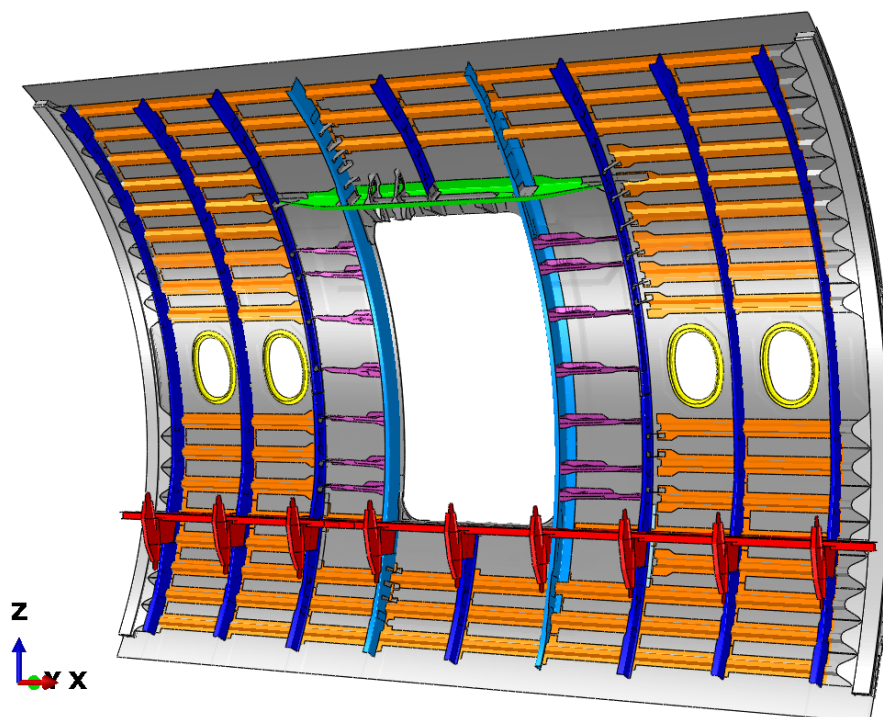




Öffentlicher Schlussbericht für das Projekt **LuFo VI-2 RapidEF_Enablers**

Verkürzung der Flugzeugentwicklung durch digital unterstützte Versuchsmethoden mittels virtueller Sensoren und SHM Systeme

Zuwendungsempfänger: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Systemleichtbau

Förderkennzeichen: 20D2105G

Projektlaufzeit: 1.1.2022 – 30.11.2025

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Dokumenteigenschaften

Titel	Abschlussbericht des LuFo VI-2 Forschungsprojekts „RapidEF_Enablers“ Verkürzung der Flugzeugentwicklung durch digital unterstützte Versuchsmethoden mittels virtueller Sensoren und SHM Systeme	
Förderer	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie	
Förderkennzeichen	20D2105G	
Projektlaufzeit	1.1.2022 – 30.11.2025	
Berichtszeitraum	1.1.2022 – 30.11.2025	
Zuwendungs- empfänger	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Systemleichtbau	
Berichtsdatum	29.05.2026	
Autoren	Bogenfeld, Raffael Marius; Moix-Bonet, Maria; Wille, Tobias	
Geprüft von	Schmidt, Daniel	
Kontakt	Raffael Bogenfeld DLR, Institut für Systemleichtbau Lilienthalplatz 7 38108 Braunschweig Raffael.Bogenfeld@dlr.de Tel.: +49 531 295 3579	Maria Moix-Bonet DLR, Institut für Systemleichtbau Lilienthalplatz 7 38108 Braunschweig Maria.Moix-Bonet@dlr.de , Tel.: +49 421 24420 1036

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	4
2. Projektübersicht	6
2.1. Aufgabenstellung	6
2.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
2.3. Planung und Ablauf des Vorhabens	7
2.4. Wissenschaftlicher und Technischer Stand	8
2.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
3. Eingehende Darstellung	10
3.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	10
3.1.1. AP1.1 Digitaler Zwilling	10
3.1.2. AP1.2 Virtuelle Sensoren	16
3.1.3. AP 1.3 Optimierte Instrumentierung	20
3.1.4. AP 1.5: Anforderungen und Validierung	21
3.1.5. AP 3.2.1: Schallbasierte SHM Verfahren	23
3.1.6. AP 3.4.2 KI Multi-modale Schadenserkenkung	29
3.1.7. AP 3.4.3 Zustandsüberwachung mittels digitalem Zwilling	32
3.2. wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	35
3.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	35
3.4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses	35
3.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts bei anderen Stellen	36
3.6. Veröffentlichungen	36
Abbildungsverzeichnis	37
Tabellenverzeichnis	38
Abkürzungsverzeichnis	38
Literaturverzeichnis	39

1. Einführung

Dieser Bericht beschreibt die Arbeiten und Ergebnisse der gesamten Projektlaufzeit des Lufo VI-2 Forschungsprojekts RapidEF_Enablers „Verkürzung der Flugzeugentwicklung durch digital unterstützte Versuchsmethoden mittels virtueller Sensoren und SHM Systeme“ im im von Airbus Operations geführten Förderverbundprojekt RapidEF_Enablers „Reduzierung der Entwicklungszeit eines neuen Flugzeugmusters durch signifikante Verkürzung des Zeitbedarfs eines EF Versuchs für den Ermüdungsnachweis“.

Die Partner im Verbundvorhaben sind nachfolgend gelistet:

- Airbus Operations, Hamburg
- Applus/IMA, Dresden
- HBK, Darmstadt
- Ifas, RWTH Aachen
- IzFP, Fraunhofer, Saarbrücken
- Carl Zeiss GOM Metrology GmbH, Braunschweig



Abbildung 1: Logos aller Partner im Konsortium des Verbundprojekts „Rapid EF Enablers“

Die globalen Ziele des Verbundvorhabens Rapid EF Enablers sind die Verkürzung von Rüstzeit, Versuchslaufzeit und der Stillstandszeit von Struktur-Ermüdungsversuchen. Die Arbeiten des Verbundvorhabens sind entsprechend dieser Ziele in drei Hauptarbeitspakete (HAP) unterteilt wie in Abbildung 2 dargestellt. Das HAP 1 hat zum Ziel, die Instrumentierung der Prüfstruktur durch die Nutzung eines kalibrierten digitalen Zwillings

des Prüfkörpers und durch den Einsatz von virtuellen Sensoren zu reduzieren. Das HAP 2 beschäftigt sich mit der Verbesserung der Regeltechnik, um eine schnellere Lastaufbringung zu erreichen. Im HAP 3 werden verschiedene Methoden zur Zustandsüberwachung und Beurteilung von Schäden in der Struktur erarbeitet, validiert und der Einfluss des Schadens unter Einsatz verschiedener Versagenskriterien bewertet. Die Arbeiten des DLR im eigenen Teilprojekt „Rapid EF Enablers“ erfolgen dabei ausschließlich in den HAP 1 und 3. Die Arbeitspakete welche die Arbeiten des DLR enthalten sind in Abbildung 2 durch Einrahmung hervorgehoben.

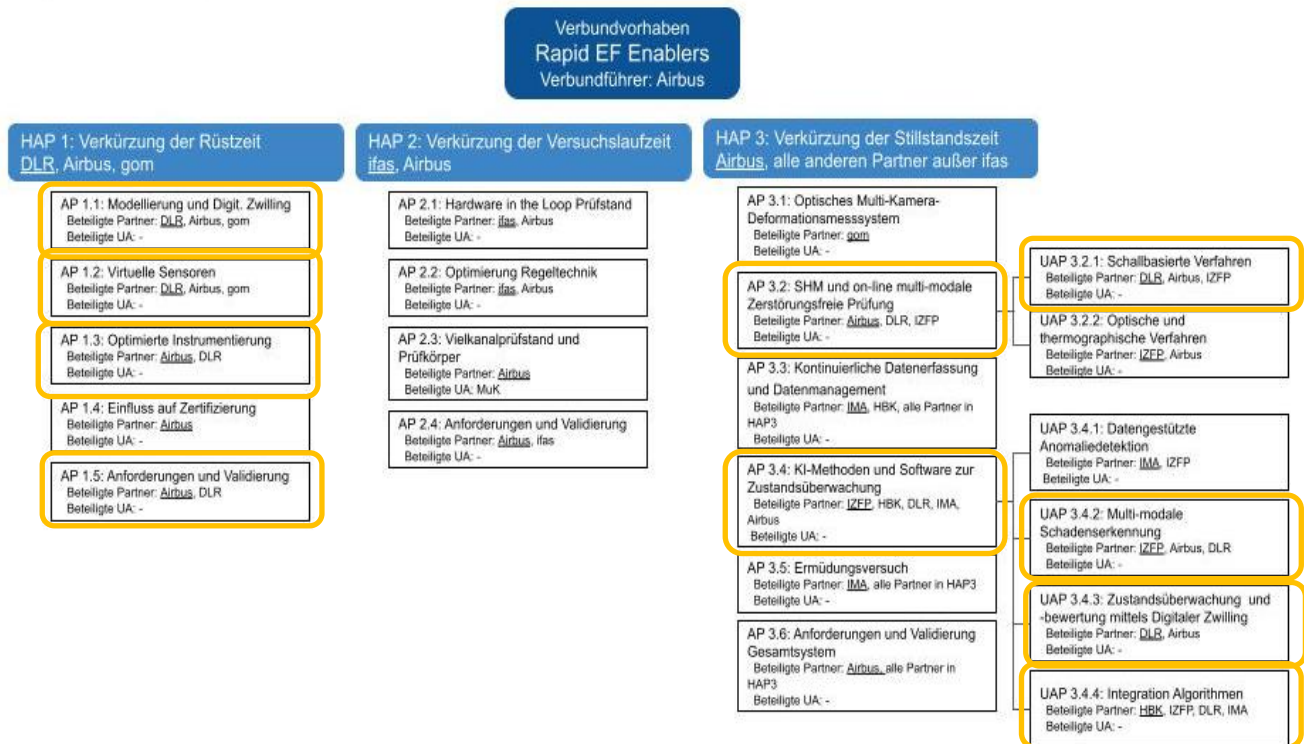


Abbildung 2: Arbeitspaketstruktur des Verbundprojekts Rapid EF Enablers

2. Projektübersicht

2.1. Aufgabenstellung

Die globalen Projektziele sind die *Verkürzung von Rüstzeit, der Versuchslaufzeit und der Stillstandszeit* von Struktur-Ermüdungsversuchen. Die Aufgabenstellungen für das DLR Teilprojekt sind von diesen globalen Zielen abgeleitet.

Ermüdungsversuche an Luftfahrtstrukturen sind ein wesentlicher Bestandteil der experimentellen Nachweisführung im Flugzeugentwicklungsprozess. Strukturversuche auf Komponenten- und Bauteilebene sind dabei mit erheblichem Aufwand für Versuchsvorbereitung, Instrumentierung, Durchführung, Überwachung und Auswertung verbunden. Ziel des DLR Teilprojekts war es daher, durch digital unterstützte Versuchsmethoden einen Beitrag zur Verkürzung von Rüstzeit, Versuchslaufzeit und Stillstandszeit solcher Ermüdungsversuchen zu leisten. Die Verkürzung der Rüstzeit sowie die Reduktion versuchsbedingter Stillstandszeiten soll durch **simulationsgestützte Auswertung** und **virtuelle Sensorik** sowie durch **strukturelle Zustandsüberwachung** erreicht werden.

Die Aufgabenstellung des DLR bestand einerseits darin, Methoden zur Online-Strukturbewertung zu entwickeln und für den Einsatz in einem versuchsbegleitenden digitalen Zwilling nutzbar zu machen. Hierzu sollten kalibrierte Strukturmodelle bereitgestellt werden, welche den realen Belastungszustand und die Randbedingungen des im Prüfstand eingespannten Versuchskörpers möglichst genau abbilden. Durch die Einbindung experimenteller Messdaten sollte die Abweichung zwischen Simulation und Versuch reduziert und eine verbesserte Auswertung des Strukturverhaltens während der Versuchsdurchführung ermöglicht werden. Durch virtueller Sensormodelle sollte zusätzliche Informationen über Belastungszustände erreicht werden, welche mit konventioneller Sensorik nur mit hohem Aufwand oder aufgrund eingeschränkter Zugänglichkeit nicht direkt messbar sind. Dadurch sollte untersucht werden, inwieweit physische Messstellen reduziert oder ergänzt werden können.

Darüber hinaus umfasste die Aufgabenstellung die Entwicklung und Erprobung von Verfahren des Structural Health Monitoring (SHM). Hierfür sollten schallbasierte Verfahren, insbesondere geführte Ultraschallwellen und Schallemission, sowie KI-basierte Auswerteverfahren eingesetzt werden, um Schäden während eines Ermüdungsversuchs automatisiert zu detektieren, zu lokalisieren und im Hinblick auf die strukturelle Integrität bewertbar zu machen.

2.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Grundlage der Arbeiten waren die am DLR vorhandenen Kompetenzen in der Strukturmechanik, der Modellierung und Bewertung von Faserverbundstrukturen und Schädigung [1]-[3] sowie in der Entwicklung von Methoden zur strukturellen Zustandsüberwachung [4],[5]. Insbesondere konnte auf Vorarbeiten zu digitalen Strukturmodellen, Schadensbewertung, geführten Ultraschallwellen, Schallemission und zerstörungsfreier Prüfung aufgebaut werden.

Für die methodische Entwicklung standen vorhandene Versuchsdaten und Modelle auf Coupon-Ebene und Paneel-Ebene zur Verfügung. Die Übertragung und Validierung der entwickelten Ansätze erfolgte im Projektkontext an der einer versteiften Rumpfschale als Versuchsobjekt einer repräsentativen Luftfahrtstruktur aus dem früheren Projekt MAAXIMUS zur Verfügung stand. Die Arbeiten wurden entsprechend der vorhandenen Kompetenzen mit den Verbundpartnern abgestimmt, insbesondere hinsichtlich Messdatenbereitstellung, optischer Verformungsmessung, Datenmanagement, Versuchsdurchführung und Anforderungen an die spätere Nutzung der digitalen und sensorbasierten Methoden.

2.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeitsanteile des DLR sind entsprechend der Aufgabenstellung in zwei Schwerpunkte untergliedert: Der Arbeitsschwerpunkt „digitaler Zwilling und virtuelle Sensoren“ und der Arbeitsschwerpunkt „SHM Systeme“. In HAP1 wurden Methoden zur Modellierung, Kalibrierung und Nutzung eines digitalen Zwillings sowie virtuelle Sensoren und deren Validierung bearbeitet. In HAP3 lagen die DLR-Arbeiten auf schallbasierten SHM-Verfahren, der multi-modalen Schadenserkennung, der Zustandsbewertung mittels digitalem Zwilling sowie der Integration der entwickelten Algorithmen.

Während der Projektlaufzeit, welche ursprünglich nur bis 31.3.2025 vorgesehen war, ergab sich die Notwendigkeit zur kostenneutralen Laufzeitverlängerung, bedingt durch einen späteren Start des Strukturversuchs an der MAAXIMUS Schale. Hierzu wurde bereits zu Beginn des Jahres 2024 im Projektkonsortium die Möglichkeiten zur kostenneutralen Laufzeitverlängerung gemeinsam erörtert. Mit den betroffenen Verbundpartnern wurde die Verlängerung der Arbeiten abgestimmt, so dass alle benötigten Inputs rechtzeitig bereitgestellt werden und die Lieferung der finalen Outputs später erfolgen konnte. Der wesentliche Grund in der Notwendigkeit einer Verlängerung um 8 Monate liegt im späteren Start des Strukturversuchs, welcher ursprünglich für 1/2024 vorgesehen war, letztlich aber erst 09/2024 erfolgen konnten. Die verbleibende Restlaufzeit nach Abschluss des Versuchsprogrammes wurde zur Auswertung des Datenschatzes für die Validierung und die Verbesserung der entwickelten Modelle genutzt.

Da der Strukturversuch an der MAAXIMUS-Schale für beide Schwerpunkte eine zentrale Rolle spielt, sollen im Rahmen der Laufzeitverlängerung Arbeitspakete aus beiden Schwerpunkten verlängert werden. Die betrifft AP1.2, AP 1.5, AP 3.2.1, AP 3.4.2 sowie AP 3.4.4. Die Verlängerungen der einzelnen Arbeitspakete sind im Balkenplan in Tabelle 1 entsprechend gekennzeichnet.

Tabelle 1: Balkenplan der Arbeitspakete des Projekts in ursprünglicher Planung und unter Berücksichtigung der kostenneutralen Verlängerung

		2022				2023				2024				2025		
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3
HAP 1: Verkürzung der Rüstzeit	1.1 Digitaler Zwilling															
	1.2 Virtuelle Sensoren															
	1.3 Optimierte Instrumentierung															
	1.5 Anforderungen und Validierung															
HAP 3: Verkürzung der Stillstandzeit	3.2.1 Schallbasierte SHM Verfahren															
	3.4.2 KI Multi-modale Schadenserkennung															
	3.4.3 Zustandsüberwachung mittels dig. Zwilling															
	3.4.4 Integration Algorithmen															

Arbeitsschwerpunkt
digitaler Zwilling und
virtuelle Sensoren

Arbeitsschwerpunkt
SHM Systeme

Verlängerte
Arbeitspakete

2.4. Wissenschaftlicher und Technischer Stand

Das Vorhaben knüpfte an den Stand der Technik zu digitalen Zwillingen, kalibrierten Strukturmodellen, virtueller Sensorik und Structural Health Monitoring an [6]-[8]. Digitale Zwillinge werden dabei als strukturelle Modelle verstanden, die durch Messdaten an reale Bauteile angepasst werden und dadurch Imperfektionen, geometrische Abweichungen, lokale Steifigkeitsänderungen oder reale Randbedingungen besser berücksichtigen können als idealisierte Berechnungsmodelle. Darauf aufbauend sollten virtuelle Sensoren zusätzliche Messgrößen wie Dehnungen an schwer zugänglichen oder nicht instrumentierten Bereichen bereitstellen. Hierfür werden bekannte mathematische Verfahren wie Surrogate Modelle oder Singulärwertzerlegung genutzt.

