

Schlussbericht zum Vorhaben

„Methoden- und Algorithmenentwicklung zur Kopplung testbasierter und computerbasierter Modelle fuer COUPLE“

im Rahmen des Eurostars Projekts
E! 114266 COUPLE
„Kopplung testbasierter und computerbasierter Modelle zur Vorhersage kritischer Vibroakustik-Probleme in Automobilen“

Francesco Trainotti, Daniel Rixen

Technischen Universitaet Muenchen

Lehrstuhl fuer Angewandte Mechanik

Professor dr.ir. Daniel J. Rixen

Boltzmannstrasse 15

85748 Garching

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

Förderkennzeichen: 01QE2055

Projektlaufzeit: 01.09.2020 – 31.08.2023

TEIL I: KURZBERICHT

Bei der Konstruktion und Entwicklung eines Automobils steht die Analyse von NVH-Aspekten wie Fahrkomfort und strukturelle Integrität an erster Stelle. Die heutigen Industriestandards für NVH-Vorhersagen stützen sich in hohem Maße auf computergestützte Modelle, was den Bau vollständiger physischer Prototypen für Validierungs- und Aktualisierungsaufgaben erfordert. Die Idee hinter "COUPLE" ist die Kombination von computergestützten und testbasierten Modellen in einem komponentenbasierten Ansatz, der genaue Vorhersagen und NVH-Optimierung in einem frühen Stadium ohne den Bau vollständiger Prototypen ermöglicht.

Die frequenzbasierte Substrukturierung ist ein Rahmen für den Zusammenbau hybrider Komponenten, bei dem eine große Baugruppe in Teilkomponenten unterteilt und separat mit frequenzbasierten Übertragungsfunktionen analysiert wird. Diese Teilkomponenten werden dann an gemeinsamen Schnittstellen unter Verwendung von Kompatibilitäts- und Gleichgewichtsbedingungen miteinander gekoppelt. Dieser Ansatz ermöglicht die Einbeziehung testbasierter Modelle und erhöht die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Vorhersagen, insbesondere bei NVH-Analysen. Es ergeben sich jedoch auch Herausforderungen, wie z. B. der Umgang mit Messfehlern und die Charakterisierung von Schnittstellen. Messrauschen und Messunsicherheiten können die Assemblierung von testbasierten Komponenten erheblich beeinträchtigen. Dies kann besonders in Frequenzbändern mit niedrigem Signal-Rausch-Verhältnis und Komponenten mit geringer Dämpfung relevant sein. Ähnliche Probleme ergeben sich durch Modellierungsannahmen wie die Linearität der Systemdynamik oder andere Parameterabhängigkeiten, die das Verhalten der Komponenten unter Betriebsbedingungen beeinflussen können. Darüber hinaus bleibt die Definition von Schnittstellen für die Kompatibilisierung, insbesondere für große, kontinuierliche und Mehrpunktverbindungen, bei denen die klassische Beschreibung mit 6 Freiheitsgraden nicht ausreicht, eine offene Forschungsfrage. Die Rolle von Verbindungen und deren dynamischer Einfluss, insbesondere in Optimierungsabläufen, ist von entscheidender Bedeutung. Die frequenzbasierte Substrukturierung hat sich zwar bei der Charakterisierung von Gummilagern in Kraftfahrzeugen bewährt, ihre Zuverlässigkeit unter verschiedenen Betriebsparametern (z.B. Amplitude, Temperatur) und ihre Ausweitung auf steifere Verbindungselemente wie Schraubverbindungen müssen jedoch noch vollständig überprüft werden.

