

Hard- und Softwarefusion von mehreren akustischen Messmethoden zur Zustandsüberwachung

Florian F. LINSCHIED¹, 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. Eine zuverlässige Zustandsüberwachung von Strukturen aus Verbundwerkstoffen in Industrieanlagen profitiert von einer Kombination mehrerer akustischer Methoden, um ein vollständigeres Bild der Struktur und möglicher Defekte zu erhalten. Neben der Schallemission erscheint eine Kombination aus Modalanalyse, Körperschallanalyse und einer Prüfung mit geführten Wellen vorteilhaft. Alle diese Verfahren basieren auf der Ausbreitung von (Ultra-) Schallwellen durch die Struktur. Bisher erfordern alle Methoden jedoch eine jeweils spezialisierte Hard- und Software. Dass eine Ergänzung der Schallemission mit anderen akustischen Messverfahren relativ selten angewendet wird, könnte an der Notwendigkeit für gleich mehrere unterschiedliche Messsysteme und Sensoren liegen. Um die Kombination dieser Methoden zu erleichtern, wurde daher ein kostengünstiger Sensor aus einer Piezokeramikscheibe und integriertem Vorverstärker entwickelt. Die Sensorkomponenten wurden so ausgewählt, dass sie eine zufriedenstellende Empfindlichkeit für alle vier Arten von Messmethoden aufweisen und damit die Einsatzmöglichkeiten des Sensors erweitern. Die geringen Materialkosten könnten somit die Implementierung eines SHM-Systems mit deutlich verringertem Kostenaufwand ermöglichen. Neben der Hardware befindet sich auch ein begleitendes MATLAB©-basiertes Softwarepaket in der Entwicklung, das die Evaluierung der verschiedenen Methoden auf der Basis eines einheitlichen Datenstroms ermöglichen wird. Ziel ist es, ein Netzwerk von baugleichen Sensoren aufzubauen, deren Signale dann von der Software nach der jeweiligen Methode ausgewertet werden. Ausgewählte Beispiele für diese Methoden werden vorgestellt, um die Fähigkeiten unseres Ansatzes zu demonstrieren.

1 Einführung

Schwingungsbasierte Sensoren zur Zustandsüberwachung von Industrieanlagen sind vielfältig. Seit Langem genutzt und weit verbreitet sind schwingungsbasierte Sensorsysteme mit Beschleunigungssensoren, die in vielfältiger Weise eingesetzt werden. Häufig werden die Sensoren an Positionen appliziert, die von selbst schwingen. Oder aber die Struktur wird aktiv durch Shaker o. ä. angeregt um charakteristische Eigenschwingungen hervorzurufen. In jedem Fall sind zumeist die Eigenresonanzen oder Abwandlungen davon die ausgewertete Eigenschaft der Messungen. Geht man in den Frequenzen vom Kilohertzbereich in den 10-100 kHz-Bereich, landet man im Bereich der Körperschallanalyse. Hier werden nicht mehr die globalen Schwingungsmoden der gesamten Struktur betrachtet, sondern eher die



Ultraschallwellen, die als Volumen-, Oberflächen- oder Plattenwellen durch die Struktur laufen. Breitbandige Körperschallsensoren können so die kontinuierlich abgegebenen Geräusche von Pumpen, Kugellagern oder Motoren aufnehmen. Eine Auswertung geht meist über das Frequenzspektrum oder den Signalpegel und kann durch eine Detektion von Änderungen zum Referenzzustand Anomalien im Betrieb aufdecken. Zur Detektion von plötzlich auftretenden Schäden in der Struktur wird die Messung von Schallemission verwendet, wenn die Schäden z.B. durch Überlast im laufenden Betrieb entstehen und das Messsystem dabei kontinuierlich mitmisst. Alternativ kann auch eine Prüfung mit geführten Wellen durchgeführt werden, um Schäden auch nach ihrem Auftreten anhand der Änderungen der Signallaufstrecke zu identifizieren. Schallemissionssensoren zeichnen sich zumeist durch einen oder zwei Resonanzpeaks im Bereich 100 kHz – 1 MHz aus. Sensoren für geführte Wellen haben tendenziell etwas niedrigere Resonanzfrequenzen und werden zudem sowohl als Sensoren als auch als Aktuatoren genutzt.