Für die Zustandsüberwachung wurde an etablierte Verfahren wie geführte Ultraschallwellen und Schallemission angeknüpft, die am DLR bereits in früheren Projekten an komplexen Faserverbundstrukturen untersucht wurden. Der technische Fortschritt des Vorhabens lag insbesondere in der Kombination aus kalibrierten digitalen Strukturmodellen, virtueller Messwerterfassung, versuchsbegleitender Auswertung und schallbasierten SHM-Verfahren unter realistischen mechanischen Belastungszuständen.

2.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Verbundprojektes erfolgte enge Zusammenarbeit innerhalb des Konsortiums, in HAP1 vor allem mit Airbus Operations, Carl Zeiss GOM Metrology, und HBK; in HAP3 vor allem mit Airbus Operations, Applus/IMA, IzFP Fraunhofer, Carl Zeiss GOM Metrology, und HBK. Über das Konsortium des Verbundvorhabens hinaus gab es keine weitere Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

3. Eingehende Darstellung

3.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

3.1.1. AP1.1 Digitaler Zwilling

Ziel des HAP ist die Bereitstellung digitaler Methoden zur Reduzierung der Rüstzeit eines Strukturversuchs. Das Arbeitspaket AP1.1 beinhaltet hierzu die Entwicklung einer Methode zur Kalibrierung eines digitalen Zwillings für Strukturversuche. Ausgehend von einem nominellen Finite-Elemente (FE) Modell sollte ein an den realen Prüfkörper angepasstes Simulationsmodell erzeugt werden, das die mechanische Antwort des Bauteils im Prüfstand genauer abbildet als dies durch das nominelle Modell möglich ist. Damit sollte eine Grundlage geschaffen werden, um die experimentellen Versuchsdaten simulationsbasiert zu erweitern und nachfolgend virtuelle Sensoren sowie eine verbesserte Strukturbewertung zu ermöglichen.

Im Projekt wurde hierfür ein Kalibrierprozess (siehe *Abbildung 3*) entwickelt, implementiert und validiert und schlussendlich publiziert [9], mit dem unsichere Modellparameter anhand experimenteller Messdaten mathematisch angepasst werden können. Der digitale Zwilling wurde dabei nicht als rein geometrisches Abbild verstanden, sondern stellt ein prüfkörperspezifisch kalibriertes Berechnungsmodell dar. Die Wahl der Kalibrierparameter ist dabei ein wesentlicher Einflussfaktor und stark modellabhängig. Berücksichtigt wurden insbesondere Unsicherheiten aus Materialsteifigkeiten, geometrischen Imperfektionen und nicht ideal bekannten Randbedingungen des Prüfstands. Diese Einflussgrößen wurden als Kalibrierparameter formuliert und über ein nichtlineares Least-Squares (LSQ) Verfahren iterativ angepasst.

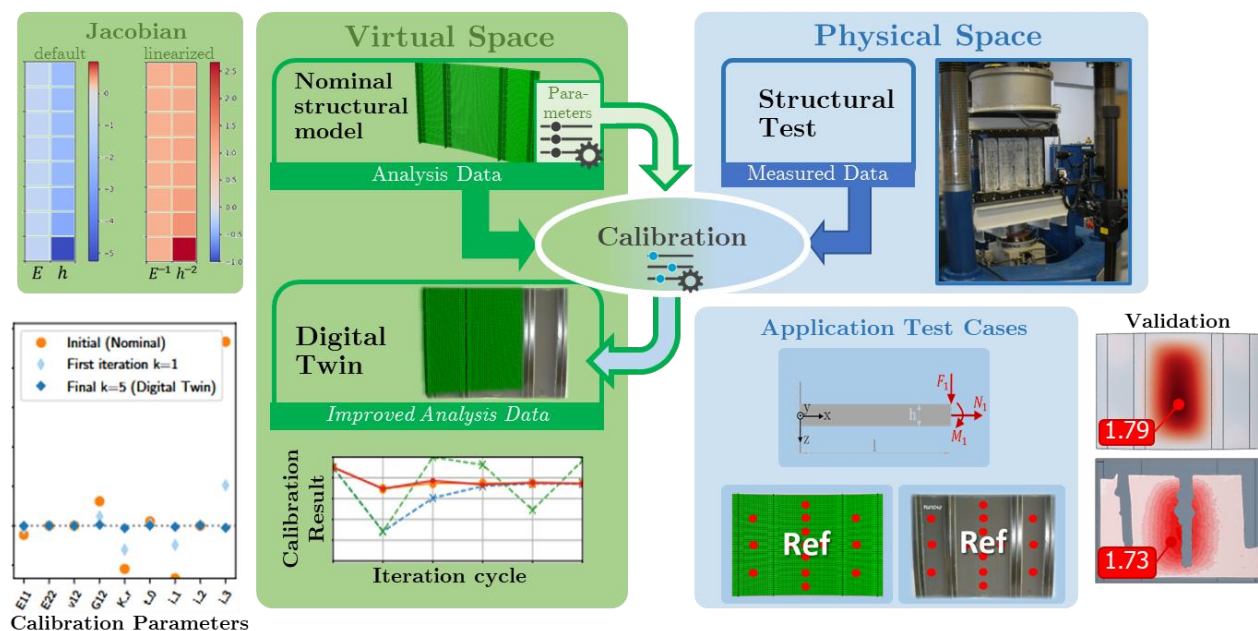


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Arbeiten zur Kalibrierung des digitalen Zwillings

Die entwickelte Kalibriermethode wurde zunächst an einem analytischen Balkenmodell verifiziert wie in *Abbildung 4* dargestellt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Parametertransformation, beispielsweise die Verwendung inverser Steifigkeitsgrößen, die Konvergenz und Robustheit der Kalibrierung deutlich verbessert. Hierdurch wird ermöglicht die Berechnung der Jacobi-Matrix, welche ein wesentlicher Schritt der nichtlinearen LSQ-Kalibrierung ist, nur einmalig zu Beginn der Optimierung durchzuführen. Eine iterative Neuberechnung der Jacobi-Matrix verbessert zwar die Konvergenz, ist jedoch der zeitintensivste Schritt des Prozesses – somit ist dies bei großen Strukturmodellen der wichtigste Faktor zur Einsparung von Berechnungszeit.

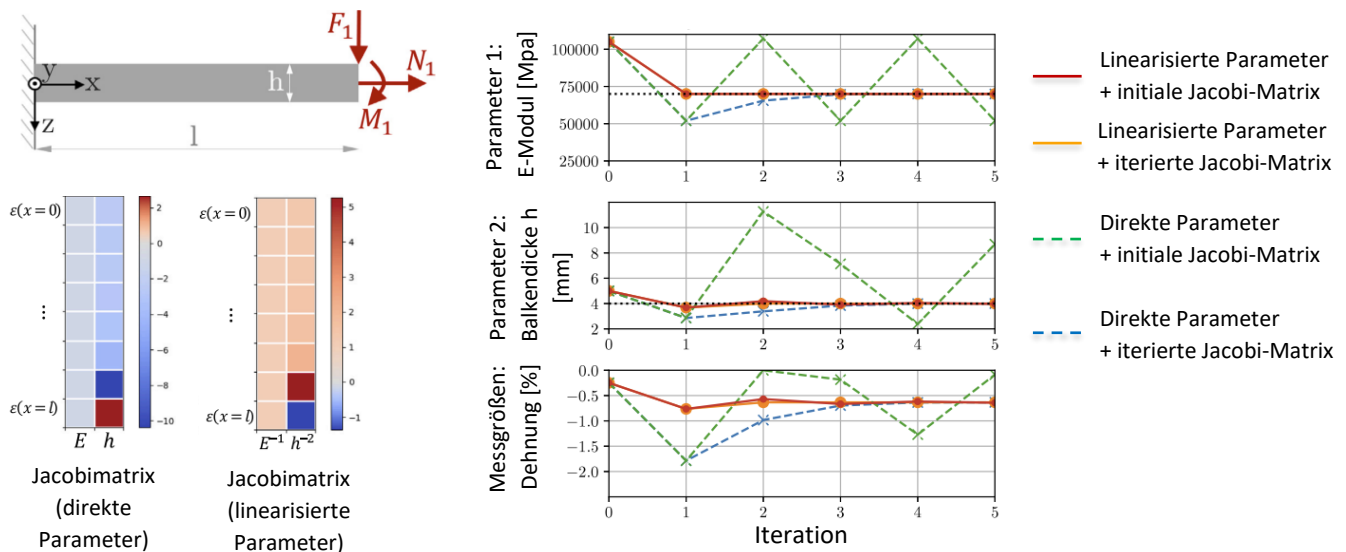


Abbildung 4: Verifikation der Kalibriermethode mit und ohne Parameterlinearisierung an einem analytischen Kragbalkenmodell

Im nächsten Schritt wurde die Vorgehensweise auf ein versteiftes CFK-Paneel übertragen für welches am DLR bereits experimentelle Versuchsdaten aus einem früheren Projekt vorlagen wie in *Abbildung 5* gezeigt. Die Messgrößen waren dabei die an beiden Oberflächen des Paneels gemessenen Dehnungen an 30 Positionen. Der erste Schritt waren hierbei synthetischen Referenzstudien, bei denen die Kalibrierung mit einer Referenzsimulation mit veränderten Parametern durchgeführt wurde. In den synthetischen Fällen konnten die Abweichungen in Steifigkeitsparametern, Randbedingungen und geometrischen Imperfektionen zuverlässig reduziert und das Optimum gefunden werden wie die Kalibrierergebnisse in *Abbildung 6* zeigen. Die Untersuchungen zeigten außerdem, dass Anzahl und Position der Messstellen einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit und Eindeutigkeit der Kalibrierung haben. Es konnten jedoch auch mit deutlich reduzierter Anzahl an Messstellen gute Ergebnisse erzielt werden.

Die experimentelle Validierung erfolgte an einem versteift CFK-Panel unter Druckbelastung. Das nominale FE-Modell wies zunächst deutliche Abweichungen gegenüber den gemessenen Dehnungen auf. Durch die Kalibrierung konnten diese Abweichungen wesentlich reduziert werden. Die resultierenden Parameteränderungen waren plausibel: Materialsteifigkeiten wurden im Bereich weniger Prozent angepasst, während größere Korrekturen insbesondere bei Randbedingungen und Imperfektionsannahmen erforderlich waren, da diese Größen im Ausgangsmodell nur näherungsweise bekannt waren.

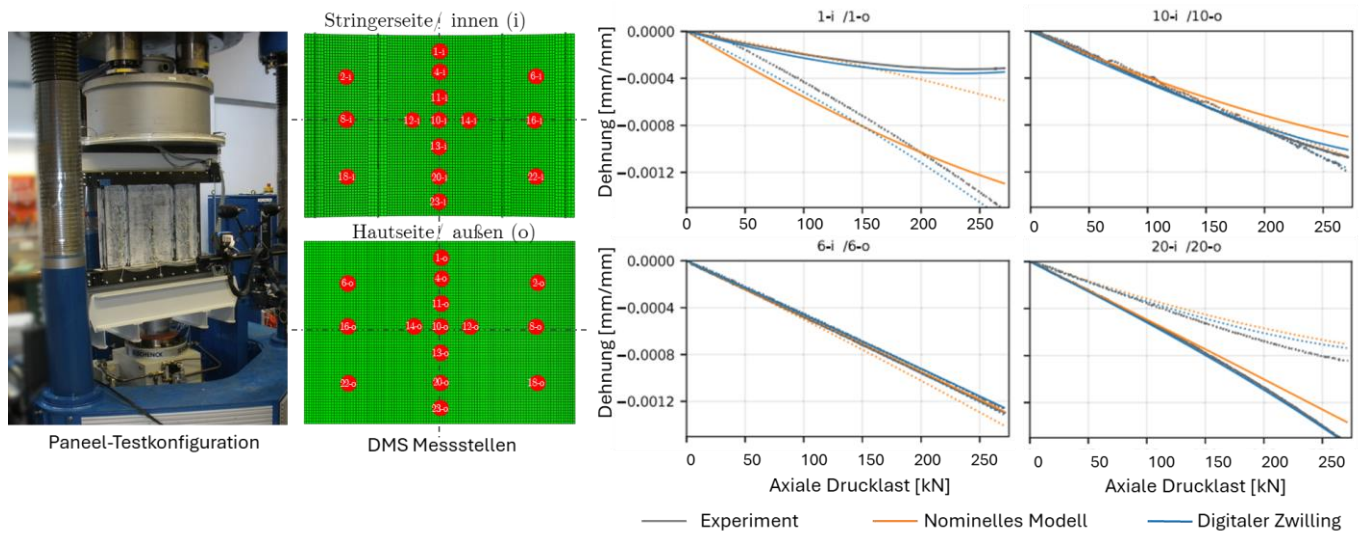


Abbildung 5: Kalibrierung eines digitalen Zwillings für einen versteiftes Composite-Panel im axialen Druckversuch

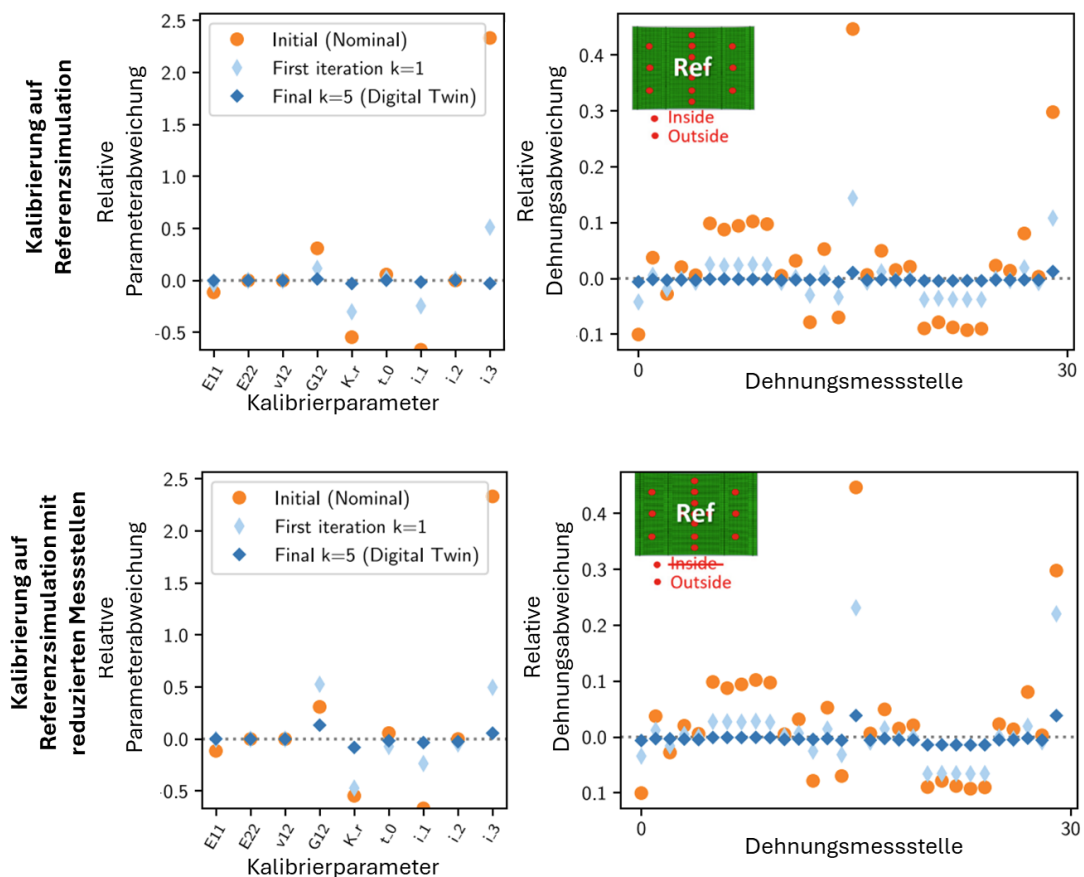


Abbildung 6: Kalibrierung eines digitalen Zwillings für ein versteiftes Composite-Panel mit synthetischer Referenzsimulation mit dem voll Messdatenset (oben) und einem reduzierten Messdatenset von der Panel-Außenseite (unten)

Der nächste Schritt nach der Kalibrierung mit Referenzsimulationen war die Nutzung des Prozesses für eine Kalibrierung mit experimentellen Dehnungsdaten aus dem Paneel-Versuch für welchen die Ergebnisse in *Abbildung 7* zu sehen sind. Das Kalibrierergebnis kann hierfür nur noch anhand der Messgrößen verifiziert werden, da die realen Werte der Kalibrierparameter unbekannt sind. Die Ergebnisse zeigen, dass die nichtlineare LSQ-Optimierung nach wenigen Iterationen das theoretische Optimum erreicht und die Simulationsergebnisse des digitalen Zwillings signifikant besser sind als die des nominellen Modells.