Angesichts der oben genannten technischen Herausforderungen wurden die Forschungsaufgaben ursprünglich in die folgenden Pakete gegliedert:

- a) Untersuchung der Qualitätsprüfung von Komponentenmodellen
- b) Erforschung der Kopplungsbedingungen
- c) Schnittstellenphysik - Best Practices/Standardisierung
- d) Analyse der Ausbreitung von Unsicherheit

Die Aufgaben (a) und (d) befassen sich mit den Auswirkungen von Fehlern und Messunsicherheiten, mit dem Ziel, deren Auswirkungen zu erkennen, zu quantifizieren und schließlich zu verringern. Die Aufgaben (b) und (c) konzentrieren sich auf die experimentelle Beschreibung von Schnittstellen bzw. Verbindungselementen. Hier geht es darum, die Darstellung der Schnittstellendynamik zu verallgemeinern und auf große und kontinuierliche Schnittstellen zu erweitern sowie die dynamische Charakterisierung von Verbindungselementen einzubeziehen und zu standardisieren.

Zur Erleichterung des Benchmarking der Forschung und der Einbindung der Methoden und Werkzeuge in industrielle Umgebungen wurde eine proaktive Zusammenarbeit mit den Projektpartnern aufgenommen. Dazu gehörte die Auswahl geeigneter Versuchsaufbauten und -szenarien zur Validierung der vorgeschlagenen Methoden sowie die Aufrechterhaltung einer regelmäßigen Kommunikation mit den Partnern, um Software-Schnittstellen und Arbeitsabläufe (Vibes) zu definieren und industrielle Komponenten (BMW) zu identifizieren und zu validieren.

Es wurden Anstrengungen bei der Analyse der Schnittstellenbeschreibung (b) für experimentelle Komponenten unternommen. Der klassische Ansatz einer Schnittstelle mit 6 Freiheitsgraden erwies sich als ausreichend für starre und lokalisierte Verbindungen (Virtual Point Transformation). Der Fokus wurde auf deformierbare/flexible Moden gerichtet mit dem Ziel, das flexible Verhalten der Schnittstelle zu erfassen und zu koppeln und dabei eine minimale Anzahl von Kompatibilitätskoordinaten zu erhalten. Hier wurden neue Konzepte mit testbasierten Singulärwerten und/oder physikalischen Moden entwickelt, die sich als wirksam (und notwendig) für große kontinuierliche Schnittstellen erwiesen haben.

Die Forschung auf dem Gebiet der Fugendynamik (c) hat zur Formulierung grundlegender Fragen über die geeignete Gummicharakterisierungsstrategie in Abhängigkeit von der Art des Bauteils, dem gewünschten Modell und den erforderlichen Betriebsbedingungen geführt. Die Standard-Charakterisierung auf der Grundlage der Substrukturierung hat sich im Fall von Gummilagern mit linearer Dynamik als robust erwiesen. Alternative Charakterisierungsstrategien, wie Materialtests und Shaker-Kontrolltests, haben sich als vielseitiger bei der Analyse von Abhängigkeiten von Parametern wie Temperatur und Amplitude erwiesen und den Weg für das Konzept von einer gemischten Charakterisierung geebnet. Wichtige Ergebnisse wurden auch bei der Charakterisierung von Schraubverbindungen erzielt, insbesondere im Hinblick auf die Robustheit der Identifikation der Steifigkeit.

Die Bauteilqualität (a) wurde im Zusammenhang mit der Quantifizierung und Ausbreitung von Messfehlern (d) analysiert. Eine Erweiterung der Taylor-basierten Methode zur Quantifizierung der Unsicherheit wurde entwickelt und an numerischen und experimentellen Beispielen getestet. Neue Einsichten in die Visualisierung der gemessenen Unsicherheit führten zum Vorschlag mehrerer frequenzbasierter Fehler-/Qualitätsmetriken. Darüber hinaus wurde eine neuartige SVD-basierte Filterstrategie, PRANK genannt, vorgeschlagen, um den Einfluss des Rauschens zu reduzieren und das Datensignal zu rekonstruieren, und mit klassischen modebasierten Ansätzen und Regularisierungstechniken verglichen, wobei sich eine überlegene Effektivität beim Umgang mit sehr niedrigen Signal-Rausch-Bandbreiten zeigte. Auch die Einbeziehung von Nichtlinearitäten in den Substrukturierungs-Workflow wurde untersucht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Höhepunkt der Eurostars-Zusammenarbeit einen bedeutenden Meilenstein auf dem Weg zum robusten NVH-Prototyping von Fahrzeugen mit einem hybriden Substrukturierungsansatz darstellt. Dank der Zusammenarbeit und des Engagements wurden ein tieferes Verständnis der testbasierten Modellierung, innovative Methoden und einsatzbereite Analysewerkzeuge entwickelt. Diese Ergebnisse bestätigen nicht nur die Effektivität des Arbeitsablaufs, sondern bilden auch eine solide Grundlage für zukünftige Entwicklungen im Bereich der modulbasierten NVH-Systemoptimierung.

