

Evaluierung der Kombination von Schallemissionsanalyse und Prüfung mit geführten Wellen in einem gemeinsamen Sensornetzwerk

Florian F. LINSCHIED¹, Sebastian SCHWÄGERL¹, Markus G. R. SAUSE¹
¹ Universität Augsburg, Institut für Materials Resource Management, Mechanical
Engineering, D-86135 Augsburg

Kontakt E-Mail: florian.linscheid@mrm.uni-augsburg.de

Kurzfassung. Im Rahmen des Themas Industrie 4.0 wächst die Bedeutung der automatisierten Zustandsüberwachung von Industrieanlagen. Der Einsatz von geführten Wellen bietet dafür bereits grundlegende Möglichkeiten, Schäden in Strukturbauteilen a posteriori nachzuweisen und zu quantifizieren. Die Schallemissionsanalyse erlaubt hingegen die Detektion von Mikrorissen während ihrer Entstehung. Die beiden Methoden haben unterschiedliche Anwendungsfälle und können sich gegenseitig ergänzen. Während durch Schallemission akustische Ereignisse live detektiert und geortet werden können, womit sich ein Maß für den Umfang der neu entstandenen Schädigung ergibt, können mittels geführter Wellen im Nachgang der Schädigung die Schädigungsart und die geometrische Ausdehnung der Defekte ermittelt werden. Bisher sind für die beiden Methoden jeweils spezialisierte Sensoren und Software notwendig. Dies erhöht die Kosten bei der Kombination beider Methoden sowie die Hürde, beide Messmethoden in bestehende Anlagen zu integrieren. Daher wird evaluiert, ob sich die Schallemissionsanalyse zusammen mit einer Zustandsüberwachung mit geführten Wellen in einem gemeinsamen Sensornetzwerk vereinen lässt. Hierbei ist insbesondere von Bedeutung, in welchem Grad Einbußen hinsichtlich der Frequenzbandbreite und der Empfindlichkeit der Sensorik für die jeweiligen Methoden hingenommen werden müssen. Die Kombination beider Methoden bietet den Vorteil, dass registrierte Schallemissionsevents direkt nach ihrer Entstehung mittels geführten Wellen weiter untersucht und genauere Aussagen über die Art der Schädigung getroffen werden können. Als potentielle Sensoren werden dünnwandige, piezoelektrische Scheiben hinsichtlich ihrer Eignung evaluiert. Die Tests erfolgten in einem ersten Schritt durch die Frequenzanalyse von Bleistiftminenbrüchen auf einer Aluminiumplatte. Die Ergebnisse zeigen, dass auch mit den kostengünstigen Sensoren eine vergleichsweise gute Aufnahme des Spektrums möglich ist.

1 Einführung

Durch den zunehmenden Einsatz von Faserverbundwerkstoffen als lasttragende Strukturen gewinnt die permanente Überwachung dieser Strukturen mehr und mehr an Bedeutung, um die Funktionssicherheit der Bauteile mittels zerstörungsfreier Prüfmethode gewährleisten zu können. Dies wird gerade in Industrieanlagen wichtig, in denen bestimmte Komponenten zur Gewichtsreduktion durch Bauteile aus Faserverbundwerkstoffen ersetzt werden. Ein



konkretes Anwendungsbeispiel stellt hierbei das Projekt „MAI CC4 fastMOVE“ dar, in dem im Rahmen des Campus Carbon 4.0 eine 5-Achsen-Hochgeschwindigkeitsfräse mit Achsen aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) entwickelt werden soll [1]. Durch den Einsatz von CFK wird bewegte Masse eingespart, was die Beschleunigung und Maximalgeschwindigkeit der Achsen erhöht. Um den sicheren Betrieb der Fräse zu jedem Zeitpunkt zu gewährleisten und Schäden im CFK frühzeitig zu registrieren, sollen die Achsen mit verschiedenen Zustandsüberwachungssystemen ausgestattet werden. Dazu zählen im Einzelnen die Modalanalyse, die Körperschallanalyse, die Schallemissionsanalyse und die Prüfung mit geführten Wellen. Zur Einsparung von Kosten sollen möglichst alle vier Methoden in einem Messsystem zusammengeführt werden und nur ein Sensorsystem verwenden. Im Folgenden soll die Zusammenführung von Schallemissionsanalyse und die Prüfung mit geführten Wellen auf ihre Vor- und Nachteile hin untersucht werden.

