

KamoS – Kombinierte akustische und modale Strukturüberwachung

Teilvorhaben: **Strukturdynamik und Systemintegration**

Abschlussbericht

Dieser Bericht ersetzt die Version vom Dezember 2022

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zuwendungsempfänger: Wölfel Engineering GmbH + Co. KG
Max-Planck-Straße 15
97204 Höchberg

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2018 bis 30.06.2022

Autoren: Stefan Kremling
Andreas Nuber
Herbert Friedmann

Höchberg, Oktober 2023

Projektpartner:

- Wölfel Engineering GmbH + Co. KG (WÖLFEL, Höchberg) → Koordinator
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (DLR, Braunschweig)
- Invent GmbH (INV, Braunschweig)
- IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH (IMA, Dresden)
- Hochschule Bochum (HS B, Fachbereich Mechatronik und Maschinenbau) – nach dem Wechsel von Prof. Kraemer → Universität Siegen (UNI SIE, Lehrstuhl für Mechanik mit Schwerpunkt Schädigungsüberwachung),

Förderhinweis

Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsvorhaben wurde im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms (LuFO) V innerhalb des 3. Programmaufrufs mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen FKZ 20Q1725A gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung zu	6
1. Aufgabenstellung (Ziele aus Antrag)	6
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	7
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	7
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	11
4.1. Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden	11
4.2. Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	11
II. Eingehende Darstellung zu	12
1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	12
2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	27
3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	28
4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	28
5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	28
6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses	28

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: ursprünglicher Projektstrukturplan	8
Abbildung 2: Balkenplan im Projekt KamoS	9
Abbildung 3: Kombination von aktiven und passiven schwingungs- und ultraschallbasierten SHM-Verfahren	12
Abbildung 4: Geplantes Aktor-Sensor-Modul	13
Abbildung 5: Design des Sensormoduls mit mechanischer/elektrischer Schnittstelle für den Beschleunigungssensor	14
Abbildung 6: Konzept für das SHM-Gesamtsystem.....	15
Abbildung 7: Prüfeinrichtung bei der IMA mit Schnittstellen zu den Messsystemen, Steuerung und DataStorage	16
Abbildung 8: FE-Modell der Türumgebungsstruktur	17
Abbildung 9: FE-Simulation und Auswertung der Eigenmoden der Türumgebungsstruktur. Exemplarisch sind die 1., 4. Und 12. Mode mit den Eigenfrequenzen 25 Hz, 49 Hz und 60 Hz dargestellt.....	17
Abbildung 10: Die Strukturantworten der nummerierten Knoten wurden wie Sensorsignale ausgewertet.....	18
Abbildung 11: Strukturantwort auf Sweepangregung	18
Abbildung 12: FE-Simulation des 3-Stringer-Panel für die vorbereitenden Arbeiten im Labor. Neben dem eigentlichen Modell ist die Eigenschwingform der 3. und 6. Mode exemplarisch dargestellt.....	19
Abbildung 13: Aufbau des Testsetup mit dem 3-Stringer-Panel und ein und einem ersten Test-Messsystem im Labor der Uni Siegen.	19
Abbildung 14: Wölfel-Messsystem, erste Ausbaustufe	20
Abbildung 15: Finale Sensor- und Aktorpositionen für das schwingungsbasierte SHM-System zur Durchführung der Messkampagne an der Türstruktur.....	20
Abbildung 16: FEM-Modell des 3-Stringer-Panels	21
Abbildung 17: Aufsummierte Auslenkung für 30 Eigenformen	21
Abbildung 18: Auslenkung für Eigenformen zwischen 0,5 bis 20 Hz.....	21
Abbildung 19: Vorgeschlagene Sensorpositionen für verschiedene Mindestabstände.....	21
Abbildung 20: Variation der betrachteten Moden	22
Abbildung 21: FE-Modell des 3-Stringer-Panel mit einer Delamination des Stringer (links) und einem Impact-Schaden (rechts).	22
Abbildung 22: Versagen der oberen Stringerverklebung.....	23

Abbildung 23: Sensor- und Aktorpositionen: Beschleunigungssensor  Aktor 	24
Abbildung 24: Ergebnisse der Modalanalyse im Überblick.....	25
Abbildung 25: Ergebnisse der Modalanalyse für 4 schädigungsrelevante Frequenzen	25
Abbildung 26: Vergleich der Lastschritte 0, 0.4, 0.6 und 0.75.....	26
Abbildung 27: Steubreitendiagramm	27

I. Kurze Darstellung zu

1. Aufgabenstellung (Ziele aus Antrag)

Im Mittelpunkt des Verbundprojekts stand die Entwicklung eines integrierten Systems zur Überwachung (engl.: Structural Health Monitoring – SHM) von Faserverbund-Luftfahrtstrukturen. Mit diesem System sollen perspektivisch Strukturen im Betrieb kontinuierlich auf Schädigungssereignisse und -fortschritt überprüft werden können. Durch die Möglichkeit der kontinuierlichen Überwachung können bedarfs- und nutzungsgerechte innovative Wartungs- und Instandsetzungskonzepte im Sinn einer „predictive maintenance“ für Luftfahrtzeuge realisiert werden. Diese erlauben es gleichzeitig, reguläre Inspektionsintervalle zu verlängern und durch eine umgehende Schadensdetektion frühzeitig Wartungsmaßnahmen einzuleiten. SHM-Systeme sind somit ein Baustein für den Paradigmenwechsel von vorgegebenen zu bedarfsorientierten Wartungsarbeiten.

Die Ziele des Verbundprojekts bestanden in der Kombination von aktiven und passiven Verfahren zur Schadensdetektion. Das SHM-System soll die schwingungsbasierte Vorgehensweise mit den Ultraschallmethoden Acoustic Emission (AE) und Acoustic Ultrasonic (AU) vereinigen um damit ein detailliertes Verständnis zur zuverlässigen Schadenslokalisation und zur Detektion des Schadensfortschrittes zu generieren. Weiterhin sollte ein robustes Aktuator-Sensor-Modul entwickelt werden, das zusätzliche Elektronik zur Datenvorverarbeitung und Kommunikation enthält, damit der Verkabelungsaufwand sowie das Systemgewicht geringgehalten werden können. Das Aktuator-Sensormodul soll für alle eingesetzten SHM-Methoden gleichermaßen zum Einsatz kommen und sollte Dehnungen, Beschleunigungen und Temperaturen messen. Zuletzt sollte ein derartiges SHM-Gesamtsystem auf die Türumgebungsstruktur appliziert werden, welche mechanischen Betriebslasten unterzogen wird. Unter Last soll das SHM-Gesamtsystem zeigen, dass es in der Lage ist, zuverlässig Schäden zu detektieren und zu lokalisieren.

Gesamtziel: Experimentelle Validierung der Funktion eines Labormusters eines Gesamtsystems zur kombinierten akustischen und modalen Überwachung von Luftfahrtstrukturen an einer realen Türumgebungsstruktur

Um das Gesamtziel zu erreichen wurden folgende Arbeitsziele definiert, welche sich auch in der Meilensteinplanung wiederspiegeln:

Arbeitsziel: Ein Konzept für ein SHM-Gesamtsystem soll entwickelt werden.

Arbeitsziel: Eine Systemidentifikation des Testobjekts soll durchgeführt werden.

Arbeitsziel: Ein Testsystem soll im Labor an einer Teststruktur installiert und in Betrieb genommen werden.

Arbeitsziel: Software zur Datenauswertung soll entwickelt und funktionsfähig bereitgestellt werden.

Arbeitsziel: Die Funktion des Teilsystems zur schwingungsbasierten Strukturüberwachung inklusive der damit gekoppelten Datenauswertung soll durch Simulation und im Labor validiert werden.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Insgesamt war die Zusammenarbeit mit den Partnern im Konsortium sehr gut, viele der involvierten Personen kannten und vertrauten sich bereits aus unterschiedlichen Vorläuferprojekten. Folglich konnten die Arbeiten der einzelnen Projektpartner sehr eng diskutiert und abgestimmt werden.

Kurz nach Projektbeginn bekam Prof. Dr. Peter Kraemer einen Ruf an die Universität Siegen. Da die geplanten Arbeiten der Hochschule Bochum untrennbar mit dem Wissen von Prof. Kraemer verbunden sind, wurde das Teilprojekt von der Hochschule Bochum an den Lehrstuhl *Mechanik mit Schwerpunkt Schädigungsüberwachung (Structural Health Monitoring)* der Universität Siegen übertragen. Prof. Kramer musste zunächst seinen Lehrstuhl neu aufbauen und entsprechend Personal für die Bearbeitung der vorgesehenen Aufgaben akquirieren.

Die ab März 2020 auch in Deutschland einsetzende Corona-Pandemie hatte leider auch erhebliche Auswirkungen auf dieses Projekt. Generell erschwert waren insbesondere alle praktischen Tätigkeiten die Hardware betreffend sowie die vorgesehenen Arbeiten an der Türstruktur. Die notwendigen und eingeführten Hygiene-, Schutz-, Raumnutzungs- und Reiseregelungen hatten signifikanten Einfluss auf die Arbeitsweise und Betriebsabläufe. Zwar hatten sich für Abstimmungen relativ schnell digitale Prozesse und Plattformen etabliert, bei der praktischen Umsetzung gingen alle Arbeiten deutlich langsamer voran als ursprünglich avisiert. Die Corona-Pandemie hatte auch massive Folgen hinsichtlich Verfügbarkeit und Lieferzeiten von Hardware, insbesondere was Elektronik- und IT-Komponenten betrifft. In Summe führte dies dazu, dass die Laufzeit des Projektes insgesamt um 12 Monate verlängert werden musste, um den geplanten Großversuch noch durchführen zu können. Die beim Versuch gewonnenen Messergebnisse und anschließende Signalanalyse waren ein zentraler Gegenstand des Projektes.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsvorhaben KamoS war als Verbundprojekt konzipiert und wurde zusammen von den Projektpartnern Wölfel Engineering GmbH + Co. KG, Invent GmbH, dem Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), der IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH sowie der Uni Siegen mit dem Lehrstuhl für *Mechanik mit Schwerpunkt Schädigungsüberwachung* als wissenschaftlichen Partner durchgeführt. Die Koordination des Gesamtprojekts wurde vom Wölfel übernommen.

Über die gesamte Projektlaufzeit wurde ein Jour Fixe mit allen Partnern in einem Abstand von 4 Wochen initiiert. Hierfür wurde ein digitales Format via Skype bzw. MS Teams gewählt. Gegenstand dieser Besprechungen waren vorwiegend organisatorische Themen, die alle Partner betrafen, aber auch technische Fragestellungen, an denen alle Partnern beteiligt waren, beispielsweise die notwendigen Vorbereitungen und die Umsetzung des Großversuchs. Daneben wurden bilaterale fachliche Abstimmungen auf direktem Weg per Telefon, E-Mail oder Skype/Teams durchgeführt. Darüber hinaus gab es insgesamt sechs Arbeits-/Projekttreffen des gesamten Konsortiums und zahlreiche gemeinsame Arbeitseinsätze bezüglich der Abrüstung der alten Messtechnik an der Türumgebungsstruktur sowie zur Ausrüstung mit neuer Messtechnik und Vorbereitungen zum Einbau der Struktur in die Prüfvorrichtung. Die vorgesehenen Präsenzveranstaltungen der Halbjahresmeetings in den letzten beiden Projektjahren wurden durch Videokonferenzen ersetzt.

