtzstraße 18, 01062 Dresden

Zusammenfassung

Durchstimmbare Infrarot-Detektoren, die auf dem Fabry-Pérot-Interferometer basieren, können für präzise spektrale Analysen genutzt werden. Allerdings unterliegen sie vielfältigen technologischen und anwendungsbedingten Herausforderungen. Um die Qualitäts- und Ausbeuteanforderungen in der Produktion solcher Detektoren zu erfüllen, ist eine präzise Kalibrierung und Justage jedes einzelnen Detektors innerhalb des spezifizierten Temperaturbereichs erforderlich. Die bisherige Methode der spektralen Empfindlichkeitsmessung mittels Fourier-Transform-Infrarotspektrometer ist in der Muster- und Kleinserienfertigung praktikabel. Dem Einsatz des Verfahrens in der Volumenfertigung stehen jedoch der hohe Platzbedarf, die hohen Investitionen für Maschinen sowie die hohen laufenden Betriebskosten entgegen. Es wird daher ein alternatives Verfahren benötigt, welches auf der gleichen Produktionsfläche bei sinkenden Herstellkosten größere Stückzahlen kalibrieren und justieren kann. Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren adressiert die genannten Herausforderungen, indem es Festkörperetalons als Kalibriernormale verwendet. Der Einsatz eines elektromechanischen Modells des Fabry-Pérot-Interferometers ermöglicht einen präzisen Abgleich mit einem Etalon-Referenzspektrum, um die identifizierten Einflussfaktoren auszugleichen.

Keywords: Fabry-Pérot-Interferometer, Durchstimmbare IR-Detektoren, Kalibrierung, Justage, Festkörperetalon

Einleitung

Die Infrarot-Gasanalyse ist eine Schlüsseltechnologie in zahlreichen Anwendungsbe-
reichen, von der Umweltüberwachung bis hin zur medizinischen Diagnostik. In einem
Analysator sind Rückschlüsse auf die Gas-
konzentration verschiedener Gase durch die
Auswahl schmalbandiger Festfilter und die
Messung der einzelnen Absorptionsbanden
der zu detektierenden Gase möglich. Der
Nachteil der notwendigen Auswahl von
schmalbandigen Filtern kann durch den Ein-
satz von durchstimmbaren IR-Detektoren als
Mikrospektrometer vermieden werden. Mit
einem solchen IR-Detektor auf Basis des
Fabry-Pérot-Interferometers (FPI) kann das
Absorptionsspektrum spektral erfasst werden,
wie in Abbildung 1 dargestellt. Dadurch können
beispielsweise zusätzliche oder ursprünglich
nicht berücksichtigte Gaskonzentrationen ge-
messen werden. Im Rahmen einer spektralen
Messung sind eine adäquate spektrale Auflö-
sung sowie eine präzise Einstellung der Filter-
wellenlänge (FWL) unabdingbar, um aussage-
kräftige Ergebnisse zu erzielen. [1, 2]

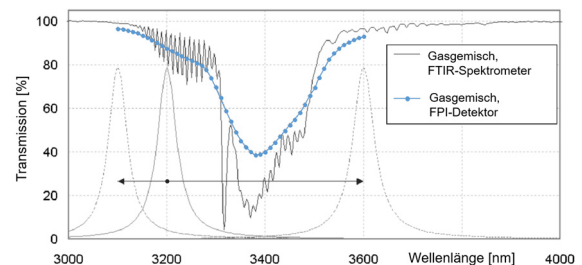


Abb. 1: Vergleich der gemessenen Absorptionsspektren eines Gasgemisches von Kohlenwasserstoffen nach Messsystemen [2]

Die Abbildung 2 zeigt den Aufbau eines solchen durchstimmbaren IR-Detektors. Dieser besteht aus einem pyroelektrischen Sensorelement, einem Fabry-Pérot-Interferometer als durchstimmbaren Schmalbandfilter, einem Bandpassfilter zur Reflexion von IR-Strahlung außerhalb des Durchstimmbereichs des FPI und einem Temperatursensor zur präzisen Überwachung der Messbedingungen. [4]

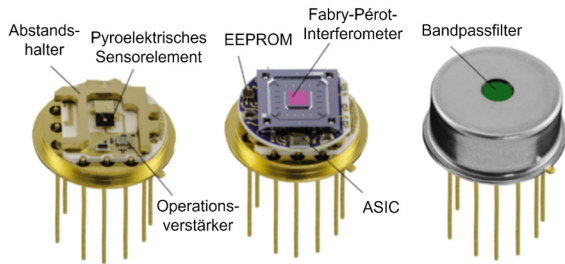


Abb. 2: Aufbau eines durchstimmbaren FPI-Detektors [4]

In Kooperation mit dem *Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme* und dem *Zentrum für Mikrotechnologien* der *Technischen Universität Chemnitz* hat die *InfraTec GmbH* mehrere IR-Detektoren mit verschiedenen Durchstimmbereichen entwickelt. Exemplarisch sei hier der *LFP-5580* im Wellenlängenbereich von 5,5 bis 8,0 μm genannt, welcher nachfolgend verwendet wird. [4]

Es gibt verschiedene produktions- und anwendungsbedingte Faktoren, die die Funktionsweise des FPI beeinflussen. Die Folge ist eine hohe Streuung der Einzelteile, weshalb eine Kalibrierung und Justage aller FPI-Detektoren am Ende des Produktionsprozesses im spezifizierten Temperaturbereich erforderlich ist. Ziel ist es, sowohl die spezifizierte Einstellgenauigkeit der FWL als auch eine möglichst hohe Ausbeute in der Detektor-Produktion zu erreichen. Abbildung 3 zeigt den vereinfachten Prozess, bei dem durch Kalibrierung und Justage die Abweichungen der FWL im Durchstimmbereich des FPI auf das spezifizierte Niveau abgesenkt werden.