2 Aspekte für den Aufbau einer Sensornetzwerks

2.1 Einsatzgebiete von Zustandsüberwachung mit geführten Wellen und der Schallemissionsanalyse

Sowohl die Schallemissionsanalyse als auch die Prüfung mit geführten Wellen sind bewährte Konzepte zur Bewertung von Schäden in platten- oder schalenförmigen Bauteilen aus Metall oder Faserverbundwerkstoffen. Durch die Aufnahme von Schallsignalen mit mehreren Sensoren ist eine Bewertung von Indikationen möglich, was eine Aussage über den Zustand des Bauteils ermöglicht.

Die Schallemissionsanalyse beruht auf der Detektion von Mikrorissen, die während der Beanspruchung des Bauteils entstehen. Es handelt sich daher um ein passives Verfahren, das nur dynamische Schädigungsvorgänge detektieren kann. Durch Aufnahme ein- und desselben Signals mit mehreren Sensoren auf verteilten Positionen auf dem Bauteil ist eine Ortung des Schadensereignisses möglich, sowie eine Bewertung der Signifikanz der Schädigung. Da die Amplitude des ausgesendeten Signals nicht beeinflusst werden kann, ist eine hohe Sensornetzwerkdichte notwendig, um die Signale aufzunehmen, bevor sie aufgrund der Dämpfung im Rauschen untergehen.

Die typische Bandbreite eines Schallemissionssignals liegt im Bereich von 20 kHz bis 1000 kHz. Dadurch sind hohe Abtastraten von bis zu 40 MS/s notwendig.

Eine Prüfung mit geführten Wellen hingegen ist ein aktives Verfahren, sodass hier keine kontinuierliche Aufzeichnung des Schallsignals erfolgen muss. Wird eine Prüfung durchgeführt, senden alle Sensoren im Sensornetzwerk wechselseitig Signale aus, die von den jeweils anderen empfangen werden. Häufig finden dann Vergleiche mit Baselinemessungen im Referenzzustand statt. Eine Korrelationsanalyse erlaubt dann Rückschlüsse auf Defekte im Bauteil, die den Ausbreitungsweg der Schallwellen beeinflussen.

Das Frequenzband der ausgesendeten Signale wird im Vergleich zu dem der Schallemissionssignale eher schmalbandig gewählt und liegt vorwiegend im Bereich bis etwa 200 kHz, sodass eine niedrigere Abtastrate gewählt werden kann. Durch die Verwendung von Bandpassfiltern ist zudem eine Dämpfung des Hintergrundrauschens gegenüber dem Nutzsignal möglich.

2.2 Vorteile der Kombination beider Methoden

Aus diesem Vergleich wird ersichtlich, dass der Fokus der Methoden auf verschiedenen Aspekten der Schadenserkenung liegt. Während die Schallemissionsanalyse live die Anzahl der Signale erfasst und somit ein Maß für die akustische Aktivität des Bauteils liefert, kann

die Prüfung mit geführten Wellen zum einem selbst gewählten Zeitpunkt beliebige Bereiche des Bauteils auf tatsächliche Schäden und Risse hin überprüfen. Die Kombination beider Methoden erhöht somit die Aussagekraft über den Bauteilzustand.

Bisherige Untersuchungen zeigten in Versuchen an Zugproben, dass bei fortschreitender Schädigung die Schallgeschwindigkeit im Material abnimmt, was sich auf die Ortungsgenauigkeit auswirkt, die an den gemessenen Schallemissionssignalen durchgeführt wurde [2]. Dazu diente die Verwendung von geführten Wellen als reproduzierbare Technik zur Messung der Schallgeschwindigkeit.

Die Verwendung von jeweils spezialisierter Hardware erfordert jedoch den Aufbau von zwei getrennten Sensornetzwerken und entsprechenden Transientenrekordern. Oftmals rechtfertigt die gleichzeitige Verwendung beider Methoden daher nicht den Aufwand der Hardwarebeschaffung für beide Systeme. Die Zusammenschließung der Sensoren an einen einzigen Transientenrekorder und einen Signalgenerator mit Multiplexer, der jeden Sensorkanal einzeln ansteuern kann, bietet eine Möglichkeit zur Kombination beider Verfahren, deren Konzept hier vorgestellt werden soll.

