

## AUFBAU UND UNTERSUCHUNG EINES ERWEITERTEN FABRY-PÉROT-INTERFEROMETERS FÜR AKUSTISCHE MESSUNGEN IN HEISSEN UMGEBUNGEN

### SETUP AND STUDY OF AN ADVANCED FABRY-PÉROT INTERFEROMETER FOR ACOUSTIC MEASUREMENTS IN HOT ENVIRONMENTS

**Holger J. Konle, Ingo Röhle, Christian O. Paschereit**

Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik, TU Berlin, Berlin,

[holger.konle@pi.tu-berlin.de](mailto:holger.konle@pi.tu-berlin.de)

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Abteilung Antriebstechnik, Berlin,

[ingo.roehle@dlr.de](mailto:ingo.roehle@dlr.de)

Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik, TU Berlin, Berlin,

[oliver.paschereit@tu-berlin.de](mailto:oliver.paschereit@tu-berlin.de)

Faser-Optisches Mikrofon (FOM), Fabry-Pérot Interferometrie, Etalon-Effekt, Thermoakustik  
Fiber-Optic Microphone, Fabry-Pérot interferometry, Etalon effect, Theromacoustics

#### Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Faserinterferometers, welches in Verbindung mit einer reflektierenden Membran zu akustischen Untersuchungen in heißer Umgebung eingesetzt werden soll. Bei dem Interferometeraufbau wird der so genannte Etalon-Effekt ausgenutzt, d.h. die Bildung eines Fabry-Pérot-Interferometers zwischen Faserende und Reflektor. Der Basisaufbau dieses Faserinterferometers wurde durch eine Pockels-Zelle, einen Akusto-Optischen Modulator und diverse optische Komponenten ergänzt, so dass durch die quasi-zeitgleiche Erfassung zweier Fabry-Pérot-Signale eine Auflösungserhöhung erreicht werden kann. Dadurch können Amplituden erfasst werden, wie sie bei akustisch angeregten Membranen zu erwarten sind. Die Leistungsfähigkeit des neuen Interferometeraufbaus zeigte sich im Vergleich mit einem kommerziellen Mach-Zehnder-Interferometer.

#### 1. Einleitung

Zur Reduktion von Schadstoffemissionen in der technischen Verbrennung wird zurzeit vorwiegend die Magerverbrennung untersucht. Hierbei werden fossile Brennstoffe mit hohem Luftüberschuss verbrannt, um dadurch die adiabate Verbrennungstemperatur zu senken und somit dem System die Aktivierungsenergie zur Stickoxidbildung vorzuenthalten. Allerdings zeigen diese Verbrennungskonzepte eine Neigung zu Verbrennungsinstabilitäten, die durch die gegenseitige Beeinflussung pulsierender Gasmassenströme und der Wärmefreisetzung erhöhten Schadstoffausstoß und erhöhte Lärmemissionen, sogar auch das mechanische Versagen der Anlage verursachen können ([1], [2]).

Um diese Phänomene besser untersuchen zu können, bedarf es unter anderem auch verlässlicher Messtechnik für die Akustik derartiger Verbrennungsinstabilitäten. Da konventionelle Mikrofone hier aufgrund ihres Temperaturlimits nicht uneingeschränkt eingesetzt wer-

den können, piezo-resistive Drucksensoren allerdings zumeist keine ausreichende Sensitivität aufweisen, gibt es zurzeit noch hohen Bedarf nach einer Messtechnik, die einen Einsatz bei hohen Temperaturen bei gleichzeitig ausreichender Messsensitivität erlaubt. Das vorgestellte Konzept sieht den Aufbau eines Faser-Optischen Mikrofons vor, welches sich auf Basis hochtemperaturresistenter Materialien aus einem Interferometer, einer Lichtleitfaser zur Messstrahlführung und einer reflektierenden Membran, welche dem zu messenden Schallfeld ausgesetzt wird, aufbaut.

Der vorliegende Artikel präsentiert einen hierfür entwickelten Interferometeraufbau, welcher bereits erfolgreich zur Messung von Reflektorauslenkungen, die sich im Bereich akustisch induzierter Membranauslenkungen befinden, eingesetzt wurde.