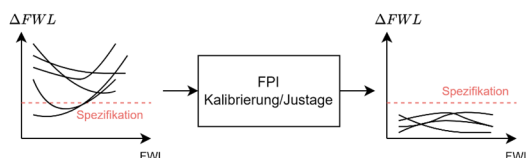


Abb. 3: Kalibrierung und Justage der FWL-Einstellgenauigkeit über Temperatur

Das derzeitige Verfahren basiert auf einem Fourier-Transform-Infrarotspektrometer (FTIR-Spektrometer) und ermöglicht in der Kleinserienfertigung die Kalibrierung sowie Justage von zwei FPI-Detektor pro Stunde. Eine Steigerung des Durchsatzes ist lediglich linear über die Anschaffung und den Betrieb weiterer FTIR-Spektrometer möglich. Die erforderlichen Investitionen und der Platzbedarf für das FTIR-Spektrometer sowie die zusätzlichen Mess- und Betriebsmittel wären hoch. Für eine Volumenfertigung ist dies folglich unwirtschaftlich. In diesem Beitrag wird ein alternatives Kalibrier- und Justageverfahren vorgestellt, welches Festkörperetalons als Kalibriernormal

und ein elektromechanisches Modell als physikalische Repräsentation des mikro-opto-elektro-mechanischen Systems (MOEMS) verwendet. Die Vorteile sind die vergleichsweise kostengünstigen Komponenten, die leichte Anpassbarkeit durch die Wahl geeigneter Etalons sowie die Möglichkeit, die Messung aufgrund des geringen Platzbedarfs zu parallelisieren.

Fabry-Pérot-Interferometer

Das Fabry-Pérot-Interferometer (FPI) ist eine zentrale Komponente des durchstimmbaren IR-Detektors. Abbildung 4 veranschaulicht dessen Funktionsprinzip, bei dem zwei planparallele, teildurchlässige Reflektoren einen optischen Resonator bilden. Eine Änderung des Abstands d zwischen diesen Reflektoren führt gemäß der optischen Resonanzbedingung zu einer Anpassung der Filterwellenlänge λ :

$$\lambda_m = \frac{2 \cdot n \cdot d}{m} \cdot \cos \beta$$

Hierbei bezeichnet n den Brechungsindex des Mediums zwischen den Reflektoren (hier Luft), m die Interferenzordnung, und β den Einfallswinkel der Infrarotstrahlung auf den Spiegel. Für präzise Messungen wird idealerweise senkrecht einfallende, kollimierte Strahlung verwendet, um den Einfluss des Einfallswinkels β zu minimieren. [1, 5]

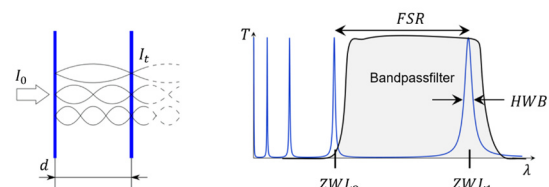


Abb. 4: Funktionsprinzip des FPI mit Bandpassfilter [1]

Der freie Spektralbereich FSR (englisch: free spectral range) und die Halbwertsbreite (HWB) sind zwei wichtige Parameter, die den Durchstimmbereich und die spektrale Auflösung des FPI bestimmen. Die HWB gibt die Breite der FPI-Filterkurve bei halber Maximaltransmission an, während der FSR den Abstand zwischen den Filterwellenlängen der Ordnungen beschreibt. Beide Parameter sind direkt von der Interferenzordnung m abhängig. Eine höhere Interferenzordnung führt zu einer schmaleren HWB und zu einem kleineren FSR. Im in Abbildung 2 dargestellten IR-Detektor wird die genutzte Interferenzordnung über das Bandpassfilter eingeschränkt. Die Zentralwellenlänge (ZWL) definiert die Filterwellenlänge als den Mittelpunkt der beiden Wellenlängen, bei dem 50 % der maximalen Transmission erreicht ist. [1]

Das FPI ist als MOEMS realisiert, welches in Abbildung 5 schematisch dargestellt ist. In diesem System kann der Abstand zwischen der festen und der beweglichen Elektrode durch Anlegen einer Steuerspannung V_c präzise eingestellt werden. Diese Einstellung resultiert aus einem Kräftegleichgewicht zwischen elektrostatischer Anziehung und mechanischer Federkraft. Der sich einstellende Reflektorabstand d_{opt} muss mit der optischen Transferkennlinie des verwendeten Reflektors in eine ZWL umgerechnet werden, um eine praktische Anwendung zu gewährleisten. Die beschriebene Resonanzbedingung ist für einen solchen Einsatz zu stark vereinfacht. [6]