Die Idee ist hierbei, für jeden Kanal kontinuierlich den Datenstream aufzunehmen. Softwareseitig muss entschieden werden, ob es sich bei einem ankommenden Signal um ein Schallemissionssignal oder eine geführte Welle handelt. Mit entsprechender Frequenzfilterung könnte auch eine Überlagerung von Schallemissionssignal und geführter Welle getrennt werden, solange die geführte Welle vergleichsweise schmalbandig ist. Aus den identifizierten Signalteilen wird eine entsprechende Merkmalsextraktion zur Datenreduktion durchgeführt. Diese Auswertung geschieht in Echtzeit, sodass der Datenstream nicht gespeichert werden muss, sondern nur die relevanten Teile des Datenstreams weiterverarbeitet werden können.

Bei aktiver Anregung eines Sensors durch den Signalgenerator ist zu beachten, dass dieses Signal auch vom Transientenrekorder aufgezeichnet wird, weshalb dieser kurzzeitig übersteuert und keinen korrekten Datenstream mehr aufnehmen kann. Da in der Schallemissionsanalyse jedoch auch Totzeiten von 0,3 ms – 1,0 ms üblich sind [3], die dem Abklingen von Echos der Schallemissionssignale geschuldet sind, bleibt der Einfluss der aktiven Anregung auf einen potentiellen Signalverlust eher gering, d.h. er liegt in der gleichen Größenordnung wie nach der Aufzeichnung eines einzigen Schallemissionssignals.

2.3 Nachteile durch eine Kombination von Schallemissionsanalyse und Prüfung mit geführten Wellen in einem gemeinsamen Sensornetzwerk

Die Aufnahme von Signalen mit unterschiedlichen Frequenzspektren hat einen Kompromiss in der Datenqualität zur Folge, wenn Sensoren mit einem nichtlinearen Ansprechverhalten verwendet werden. Sowohl die Schallemissionssignale als auch die geführten Wellen werden somit in gewissen Frequenzbereichen in ihrer Bandbreite beschränkt. Die Verwendung von preisgünstigen, dünnwandigen Piezosensoren für die aktive Anregung von Ultraschallwellen ist jedoch bereits sehr gebräuchlich, sodass im Rahmen dieser Untersuchung der Fokus darauf liegt, inwiefern die Sensoren auch für die Aufzeichnung von Schallemission geeignet sind.

Verglichen mit der Verwendung von einem Einzelsystem, das nur eine der vorgestellten Methoden auswertet, ist außerdem mit potentiell höheren Kosten zu rechnen, wenn ein System verwendet werden soll, das für beide Methoden ausgelegt ist.

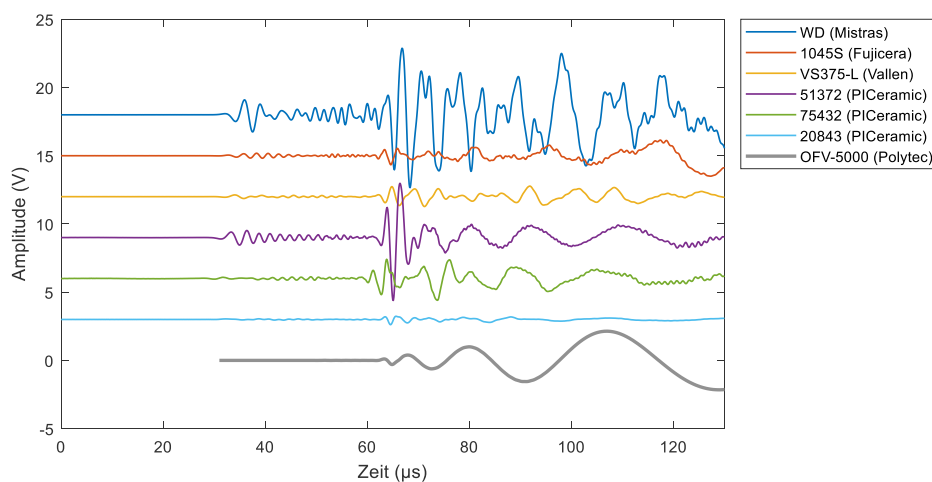
3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Messungen der Frequenzbandbreite verschiedener Ultraschallsensoren mittels Bleistiftminenbruchtests

