

# Evaluierung eines Überwachungsszenarios durch Kombination von akustischen Zustandsüberwachungsmethoden in einem gemeinsamen Sensornetzwerk

Florian F. LINSCHIED<sup>1</sup>, Tobias PETER<sup>1</sup>, Christian HOLZMANN<sup>1</sup>,  
Markus G. R. SAUSE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universität Augsburg, Institut für Materials Resource Management, Mechanical Engineering, D-86135 Augsburg

Kontakt E-Mail: [florian.linscheid@mrm.uni-augsburg.de](mailto:florian.linscheid@mrm.uni-augsburg.de)

**Kurzfassung.** Im Rahmen des Themas Industrie 4.0 wächst die Bedeutung der automatisierten Zustandsüberwachung von Industrieanlagen. Globale Überwachungsmethoden wie schwingungsbasierte Methoden liefern eine Aussage über die Grundsteifigkeit der Anlage und können eine globale Aussage über die Funktionstauglichkeit treffen. Akustische Methoden wie die Körperschallanalyse und der Einsatz von geführten Wellen können Veränderungen in den Betriebsgeräuschen der Anlage sowie Defekte in der Struktur nachweisen. Mittels Schallemission ist es möglich, akustische Ereignisse live zu detektieren und zu orten, womit sich ein Maß für den Umfang der neu entstandenen Schädigung ergibt. Die Methoden tragen mit verschiedenen Aspekten zur Strukturüberwachung bei und können sich daher gegenseitig ergänzen. Für alle Methoden sind bislang jedoch spezialisierte Sensoren und Software nötig. Dies erhöht die Kosten bei der Kombination sowie die Hürde, verschiedene Messmethoden in bestehende Anlagen zu integrieren. Daher wird evaluiert, inwiefern sich die genannten Zustandsüberwachungsmethoden in einem gemeinsamen Sensornetzwerk vereinen lassen. Hierbei ist insbesondere von Bedeutung, in welchem Grad Einbußen in Bezug auf die Detektionswahrscheinlichkeiten der Sensorik für die jeweiligen Messgrößen hingenommen werden müssen. Als potentielle Sensoren werden piezoelektrische Scheiben der Firma PICeramic hinsichtlich ihrer Eignung evaluiert. Als Anwendungsbeispiel dient eine CNC-Fräse mit integrierten Leichtbaukomponenten aus carbonfaserverstärkten Kunststoffen, auf der das Konzept eines Überwachungsszenarios demonstriert werden soll.

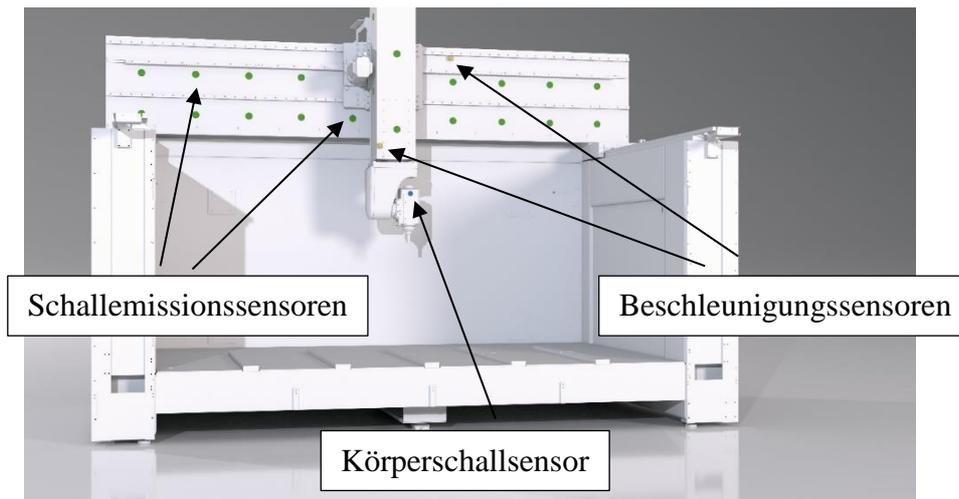
## 1 Einführung

Der Einsatz von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) in der Automobilbranche und der Luftfahrt ist mittlerweile recht weit verbreitet. Hier werden bereits lasttragende Strukturen aus CFK gefertigt und damit der Vorteil des Materials ausgenutzt. Diese Eigenschaften machen die Verwendung von CFK auch in Industrieanlagen attraktiv, insbesondere, wenn bewegte Masse eingespart werden kann. Für einen sicheren Betrieb der Anlagen wäre jedoch eine stetige Überwachung wünschenswert, da Schäden von außen oft nicht sichtbar sind. Die Betrachtung einer möglichen Zusammenführung verschiedener



Zustandsüberwachungsmethoden geschieht im Rahmen des Projektes MAI CC4 fastMOVE im Campus Carbon 4.0, in dem eine 5-achsige Hochgeschwindigkeitsfräse mit Komponenten aus CFK entwickelt wird (s. Abbildung 1). Hierbei sollen durch die Gewichtseinsparung höhere Beschleunigungen des Fräskopfes möglich werden, wodurch der Fräsprozess schneller werden soll. Zur Onlineüberwachung der Struktur werden im Projekt akustische Methoden verfolgt.