TEIL II: Ausführlicher Sachbericht

Die Analyse von NVH-Aspekten wie Fahrkomfort und strukturelle Integrität steht bei der Konstruktion und Entwicklung von Kraftfahrzeugen im Vordergrund. Dieser Aspekt wird durch das Aufkommen von Elektro- und Hybridfahrzeugen noch verstärkt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, die hauptsächlich durch niederfrequente Motorgeräusche gekennzeichnet sind, die andere Geräusche überdecken, erzeugen Elektro- und Hybridfahrzeuge "neue" Schwingungen mit höheren Frequenzen bis zu 5 kHz. Daher ist die Bewertung und Vorwegnahme von NVH-Problemen in einer frühen Phase des Fahrzeugentwicklungszyklus von großer Bedeutung und kann sowohl Kosten- als auch Zeiteinsparungen bewirken. Die heutigen Industriestandards für die Vorhersage von NVH-Problemen stützen sich weitgehend auf computergestützte Modelle der Komponenten, wobei Werkzeuge wie Computer Aided Design (CAD) und Computer Aided Engineering (CAE) zum Einsatz kommen. Die Vorhersage der Leistung des montierten Systems durch Kopplung der Komponenten ist jedoch aufgrund der Komplexität der Systemdynamik noch kein zuverlässiger Prozess. Daher ist der Bau vollständiger physischer Prototypen für die Validierung und Modellaktualisierung erforderlich, was die lokale Neuentwicklung und Optimierung zu einem ineffizienten und kostspieligen Prozess macht. Die Verwendung von Testdaten für Komponenten mit komplexem dynamischen Verhalten ist daher notwendig, um die Genauigkeitsanforderungen zu erfüllen. Die Idee hinter "COUPLE" ist es, computergestützte und testbasierte Modelle in einem komponentenbasierten Ansatz zu kombinieren, um genaue Vorhersagen in einem frühen Stadium und eine NVH-Optimierung zu ermöglichen, ohne dass vollständige Prototypen gebaut werden müssen.

Stand der Technik und technische Herausforderungen

Die frequenzbasierte Unterstrukturierung wird als Rahmen für den Zusammenbau von modellbasierten und testbasierten Komponenten gewählt. Bei der frequenzbasierten Substrukturierung wird eine große Baugruppe in Teilkomponenten unterteilt, die separat mit Hilfe von frequenzbasierten Übertragungsfunktionen (oder Frequenzgangfunktionen) analysiert und an den gemeinsamen Schnittstellen über Kompatibilitäts- und Gleichgewichtsbedingungen miteinander gekoppelt werden. Die von Testingenieuren üblicherweise verwendete frequenzbasierte Formulierung wird als Lagrange Multiplier - Frequency-Based Substructuring (LM-FBS) [1,2,3] bezeichnet, die ihren Namen der Verwendung von Schnittstellenkräften (deren Amplituden die Lagrange-Multiplikatoren sind) als Unbekannte bei der Lösung der Bewegungsgleichungen mit den Schnittstellenbedingungen verdankt. Die mathematische Formel lautet wie folgt:

$$Y^{coupled} = Y - YB^T (BYB^T)^{-1} BY$$

Dabei ist Y die ungekoppelte Blockdiagonalmatrix, die die dynamische Nachlässigkeit der Teilsysteme enthält, B ist eine signed Boolean Matrix, die die Freiheitsgrade darstellt, die zwischen den Teilsystemen kompatibel sein müssen, und $Y^{coupled}$ ist die resultierende zusammengesetzte dynamische Nachlässigkeit.