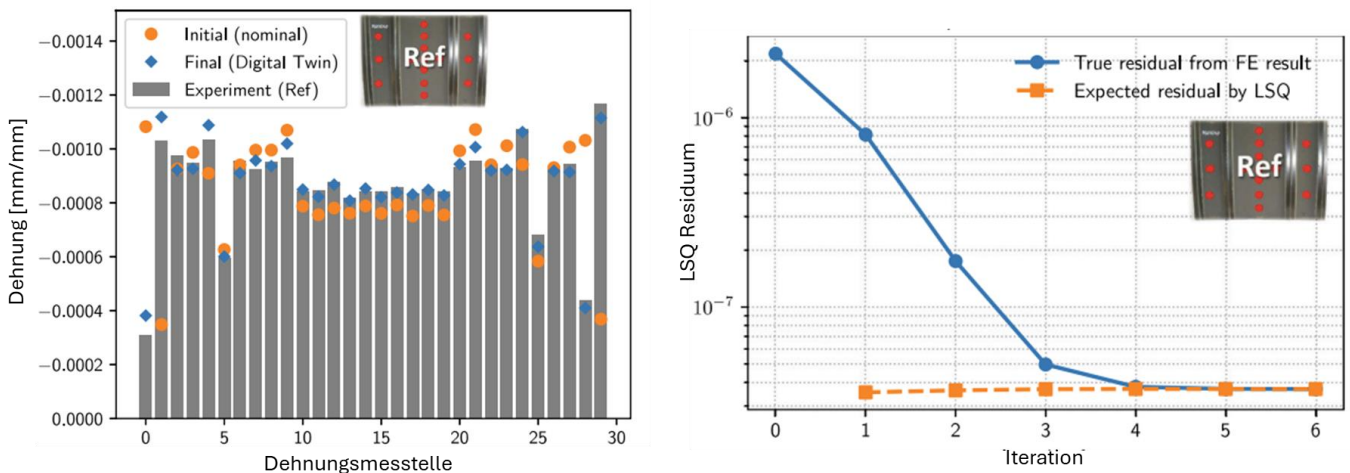
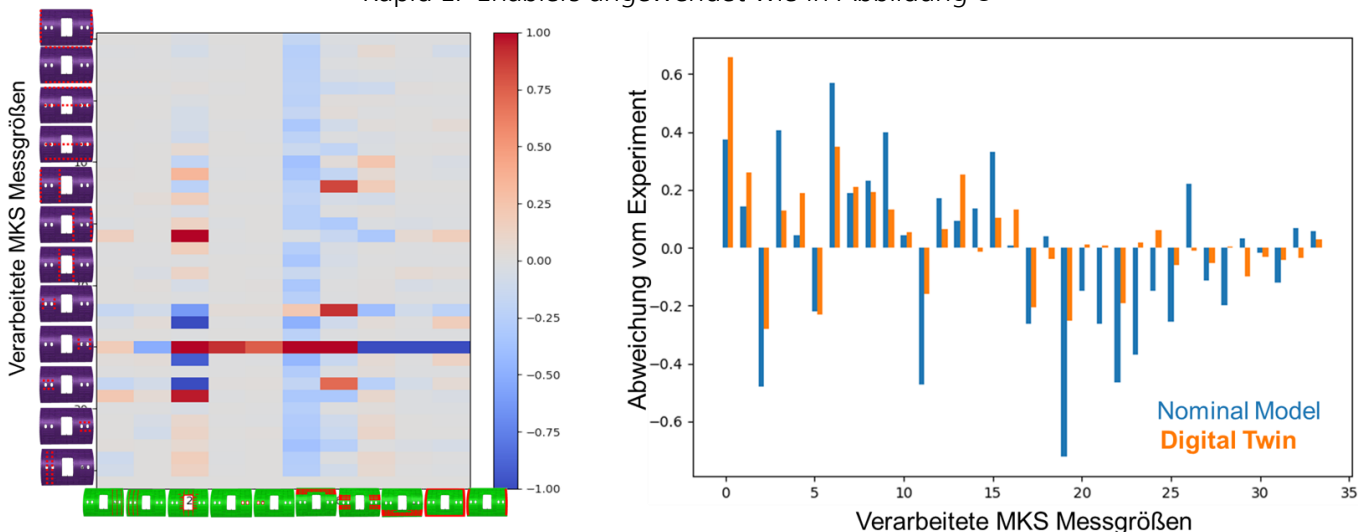


Abbildung 7: Kalibrierung eines digitalen Zwillings mit experimentellen Daten aus dem Paneel-Versuch

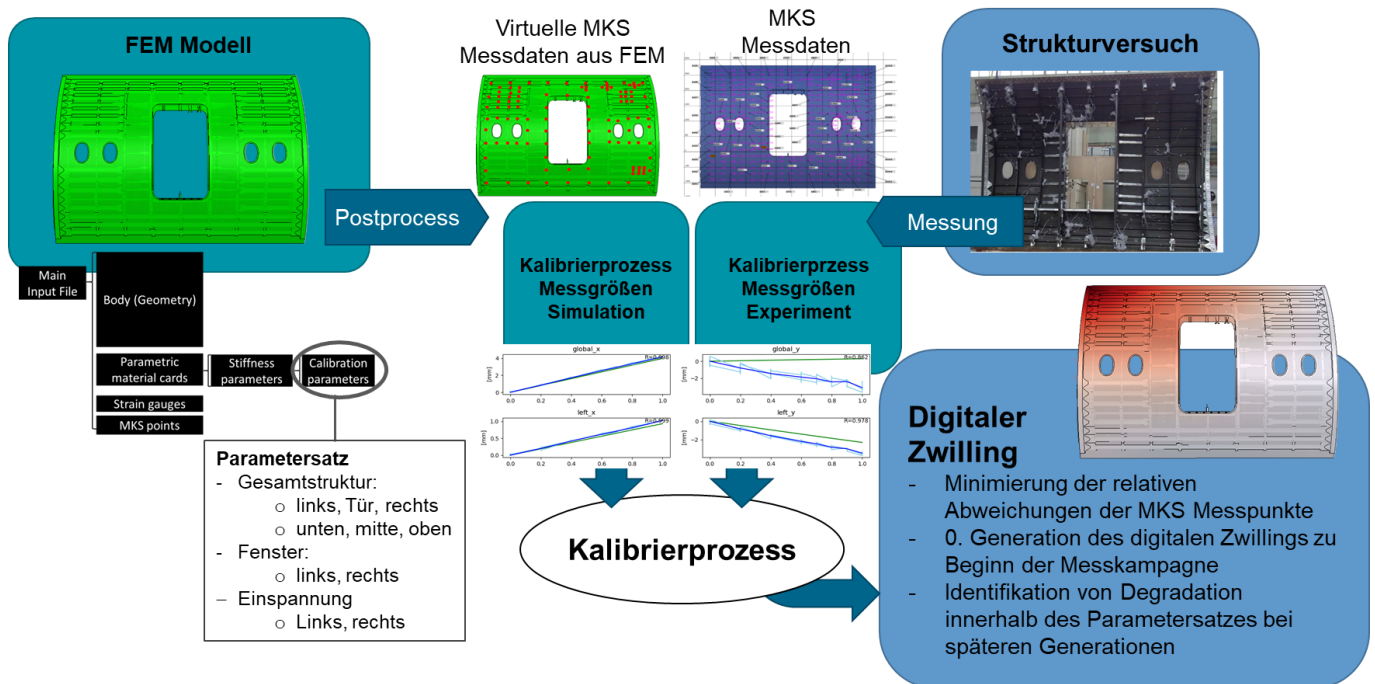
Im finalen Schritt, wurde die Kalibriermethode auf die Rumpfschale des Strukturversuchs im Verbundprojekt Rapid EF Enablers angewendet wie in *Abbildung 8*



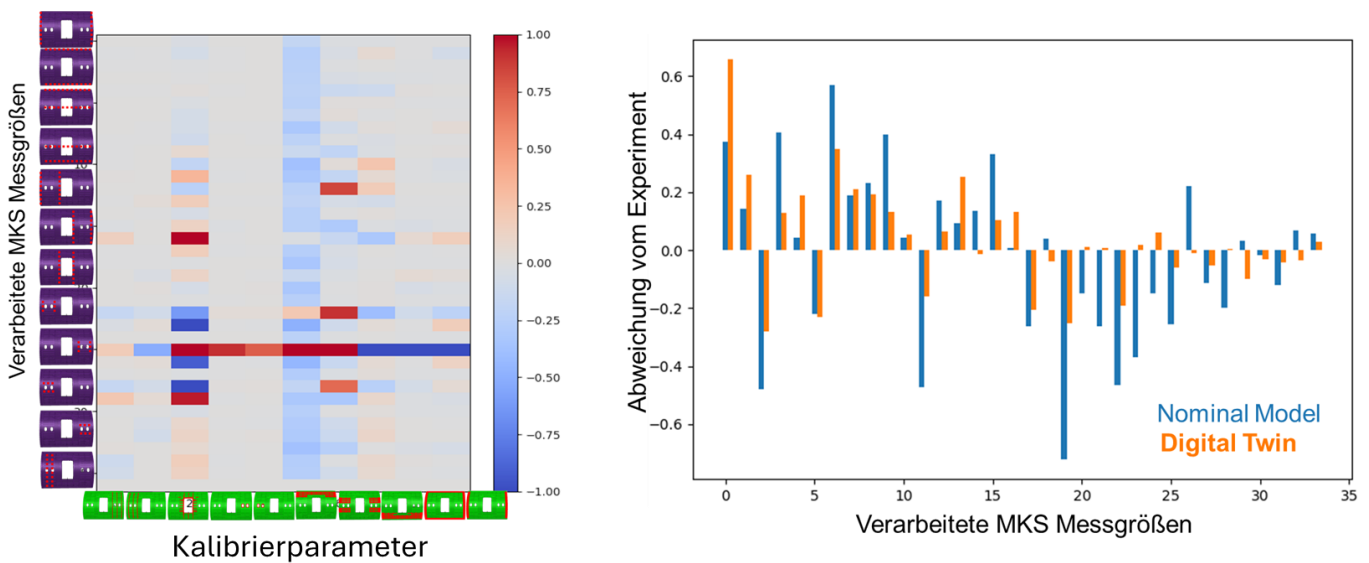
(b)

Abbildung 8a gezeigt. Während die mathematischen Methoden der Kalibrierung des Panels wie in [9] beschrieben direkt übernommen werden konnten, waren verschiedene Anpassungen am Framework des Kalibrierprozesses erforderlich, um die Anwendung für den Strukturversuch demonstrieren zu können.

- Die Messgrößen, welche den Input für die Kalibrierung darstellen, sind nun die durch den Projektpartner ZEISS bereitgestellten Verformungsmessdaten des Multikamerasystems (MKS) [10]. Dieses stellt die Verschiebungen an diskreten Punkten auf der Außenhaut der Rumpfschale dar. Die entsprechenden Verschiebungen müssen auch aus dem FE-Modell als Output extrahiert werden, um die Abweichungen zuverlässig ermitteln zu können.
- Da absolute Verschiebungen durch Starrkörperbewegung oder Nachgiebigkeit an der Einspannung stark unterschiedlich sein können, ist es erforderlich relative Verschiebungen zwischen bestimmten Bereichen der Struktur zu ermitteln. Daher ist eine Umrechnung der Messgrößen notwendig, bevor diese als Input in die Kalibrierung einfließen.
- Durch multiple Lastfälle können unterschiedliche Kalibrierergebnisse für die einzelnen Lastfälle auftreten. Jedoch kann ein digitaler Zwilling abschließend nur durch ein Parameterset repräsentiert werden. Um dies zu erreichen, wurde eine Wahrscheinlichkeitsbasierte Mittelung durch Bayes'sche Schätzung herangezogen. Auf Basis der Reduktion des Residuums kann die Zuverlässigkeit der Optimierung für jeden Lastfall ermittelt werden. Darauf basierend lässt sich ein globales Optimum für alle Lastfälle ermitteln.



(a)



(b)

Abbildung 8: Kalibrierprozess (a) und Ergebnisse (b) für den digitalen Zwilling der Rumpfschale des Rapid EF Strukturversuchs

Die erzielten Ergebnisse der Kalibrierung der Rumpfschale sind in Abbildung 8b dargestellt. Es konnte gezeigt werden, dass der digitale Zwilling die globale Verformung des Prüfkörpers besser abbildet als das nominelle Modell. Dennoch wurde festgestellt, dass die lokale Dehnung an den Verstärkungselementen durch die

Kalibrierung kaum beeinflusst wird. Der hierfür identifizierte Grund lag in den geringen Dehnungen an den Versteifungselementen (Spante und Lintel), was durch die Einspannung bedingt nicht anders möglich war.

Die vorgegebenen Ziele bezüglich des digitalen Zwillings wurden im Wesentlichen erreicht. Es wurde eine belastbare Methode entwickelt, um aus einem nominellen Strukturmodell einen prüfkörperspezifischen digitalen Zwilling zu erzeugen. Dieser bildet die Grundlage für die nachfolgenden Arbeiten zu virtuellen Sensoren, optimierter Instrumentierung. Als derzeitige Einschränkungen ist festzuhalten, dass eine vollständige FE-basierte Kalibrierung komplexer Strukturmodelle weiterhin rechenzeitintensiv ist und daher nicht unmittelbar als durchgehend echtzeitfähige Lösung vorliegt. Gleichwohl wurde die zentrale methodische Grundlage geschaffen, um Strukturversuche durch digitale Zwillinge aussagekräftiger und effizienter auszuwerten.

3.1.2. AP1.2 Virtuelle Sensoren

Im Arbeitspaket AP1.2 war die Entwicklung virtueller Sensormodelle das Ziel, um die physische Messwerterfassung von Strukturversuchen virtuell zu erweitern. Virtuelle Sensoren sollen Messgrößen an Positionen oder in Strukturbereichen bereitstellen, an denen eine direkte Instrumentierung mit DMS nicht möglich, nicht wirtschaftlich oder mit unverhältnismäßigem Rüstaufwand verbunden ist. Im Fokus standen dabei Dehnungen an nicht instrumentierten Stellen, sowie daraus abgeleitete Größen wie Spannungen, Materialanstressungen und lokale Strukturreserven. Damit knüpfte AP1.2 direkt an AP1.1 an, da die virtuellen Sensoren auf einem digitalen Zwilling bzw. auf simulationsgestützten Ersatzmodellen basieren und die Simulationsmodelle einen Prüfkörper entsprechend so genau wie möglich abbilden müssen.

Im Projekt wurden durch das DLR nach einer initialen Literaturstudie und einer Ausarbeitung der unterschiedlichen Möglichkeiten (*Abbildung 9*) mehrere komplementäre Sensormodelle untersucht. Das gemeinsame Grundprinzip jedes Konzepts bestand darin, experimentell verfügbare Messwerte aus dem physischen Versuch mit einer simulationsbasierten Datenbasis aus dem virtuellen Raum zu kombinieren (*Abbildung 10*). Hierbei liegt eine Analogie zum digitalen Zwilling vor, der ebenfalls physisch erzeugte Daten mit virtuell erzeugten Daten fusioniert. Der Wesentliche Unterschied liegt jedoch in der betrachteten Skala: Während der digitale Zwilling eine Struktur als Ganzes erfasst und deren physische Deformation beschreibt, arbeitet der virtuelle Sensor mit lokalen Messdaten und deren mathematischen Zusammenhängen ohne die Topologie der Struktur direkt zu berücksichtigen.

Aus FE-Simulationen wurden hierfür sogenannte Snapshot-Daten erzeugt, welche die Strukturantwort an bekannten und potentiell virtuellen Messstellen für repräsentative Lastzustände enthalten. Auf dieser Basis wurde ein virtuelles Sensormodell aufgebaut, das aus unvollständigen experimentellen Messdaten die fehlenden Messgrößen an Zielpositionen rekonstruiert wie schematisch in *Abbildung 10* dargestellt. Methodisch wurden hierfür korrelationsbasierte Verfahren und reduzierte Modellansätze genutzt, bei denen aus bekannten Stützstellen auf nicht gemessene Zielgrößen geschlossen wird. Im Wesentlichen wurden hierfür zwei mathematische Methoden betrachtet: 1) Proper Orthogonal Decomposition (POD) welche auf der

Singularwertzerlegung der Matrix aus Snapshot-Daten basiert 2) Interpolation mittels eines Surrogate-Modells. Die POD Methode stellte sich als sehr flexibel hinsichtlich der Eingangsdaten heraus, da ein unvollständiger Snapshot von fast beliebig vielen physischen Sensoren genutzt werden kann um einen vollständigen Snapshot invers zu errechnen. Daher ist diese Methode sehr robust gegen Ausfälle einzelner Sensoren, ohne dass eine neue Initialisierung des Sensormodells stattfinden muss. Anders ist dies bei Interpolationssensoren, die darauf ausgelegt sind Eingangsdaten an allen erforderlichen Stützstellen zu erhalten. Bei teilweise unvollständigen Eingangsdaten muss eine erneute Initialisierung des Modells erfolgen, bei dem die Interpolation auf Basis der veränderten Konfiguration an physischen Eingangsdaten erfolgen. Dennoch hat der Interpolationsansatz einen wesentlichen Vorteil gegenüber dem virtuellen Sensor mit POD: Die Sensitivität des Modells gegen Abweichung in den Eingangsdaten ist geringer. Der POD Sensor kann bei ungeschickter Konstituierung der Eingangsdaten (im Wesentlichen bedingt durch Eingangsdaten mit sehr kleinen Dehnungen) un plausible Output-Daten erzeugen.

Daher ist eine geschickte Wahl der physischen Messstellen, welche den Input für die virtuellen Sensoren bereitstellen, unerlässlich um diese Modelle verlässlich anwenden zu können. Entsprechende Richtlinien wurde im nachfolgenden Arbeitspaket AP1.3 abgeleitet und sind an entsprechender Stelle dieses Berichts aufgeführt.