Da im folgenden Artikel die Zusammenführung dieser Zustandsüberwachungsmethoden betrachtet werden soll, erfolgt zunächst eine Übersicht über die einzelnen Methoden und ihre bisherige Anwendung in Industrieanlagen.



**Abbildung 1.** Darstellung des 5-Achs-Hochgeschwindigkeitsfräse, deren zwei beweglichen Achsen aus CFK gefertigt werden. Auf den Achsen sind die Positionen markiert, an denen Sensoren installiert werden.

## 2 Übersicht über akustische Zustandsüberwachungsmethoden

### 2.1 Modalanalyse

Die Modalanalyse basiert auf dem Prinzip, die Schwingungen und Vibrationen eines Objektes zu messen. Die charakteristische Art der Schwingungsform des Systems bei einer bestimmten Eigenfrequenz wird Schwingungsmode genannt.

Die Anfänge der Zustandsüberwachung mittels Modalanalyse lagen in der Überwachung von rotierenden Maschinen und Offshore-Plattformen, deren Messdaten häufig mit numerischen Simulationen verglichen wurden. Später weitete sich der Bereich auf Weltraumstationen und den Hoch- und Tiefbau [1] sowie Windkraftanlagen [2] aus. Sie wird jedoch auch zur Überprüfung von Serienbauteilen verwendet [3].

Carden et al. [4] geben an, dass sich die Schwingungsmessungen unter anderem durch Auswertung von Eigenresonanzen, Eigenmoden, Modenformkrümmungen und mithilfe von neuronalen Netzen durchführen lässt. Treten durch Überbeanspruchung Risse oder Defekte auf, die die Steifigkeit des Systems herabsetzen, führt dies zu einer Absenkung von Eigenresonanzen. Dabei kommt es vor allem zu Frequenzverschiebungen derjenigen Schwingungsmoden, deren Schwingungsbäuche in der Nähe der Defekte liegen und daher besonders durch die Defekte beeinflusst werden. Defekte in der Nähe der Schwingungsknoten sind daher mit der zugehörigen Eigenmode nicht detektierbar [5]. Somit ist es auch nicht zulässig, zu folgern, dass keine Defekte vorhanden sind, wenn keine Verschiebungen der Eigenresonanzen festgestellt wurden. Dieser Fehler kann jedoch

minimiert werden, wenn die Positionen der Sensoren so gewählt werden, dass sie für möglichst viele Eigenmoden in der Nähe der jeweiligen Schwingungsbäuche liegen.

Die Defekterkennung durch Analyse der Eigenmoden erfordert eine große Anzahl an Sensoren, die so angeordnet sind, dass sie die Form der Schwingungsmode abbilden können [4]. Als Auswertemethode kommt häufig das Modal Assurance Criterion (MAC) zum Einsatz [6], welches die Ähnlichkeit zweier Schwingungsformen vergleicht [4].

Eine wichtige Rolle bei der Messung von Eigenfrequenzen spielt die Art der Anregung. Insbesondere bei großen Strukturen ist eine Anregung mit Impacthammern nur schwer realisierbar, da erstens keine Schwingung des gesamten Systems erreicht werden kann und zweitens eine händische Anregung für regelmäßige Messungen im industriellen Maßstab unpraktikabel ist. Es bietet sich daher an, Schwingungen oder Vibrationen auszunutzen, die durch die Maschine selbst erzeugt werden. Dies kann die Bewegung eines Roboterarms sein oder die Vibration eines Motors.

Ein Unterschied zur Modalanalyse an industriell gefertigten Bauteilen liegt darin, dass stets dasselbe System, nämlich die Anlage selbst, gemessen wird, weshalb Variationen in den Eigenfrequenzen nur durch Änderungen des Systems oder durch Umwelteinflüsse passieren können, nicht jedoch durch Geometrieabweichungen oder Materialtoleranzen. Beim Trainieren von Frequenzverschiebungen auf Steifigkeitsänderungen müssen Umweltparameter daher berücksichtigt werden.

Als Sensoren werden meist Beschleunigungssensoren verwendet, da diese einen sehr linearen Frequenzgang haben und daher sehr unverfälscht die Auslenkungen des Systems wiedergeben.

## 2.2 Körperschallanalyse

In allen Prozessen mit umlaufenden oder rotierenden Teilen wie Kugellager, Wellen, Ventilatoren, Pumpen, Motoren etc. entsteht kontinuierlich Schall, der an die Luft und/oder in das System abgegeben wird. Das Frequenzspektrum kann hierbei sowohl im hörbaren Bereich als auch im Ultraschallbereich liegen. Da der Schall von dem System selbst erzeugt und abgegeben wird, spricht man hierbei von Körperschall. Geläufig zur Beschreibung der Auswertung ist jedoch auch der Begriff schwingungsbasierte Zustandsüberwachung, bei dem sich Überschneidungen mit der Modalanalyse finden. Die Anfänge der Körperschallanalyse betraf überwiegend die Überprüfung von defekten Kugellagern [7]. Ein reibendes Kugellager durch abgeplatzte Metallteile liefert wiederkehrende charakteristische Ausschläge im Signal. Diese wurden beispielsweise durch die Auswertung der Kurtosis des Signals [8] oder durch Merkmalsextraktion und anschließender Klassifizierung [9] detektiert.