Die Verwendung von Frequenzgängen anstelle von z.B. physikalischen Moden erleichtert die Integration von versuchsbasierten Modellen, was die Zuverlässigkeit und Genauigkeit von NVH-Vorhersagen für das zusammengesetzte System erhöht. Mehrere technische Herausforderungen behindern jedoch die systematische Verwendung experimentell identifizierter Komponenten. Zwei wesentliche Aspekte sind der Einfluss von Messfehlern

und die Charakterisierung von Grenzflächen. Eine unzureichende dynamische Beschreibung von Grenzflächen in Verbindung mit Messfehlern führt unweigerlich zu Fehlern und irreführenden Vorhersagen.

Das Vorhandensein von Messrauschen und Messunsicherheiten ist oft ein Hindernis für die erfolgreiche Zusammensetzung von Komponenten auf der Grundlage von Tests. Eine Matrixinversion charakterisiert den Kopplungsalgorithmus und verstärkt daher den Fehler in Frequenzbändern mit niedrigem Signal-Rausch-Verhältnis, wie z. B. bei Antiresonanzen oder dynamischen Nullstellen des Systems. Dieser Aspekt wird noch verstärkt, wenn es sich um Komponenten mit geringer Dämpfung ($< 5\%$ Dämpfungsverhältnis) handelt.

Regularisierungstechniken wie Ridge/Tikhonov oder Truncated Singular Value Decomposition [4,5] wurden vorgeschlagen, um die Inversion der Grenzflächenmatrix durch Dämpfung der schlechten Konditionierung zu behandeln. Darüber hinaus wurde die Fortpflanzung von zufälligen Messfehlern durch den substrukturierenden Kopplungsalgorithmus in mehreren neueren Veröffentlichungen theoretisiert und formuliert [6,7,8]. Techniken, die auf der Taylor-Entwicklung basieren, standen aufgrund des hohen Rechenaufwands im Mittelpunkt solcher statistischen Analysen. Trotz der bedeutenden Fortschritte, die im akademischen Umfeld bei der Quantifizierung der Unsicherheit und der Datenverarbeitung zur Lärmpegelkontrolle erzielt wurden, ist die Anwendung dieser Techniken in der industriellen Montage noch nicht Standard. Die Integration von Filter- und Unsicherheitsquantifizierungsstrategien könnte Ingenieuren wertvolle Werkzeuge zur Bewertung der Qualität eines gemessenen Bauteils an die Hand geben und damit die Iterationskosten senken. Ähnliche Probleme ergeben sich durch Modellierungsannahmen wie die Linearität der Systemdynamik, die bei der Unterstrukturierung selten in Frage gestellt werden, oder durch andere Abhängigkeiten von Systemparametern, die das Komponenten- oder Gesamtverhalten unter Betriebsbedingungen beeinflussen können.