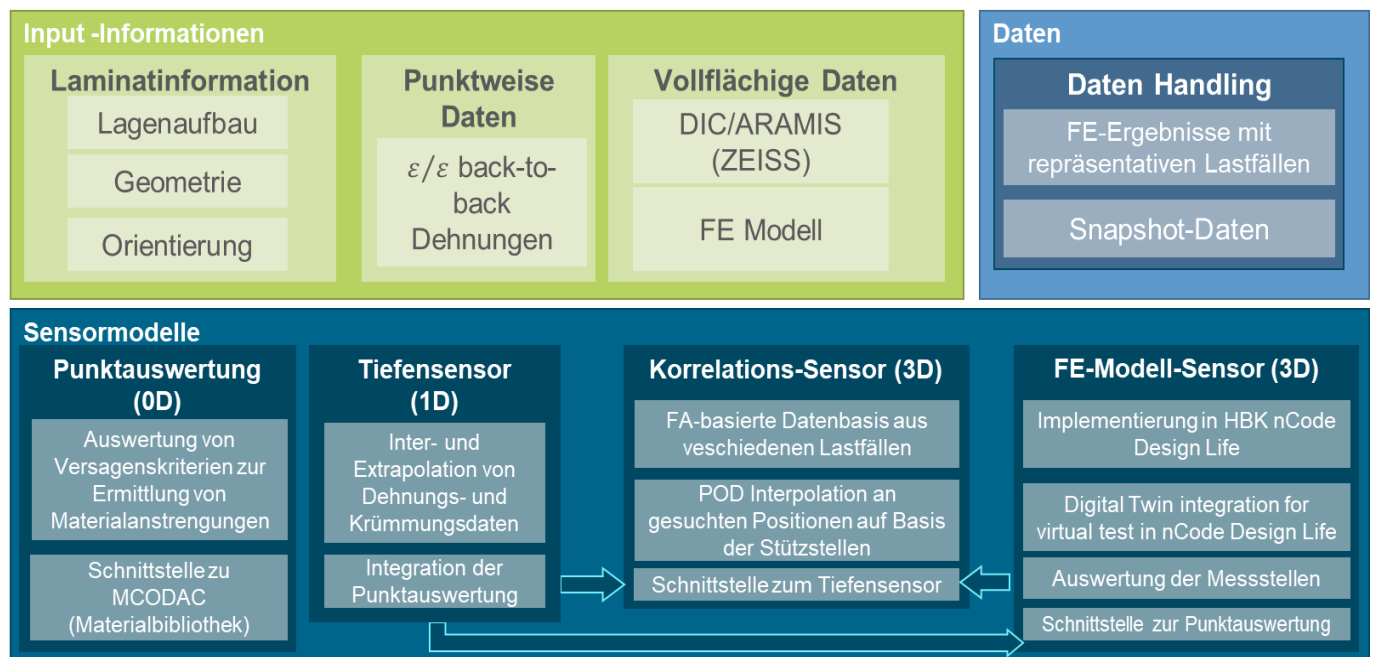


Abbildung 9: Erarbeitete Konzepte für verschiedene Arten virtueller Sensormodelle und deren Eingangsdaten

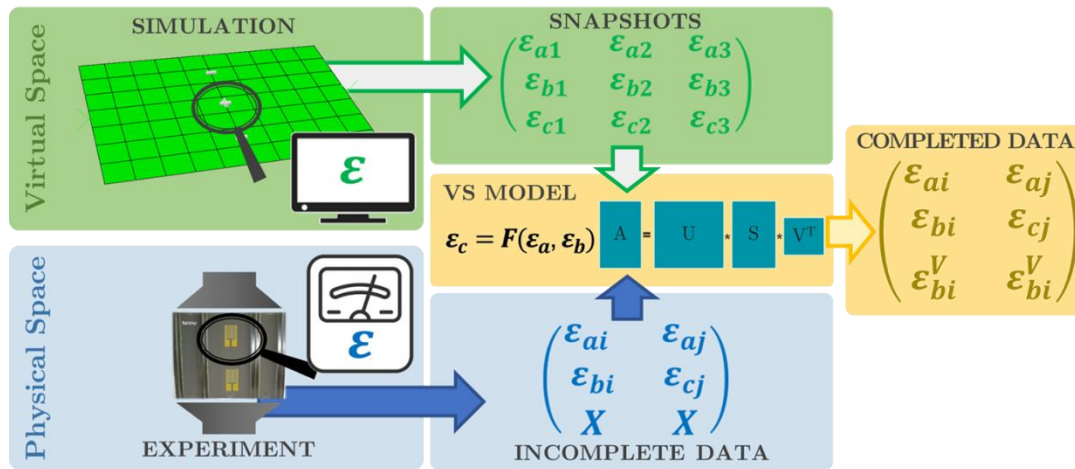


Abbildung 10: Grundprinzip des Virtuellen Sensors zur erweiterten Dehnungserfassung

Die Anwendung der virtuellen Sensoren erfolgte an der versteiften Rumpfschale im Strukturversuch des Verbundprojekts Rapid EF Enablers. Hierzu wurden unterschiedliche Lastfalltypen berücksichtigt. Einerseits wurden Einheitslastfälle ermittelt, welche jeweils nur aus einzelnen Kraft- oder Momentenkomponenten des Prüfstandes bestanden. Diese Einheitslasten und die entsprechende Deformation der Struktur sind in *Abbildung 11* links dargestellt.

Die Belastung der Struktur im Versuch erfolgt jedoch mit kombinierten Biegelastfällen in vertikaler oder horizontaler Richtung: Vertical Bending Down (VBD), Vertical Bending Up (VBU), Lateral Bending Left (LBL) und Lateral Bending Right (LBR). Für alle Lastfälle wurde für den Strukturversuch die maximal zulässige Lastamplitude definiert. Diese muss möglichst hoch sein, um ein signifikantes Dehnungsniveau an den relevanten Messstellen der virtuellen Sensoren zu erreichen. Gleichzeitig wird die Last durch Stabilitätseffekte der Struktur limitiert. Die vereinfachte Einspannung im Vergleich zum Originalversuch im Projekt MAAXIMUS führt zu unerwünschten Beuleffekten an den freien Rändern der Schale. Diese Unterscheidung war wesentlich für die Versuchsdurchführung und zur Sicherstellung der Anwendbarkeit der virtuellen Sensoren.

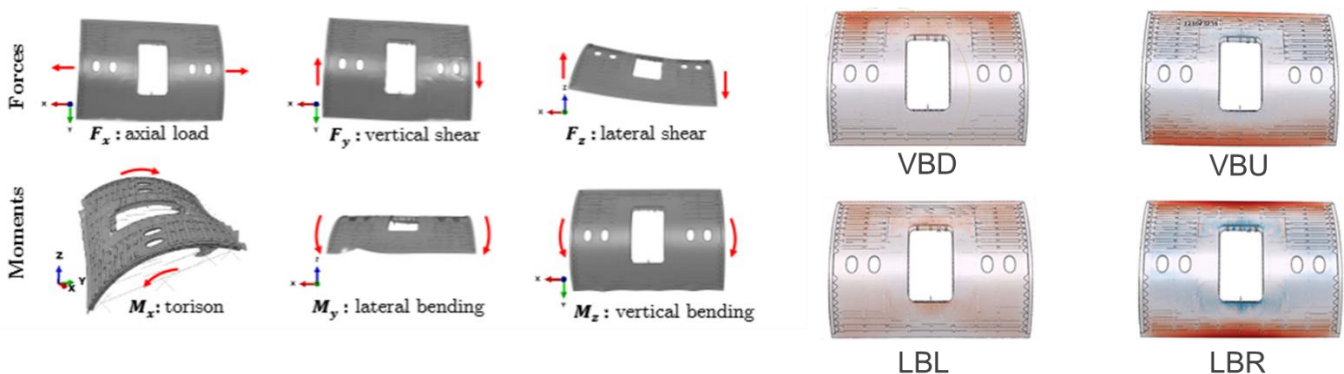


Abbildung 11: Einheitslastfälle und Service-Lastfälle für den Versuch an der versteiften Rumpfschale

Eine zentrale Erkenntnis der Anwendung virtueller Sensormodelle war daher die Bewertung verschiedener Kombinationen aus Initialisierung und Anwendung wie in

Tabelle 2 gezeigt. Die aus den einzelnen Varianten abgeleitete Anwendungsmatrix zeigt, wie die Initialisierung mit Einheitslastfällen oder kombinierten Lastfällen (siehe *Abbildung 11*) sich bei anschließender Auswertung für verschiedene Lastfälle auf die erzielbare Genauigkeit auswirkt. Die höchste Genauigkeit und Flexibilität liefert. Wird ein auf Einheitslastfällen initialisiertes Modell für kombinierte Lastfälle genutzt, was in der Praxis eine hohe Flexibilität erlaubt da die Anwendungs-Lastfälle zuvor nicht bekannt sein müssen.

bleibt die Flexibilität hoch, während die Genauigkeit reduziert, aber weiterhin nutzbar ist. Eine Initialisierung ausschließlich mit kombinierten Lastfällen ist dagegen weniger flexibel, da das Sensormodell stärker an die jeweils betrachteten Lastkombinationen gebunden ist. Für die spätere Anwendung ergibt sich daraus, dass möglichst elementare, gut separierbare Lastzustände für die Initialisierung vorteilhaft sind, wenn das Sensormodell anschließend auf unterschiedliche Lastkombinationen übertragen werden soll.

Tabelle 2: Anwendungsmatrix für die Initialisierung und Nutzung von virtuellen Sensormodellen für multiple Lastfälle

		Sensor-Auswertung			
		Einheitslastfälle		Kombinierte Lastfälle	
Initialisierung	Einheitslastfällen (Fx, Mz, My)	1	Genauigkeit: ++ Flexibilität: ++	2	Genauigkeit: + Flexibilität: ++
	Kombinierte Lastfälle (VBD, VBU, LBL, LBR)	3	Genauigkeit: - Flexibilität: --	4	Genauigkeit: + Flexibilität: o

Die Auswertung der Sensormodelle für den Strukturversuch an der Rumpfschale zeigte, dass virtuelle Sensoren die gemessenen Dehnungsverläufe an mehreren Positionen grundsätzlich gut wiedergeben können wie in *Abbildung 12* für die Lastfälle FX und LBL dargestellt. Die vorbereiteten Vergleichsdiagramme zeigen jedoch auch, dass die Vorhersagequalität positions- und lastfallabhängig ist. Gute Übereinstimmungen wurden insbesondere dort erzielt, wo die Strukturantwort durch die verwendeten Stützstellen und Lastfälle ausreichend beschrieben wurde. Größere Abweichungen traten dort auf, wo lokale Effekte, nicht vollständig abgebildete Randbedingungen, lokale Steifigkeitsänderungen oder unzureichende Sensitivität der Stützstellen eine stärkere Rolle spielten. Diese Ergebnisse sind für die Bewertung des Ansatzes wesentlich, da sie zeigen, dass virtuelle Sensoren nicht pauschal als Ersatz beliebiger physischer Sensoren verwendet werden können, sondern eine geeignete Lastfallbasis, eine sinnvolle Auswahl der Stützstellen und eine Validierung für den jeweiligen Anwendungsfall benötigen.

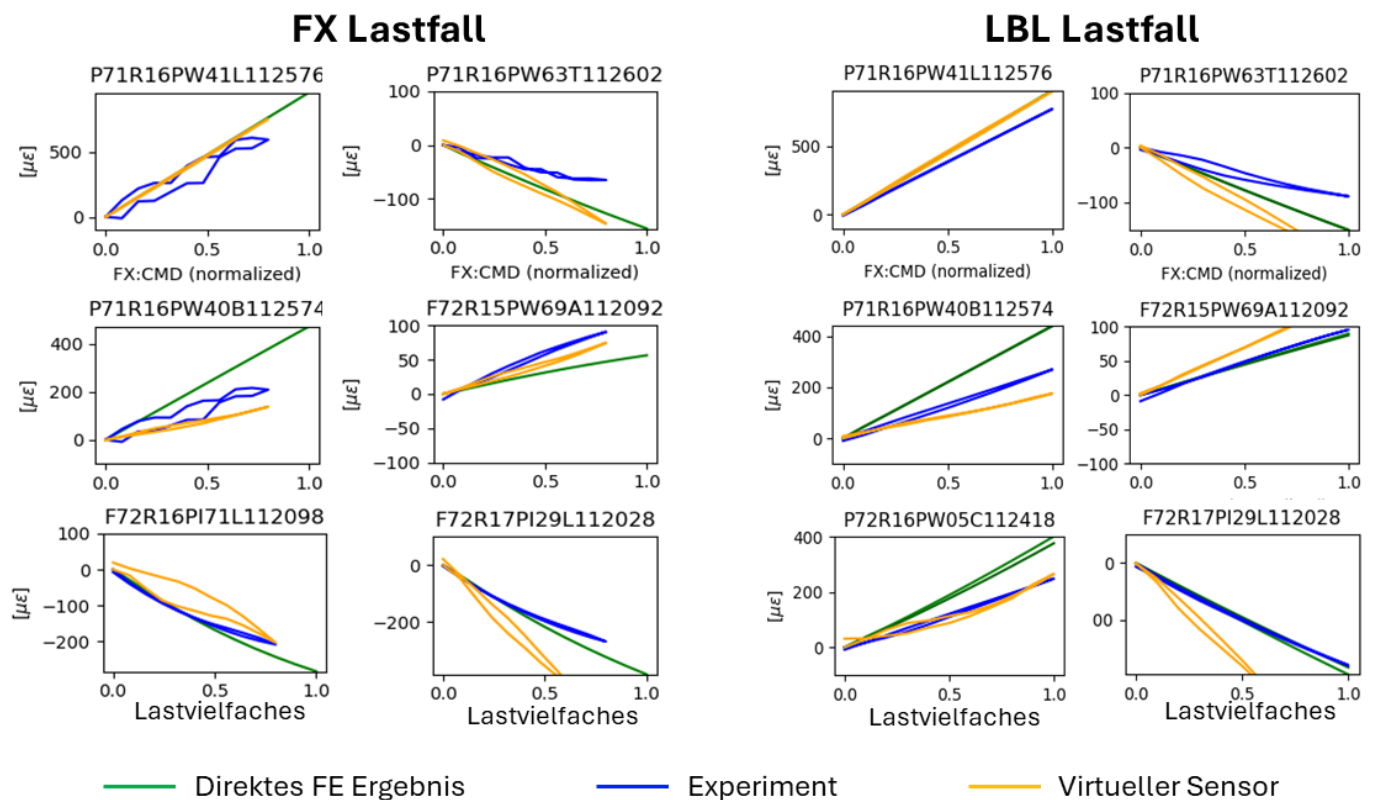


Abbildung 12: Ergebnisse der virtuellen Sensormodelle am Strukturversuch der Rumpfschale im Vergleich zu den experimentellen Messdaten und den FE-Ergebnissen

3.1.3. AP 1.3 Optimierte Instrumentierung

Virtuelle Sensoren und der digitale Zwilling basieren auf der Kombination von Simulationsdaten und physischen Messdaten. Ziel von AP 1.3 war die Ableitung geeigneter Messpositionen für die hierzu notwendige physische Messwerterfassung. Auf Basis der in AP 1.1 und AP 1.2 entwickelten Methoden wurden Kriterien betrachtet, mit denen relevante Bereiche der Struktur für eine Instrumentierung identifiziert werden

können. Die relevanten Regionen im Versuch sind insbesondere Bereiche hoher Dehnungen/Materialanstrengung, schwer zugängliche Strukturzonen sowie Bereiche, in denen eine verbesserte Absicherung des digitalen Zwillings oder der virtuellen Sensoren durch zusätzliche Eingangsdaten erforderlich ist.

Durch die Arbeiten zur Kalibrierung des digitalen Zwillings zeigte sich, dass der digitale Zwilling nicht nur zur nachgelagerten Versuchsauswertung, sondern auch zur Planung der Versuchsinstrumentierung genutzt werden kann. Die Jacobi-Matrix der nichtlinearen LSQ muss ausreichend hohe Gradienten der Messstellen bezüglich der Kalibrierparameter aufweisen, damit ein Parameter überhaupt mit den vorhandenen Messdaten zuverlässig ermittelbar ist. Daher müssen können physische Sensoren gezielt an für Kalibrierung relevanten Positionen platziert werden. Für virtuelle Sensoren ist es in ähnlicher Weise erforderlich, dass die Daten an den physischen Messstellen und den virtuellen Messstellen eine ausreichende mathematische Korrelation aufweisen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden und einen Versuch, welcher durch den digitalen Zwilling und virtuelle Sensoren digital unterstützt werden soll, sind daher einige Richtlinien zu beachten, welche in diesem Arbeitspaket herausgearbeitet wurden.

Folgende Leitlinien wurden daher für die Definition physischer Messstellen als Input für virtuelle Sensoren und den digitalen Zwilling definiert:

- Signifikantes Dehnungsniveau an allen zur Kalibrierung oder physischen Sensormessung genutzten Messstellen! (Digitaler Zwilling & Virtuelle Sensoren)
- Rauschfreie Verschiebungskomponenten (Digitaler Zwilling)
- Verlässlich vorhandene Verschiebungsmesspunkte (Digitaler Zwilling)
- Regionen mit kleinen Dehnungsgradienten für physische DMS wegen Unsicherheit in Modell und Versuch (Virtuelle Sensoren)
- Linear unabhängige Dehnungen bei verschiedenen Lastfällen (Virtuelle Sensoren)

3.1.4. AP 1.5: Anforderungen und Validierung

Ziel von AP 1.5 war die Validierung der entwickelten Methoden für den digitalen Zwilling und die virtuellen Sensoren sowie die Ableitung der aus den Methoden resultierenden Anforderungen für deren zuverlässige Anwendbarkeit. Die in *Abbildung 7* dargestellten Daten der Paneel-Kalibrierung mit experimentellen Daten zeigt bereits, dass die Kalibrierung des digitalen Zwillings die Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch deutlich verbessert, wie bereits obenstehend in den Arbeitsinhalten von AP 1.1 beschrieben. Diese Übereinstimmung verifiziert zwar die Methode, bietet jedoch noch keine Validierung, da noch keine unabhängigen Messdaten eingesetzt wurden. Diese unabhängigen Daten wurden jedoch insbesondere durch den Vergleich mit optischen Verformungsmessdaten bestätigt.