In einer früheren Veröffentlichung haben wir bereits über die Entwicklung eines kostengünstigen Sensors zur Messung mit allen vier genannten Methoden berichtet [1]. Dies verfolgt das übergeordnete Ziel, die genannten Zustandsüberwachungsmethoden zu vereinen, um ein vollständigeres Bild über den Zustand des Systems zu erhalten. Dafür ist ein prototypischer Sensor mit eigener Hardware entwickelt worden, um außerdem ein möglichst kostengünstiges System zu erhalten und damit die Verwendung in Massenmärkten zu ermöglichen. Im Folgenden stellen wir die Designschritte bei der Entwicklung der Hardware vor, sowie das Verarbeitungskonzept des Matlab® basierten Softwareframeworks Ultra-Highlevel-Ultrasonics (UHU), mit dessen Hilfe eine möglichst direkte Auswertung der Messdaten im Betrieb von Maschinen und Anlagen gewährleistet werden soll [2].

Ziel unserer Entwicklung ist ein portables Messsystem, das für eine Vielzahl an Messaufgaben einsetzbar ist. Als Datenerfassungssystem dient ein System der Firma *Spectrum Instrumentation GmbH*. Die eingebauten Messkarten haben eine maximale Abtastrate von 20 MS/s auf jedem Kanal. Bei ausreichender Schreibgeschwindigkeit auf die SSD Festplatten und genügendem Speicherplatz ist ein unlimitiertes, kontinuierliches Streamen der Daten auf allen Kanälen möglich, sowie eine Vielzahl an getriggerten Modi mit frei wählbarer Aufnahmelänge. Die Steuerung der Karten ist über eine Vielzahl an Schnittstellen möglich, in unserem Fall erfolgt sie über eine Matlab® Bibliothek. Eine Besonderheit gegenüber anderen Messsystemen ist, dass die Kanäle nicht unabhängig voneinander getriggerte Signale speichern können, sondern die Kanäle stets synchronisiert arbeiten. Daher ist eine Onlineauswertung der Daten zu bevorzugen, um die Speicherung von großen Datenmengen zu vermeiden. Analysen wie die Körperschallanalyse und Modalanalyse sind nicht eventbasiert und benötigen daher eher einen kontinuierlichen Stream. Unser Konzept sieht daher vor, auf ausgewählten Kanälen kontinuierlich mit Abtastraten im Bereich 1–10 MS/s zu streamen. Schallemissionssignale tauchen hingegen zu beliebigen Zeiten auf. Für die Schallemissionsanalyse würden üblicherweise nur diese kurzen Events getriggert und aufgenommen werden. In unserem Ansatz wird durch einen Software-Trigger die Auswertung von Schallemission aktiviert. Das Konzept der gewählten Datenauswertung wird im Abschnitt 3 Softwareentwicklung genauer erläutert.

2 Hardwareentwicklung

Der entwickelte Sensor besteht aus einem Keramikplättchen, einem Piezoplättchen, Verstärkerelektronik und einem Kunststoffgehäuse (Abbildung 1). Zusammen mit einer externen Elektronik wird im passiven Modus das gemessene Signal analog weiterverarbeitet sowie im aktiven Modus ein Anregungssignal auf den entsprechenden Sensor umgeleitet, um damit z.B. geführte Wellen zu erzeugen. Als Designkonzept des Prototyps wurde insgesamt

möglichst günstige Hardware verwendet, wobei die Tauglichkeit für verschiedene Messmethoden erreicht werden sollte [3]. Da alle Sensoren zudem im geplanten Anwendungsfall zur Überwachung von Leichtbaustrukturen eingesetzt werden sollen, wurde auch auf eine möglichst große Gewichtsersparnis geachtet.