Darüber hinaus ist der Kern des Montageprozesses in der Substrukturierung die Definition von Schnittstellen, die kompatibel sein müssen. Dabei werden Techniken der Schnittstellenreduktion eingesetzt, um eine vollständige (im dynamischen Sinne) Schwingungsübertragung über die Schnittstelle zu gewährleisten und gleichzeitig kollokierte Freiheitsgrade für die Kopplung der Komponenten bereitzustellen. Diese Strategien werden oft als "Abschwächung" der ansonsten strengen Kompatibilitätsbedingung bezeichnet, wodurch Locking-Phänomene, die durch unvollkommene Messbedingungen (unzureichende oder unpraktische Kollokation von Messgeräten, Messfehler und schlecht konditionierte Matrizen) verursacht werden, vermieden werden. Die Behandlung von diskreten und wohldefinierten Schnittstellen unter Verwendung von Translations- und Rotationsfreiheitsgraden (d.h. Virtual Point Transformation [9]) ist in der Substrukturierung gut etabliert. In der Realität werden Komponenten jedoch häufig durch kontinuierliche und flexible Schnittstellen verbunden. Eine Möglichkeit besteht darin, die Schnittstelle mit mehreren virtuellen Punkten zu modellieren [10]. Ein allgemeiner Ansatz zur robusten Behandlung großer, kontinuierlicher und Mehrpunkt-Schnittstellenverbindungen ist eine offene Forschungsfrage. Die Verwendung sogenannter deformierbarer Schnittstellenmoden kann die Beschreibung gut konditionierter (im mathematischen Sinne) und gut repräsentativer (im dynamischen Sinne) Schnittstellenmatrizen ermöglichen, ohne dass mehrere virtuelle Punkte entlang der Schnittstelle verteilt werden müssen [11]. In der Literatur wurden alternative Strategien vorgeschlagen, bei denen ein externe Ersatzkomponente, ein so genannter Transmission Simulator, verwendet wird [12]. Diese Methoden erleichtern die Analyse der Schnittstellendynamik in den zusammengesetzten Konfigurationen (und ermöglichen somit ein besseres "Lesen" des Schnittstellenverhaltens) und bieten praktische Vorteile, da sie mehr Platz für die Platzierung von Anregungs- und

Messeinrichtungen bieten. Bei der Substrukturierung von Verbindungen dürfen die Rolle der Verbindungen und ihr dynamischer Einfluss nicht vernachlässigt werden, insbesondere im Zusammenhang mit einem Optimierungsworkflow [13]. Die frequenzbasierte Substrukturierung wurde in der Industrie erfolgreich eingesetzt, um die Dynamik von Gummilagern in Kraftfahrzeugen zu charakterisieren [14,15]. Dies wird im Allgemeinen durch die Entkopplung der Dynamik von zwei Ersatzkomponenten erreicht, die auf beiden Seiten des zu identifizierenden Gummilagers angebracht sind. Eine gebräuchliche Formulierung des Entkopplungsproblems, bekannt als Inverse Substructuring (oder in-situ), ist in der Lage, die Identifizierung allein auf der Grundlage einer einzigen Messkampagne der Dynamik des montierten Systems durchzuführen. Die Ersatzkomponenten werden verwendet, um eine angemessene Anregung und Beobachtung aller wichtigen Schwingungspfade durch das Gummilager zu gewährleisten. Die Verfeinerung und Standardisierung des experimentellen Charakterisierungsverfahrens würde es ermöglichen, in der industriellen Praxis (z.B. bei hydraulischen Maschinen) übliche Strategien zu ersetzen. Die Zuverlässigkeit der Vorhersagen hinsichtlich der Abhängigkeit von Betriebsparametern (wie Amplitude, Temperatur usw.) wurde noch nicht systematisch überprüft, ebenso wenig die Ausweitung auf starrere Verbindungselemente wie z.B. Schraubverbindungen.

Arbeitspakete und Zusammenarbeitsumgebung

Im Rahmen des "COUPLE"-Projekts war die TUM federführend bei der Forschung und Methodenentwicklung. Angesichts der oben genannten technischen Herausforderungen wurden die Forschungsaufgaben ursprünglich in die folgenden Pakete gegliedert:

- a) Untersuchung der Qualitätsprüfung von Komponentenmodellen
- b) Erforschung der Kopplungsbedingungen
- c) Schnittstellenphysik - beste Praktiken/Standardisierung
- d) Analyse der Unsicherheitsfortpflanzung