In Abbildung 1 ist die Projektstruktur der Arbeitspakete innerhalb des Projektes KamoS dargestellt:

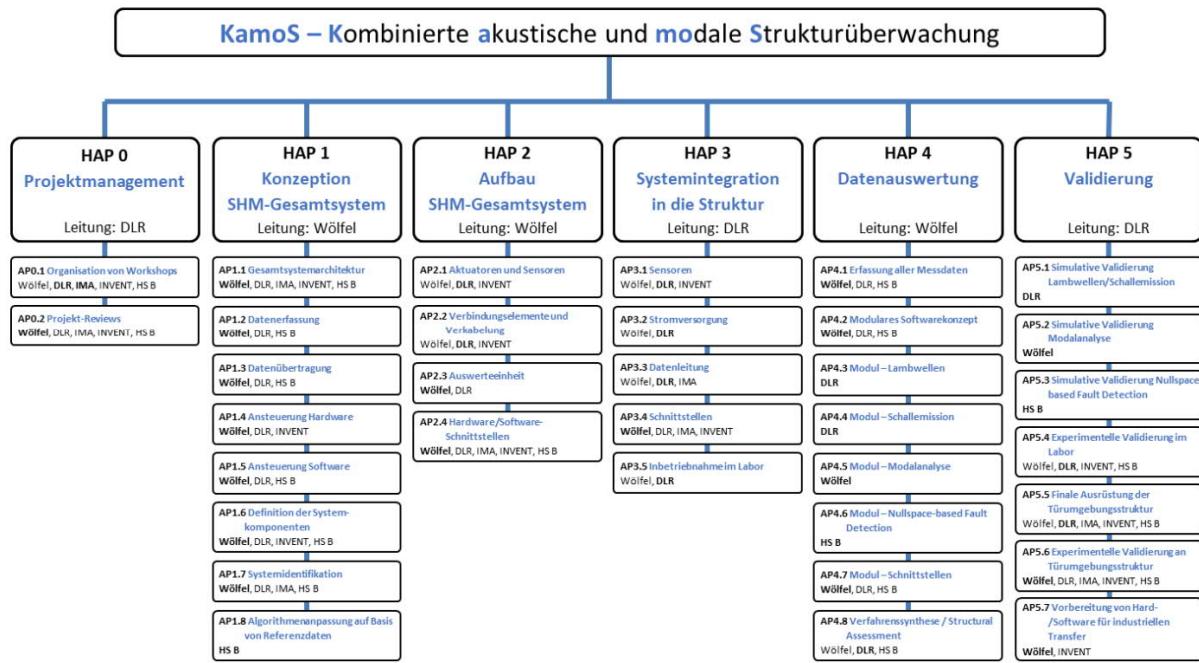


Abbildung 1: ursprünglicher Projektstrukturplan

Die ursprüngliche Planung für die Bearbeitung untergliederte die Projektinhalte in sechs Hauptarbeitspakete (HAP):

- HAP 0 war für das allgemeine Projektmanagement vorgesehen. Ein wesentlicher Bestandteil waren die darin geplanten jährlichen Projekt-Reviews, um den aktuellen Stand der Teilprojekte innerhalb des Konsortiums zu präsentieren und diskutieren.
- Das Konzept des SHM-Gesamtsystems war Gegenstand von HAP 1. Neben der Gesamtarchitektur inkl. den Schnittstellen und Ansteuerungen der Subsysteme wurden die für das Projekt notwendigen Voraussetzungen hinsichtlich Datenerfassung und -übertragung definiert. Darauf hinaus war in diesem Arbeitspaket eine Systemidentifikation als Basis für die Entwicklung von Analysealgorithmen vorgesehen.
- Der Aufbau des Gesamtsystems war Gegenstand von HAP 2. Die für die Modalanalyse benötigten Sensoren, Datenerfassungs- und Auswertekomponenten sowie die Schnittstellen und Verbindungselemente für das Gesamtsystem waren Gegenstand dieses Arbeitspakets. Zusammen mit den Partnern war vorgesehen, das gesamte System auf dem Labortisch aufzubauen.
- HAP 3 sah die Systemintegration in eine Teststruktur im Labor vor. Vorgesehen war ein schalenartiges Drei-Stringer Panel, woran das Zusammenspiel der Komponenten getestet werden konnte.
- In HAP 4 wurden alle Arbeiten hinsichtlich der Datenanalyse gebündelt. Dieses HAP hat eine zentrale Bedeutung, da darin der Grundstein für die fusionierte Signalanalyse und die anschließende Strukturbewertung gelegt wurde. Zusätzlich zur passiven Modalanalyse (OMA) musste ein Konzept für die Schwingungsanregung entwickelt werden. Eine Herausforderung war we-

gen den enormen Datenmengen die störungsfreie Datenerfassung und Archivierung der Messdaten aller vier Messpfade in einer Datenbank. Für die Verknüpfung und Steuerung war ein Modul Schnittstellen geplant.

- Das letzte HAP 5 diente zur Validierung. Neben der simulativen Validierung der jeweiligen Messprinzipien war zentraler Bestandteil in diesem HAP die Instrumentierung der Türumgebungsstruktur, die Vorbereitung der Messkampagne sowie deren Durchführung und abschließende Analyse.

Der Großteil der Arbeiten konnte so, wie ursprünglich vorgesehen, durchgeführt werden. Jedoch waren einige Anpassungen technischer Natur und in der zeitlichen Abfolge notwendig, da sich zwischen Planung des Verbundprojektes und der Bearbeitung einige Voraussetzungen geändert hatten. Wie bereits unter den Voraussetzung in Abschnitt 2 bereits beschrieben, war aufgrund zeitlicher Verzögerungen auch eine kostenneutrale Projektverlängerungen notwendig. Der zeitliche Ablauf der Arbeitspakete ist im Balkenplan in Abbildung 2 visualisiert, wobei die ursprüngliche Planung blau eingefärbt ist, die dann tatsächliche Bearbeitung in grün. Hier ist auch die Laufzeitverlängerung berücksichtigt.

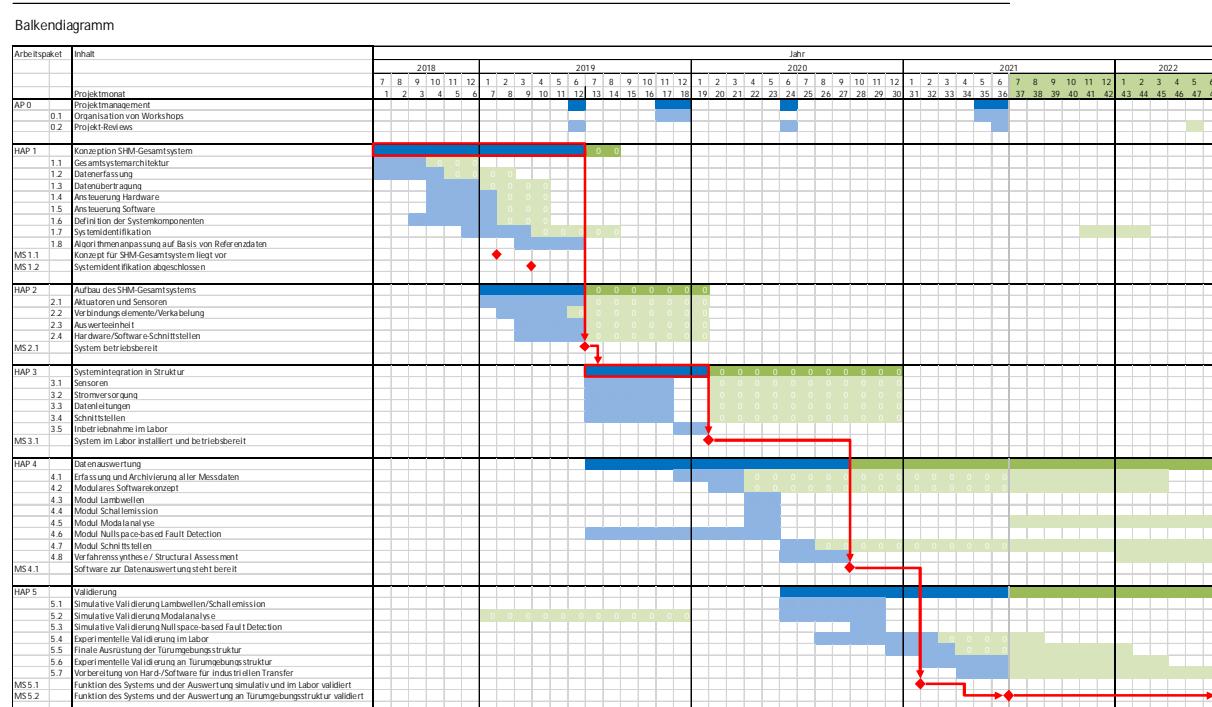


Abbildung 2: Balkenplan im Projekt KamoS

Die wesentlichen, mit dem Projektträger abgestimmten Änderungen in KamoS waren:

- Einführung eines zusätzlichen Testobjekts in Form eines von DLR zur Verfügung gestellten 3-Stringer-Panels. In der ersten Hälfte der Laufzeit stand die Türumgebungsstruktur nicht zur Verfügung und ihr Schädigungsgrad durch vorangegangene Versuche war unklar. Deswegen musste das 3-Stringer-Panel zusätzlich instrumentiert werden, ein Teil der Forschungsarbeit wurde am 3-Stringer-Panel durchgeführt. Die Erprobung des Demonstrators an der Türumgebungsstruktur erfolgte zu einem späteren Zeitpunkt.

- Die Integrationsprobleme des würfelförmigen Beschleunigungssensors in den flachen Einheitssensor führten zu einer Zwischenlösung mit einem separaten Beschleunigungssensor. Die Entwicklung des Einheitssensors/Aktors wurde auf ein Folgeprojekt verschoben.
- Entgegen der ursprünglichen Planung konnte vorrangig aus Kostengründen nur $\frac{1}{4}$ der Türumgebungsstruktur mit hochfrequenter Sensorik ausgestattet werden, die Beschleunigungssensoren wurden auf der Gesamtstruktur installiert.
- Datensynchronisierung und –fusion für SHM verlangt die Kongruenz der Sensorpositionen. Mit dem geänderten Konzept und der Aufgabe des Einheitssensors war dies nicht möglich. Deshalb kann Structural Assessment nur durch eine Ingenieurentscheidung erreicht werden, eine Automatisierung war nicht möglich.

Insgesamt konnte das Projekt durch die durchweg kollegiale Zusammenarbeit im Konsortium trotz der erheblichen technisch und pandemiebedingten Verzögerungen zu einem guten und erfolgreichen Ende geführt werden.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

4.1. Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Im Projekt wurden keine Verfahren oder Schutzrechte dritter benutzt. Alle im Projekt entwickelten Funktionsmuster wurden unter Nutzung von Standardkomponenten wie Schaltschränke, Netzteile, Rechner, usw. entwickelt, konstruiert und realisiert.

4.2. Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Literaturrecherchen wurden zeitgemäß im Internet durchgeführt. Einige wichtige Publikationen sind nachfolgend aufgeführt:

- Friedmann, H., Kraemer, P., 2016: Vibration-based condition monitoring, structural health monitoring, population monitoring – Approach to a definition, EWSHM, Bilbao 2016
- Friedmann, H., Kraemer, P., Ebert, C., 2014 a: Structural Health Monitoring von Offshore-Windenergieanlagen auf der Grundlage von Schwingungsmessungen – von der Blattüberwachung zum Monitoring der Gesamtanlage. In: PLUS, Heft 11/2014, S. 2445-2451
- Friedmann, H., Kraemer, P., Ebert, C., 2014 b: Vibration based structural health monitoring (SHM) for offshore wind turbines – from monitoring the blades to a concept for foundation structures, in: Proceedings IWEC Hannover 2014
- Kraemer, P., Friedmann, 2015: Vibration-based structural health monitoring for offshore wind turbines – Experimental validation of stochastic subspace algorithms, in: Wind and Structures, Vol. 21, No. 6 (2015) 693-707, DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/was.2015.21.6.693>
- Kraemer, P., et al., 2016: Experimental validation of stochastic subspace algorithms for structural health monitoring of offshore wind turbine towers and foundations, EWSHM, Bilbao 2016
- Farrar, C.R., Worden, K., 2007. An introduction to structural health monitoring. Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci. 365, 303–315.
- Grießmann, T., Penner, N., Schmoch, A., & Rolfes, R. (2014). Non-Destructive Determination of Serviceability and Load Bearing Capacity of Floor Slabs Using Dynamic Methods. 7th European Workshop on Structural Health Monitoring. Nantes, France.
- Penner, N., Grießmann, T., & Rolfes, R. (2015). Baudynamische Zustandsanalyse von Deckenkonstruktionen. VDI-Berichte: 5. Band 2244, 187-196.
- Friedmann et al. (2016). Entwicklung eines Structural Health Monitoring Systems für Gründungsstrukturen von Offshore Windenergieanlagen – Großversuch zur Ermittlung messtechnischer Grundlagen, in: Messen in der Geotechnik 2016, S. 309 – 325
- Zang, C.; Friswell, I.; Imregun, M. (2003): Structural Health Monitoring and Damage Assessment Using Measured FRFs from Multiple Sensors, Part I: The Indicator of Correlation Criteria, in: Key Engineering Materials Vols. 245-246 (2003) pp. 131-140
- Zang, C.; Friswell, I.; Imregun, M. (2003): Structural Health Monitoring and Damage Assessment Using Measured FRFs from Multiple Sensors, Part II: Decision Making with RBF Networks, in: Key Engineering Materials, Vols. 245 – 246 (2003), pages 141 – 148, doi:10.4028/www.scientific.net/kem.245-246.141.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während der Bearbeitung des Forschungsvorhabens wurde intensiv mit den Konsortialpartnern zusammengearbeitet. Eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen gab es nicht.