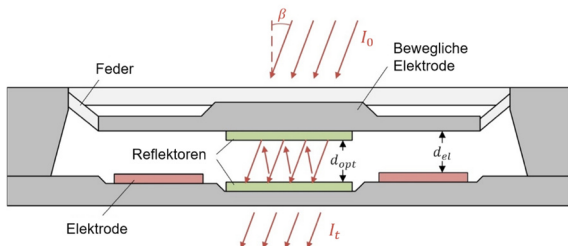


Abb. 5: Schematischer Querschnitt des FPI als MOEMS bei elektrostatischer Auslenkung der oberen Elektrode [6]

Die Masse des beweglichen Reflektors führt dazu, dass das FPI beispielsweise auf Lageänderungen im Erdschwerefeld, Stöße oder Vibrationen mit einer Änderung in der Zentralwellenlänge reagiert. Im geregelten Betrieb wird der Reflektorabstand mittels eines geschlossenen Regelkreises eingestellt. Hierbei wird die Auslenkung des FPIs kontinuierlich mit 2 kHz gemessen, um eine entsprechende Anpassung der elektrostatischen Kraft vorzunehmen und somit den Störeinfluss zu kompensieren. Im gesteuerten Betrieb erfolgt lediglich die Einstellung des Reflektorabstandes über die Steuerspannung. Infolgedessen können äußere Störfaktoren wie z.B. Vibrationen auf das FPI einwirken. [6]

Nachfolgend wird als Einschränkung lediglich der eingeschwingene bzw. quasistatische Zustand betrachtet. Abbildung 6 veranschaulicht exemplarisch den Einfluss steigender Steuerspannungen V_c auf die Zentralwellenlänge in einem FPI-Detektor.

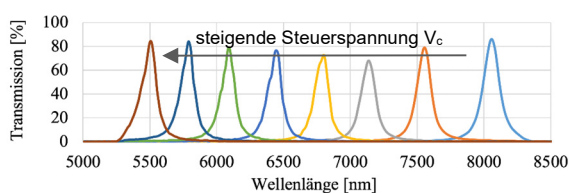


Abb. 6: FPI-Filterkurven bei verschiedenen Steuerspannungen V_c

Dieser nichtlineare Zusammenhang zwischen Steuerspannung V_c und dem Reflektorabstand d_{opt} in Abhängigkeit der Detektortemperatur T wird nachfolgend als Steuerkennlinie $d_{opt} = f(V_c, T)$ bezeichnet. Es wird durch ein elektromechanisches (EM) Modell beschrieben, welches auf dem elektrostatischen Antrieb in Form eines Parallelplattenkondensators und dem mechanischen Verhalten des Feder-Masse-Systems basiert. [6]

Dieses EM-Modell kann justiert werden, so dass eine präzise ZWL-Einstellgenauigkeit ermöglicht wird. In Abbildung 7 sind entsprechende Steuerkennlinien auf Basis des EM-Modells exemplarisch dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung wurde zusätzlich die optische Transferkennlinie verwendet, um den Reflektorabstand in ZWL umzurechnen.

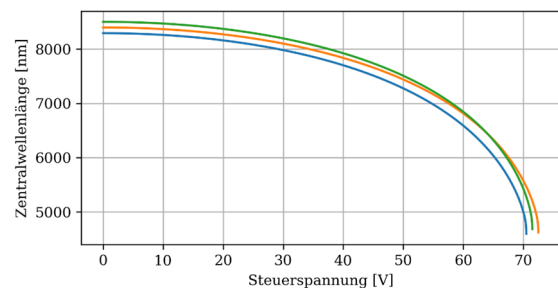


Abb. 7: Steuerkennlinien von drei Exemplaren des Typs LFP-5580 bei 23 °C

Kalibrierung und Justage von FPI-Detektoren

Die spektrale Auflösung eines FPI-Detektors ist essenziell für spektrale Messungen und wird durch die Halbwertsbreite definiert. Die HWB ist jedoch von der Reflektivität und Planparallelität der Reflektoren abhängig, welche nicht justiert werden können. Darüber hinaus gibt es justierbare Einflussfaktoren, die sich auf die ZWL-Einstellgenauigkeit auswirken. Zu diesen Faktoren zählen die Temperatur, welche die mechanischen Spannungen innerhalb des FPI beeinflusst, sowie Streuungen in den Ätztiefen im Fertigungsprozess des mikrostrukturierten FPI. Letztere können beispielsweise zu Unterschieden in der Federsteifigkeit oder den Ruheabständen im MOEMS führen. [2]

Die aktuelle Methode zur Kalibrierung und Justage verwendet ein FTIR-Spektrometer, um die spektrale Empfindlichkeit jedes FPI-Detektors im spezifizierten Durchstimm- und Temperaturbereich zu messen. Im Anschluss werden die Modellparameter des EM-Modells durch eine Ausgleichsrechnung auf Basis der ermittelten Werte für ZWL, Steuerspannung und Detektortemperatur bestimmt. Diese Parameter werden dauerhaft im Detektor gespeichert, um die indi-

viduelle Justage der Steuerkennlinien nachfolgend nutzen zu können. [6]

Obgleich das Verfahren eine präzise Justage ermöglicht, sind der geringe Durchsatz, der hohe Platz- und Investitionsbedarf für eine Volumenproduktion unwirtschaftlich. Das Ziel ist die Entwicklung eines Kalibrier- und Justageverfahrens, welches kein FTIR-Spektrometer erfordert und die Anforderungen der Spezifikation aus Tabelle 1 erfüllt.