Die unabhängige Validierung des kalibrierten Modells anhand optischer mit ARAMIS gemessenen DIC-Messdaten wie in *Abbildung 13* dargestellt. Diese Daten wurden nicht für die Kalibrierung verwendet, sondern dienten als unabhängiger Vergleich der vorhergesagten Verformungsfelder. Im Besonderen wird hierbei die gemessene Ausbeulung normal zur Haut herangezogen. In dieser Richtung tritt eine große Verformungsamplitude auf, die räumlich kaum mit der axialen Dehnung korreliert. Wie in *Abbildung 13* zu

sehen, bildet der digitale Zwilling die gemessene Ausbeulung bezüglich der globalen Strukturantwort des Panels und der gemessenen Maximalamplitude deutlich besser ab als das ursprüngliche nominelle Modell und deutlich besser als gelenkig gelagerte oder fest eingespannten Randbedingungen. Damit konnte gezeigt werden, dass die entwickelte Kalibrierungsmethode nicht nur lokale Dehnungsmesswerte angleicht, sondern die physikalische Aussagefähigkeit des Simulationsmodells insgesamt verbessert.

Die Validierungsarbeiten zeigten zugleich, dass die Genauigkeit virtueller Messgrößen wesentlich von der Sensitivität und Verteilung der verfügbaren Messstellen, der Auswahl geeigneter Kalibrierparameter und der Abbildung der Randbedingungen abhängt. Damit wurde das Grundkonzept der simulationsgestützten Erweiterung der Versuchsauswertung erfolgreich validiert, während für eine durchgehend echtzeitfähige Anwendung an großskaligen Strukturmodellen weiterhin Einschränkungen durch Rechenzeit und Modellkomplexität bestehen.

Zur Bewertung der Eignung einzelner Messstellen und Modellparameter wurde eine sensitivitätsbasierte Analyse über eine Jacobi-Matrix eingeführt. Dadurch konnten Parameter identifiziert werden, die für die Kalibrierung gut beobachtbar sind. Gleichzeitig wurden schwach sensitive oder stark korrelierte Parameter ausgeschlossen, um nichtphysikalische Parameterschätzungen und instabile Modellupdates zu vermeiden.

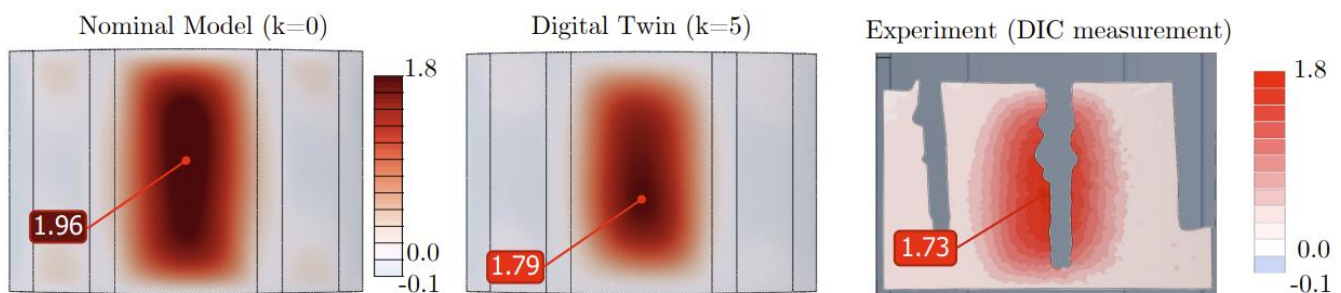


Abbildung 13: Out-of-Plane Verformung im Strukturmodell im Vergleich zur Aramis Messung im Experiment zur Validierung des kalibrierten digitalen Zwillings am versteiften Paneel

Hierzu wurden verfügbare Messdaten in Kalibrierungs- und Validierungsdaten aufgeteilt, sodass die Modellanpassung nicht ausschließlich anhand derselben Messgrößen bewertet wurde, die zur Kalibrierung verwendet wurden. Im Mittelpunkt stand der Abgleich zwischen real gemessenen Versuchsdaten und virtuell berechneten Messgrößen. Dieser Abgleich geht direkt aus den in *Abbildung 12* gezeigten Dehnungskurven enthalten, da die Ergebnisse der virtuellen Sensoren jeweils an Messstellen vorliegen, welche zum Zweck der Validierung mit physischen DMS ausgestattet wurden. Auch für eine reale Anwendung ist es erforderlich neben den Zielmessstellen der virtuellen Dehnungserfassung einige Validierungsmessstellen vorzusehen, welche die Gültigkeit des virtuellen Sensormodells während des Einsatzes sicherstellen. Die entsprechenden Dehnungsdaten dürfen nicht als Input für den virtuellen Sensor einfließen.

3.1.5. AP 3.2.1: Schallbasierte SHM Verfahren

Die geführte Wellen-basierte Strukturüberwachung (Guided Wave-based Structural Health Monitoring, GW-SHM) wurde als kosten- und zeiteffiziente Alternative zu konventionellen zerstörungsfreien Prüfverfahren für full-scale Flugzeugstrukturen identifiziert. Eine wesentliche Herausforderung für GW-SHM ist der Einfluss von Umwelt- und Betriebsbedingungen auf die Schadenserkenkung. Änderungen von Temperatur, Druck und Betriebslasten beeinflussen die Ausbreitung geführter Wellen und können die Leistungsfähigkeit von SHM Systemen beeinträchtigen, die häufig auf begrenzten Referenzdatensätzen basieren. Die Kompensation dieser Einflüsse ist weiterhin Gegenstand aktueller Forschung, wobei zahlreiche Methoden vorgeschlagen wurden. Die praktische Umsetzung wird jedoch häufig durch komplexe Geometrien sowie durch das gleichzeitige Auftreten mehrerer Umwelt- und Betriebsbedingungen erschwert.

Das Verständnis von Lasteinflüssen ist insbesondere für Anwendungen entscheidend, die eine Überwachung unter variierenden Betriebsbedingungen erfordern, beispielsweise während des Flugbetriebs, bei Bodeninspektionen oder während Strukturtests. Vor diesem Hintergrund konzentriert sich AP 3.2.1 auf SHM Systeme für Strukturversuche an großskaligen Faserverbundstrukturen.

Schadenserkenkungsmethoden

Im Rahmen von AP 3.2.1 wurde ein auf Gaußscher Prozessregression (Gaussian Process Regression, GPR) basierender Schadenserkenkungsalgorithmus entwickelt, um Schäden mittels GW-SHM an einer Faserverbund-Rumpfstruktur unter mehrachsiger Belastung und temperaturabhängigen Umgebungsbedingungen eines nicht klimatisierten Hangars zu detektieren. Ziel der Methodik ist die statistische Beschreibung der Beziehung zwischen geführten Wellen und Umwelt- beziehungsweise Betriebsbedingungen, um gutartige Effekte von schadensbedingten Signaländerungen unterscheiden zu können.

GPR wird hierbei für die unüberwachte Schadenserkenkung eingesetzt, indem Betriebsparameter wie Temperatur und Last auf ausgewählte Merkmale der geführten Wellen abgebildet werden. Zunächst wurde die Methode für einzelne Lastfälle bei variierenden Temperaturen untersucht. Obwohl dieser Ansatz für einfache Belastungen geeignet ist, reicht er für mehrachsige Belastungszustände nicht aus. Daher wurde der Eingangsraum des Modells von zwei Dimensionen (Temperatur und Lastniveau) auf vier Dimensionen erweitert: Axialkraft F_x , Biegemomente M_y und M_z , sowie Temperatur. Die mathematische Formulierung der GPR-basierten Anomalie Erkennung ist in den Publikationen 4 und 7 beschrieben.

Einzelner Lastfall

Die entwickelte Methodik zur Schadenserkenkung wurde zunächst für einzelne Lastfälle untersucht, um die Leistungsfähigkeit des GPR-Ansatzes unter variierenden Umwelt- und Betriebsbedingungen zu bewerten. Hierzu wurde ein repräsentativer Aktor-Sensor-Pfad ausgewählt, dessen Verhalten die Herausforderungen konventioneller Referenzsignalvergleiche verdeutlicht. Der Pfad wurde gezielt gewählt, da die kombinierten Einflüsse von Temperatur, Last und Schaden nur geringe Signaländerungen verursachen und daher schwer voneinander zu trennen sind.

Abbildung 14 zeigt das gefilterte Signal zwischen Aktor 3 und Sensor 7 bei einer Anregungsfrequenz von 70 kHz. Der Datensatz umfasst Messungen bei verschiedenen Laststufen vom unbelasteten Zustand bis zu 75 % der Grenzlaster sowie Temperaturen zwischen etwa 12 °C und 32 °C. Zur besseren Darstellung kleiner Unterschiede in Amplitude und Laufzeit wurde die erste Signalankunft vergrößert dargestellt.

Bereits im unbeschädigten Zustand sind Variationen sowohl der Amplitude als auch der Laufzeit infolge veränderlicher Last- und Temperaturbedingungen erkennbar. Da sich der überwachte Bereich in einer vergleichsweise gering belasteten Strukturregion befindet, bleibt der Einfluss der Last auf das Signal moderat. Dennoch liegt die durch Umwelt- und Betriebsbedingungen verursachte Signalvariation in einer ähnlichen Größenordnung wie die schadensbedingte Änderung, wodurch eine direkte Interpretation der Rohsignale erschwert wird.

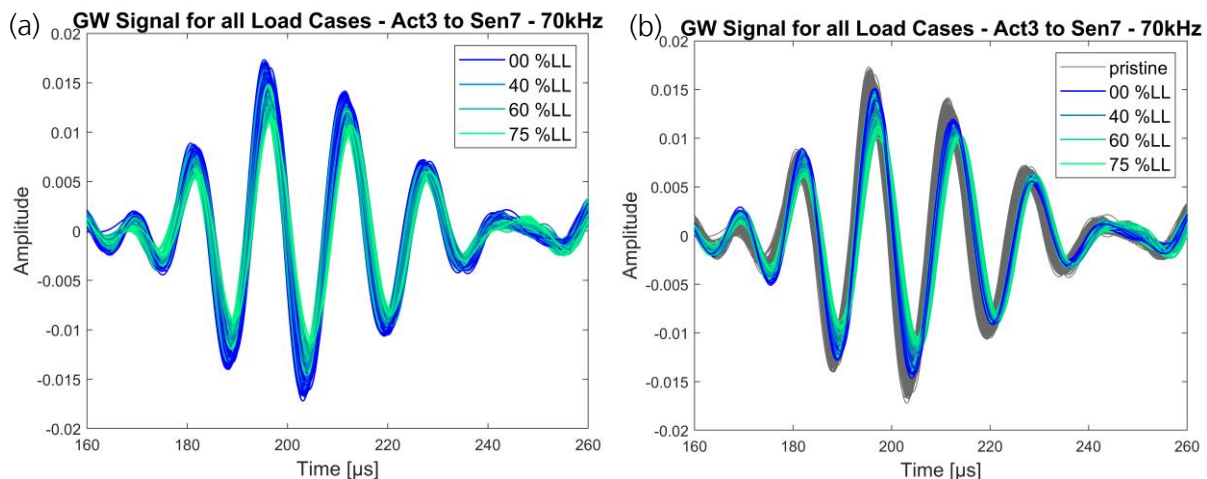


Abbildung 14: GW-Signal für den Pfad Aktor 3 zu Sensor 7 bei 70 kHz (a) im ungeschädigten Zustand und (b) Vergleich zwischen ungeschädigtem (grau) und geschädigtem Zustand (farbig).

Nach Einbringung eines Impactschadens zeigen die Signale leichte Verschiebungen sowohl in der Amplitude als auch in der Laufzeit gegenüber dem unbeschädigten Zustand. Diese Änderungen bleiben jedoch gering und überlagern sich teilweise mit den Variationen infolge veränderlicher Betriebsbedingungen. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit statistischer Modelle, die das erwartete Signalverhalten unter variierenden Bedingungen beschreiben können, bevor eine zuverlässige Anomalie Erkennung möglich ist.

Zur Quantifizierung dieser Effekte wurden zwei Signalmerkmale aus den geführten Wellen extrahiert: Signalamplitude und Laufzeit. Abbildung 15 zeigt die Entwicklung dieser Merkmale in Abhängigkeit von Lastniveau, Temperatur und Schadenszustand. Mit steigender Last reduziert sich die Signalamplitude, während die Laufzeit nur geringfügig beeinflusst wird. Steigende Temperaturen führen hauptsächlich zu einer Zunahme der Amplitude bei gleichzeitig leichter Abnahme der Laufzeit. Im geschädigten Zustand treten tendenziell erhöhte Laufzeiten auf, wobei sich die Verteilungen von unbeschädigtem und geschädigtem Zustand unter Berücksichtigung aller Umwelt- und Betriebseinflüsse weiterhin deutlich überlagern.

Der überwachte Defekt bestand aus einer Delamination mit Abmessungen von etwa 29 mm × 20 mm, bestätigt durch einen Ultraschall-C-Scan. Der ausgewählte Aktor-Sensor-Pfad verläuft dabei nicht direkt durch das Zentrum des Schadens, sondern lediglich angrenzend daran, wodurch die schadensbedingten Signaländerungen vergleichsweise gering ausfallen. Diese bewusst anspruchsvolle Konfiguration wurde gewählt, um die Sensitivität und Robustheit des entwickelten GPR-Ansatzes zu bewerten.

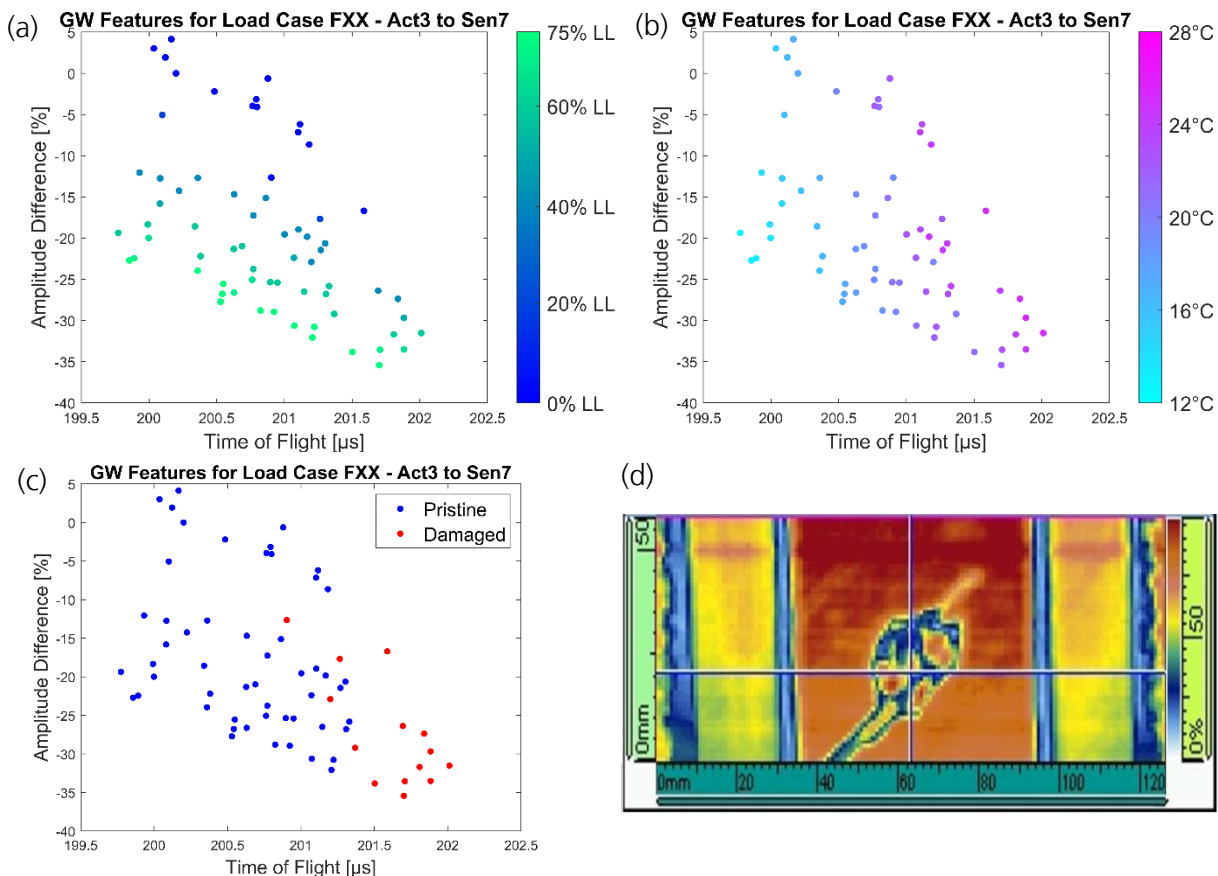


Abbildung 15: Amplitude und Laufzeit des GW-Signals für den Pfad Aktor 3 zu Sensor 7 bei 70 kHz in Abhängigkeit von (a) Temperatur, (b) Last und (c) Schadenszustand.

Auf Grundlage der extrahierten Merkmale wurde ein GPR-Modell ausschließlich mit Daten des unbeschädigten Zustands trainiert. In der ersten Implementierung wurden Temperatur und Lastniveau als unabhängige Variablen verwendet, während die Laufzeit als abhängige Variable diente. Die Beschränkung auf drei Dimensionen ermöglichte eine grafische Darstellung der Regressionsfläche und erleichterte die Interpretation des Modellverhaltens.

Das trainierte GPR-Modell konnte die kontinuierliche Veränderung der Signalantwort infolge variierender Umwelt- und Betriebsbedingungen erfolgreich abbilden. Messungen innerhalb des trainierten Parameterraums zeigten geringe Vorhersageunsicherheit und konnten anhand ihrer Likelihood zuverlässig bewertet werden. Messungen außerhalb des trainierten Temperaturbereichs führten dagegen zu erhöhter Unsicherheit und reduzierter Zuverlässigkeit der Anomalie Bewertung.