Die Aufgaben (a) und (d) befassen sich mit den Auswirkungen von Fehlern und Messunsicherheiten mit dem Ziel, deren Auswirkungen zu erkennen, zu quantifizieren und letztlich abzuschwächen. Während sich Aufgabe (a) auf Qualitäts- oder Fehlermetriken konzentriert, um die Vollständigkeit und Zuverlässigkeit einer testbasierten Komponentenbeschreibung zu definieren, zielt Aufgabe (d) auf die Entwicklung von Algorithmen zur effektiven Handhabung solcher Fehlerquellen und zur Bewertung ihrer Auswirkungen bei der Montage von Komponenten ab. Während des gesamten Projekts galt unsere Aufmerksamkeit in erster Linie der Aufgabe (d). Dieser Schwerpunkt ergibt sich aus unserer gemeinsamen Erkenntnis, dass die Bewertung der Qualität einer Komponente unabhängig von ihrer Rolle in der Montageaufgabe sowohl schwierig als auch letztlich unpraktisch ist (wenn nicht sogar eine unmögliche Aufgabe, wenn es darum geht, eine geeignete Schnittstellenbeschreibung zu bewerten, ohne die montierte Konfiguration von vornherein zu kennen).

Die Aufgaben (b) und (c) konzentrieren sich stattdessen auf die experimentelle Implementierung und Beschreibung von Schnittstellen bzw. Gelenken. In (b) geht es um die Verallgemeinerung und Erweiterung der Darstellung der Schnittstellendynamik auf große und kontinuierliche Schnittstellen, was aufgrund der jüngsten Entwicklungen von Hybridfahrzeugen in der Automobilindustrie und der damit verbundenen Vergrößerung des für NVH-Analysen interessanten Frequenzbereichs für den Projektfall relevant ist. In (c) ist das Ziel, die dynamische Charakterisierung von Gelenkkomponenten mittels frequenzbasierter Substrukturierung zu integrieren und zu standardisieren. Dies bedeutet,

die Annahmen und Grenzen dieser Methode zu untersuchen und schließlich alternative (und/oder ergänzende) Lösungen zu finde.

Um das Benchmarking der Forschung und die Integration der Methoden und Werkzeuge in industrielle Umgebungen zu erleichtern, wurde eine proaktive Zusammenarbeit mit den Projektpartnern aufgebaut. In der Zusammenarbeit mit Vibes Technology wurde durch iterative Diskussionen und Feedbackschleifen versucht, die Forschung mit den Zielen der Softwareentwicklung in Einklang zu bringen. Dazu gehört auch die aktive Beteiligung an der Definition von Softwareschnittstellen und Arbeitsabläufen, wodurch eine nahtlose Integration der Technologie erleichtert wird. In ähnlicher Weise unterstreicht die Zusammenarbeit und Diskussion mit BMW das Engagement, industrielle Komponenten zu identifizieren und zu validieren und die Expertise und das Wissen des Industriepartners zu nutzen, um die Methodik in Übereinstimmung mit Industriestandards und -anforderungen zu verfeinern.

Unter anderem diente der in Abbildung 1 dargestellte AM-Prüfstand während des gesamten Projekts als Benchmark für die Evaluierung und Validierung von Substrukturierungsmethoden in einem akademischen Umfeld.

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten haben eine Reihe von Ergebnissen hervorgebracht, die in den oben dargestellten Forschungspaketen beschrieben sind. Das proaktive Arbeitsumfeld hat die TUM dazu veranlasst, Möglichkeiten der akademischen Zusammenarbeit mit Partneruniversitäten auszuloten, um die Methodenentwicklung zu verbessern. Diese Kooperationen haben dazu beigetragen, unsere Publikationsliste zu erweitern.