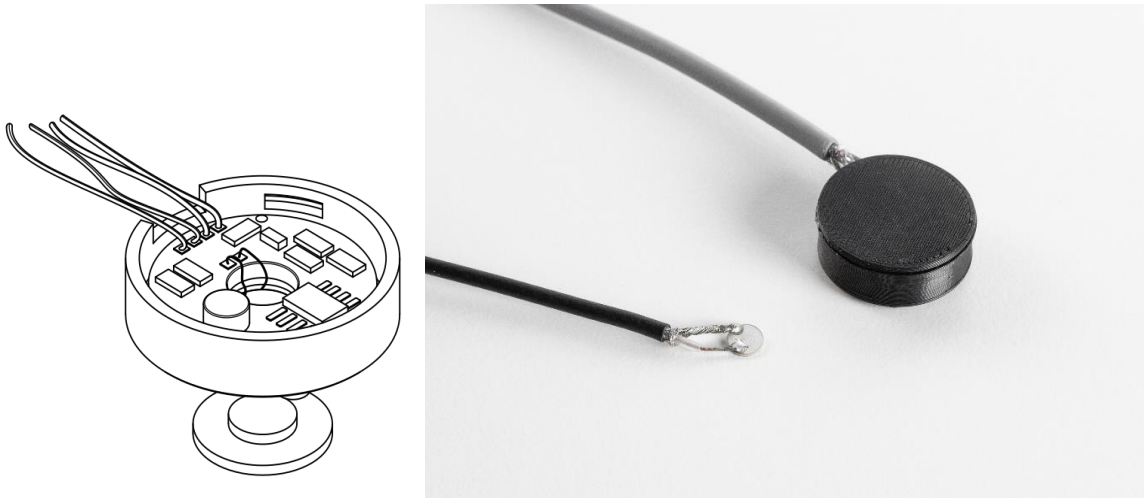


Abbildung 1. Schematische Darstellung des entwickelten Ultraschallsensors mit integriertem Vorverstärker. Daneben der fertige Sensor mit einem rohen Piezoplättchen zum Vergleich.

Das Piezoplättchen (Typ PRYY-0006 von PICeramic, wie in [3] vorgestellt) wird mittels Keramikkleber auf das Keramikplättchen geklebt, das wiederum von unten an das Gehäuse angeklebt wird. Somit ist ein Schutz der Piezokeramik vor mechanischer Belastung gegeben und sie ist elektrisch vom Untergrund isoliert. Die gemessene Sensitivität wird dabei nur unwesentlich beeinflusst. Das Piezoplättchen kann leicht über zwei Drähte mit der Vorverstärkerplatine kontaktiert werden. Vier weitere Kontaktstellen führen Ground, 24V Spannungsversorgung, aktives und passives Sensorsignal nach außen.

Durch die Wahl eines Kunststoffgehäuses ist im Sensor kein Schutz vor elektromagnetischen Störsignalen gegeben. Dieser leichte Verlust an Abschirmung wurde jedoch für die einfache Herstellung unserer Prototypen in Kauf genommen.

2.1 Vorverstärker

Ultraschallsensoren sind mittlerweile häufig sowohl mit als auch ohne internen Vorverstärker verfügbar. Die Vorteile der integrierten Verstärker liegen klar auf der Hand, da die Empfindlichkeit gegenüber elektrischen Störquellen aus der Umgebung deutlich verringert werden kann. Allerdings benötigt die Elektronik auch mehr Platz und vergrößert somit den Formfaktor des Sensors. Da für den geplanten Anwendungsfall Kabellängen von über 15m auftreten, war eine ausreichende Vorverstärkung unerlässlich.

Der Vorverstärker besteht im Wesentlichen aus Hoch- und Tiefpassfiltern und dem Instrumentenverstärker AD8421 von Analog Devices. Die Schaltung ist in Abbildung 2 dargestellt. Die -3dB Grenzfrequenz des Hochpassfilters liegt bei nominell 340 Hz, um auch niederfrequenterer Signale für die Modalanalyse messen zu können. Der Tiefpassfilter hat eine Grenzfrequenz von nominell 3.4 MHz.

Durch eine Begrenzerschaltung mittels zweier Dioden wird der Instrumentenverstärker vor dem Anregungspuls für die geführten Wellen geschützt [4], [5]. Der Gain des Verstärkers wird über einen Festwiderstand auf 100x festgesetzt. Da auf eine symmetrische Spannungsversorgung um Ground verzichtet wurde, liegt das Sensorsignal auf einem konstanten DC-Pegel der halben Versorgungsspannung. Dieser Versatz wird auf der externen

Elektronik vor dem Messgerät durch einen einfachen Hochpassfilter wieder ausgekoppelt, da der Messrechner selbst über keine eigenen analogen Filterbänke verfügt.