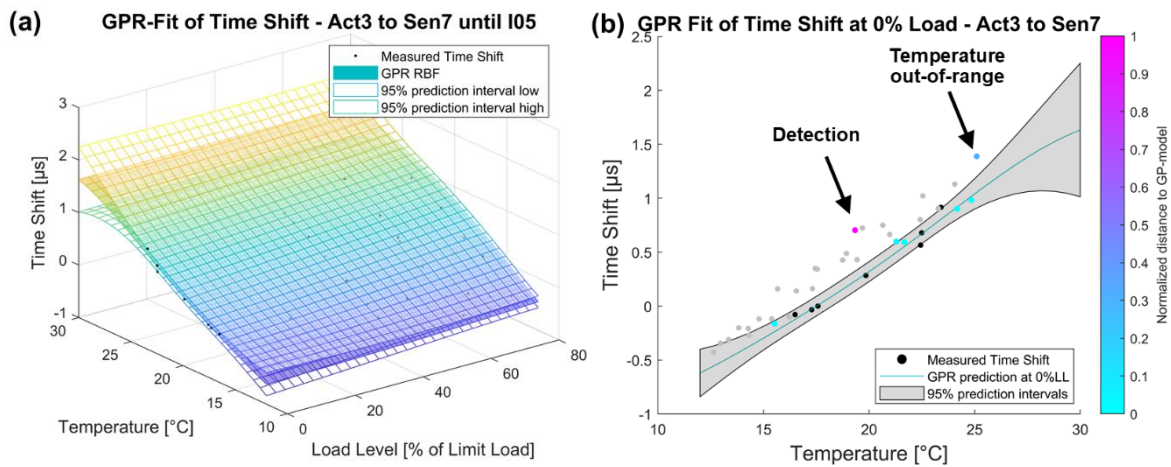


Abbildung 16: (a) Gaußsche Prozessregression für die Laufzeitverschiebung des Pfades Aktor 3 zu Sensor 7; (b) GPR-Modell bei 0 % Last mit Trainings- und Testdaten.

Die Ergebnisse zeigen, dass Lasteinflüsse in geführte Wellen-basierte SHM Systeme unter realistischen Strukturtestbedingungen explizit integriert werden müssen. Ohne Berücksichtigung der Lastinformationen können signalbedingte Änderungen infolge von Betriebsbedingungen nicht zuverlässig von schadensbedingten Veränderungen unterschieden werden.

Mehrachsige Lastfälle

Nach der erfolgreichen Demonstration für einzelne Lastfälle wurde die Methodik auf mehrachsige Belastungszustände erweitert, die realistische Strukturtestbedingungen repräsentieren. Hierzu wurde ein umfangreicher Datensatz über drei Versuchstage unter verschiedenen Kombinationen aus axialer Zugbelastung und Biegebeanspruchung sowie natürlich variierenden Umgebungstemperaturen aufgenommen.

Der untersuchte Datensatz umfasst die vier grundlegenden Lastfälle aus axialem Zug, lateraler Biegung, vertikaler Biegung sowie deren Kombinationen. Insgesamt wurden 17 Lastkombinationen mit jeweils vier Laststufen untersucht. Da die Messungen in einem nicht klimatisierten Hangar durchgeführt wurden, schwankten die Temperaturen während der Kampagne zwischen etwa 14,5 °C und 20,3 °C.

Abbildung 17 fasst den untersuchten Betriebsbereich zusammen. Die dreidimensionale Darstellung der Lasten sowie die entsprechenden zweidimensionalen Projektionen verdeutlichen die Verteilung von Kräften, Momenten und Temperaturen während der Messkampagne. Die Darstellung zeigt die Komplexität der betrachteten Umwelt- und Betriebsbedingungen und verdeutlicht, dass der Datensatz einen breiten Bereich realistischer Strukturzustände abdeckt.

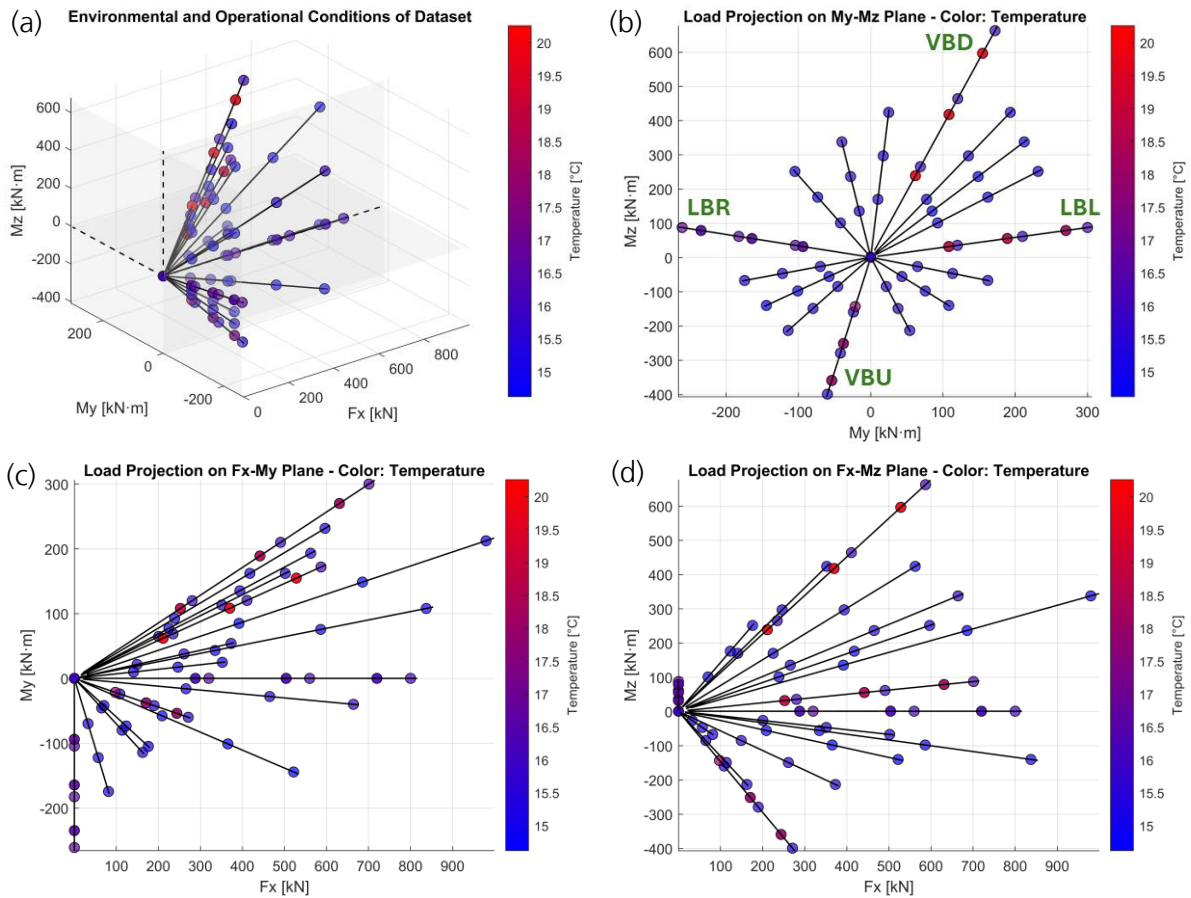


Abbildung 17: Last- und Temperaturbedingungen während der GW-Messkampagne. (a) 3D Darstellung der aufgetragenen Lasten; (b) Projektion der Lasten in die My-Mz-Ebene; (c) Projektion der Lasten in die Fx-My-Ebene; (d) Projektion der Lasten in die Fx-Mz-Ebene.

Zur Untersuchung des Einflusses mehrachsiger Belastungen auf die Wellenausbreitung wurden zwei repräsentative Aktor-Sensor-Pfade in einem hoch belasteten Strukturgebiet analysiert. Ein Pfad war entlang der Längsrichtung orientiert, während der zweite senkrecht dazu verlief. Die extrahierten Signalmerkmale zeigten eine starke Richtungsabhängigkeit bezüglich der angelegten Belastung.

Die in Abbildung 18 dargestellten Ergebnisse zeigen die Entwicklung von Amplitude und Laufzeit für beide Pfade unter unterschiedlichen Last- und Temperaturkombinationen. Diese Beobachtungen verdeutlichen die komplexe Wechselwirkung zwischen Wellenausbreitung, struktureller Belastung und Umweltbedingungen in realistischen Strukturen. Gleichzeitig zeigen sie die Grenzen konventioneller Referenzsignalansätze unter mehrachsigen Belastungszuständen auf.

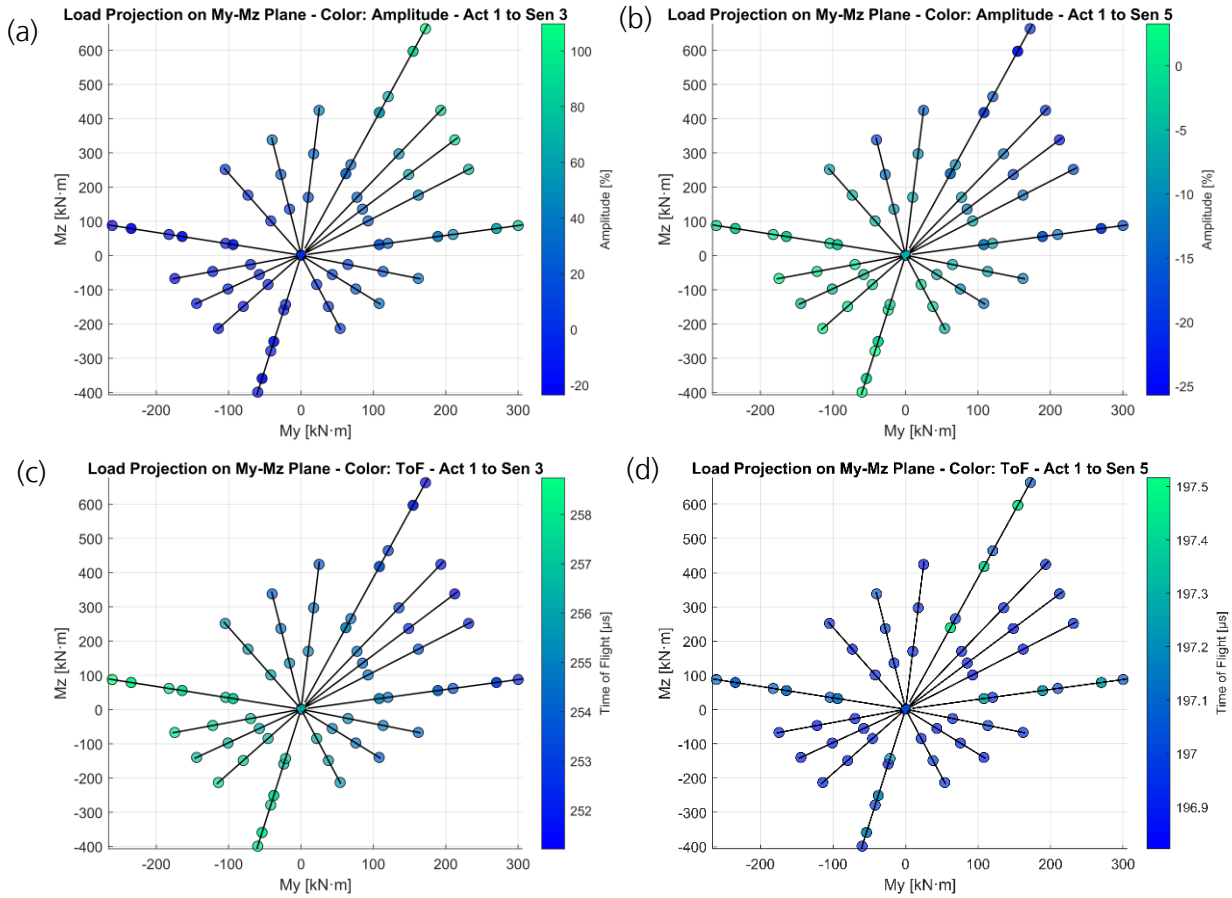


Abbildung 18: GW-Signalmerkmale unter mehrachsiger Belastung. (a) Amplitude Pfad 1–3; (b) Amplitude Pfad 1–5; (c) Laufzeit Pfad 1–3; (d) Laufzeit Pfad 1–5.

Zur Bewältigung dieser Herausforderungen wurde der zuvor entwickelte GPR-Ansatz von einem zweidimensionalen auf einen vierdimensionalen Eingangsraum erweitert. Das finale Modell berücksichtigt Axialkraft F_x , die Biegemomente M_y und M_z sowie die Temperatur als unabhängige Variablen, während geführte Wellenmerkmale wie die Laufzeit als abhängige Variablen verwendet werden.

Die resultierenden Modellvorhersagen sind exemplarisch in Abbildung 19 dargestellt. Das trainierte Modell bildet sowohl globale Trends als auch lokale Nichtlinearitäten innerhalb des Datensatzes ab. In Bereichen mit ausreichender Datengrundlage bleiben die Vorhersageintervalle schmal und weisen auf eine hohe Modellzuverlässigkeit hin. Bereiche mit geringer Datendichte zeigen dagegen erhöhte Unsicherheit in Form breiterer Vorhersageintervalle.

Der entwickelte vierdimensionale GPR-Ansatz ermöglicht die kontinuierliche Vorhersage der Signalantwort für bislang nicht gemessene Kombinationen aus Last und Temperatur. Durch die explizite Quantifizierung der Vorhersageunsicherheit stellt die Methodik eine robuste und dateneffiziente Grundlage für Strukturüberwachung unter realistischen Umwelt- und Betriebsbedingungen dar und bildet die Basis für die anschließende Schadenserkenkung und Lokalisierung.

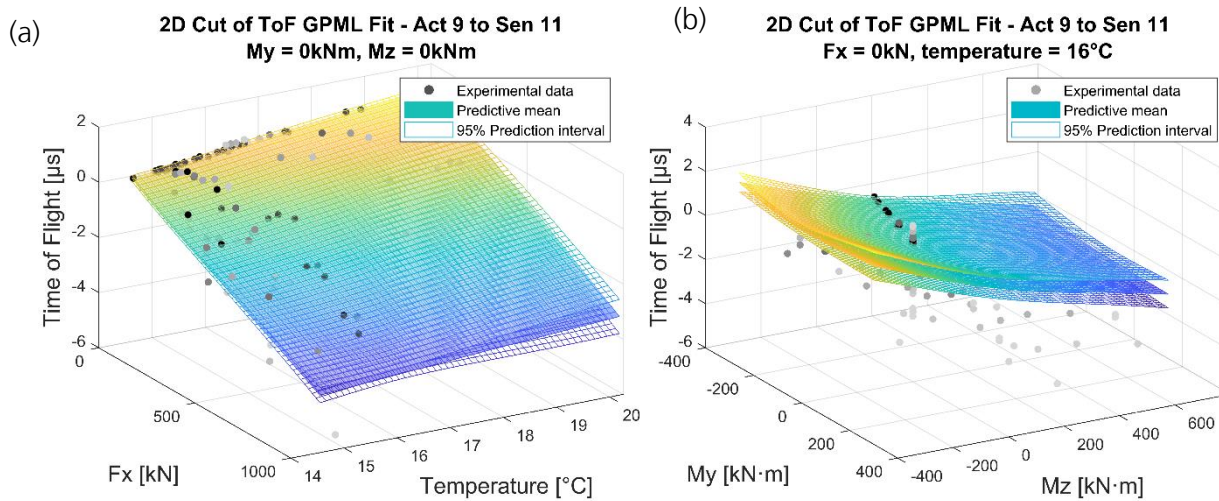


Abbildung 19: Teildarstellungen des trainierten GPR-Modells. (a) F_x , Temperatur und Laufzeit; (b) M_y , M_z und Laufzeit.

3.1.6. AP 3.4.2 KI Multi-modale Schadenserkennung

Ein zentrales Ziel des Rapid-EF-Projekts war die Untersuchung multimodaler Überwachungsansätze für Strukturtests auf Basis heterogener Sensorsysteme und maschineller Lernverfahren in AP 3.4.2. In diesem Zusammenhang bildet die in AP 3.2.1 entwickelte Methodik eine grundlegende Technologie für datenfusionsbasierte Strukturüberwachung.

Die zuverlässige Interpretation geführter Wellen unter realistischen Betriebsbedingungen erfordert zusätzliche Kontextinformationen über den aktuellen strukturellen und umgebungsbedingten Zustand. Während der Rapid-EF-Ermüdungsversuche wurden daher mehrere synchronisierte Messsysteme parallel betrieben, darunter Dehnungsmessstreifen, optische Messsysteme, Thermografie und geführte Wellen-basierte Strukturüberwachung. Alle Systeme wurden mittels Precision Time Protocol (PTP) synchronisiert, wobei das HBK-System als Master Clock fungierte. Dadurch konnten geführte Wellen direkt mit Lastzuständen, thermischen Bedingungen und weiteren Sensordaten korreliert werden.