Die Aufzeichnung des Körperschalls kann sowohl mit Beschleunigungssensoren als auch mit Verschiebungs- oder Geschwindigkeitssensoren erfolgen. Die Entscheidung hierüber erfolgt zumeist aufgrund der erwarteten Frequenzen. In niedrigeren Frequenzbereichen sind Beschleunigungssensoren aufgrund ihres linearen Ansprechverhaltens bevorzugt.

Klassische Analysemethoden der Schwingungssignale finden im Zeit-, Frequenz- oder auch Zeit-Frequenzraum statt. Im Zeitraum werden Merkmale wie der Root Mean Square (RMS), der Scheitelfaktor oder die Kurtosis berechnet. Tahir et al. [10] führten eine ausführliche Merkmalsextraktion durch, um Schäden in Kugellagern zu identifizieren. Außerdem kann das Cepstrum des Signals berechnet werden, welches harmonische Schwingungen mit vielen Obertönen betont und somit zur besseren Erkennung von Eigenresonanzen dienen kann [11]. Im Frequenzraum können Methoden wie Fourier-Transformation sowie Zeit-Frequenz-Analysen mittels Wavelet-Transformation, Wigner-Ville- [12] oder Choi-Williams-Verteilung [13] angewendet werden.

Die Einsatzmöglichkeiten der Körperschallanalyse konnten durch den vermehrten Einsatz von maschinellem Lernen und neuronalen Netzen auf Schweiß-, Spritzguss-, Bohr oder Fräsprozesse erweitert werden und zur Auswertung von Rissen und verschlissenen Werkzeugen genutzt werden [14]. Oftmals ist das plötzliche Auftreten von hohen Frequenzen ein Indikator für unerwünschte Reibgeräusche, die zum Beispiel durch einen stumpfen Bohrer oder ein defektes Kugellager entstehen können.

Sofern die Daten nicht in Echtzeit ausgewertet werden, ist eine Speicherung des gesamten Signals notwendig, da es keinen allgemeingültigen Triggermechanismus gibt, der relevante Änderungen im Körperschallsignal entdeckt, ohne vorher eine vollständige Auswertung des Signals durchzuführen.

### 2.3 Schallemissionsanalyse

Die Schallemissionsanalyse bezieht sich auf Defekte, die während des Prozesses entstehen und bei ihrer Entstehung Signale im Ultraschallbereich aussenden, welche sich durch das Bauteil ausbreiten [15], [16]. Sie dient dazu, Defekte bei ihrer Entstehung aufzuzeichnen und hinsichtlich Intensität und Anzahl auszuwerten. Außerdem ist bei Verwendung eines Sensornetzwerks eine Ortung der Schallsignale möglich [17]. Typische Merkmale für die Analyse von Schallemissionssignalen sind die Länge des Signals, die maximale Amplitude, die Anstiegszeit, die mittlere Frequenz, spektrale Leistungsdichten sowie Vorzugsfrequenzen und gewichtete Frequenzen [18]–[20]. Wie auch für die Körperschallanalyse kann die Zeit-Frequenz-Analyse für Schallemissionssignale genutzt werden [21]. Schallemissionssignale sind im allgemeinen transiente Signale, die nur bei neu entstandener Schädigung auftreten. Die verwendete Messhardware muss daher nicht den kompletten Stream aufnehmen, sondern kann durch das Schallemissionssignal getriggert werden. Dies verringert die Datenmengen gegenüber der Körperschallanalyse erheblich.

In Faserverbundwerkstoffen können sowohl Fasern reißen, als auch reine Matrixrisse auftreten, was zu Signalen mit unterschiedlichen Amplituden und Frequenzspektrern führt. Somit ist eine Klassifizierung der Schallsignale in die einzelnen Schadensmechanismen möglich [22]. Mit diesen Informationen können zuverlässige Aussagen über Art und Umfang der Schädigung getroffen werden, womit auch in den Prozess eingegriffen werden könnte, wenn die Schallemission festgelegte Grenzwerte überschreitet. In einer Umgebung, in der viele Störgeräusche mit ähnlicher Frequenzcharakteristik auftreten, kann die Schallemissionsanalyse jedoch an ihre Grenzen kommen, da transiente Signale, die von einem kontinuierlichen Rauschen überdeckt sind, schwerer getriggert werden können. Je nach Situation kann sich die Messung von Körperschall und die Messung von Schallemission daher gegenseitig ausschließen, bzw. ineinander übergehen. Hauptsächlich kommen piezokeramische Sensoren mit hohen Empfindlichkeiten zum Einsatz, da viele der Schallemissionssignale nur sehr geringe Amplituden aufweisen.

Anwendung zur Zustandsüberwachung im industriellen Maßstab fand die Schallemission zum Beispiel beim Laserschweißen in [23] oder an Windkraftanlagen in [24].