II. Eingehende Darstellung zu

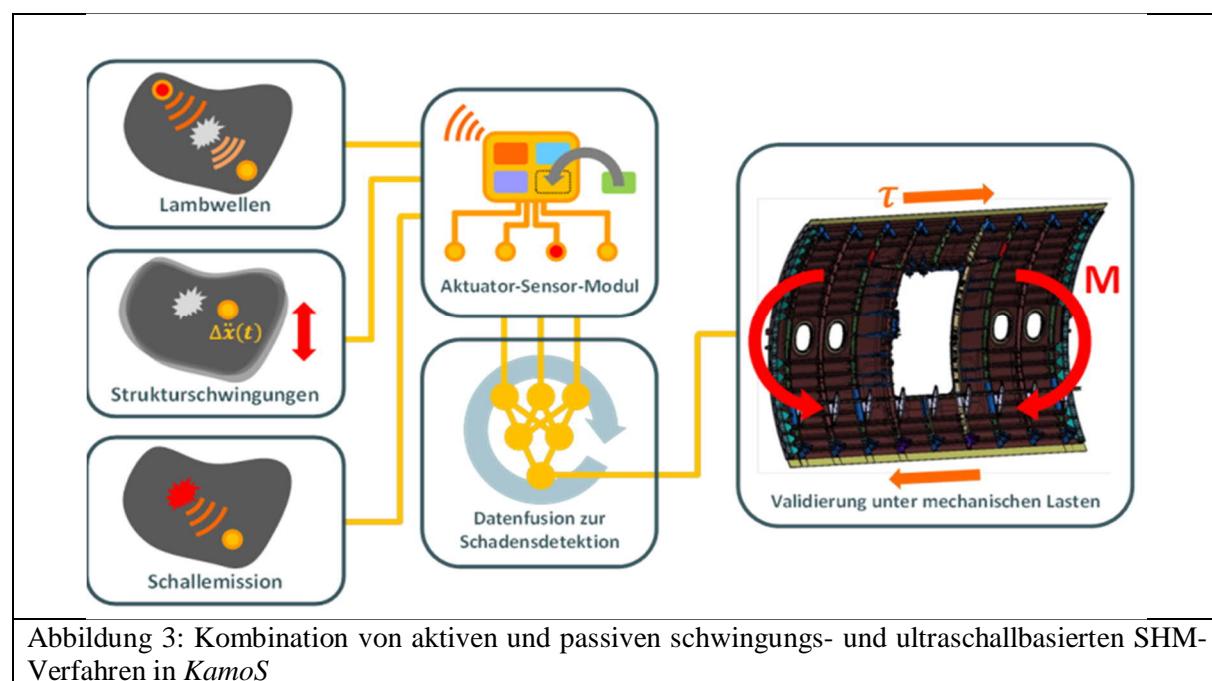
1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Für die Durchführung des Teilverhabens von Wölfel Engineering GmbH + Co. KG wurden insgesamt 600 T€Selbstkosten mit einer Förderquote von 65 % bewilligt.

Die Zuwendung wurde für die anteilmäßige Finanzierung der Bearbeitung aller Arbeitspakete zur Erreichung der für Wölfel gesetzten Projektziele verwendet. Im Folgenden werden die vorgegebenen Ziele (aus dem Antrag) kurz beschrieben und die erzielten Ergebnisse dargestellt.

Übergeordnete Ziele des Gesamtprojekts:

Übergeordnete Ziele des Gesamtprojekts war die Entwicklung eines integrierten Systems zur Überwachung (engl.: Structural Health Monitoring – SHM) von Faserverbund-Luftfahrtstrukturen. Mit einem solchen System können Strukturen im Betrieb kontinuierlich auf Schädigungseignisse und -fortschritt überprüft werden.



Die Ziele des Projekts bestanden zunächst in der Kombination von aktiven und passiven Verfahren zur Schadensdetektion und damit der Verknüpfung der beiden wichtigsten SHM-Methoden, Abbildung 3.

Das zukünftige SHM-System soll die schwingungsbasierte Vorgehensweise mit den Ultraschallmethoden AE (acoustic emission) und AU (acousto ultrasonics) vereinigen. Das ermöglicht eine zuverlässige Schadenslokalisierung und die Detektion des Schadensfortschritts.

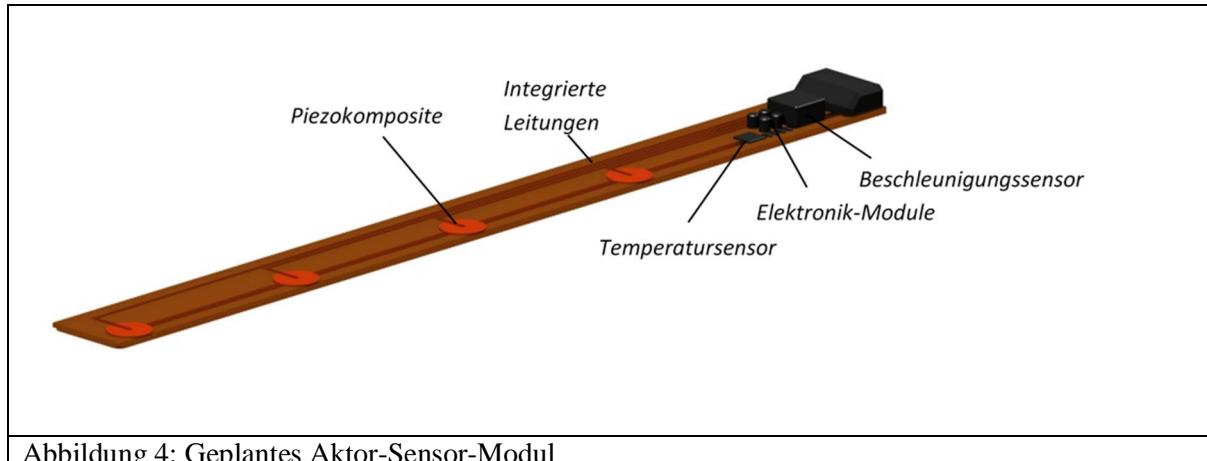


Abbildung 4: Geplantes Aktor-Sensor-Modul

Weiterhin sollte ein robustes Aktor-Sensor-Modul entwickelt werden, das für alle eingesetzten SHM-Methoden gleichermaßen geeignet ist und Dehnungen, Beschleunigungen und Temperaturen messen kann. Zuletzt sollte ein derartiges SHM-Gesamtsystem auf die Türumgebungsstruktur appliziert werden, welche mechanischen Betriebslasten unterzogen werden sollte. Unter Last sollte das SHM-Gesamtsystem zeigen, dass es in der Lage ist, zuverlässig Schäden zu detektieren und zu lokalisieren.

Arbeitsziele des Teilverhabens:

1. Ein Konzept für ein SHM-Gesamtsystem sollte entwickelt werden, HAP 1

Zu Beginn des Verbundprojektes wurde in enger Abstimmung mit den Konsortialpartnern mehrere Varianten für die Gesamtsystemarchitektur innerhalb von HAP 1 diskutiert und bewertet. Fokus von Wölfel lag hier auf den Anforderungen bezüglich schwingungsbasierter Sensorik und der dazu notwendigen Peripherie. Es hat sich herausgestellt, dass die durchgehende Kombination und Integration der verschiedenen Mess- und Auswerteverfahren aufgrund der erheblichen Unterschiede in den Anforderungen unterschiedliche Vor- und Nachteile mit sich bringt. Für das Gesamtkonzept mussten folgende Randbedingungen berücksichtigt werden:

- Größe der zu überwachenden Struktur / des zu überwachenden Bereichs
- Notwendige Anzahl an Sensoren (Piezokeramiken, ACC)
- Maximal realisierbare Größe eines Sensormoduls im Fertigungsprozess
- Maximaler Abstand der Piezokeramiken für AU-Messprinzip
- Max. Anzahl an Ultraschallkanäle je Elektronikeinheit zur Vorverarbeitung
- Maximale Prozesstemperatur
- Max. Abmessung der „Fremdkörper“ zur Integration in den Sensor-Laminier-Prozess
- uvm.

Unter Berücksichtigung dieser Voraussetzungen wurden verschiedene Designkonzepte entwickelt und diskutiert. Die vollständige Integration aller Sensoren in ein gemeinsames Sensorik-Modul konnte aus

mehreren Gründen nicht realisiert werden. Insbesondere die für die schwingungsbasierte Messung notwendige Auflösung der Beschleunigungssensoren in Verbindung mit der für die Integration notwendigen Temperaturbeständigkeit waren hauptausschlaggebend. Hochauflösende Beschleunigungssensoren sind mit einem Stückpreis von > 1.000 € vergleichsweise teuer. Zum Schutz sind diese häufig in einem massiven Gehäuse vergossen. In dieser Größe und Form ist eine Integration im Laminierprozess nicht möglich. Auch die Nachfrage bei Hersteller Micromega Dynamics, ob die Sensorik auch ohne Gehäuse erworben werden kann, war leider negativ.

Schwingungsbasiertes SHM zielt auf die Überwachung des Schwingungsverhaltens der gesamten Struktur. Folglich sollen die Sensoren auch auf der gesamten Struktur verteilt sein. Die exakten Positionen wurden im späteren Projektverlauf ermittelt. Hingegen ist AU ein sehr lokales Messprinzip. Die resultierende Anzahl an Sensormodulen wird durch den relativ geringen Abstand (ca. 10 cm) der Piezo-Sensoren definiert. Die Elektronik eines Moduls und auch der Laminierprozess erlauben es, Sensormodule mit max. acht Piezosensoren zu fertigen. Aufgrund der Geometrie der zu untersuchenden Türstruktur mit den einzelnen Stringern und Spanten müssen viele der Module klein sein. In Summe wären für die Überwachung der gesamten Türstruktur ca. 120 Sensorelemente notwendig gewesen. Diese Anzahl hätte jedoch das Budget gesprengt.

Aus diesen Gründen wurde eine vollständige Integration aller Sensoren in einem Modul im Projekt nicht weiterverfolgt und auf ein Folgeprojekt verschoben. Die Alternative sah zwei verschiedenen Sensormodule - eines mit und eines ohne integrierten Beschleunigungssensor - vor. Auch hier war die nicht lösbare Herausforderung, dass aufgrund des Gehäuses und der hohen Prozesstemperatur eine direkte Integration des High-Resolution Beschleunigungssensors nicht möglich war.

Das für das Projekt resultierende Systemdesign sah eine mechanische Schnittstelle zur Integration der Beschleunigungssensoren vor, wie in Abbildung 5 schematisch gezeigt. Über eine mechanische Schnittstelle (z.B. integrierte Metallstifte, Gewindehülsen) kann an den Sensorpositionen, wo ein Modul mit Beschleunigungssensor gewünscht ist, ein Sensor nachträglich mechanisch adaptiert werden. Ebenso sieht das Design eine elektrische Schnittstelle vor, um ggf. die Sensorsignale in die Vorverarbeitungselektronik mit einzubinden. Die Elektronik ist ebenfalls über eine mechanische Schnittstelle mit dem Sensormodul verbunden, da auch hier die hohen Prozesstemperaturen eine Gesamtintegration deutlich erschwert hätten. Zudem hätte dies den Nachteil, dass evtl. beschädigte oder fehlerhafte Elektronikkomponenten nicht mehr hätten getauscht werden können.