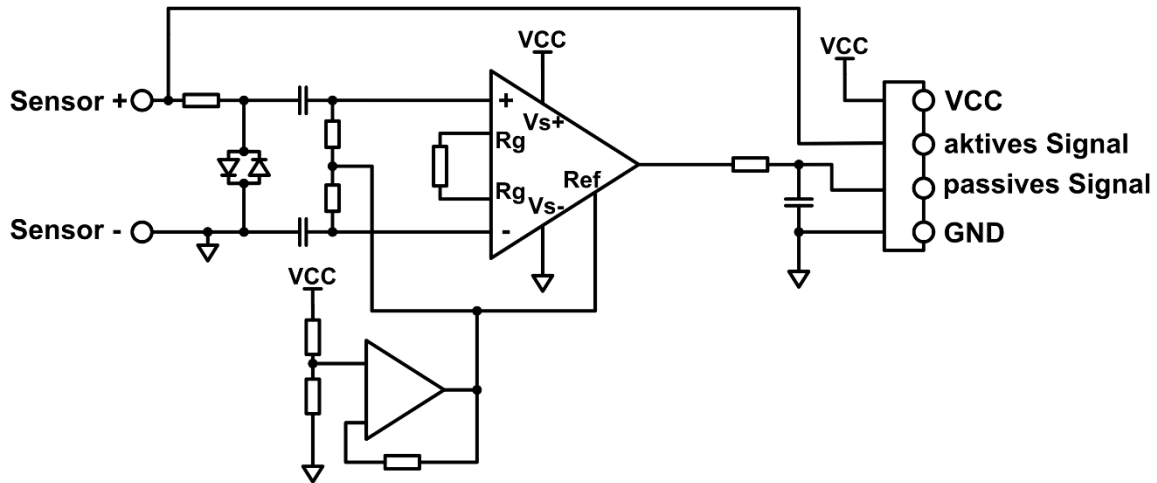


Abbildung 2. Elektrische Schaltung des Vorverstärkers.

2.2 Externe Ansteuerung

Zwischen dem Sensor und dem Eingang in den Messrechner befindet sich ein weiteres Hardwaremodul, welches der Spannungsversorgung und Steuerung der Sensoren dient. Pro Platine werden 8 Kanäle verarbeitet. Der Messrechner verfügt über 9 Messkarten à 8 Kanäle, sodass insgesamt bis zu 72 Kanäle aufgenommen werden können. Der Anschluss der Sensoren erfolgt über geschirmte 3-polige Stecker der Firma Lemo in der Größe 0B. Das ankommende, bereits verstärkte Signal des Sensors wird mit einem zweistufigen 10 kHz-Hochpassfilter gefiltert und über einen Multiplexer auf den Ausgang der Platine gelegt, sodass entweder das Rohsignal aufgenommen, oder ein analog vorgefiltertes Signal verwendet werden kann, wenn mit dem jeweiligen Sensor z.B. keine Modalanalyse gemessen werden soll.

Der Messrechner verfügt über einen Arbiträrwellengenerator, der zur Anregung der geführten Wellen dient. Da hier nur eine maximale Amplitude von 3V erreicht wird, wird das Signal auf der Platine über einen einfachen Operationsverstärker verstärkt. Das verstärkte Signal wird über einen 1-to-8-Multiplexer auf die entsprechende Signalleitung gegeben. Die Multiplexer der 9 Messkarten sind hierbei über eine Daisy-Chain-Anordnung miteinander verbunden, sodass stets nur einer der Kanäle aktiv geschaltet wird. Die elektrische Schaltung ist in Abbildung 3 dargestellt.

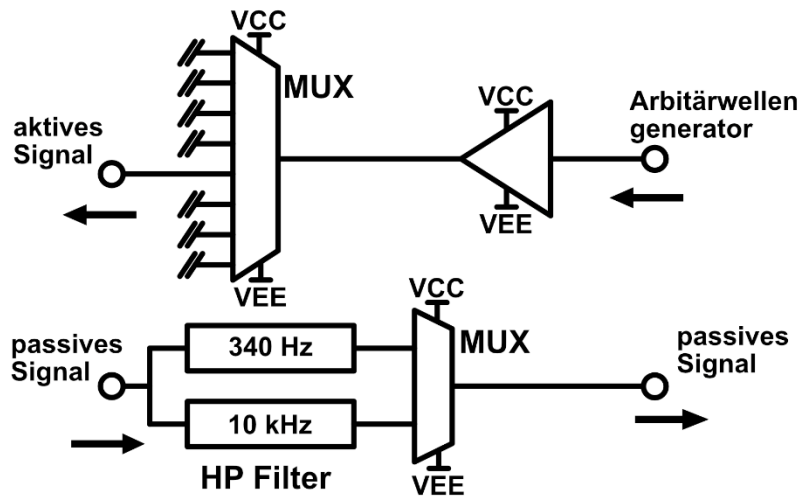


Abbildung 3. Elektrische Schaltung der externen Elektronik. Ein aktives Signal des Arbiträrwellengenerators wird über einen Operationsverstärker und einen Multiplexer auf einen der Sensoren geleitet. Das ankommende Signal wird durch umschaltbare analoge Filter für den Messrechner vorverarbeitet.