Tab. 1: Spezifikation des durchstimmbaren IR-Detektors LFP-5580

Parameter	Grenzen
Betriebstemperatur	15 – 65 °C
Durchstimmbereich	5500 – 8000 nm
Halbwertsbreite	90-170 nm
ZWL-Abweichung	± 10 nm

Kalibrierung und Justage mit Festkörperetalons

Das hier vorgestellte Verfahren zur Kalibrierung und Justage basiert auf der Verwendung eines Festkörperetalons, welches eine spezielle Form des Fabry-Pérot-Interferometers darstellt. Im Gegensatz zu Abbildung 4 weist es keinen Luftspalt und somit keinen durchstimmbaren Reflektorabstand auf. Das Etalon besteht stattdessen aus einem Stück IR-transparentem Material, im vorliegenden Fall Silizium, mit planparallelen, polierten Oberflächen. Um das erzeugte Interferenzmuster im Transmissionsspektrum des Etalons als optische Referenz nutzen zu können, ist eine präzise Dicke von Bedeutung. Der wesentliche Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass die Dicke des Etalons exakt anhand der Anforderungen der zu kalibrierenden FPI-Detektoren gewählt werden kann. Dadurch wird eine individuelle Kalibrierung verschiedener Detektortypen ermöglicht. Des Weiteren erlaubt es der geringe Platzbedarf und die Kosteneffizienz der Etalons, mehrere IR-Detektoren parallel zu messen und damit den Kalibrierprozess effizienter zu gestalten.

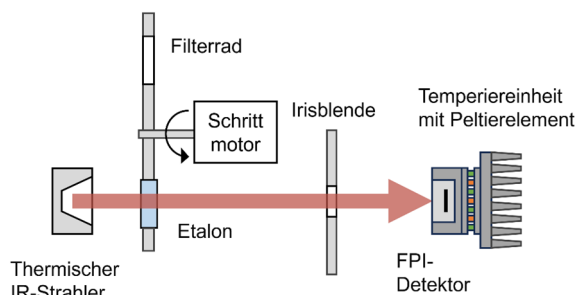


Abb. 8: Schematische Messanordnung der Kalibrierung eines Etalons

In der in Abbildung 8 dargestellten Messanordnung wird modulierte IR-Strahlung von einem breitbandigen thermischen IR-Strahler emittiert. Der Öffnungswinkel des FPI-Detektors wird durch eine Blende begrenzt. Das Etalon fungiert als optischer Resonator und stellt die Referenz dar. Um eine Vermessung unterschiedlicher Etalondicken zu ermöglichen, sind diese in einem Filterrad angeordnet. Das gewählte Etalon wird mit dem unkalibrierten FPI-Detektor LFP-5580 spektral vermessen, wobei die Steuerspannung des FPI schrittweise angepasst wird. Die Temperatur des Detektors wird dabei durch eine externe Temperiereinheit reguliert.

Um das Transmissionsspektrum dieser Kalibrierung zu erhalten, ist zunächst eine Messung des Hintergrundspektrums I_0 ohne Etalon erforderlich. Erst im zweiten Schritt wird das Transmissionsspektrum I_t mit Etalon gemessen, um das Messergebnis I_t/I_0 wie in Abbildung 9 zu erhalten. Dieses beschreibt den Zusammenhang zwischen der Steuerspannung V_c und der Transmission T .

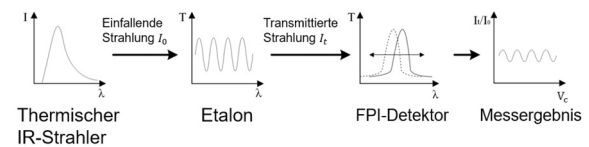


Abb. 9: Schematische Filterkette der Kalibrierung des Etalonspektrums

Auswahlkriterien für Etalons

Ein wichtiger Schritt bei der Entwicklung des Verfahrens ist die Auswahl der geeigneten Dicke des Festkörperetalons. Die Dicke bestimmt die Anzahl der Perioden im gewünschten Wellenlängenbereich. Eine höhere Anzahl an Perioden erhöht die Zahl der Kalibrierungsflanken und verbessert somit die Genauigkeit der Kalibrierung. Gleichzeitig ist es wichtig, dass der freie Spektralbereich (FSR) des Etalons groß genug ist, um die spektrale Auflösung durch den FPI-Detektor zu gewährleisten. Die spektrale Auflösung wird durch die maximale Halbwertsbreite (HWB) des FPI-Detektors charakterisiert. Die Wahl des Etalons stellt somit einen Kompromiss zwischen diesen beiden Faktoren dar, um eine bestmögliche Kalibrierung sicherzustellen.