Im Bereich der Schallemissionsanalyse dient die Verwendung einer Hsu-Nielsen-Quelle der experimentell einfach durchzuführenden Erzeugung von Schallsignalen [4]. In der Vergangenheit eignete sie sich auch bereits gut für den quantitativen Vergleich der Empfindlichkeit verschiedener Sensortypen [2]. Die Bleistiftminenbrüche wurden entsprechend der ASTM E 976 mit Minen der Härte 2H und einem Durchmesser von 0,5 mm durchgeführt.

Um die Leistungsfähigkeit verschiedener dünnwandiger Piezosensoren zu untersuchen, wurde das Frequenzspektrum einer aufgenommenen Bleistiftminenquelle gemessen und mit kommerziell verfügbaren Schallemissionssensoren verglichen. Zur Verfügung standen kommerzielle Sensoren von Mistras (Wideband-Differential (WD) AE Sensor), Fujicera (1045S) und Vallen (VS375-L, eine Tieftemperaturversion des VS375) sowie neun verschiedene dünnwandige Piezoscheiben von PICeramic mit nominellen Resonanzfrequenzen von 40 kHz – 400 kHz.

Das gewählte Setup war hierbei eine Aluminiumplatte mit einer Abmessung von 1500 mm × 1000 mm × 3 mm. Der jeweilige Sensor wurde in der Mitte der Platte positioniert. Die Bleistiftminenbrüche wurden in einem Abstand von 250 mm vom Sensor ausgelöst. Pro Sensor wurden 20 Messungen durchgeführt. Die Abtastrate betrug hierbei 10 MS/s mit einer Aufnahmezeit von 1,6 ms. Die Signale wurden hardwareseitig mit einem Butterworth-Bandpassfilter 6. Ordnung auf den Bereich von 20 kHz - 3 MHz gefiltert. Aus jeder Welle wurde jeweils per Fourier-Transformation ihr Frequenzspektrum ermittelt. Das gemittelte Spektrum wurde zusätzlich mit einem gleitenden Mittelwert 10. Ordnung geglättet. Die ersten 130 μ s der Signale sowie die erhaltenen Spektren sind in Abbildung 1 dargestellt. Dabei werden die drei kommerziellen Sensoren und drei Piezoscheiben dargestellt, deren Frequenzspektrum am besten die Anforderungen erfüllt.



