

Ein Schallemissionssensor auf Basis eines Fabry-Pérot Interferometers- Möglichkeiten und Randbedingungen

Manuel RAITH¹, Sascha KIENITZ², Hannes EIGNER¹, Stefanie KREFT²

¹ Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, München

² fos4X GmbH, München

Kontakt E-Mail: manuel.raith@tum.de

Kurzfassung. Schallemissionssensoren basieren in der Regel auf dem piezoelektrischen Effekt. Sie benötigen daher eine geeignete Vorverstärkung und eine abgeschirmte Signalübertragung. Optische-Sensoren auf Basis eines Fabry-Pérot Interferometers können eine Alternative zu klassischen Sensoren darstellen. Diese Arbeit zeigt den Vergleich eines piezobasierter Sensors, einem Laser-Doppler Vibrometer (LDV) und einem Fabry-Pérot Sensor (FP-Sensor). Es wird ein Frequenzbereich von 20 bis 140 kHz untersucht. Die Sensoren werden hinsichtlich ihres Signal-Rausch Verhältnisses betrachtet. Es konnte gezeigt werden, dass die Empfindlichkeit des FP-Sensors vergleichbar zu einem LDV und einem Piezosensor ist.

Einleitung und Stand der Technik

Schallemissionssensoren basieren in der Regel auf dem piezoelektrischen Effekt [1]. Dieser Sensortyp ist einer stetigen Weiterentwicklung unterworfen und hat in den letzten Jahren einen hohen Entwicklungsstand erreicht. Trotz aller Fortschritte, ist die Nutzung von Piezosensoren mit Einschränkungen verbunden. So können elektromagnetische Wechselfelder, wie sie bei Blitzentladungen oder Frequenzumrichtern entstehen als elektromagnetische Störung die Messung negativ beeinflussen. Auch Messungen in einer korrosiven Umgebung sind für Standardsensoren mit metallische Komponenten und metallischen die Anschlüssen problematisch [2], [3]. Die Anwendung nichtmetallischer Sensoren und Glasfasern für die Signalübertragung umgeht einige dieser Einschränkungen und bietet zudem den Vorteil einer äußerst geringen Signaldämpfung. Für Monomodent-Fasern kann eine Dämpfung von 1 dB/km angenommen werden. Wohingegen Koaxialkabel eine frequenzabhängige Dämpfung von etwa 1 dB je 100 m bei 10 MHz aufweisen. Prinzipiell lassen sich die bisher erforschten Designs für faseroptische (Ultra-) Schallsensoren in drei Kategorien einteilen: Mach-Zehnder/Sagnac-Interferometer, Faser-Bragg-Gitter und (extrinsische) Fabry-Pérot-Interferometer. Letztgenannte haben in den jüngsten Entwicklungen das größte Potential hinsichtlich der Sensitivität gezeigt [4].

Dieser Sensortyp kam in einigen (Labor-)Anwendungen bereits erfolgreich zum Einsatz. So konnte der Schädigungsprozess, welcher in großen Transformatoren durch Teilentladung ausgelöst wird, erfolgreich detektiert werden. Die Sensoren wurden dabei direkt in den



Transformator eingebracht und somit über das Transformatoröl angekoppelt. Sie mussten also nicht an der Oberfläche montiert werden [5].

Aktuelle Forschungen zielen darauf, FP-Sensoren sensitiver [6] und dabei gleichzeitig kostengünstig sowie robust zu gestalten [7] [8]. Insbesondere der Demodulation des Lichtspektrums und der Stabilisierung des Arbeitspunktes wird eine große Bedeutung beigemessen [9], [10], [11], [12].

In dieser Arbeit wird der Prototyp eines membran-basierten Fabry-Pérot Sensors (FP-Sensor) untersucht. Um die Übertragungseigenschaften des FP-Sensors zu erfassen, werden parallele Messungen mit einem LDV durchgeführt. Weiterhin wird ein Piezosensor zum Vergleich herangezogen.