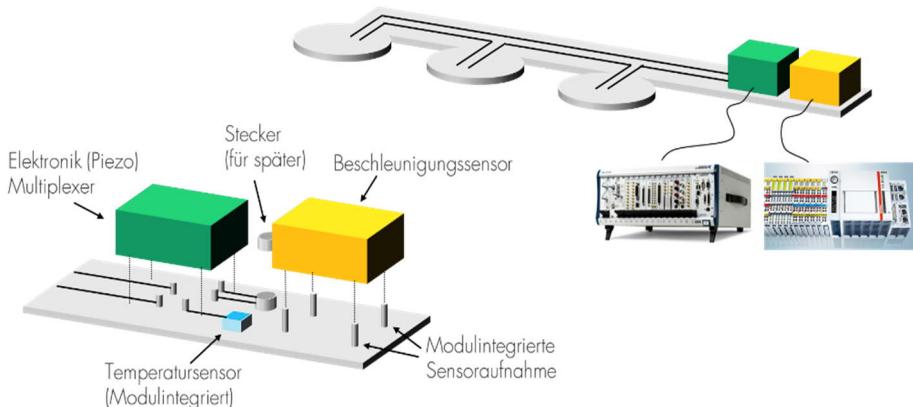


Abbildung 5: Design des Sensormoduls mit mechanischer/elektrischer Schnittstelle für den Beschleunigungssensor

In Abbildung 6 ist das Konzept für das SHM-Gesamtsystem für die weitere Bearbeitung im Projekt *KamoS* dargestellt. Im ersten Schritt werden für die Piezosensoren und die Beschleunigungssensorik jeweils eigene Datenerfassungssysteme (DAQ) verwendet um den jeweiligen Anforderungen gerecht zu werden. Die DAQ sind über ein Triggersignal miteinander synchronisiert, sodass der gleiche Zeitstempel verwendet werden kann.

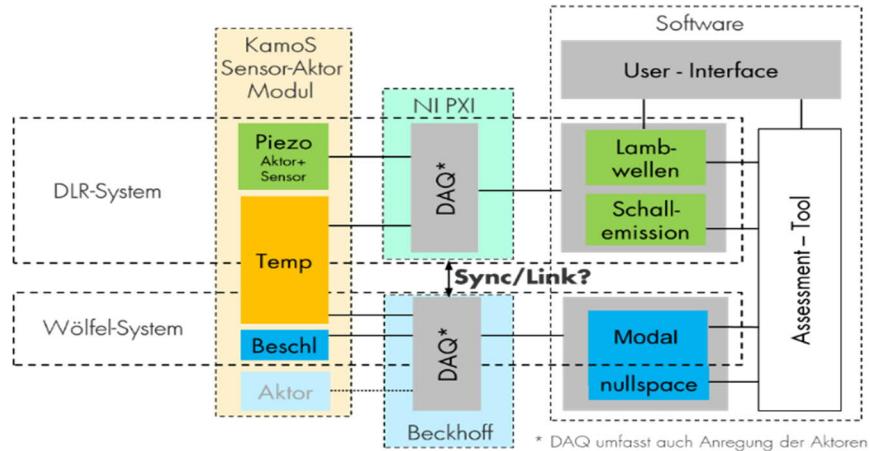


Abbildung 6: Konzept für das SHM-Gesamtsystem

Die Anbindung des Sensormoduls wird kabelgebunden realisiert, insbesondere die hochfrequenten Messungen der Ultraschallverfahren hätten eine sichere, verlustfreie und stabile Funkanbindung enorm aufwändig gestaltet. Mit Blick auf eine spätere Verwertung bei Luftfahrtanwendungen sind Funkanwendungen mit Bedacht zu wählen um Störungen und Einflüsse auf flugrelevante Bauteile und Anwendungen (z.B. Radar, Navigation, ...) zu vermeiden. Für die anfallenden Messdaten der jeweiligen Verfahren wurde von der IMA ein Cloud Data-Storage aufgesetzt, sodass eine zentrale Ablage aller Daten gewährleistet werden konnte. Dariüber hinaus wurden auch mit mehreren DMS (Dehmessstreifen) lokale Spannungen mit gemessen und abgelegt, welche für die Steuerung der Prüfeinrichtung genutzt wurden.

In Abbildung 7 ist das Testsetup mit den jeweiligen Schnittstellen und Triggersignal übergeben schematisch dargestellt.

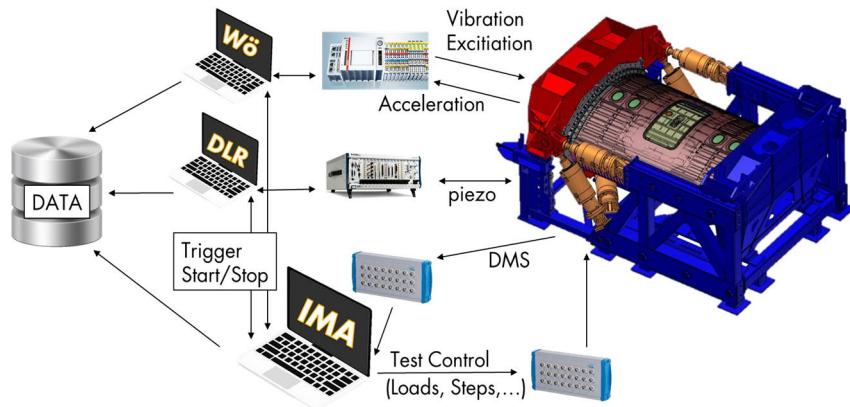


Abbildung 7: Prüfeinrichtung bei der IMA mit Schnittstellen zu den Messsystemen, Steuerung und DataStorage

Der Rechner der IMA zur Steuerung des Prüfstandes dient als Master-Einheit. Von dort werden die Slave-Systeme von Wölfel und dem DLR gesteuert, sodass eine durchgehende und automatisierte Messprozedur umgesetzt werden konnte. Details zur Versuchsdurchführung und den daraus gewonnenen Ergebnissen sind gegen Ende des Berichts ausführlich dargestellt.

2. Eine Systemidentifikation des Testobjekts soll durchgeführt werden, HAP 1

Ein weiteres Arbeitsziel war, eine Systemidentifikation der final zu untersuchenden Türumgebungsstruktur durchzuführen. Damit sollten Referenzdaten gewonnen werden, anhand derer eine weitere Entwicklung der Überwachungsverfahren erfolgen kann. Dazu zählen beispielsweise die Sensorplatzierungen und die notwendige Auflösung der Sensoren. Die ursprüngliche Planung sah vor, dass dynamische Verhalten experimentell zu erfassen, indem die Struktur bei der IMA mit Standard-Messtechnik vermessen wird. Vorgesehen war diese Aufgabe in AP 1.7 im Zeitraum M5 bis M9 nach Projektbeginn. Leider war es so, dass die Türstruktur, welche ursprünglich im Projekt MAAXIMUS gebaut und getestet wurde, noch am DLR in Stade im Zustand des Projektabschlusses aus MAAXIMUS war. Dies bedeutet, die Struktur war in einer Aufbewahrungshalterung eingebaut und noch mit der Sensorik bestückt. In diesem Zustand konnte leider keine experimentelle Systemidentifikation vorgenommen werden, da sich die Randbedingungen gegenüber denen im späteren Teststand signifikant unterscheiden. Ein Transport und Einbau in den Teststand war zu diesem frühen Projektzeitpunkt noch nicht möglich, da der Teststand noch für andere Projekte vorgesehen war. Aus diesem Grund haben wir entschieden, die Systemidentifikation mittels FEM-Simulationen anzugehen und später im Projekt den experimentellen Abgleich nachzuholen, wenn die Struktur dann in der Prüfeinrichtung eingebaut und die alte Messtechnik abgerüstet ist. Zusätzlich wurde für experimentelle Arbeiten ein nicht geplantes 3-Stringer-Panel von DLR zur Verfügung gestellt und instrumentiert.

Für den Aufbau des FE-Modells mussten einige Annahmen getroffen werden, da aus Geheimhaltungsgründen nicht alle Informationen zur Verfügung standen, z. B. exakte Geometrie, Lagenaufbau, Materialdaten usw. Als FE-Simulationsumgebung wurde ABAQUS von Dassault Systems verwendet. In Abbildung 8 ist das auf begründeten Ingenieurannahmen beruhende finale FE-Modell dargestellt.

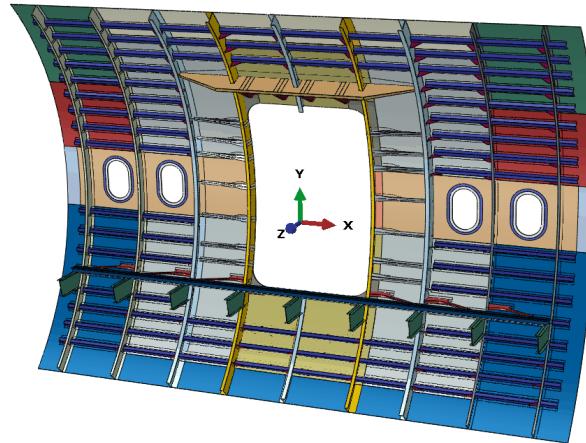


Abbildung 8: FE-Modell der Türumgebungsstruktur

Auf dieser Grundlage konnte eine Modalanalyse im Rechner durchgeführt werden. Dabei wurden die Randbedingungen so gewählt wie sie im späteren Versuch auch vorgesehen waren. Die Struktur wird nur an den beiden Seiten rechts und links eingespannt. Die Ränder oben und unten bleiben, im Gegensatz zum Projekt MAXXIMUS, frei. Ebenso werden die Verbindungen zur Bodenbindung (grüne Streben unterhalb der Türöffnung) nicht fest eingespannt. Auch die Türe selbst sowie die Fenster werden nicht wieder in die Struktur eingebaut, die Luken bleiben offen. Dies bedeutet aber auch, dass während des Tests keine Innendruckbelastung aufgeprägt werden kann. Abbildung 9 zeigt exemplarisch die Schwingungsformen von drei beliebig gewählten Eigenfrequenzen.

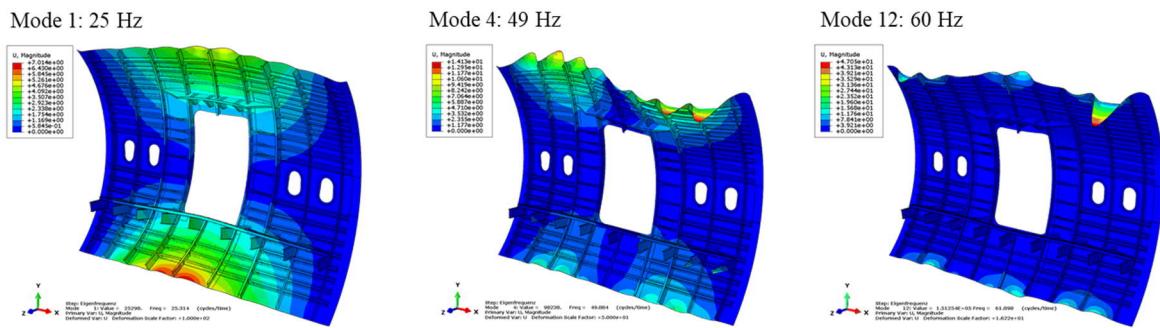
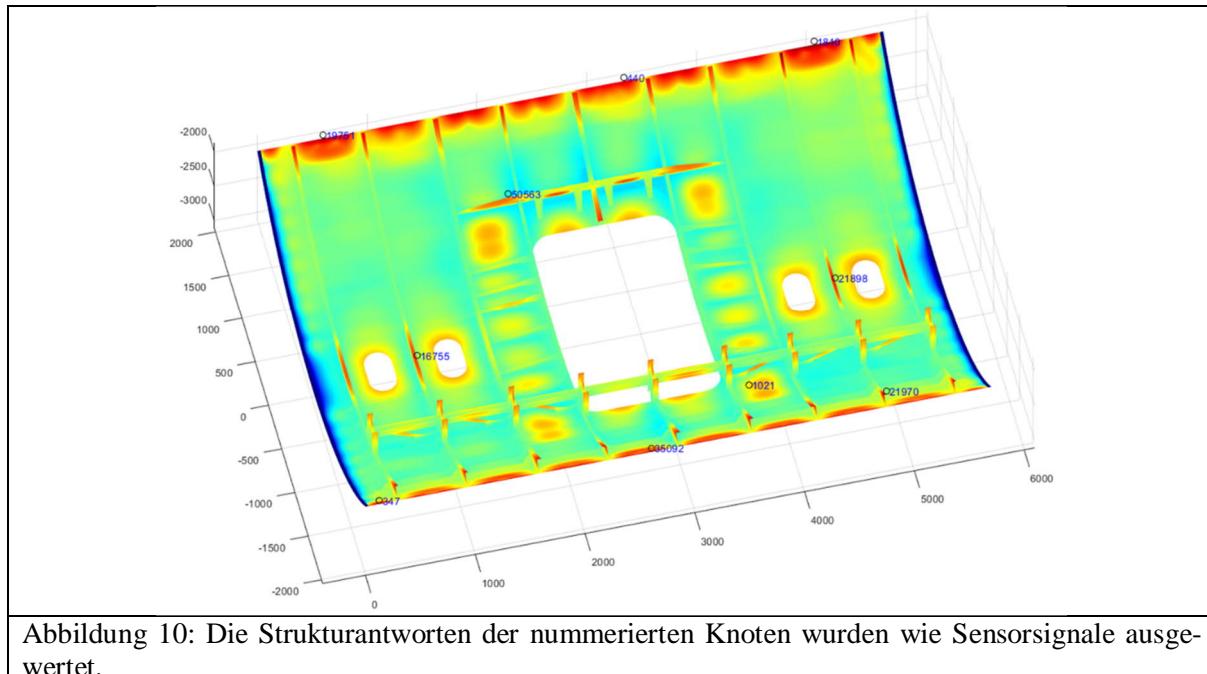


Abbildung 9: FE-Simulation und Auswertung der Eigenmoden der Türumgebungsstruktur. Exemplarisch sind die 1., 4. Und 12. Mode mit den Eigenfrequenzen 25 Hz, 49 Hz und 60 Hz dargestellt.