Um ein geeignetes Referenzspektrum des gewählten Etalons zu erzeugen, können verschiedene Methoden genutzt werden. In diesem Fall wurde das Festkörperetalon mit einem FPI-Detektor vermessen und der ZWL-Fehler des Detektors durch eine Vermessung am FTIR-Spektrometer korrigiert. Hierzu wird ein FPI-Detektor mit einer möglichst kleinen

HWB und einem symmetrischen Verlauf der spektralen Empfindlichkeit gewählt.

Optimierung der Modellparameter

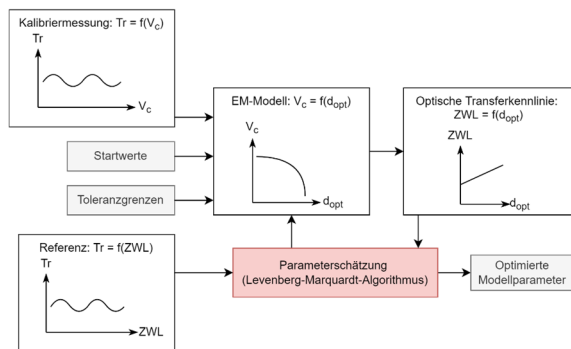


Abb. 10: Schematischer Ablauf der Parameterschätzung des EM-Modells

Wie in Abbildung 10 dargestellt, werden die Kalibrierungsmessung, die Etalon-Referenz und die Startwerte des elektromechanischen Modells sowie Toleranzgrenzen in den Kalibrier- und Justagevorgang einbezogen. Im EM-Modell wird die Umrechnung der FPI-Steuerspannung V_c in den Reflektorabstand d_{opt} durch Modellparameter beschrieben. Die optische Transferkennlinie ist durch Kenntnis des gewählten Reflektors für das FPI bekannt.

Durch die Kombination des EM-Modells und der optischen Transferkennlinie kann die FPI-Steuerspannung V_c der Kalibrierungsmessung in eine ZWL umgerechnet werden. Anschließend können die Modellparameter mittels des Levenberg-Marquardt-Algorithmus optimiert werden. Hierbei handelt es sich um einen numerischen Optimierungsalgorithmus, das für nichtlineare Parameterschätzungen geeignet ist [7]. Konkret werden durch Variation der Modellparameter des EM-Modells die Residuenquadratsummen zwischen Referenz und Kalibrierungsmessung minimiert.

Die beschriebene Optimierung der Modellparameter muss mehrfach iterativ mit sinkenden Toleranzgrenzen und den jeweils ermittelten Modellparametern als Startwerte durchgeführt werden. Dieses iterative Vorgehen ist erforderlich, da die anfängliche Unsicherheit in den Modellparametern einen umfangreichen Lösungsraum für die Minimierung der Residuenquadratsumme impliziert.

Zu Beginn werden die Toleranzgrenzen daher bewusst weit gesetzt, um eine breite Abdeckung potenzieller Lösungen zu gewährleisten. Allerdings ist es dadurch erforderlich, das Interferenzspektrum des Etalons an den Rändern zu beschneiden, um eine gültige Lösung für jede zulässige Modellparameterkombination zu gewährleisten. Mit sinkenden Toleranzgrenzen sinkt ebenfalls der notwendige

Zuschnitt im Interferenzspektrum und die Randbereiche werden ebenfalls in die Parameterschätzung einbezogen.

Da die Nichtlinearität der Steuerkennlinie im Bereich niedriger ZWL die Anfälligkeit für Fehleinschätzungen der erforderlichen FPI-Steuerspannung erhöht, wird eine relative Gewichtung eingeführt, die auf der Steigung der Steuerkennlinie basiert. Diese beschriebenen methodischen Verfeinerungen stellen sicher, dass die Modellparameter nicht nur präzise, sondern auch in einer Weise optimiert werden, die der spezifischen Dynamik des Steuerverhaltens gerecht wird. Das Ergebnis dieser sorgfältig abgestimmten Prozedur sind Modellparameter, die für die gemessene Temperatur optimiert wurden.

Es gibt jedoch eine Einschränkung: Die Abbildung von Zwischentemperaturen ist noch nicht möglich. Um dieses Problem zu lösen, wird das EM-Modell durch die Integration von Temperaturparametern c_n erweitert. Diese Anpassung verleiht dem Modell die notwendige Flexibilität, um auch für nicht direkt gemessene Zwischentemperaturen präzise Steuerkennlinien zu generieren, die den Spezifikationsanforderungen entsprechen.

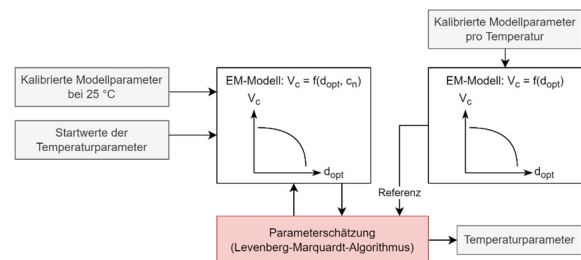


Abb. 11: Schematischer Ablauf der Schätzung der Temperaturparameter

In Abbildung 11 wird die methodische Vorgehensweise bei der Optimierung der Temperaturparameter schematisch dargestellt. Die bisher optimierten Modellparameter werden als Referenz in der entsprechenden EM-Modell-darstellung verwendet. Zusätzlich werden die bei 25 °C optimierten Modellparameter als fixierte Größen in das erweiterte Modell übernommen. Darüber hinaus werden Startwerte für die neu integrierten Temperaturparameter benötigt.