Methoden

1.1 Anregung und Signalaufzeichnung

Um das Signal-Rausch-Verhältnis der jeweiligen Sensoren zu erfassen, wurde ein sinusförmiges Ultraschallsignal in eine 5 cm dicke PMMA (Polymethylmethacrylat) Platte eingekoppelt. Die Kantenlänge der quadratischen Platte beträgt 60 cm. Als Quelle dient ein Olympus Kompressionswellengeber, der mit medizinischem Ultraschallgel an die PMMA Platte angekoppelt und mit einem Scherentisch angedrückt wurde. Die Empfänger waren jeweils gegenüber der Quelle positioniert. Der Messaufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Als Sensoren wurde neben dem optischen Sensor sowohl ein Laser-Doppler Vibrometer (LDV) als auch ein piezobasierter Empfänger verwendet. Der Piezoempfänger wurde ebenfalls mit medizinischem Ultraschallgel angekoppelt. Für die LDV-Messung wurde eine Reflektorfolie an der Messposition auf die PMMA-Platte geklebt, und der FP-Sensor wurde über eine dünne Wachsschicht angekoppelt.

Das LDV (Polytec OPV-5000) Signal wurde mit einem Geschwindigkeitsdecoder demoduliert. Die Auflösung betrug 10 mm/s/V bei einer Maximalfrequenz von 250 kHz.

Das Quellsignal wurde mit einem Funktionengenerator und einem geeigneten Piezo Treiber erzeugt. Zur Datenaufzeichnung wurde ein Digitaloszilloskop mit einer Abtastrate von 5 MHz verwendet. Die Amplitudenauflösung betrug 16 Bit bei einer Aufzeichnungslänge von 1 ms. Der Pretriggerbereich wurde zu 0,2 ms und der Posttriggerbereich dementsprechend zu 0,8 ms. Als sinusförmiges Anregungssignal wurde genutzt und die Frequenz wurde in 100 Hz Schritten von 20 kHz bis auf 140 kHz automatisiert gesteigert.

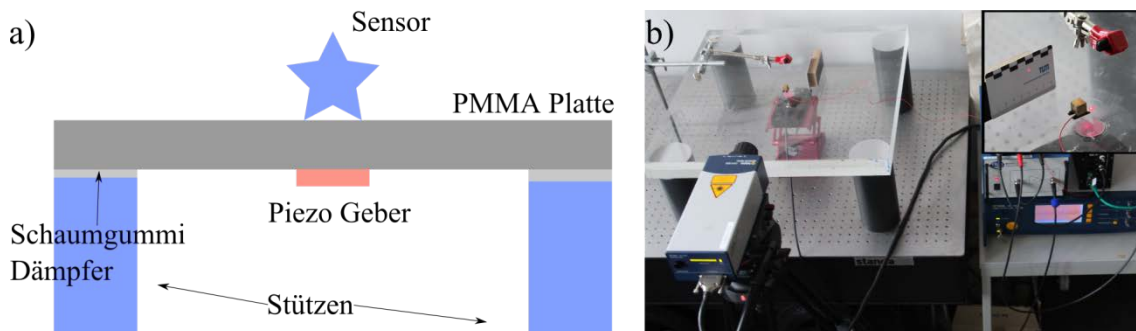


Abb. 1. a) Schematischer Messaufbau. **b)** Realer Aufbau mit Laservibrometer und FP-Sensor. Der Laserstrahl des Laservibrometers wird mit einem Umlenkspiegel auf die PMMA-Oberfläche gelenkt. Das Detail zeigt den FP-Sensor und den Laserreflex des LDV.

Sowohl der FP-Sensor als auch der Piezosensor werden außerhalb ihres Resonanzbereichs betrieben. Bei der LDV-Messung können durch die Reflektorfolie Resonanzen oberhalb von 3 MHz entstehen.