## 2. Grundaufbau des Faser-Optischen Mikrofons

Abbildung 1 verdeutlicht den Grundaufbau eines Faser-Optischen Mikrofons (FOM): der Messstrahl eines Interferometers wird über eine Lichtleitfaser zur Rückseite einer reflektierenden Membran geführt, auf die der Strahl über eine Linse fokussiert wird [3]. Der akustische Wechseldruck regt die Membran zur Oszillation an und verändert somit die Phasenlage des Messstrahlreflexes gegenüber einem Referenzstrahl. Die Auswertung des Interferenzsignals beider Strahlen ermöglicht folglich die Bestimmung des akustischen Feldes. Das FOM-Konzept sieht die Verwendung hochtemperaturstabiler Materialien vor, um es bei Temperaturen von bis zu 700°C ohne erhöhten Kühlaufwand einsetzen zu können. Neben dem Hochtemperatureinsatz des gewählten FOM-Prinzips bietet der Aufbau auch die Möglichkeit des Einsatzes in Feldern elektromagnetischer Interferenz oder

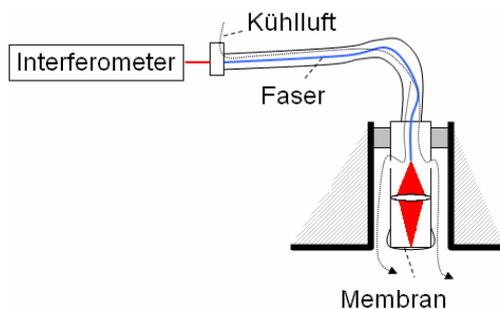


Abb. 1: Grundprinzip eines Faser-Optischen Mikrofons

Radiofrequenzinterferenz, da der Sensorkopf für derartige Störsignale unempfindlich ist.

Abbildung 2 zeigt einen realisierten Sensorkopf des FOMs. Ein Edelstahlzylinder, der mit dem erforderlichen Linsenaufbau verschraubt wird, wird mit einer dünnen Edelstahlfolie, die als Membran dient, verschlossen. Befestigt wird die Membran über eine Klemmvorrichtung, die als eine Art Überwurfmutter realisiert wurde. Die Membranspannung wird durch dieses Konzept bewusst niedrig gehalten, um möglichst hohe Membranauslenkungen und damit niedrige Schalldruckgrenzen für den Sensor zu gewährleisten.



Abb. 2: FOM-Sensorkopf

### 3. Fabry-Pérot Interferometer

#### 3.1. Grundaufbau eines faserbasierten Fabry-Pérot Interferometers

Der zur Realisierung des FOMs genutzte Interferometerbasisaufbau ist ein Fabry-Pérot-Interferometer, das durch das Ende einer Singlemode-Lichtleitfaser und einen Reflektor gebildet wird (siehe Abbildung 3) ([4] bis [7]). Der Reflex von der Faserendfläche interferiert mit dem Reflex der Oberfläche, deren Bewegung analysiert werden soll, im Falle des FOMs also dem Reflex der Rückseite der Membran. Durch die Bewegung des Reflektors wird die Phasenlage der interferierenden Strahlen beeinflusst, so dass das erfasste Interferenzsignal genutzt werden kann, um auf die Bewegung zurück zu rechnen. Wie Abbildung 3 auch verdeutlicht, ist der Wegunterschied beider interferierender Strahlen nur zwei Mal der Abstand zwischen Faserende und Reflektor, so dass keine Strahlquelle mit einer wesentlich höheren Kohärenzlänge nötig ist. Fasererschütterungen, die bei interferometrischen Faseraufbauten, bei denen nicht beide Strahlen in der gleichen Faser geführt werden, stark das Messsignal verfälschen, sind bei dem vorgeschlagenen Interferometeraufbau vernachlässigbar gering. Eine Hochtemperaturanwendung des Aufbaus wird durch die Verwendung einer goldbeschichteten Singlemode-Faser, die eine Temperaturverträglichkeit von bis zu 700°C aufweist, ermöglicht.

