

# Statisches Fourier-Transformations-Spektrometer für den mittleren Infrarotbereich mit erhöhter spektraler Auflösung

Michael H. Köhler, Michael Müller, Michael Schardt, Patrick Kienle, Xingchen Dong, Alexander W. Koch  
 Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik, Technische Universität München  
 mailto:michael.koehler@tum.de

Dieser Beitrag beschreibt ein statisches Fourier-Transformations-Spektrometer, welches im mittleren Infrarotbereich betrieben wird und durch den Einsatz eines Stufenspiegels eine vergleichsweise hohe spektrale Auflösung ermöglicht. Es werden Simulationen und erste Messergebnisse vorgestellt.

## 1 Motivation

Statische Fourier-Transformations-Spektrometer (sFTS) bieten eine kostengünstige und stabile Alternative zu FTIR-Laborgeräten, da sie ohne bewegliche Bauteile auskommen. Statische Einzelspiegel-Spektrometer bieten sich dabei vor allem im mittleren Infrarotbereich an, da sie keine internen Lichtverluste aufweisen [1]. Ein Nachteil dieser Systeme ist die vergleichsweise geringe spektrale Auflösung, die durch die Pixelanzahl des verwendeten Detektorarrays limitiert ist [2]. In diesem Beitrag wird daher ein Konzept vorgestellt, welches mithilfe eines Stufenspiegels das Interferogramm über die zweite Dimension eines 2D-Detektors aufteilt. Dadurch lässt sich die nutzbare Pixelanzahl vervielfachen, was zu einer entsprechend höheren spektralen Auflösung führt. Dies ist beispielsweise für die Gasanalyse vorteilhaft.

## 2 Grundprinzip

Abbildung 1 zeigt den optischen Aufbau des sFTS mit erhöhter spektraler Auflösung. Kollimiertes Licht trifft auf eine konvexe Eingangslinse, welche einen Brennpunkt im Interferometer erzeugt. Ein Strahlteiler teilt das einfallende Licht daraufhin auf, wobei ein Teil der Strahlung direkt zu einer Fourierlinse transmittiert wird, während der andere zunächst sowohl am Strahlteiler, als auch an einem weiteren Spiegel reflektiert wird. Durch den Einsatz eines Strahlteilers mit hohem Brechungsindex gelingt es dabei die optischen Pfadlängen der Interferometerarme anzugleichen. Die Fourierlinse mit Brennweite  $f$  erzeugt letztlich Interferenz auf einem Detektor in ihrer Brennebene. Die resultierende optische Pfaddifferenz  $\Delta X$  auf dem Detektorarray lässt sich gemäß Gleichung (1) ausdrücken.

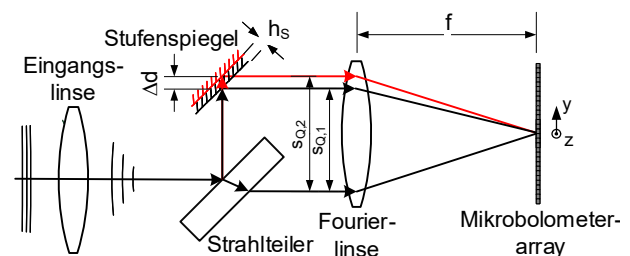
$$\Delta X = \frac{s_Q}{f} \cdot y + \Delta d \quad (1)$$

Dabei beschreibt  $s_Q$  den vertikalen Abstand zwischen den Zentralstrahlen vor der Fourierlinse. Durch Verschieben des Spiegels aus seiner Neutralposition um  $\Delta d$  lässt sich der abgebildete Pfaddiff-

erenzbereich auf dem Detektor variieren. Die spektrale Auflösung  $\Delta \tilde{\nu}$  lässt sich dann gemäß Gleichung (2) aus der maximalen optischen Pfaddifferenz  $\Delta X_{\max}$  bestimmen, die Pixelanzahl in  $y$ -Richtung wird mit  $N_y$  bezeichnet.