Anschließend wird der Satz von EM-Modellen, die verschiedene Detektortemperaturen repräsentieren, mit dem erweiterten Modell verglichen. Die Optimierung konzentriert sich ausschließlich auf die Temperaturparameter. Dabei wird erneut der Levenberg-Marquardt-Algorithmus verwendet, um die Residuenquadratsumme zwischen den temperaturabhängigen Modellvorhersagen und den empirischen Mo-

dellen verschiedener Temperaturen zu minimieren.

Experimentelle Versuchsergebnisse zur Kalibrierung und Justage

In einem eigens konzipierten Messaufbau, der die Messanordnung aus Abbildung 8 repliziert, wurden verschiedene Festkörperetalons in einem Filterrad zur experimentellen Überprüfung des vorgestellten Verfahrens eingesetzt. Die Versuche zielten darauf ab, die Leistungsfähigkeit des Verfahrens unter variierenden Bedingungen zu evaluieren. Als Referenz wurde ein Etalon mit einer Dicke von $(30 \pm 2) \mu\text{m}$ verwendet. Dieses wurde mit einem FPI-Detektor mit einer HWB von 102 nm vermessen wurde. Die Versuche wurden mit einem Detektor mit einer HWB von 115 nm durchgeführt.

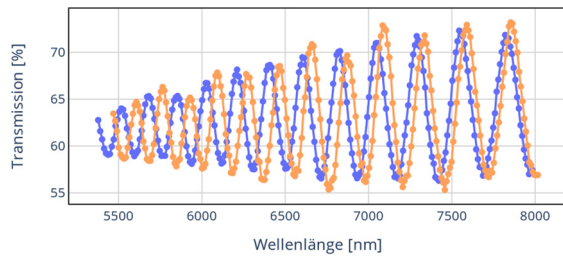


Abb. 12: Gemessenes Etalonspektrum mit unkalibriertem FPI-Detektor (blau: 15 °C, orange: 65 °C)

In Abbildung 12 ist der Versatz und die Stauung des gemessenen Etalon-Interferenzspektrums in Abhängigkeit der Detektortemperatur vor der Kalibrierung ersichtlich. Dies verdeutlicht die Temperatursensitivität des Fabry-Pérot-Interferometers und die Notwendigkeit einer präzisen Temperaturkalibrierung.

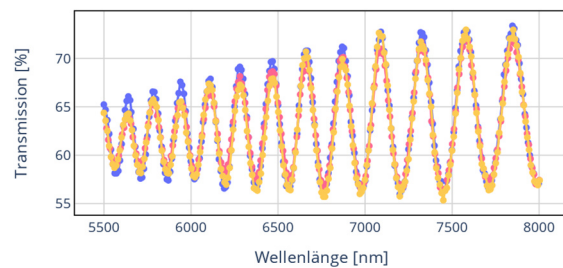


Abb. 13: Gemessenes Etalonspektrum nach Kalibrierung und Justage im Vergleich zur Referenz (blau)

Die Anwendung des neuen Kalibrier- und Justageverfahrens führte zu einer deutlichen Verbesserung der Messergebnisse, wie in Abbildung 13 ersichtlich ist. Der Vergleich der Messungen bei 15 °C und 65 °C mit der Referenz bestätigt die Wirksamkeit des Verfahrens durch die Minimierung der Residuenquadrat-

summe und die damit verbundene Kompensation der temperaturbedingten Verzerrungen.

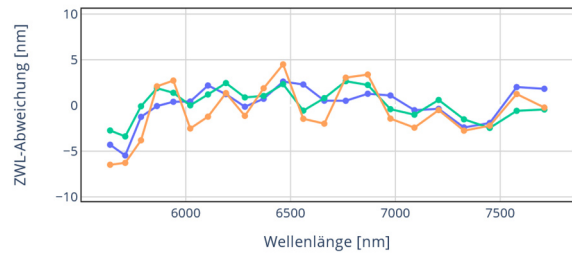


Abb. 14: Bewertung der Justage (blau: 15 °C, grün: 35 °C, orange: 65 °C)

Ein zentrales Bewertungskriterium für die Kalibrierung war bisher die ZWL-Abweichung des kalibrierten FPI-Detektors vom Sollwert. Diese kann im neuen Verfahren nicht direkt ermittelt werden, wie es bei einer FTIR-basierten Kalibrierung der Fall ist. Stattdessen wurde aus dem Etalon-Interferenzspektrum für jeden lokalen Extremwert die ZWL bestimmt, um die Abweichungen zwischen Referenz und Kalibrierung zu evaluieren. Die maximale Abweichung des kalibrierten FPI-Detektors aus Abbildung 14 lag dabei mit -6,5 nm innerhalb der Spezifikation von ± 10 nm.