1.2 FP Sensor

Ein Fabry-Pérot Resonator besteht, wie in Abbildung 2a dargestellt, im Allgemeinen aus zwei planparallelen Spiegeln im Abstand L zueinander. Ein Spiegel ist halbdurchlässig ausgeführt und gegenüber liegt ein Vollspiegel. Durchläuft Licht den halbdurchlässigen Spiegel, reflektiert das Licht am Vollspiegel. Die reflektierte Lichtwelle bewegt sich dann im Resonator mit Länge L in Gegenrichtung zurück zum ersten Spiegel. Die elektromagnetischen Wellen überlagern sich in dem Resonator, so dass es zur Superposition aller Partialwellen kommt. Die Wellenlängen, welche die Resonatorbedingung aus Gleichung 1 erfüllen, werden in Transmissionsrichtung konstruktiv verstärkt, während alle anderen Wellenlängen abgeschwächt werden. In Reflexionsrichtung tritt der umgekehrte Fall auf. Die Resonatorbedingung ist von der Wellenlänge des Lichts λ und dem Abstand der Spiegel L abhängig. Eine Abweichung der Planparallelität wird über den Winkel Φ berücksichtigt; n ist der Brechungsindex des Resonatormediums und N ist die optische Ordnung. Die Führung des Licht erfolgt über einen Spiegel in die Kavität [13]. Das Licht wird über eine optische Faser und einen Umlenkspiegel in die Kavität ein- und wieder ausgekoppelt. Der Vollspiegel wird als Membran ausgebildet und mechanisch an das Messobjekt angekoppelt, sodass eintreffende elastische Wellen eine Auslenkung der Membran verursachen und somit die optische Weglänge des FP-Sensors verändern. Zur Ankopplung dient eine Stahlkugel mit einem Durchmesser von 1 mm, womit eine punktförmige Lasteinleitung auf die Membran erreicht wird. Der verwendete Sensor hat eine Resonanzfrequenz von 250 kHz.

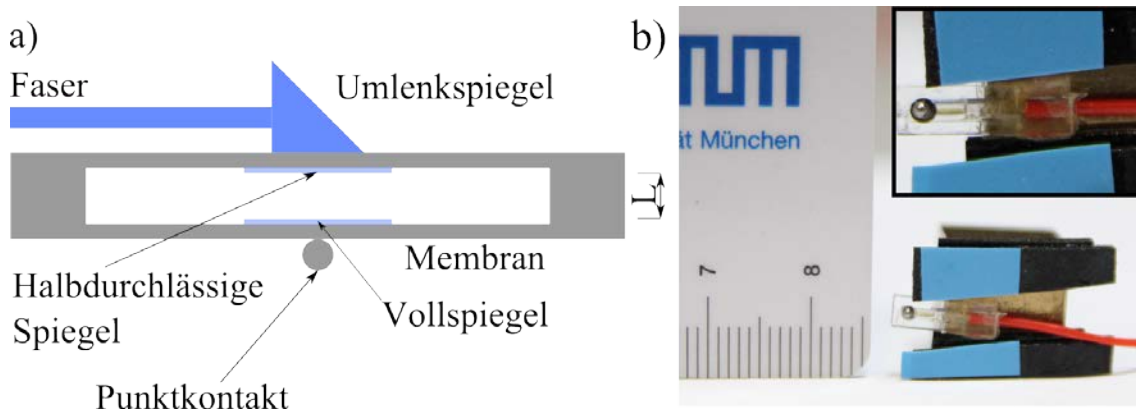


Abb. 2. a) Schematischer Aufbau des Fabry-Pérot Interferometers. b) FP-Sensor mit Maßstab (cm Skala) und Detailaufnahme Koppellement und Sensor. Die Blauen Elemente dienen als Montagehilfe.

$$N \cdot \lambda = 2nL \cdot \cos \Phi \quad (1)$$

Um die Frequenzverschiebung des Lichts in ein elektrisches Signal zu wandeln gibt es unterschiedliche Demodulationstechniken [10] mit spezifischen Vor- und Nachteilen. Im hier verwendeten Aufbau wird die lineare Demodulation angewandt. Diese erlaubt eine hochfrequente Abtastung des Signals und eignete sich daher sehr gut zur Aufzeichnung von

akustischen Wellen und Ultraschall. Zudem ist sie vergleichsweise einfach und günstig zu implementieren.