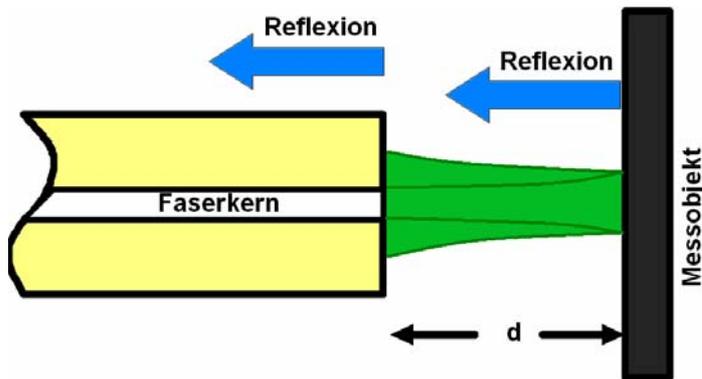


Abb. 3: Reflexionen des Fabry-Pérot-Aufbaus

Abbildung 4 zeigt, wie das Interferenzsignal für eine sinusförmige Reflektorbewegung aussieht und interpretiert werden muss. Die blaue, gestrichelte Linie repräsentiert die Reflektorbewegung, die schwarze Linie das Signal der Diode, welche das Fabry-Pérot-Interferenzsignal erfasst. Ein Intensitätsmaximum im Diodensignal liegt vor, wenn die Phasenlage der interferierenden Strahlen gerade 0 ist, also konstruktive Interferenz auftritt. Das Intensitätsminimum entspricht entsprechend destruktiver Interferenz. Der Wechsel von Maximum zu Minimum stellt eine Reflektorbewegung von einem Viertel der Lichtwellenlänge ( $\lambda/4$ ) dar. Die Interferenzereignisfrequenz, d.h. der Wechsel zwischen konstruktiver und destruktiver Interferenz, spiegelt die Geschwindigkeit der Reflektorbewegung wieder.

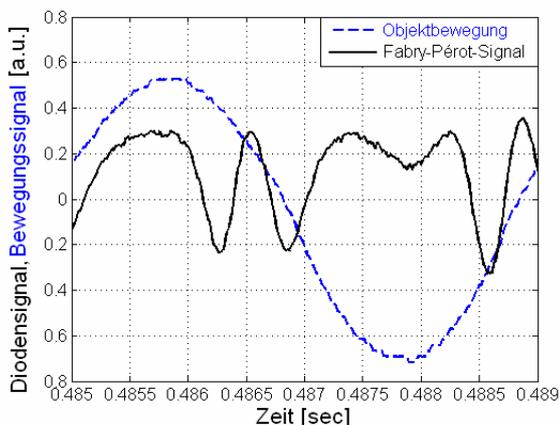


Abb. 4: Zeitsignal FP bei sinusförmiger Objektbewegung

Klassische Interferenzzählverfahren ermöglichen eine Abschätzung der Bewegungsamplitude, bei dem nur ganzzahlige Vielfache von  $\lambda/4$  als Bewegung detektiert werden (Definition von Hell-/Dunkel-Level). Schwankungen an der Flanke, die sowohl Reflektorbewegung also auch Intensitätsschwankungen der Laserlichtquelle darstellen können, werden hierbei nicht aufgelöst. Dieses Verfahren kann folglich Fehler von bis zu  $\lambda/8$  ergeben.

### 3.2. Erweiterter Fabry-Pérot Aufbau mit erhöhter Auflösung

Da die Auslenkung akustisch angeregter Membranen in Abhängigkeit von Membrandurchmesser, Membransteifigkeit und vorliegendem Schalldruck die Detektion geringerer Membranauslenkungen erforderlich macht, wurde der Fabry-Pérot-Aufbau um eine Pockels-Zelle und einen Akusto-Optischen Modulator (AOM) erweitert, wie in Abbildung 5 dargestellt.