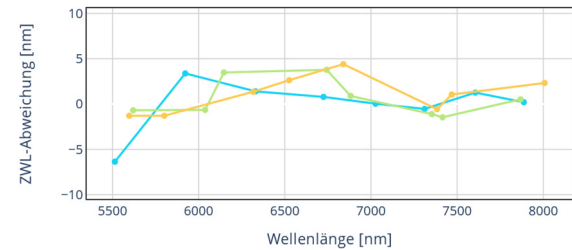


Abb. 15: Verifikation der Justage (blau: 15 °C, grün: 35 °C, gelb: 65 °C)

Zur unabhängigen Überprüfung der Ergebnisse wurde ein Vergleich mit Messungen am FTIR-Spektrometer durchgeführt, wie in Abbildung 15 dargestellt. Diese Verifikationsmethode bestätigte den Kalibrier- und Justageerfolg, indem sie vergleichbare Abweichungen von den Referenzwerten ermittelte. Damit wurde das in Tabelle 2 dargestellte Bewertungsergebnis untermauert.

Tab. 2: Vergleich zwischen Bewertung und Verifikation

Parameter	Bewertung	Verifikation
Mittelwert	-0,3 nm	0,3 nm
Standardabweichung	2,2 nm	2,3 nm
Maximalabweichung	6,5 nm	7,0 nm

Der Erfolg des neuen Kalibrierverfahrens hängt entscheidend davon ab, ob die maximale ZWL-Abweichung nach der Kalibrierung und Justage innerhalb der spezifizierten Toleranz von ± 10 nm aus Tabelle 1 gehalten werden kann. Darüber hinaus ist es wichtig, dass das verwendete Bewertungskriterium eine zuverlässige Rückführung auf die ZWL-Abweichungen erlaubt, die mit Hilfe des FTIR-Spektrometers bestimmt wurden. Die experimentellen Ergebnisse dieses Beispiels in Tabelle 2 zeigen, dass diese Kriterien erfüllt wurden. Die durchgeführte Kalibrierung und Justage erreichten das geforderte Spezifikationsniveau. Die Methode der Bewertung erwies sich im Vergleich mit unabhängigen Verifikationsmessungen als konsistent.

Einflussfaktoren und Limitationen

Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass die HWB des FPI-Detektors einen signifikanten Einfluss auf die Kalibrier- und Justagegenauigkeit hat.

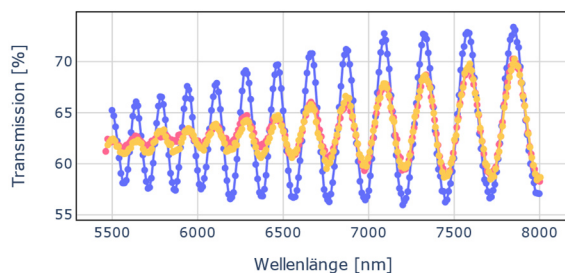


Abb. 16: Gemessenes Etalonspektrum nach Kalibrierung und Justage eines FPI-Detektors mit hoher HWB im Vergleich zur Referenz (blau)

Abbildung 16 verdeutlicht, dass eine hohe HWB des FPI-Detektors von 164 nm, insbesondere bei Wellenlängen unterhalb von 6300 nm, zu einer limitierten Auflösung des Etalon-Interferenzspektrums führt. Diese Limitation beeinträchtigt den Kalibrier- und Justageprozess erheblich, da ein bedeutender Anteil der Residuen nicht minimiert werden kann. Diese Erkenntnisse basieren auf der Anwendung des Verfahrens auf 22 verschiedenen FPI-Detektoren, die ein breites Spektrum der Produktionsvarianz abdecken. Als Referenz diente erneut ein Etalon mit einer Dicke von $(30 \pm 2) \mu\text{m}$. Die maximale Abweichung der Verifikationsmessung in Abhängigkeit von der HWB des FPI-Detektors ist in Abbildung 17 dargestellt. Es wurde festgestellt, dass eine erfolgreiche Kalibrierung und Justage bis zu einer HWB von etwa 120 nm möglich ist. Jenseits dieses Wertes erweist sich die Kalibrierung und Justage aufgrund der oben genannten Probleme meist als unzureichend.

Diese Einschränkungen betonen die Bedeutung der HWB als kritischen Faktor, der die Anwendbarkeit des Verfahrens begrenzt.

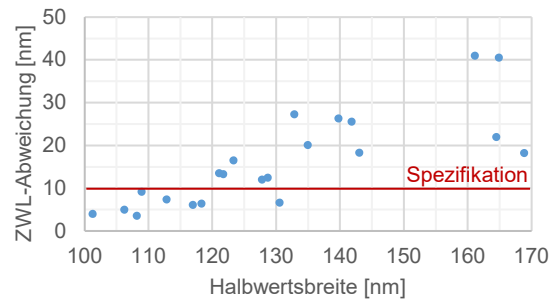


Abb. 17: Maximalabweichung in Abhängigkeit der HWB des FPI-Detektors

Ein weiterer relevanter Einflussfaktor für die Kalibrierung und Justage mittels eines Etalon-Interferenzspektrums ist die Symmetrie der FPI-Filterkurve. Diese variiert in Abhängigkeit des FPI-Detektors sowie des Durchstimmbereichs, wie in Abbildung 6 dargestellt ist. Abbildung 18 veranschaulicht die Auswirkung der Symmetrie, definiert als Differenz zwischen der Zentralwellenlänge und der Peakwellenlänge, auf die Kalibrierung und Justage.