### 2.4 Prüfung mit geführten Wellen

Als aktive Messmethode kommt die Anregung von geführten Wellen zum Einsatz. Wird ein Transducer auf einer dünnwandigen Struktur angeregt, breiten sich die Wellen aufgrund der Geometrie parallel auf der Ober- und Unterseite der Struktur aus. Dabei interferieren sie miteinander und bilden Lamb- bzw. geführte Wellen aus. Diese werden geringer gedämpft als vergleichbare Rayleigh-Wellen, sodass eine größere Reichweite erzielt werden kann. Eine gute Zusammenfassung des Mechanismus liefern Prager et al. [25].

Das Prinzip für eine Prüfung mit geführten Wellen ist, dass mehrere verteilte Sensoren verwendet werden. Jeder der Sensoren wird sowohl als aktiver als auch als passiver Sensor verwendet. Pro Prüfvorgang wird jeder Sensor einmal mit einem Signalgeber angeregt, während die anderen Sensoren das ausgesendete Signal empfangen. Somit ergeben sich bei N Sensoren  $N^{N-1}$  Messungen, mit denen der Bereich zwischen den Sensoren durchschallt wird. Liegen Defekte im Material vor, verändern diese den Propagationspfad der Welle. Insbesondere kommt es zu einer Dämpfung der Amplitude sowie Änderungen im Frequenzspektrum [26]. Durch geeignete Auswertemethoden sind somit Rückschlüsse auf Ort und Größe der Defekte möglich.

Die Prüfung mit geführten Wellen wird bereits erfolgreich auf Rohren [27] und teilweise auf Flugzeugstrukturen [28] angewendet. Die Erfolge und Probleme von geführten Wellen werden von Rose [29] sehr gut zusammengefasst. Eine Auflistung der Vor- und Nachteile aller Zustandsüberwachungsmethoden ist in Tabelle 1 gegeben.

Überwachungsmethode	Vorteile	Nachteile
Modalanalyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfach zu implementieren</li> <li>• Sensibel im Niederfrequenzbereich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frequenzänderungen stark von Umweltbedingungen abhängig</li> <li>• Nicht alle Defekte bedingen zwangsläufig Frequenzverschiebung</li> <li>• Keine Mikrorisse detektierbar</li> </ul>
Körperschallanalyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überwachung von umlaufenden oder sich bewegenden Prozessen</li> <li>• Für Anomalie- als auch Rissdetektion geeignet</li> <li>• Anwendbar im Hörschall- und Ultraschallbereich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontinuierlicher Datenstream stellt hohe Anforderungen an Rechenleistung und Speicherkapazität</li> </ul>
Schallemissionsanalyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geeignet für die Detektion von Mikrorissen, Impactschäden und Reibgeräusche</li> <li>• Bei Verwendung eines Sensornetzwerks Ortung der Signalquelle möglich</li> <li>• Vorwiegend im Ultraschallbereich bis 1 MHz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nur anwendbar auf Brüche, die während der Aufnahme entstehen</li> <li>• Für zuverlässige Detektion ist eine hohe Sensordichte notwendig</li> </ul>
Geführte Wellen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geeignet für die Ortung von bereits bestehenden Defekten</li> <li>• Weniger anfällig für Hintergrundrauschen, da der aktive Signalpegel angepasst werden kann</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interpretation der Signale mitunter schwierig</li> <li>• Für zuverlässige Detektion ist eine hohe Sensordichte notwendig</li> </ul>

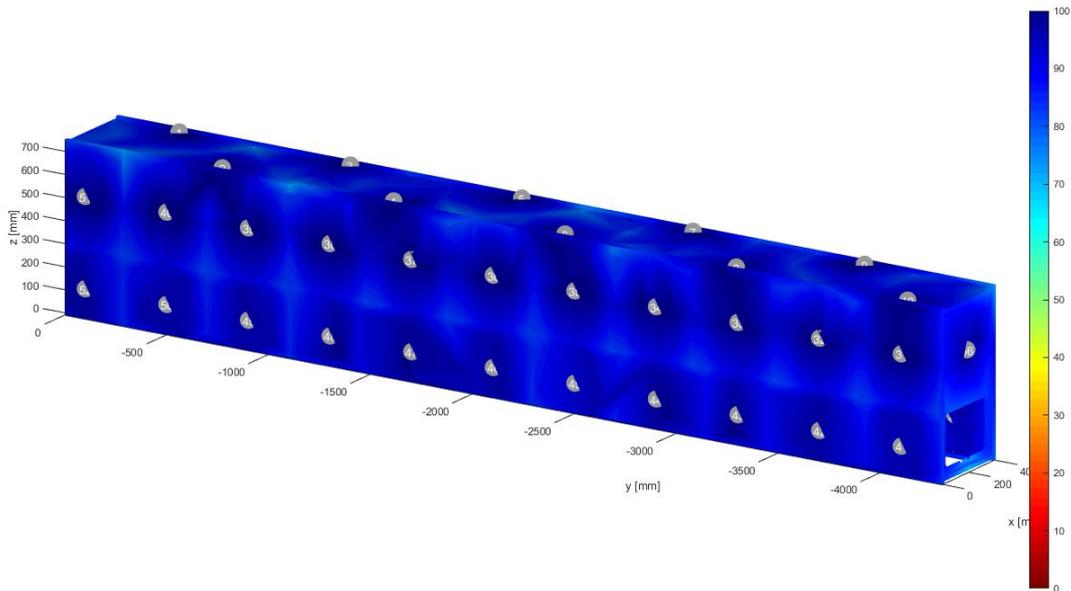
**Tabelle 1.** Auflistung der Vor- und Nachteile der hier vorgestellten Zustandsüberwachungsmethoden