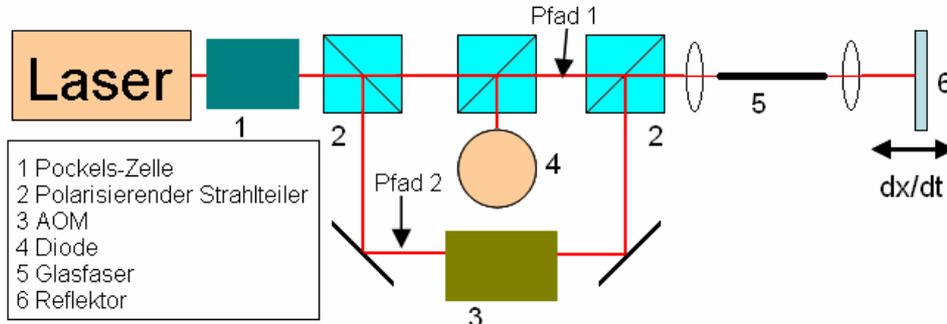


Abb. 5: Prinzipskizze erweiterter FP-Aufbau

Durch die Pockels-Zelle, die zusammen mit einem polarisationsempfindlichen Strahlteilerwürfel einen optischen Schalter ergibt, werden bei hoher Ansteuerfrequenz quasi zeitgleich zwei Fabry-Pérot-Signale erzeugt. Das erste ergibt sich aus *Pfad 1*, in dem der Grundaufbau erzeugt wird. Schaltet die Pockels-Zellenbaugruppe, wird *Pfad 2* aktiv und es ergibt sich das zweite Fabry-Pérot-Signal. In *Pfad 2* führt der AOM zu einer Frequenzverschiebung  $\delta\nu$  des Laserstrahls. Durch die Frequenzverschiebung wird bei Abstimmung des Abstandes *Faserende – Reflektor L* nach Gleichung (1) ein konstanter  $90^\circ$ -Phasenversatz zwischen den 2 Fabry-Pérot-Signalen erzeugt:

$$\frac{\delta\nu}{\nu_0} = \frac{\lambda/4}{L} \quad (1)$$

Hierbei stellt  $\nu_0$  die Grundfrequenz der Laserlichtquelle dar.

Trägt man nun die beiden Signale gegeneinander auf, so ergibt sich im Lissajous-Bild aufgrund des konstanten  $90^\circ$  Phasenversatzes ein Kreis. Die relative Lage des Bildpunktes, der sich aus den Fabry-Pérot-Signalen ergibt, kodiert die Bewegung des Reflektors, so dass über den Arcustangens der Signale diese Bewegung berechnet werden kann. Aus der Charakteristik der Interferometrie spiegelt ein geschlossener Kreis eine Bewegung um  $\lambda/2$  wider, so dass folglich auch die Bewegungsamplitude berechnet werden kann. Intensitätsfluktuationen der Lichtquelle beeinflussen den Kreisradius, nicht aber den Winkel, der zwischen der Verbindungslinie *Punkt – Ursprung* und der Horizontalen liegt, so dass auch das kalkulierte Bewegungssignal unbeeinflusst bleibt. Somit können Bewegungen weit unter der Lichtwellenlänge durch die Interpretation von Kreissegmenten vermessen werden.

### 4. Versuchsergebnisse

Die im Anschluss präsentierten Vorversuchsergebnisse basieren auf der Verwendung eines 80MHz – AOMs, d.h. der Abstand *Faserende – Reflektor* betrug hier 47cm. Um eine Membranbewegung zu simulieren, wurde ein piezo-elektrischer Translator genutzt, dessen Auslenkung durch einen Frequenzgenerator gesteuert wurde. Bei den eingestellten Amplituden wurden Werte gewählt, wie sie schätzungsweise bei akustisch angeregten Edelmembranen bei Membrandurchmessern von circa 6mm und Schalldrücken ab 110dB vorliegen. Neben diskreter Anregung wurden Mehrtonanregung und Frequenzdurchlaufsanregung (*sweep*) untersucht. Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des optischen Aufbaus wurden

Versuchsergebnisse diskreter Anregung mit Messungen eines kommerziellen Mach-Zehnder-Interferometers verglichen.

#### 4.1. Diskrete, Mehrton – und sweep – Anregung

Das erste präsentierte Experiment stellt eine 1-Frequenzanregung mit 53Hz und einer Bewegungsamplitude von circa  $0,2\mu\text{m}$  dar. Abbildung 6 zeigt zunächst das Diodensignal, was aufgrund der hohen Schaltfrequenz der Pockels-Zelle als vertikal linierte Fläche erscheint. Die zwei Fabry-Pérot-Signale werden nach der Datenerfassung durch ein Auswerteprogramm aus dem einen Diodensignal extrahiert (sie sind in der Abbildung in blau und rot als