Das GW-SHM System erfasste kontinuierlich Ultraschallmessungen über das installierte Sensornetzwerk. Nach der Datenerfassung wurden die Signale automatisch verarbeitet und charakteristische Signalmerkmale für jeden Aktor-Sensor-Pfad extrahiert. Zusammen mit synchronisierten Temperaturmessungen und Lastinformationen wurden diese Merkmale auf den zentralen „Hamster“-Server der IMA Dresden übertragen. Die SHM-Auswertung wurde auf der von HBK bereitgestellten Plattform „Aqira“ implementiert. Innerhalb dieser Umgebung wurden die synchronisierten Datensätze automatisch abgerufen und mithilfe des in AP 3.2.1 entwickelten GPR-Frameworks verarbeitet. Das implementierte Machine-Learning-Modell kombiniert dabei drei heterogene Informationsquellen:

- Merkmale geführter Wellen
- Temperaturmessungen
- Strukturelle Lastinformationen in Form von Kräften und Momenten

Durch die Kombination dieser Datenquellen innerhalb eines probabilistischen Frameworks sagt das Modell die erwartete Signalantwort unter den aktuellen Umwelt- und Betriebsbedingungen vorher. Abweichungen zwischen vorhergesagter und gemessener Antwort werden anschließend als Hinweise auf anomales Strukturverhalten bewertet.

Abbildung 20 zeigt den implementierten Workflow zur synchronisierten Online-Überwachung und Datenfusion während der Ermüdungsversuche.

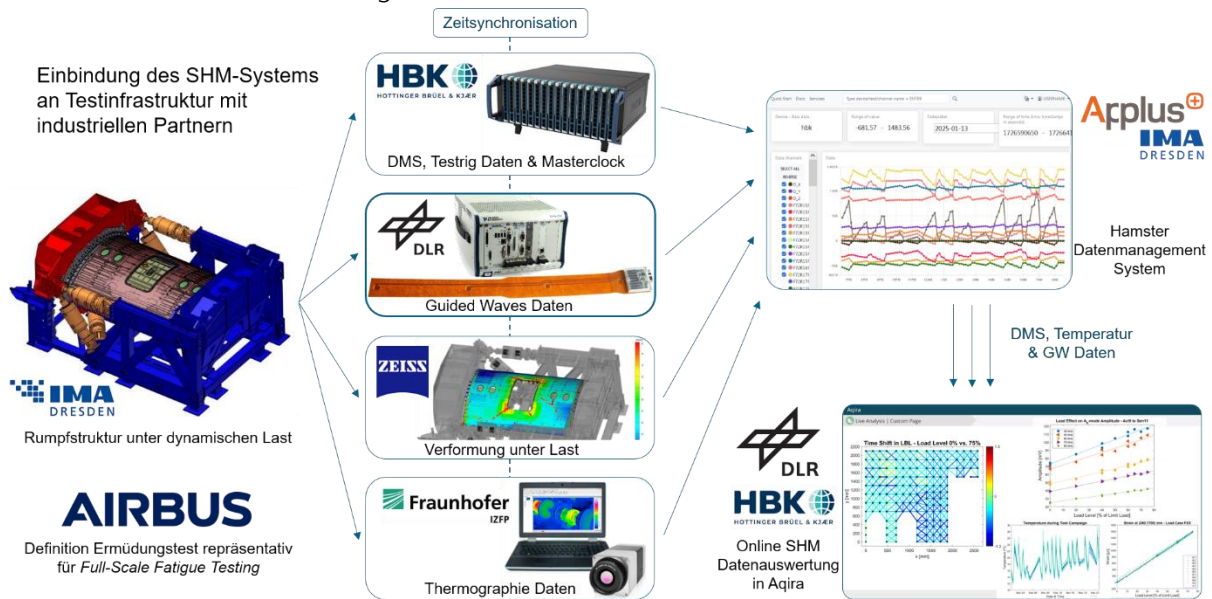


Abbildung 20: Workflow zur synchronisierten Online-Überwachung und Datenfusion mit dem GW-SHM System während der Rapid-EF-Ermüdungsversuche.

Praktische Umsetzung und Demonstration bei der IMA Dresden

Der entwickelte Workflow wurde während der Ermüdungsversuche 2024 bei der IMA Dresden demonstriert. Ziel war die Validierung der vollständigen Datenpipeline unter realistischen Versuchsbedingungen, einschließlich automatisierter Datenerfassung, synchronisierter Datenübertragung, Machine-Learning-basierter Auswertung und Online-Visualisierung.

Der GW-SHM Datenerfassungsrechner führte während der Versuchskampagne periodische Ultraschallmessungen durch. Ein kontinuierlich laufender Python-basierter Prozess überwachte das Messverzeichnis und extrahierte charakteristische Signalmerkmale für alle Aktor-Sensor-Pfade.

Nach der Synchronisation zwischen lokalem Erfassungssystem und Hamster-Server wurden die extrahierten Merkmale zusammen mit pfadspezifischen Zeitstempeln in die zentrale Datenbank hochgeladen. Diese automatisierte Verarbeitungskette ermöglichte die kontinuierliche Bereitstellung synchronisierter SHM-Daten während der gesamten Ermüdungsversuche.

Die Online-Auswertung und Visualisierung erfolgten innerhalb der Aqira-Umgebung (Abbildung 21). Die Anwendung rief kontinuierlich synchronisierte Daten zu geführten Wellen, Temperatur und Last aus der Datenbank ab und verarbeitete diese mithilfe des trainierten GPR-Modells. Basierend auf den aktuellen Umwelt- und Betriebsbedingungen sagte das Modell die erwartete Signalantwort für jeden Aktor-Sensor-Pfad

vorher. Unterschiede zwischen gemessenen und vorhergesagten Merkmalen wurden anschließend als Hinweise auf anomales Strukturverhalten bewertet.

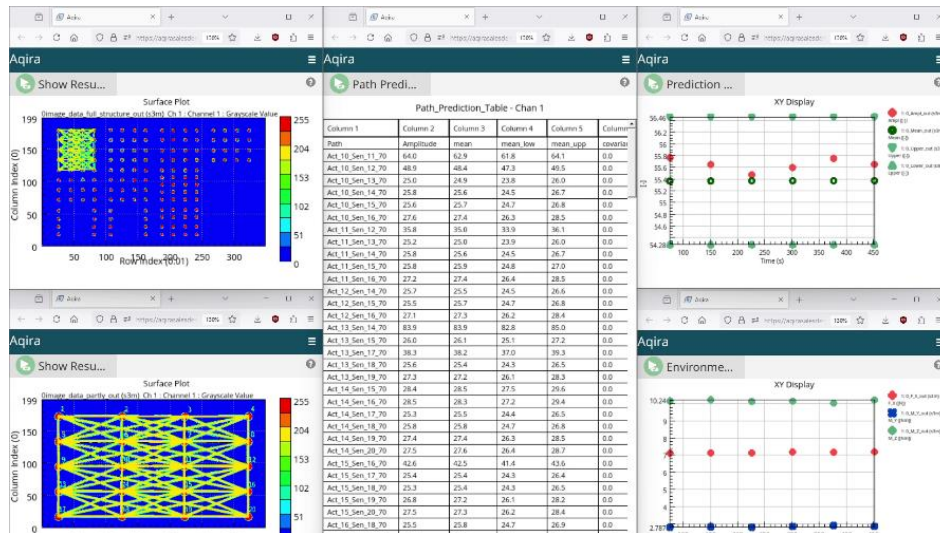


Abbildung 21: Visualisierung der SHM-Ergebnisse innerhalb der Aqira-Umgebung

Aufgrund von Einschränkungen innerhalb der Aqira-Software konnten die kombinierte wahrscheinlichkeitsbasierte Schadenslokalisierung im Rahmen der Demonstration nicht vollständig umgesetzt werden.

Im letzten Schritt des entwickelten Workflows wurde das trainierte GPR-Modell auf Messungen angewendet, die nach Einbringung eines Barely Visible Impact Damage (BVID) aufgenommen wurden. Ziel war die Bewertung, ob die kombinierte Nutzung von geführten Wellen, Temperaturdaten und Lastinformationen eine zuverlässige Schadenserkennung unter realistischen Betriebsbedingungen ermöglicht.

Abbildung 22 zeigt die Antwort des trainierten GPR-Modells für einen repräsentativen Aktor-Sensor-Pfad. Die experimentell gemessenen Signalmerkmale werden dabei mit dem vorhergesagten Mittelwert sowie den Unsicherheitsgrenzen des Modells verglichen. Messungen innerhalb des durch Trainingsdaten abgedeckten Betriebsbereichs können zuverlässig bewertet werden und führen zu schmalen Vorhersageintervallen sowie hoher Modellzuverlässigkeit. Messungen außerhalb des trainierten Umweltbereichs weisen dagegen erhöhte Unsicherheiten und entsprechend breitere Konfidenzintervalle auf. Die Ergebnisse zeigen, dass das probabilistische Framework nicht nur die erwartete Signalantwort unter variierenden Umwelt- und Betriebsbedingungen vorhersagt, sondern gleichzeitig die Zuverlässigkeit der Vorhersage quantifiziert.

Die Ergebnisse verdeutlichen weiterhin, dass eine zuverlässige geführte Wellen-basierte Strukturüberwachung unter realistischen Strukturtestbedingungen die gleichzeitige Berücksichtigung von Umwelt-, Betriebs- und Strukturinformationen erfordert. Durch die Kombination geführter Wellen mit synchronisierten Temperatur- und Lastdaten verbessert das entwickelte Machine-Learning-Framework die Robustheit der Schadenserkennung und reduziert falsch-positive Anzeigen infolge gutartiger Betriebsänderungen.

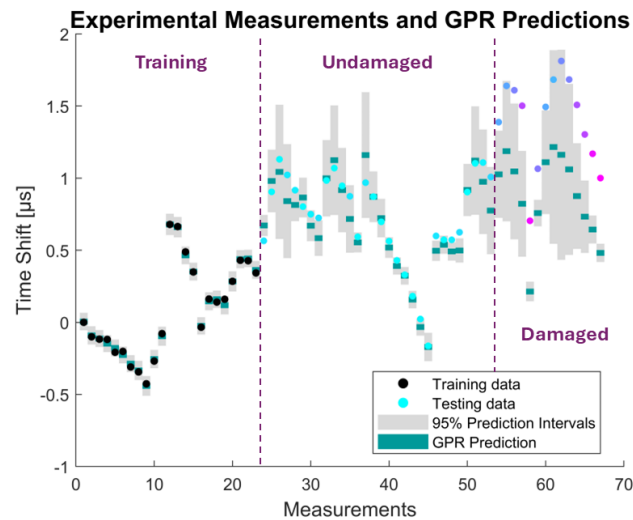


Abbildung 22: Schadenserkennung unter variierenden Umwelt- und Betriebsbedingungen

Im letzten Verarbeitungsschritt wurden die wahrscheinlichkeitsbasierten Schadensindikatoren aller Aktor-Sensor-Pfade mithilfe eines Rekonstruktionsalgorithmus kombiniert. *Abbildung 23* zeigt die resultierende Schadenslokalisierung für zwei repräsentative Lastzustände: den unbelasteten Zustand sowie 75 % der Grenzlaster unter axialer Zugbelastung. In beiden Fällen identifiziert die rekonstruierte Wahrscheinlichkeitsverteilung die geschädigte Region eindeutig und demonstriert damit die Fähigkeit des entwickelten Frameworks zur zuverlässigen Schadenslokalisierung unter variierenden Betriebsbedingungen.

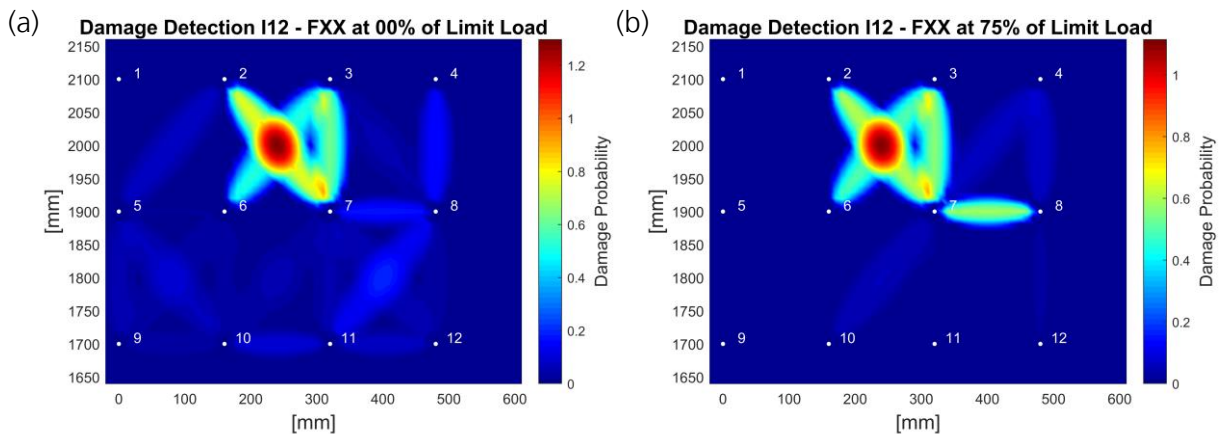
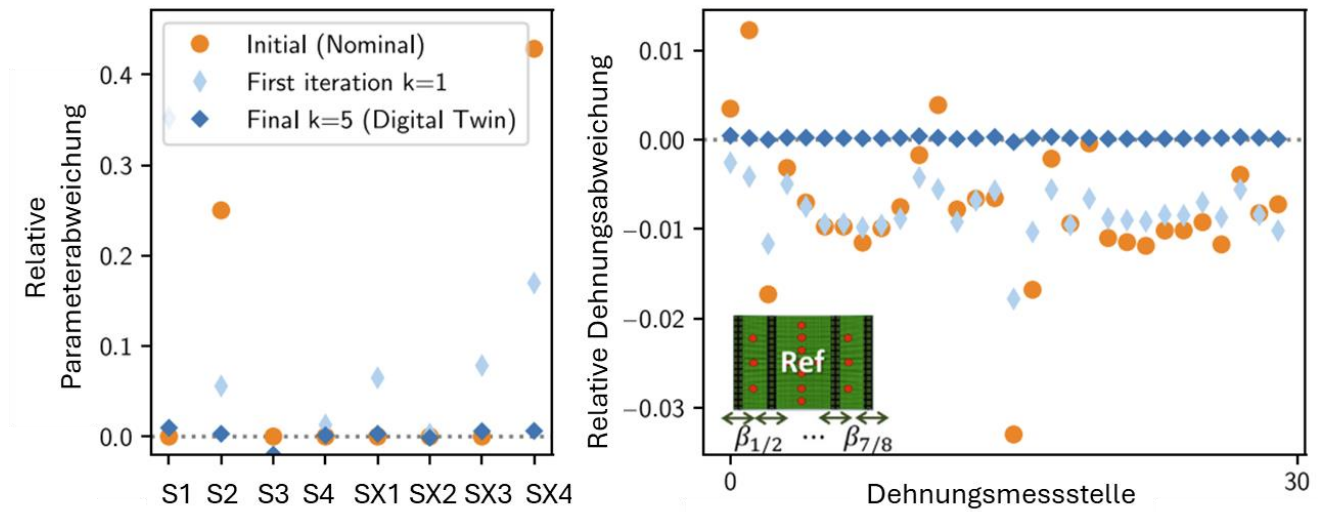


Abbildung 23: Schadenslokalisierung bei (a) unbelastetem Zustand und (b) 75 % der Grenzlaster.

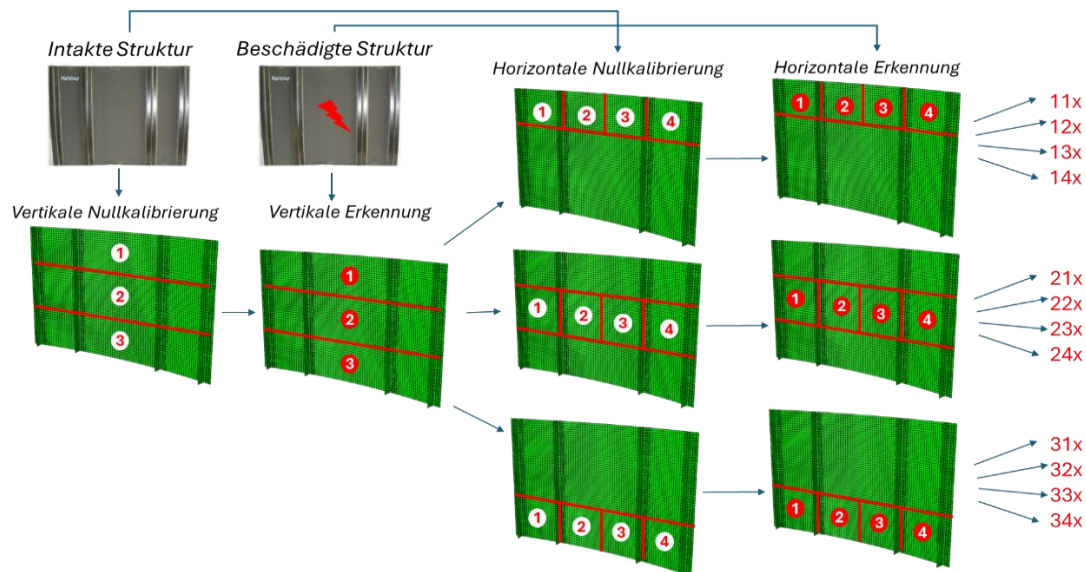
3.1.7. AP 3.4.3 Zustandsüberwachung mittels digitalem Zwilling

Die Kalibriermethode für den digitalen Zwilling kann zur Erkennung von lokalen Steifigkeitsdegradationen genutzt werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Position des Schadens grob bekannt ist (beispielsweise durch Messung mit einem SHM System). Durch das Vorsehen entsprechender Degradationsparameter, kann

die Kalibrierung des digitalen Zwillings Unterschiede im Zustand vor und nach einem Schädigungsereignis feststellen. Abbildung 24b zeigt wie hierzu vorgegangen werden muss: Es ist wesentlich, dass vor der Ermittlung lokaler Degradationen eine Nullkalibrierung mit den Messdaten der intakten Struktur und dem gleichen Parameterset wie zur Schädigungsidentifikation durchgeführt wird.