Auf 3 Knoten des FEM-Modells wurde sowohl ein Sweepsignal mit einer Amplitudenhöhe von 20 N im Frequenzbereich von 30 Hz bis 1.000 Hz aufgegeben als auch ein Zufallssignal. Die „Aktorknoten“ lagen unter der Schwelle der Türluke und an der oberen Einspannung direkt über der Türluke sowie 3 Spanten weiter rechts. Die Auswertung erfolgte an allen Positionen, an denen im späteren Versuch Beschleunigungsaufnehmer positioniert wurden, vgl. Abbildung 10.



Von der umfangreichen Auswertung sei hier nur die Strukturantwort auf das Sweep signal an den 10 Sensorpositionen dargestellt, vgl. Abbildung 10, Abbildung 11.

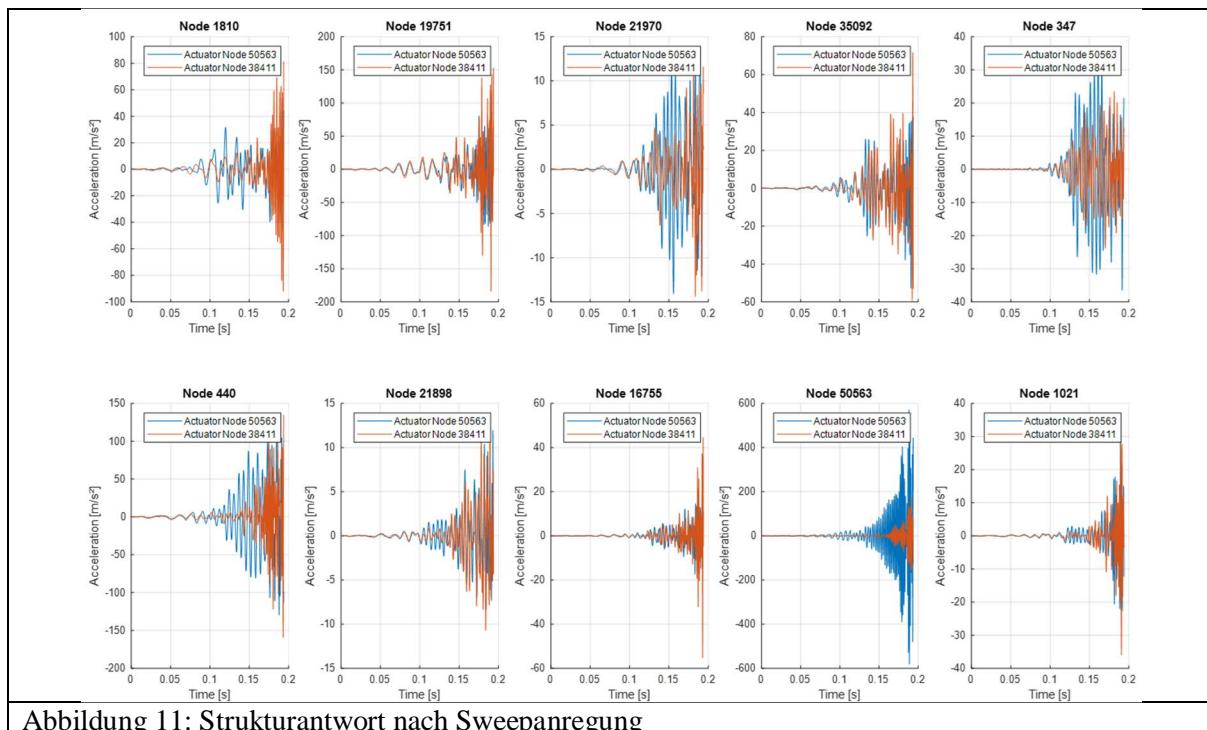
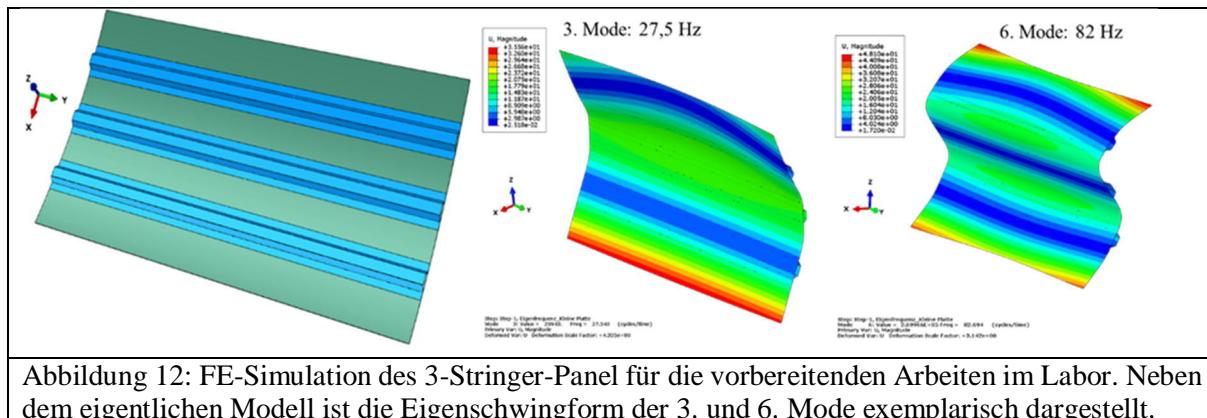


Abbildung 11: Strukturantwort nach Sweepanregung

Auch das 3-Stringer-Panel wurde modelliert, wobei die Datenlage hier wesentlich besser war, vgl. Abbildung 12. Neben der Simulation der Eigenmoden diente das FEM-Modell auch dazu, ein erstes Tool zur Bestimmung optimaler Sensorpositionen zu entwickeln, vgl. HAP 4.



3. Ein Testsystem soll im Labor an einer Teststruktur installiert und in Betrieb genommen werden, HAP 2

Weil zu Projektbeginn die Türumgebungsstruktur nicht verfügbar war, musste ein Teil Arbeiten an einer Ersatzstruktur, einem 3-Stringer-Panel durchgeführt werden. Die Laboruntersuchungen an der Uni Siegen fanden an dieser vom DLR zur Verfügung gestellten Struktur statt. Wie für die Türumgebungsstruktur wurde auch für das 3-Stringer-Panel ein FEM-Modell erstellt, vgl. Abbildung 16.

Auch hier wurden mit dem entwickelten Tool (vgl. HAP 4) basierend auf einer Modalanalyse die idealen Sensorpositionen bestimmt. In enger Zusammenarbeit mit der Uni Siegen wurden erstes Test im Labor durchgeführt, wie in Abbildung 13 gezeigt.

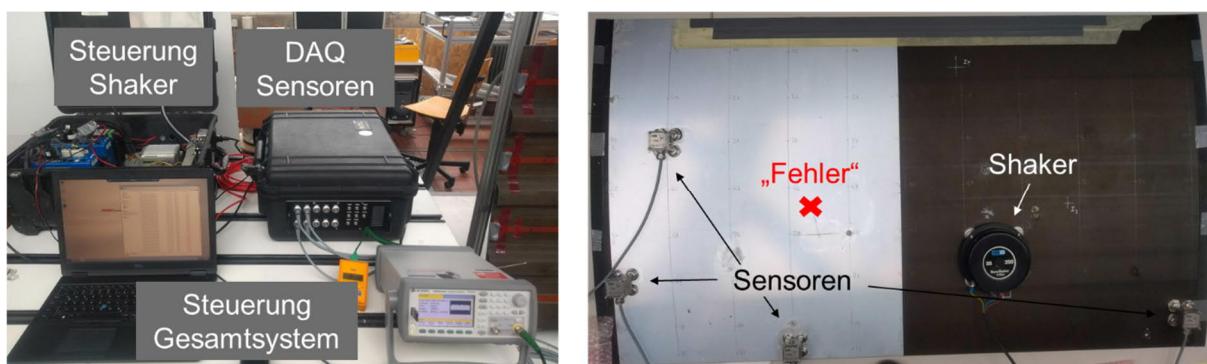


Abbildung 13: Aufbau des Testsetup mit dem 3-Stringer-Panel und einem ersten Test-Messsystem im Labor der Uni Siegen.

Das Testsystem bestand aus vier Beschleunigungssensoren und einem Shaker zur Anregung. Als „Fehler“ wurde eine Zusatzmasse angebracht. Das Panel war an der Oberkante fest eingespannt.

In der zweiten Projekthälfte stand die Türumgebungsstruktur bei der IMA in Dresden für die Versuche zur Verfügung. Das Messsystem konnte installiert werden, Abbildung 14.

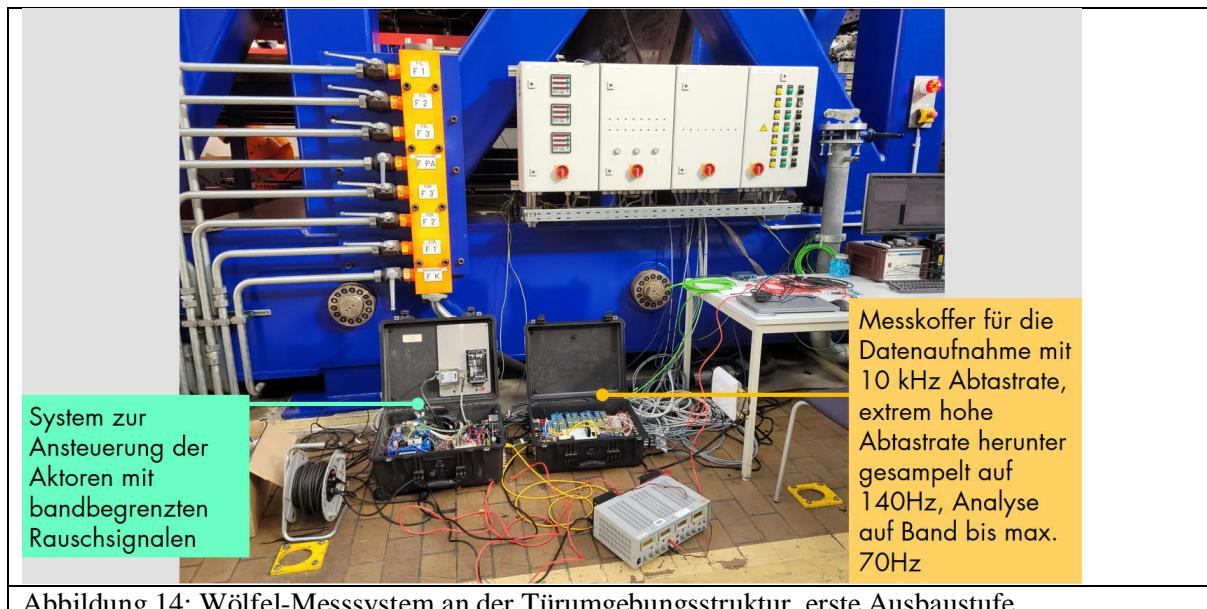


Abbildung 14: Wölfel-Messsystem an der Türumgebungsstruktur, erste Ausbaustufe

Für die Sensorplatzierung wurde wie beim 3-Stringer-Panel die neu entwickelte Software benutzt, vgl. HAP 4 und Abbildung 15.