$$\Delta \tilde{\nu} = \Delta X_{\max}^{-1} \propto N_y^{-1} \quad (2)$$

Im Gegensatz zur Standardkonfiguration eines Einzelspiegel-Interferometers [1] wird hier ein gestufter Spiegel mit Höhe  $h_S$  eingesetzt, um das Interferogramm entlang der  $z$ -Achse des Detektors in zwei Teilbereiche aufzuteilen. Während die neutrale Stufe (schwarz) wie in der Standardkonfiguration des Spektrometers einen Pfaddifferenzbereich auf dem Detektor erzeugt, welcher den Mid-Peak des Interferogramms beinhaltet, erzeugt die äußere Stufe (rot) größere Pfaddifferenzen, um die spektrale Auflösung des Spektrometers zu erhöhen.



**Abbildung 1** Funktionsprinzip eines statischen Einzelspiegel-Spektrometers mit Stufenspiegel.

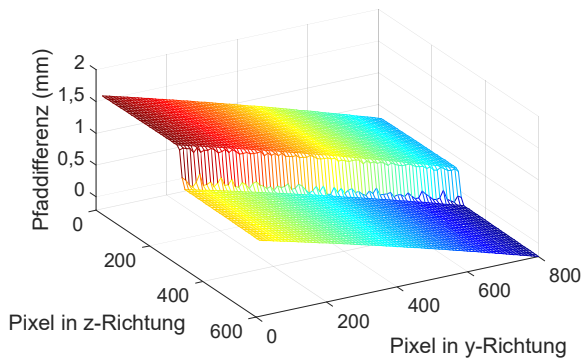
Zu beachten ist hierbei, dass zwischen den parallelen Teilstrahlen durch den Offset  $\Delta d$  unterschiedliche vertikale Distanzen  $s_{Q,1}$  und  $s_{Q,2}$  vor der Fourierlinse erzeugt werden, wodurch sich gemäß Gleichung (3) auch die entsprechenden Raumfrequenzen  $k_{1,2}$  für jede Wellenlänge  $\lambda$  auf den jeweiligen Detektorbereichen unterscheiden [2].

$$k_1 = \frac{s_{Q,1}}{f \cdot \lambda} < k_2 = \frac{s_{Q,2}}{f \cdot \lambda} \quad (3)$$

Die beiden so erzeugten Teilinterferogramme müssen dann vor der Fourier-Transformation algorithmisch geeignet fusioniert werden, um das Spektrum zu berechnen.

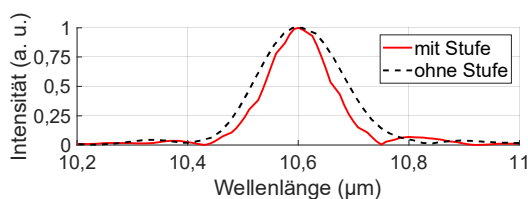
### 3 Simulationsergebnisse

Um das vorgestellte Konzept zu evaluieren, wurden Ray-Tracing Simulationen einer typischen Spektrometerkonfiguration durchgeführt. Dazu wurde wie im späteren Messaufbau ein ZnSe-Strahlteiler mit einer Dicke von 3 mm und eine Germanium-Fourierlinse mit einer Brennweite von 75 mm verwendet. Der Detektor hat 800 x 600 Pixel und einen Pixelabstand von 17  $\mu\text{m}$ . Abbildung 2 zeigt die Pfaddifferenzverteilung für eine Stufenhöhe von 400  $\mu\text{m}$ .



**Abbildung 2** Simulierter Pfaddifferenzverlauf für eine Stufenhöhe  $h_s$  von 400  $\mu\text{m}$ .

Zu erkennen ist die Stufe parallel zur y-Achse des Detektors, wodurch die maximale Pfaddifferenz von etwa 1 mm auf 1,6 mm erhöht wird. Dadurch ergibt sich eine Steigerung der spektralen Auflösung von 10  $\text{cm}^{-1}$  auf 6  $\text{cm}^{-1}$ . Nach Vereinigung der Teilinterferogramme lässt sich nun das feiner aufgelöste Spektrum der Lichtquelle ermitteln. Das auf diesem Weg simulierte Spektrum einer Lichtquelle mit Wellenlänge 10,6  $\mu\text{m}$  zeigt Abb. 3.