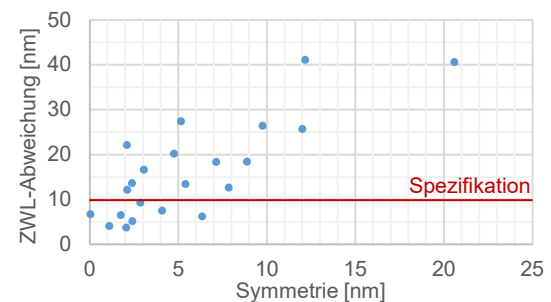


Abb. 18: Maximalabweichung in Abhängigkeit der Symmetrie des FPI-Detektors

Diese beiden Faktoren haben keinen Einfluss auf die ZWL-Abweichung bei Messung der spektralen Empfindlichkeit am FTIR-Spektrometer. Allerdings fließen sie direkt in die Messgröße ein, wenn eine Kalibrierung und Justage mit Hilfe eines Festkörperetalons durchgeführt wird. Daher begrenzen diese Faktoren derzeit den Einsatz des neuen Verfahrens.

Schlussfolgerung und Ausblick

Die durchstimmbaren IR-Detektoren vom Typ *LFP-5580*, entwickelt von der *InfraTec GmbH*, nutzen die Technologie des Fabry-Pérot-Interferometers als durchstimmbaren Schmalbandfilter. Die Leistungsfähigkeit der IR-Detektoren als Mikrospektrometer wird maßgeblich von der präzisen Steuerung der Filterwellenlänge bestimmt. Diese ist von verschiedenen Faktoren abhängig, darunter die Detektortempera-

tur sowie Streuungen, die während der Fertigung des mikrostrukturierten FPI auftreten können. Die Entwicklung und experimentelle Validierung des neuartigen Kalibrier- und Justageverfahrens, welches Festkörperetalons aus Silizium als Kalibriernormale verwendet, verspricht einen höheren Durchsatz zu geringeren Herstellkosten. Ein wesentlicher Faktor für den Erfolg dieses Verfahrens ist der Einsatz eines elektromechanischen Modells des FPI. Die Modellparameter werden mittels des Levenberg-Marquardt-Algorithmus iterativ optimiert, um eine präzise Abstimmung der nicht-linearen Steuerkennlinie zu erzielen. Die experimentellen Ergebnisse belegen die Funktionsfähigkeit des vorgestellten Verfahrens, indem es die spezifizierte Einstellgenauigkeit der ZWL erreichen konnte. Allerdings offenbarte die Untersuchung einer größeren Stichprobe, dass die Halbwertsbreite des zu kalibrierenden Detektors eine kritische Rolle spielt. Detektoren mit einer HWB über 120 nm können derzeit die vorgegebenen Spezifikationsgrenzen nicht einhalten. Diese Erkenntnisse legen den Grundstein für weiterführende Entwicklungen in der Kalibrierung und Justage von FPI-Detektoren. Dabei wird die Art der Referenz, die optimale Etalondicke als auch der gewählte Referenzdetektor von entscheidender Bedeutung sein, um die Anwendbarkeit des Verfahrens zu erweitern.

- Infrared Sensors, Devices, and Applications III, 2013, S. 146-157, doi: 10.1117/12.2024822.
- [7] Gavin, H.P.: The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems. Department of civil and environmental engineering, Duke University, 2019, 19. Jg.

Literaturnachweis

- [1] Neumann, N., et al.: Novel MWIR microspectrometer based on a tunable detector. Proc. SPIE 7208, MOEMS and Miniaturized Systems VIII, 2009, San Jose, S. 121-128, doi: 10.1117/12.816578.
- [2] Ebermann, M.: Mikromechanische Mehrband-Fabry-Pérot-Interferometer für die Anwendung in der Infrarot-Spektroskopie. Dresdner Beiträge zur Sensorik, Band 54, Dresden: Verlag der Wissenschaften GmbH, 2014, ISBN 978-3-944331-83-6.
- [3] Neumann, N., et al.: Tunable infrared detector with integrated micromachined Fabry-Perot filter. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS, 2008, 7. Jg., Nr. 2, S. 021004-021004-9, doi: 10.1117/1.2909206.
- [4] Ebermann, M.; Lehmann, S.; Neumann, N.: Tunable filter and detector technology for miniature infrared gas sensors, 2017 ISOCs/IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN), Montreal, QC, Canada, 2017, S. 1-3, doi: 10.1109/ISOEN.2017.7968846.
- [5] Vaughan, M.: The Fabry-Perot Interferometer: History, Theory, Practice and Applications. 1. Aufl. New York: Routledge 1989, doi: 10.1201/9780203736715.
- [6] Schröter et al.: Wavelength stabilization of electrostatically actuated micromechanical infrared Fabry-Pérot filters. Proc. SPIE 8868,