3 Softwareentwicklung

Wie bereits eingeführt ist der Aufbau der Hardware eng mit der Entwicklung eines Matlab®-basierten Softwarepaketes verknüpft. Aufgrund der absehbar großen Datenmengen, die mit dem Messsystem aufgenommen werden sollen, ist eine Speicherung aller Rohdaten langfristig nicht sinnvoll, da große Teile des Datenstreams kaum relevanten Informationen enthalten und nicht von langfristigem Interesse sind.

Die Auswertung der Daten ist daher in einem zweistufigen Prozess geplant. Dabei wird in der ersten Stufe der Stream in Blöcke konstanter Länge aufgeteilt und auf diesen „Low-Level-Features“ berechnet. Diese sollen das jeweilige Signal, spezifisch angepasst für die jeweilige Überwachungsmethode, ausreichend parametrisieren und charakterisieren, sodass im weiteren Verlauf das Rohsignal nicht mehr benötigt wird. Hierbei findet auch eine erhebliche Reduktion der Datenmengen statt, womit diese Low-Level-Features dann langfristig gespeichert werden können. Diese Berechnung muss am Ende echtzeitnah während der Datenakquisition erfolgen und beschränkt sich daher größtenteils auf einfache Merkmale im Zeit- und Frequenzraum wie z.B. (Maximal-)Amplitude, Spektrale Energiebereiche oder Autokorrelationsparameter. Unterschiedliche Überwachungsmethoden benötigen zum Teil unterschiedliche Low-Level-Features, die außerdem zu verschiedenen Zeitpunkten aus dem Datenstream berechnet werden müssen. Für die Körperschallanalyse findet die Berechnung der Low-Level-Features kontinuierlich statt. Die Low-Level-Features bei der Schallemissionsanalyse werden beispielsweise erst bei der Detektion eines Schallemissionsereignisses berechnet, d.h. triggerbasiert ausgelöst. Bei der Messung mit geführten Wellen wird ohnehin aktiv angeregt, so dass die Low-Level-Features gezielt aus dem darauffolgenden Zeitbereich berechnet werden können. Für die Modalanalyse, welche in einem deutlich tieferen Frequenzbereich arbeitet, müssen hingegen mehrere Datenblöcke in einem Puffer vorgehalten werden, damit die zugehörigen Low-Level-Features berechnet werden können.

In der zweiten Stufe findet dann die Berechnung von High-Level-Features für die jeweilige Überwachungsmethode statt. Diese basieren auf der Kombination von beliebig vielen Low-Level-Features aus beliebig langen Zeiträumen, allerdings ohne erneuten Zugriff auf das Rohsignal, teilweise über mehrere Messmethoden hinweg. Die Berechnungen können deutlich rechenintensivere Algorithmen enthalten und sind somit nur eingeschränkt für eine

echtzeitnahe Auswertung der Rohdaten geeignet. Unter High-Level-Features fallen beispielsweise Größe und Ort eines Defekts aus der Prüfung mit geführten Wellen, der Quellort einer Gruppe von Schallemissionssignalen oder die Signalklassifizierung anhand verschiedener Merkmale mittels Mustererkennungsalgorithmen. Im Folgenden wird ein Fallbeispiel zur Anwendung dieser zweistufigen Auswertung zur Impacterkennung in Faserverbundwerkstoffen vorgestellt.