Für lineare Demodulation erzeugt eine schmalbandige Lichtquelle ein Lichtspektrum. Dieses gelangt durch eine optische Faser in den FP-Sensor, welcher als optischer Filter fungiert. Das reflektierte Licht gelangt dann vom Sensor aus durch die identische optische Faser in eine Auswerteelektronik bzw. -elektronik. Dort wird das modulierte Lichtsignal an einem Kantenfilter gefiltert bzw. moduliert. Das daraus resultierende Intensitätsverhältnis an einer Filter- und Referenzphotodiode ist im Idealfall direkt proportional zur Resonatorlänge L .

Für die optimale Verwendung des Sensors, muss der Arbeitspunkt des Sensors so eingestellt werden, dass dieser zum optischen Kantenfilter des Messgerätes passt. Dies kann durch die Veränderung des Anpressdrucks des Sensors beeinflusst werden. Tabelle 1 gibt einen Überblick über verwendeten Sensoren und zugehörige Spezifikationen.

Tabelle 1. Verwendete Sensoren und Spezifikationen

Sensoren	Nomineller Frequenzbereich	Ankopplung	Kopffläche [in mm]	Resonanzfrequenz
PZT	-	Med. Ultraschallgel	20 mm	500 kHz
FP	0-120 kHz	Wachs	Punktförmig	250 kHz
LDV	0-250 kHz	Reflektorfolie	40µm	-

2. Auswertung

Die Bestimmung des Signalrauschverhältnisses erfolgt im Zeitbereich. Die Rausch- und Signalleistung wird gemäß Gleichung 1 und 2 aus den aufgezeichneten Signalen berechnet. Für die Rauschleistung wird der Pretriggerbereich ausgewertet und die Signalleistung wird über den Posttriggerbereich berechnet. Aus dem Verhältnis der beiden Werte wird das Signalrauschverhältnis berechnet.

$$\text{Signalleistung} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (2)$$

$$\text{SNR} = \frac{\text{Signalleistung}}{\text{Rauschleistung}} \quad (3)$$

In Abbildung 3 sind die Amplitude als Funktion von Laufzeit und Frequenz angegeben. Die Amplituden der Einzelspuren sind jeweils normiert und mit einer Amplitudenkorrektur angepasst, um die Spreizung der Farbskala zu reduzieren [14]. Die Frequenzbeschränkung des FP-Sensors zeigt sich in dem unscharfen Ersteinsatz und der abgeschwächten Mehrfachreflexionen.