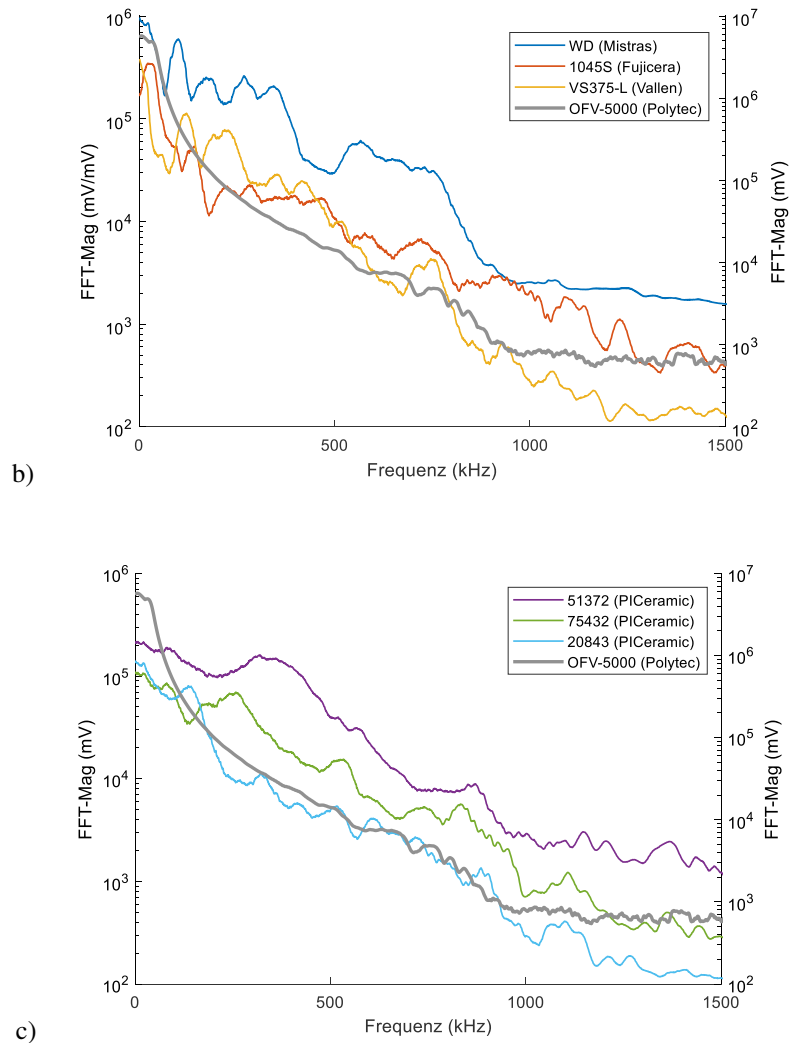


Abbildung 1. Vergleich von detektierten Bleistiftminenbrüchen im Zeit- (a) und Frequenzbereich (b, c). Die Frequenzspektren wurden aus 20 Messungen gemittelt und danach geglättet. Die Referenzmessung des Laservibrometers OFV-5000 ist auf der rechten y-Achse dargestellt.

Als Referenz dient eine Messung eines 1D-Laservibrometers der Firma Polytec, Modell OFV-5000 mit einem DX-900 Breitband-Wegdecoder. Die Messung erfolgte auf derselben Aluminiumplatte mit demselben Transientenrekorder. Der Abstand zwischen Quelle und Sensor betrug bei dieser Messung nur 100 mm im Vergleich zu den 250 mm für alle anderen Messungen. Grund hierfür ist, dass die Empfindlichkeit des Laservibrometers weit unterhalb der eines Piezosensors liegt und somit bei großen Quelle-Sensor-Abständen ein schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis entsteht. Da sich das Frequenzspektrum mit größerem Abstand von Quelle zu Sensor ändert, sind die Spektren nicht vollständig vergleichbar, dienen aber als gute Orientierung. Es wurden 20 Messungen durchgeführt, deren Zeitsignal gemittelt und geglättet wurde. Ohne Glättung würde das schlechte Signal-Rausch-Verhältnis zu einer Verzerrung des Spektrums im Vergleich zu den anderen Sensoren führen. Da das Signal des Laservibrometers das Wegsignal darstellt, wohingegen die restlichen Messungen Spannungssignale liefern, ist ein Amplitudenvergleich der Signale in dieser Darstellung nicht sinnvoll. Weitere Erläuterungen finden sich in [5].

Der Vergleich der Zeitsignale in Abbildung 1a) zeigt zunächst den hohen Anteil an niederfrequenten Schwingungen im Laservibrometersignal im Vergleich zu den Signalen, die mit den Piezokeramiken aufgezeichnet wurden.

Die Ankunft der schnelleren S_0 -Mode ist nur im Sensor 20843 von PICeramic kaum vom Rauschen zu unterscheiden. Sonst kann der Einsatzzeitpunkt leicht bestimmt werden.

Der Einsatzzeitpunkt der A_0 -Mode wird ebenso in allen Signalen deutlich, der zeitliche Verlauf der Signale weicht jedoch schnell voneinander ab.

Ab ca. $65 \mu\text{s}$ steigt die Amplitude der Sensoren WD und 51372 stark an und bleibt im Falle des WD-Sensors für knapp $100 \mu\text{s}$ auf diesem Niveau. Die Sensoren 75432 und VS375-L zeigen hier ein deutlich schlechteres Ansprechverhalten.

Abbildung 1 b) und c) vergleichen die Frequenzspektren der genannten Sensoren. Das Vibrometer dient erneut als Referenz und ist auf der rechten y-Achse aufgetragen. Der Verlauf des Spektrums liegt nahe an der theoretischen Vorhersage für die Ausbreitung von geführten Wellen durch einen Bleistiftminenbruch und kann daher als der ideale Verlauf angesehen werden. Die Amplitude des Frequenzspektrums erstreckt sich im Bereich von 0 kHz bis 1500 kHz über etwa 3 Größenordnungen, wobei die Amplitude schon bei 200 kHz um 2 Größenordnungen verringert ist, da sie ein hohes Maximum bei etwa 20 kHz aufweist.