4 Anwendungsbeispiel

Das vorgestellte Paket aus Hard- und Software soll als erstes Anwendungsbeispiel auf einer 5-achsigen Hochgeschwindigkeitsfräse mit Komponenten aus CFK erprobt werden. Die zwei bewegten Achsen der Fräse sollen durch die Gewichtsersparnis, die durch den Einsatz von CFK- anstatt Stahl-Bauteilen erreicht wird, höhere Beschleunigungen erreichen können. Der Einsatz von CFK birgt jedoch die Gefahr, dass Risse und Defekte in der Struktur unentdeckt bleiben. Aus diesem Grund soll an der Struktur das Konzept einer umfassenden Zustandsüberwachung umgesetzt werden. Die Sensoren werden auf den Achsen mit einem maximalen Abstand von 400 mm angebracht. Dies erlaubt eine flächendeckende Überwachung mit einer guten Detektionswahrscheinlichkeit (PoD) von über 80 %, erfordert jedoch 72 Sensoren. Die Überwachung dient einerseits der Sicherstellung, dass die Maschine betriebstauglich ist. Andererseits wird durch die Körperschallanalyse auch gleichzeitig eine Überwachung des Fräsprozesses möglich. Hiermit kann die Qualität und der Abnutzungsgrad des Fräasers bewertet werden. In Abbildung 4 ist ein Gesamtbild der CNC-Fräse zu sehen, in Abbildung 5 ein Überblick, wie die Sensoren auf die z-Achse der Fräse geklebt wurden.

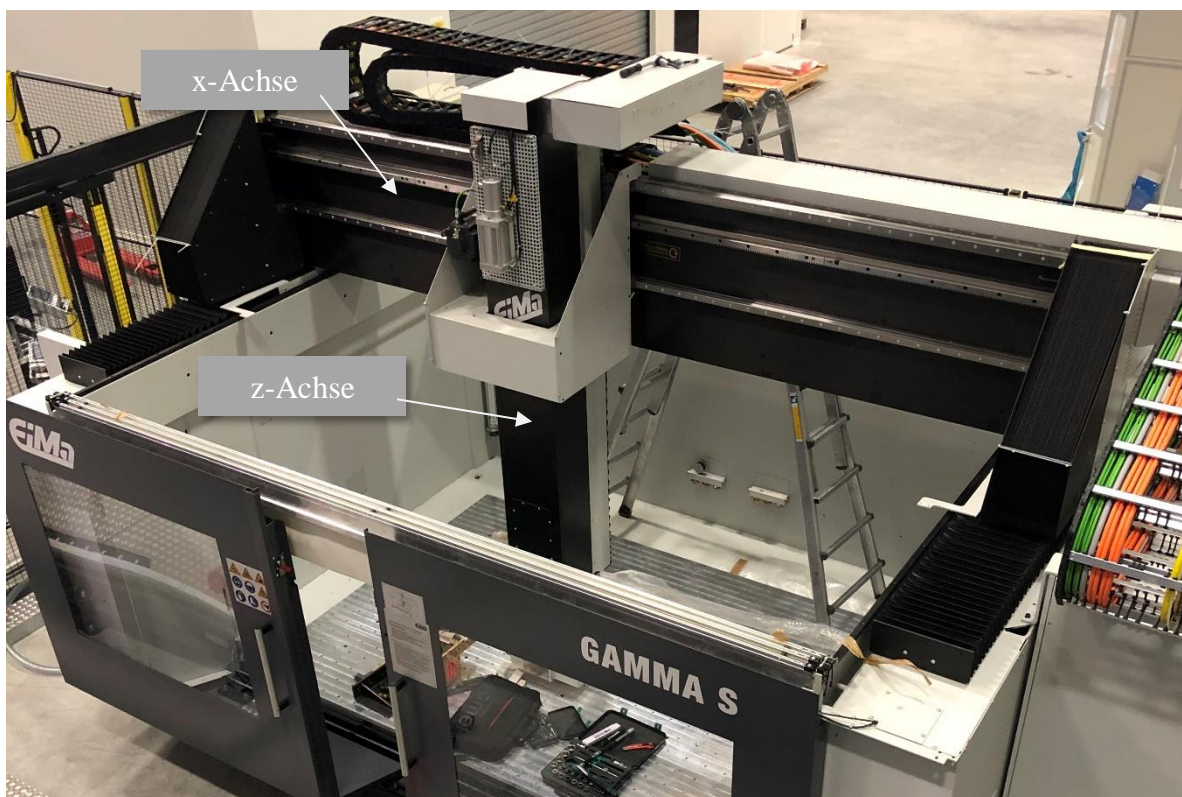


Abbildung 4. Foto der modifizierten CNC-Fräse mit den zwei Achsen aus CFK.