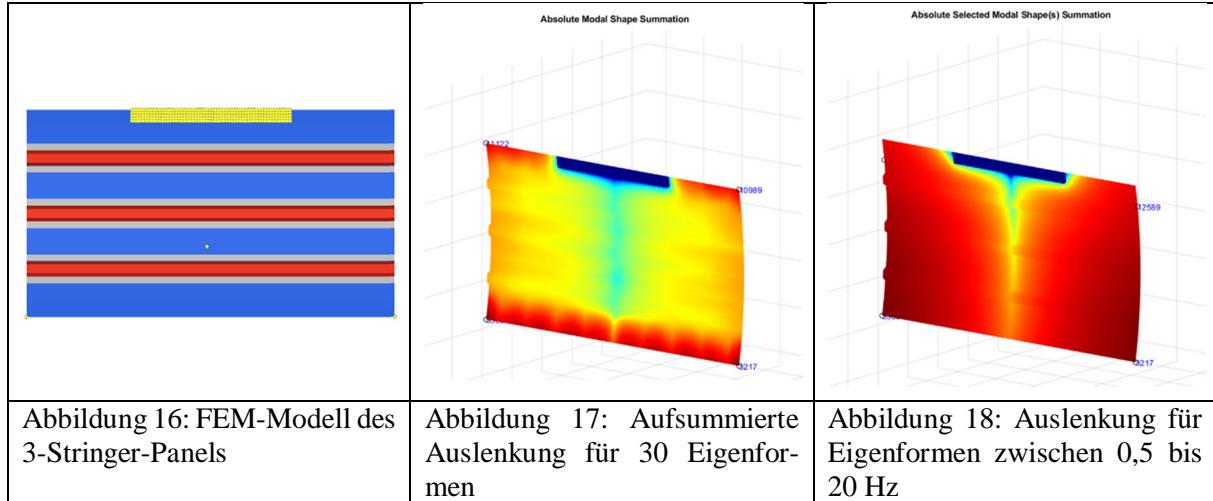
Abbildung 15: Finale Sensor- und Aktorpositionen für das schwingungsbasierte SHM-System zur Durchführung der Messkampagne an der Türstruktur

4. Software zur Datenauswertung soll entwickelt und funktionsfähig bereitgestellt werden, HAP 4

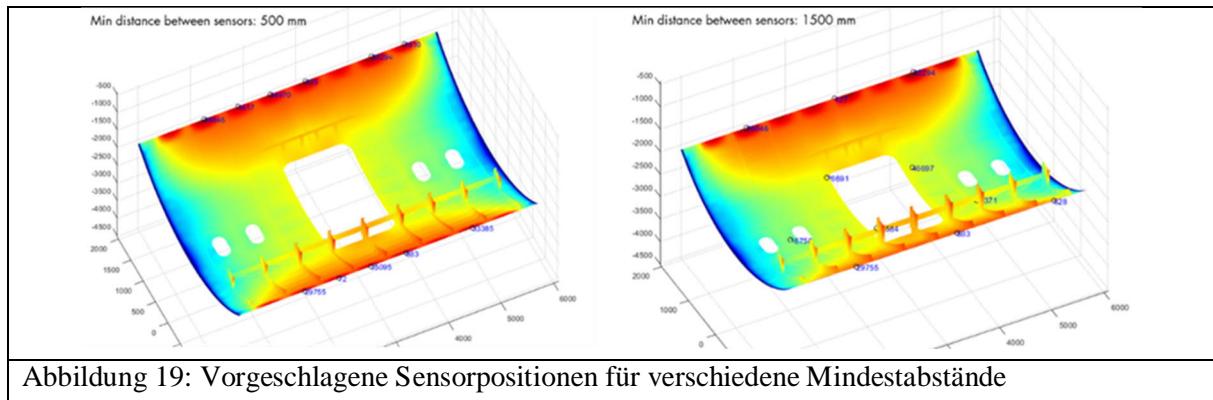
Zwei Software-Tools wurden auf der Grundlage von FEM-Simulationen entwickelt. Wie Eingangs bereits dargestellt, wurde mit einem 3-Stringer-Panke begonnen. Diese Vorgehensweise hatte wegen der wesentlich einfacheren Geometrie durchaus Vorteile. Ausgangspunkt war eine FEM-Modell des 3-Stringer-Panels, Abbildung 16. Die Entwicklungsumgebung war Matlab und Python. Eine graphische Benutzeroberfläche wurde zunächst nicht entwickelt.

Aufbauend auf die simulatorische Modalanalyse wurde ein Tool entwickelt, um die idealen Positionen für die Beschleunigungssensoren zu finden. Werden Sensoren z. B. in einem Schwingungsknoten der relevanten Eigenschwingungen platziert, sind diese „blind“ gegenüber diesen Schwingungen, was zu

fehlerhaften Aussagen bzw. verringerte Sensitivität des schwingungsbasierten Überwachungssystems führen kann. Generell unterscheiden sich die jeweiligen Schwingungsformen und somit auch die Positionen der max. Auslenkungen. Das entwickelte Softwaretool erlaubt es, die Moden einzugrenzen, die für die Strukturüberwachung relevant sind. Diese werden im nächsten Schritt normiert um alle Anteile gleich zu gewichten.



Da in der späteren Versuchsdurchführung keine ambiente Anregung zu erwarten ist, wird eine gezielte Anregung der Struktur mit Shakern umgesetzt. Dieser Umstand wird durch eine zweite Normierung berücksichtigt. Anschließend werden die Eigenformen aufsummiert. Als Ergebnis können die Positionen mit der maximal zu erwartenden Auslenkung für die gewünschte Modensumme ausgegeben werden. Weitere Randbedingungen, die gesetzt werden können, sind z.B. Mindestabstände zwischen gefundenen Maxima um globale/lokale Maxima berücksichtigen zu können, das Anregungsspektrum um Frequenzanteile gezielt zu manipulieren und die Anzahl an gewünschten Sensorpositionen, die ausgegeben werden sollen. Abbildung 17, Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen exemplarisch eine Auswahl an Ergebnissen für die Türstruktur.



In Abbildung 19 wurden nur die ersten zehn Eigenformen berücksichtigt und die Farbskalierung entspricht der maximalen Auslenkung, wobei blau keine bzw. kleine und rot große Auslenkungen wiederspiegeln. Sehr gut zu erkennen ist so auch die feste Einspannung an den Seiten. In der linken Darstellung in Abbildung 19 liegen alle gefundenen Sensorpositionen am oberen und unteren Rand, bei Vergrößern

der Mindestabstände zwischen den Sensoren werden auch lokalere Maxima mit berücksichtigt. In Abbildung 20 werden die zu berücksichtigenden Moden variiert.

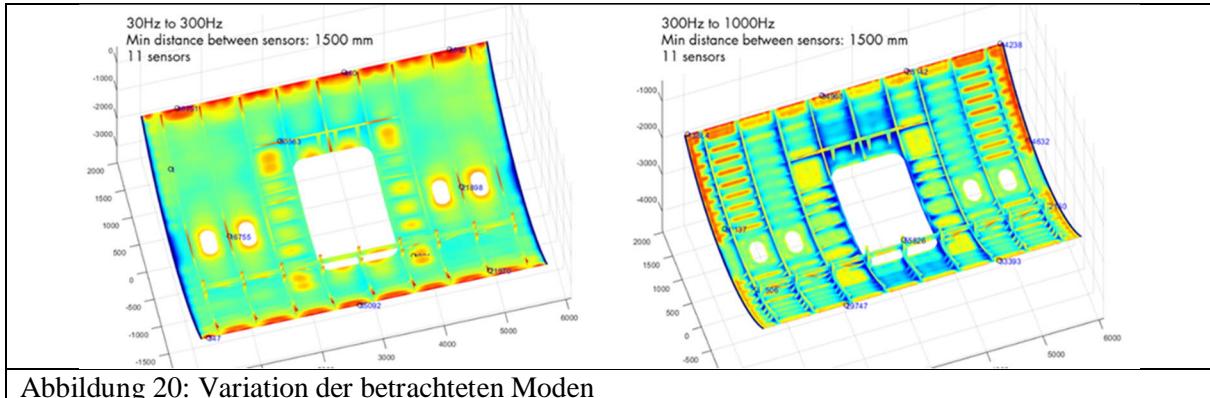


Abbildung 20: Variation der betrachteten Moden

Während in der linken Darstellung in Abbildung 20 Moden zwischen 30 Hz und 300 Hz gewählt wurden, sind in der rechten Darstellung höhere Moden zwischen 300 Hz und 1000 Hz ausgewählt. Sehr schön zu erkennen ist hier die zunehmende Lokalisierung der höheren Moden in die einzelnen Felder zwischen Stringer und Spannen mit zunehmenden Frequenzen. Insbesondere für Betrachtung von lokalen Schädigungen, wie z.B. Impactschäden an der Schalenstruktur, bieten sich die höheren Frequenzen an.

Das zweite Tool war ein Schadensindikator, mit dem die Auswirkung von Fehlern bzw. Schädigungen auf die Transferfunktionen betrachten zu können, da nicht mit ambienter sondern zusätzlicher mit äußerer Anregung gearbeitet wird. Dies geschah auch in Vorbereitung auf die Entwicklung von Schadensindikatoren. Im ersten Schritt wurden die Randbedingungen (Einspannung und Position der Anregung) in das Modell integriert. Zusätzlich können in die Simulation verschiedene Fehler in verschiedener Ausprägung eingebracht werden. Exemplarisch ist dies in Abbildung 21 für eine Delamination und einen Impact-Schaden gezeigt.