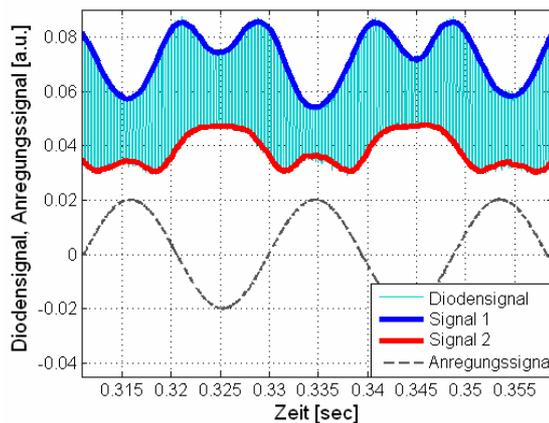


Abb. 6: Dioden- und Anregungssignal für 1-Frequenzanregung

die Einhüllenden des Diodensignals sichtbar). Das zusätzlich dargestellte Anregungssignal zeigt das Ansteuersignal des piezo-elektrischen Translators. In beiden Fabry-Pérot-Signalen ist die Symmetrie wie bereits in Abbildung 4 sichtbar, zusätzlich zeigt sich der konstante  $90^\circ$ -Phasenversatz beider Signale. Abbildung 7 zeigt das bereits beschriebene Vorgehen zur Berechnung der Reflektorbewegung: die linke, obere Teilgrafik zeigt die zwei getrennten Fabry-Pérot Signale. In der

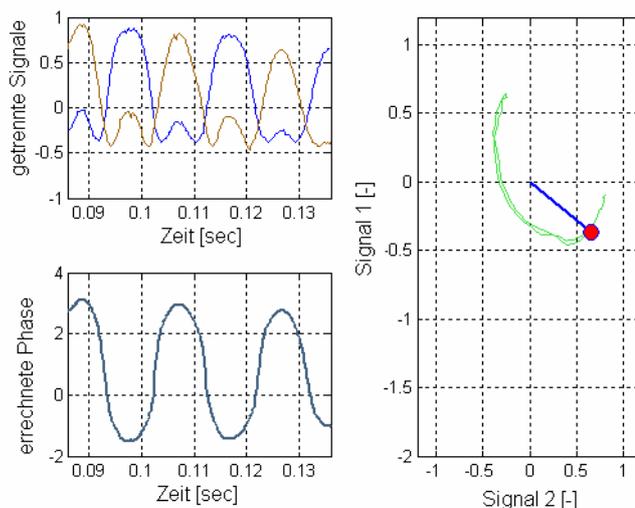


Abb. 7: FP-Auswertung 1-Frequenz-Anregung

die linken, unteren Grafik dargestellt. Aus diesem berechneten Bewegungssignal lassen sich durch Fourieranalyse Bewegungsfrequenz und Bewegungsamplitude des Reflektors ermitteln (dargestellt in Abbildung 8). Nutzt man die Information, dass ein geschlossener Kreis eine Bewegung von  $\lambda/2$  darstellt, so ergibt sich aus der Fourieranalyse eine Bewegungsfrequenz von 53Hz bei einer Amplitude von circa  $0,2\mu\text{m}$ . Diese Werte entsprechen dem Ansteuersignal für den piezo-elektrischen Translator.

Abbildung 7 zeigt das bereits beschriebene Vorgehen zur Berechnung der Reflektorbewegung: die linke, obere Teilgrafik zeigt die zwei getrennten Fabry-Pérot Signale. In der

rechten Grafik, in der beide Signale gegeneinander aufgetragen werden, dem so genannten Lissajous-Bild, ergibt sich aufgrund des konstanten  $90^\circ$ -Phasenversatzes beider Signale ein Kreis. Die Lage des Signalpunktes, verdeutlicht durch den zugefügten Zeiger, kodiert die Bewegung des Reflektors. Der Arcustangens ermöglicht ihre Berechnung und ist in der linken, unteren Grafik dargestellt. Aus diesem berechneten Bewegungssignal lassen sich durch Fourieranalyse Bewegungsfrequenz und Bewegungsamplitude des Reflektors ermitteln (dargestellt in Abbildung 8). Nutzt man die Information, dass ein geschlossener Kreis eine Bewegung von  $\lambda/2$  darstellt, so ergibt sich aus der Fourieranalyse eine Bewegungsfrequenz von 53Hz bei einer Amplitude von circa  $0,2\mu\text{m}$ . Diese Werte entsprechen dem Ansteuersignal für den piezo-elektrischen Translator.