## 2.5 Konzept für ein Überwachungsszenario einer CNC-Fräse

Zur Demonstration, dass eine Zustandsüberwachung im industriellen Maßstab mittels akustischen Methoden möglich ist, sollen die genannten Überwachungsmethoden auf den zwei bewegten Achsen einer CNC-Fräse implementiert werden (Sensorpositionen s. Abbildung 1). Es soll gezeigt werden, dass eine solche Umsetzung prinzipiell möglich ist und eine Überwachung zuverlässig durchgeführt werden kann.

### 2.5.1 Kombination der einzelnen Zustandsüberwachungsmethoden

Mittels Schallemission sollen die zwei Achsen aus CFK während des Betriebs auf Impactschäden oder Überlastung überwacht werden. Zur Abschätzung des maximalen Sensorabstandes wurde eine Berechnung der Probability of Detection (PoD) nach [30] mit einer konservativen Abschätzung der Signaldämpfung durchgeführt. Der Abstand der Sensoren auf der Komponente wurde so gewählt, dass für die gesamte Struktur eine PoD von  $> 80\%$  erreicht wird. Dafür wurden 65 Sensoren benötigt. Auf der anderen Komponente werden weitere 12 Sensoren benötigt.



**Abbildung 2.** Beispielhafte Berechnung der PoD auf dem Portalschlitten der Fräse. Die Sensoren wurden so angeordnet, dass auf der gesamten Struktur eine PoD von  $>80\%$  erreicht wurde. Dafür werden 65 Sensoren benötigt.

Durch die Prüfung mit geführten Wellen existiert eine weitere Methode, die Achsen auf Schäden hin zu untersuchen. Die Prüfung kann dabei in regelmäßigen Intervallen sowie bedarfsgerecht getriggert im Anschluss an Schallemissionsevents stattfinden, um die Ergebnisse aus der Schallemissionsanalyse zu ergänzen.

Die Körperschallanalyse kann in diesem Kontext zur Überwachung des Zustands der Zahnräder und Kugellager der Achsen genutzt werden. Weiterhin soll damit auch der Bohr- oder Fräsvorgang überwacht werden, um den Verschleiß des Bohrers oder Fräasers festzustellen.

Die Modalanalyse erlaubt eine globale Aussage über die Grundsteifigkeit des Systems. Treten hier signifikante Änderungen auf, ist ein schwerwiegender Defekt der CNC-Fräse sehr wahrscheinlich. Die Überprüfung der Eigenschwingungen erfolgt vor jeder Inbetriebnahme im Rahmen des Aufwärmprogramms der Fräse durch Anregung mittels der Fräerspindel. Die dadurch erzeugten Vibrationen übertragen sich auf die gesamte Struktur. Wichtig für eine zuverlässige Erkennung der Schwingung sind die gleichen Umgebungsbedingungen und Massenverteilungen auf der Maschine, da ansonsten die Schwingungsmoden schon durch den Aufbau beeinflusst werden.