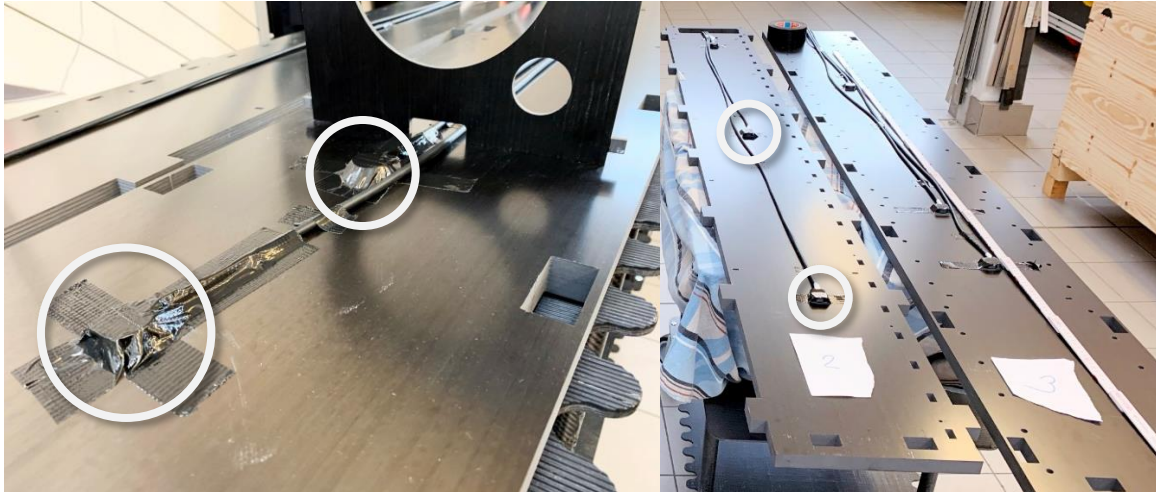


Abbildung 5. Die Fotos zeigen, wie die Sensoren während der Herstellung der z-Achse auf den Innenflächen aufgeklebt wurden. Auf diese Weise sind sie vor Stäuben aus dem Bauraum der Fräse geschützt.

Die Auswertung der Modalanalyse ermöglicht eine globale Bewertung der Grundsteifigkeit der Maschine. Eine veränderte Signatur der Eigenresonanzen, die sich durch eine Veränderung der Low-Level-Features darstellt, kann auf einen Verlust von Steifigkeit hindeuten und damit eine generelle Aussage über die Betriebstauglichkeit der Maschine machen. Bei der Auswertung der Modalanalyse im Fräsbetrieb können sich eventuell auch kurzzeitige atypische Überlastungen der Struktur in einer veränderten Signatur niederschlagen. Somit werden Fehlerquellen abgedeckt, die nicht notwendigerweise aus einem lokalen Defekt der CFK-Struktur stammen.

Zusätzlich zu diesen globalen Aussagen können nun die Schallemissionsanalyse und die Prüfung mit geführten Wellen eine Aussage über lokale Schadensereignisse geben. Bei einer kontinuierlich mitlaufenden Schallemissionsanalyse lassen sich im Betrieb der Fräse alle Schallemissionsereignisse erfassen und ihr Ursprung bestimmt werden. Häufen sich die Ereignisse an einem bestimmten Ort oder werden die Signale als Faserbrüche oder Delaminationen klassifiziert, kann noch im laufenden Betrieb eine vermehrte Prüfung dieser Stelle durch die geführten Wellen durchgeführt werden. Somit können sich die passive und aktive Methode gegenseitig ergänzen. Stellt sich das Ereignis tatsächlich als neuer Defekt heraus, kann der Betrieb der Maschine auch direkt unterbrochen werden.

Da die Prüfung mit geführten Wellen eine aktive Methode ist, kann sie auch Schäden entdecken, die nicht während des aktiven Betriebs des Systems entstanden sind, was mit der Schallemissionsanalyse nicht möglich ist. Somit sind auch Schäden abgedeckt, die im abgeschalteten Zustand, beispielsweise beim Beladen des Bauraums der CNC-Fräse, entstanden sind.

Die Körperschallanalyse ergänzt die Informationen über die Fräse durch Überwachung der Zahnräder und Kugellager der Achsen. Veränderungen treten hier in der veränderten Signatur des kontinuierlichen Betriebsgeräusches, das durch das Verfahren der Achsen entsteht, im Bereich des Defektes auf und werden somit über Abweichungen zum Referenzzustand identifiziert. Zusätzlich wird die Überwachung der Bearbeitung möglich, wenn sich ein Sensor auch in der Nähe des Fräskopfes befindet. Abnutzungserscheinungen führen zur Zunahme von höherfrequenten Signalanteilen.