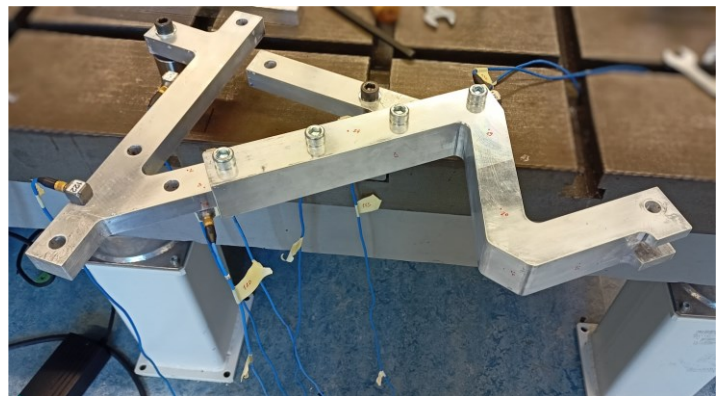


Abbildung 1: AM-Benchmark für Frequency-based Substructuring. Links: Ein-Punkt-Montage. Rechts: Linie/kontinuierliche Montage.

Forschungsergebnisse - Arbeitspaket (b)

Ein großer Teil der Arbeiten konzentrierte sich auf eine angemessene Beschreibung der Schnittstelle zwischen den experimentellen Komponenten (b). Dies ist entscheidend, um die Kollokation, die Reduzierung des Messfehlers, die Regularisierung der Schnittstelle und eine vollständige dynamische Schwingungsübertragung zu gewährleisten. Der klassische Ansatz einer Schnittstelle mit 6 Freiheitsgraden (siehe Abbildung 2) hat sich für starre und

lokalisierte Verbindungen als ausreichend erwiesen (Virtual Point Transformation). Es wurden Versuche unternommen, die Robustheit der Virtual-Point-Least-Squares-Reduktion zu verbessern, indem a) ein direkter Drehbeschleunigungssensor verwendet wurde, um die Rotationsmessungen besser zu konditionieren [16] und/oder b) Gewichtungsfunktionen eingeführt wurden, die die M- und K-Orthogonalität zwischen starren Moden und Restflexibilität ausnutzen [24]. In beiden Fällen hatte das Ergebnis der Strategie keinen signifikanten Einfluss auf die Kopplung. In einem anderen Ansatz wurde die Untersuchung auf verformbare/flexible Moden verlagert, mit dem Ziel, das flexible Verhalten der Schnittstelle zu erfassen und zu koppeln und dabei eine minimale Anzahl von Kompatibilitätskoordinaten beizubehalten. Die Verwendung mehrerer virtueller Punkte zur Unterteilung der Grenzfläche in stückweise starre Bereiche erwies sich aufgrund der daraus resultierenden schlechten Konditionierung und der daraus resultierenden Verstärkung von Störgrößen als ineffizient. Daher wurden alternative geometrische und experimentelle Deformationsbasen in Betracht gezogen:

1. Geometrisch verformbare Schnittstellenmoden, als Erweiterung der starren Moden des virtuellen Punktes
2. Experimentell basierte singuläre Deformationsmoden
3. Experimentell basierte physikalische Deformationsmoden

Schritt 1 besteht in der Auswahl eines geeigneten Satzes von geometrischen Moden, d. h. Verformungen, die durch die relative Position der Messposition in Bezug auf den virtuellen Punkt definiert sind, um die Ein- und Auslaufstrecken an der Schnittstelle zu reduzieren. Die Auswahl der Verformungsmoden ist für wohldefinierte und bekannte Schnittstellengeometrien wie Balken und Platten einfacher, wie das Beispiel in Abbildung 3 zeigt. Im Allgemeinen hängt die Wahl jedoch vom Urteil des Anwenders ab, und das Risiko, einen ungeeigneten Reduktionsraum zu erzeugen, ist hoch.