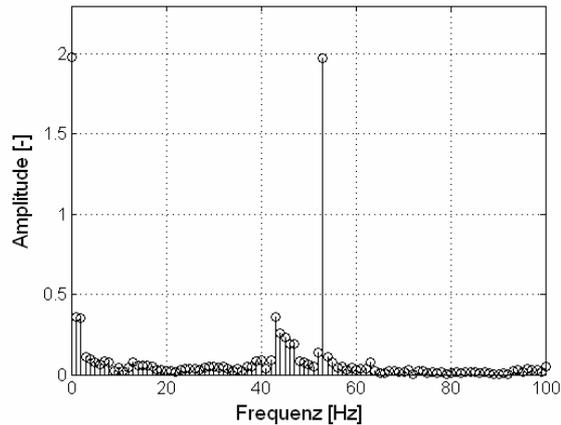


Abb. 8: FFT-Ergebnis berechnetes Bewegungssignal: 1-Frequenz-Anregung

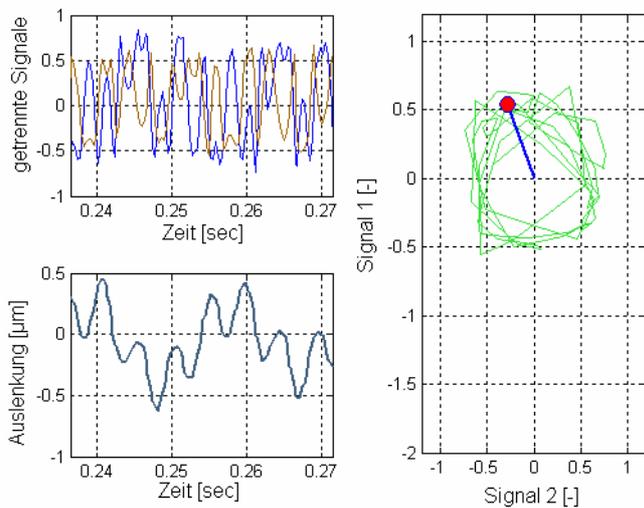


Abb. 9: FP-Signal 2-Frequenz-Anregung

Abbildung 9 zeigt das Versuchsergebnis für eine 2-Frequenz-Anregung und die entsprechende Datenbearbeitung. Bei dem Experiment wurden die Frequenzen 53 und 211Hz mit einem Amplitudenverhältnis von 3:2 simultan angeregt. Abbildung 10 weist links einen Ausschnitt aus dem berechneten Zeitsignal der 2-Frequenzanregung, rechts das Ergebnis der entsprechenden Fourieranalyse aus. Die berechneten Amplituden von  $0,30\mu\text{m}$  (53Hz) und  $0,18\mu\text{m}$  (211Hz) stellen annähernd das Amplitudenverhältnis der Anregungssignale dar.

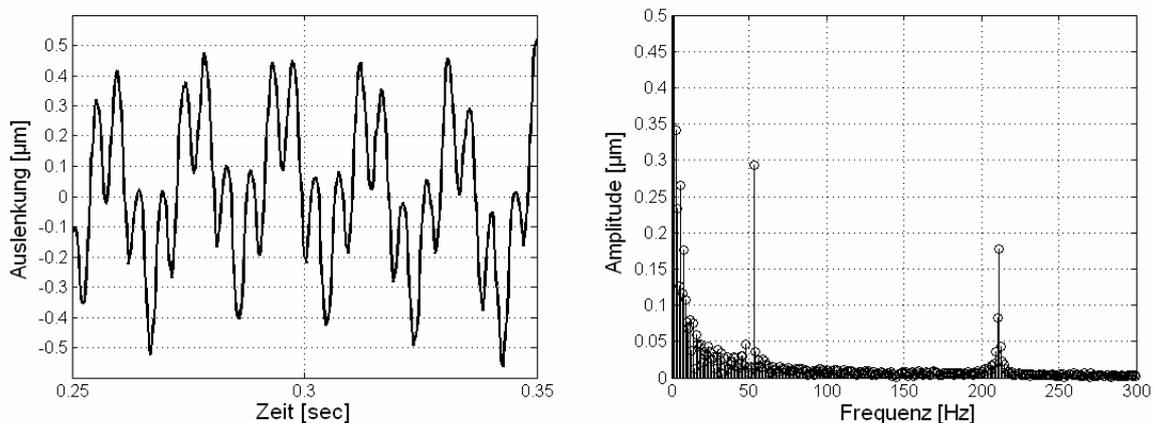


Abb. 10: Zeitsequenz und FFT bei 2-Frequenz-Anregung

Abbildung 11 zeigt das Ergebnis der dritten Anregungsform, der *sweep*-Anregung. Hier wurde die Frequenz in je 100 Millisekunden zwischen 20 und 300Hz linear gesteigert. Der linke Teil der Abbildung zeigt 2 *sweep*-Perioden des berechneten Auslenkungssignals, der rechte das aus diesem Zeitsignal berechnete Spektrum. Im Spektrum zeigt sich, dass der piezo-

elektrische Translator bei gleichbleibender Anregungsspannung eine frequenzabhängige Amplitude aufweist (dies ist sowohl aus den Produktunterlagen des Herstellers, als auch durch Untersuchungen mit einem kommerziellen Mach-Zehnder-Interferometer bekannt).