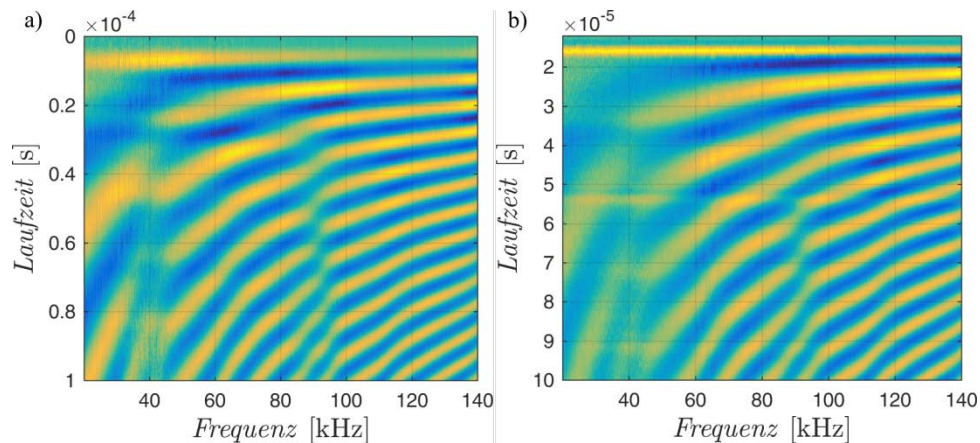


Abb. 3. a) zeigt das Wellenfeld, aufgenommen mit dem FP-Sensor. b) Wellenfeld, aufgenommen mit dem LDV, Mehrfachreflexionen und Ersteinsatz sind erkennbar.

3. Ergebnisse

Die Entwicklung des SNR Frequenzbereichs ist in Abbildung 4 dargestellt. Der Verlauf des SNR über der Frequenz zeigt ausgeprägte Minima bei 40 und 90 kHz. Die entsprechenden Bereiche in Abbildung 3a und 3b zeigen ebenfalls reduzierte Amplituden.

Der FP Sensor zeigt im Bereich von 20 bis 30 kHz eine ein im Vergleich erhöhtes Signal-Rausch Verhältnis. Offenbar zeigt der FP-Sensor in diesem Frequenzbereich eine Resonanz. Oberhalb von 30 kHz bis etwa 130 kHz zeigen die betrachteten Sensoren eine ausgeprägte Übereinstimmung im Signalrauschverhältnis.

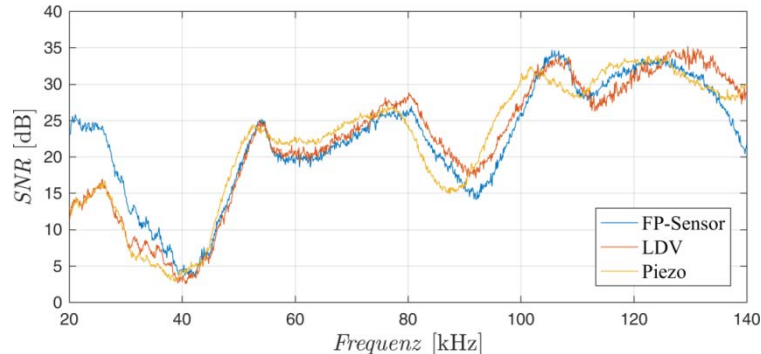


Abb. 4. Veränderung des SNR innerhalb des untersuchten Frequenzbereichs.

Zusammenfassung

Schallemissionssensoren, basierend auf einem Fabry Pérot Interferometer stellen aufgrund verschiedener Aspekte eine vielversprechende Alternative zu klassischen Piezobasierten Sensoren dar.

(1). Die Baugröße des Sensors ist im Wesentlichen bestimmt durch die Abmessungen der Membran sodass geringe Abmessungen erreicht werden können. Die Resonanzfrequenz kann durch die Stärke der Membran eingestellt werden. Die Koppelfläche kann wie in dem vorgestellten Sensor als Punkt angenähert werden. Damit kann eine hohe Ortsauflösung bei der Signalaufzeichnung erreicht werden.

(2). Durch den Verzicht auf elektrisch leitende Bauteile besteht eine geringe Empfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen. Weiterhin können die

Sensoren ohne Einschränkungen in rauen Umgebungsbedingungen eingesetzt werden und sind vielversprechend in für eventuelle Anwendungen in explosionsgefährdeten Bereichen. Die Signalübertragung über Glasfaser erlaubt große Abstände zwischen Datenerfassungssystem und Sensor.

(3). Die durchgeführten Messungen zeigen einen übereinstimmenden Frequenzgang zwischen LDV und FP-Sensor im Bereich von 40 bis 130 kHz. Abweichungen bestehen vor allem im niedrigen Frequenzbereich von 20 bis 40 kHz. Eine Erklärung für diese Abweichung konnte bisher nicht gefunden werden. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass dieser Sensor im betrachteten Frequenzbereich eine mit dem Piezosensor vergleichbare Empfindlichkeit zeigt.