Der WD-Sensor hat von allen Piezosensoren die höchste Empfindlichkeit, was sich im Frequenzraum fast über die gesamte spektrale Breite zeigt. Seine Resonanzen um 300 kHz und 600 kHz sind in dem Spektrum deutlich zu erkennen. Im Bereich unter 100 kHz liegt er jedoch deutlich unterhalb des idealen Spektrums. Ab 1000 kHz geht er in ein annähernd lineares Antwortverhalten über.

Der Fujicera 1045S liegt um durchschnittlich eine Größenordnung unter dem WD-Sensor. Ab 500 kHz nähert er sich dem idealen Verlauf an, zeigt darunter jedoch eine deutlich verringerte Empfindlichkeit. Der VS375 von Vallen bewegt sich hier in einem ähnlichen Bereich.

Bemerkenswert ist, dass sich die Piezoplättchen 51372 und 75432 in weiten Bereichen zwischen dem WD-Sensor und dem Fujicera bewegen und somit in ihrer Empfindlichkeit mit den kommerziellen Schallemissionssensoren konkurrieren können. Die vom Hersteller angegebene Resonanzfrequenz von 335 kHz für den 51372 ist in dem Spektrum zwar gut erkennbar, der Abfall zu den Seiten hin fällt jedoch vergleichsweise gering aus, sodass auch bis zu Frequenzen von 500 kHz noch eine gute Empfindlichkeit erreicht werden kann. Frequenzen unterhalb von 200 kHz werden, insbesondere beim Vergleich mit dem Idealspektrum, nur noch eingeschränkt erfasst. Über 500 kHz spricht zwar der WD-Sensor deutlich besser an als der 51372, der VS375 und 1045S bleiben mit ihrer Empfindlichkeit jedoch weiterhin darunter. Der 75432 hat eine Resonanzfrequenz von 200 kHz, die im Spektrum auch deutlich zutage tritt. Bei 400 kHz ist die Empfindlichkeit um eine Größenordnung abgefallen. Ab dort hält sie sich jedoch relativ konstant und folgt ungefähr dem Verlauf des Sensors von Fujicera.

Zur Bewertung von Resonanzüberhöhungen sind in Abbildung 2 dieselben Spektren dargestellt, nachdem sie auf die Amplitude des Laservibrometers normiert wurden. Ein zum tatsächlichen Spektrum proportionaler Verlauf würde hier als waagerechte Linie dargestellt. Ein Vergleich der Empfindlichkeiten kann wieder nur zwischen den Piezosensoren, jedoch nicht relativ zum Laservibrometer gezogen werden. Beim WD-Sensor treten erneut deutlich die Resonanzen bei 300 kHz und 600 kHz zutage, dafür ist jedoch um 400 kHz – 500 kHz ein recht großer Einbruch um 10 dB erkennbar. Der 51372 hat insbesondere um 700 kHz - 800 kHz Einbußen in der Empfindlichkeit. Hierdurch wird eine große Diskrepanz zwischen WD-Sensor und dem 51372 sichtbar. Durch die Resonanzerhöhung des Ersteren und die Resonanzdämpfung des Letzteren nehmen die Sensoren den Frequenzbereich von 600 kHz - 800 kHz eines Bleistiftminenbruchs sehr unterschiedlich auf. Ab 800 kHz liegen dann beide auf einem sehr ähnlichen Niveau.

Die Sensoren 1045S und 75432 zeigen kaum einen konstanten Verlauf und bilden daher das Idealspektrum eher schlecht ab. Bei 900 kHz kommt es zu einer recht starken Überhöhung, danach fällt die Empfindlichkeit wieder ab. Die Magnitude ist über weite Bereiche um 10-15 dB gegenüber dem WD-Sensor verringert.