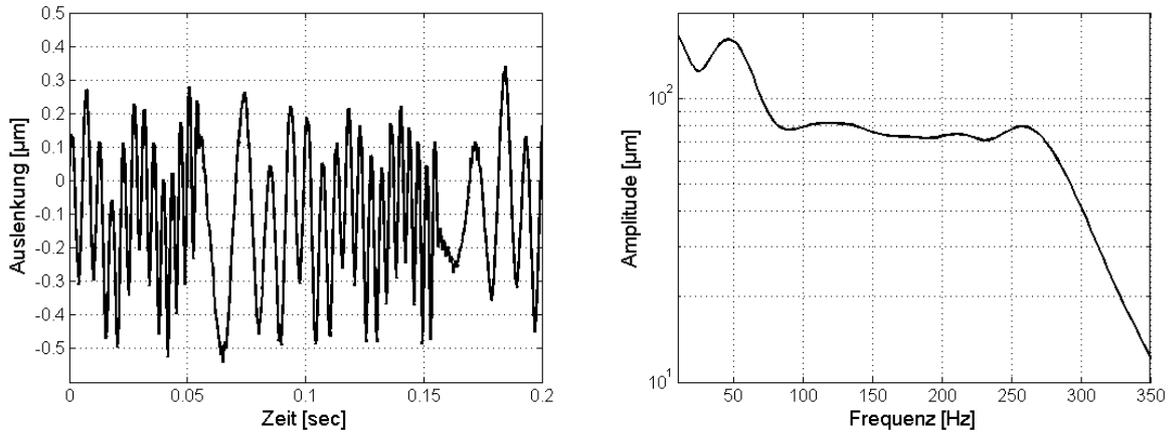


Abb. 11: Zeitsignal und Spektrum der *sweep*-Anregung

#### 4.2. Vergleich mit kommerziellen Mach-Zehnder-Interferometer

Unter Verwendung einer umfassenden Messreihe, bei der der piezo-elektrische Translator bei konstanter Frequenz in seiner Anregungsamplitude zwischen 20 und 150mV variiert wurde, wurde die Leistungsfähigkeit des neuen Fabry-Pérot-Interferometeraufbaus durch Vergleich seiner Messergebnisse mit denen des oben genannten Mach-Zehnder Interferometers verglichen. Bei konstanter Anregungsfrequenz und steigender Anregungsamplitude sollte der piezo-elektrische Translator dabei eine lineare Steigerung der Auslenkung aufweisen. Abbildung 12 stellt die Ergebnisse beider Messaufbauten gegenüber: links die Auslenkung des Translators gemessen mit dem kommerziellen Mach-Zehnder-Aufbau, rechts die Auslenkungen, die aus den berechneten Bewegungssignalen des Fabry-Pérot-Aufbaus ermittelt wurden, jeweils aufgetragen über der Anregungsamplitude des Piezos (MZ = Mach-Zehnder, FP = Fabry-Pérot). Beide Ergebnisse zeigen das erwartete lineare Verhalten des piezo-elektrischen Translators. Die Abweichungen des Fabry-Pérot - Ergebnisses von der linearen Trendlinie ergeben sich hauptsächlich aus der mechanischen Instabilität des optischen Auf-