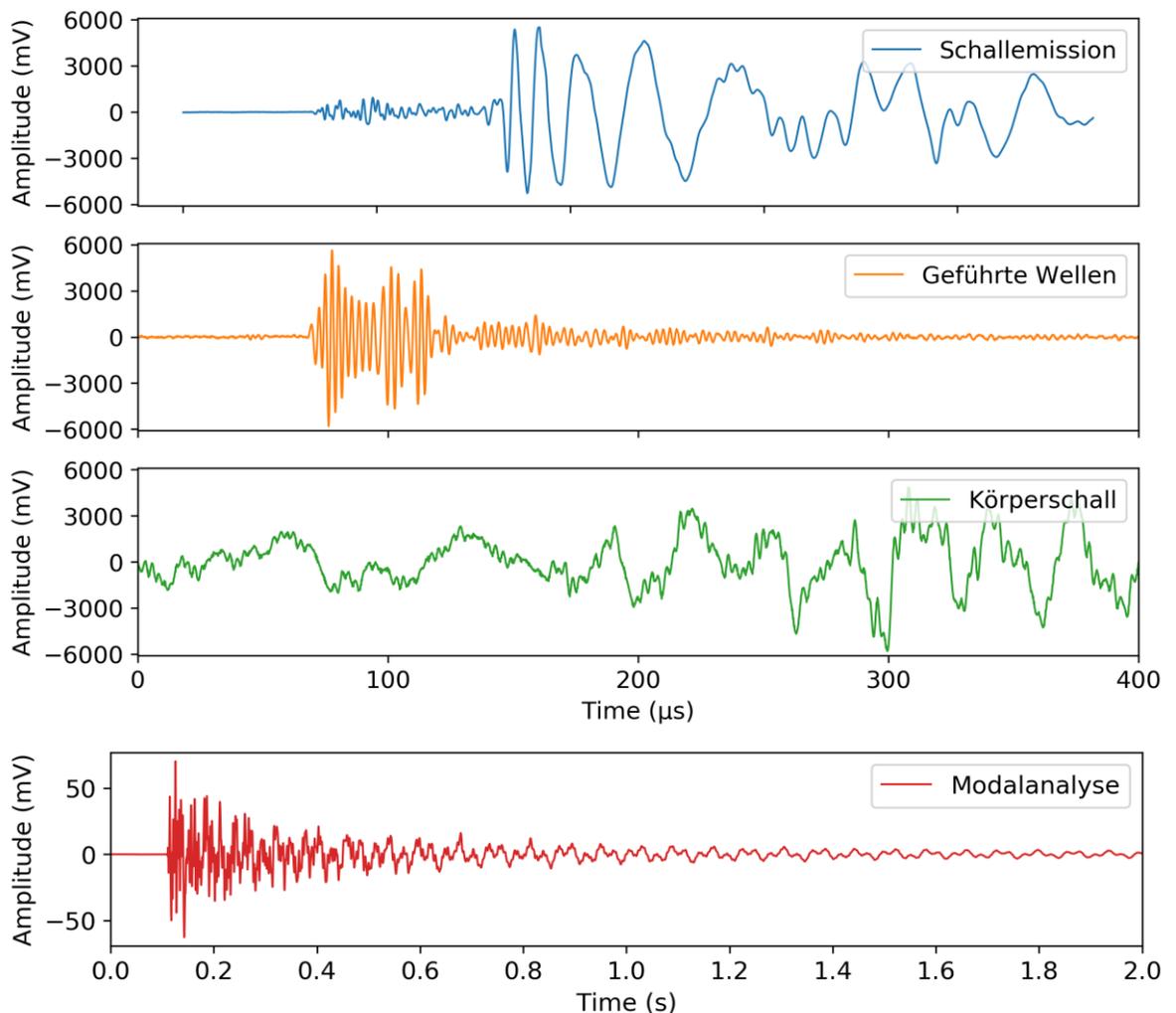
### 2.5.2 Verwendung eines gemeinsamen Sensornetzwerks

Für die Schallemissionsanalyse, die Prüfung mit geführten Wellen und die Körperschallanalyse werden Ultraschall-Piezosenoren verwendet. Grundsätzlich existieren

für alle Methoden jeweils spezialisierte Sensoren. Ein Überwachungsszenario mit über 80 Sensoren mit hochwertigen Ultraschallsensoren erscheint jedoch nicht wirtschaftlich.

Die Kosten für die vorgestellte 5-Achs-Fräse betragen ca. 500 000€. Bei einem Stückpreis von z.B. 500€ für einen hochwertigen Sensor belaufen sich allein die Kosten für Sensorik auf über 40 000€. Inklusiv weiterer benötigter Messhardware (Vorverstärker, A/D Wandler, Datenaufzeichnung) erreichen die Ausgaben für ein kommerzielles Überwachungssystem ca. 150 000€, was 30% Aufschlag zu den Kosten für die CNC-Fräse bedeuten würde. Dies steht bisher in keinem Verhältnis zum Mehrwert der Zustandsüberwachung und würde daher wirtschaftlich nicht umsetzbar sein.

Ersten Untersuchungen zufolge bieten dünnwandige Piezoplättchen eine gute Alternative zu kommerziellen Sensoren [31]. Hier wurde bereits gezeigt, dass bei guter Wahl des Piezoplättchens ähnliche gute Empfindlichkeiten für die Aufnahme von Schallemissionssignalen erreicht werden können. Die Piezoplättchen liegen bei unter 10€ pro Stück und bieten daher großes Einsparpotential. Beispielsignale der Piezoplättchen für die Aufzeichnung von Schallemissionssignalen, geführten Wellen, Körperschall und Modalanalyse sind in Abbildung 3 gezeigt.



**Abbildung 3.** Beispielsignale eines Piezoplättchens für die Aufzeichnung von Schallemissionssignalen, geführten Wellen, Körperschallsignalen und Modalanalyse. Das letzte Signal wurde ohne Vorverstärkung gemessen und erreicht daher eine deutlich geringere Amplitude.

In diesem Fall können die genannten Messmethoden mit ein und demselben Sensornetzwerk genutzt werden. Eine Unterscheidung der Messmethoden erfolgt dann erst

durch die Auswertung des Datenstreams durch die Software. So sollen beispielsweise die Schallemissionssignale über eine softwareseitige Schwellwertbestimmung erkannt werden, da aufgrund der kontinuierlichen Aufnahme kein hardwareseitiger Trigger verwendet wird.

Da die Prüfung mit geführten Wellen aktiv geschieht, sind die Zeitpunkte der Anregung bekannt, wodurch die Erkennung der erzeugten Wellen nicht von einem Schwellwertverfahren abhängt, sondern aus dem Anregungszeitpunkt abgeleitet werden kann. Es ist möglich, dass sich eine aktive geführte Welle mit einem Schallemissionssignal überlagert. Dadurch, dass jedoch der gesamte Signalstream vorliegt, besteht die Chance, durch Herausfilterung des schmalen Frequenzbandes einer angeregten geführten Welle das Schallemissionssignal wiederherzustellen.