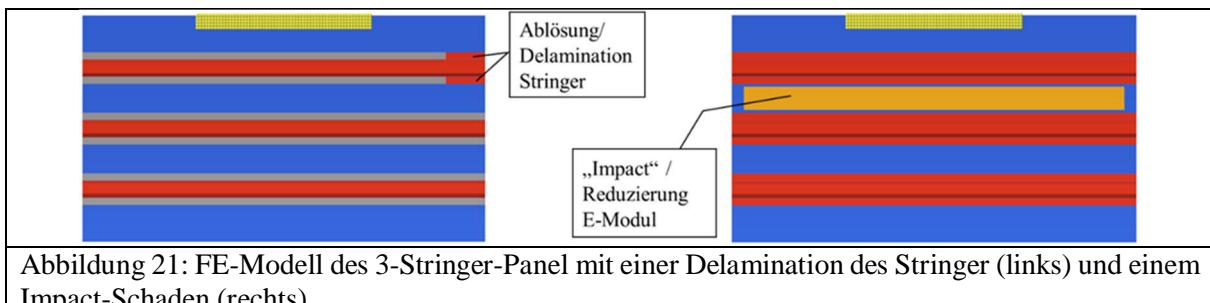


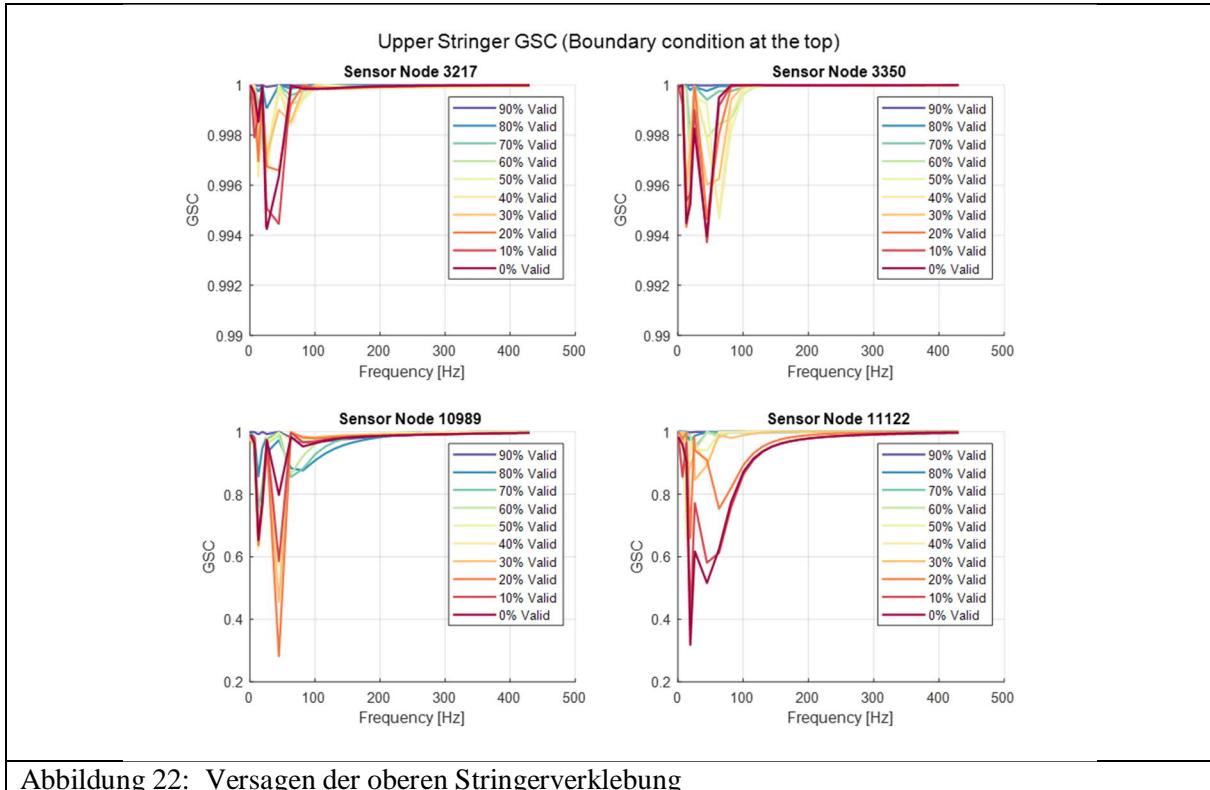
Abbildung 21: FE-Modell des 3-Stringer-Panel mit einer Delamination des Stringer (links) und einem Impact-Schaden (rechts).

Zunächst werden die modalen Auslenkungen für vorgewählte Frequenzen aus dem Abaqus-Ergebnisfile *.ODB entnommen. Danach werden die Strukturanworten zwischen vorgewählten Aktorpositionen und Sensorpunkten berechnet. Entsprechend der Methode von Zang, C.; Friswell, I.; Imregun, M. (2003) werden die GSC (Global Shape Correlations) berechnet. Dabei liegt der Wert der GSC immer zwischen 0 und 1, wobei 1 für eine ungeschädigte Struktur steht.

$$x_a(\omega) = \frac{2|\{H_{x1}(\omega)\}^H \{H_{x2}(\omega)\}|}{(\{H_{x1}(\omega)\}^H \{H_{x1}(\omega)\}) + (\{H_{x2}(\omega)\}^H \{H_{x2}(\omega)\})}, \text{ where}$$

H_{x1} =FRF of undamaged model, H_{x2} =FRF of damaged model, $\{\cdot\}^H$ =complex conjugate transpose.

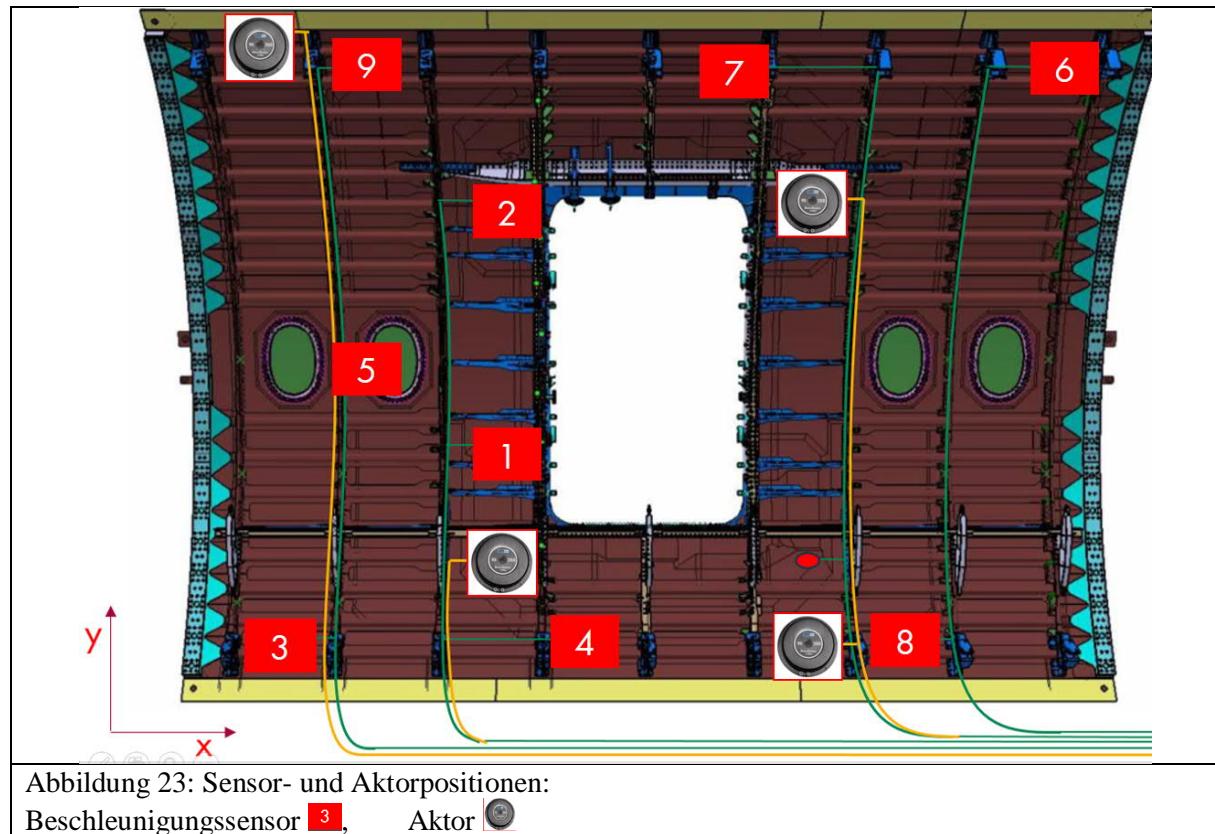
Bei der Anwendung des zweiten Tools müssen mehrere Simulationen der geschädigten und der ungeschädigten Struktur durchgeführt werden, vgl. Abbildung 22.



5. Die Funktion des Teilsystems zur schwingungsbasierten Strukturüberwachung inklusive der damit gekoppelten Datenauswertung soll durch Simulation und im Labor validiert werden, HAP 5

Mit Hilfe einer Modalanalyse sollte untersucht werden, ob strukturelle Änderungen der Türumgebung infolge der eingebrachten Schäden detektiert werden können. Dabei lag der Fokus bezüglich von Änderungen der Eigenfrequenzen im niederfrequenten Bereich. Als Modalanalyseverfahren wurde eine von Peter Kraemer entwickelte Software zur operational modal analysis (OMA) genutzt: Als Schadensindikator kam die in einem Vorläuferprojekt QS-M Grout ebenfalls von Peter Kraemer erfolgreich weiterentwickelte und erprobte covariance-driven stochastic subspace identification (SSI-COV) zum Einsatz, vgl. Kraemer, P., Friedmann, 2015 und Friedmann et al. (2016). Für die Analyse wurden alle Sensoren – mit Ausnahme des defekten Sensors an Messposition 1, vgl. Abbildung 23 – zusammen betrachtet und die folgenden Koordinaten-Kombination berechnet: X, Y, Z, XYZ. Die folgende Darstellung konzentriert sich auf die Ergebnisse der Modalanalyse in XYZ, da bei den Analysen in die einzelnen Koordinaten manche Moden nicht immer stabil zu identifizieren waren.

Die Ergebnisse wurden für weitere Analysen nach den drei Lastfällen (loadcase, bending down, bending left, tension) und den acht Lastschritten (loadstep) sortiert, um zeitliche Veränderungen unter gleichen Bedingungen – also einer bestimmten Kombination aus Lastfall und Lastschritt – untersuchen zu können. Die Ergebnisse für den Lastfall LL-FXXs (tension) und den Lastschritt 0 werden hier exemplarisch gezeigt.



Im Frequenzbereich zwischen 20 bis 70 Hz sind rechts neben der Referenz die unterschiedlichen Schädigungsstufen D01 bis D12 farblich hinterlegt dargestellt, Abbildung 24.

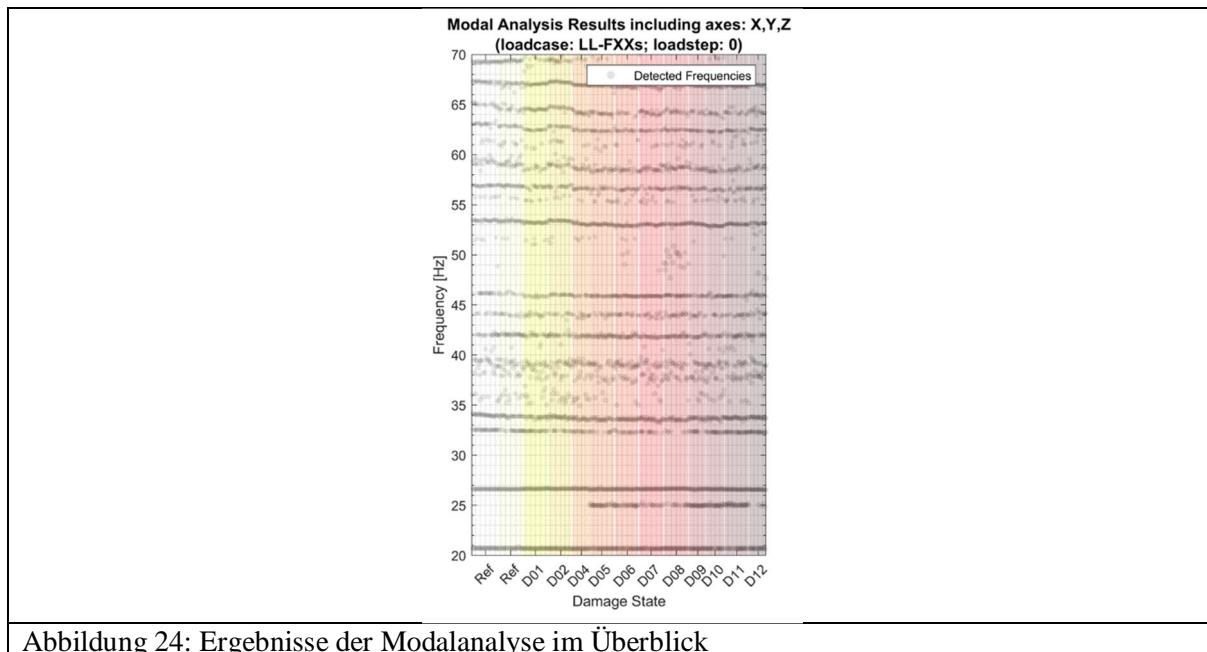


Abbildung 24: Ergebnisse der Modalanalyse im Überblick

Mit Hilfe der Modalanalyse konnten mehrere stabile Frequenzen identifiziert werden. Allerdings sind nicht alle gleichermaßen sensitiv bezüglich der eingebrachten Schädigungen. Deshalb werden nur die 4 Frequenzen ausgewählt, deren Verlauf sich mit zunehmendem Schaden verringert.