4. Ausblick

In der Zukunft soll der Anpressdruck so eingestellt werden, dass sich der Arbeitspunkt des Sensors dauerhaft im optimalen Messbereich des Faseroptischen Verstärkers befindet um eine langwierige manuelle Bestimmung zu vermeiden. Diese könnte beispielsweise mit einem Federmechanismus realisiert werden. Zusätzliche Verbesserungen könnten durch eine automatische Regelung der Lichtleistung ermöglicht werden.

Referenzen

- [1] M. Ohtsu, "Sensor and Instrument," in *Acoustic Emission Testing*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 19–40.
- [2] P. Wei *et al.*, "Novel Fiber-Optic Ring Acoustic Emission Sensor," *Sensors*, vol. 18, no. 2, p. 215, Jan. 2018.
- [3] H. Asaue, T. Shiotani, T. Nishida, K. C. Chang, and H. Nakayama, "Innovative AE Measurement by Optical Fiber Sensing for FRP," Springer, Cham, 2017, pp. 219–227.
- [4] J. G. V. Teixeira, I. T. Leite, S. Silva, and O. Frazão, "Advanced fiber-optic acoustic sensors," *Photonic Sensors*, vol. 4, no. 3, pp. 198–208, Sep. 2014.
- [5] B. Yu, D. W. Kim, J. Deng, H. Xiao, and A. Wang, "Fiber Fabry-Perot sensors for detection of partial discharges in power transformers," *Appl. Opt.*, vol. 42, no. 16, p. 3241, Jun. 2003.
- [6] O. Kilic, M. Digonnet, G. Kino, and O. Solgaard, "External fibre Fabry–Perot acoustic sensor based on a photonic-crystal mirror," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 10, pp. 3049–3054, Oct. 2007.
- [7] H. Li *et al.*, "Low-Cost, High-Performance Fiber Optic Fabry–Perot Sensor for Ultrasonic Wave Detection," *Sensors*, vol. 19, no. 2, p. 406, Jan. 2019.
- [8] M. Islam *et al.*, "Chronology of Fabry-Perot Interferometer Fiber-Optic Sensors and Their Applications: A Review," *Sensors*, vol. 14, no. 4, pp. 7451–7488, Apr. 2014.
- [9] H. Liao *et al.*, "Phase Demodulation of Short-Cavity Fabry–Perot Interferometric Acoustic Sensors With Two Wavelengths," *IEEE Photonics J.*, vol. 9, no. 2, pp. 1–9, Apr. 2017.
- [10] J. Jia, Y. Jiang, L. Zhang, H. Gao, S. Wang, and L. Jiang, "Dual-Wavelength DC Compensation Technique for the Demodulation of EFPI Fiber Sensors," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 30, no. 15, pp. 1380–1383, Aug. 2018.
- [11] Z. Yu and A. Wang, "Fast White Light Interferometry Demodulation Algorithm for Low-Finesse Fabry–Pérot Sensors," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 27, no. 8, pp. 817–820, Apr. 2015.
- [12] X. Mao, P. Zheng, S. Yuan, and X. Wang, "Stabilized Fiber-Optic Fabry–Perot Acoustic Sensor Based on Improved Wavelength Tuning Technique," *J. Light. Technol. Vol. 35, Issue 11, pp. 2311-2314*, vol. 35, no. 11, pp. 2311–2314, Jun. 2017.
- [13] S. Kienitz, "Kennlinienoptimierung eines Fabry-Pérot Drucksensors," 2017.
- [14] G. F. Margrave and M. P. Lamoureux, *Numerical Methods of Exploration Seismology: With Algorithms in MATLAB®*. Cambridge University Press, 2019.