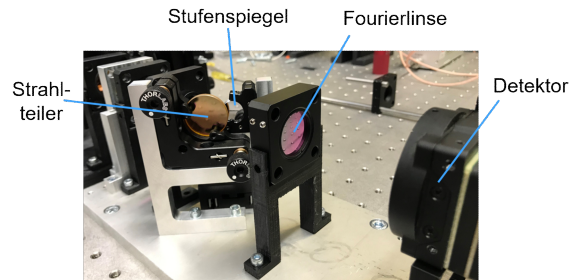


**Abbildung 3** Simulierte Spektren einer monochromatischen Lichtquelle der Wellenlänge 10,6  $\mu\text{m}$ .

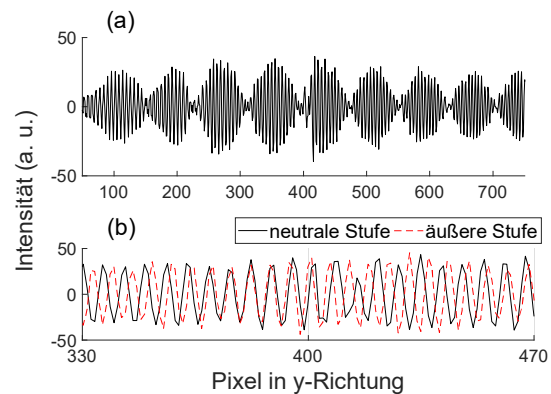
### 4 Messergebnisse

Abbildung 4 zeigt den entwickelten Prototypen zur Evaluierung des Konzepts. Abbildung 5 zeigt das Messergebnis für einen  $\text{CO}_2$ -Laser mit Wellenlänge 9,4  $\mu\text{m}$ . Wird über den gesamten Detektor gemittelt, so ergibt sich eine Schwebung (siehe Abb. 5(a)), da die beiden Stufen gemäß Gleichung (3) unterschiedliche Raumfrequenzen  $k$  erzeugen. Werden hingegen nur die Signale von den jeweiligen Detektorhälften ausgewertet (siehe Abb. 5(b)), so lassen

sich die Signale trennen, was auf die grundsätzliche Funktionsweise des Aufbaus schließen lässt. Zudem erzeugt die äußere Stufe wie zu erwarten eine leicht erhöhte Raumfrequenz. Zur besseren Übersicht wird hier nur ein Ausschnitt des Detektors gezeigt.



**Abbildung 4** Laboraufbau zur Evaluierung des vorgeschlagenen Konzepts.



**Abbildung 5** (a) Gemessenes Gesamtinterferogramm; (b) Interferogramme auf den einzelnen Detektorhälften, die von den unterschiedlichen Stufen erzeugt werden.

### 5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Ansatz gezeigt, um die spektrale Auflösung von statischen Einzelspiegel-Fourier-Transformationspektrometern mithilfe eines Stufenspiegels zu erhöhen. Neben Simulationsergebnissen wurden ein Messaufbau sowie erste Messresultate vorgestellt. Als nächsten Schritt gilt es ein geeignetes Kalibrationsverfahren für den Messaufbau zu entwickeln, um das Interferogramm geeignet zu fusionieren und feiner aufgelöste Spektren zu erhalten. Zudem bietet sich der Einsatz breitbandiger Lichtquellen sowie mehrstufiger Spiegel an.

#### Literatur

- [1] M. Schardt et al., *Static Fourier transform infrared spectrometer* (Optics Express, 24(7), 2016).
- [2] Michael H. Köhler et al., *Broadband static Fourier transform mid-infrared spectrometer* (Applied Optics 58(13), 2019).