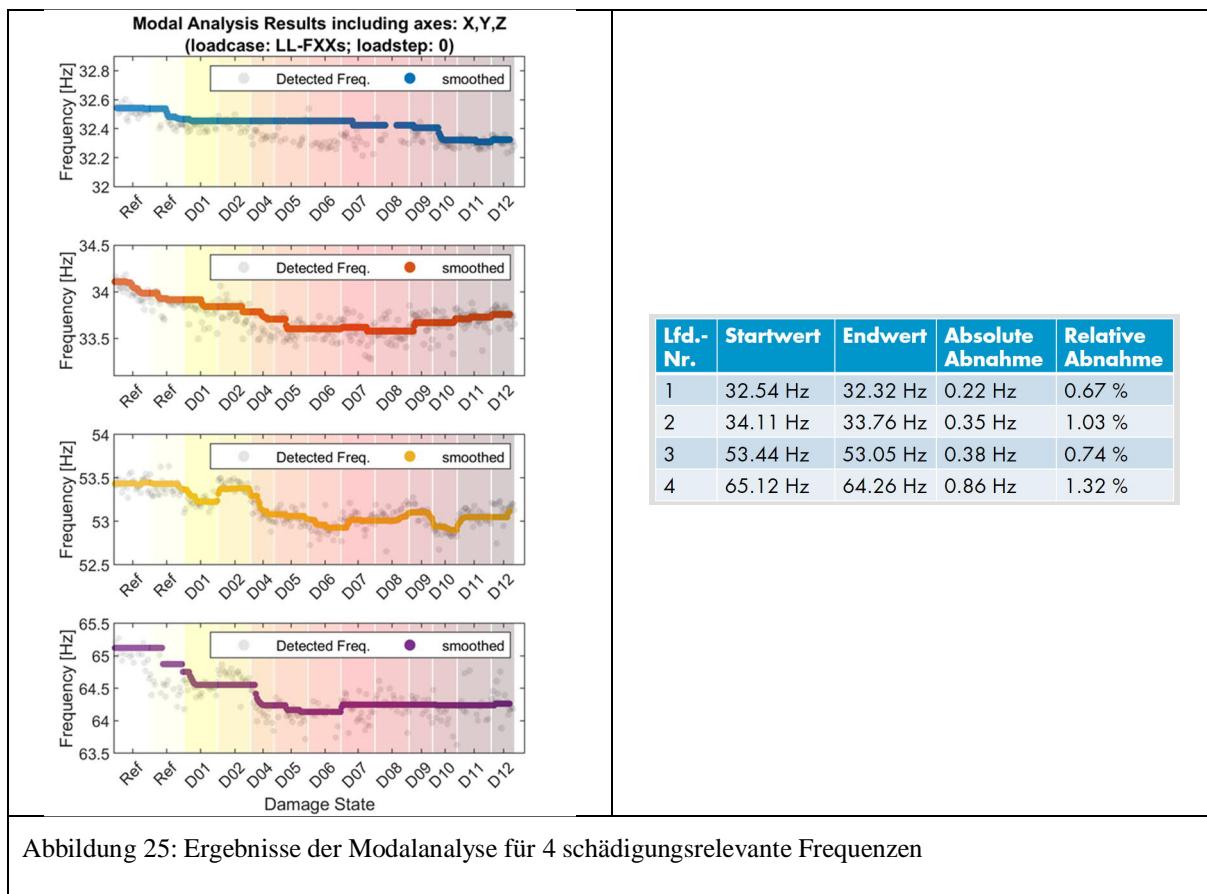


Abbildung 25: Ergebnisse der Modalanalyse für 4 schädigungsrelevante Frequenzen

Bei allen vier ausgewählten Frequenzen ist eine Abnahme der Frequenz mit zunehmender Schädigung zu beobachten. Die Abnahme beträgt zwischen $\sim 0.22\text{Hz}$ und $\sim 0.86\text{Hz}$ bzw. $\sim 0.67\%$ und $\sim 1.32\%$, vgl. Abbildung 25. Für 4 der 8 Lastschritte wurde untersucht, in wieweit dieses Verhalten auch bei anderen Lastschritten zutraf.

Die vier Lastschritte, für die die meisten Datenpunkte vorliegen, werden in Abbildung 26 verglichen. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Frequenz mit zunehmender Last höhere Werte annimmt. Es kommt also zu einer Verschiebung der Frequenz unter Last. Die Frequenz haben bei allen vier Lastschritten einen sehr ähnlichen Verlauf. Die Änderungen in Folge der höheren Last sind größer als die durch Schädigung induzierten Änderungen. Höhere Lasten sind Teil der environmental and operational conditions, EOCs. Sie müssen zuverlässig separiert werden, wenn Strukturschäden detektiert werden sollen.

Für eine sichere Detektion struktureller Veränderungen muss gewährleistet sein, dass die zuvor beobachtete Abnahme (absolut und relativ) der Frequenzen größer ist als die Streubreite der detektierten Frequenzwerte pro Messung. Deshalb soll in einem Streudiagramm der zuvor ausgewählten Frequenzen zu analysieren, vgl. Abbildung 27.

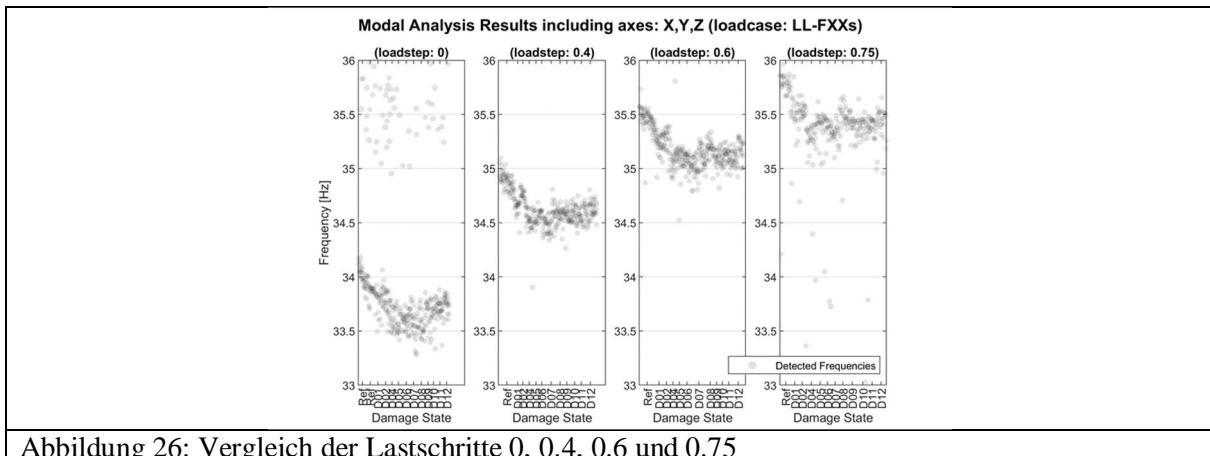


Abbildung 26: Vergleich der Lastschritte 0, 0.4, 0.6 und 0.75

Darüber hinaus kann anhand der „gesmoothten“ Verläufe der Streudiagramme identifiziert werden, ob sich der Trend der Frequenz über die Zeit verändert. Das Verfahren zum smoothen – also dem identifizieren stabiler Frequenzstränge – beruht dabei auf Kriterien für stabile Frequenzen, Dämpfungen und Eigenformen. Ähnlich den Stabilitätskriterien beim Postprocessing der Modalanalyse.

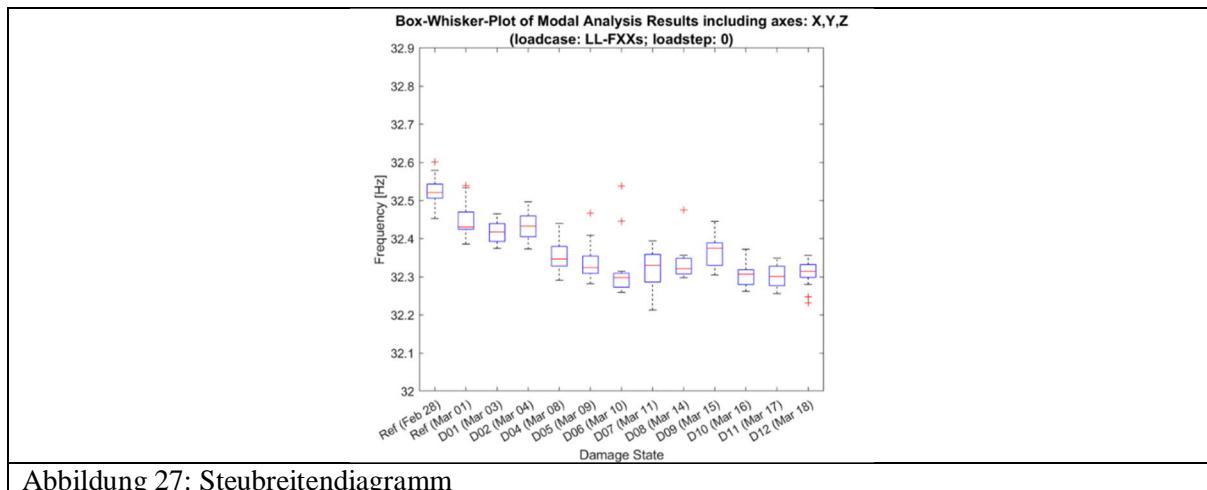


Abbildung 27: Steubreitendiagramm

Durch Darstellung der Frequenzverläufe als Box-Whisker-Plot soll abschließend untersucht werden, inwieweit sich das Streudiagramm zu unterschiedlichen Schädigungsphasen mit dem zu Beginn der Messung (Referenzphase) schneidet. Dabei markiert der zentrale rote Strich den Medianwert, die Unterkante der Box das 25% bzw. 75% Perzentil und die sogenannten Whisker die Extremwerte der Punktewolke. Ausreißer werden durch rote Kreuze markiert, vgl. Abbildung 27.

Im Vergleich zur Abnahme des Frequenzwerts ist die Streubreite des Streudiagramms recht schmal. Auch wenn der „gesmoothte“ Frequenzverlauf nicht immer ideal durch die Punktewolke verläuft, nimmt er kontinuierlich ab. Das Box-Whisker Diagramm bestätigt dies. Schon ab der zweiten Referenzphase gibt es keine Überschneidung der 25/75-Perzentil-Boxen mehr. Bei den meisten Schädigungsphasen gibt es auch keine Überschneidung der Extremwerte mit denen der ersten Referenzphase.

Mit dem schwingungsbasierten SHM-Verfahren können Veränderungen der Resonanzfrequenzen sowohl in Folge von Schädigungsvorgängen als auch von Änderungen der EOCs nachgewiesen werden. Deshalb ist die zuverlässige Unterscheidung zwischen Schadereignis und EOC eine grundlegende Voraussetzung.

2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

- Die Personalkosten für die Projektmitarbeiter sind der mit Abstand größte Posten. Insgesamt wurden Mitarbeiter verschiedener Kategorien eingesetzt, sodass die projektspezifischen Aufgaben effektiv und zielgerichtet bearbeitet werden konnten.
- Die für die Durchführung des Vorhabens notwendige Sensorik und Messtechnik wurde angeschafft und zu Systemen zusammengebaut.
- Reisekosten sind für die zu Projektbeginn noch durchgeführten Präsenz-Projekt- und Arbeitstreffen sowie die praktischen Tätigkeiten zur Ausrüstung der Türstruktur und Durchführung des Großversuches an der IMA angefallen.

3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Bearbeitung der konkreten Aufgaben innerhalb der Arbeitspakete wurde von hochqualifizierten Mitarbeitern mehrerer Geschäftsfelder durchgeführt. Für dieses Projekt waren insbesondere Kollegen der Teams aus Algorithmen- und Hardwareentwicklung sowie im Geschäftsfeld Virtual Mechanical Engineering involviert. Ohne Förderung wäre das Vorhabenziel nicht erreicht worden.

4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Im Projekt *KamoS* konnten sowohl in Bezug auf Schadenserkennung als auch in Bezug auf Schadenssimulation vielversprechende Ergebnisse erzielt werden.

5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind keine relevanten Ergebnisse Dritter bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens direkt relevant waren.

6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

Zeitschriftenartikel

Friedmann, Herbert; Kraemer, Peter; Nuber, Andreas; Schmidt, Christoph; Adam, Tobias: Combined Acoustic and Modal Structural Health Monitoring and Structural Assessment, Proceedings 14th International Workshop on Structural Health Monitoring, IWSHM 2023, Stanford, CA, USA, Submission ID 332, in printing

Konferenzbeiträge

Friedmann, Herbert; Kraemer, Peter; Nuber, Andreas; Schmidt, Christoph; Adam, Tobias: Combined Acoustic and Modal Structural Health Monitoring and Structural Assessment, Vortrag am 14.09.2023 anlässlich 14th International Workshop on Structural Health Monitoring, IWSHM 2023, Stanford, CA, USA

Vorträge