Die Daten aus dem Ultraschallsystem werden zudem noch mit weiteren Maschinendaten wie Fräskopfposition, –geschwindigkeit und –drehzahl mittels Profinet oder OPC/UA in der Software zusammengeführt. Zudem ist denkbar, weitere Parameter wie Temperatur oder die Daten aus einer Kraft-Momenten-Sensorik mit aufzunehmen [6], [7]. Diese Daten enthalten Informationen über die Kräfte, die auf das Bearbeitungswerkzeug wirken und können insbesondere die Ergebnisse aus der Modalanalyse komplettieren.

Das Ergebnis ist ein Überwachungssystem, das zur Bestimmung des Zustandes einen ganzheitlichen Ansatz verfolgt. Statt auf eine hoch spezialisierte Lösung zu setzen, versuchen wir, aus demselben Datenstream, der aus einem einzigen Sensornetzwerk stammt, durch Auswertung verschiedener Aspekte möglichst unterschiedliche, sich gegenseitig ergänzende Informationen zu erhalten.

5 Zusammenfassung

Die von uns gestellten Anforderungen an ein Zustandsüberwachungssystem haben zur Entwicklung von hauseigenen Sensoren und einem Softwarepaket geführt, welches auf möglichst kostengünstige Weise eine umfassende und ganzheitliche Überwachung von Leichtbaustrukturen ermöglichen soll. Durch die Kombination von mehreren Überwachungsmethoden in einem Sensornetzwerk wird, ohne einen Mehraufwand an Sensorik zu benötigen, eine gleichzeitige Auswertung vieler Eigenschaften möglich, die ein umfassenderes Bild über den Schädigungszustand der Struktur ermöglichen. Wie bereits in [3] vorgestellt, werden die entwickelten Sensoren im Rahmen des Projektes MAI CC4 fastMOVE auf den Achsen einer 5-Achs-Fräse aufgebracht und das gesamtheitliche Konzept der Zustandsüberwachung getestet. Weiterhin wird dasselbe Messsystem mit abgewandelter Sensorik im Rahmen des Projektes MAI CC4 CosiMo für die Überwachung des Hochdruckinfusionsprozesses bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen benutzt [8].

Danksagung

Dieser Beitrag stellt Ergebnisse der Projekte "WiR Augsburg - Wissenstransfer Region Augsburg", gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programms „Innovative Hochschule“ und „MAI CC4 fastMOVE“, gefördert vom Freistaat Bayern im Rahmen des Programms „Neue Werkstoffe“ vor.

Referenzen

- [1] F. F. Linscheid, T. Peter, C. Holzmann, and M. G. R. Sause, "Evaluierung eines Überwachungsszenarios durch Kombination von akustischen Zustandsüberwachungsmethoden in einem gemeinsamen Sensornetzwerk," in *DACH-Jahrestagung 2019*, 2019, pp. 1–10.
- [2] M. G. R. Sause, F. F. Linscheid, C. Oblinger, S. O. Gade, and S. Kalafat, "Hard-and Software fusion for process monitoring during machining of fiber reinforced materials," in *Munich Symposium on Lightweight Design 2020*, 2020.
- [3] 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 *Kolloquium Schallemission 2019*, 2019.
- [4] G. R. Lockwood, J. W. Hunt, and F. S. Foster, "The Design of Protection Circuitry for High-Frequency Ultrasound Imaging Systems," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 38, no. 1, pp. 48–55, 1991.
- [5] J. Camacho and C. Fritsch, "Protection circuits for ultrasound applications," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 55, no. 5, pp. 1160–1164, 2008.
- [6] C. Scheer, "Überwachung des Zerspanungsprozesses mit geometrisch bestimmter Schneide durch Schallemissionsmessung," ETH Zürich, 2000.
- [7] G. Ferrari and M. P. Gómez, "Correlation Between Acoustic Emission, Thrust and Tool Wear in Drilling," *Procedia Mater. Sci.*, vol. 8, pp. 693–701, 2015.
- [8] S. Stieber *et al.*, "Towards Real-time Process Monitoring and Machine Learning for Manufacturing Composite Structures," in *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA*, 2020, vol. 2020-Sept, pp. 1455–1458.