Die Körperschallanalyse ist auf einen kontinuierlichen Datenstream angewiesen, da hier keine transienten Schallereignisse untersucht werden, sondern kontinuierlich die Prozessgeräusche analysiert werden. Zu Zeitpunkten, in denen eine Prüfung mit geführten Wellen durchgeführt wird, ist das Körperschallsignal von diesen überlagert, kann aber analog der Schallemissionssignale gefiltert werden.

Die erwarteten Frequenzen bei der Modalanalyse liegen unter 1000 Hz. In diesem Bereich bietet sich die grundsätzlich die Verwendung von Beschleunigungssensoren an, da diese hier eine hohe Empfindlichkeit bei gleichzeitig linearem Antwortverhalten aufweisen. Die prinzipielle Eignung der Piezosensoren für die Messung von Eigenresonanzen soll jedoch weiterhin evaluiert werden. Wie in Abbildung 3 gezeigt, sind diese durchaus für die Messung niederfrequenter Schwingungen geeignet.

### *2.5.3 Auswahl der Messhardware für eine Kombination der Messmethoden*

Die Anforderungen an ein Messsystem, das für die verschiedenen Messmethoden geeignet ist, sind vor allem die Möglichkeit einer kontinuierlichen Datenaufzeichnung, sowie die aktive Anregung von Signalen. Dies ermöglicht die Aufnahme des Körperschalls sowie auftretende Schallemissionssignale. Mithilfe der aktiven Anregung können die Sensoren zur Prüfung mit geführten Wellen verwendet werden. Es existieren bereits kommerzielle Systeme (z.B. von Vallen Systeme GmbH) die diese Anforderungen erfüllen können. Bei einer Permanentüberwachung ist insbesondere das Datenmanagement zu beachten. Bei 80 Sensoren, einer Abtastrate von 10 MS/s und 16 bit Auflösung pro Wert werden 1,6 GB/s an Daten produziert. Über USB ist diese Datenrate nicht mehr übertragbar. Mit einer 10 GBit Ethernetleitung ist dies jedoch möglich. Für den Einsatz zur Zustandsüberwachung sollte daher ein Echtzeitsystem verwendet werden, welches keine Speicherung der Daten erfordert und die Datenanalyse auf Hardwareebene durchführt.

## **3 Zusammenfassung und Fazit**

Im Rahmen der Projektes MAI CC4 fastMOVE soll eine 5-Achs-Hochgeschwindigkeitsfräse mit Komponenten aus CFK hergestellt werden, mit der eine höhere Beschleunigung der Achsen erreicht werden kann und somit die Bearbeitungszeit der Werkstücke verringert werden kann. Um die CFK Komponenten auf Schädigungen zu überwachen, soll eine Zustandsüberwachung mit akustischen Methoden durchgeführt werden. Die gewählten Methoden sind dabei die Modalanalyse, die Körperschallanalyse, die Schallemissionsanalyse und die Prüfung mit geführten Wellen. Aus Wirtschaftlichkeit ist eine separate Umsetzung der einzelnen Methoden mit jeweils spezialisierter Sensorik und Messtechnik nicht zielführend. Es wurde daher ein Konzept umgesetzt, wie sich die Methoden in einem gemeinsamen Sensornetzwerk vereinen lassen. Als mögliche Sensoren wurden dünnwandige Piezoplättchen identifiziert, deren hohe Empfindlichkeit eine Messung von Schallemission und Körperschall ermöglicht, und zudem eine aktive Anregung von Signalen erlauben.

Da entsprechende Messsysteme bereits kommerziell erhältlich sind, die sowohl die aktive Anregung als auch die Messung von Schallemission erlauben, ist der nächste Schritt die technische Umsetzung des Konzeptes und die Datenanalyse.