(a) Schadenserkennung an Versteifungselementen



(b) Systematische Degradationserkennung in verschiedenen Hautbereichen

Abbildung 24: Ergebnisse (a) und methodisches Vorgehen (b) zur Zustandsüberwachung mittels digitalem Zwilling

Diese Nullkalibrierung stellt keinen digitalen Zwilling der Struktur dar, da die Degradationsparameter durch Overfitting zwar eine mathematische Modellverbesserung zeigen, die jedoch keine physische Grundlage hat. Daher ist die Nullkalibrierung lediglich die Vergleichsbasis für die darauffolgende Kalibrierung des Modells mit Messdaten der geschädigten Struktur.

Abbildung 24a zeigt das Ergebnis einer solchen Kalibrierung für eine synthetische Referenz mit einer Degradation am zweiten Versteifungselement S2. Die Degradation konnte durch die Kalibrierungsmethode zuverlässig erkannt werden

Die Simulationsergebnisse des digitalen Zwillings stellen genauere Dehnungen bereit als dies durch das nominelle Modell möglich ist. Daher ist die Strukturbewertung anhand bekannter Versagenskriterien mit dem digitalen Zwilling besser möglich. So wurde der digitale Zwilling der Rumpfschale genutzt, um die während des Rapid EF Strukturversuchs eingebrachten Schäden strukturmeechanisch zu bewerten. Am Beispiel des Impactschadens am Türspant wurde hierzu basierend auf einem analytischen Kriterium für Zugbelastung ermittelt, bei welchen Dehnungen quasi-statisches oder Fatigue-Versagen zu erwarten wäre. Im in *Abbildung 25* gezeigten Ergebnis lagen die versagenskritischen Dehnungen jedoch bei 4000 Microstrain für 10 000 Lastzyklen und über 10000 Microstrain für quasistatische Belastung. Da die Analysen aller Lastfälle eine Dehnung von maximal 1000 Microstrain an der betreffenden Stelle ergaben, ist Schadenswachstum oder gar ein Versagen der Struktur, bedingt durch den hohen Reservefaktor, nicht zu erwarten.

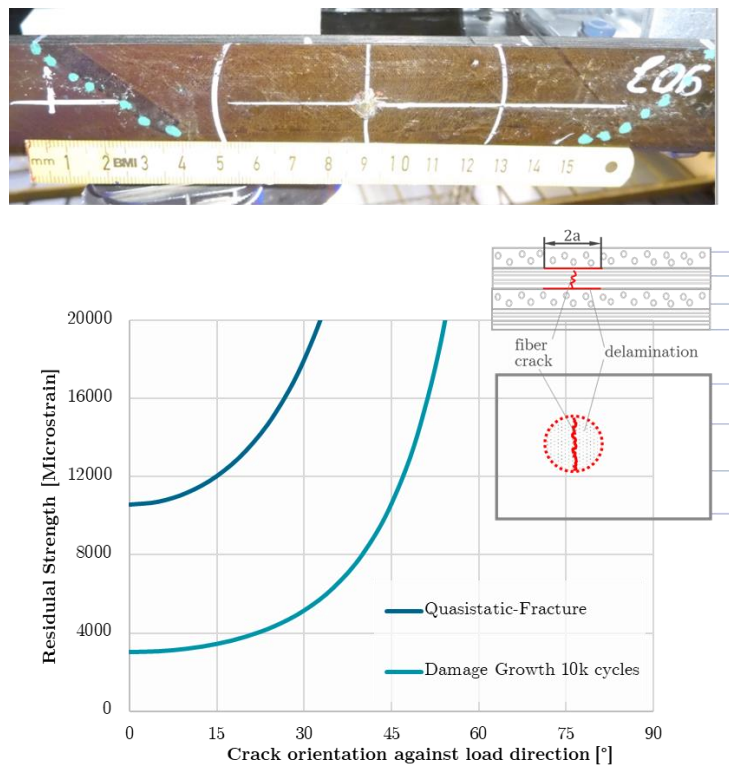


Abbildung 25: Strukturmeechanische Bewertung der Delamination am Türspant der versteiften Rumpfschale

3.2. wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die bewilligten Mittel im DLR Teilvorhaben Rapid EF Enablers wurden entsprechend der Projektplanung zur Durchführung der Arbeiten im DLR-Teilvorhaben eingesetzt. Der mit Abstand größte Anteil der Ausgaben entfiel dabei antragsgemäß auf die Personalkosten. Diese waren erforderlich, um die wissenschaftlich-technischen Arbeiten zum digitalen Zwilling, den virtuellen Sensoren, sowie der SHM-Methoden durchzuführen.

In geringem Umfang wurden außerdem Mittel für Material eingesetzt. Diese waren die messtechnischen Untersuchungen im Arbeitsschwerpunkt der SHM-Methoden erforderlich. Darüber hinaus fielen Softwarekosten für die Nutzung notwendiger, kommerzieller FE-Software. Diese war für die numerischen Strukturmodelle, die Kalibrierung des digitalen Zwillings und die Strukturbewertung erforderlich.

Reisemittel wurden für Projekttreffen sowie für Tätigkeiten im Zusammenhang mit der Versuchsvorbereitung und -Durchführung verwendet. Dadurch konnten die Abstimmungen mit den Verbundpartnern, insbesondere zur Integration der entwickelten Methoden in den Strukturversuch, unterstützt werden. Darüber hinaus wurden Mittel für Konferenzreisen zur Präsentation der Projektfortschritte und Ergebnisse eingesetzt.

Insgesamt wurden die Mittel zweckentsprechend eingesetzt. Die Ausgaben standen in direktem Zusammenhang mit den im Vorhaben geplanten Arbeiten und waren für die Erreichung der erzielten Ergebnisse notwendig.

3.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten im DLR Teilvorhaben Rapid EF Enablers waren notwendig, um die Ziele Reduzierung von Rüstzeit und Stillstandszeit im von Struktur-Ermüdungsversuchen mittels digitaler Methoden und Strukturüberwachung zu erreichen. Die Kombination aus kalibriertem digitalem Zwilling und virtuellen Sensoren zeigt, dass diese digitalen Methoden die Messwertgewinnung erheblich vereinfachen können und das Erreichen hoher Genauigkeit möglich ist.

Der Umfang der Arbeiten war angemessen, da die entwickelten Methoden unmittelbar auf die Projektziele zur Verkürzung von Rüst- und Stillstandszeiten ausgerichtet waren und am Großversuch an der MAAXIMUS-Schale erprobt werden konnten. Die bewilligten Mittel wurden zielgerichtet für den wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn zur Erreichung der Vorhabenziele eingesetzt.

3.4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die erzielten Ergebnisse bilden eine wesentliche Grundlage für die Verkürzung der Entwicklungsdauer von Luftfahrtstrukturen. Die zeitintensiven Struktur-Ermüdungsversuche können durch die entwickelten Methoden zur Kalibrierung eines digitalen Zwillings, der virtuellen Messwerterfassung und der schallbasierten Zustandsüberwachung dazu beitragen, Versuchsdaten effizienter durchzuführen und auszuwerten, schwer zugängliche Strukturbereiche besser zu bewerten und den Instrumentierungsaufwand zukünftiger Versuche zu reduzieren.

Für das DLR ergibt sich daraus eine direkte wissenschaftliche Verwertbarkeit in Form von Veröffentlichungen, Anschlussarbeiten und der Weiterentwicklung eigener Simulations- und SHM-Kompetenzen. Darüber hinaus sind die Ergebnisse für zukünftige nationale und europäische Forschungsprojekte sowie für Kooperationen mit industriellen Partnern nutzbar.

Langfristig können die entwickelten Methoden dazu beitragen, Strukturversuche mit hoher Aussagekraft effizienter durchzuführen und damit Entwicklungs- und Nachweisprozesse für neue Luftfahrtstrukturen zu beschleunigen.

3.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit wurden neue Publikationen und relevante Entwicklungen bezüglich der Themen digitaler Zwilling, virtueller Sensorik, Strukturüberwachung und datenbasierte Auswertemethoden kontinuierlich verfolgt. Dabei wurden insbesondere Veröffentlichungen zu modellgestützter Versuchsauswertung, SHM-Verfahren, geführten Wellen, Schallemission sowie zur Anwendung von KI-Methoden in der Zustandsüberwachung berücksichtigt.

Während der Durchführung des Vorhabens sind dem DLR keine Fortschritte Dritter bekannt geworden, die die Zielsetzung, Durchführung oder Verwertbarkeit der im Vorhaben entwickelten Methoden grundsätzlich infrage stellen oder eine wesentliche Anpassung der Arbeiten erforderlich gemacht hätten.

3.6. Veröffentlichungen

1. Bogenfeld, Raffael (2023) Calibration of a Digital Twin for Structural Testing. 11th International Conference on Composite Testing and Model Identification, 2023-05-31 - 2023-06-02, Girona, Spanien.
2. Moix-Bonet, M., Schmidt, D., Eckstein, B., & Wierach, P. (2024). A Composite Fuselage under Mechanical Load: a case study for Guided Wave-based SHM. Published in Proceedings of the 10th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2024), June 10-13, 2024 in Potsdam, Germany. e-Journal of Nondestructive Testing, 29(7). <https://doi.org/10.58286/29842>
3. Moix-Bonet, Maria und Schmidt, Daniel und Eckstein, Benjamin und Wierach, Peter (2025) Load and Temperature Influence on a GW-SHM System for a Composite Fuselage. In: 10th Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring, APWSHM 2024, 50. Materials Research Forum journal. APWSHM 2024, 2024-12-08 - 2024-12-11, Sendai, Japan. <https://doi.org/10.21741/9781644903513-1> ISBN 9781644903506. ISSN 2474-3941
4. Moix-Bonet, M., Schmidt, D., Eckstein, B., & Wierach, P. (2025). Damage Detection in Composite Aircraft Fuselages Under Load and Temperature Using Gaussian Processes for GW-SHM. Published in Proceedings of the 15th International Workshop on SHM (IWSHM 2025), Sept 9-11 2025 in Stanford, CA, USA, 2025, <https://doi.org/10.12783/shm2025/37302>
5. Bogenfeld R, Wille T, Witzel O, et al. (2026) Experiment-based calibration of a digital twin for composite panel testing using standard signals. Measurement 276:121329. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2026.121329>
6. Moix-Bonet, M., Eckstein, B., Schmidt, D., & Wierach, P. Guided Wave-based SHM for Testing – A Composite Fuselage under Mechanical Load. To be published in Structural Health Monitoring. (Artikel akzeptiert zur Veröffentlichung)

7. Moix-Bonet, M., Eckstein, B., Behrens, T. & Wierach, P. (2026). Effects of multi-axial Loading on a GW-SHM System for a Composite Fuselage. To be published in Proceedings of the 11th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2026), July 7-10, 2026 in Toulouse, France

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Logos aller Partner im Konsortium des Verbundprojekts „Rapid EF Enablers“	4
Abbildung 2: Arbeitspaketstruktur des Verbundprojekts Rapid EF Enablers	5
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Arbeiten zur Kalibrierung des digitalen Zwillings	10
Abbildung 4: Verifikation der Kalibriermethode mit und ohne Parameterlinearisierung an einem analytischen Kragbalkenmodell.....	11
Abbildung 5: Kalibrierung eines digitalen Zwillings für einen versteiftes Composite-Paneel im axialen Druckversuch.....	12
Abbildung 6: Kalibrierung eines digitalen Zwillings für ein versteiftes Composite-Paneel mit synthetischer Referenzsimulation mit dem voll Messdatenset (oben) und einem reduzierten Messdatenset von der Paneel-Außenseite (unten)	12
Abbildung 7: Kalibrierung eines digitalen Zwillings mit experimentellen Daten aus dem Paneel-Versuch	13
Abbildung 8: Kalibrierprozess (a) und Ergebnisse (b) für den digitalen Zwilling der Rumpfschale des Rapid EF Strukturversuchs.....	15
Abbildung 9: Erarbeitete Konzepte für verschiedene Arten virtueller Sensormodelle und deren Eingangsdaten.....	17
Abbildung 10: Grundprinzip des Virtuellen Sensors zur erweiterten Dehnungserfassung	18
Abbildung 11: Einheitslastfälle und Service-Lastfälle für den Versuch an der versteiften Rumpfschale.....	18
Abbildung 12: Ergebnisse der virtuellen Sensormodelle am Strukturversuch der Rumpfschale im Vergleich zu den experimentellen Messdaten und den FE-Ergebnissen	20
Abbildung 13: Out-of-Plane Verformung im Strukturmodell im Vergleich zur Aramis Messung im Experiment zur Validierung des kalibrierten digitalen Zwillings am versteiften Paneel	22
Abbildung 14: GW-Signal für den Pfad Aktor 3 zu Sensor 7 bei 70 kHz (a) im ungeschädigten Zustand und (b) Vergleich zwischen ungeschädigtem (grau) und geschädigtem Zustand (farbig).	24
Abbildung 15: Amplitude und Laufzeit des GW-Signals für den Pfad Aktor 3 zu Sensor 7 bei 70 kHz in Abhängigkeit von (a) Temperatur, (b) Last und (c) Schadenszustand.	25
Abbildung 16: (a) Gaußsche Prozessregression für die Laufzeitverschiebung des Pfades Aktor 3 zu Sensor 7; (b) GPR-Modell bei 0 % Last mit Trainings- und Testdaten.	26
Abbildung 17: Last- und Temperaturbedingungen während der GW-Messkampagne. (a) 3D Darstellung der aufgebrachten Lasten; (b) Projektion der Lasten in die My–Mz-Ebene; (c) Projektion der Lasten in die Fx–My-Ebene; (d) Projektion der Lasten in die Fx–Mz-Ebene.	27
Abbildung 18: GW-Signalmerkmale unter mehrachsiger Belastung. (a) Amplitude Pfad 1–3; (b) Amplitude Pfad 1–5; (c) Laufzeit Pfad 1–3; (d) Laufzeit Pfad 1–5.	28
Abbildung 19: Teildarstellungen des trainierten GPR-Modells. (a) Fx, Temperatur und Laufzeit; (b) My, Mz und Laufzeit.	29
Abbildung 20: Workflow zur synchronisierten Online-Überwachung und Datenfusion mit dem GW-SHM System während der Rapid-EF-Ermüdungsversuche.	30
Abbildung 21: Visualisierung der SHM-Ergebnisse innerhalb der Aqira-Umgebung.....	31

Abbildung 22: Schadenserkennung unter variierenden Umwelt- und Betriebsbedingungen	32
Abbildung 23: Schadenslokalisierung bei (a) unbelastetem Zustand und (b) 75 % der Grenzlast.	32
Abbildung 24: Ergebnisse (a) und methodisches Vorgehen (b) zur Zustandsüberwachung mittels digitalem Zwillling	33
Abbildung 25: Strukturmechanische Bewertung der Delamination am Türspant der versteiften Rumpfschale	34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Balkenplan der Arbeitspakete des Projekts in ursprünglicher Planung und unter Berücksichtigung der kostenneutralen Verlängerung	8
Tabelle 2: Anwendungsmatrix für die Initialisierung und Nutzung von virtuellen Sensormodellen für multiple Lastfälle	19

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BVID	Barely Visible Impact Damage
FE	Finite Elemente
GPR	Gaussian Process Regression
GW	Guided Waves
HAP	Hauptarbeitspaket
LBL	Lateral Bending Left
LBR	Lateral Bending Right
LSQ	Least Squares
MKS	Multikamerasystem
POD	Proper Orthogonal Decomposition
SHM	Structural Health Monitoring
VBD	Vertical Bending Down
VBU	Vertical Bending Up

Literaturverzeichnis

- [1] Bogenfeld, R. (2019). A combined analytical and numerical analysis method for low-velocity impact on composite structures [Technische Universität Carola-Wilhelmina zu Braunschweig]. In Doctoral Thesis. <https://elib.dlr.de/130241/>
- [2] Bogenfeld, R., Freund, S., & Schuster, A. (2020). An analytical damage tolerance method accounting for delamination in compression-loaded composites. *Engineering Failure Analysis*, 118 (September), 104875. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104875>
- [3] Dienel, C. P. (2014). Modeling the Behavior of Impact Induced Multiple Delaminations under Compressive Load. *Proceedings of the American-Society-of-Composites 29th Technical Conference on Composite Materials*, 1. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- [4] Schmidt D. et al.: Development of a Door Surround Structure with Integrated Structural Health Monitoring System, *Smart Intelligent Aircraft Structures (SARISTU) - Proceedings of the Final Project Conference*, S. 935-945, 2016
- [5] Moix-Bonet M, Eckstein B, Wierach P (2016) Probability-based damage assessment on a composite door surrounding structure. *8th European Workshop on Structural Health Monitoring, EWSHM 2016* 1:131–139
- [6] Tao F, Zhang H, Liu A, Nee AYC (2019) Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 15:2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
- [7] Li L, Aslam S, Wileman A, Perinpanayagam S (2022) Digital Twin in Aerospace Industry: A Gentle Introduction. *IEEE Access* 10:9543–9562. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3136458>
- [8] Semeraro C, Lezoche M, Panetto H, Dassisti M (2021) Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry* 130:103469. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103469>
- [9] Bogenfeld R, Wille T, Witzel O, et al. (2026) Experiment-based calibration of a digital twin for composite panel testing using standard signals. *Measurement* 276:121329. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2026.121329>
- [10] Witzel, O., Burg, A., & Schwarz, B. (2025). Weiter- und Neu-Entwicklung optischer 3D Messtechnik für digitale Verfahren zur Reduzierung der Rüst- und Stillstandszeit; im von Airbus Commercial geführten Förderverbundprojekt: Rapid EF Enablers - Reduzierung der Entwicklungszeit eines neuen Flugzeugmusters durch signifikante Verkürzung des Zeitbedarfs eines EF Versuchs für den Ermüdungsnachweis. Hannover : Technische Informationsbibliothek. <https://doi.org/10.34657/26044>