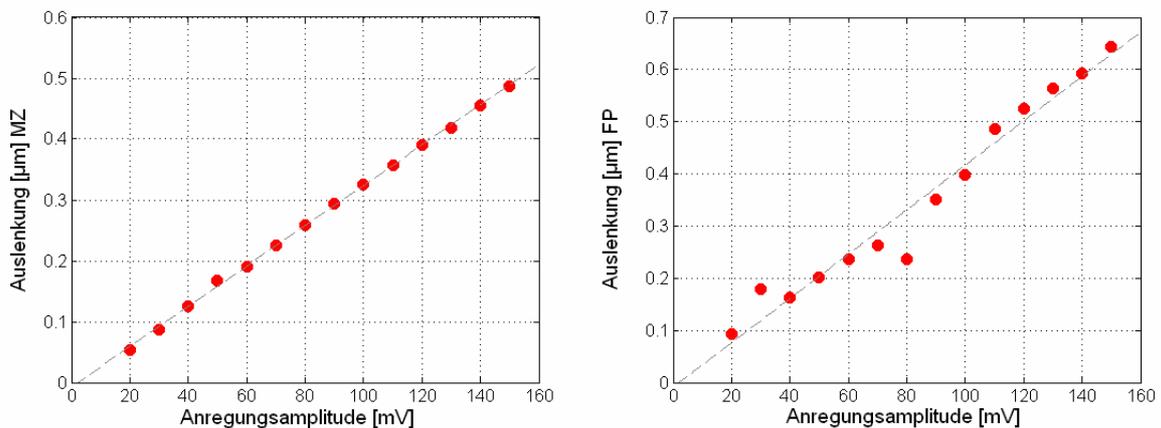


Abb. 12: Vergleich FP (rechts) mit kommerziellem Mach-Zehnder – Interferometer (links)

baus. Da der Abstand der Faser vom Reflektor für die Voruntersuchungen aufgrund der relativ niedrigen Frequenzverschiebung des genutzten AOMs 47cm betragen musste, konnte noch keine ausreichende Stabilität des Gesamtaufbaus gewährleistet werden, die zur Ver-

meidung der Messsignalbeeinflussung durch Laborerschütterungen und ähnliches notwendig ist.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Artikel zeigt den Aufbau eines 1-Faser-Interferometers nach Fabry-Pérot, was zur Messung von akustisch induzierten Membranschwingungen in heißen Umgebungen genutzt werden soll. Um hierbei eine ausreichende Sensitivität des Sensors für Auslenkungen akustisch angeregter Membranen zu erreichen, wurde der optische Aufbau durch eine Pockels-Zelle und einen Akusto-Optischen Modulator ergänzt, wodurch eine quasi zeitgleiche Aufzeichnung zweier Interferenzsignale, die sich durch einen konstanten 90°-Phasenversatz auszeichnen, ermöglicht. Erste Vorversuche wurden mit einem 80MHz-Frequenzschieber durchgeführt. Hierdurch ergab sich ein Abstand *Faser – Reflektor* von 47cm. Der Vergleich der Messergebnisse dieses neuen Interferometeraufbaus mit denen eines kommerziellen Mach-Zehnder-Interferometers zeigt das hohe Potential des gewählten Konzeptes.

Für Heißmessungen, die an einer hauseigenen Modelbrennkammer vorbereitet werden, ist die Nutzung eines 540MHz-Frequenzschiebers geplant, wodurch ein mechanisch stabiler Prototyp mit einer für die Anwendung akzeptablen Baulänge von circa 7cm aufgebaut wird.

## Dankesworte

Die Autoren danken ihren studentischen Mitarbeitern Mirko Spitalny und Alexandre Buffet. Für die finanzielle Unterstützung der Arbeit im Rahmen der Nachwuchsforschergruppe *New Optical Measurement Techniques for Turbomachinery Diagnostics* sei der Helmholtz-Gemeinschaft gedankt.

## Literatur

- [1] Paschereit, C. O., et al., 2002, „Measurement of Transfer Matrices and Source Terms of Premixed Flames“, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*
- [2] Freitag, E., et al., 2006, Pressure influence on the flame transfer function of a premixed swirling flame, *ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air, GT2006-90540*, Barcelona, Spain
- [3] Konle, H. J., et al., 2007, „Development of a novel technique of pressure pulsation measurements in turbomachinery: fiber optic microphone“, *13<sup>th</sup> AIAA Aeroacoustics Conference*
- [4] Schmidt, M., et al., 2000, „Fiber-optic polarimetric strain sensor with three-wavelength digital phase demodulation“, *Optics Letters*, Vol. 25, No. 18
- [5] Lewin, A.C., et al., 1985, „Non-contact surface vibration analysis using a monomode fiber optic interferometer incorporating an open air path“, *J.Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol. 18
- [6] Davis, P.G., et al., 1998, „Fiber Optic Displacement Sensor, Fourth Pacific Northwest Fiber Optic Sensor Workshop“, *Proc. SPIE Vol. 3489*
- [7] Fürstenau, N., et al., 1997, „Extrinsic Fabry-Perot interferometer vibration and acoustic sensor systems for airport ground traffic monitoring“, *IEE Proc.-Optoelectron*, Vol. 144, No. 3