## 4 Referenzen

- [1] C. R. Farrar and S. W. Doebling, "DAMAGE DETECTION II Field Applications to Large Structures."
- [2] A. Ghoshal, M. J. Sundaresan, M. J. Schulz, and P. Frank Pai, "Structural health monitoring techniques for wind turbine blades," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 2000.
- [3] M. Heinrich, U. Rabe, B. Grabowski, and B. Valeske, "Methodische Entwicklung der akustischen Resonanzanalyse zur zerstörungsfreien Erkennung von ur- oder umgeformten Serienteilen mit unzulässigen Geometrieabweichungen – simulati- onsbasierte Modellüberlegungen," *DACH-Jahrestagung 2015*, pp. 1–8, 2015.
- [4] E. P. Carden and P. Fanning, "Vibration Based Condition Monitoring: A Review," *Struct. Heal. Monit.*, vol. 3, no. 4, pp. 355–377, 2004.
- [5] O. S. Salawu, "Detection of structural damage through changes in frequency," *Eng. Struct.*, 1995.
- [6] B. J. Allemang and D. L. Brown, "A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis."
- [7] L. M. Rogers, "The application of vibration signature analysis and acoustic emission source location to on-line condition monitoring of anti-friction bearings," *Tribol. Int.*, vol. 12, no. 2, pp. 51–58, 1979.
- [8] D. Dyer and R. M. Stewart, "Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis," *J. Mech. Des.*, vol. 100, no. 2, p. 229, Apr. 2010.
- [9] C. James Li and S. Y. Li, "Acoustic emission analysis for bearing condition monitoring," *Wear*, vol. 185, no. 1–2, pp. 67–74, 1995.
- [10] M. M. Tahir, S. Badshah, A. Hussain, and M. A. Khattak, "Extracting accurate time domain features from vibration signals for reliable classification of bearing faults," *Int. J. Adv. Appl. Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 156–163, 2017.
- [11] A. Kumar and R. Kumar, "Role of Signal Processing, Modeling and Decision Making in the Diagnosis of Rolling Element Bearing Defect: A Review," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 38, no. 1. 2019.
- [12] Y. S. Shin and J. J. Jeon, "Pseudo wigner-ville time-frequency distribution and its application to machinery condition monitoring," *Shock Vib.*, vol. 1, no. 1, pp. 65–76, 1993.
- [13] H. I. Choi and W. J. Williams, "Improved time-frequency representations of multi-component signals using exponential distribution," *IEEE.Trans.Acoustics.Speech.Sig.Proc.*, vol. ASSP-40, no. 6, pp. 862–871, 1989.
- [14] U. Seuthe, "Optimierung industrieller Fertigungsprozesse-Körperschall und komplexe Signalanalyse," in *19. Kolloquium Schallemission*, 2013.
- [15] M. G. R. Sause and M. A. Hamstad, "Acoustic Emission Analysis," in *Comprehensive Composite Materials II*, P. W. R. Beaumont and C. H. Zweben, Eds. Elsevier, 2017, pp. 291–326.
- [16] M. G. R. Sause, *Fiber Reinforced Composites: In-situ monitoring*. Springer International Publishing, 2016.
- [17] S. Kalafat and M. G. R. Sause, "Lokalisierung von Schallemissionsquellen in Faserverbundwerkstoffen mit künstlichen neuronalen Netzwerken," in *19. Kolloquium Schallemission*, 2013, pp. 1–8.
- [18] M. G. R. Sause and S. Horn, "Einfluss der Signallaufzeit auf die Unterscheidbarkeit von Schallemissionsquellen in Faserverbundwerkstoffen," *18. Kolloquium Schallemission*, pp. 1–9, 2011.
- [19] M. G. R. Sause and S. R. Horn, "Simulation of acoustic emission in planar carbon fiber reinforced plastic specimens," *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 29, no. 2, pp. 123–142, 2010.
- [20] M. G. R. Sause, "ON USE OF SIGNAL FEATURES FOR ACOUSTIC EMISSION SOURCE IDENTIFICATION IN FIBRE-REINFORCED COMPOSITES," in *33rd European Conference on Acoustic Emission Testing*, 2018.
- [21] S. K. Yadav, S. Banerjee, and T. Kundu, "On sequencing the feature extraction techniques for online damage characterization," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 24, no. 4, pp. 473–483, 2013.
- [22] M. G. R. Sause, "Identification of failure mechanisms in fiber reinforced composites by acoustic emission analysis," 2013.
- [23] K. Wasmer, F. Saeidi, B. Meylan, Q. T. Le, and S. A. Shevchik, "When AE (Acoustic Emission) meets AI (Artificial Intelligence)," in *21. Kolloquium Schallemission*, 2018, pp. 1–8.
- [24] Z. Bo, Z. Yanan, and C. Changzheng, "Acoustic emission detection of fatigue cracks in wind turbine blades based on blind deconvolution separation," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 40, no. 6, pp. 959–970, 2017.
- [25] J. Prager, H. Gravenkamp, M. U. Rahman, and E. Köppe, "Einsatz geführter Wellen für die

- Ultraschallprüfung,” *Tech. Mess.*, vol. 79, no. 5, pp. 251–261, 2012.
- [26] S. H. Díaz Valdés and C. Soutis, “Real-time nondestructive evaluation of fiber composite laminates using low-frequency Lamb waves,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 111, no. 5, p. 2026, 2002.
- [27] H. Lais, P. S. Lowe, T. H. Gan, L. C. Wrobel, and J. Kanfoud, “Characterization of the use of low frequency ultrasonic guided waves to detect fouling deposition in pipelines,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 7, 2018.
- [28] M. Capriotti, H. E. Kim, F. L. di Scalea, and H. Kim, “Non-destructive inspection of impact damage in composite aircraft panels by ultrasonic guided waves and statistical processing,” *Materials (Basel)*, vol. 10, no. 6, 2017.
- [29] J. L. Rose, “Exhibition on Non-Destructive Evaluation Successes and Challenges in Ultrasonic Guided Waves for NDT and SHM,” in *Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation*, 2009.
- [30] M. G. R. Sause, F. F. Linscheid, and M. Wiehler, “An Experimentally Accessible Probability of Detection Model for Acoustic Emission Measurements,” *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 37, no. 2, pp. 1–12, 2018.
- [31] F. F. Linscheid, S. Schwägerl, and M. G. R. Sause, “Evaluierung der Kombination von Schallemissionsanalyse und Prüfung mit geführten Wellen in einem gemeinsamen Sensornetzwerk,” in *22. Kolloquium Schallemission*, 2019, pp. 1–8.