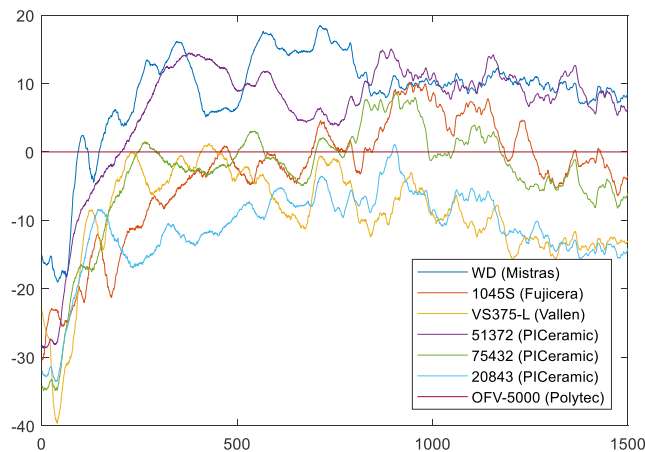


Abbildung 2. Diagramm der Frequenzspektren, die jeweils auf das Spektrum des Laservibrometers normiert wurden, um Resonanz erhöhungen und –erniedrigungen gegenüber dem Idealspektrum zu verdeutlichen

Die Sensoren VS375 und 20843 sind um weitere 5-10 dB verringert, weisen aber einen etwas konstanteren Verlauf auf und zeigen somit ein unverzerrteres Spektrum. Durch ihre geringe Empfindlichkeit sind sie jedoch dennoch den vorher genannten Sensoren unterlegen.

4 Diskussion und Zusammenfassung

Der Vergleich der Frequenzspektren zeigt, dass im Rahmen der getesteten Sensoren der WD-Sensor für die Aufnahme von Schallemissionssignalen den besten Kompromiss aus Empfindlichkeit und Bandbreite liefert. Allerdings wurden in dieser Studie keine speziellen breitbandigen Sensoren (z.B. konische Sensoren [6]) zum Vergleich herangezogen. Wie in [7] gezeigt können diese bei hoher Frequenztreue eine äußerst hohe Empfindlichkeit erreichen. Für diese Messreihe diente jedoch das Laservibrometer als Referenzgröße. Dennoch können einige dünnwandige Piezoplättchen beinahe dieselbe Empfindlichkeit wie der WD-Sensor erreichen. Insbesondere liegen sie in einem weiten Frequenzbereich oberhalb der Empfindlichkeit der Sensoren 1045S und VS375-L. Trotz der guten Empfindlichkeiten sind Verzerrungen im Frequenzspektrum zu erwarten. Eine Anregung der Piezoplättchen mit aktiven Signalen ist gut möglich, zumal hier der Frequenzbereich der Anregung an die Resonanzfrequenz des Plättchens angepasst werden kann.

Dies lässt aufgrund dieser Ergebnisse darauf schließen, dass eine Verwendung der Piezoplättchen erfolgversprechend ist, um ein Sensornetzwerk aufzubauen, mit dem sowohl Schallemissionssignale aufgenommen werden können als auch Prüfungen mit geführten Wellen möglich sind.

5 Referenzen

- [1] „Carbon Composites,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.carbon-composites.eu/de/projekte/mai-carbon-fe-projekte/produktionssysteme/mai-cc4-fastmove/>. [Zugriff am 22 01 2019].

- [2] M. G. R. Sause, *In Situ Monitoring of Fiber-Reinforced Composites*, Springer International Publishing, 2016.
- [3] MISTRAS Group Inc., „AEwin Software User's Manual,“ Princeton Junction, NJ, USA, 2010.
- [4] N. N. Hsu, „Acoustic emissions simulator“. Patent US4018084A, 1976.
- [5] M. G. R. Sause und M. A. Hamstad, „Numerical modeling of existing acoustic emission sensor absolute calibration approaches,“ *Sensors and Actuators A*, pp. 294-307, 2017.
- [6] T. M. Proctor, „An improved piezoelectric acoustic emission transducer,“ *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1982.
- [7] M. G. Sause, M. A. Hamstad und S. Horn, „Finite element modeling of conical acoustic emission sensors and corresponding experiments,“ *Sensors and Actuators A: Physical*, pp. 64-71, 09 2012.
- [8] M. G. R. Sause und M. A. Hamstad, „Acoustic Emission Analysis,“ in *Comprehensive Composite Materials II*, Oxford, Academic Press, 2017, pp. 291-326.
- [9] T. Yan, P. Theobald und B. E. Jones, „A conical piezoelectric transducer with integral sensor as a self-calibrating acoustic emission energy source,“ *Ultrasonics*, pp. 431-438, 2004.