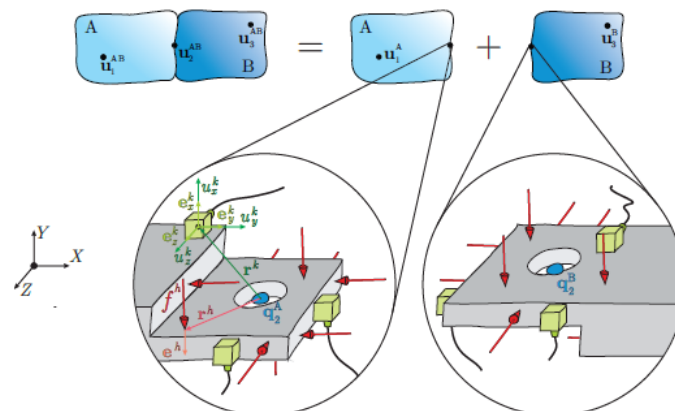


Abbildung 2: Substructuring coupling mit einem virtuellen Punkt. Gemessene Ausgänge und Eingänge an einzelnen Komponenten müssen nicht kolloziert werden, nur der virtuelle Punkt.

Punkt 2 ist ein neuer Vorschlag, der darin besteht, die Kompatibilität durch die Verwendung eines reduzierten Unterraums von dominanten und frequenzabhängigen Singularvektoren (Singular Vector Transformation [17, 22]) zu verringern, die direkt aus dem gemessenen FRF-Datensatz extrahiert werden. Ein Geometriemodell ist daher nicht erforderlich. Aufgrund der fehlenden geometrischen Bedingungen muss die Kollokationsanforderung direkt auf der Messebene für die Ein- bzw. Ausgänge erfüllt werden. In der experimentellen Praxis ist dies leicht durch Entkopplungsverfahren zu erreichen. Für die Kopplung wird eine Übertragungssimulationsstrategie vorgeschlagen. Die Ergebnisse eines

Entkopplungstestfalls, bei dem die Virtual Point Transformation und die Singular Vector Transformation verglichen wurden, sind in Bild 4 dargestellt. Die Kopplungsergebnisse für eine Linie/Flascheverbindung, die die Wirksamkeit eines solchen Reduktionsansatzes zeigen, sind in Bild 5 dargestellt.

Punkt 3. ist ebenfalls eine Neuentwicklung, die auf den Ergebnissen von Punkt (b) aufbaut, aber die Basis der singulären Vektoren durch eine Basis identifizierter physikalischer Moden ersetzt [19,35] (über einen experimentellen Modenidentifikationsalgorithmus). Es gelten die gleichen Anforderungen an die Versuchsplanung, wie sie in Punkt 2 hervorgehoben wurden. In ähnlicher Weise hängt die Vollständigkeit der Beschreibung davon ab, ob die Schnittstellendynamik durch die verfügbaren Messungen und die gewählten Deformationsbasen ausreichend kontrollierbar und beobachtbar ist. Eine erfolgreiche Anwendung der Kopplung ist in Abbildung 5 dargestellt.

Beide vorgeschlagenen testbasierten Formulierungen der Kompatibilitätsschwächung bieten eine gute Fehlerminderung, eine gut konditionierte Schnittstellenmatrix und die Möglichkeit der Einbeziehung relevanter Schnittstellenflexibilität im interessierenden Frequenzbereich. Für die Kopplung von Bauteilen ist dies jedoch mit zusätzlichen Kosten verbunden, die mit der Entwicklung und Messung einer zusätzlichen Vorrichtung, dem Übertragungssimulator, verbunden sind.

Weitere Untersuchungen konzentrierten sich auf den Vergleich der klassischen Frequency Based Substructuring mit einem modalbasierten Kopplungsverfahren oder Modal Based Substructuring [34]. Die modalbasierte Substrukturierung kann grob als frequenzbasierte Substrukturierung interpretiert werden, bei der eine modale Überlagerung/Rekonstruktion auf die gemessenen Übertragungsfunktionen angewendet wird. Unter diesem Gesichtspunkt sind in experimentellen Anwendungsfällen, in denen das Signal-Rausch-Verhältnis gut ist, die gleichen Kompatibilitätsschwächungsbasen gewählt werden und die Modalidentifikation erfolgreich ist (geringe Modaldichte und geringe Dämpfung), keine signifikanten Genauigkeitsunterschiede zwischen den Verfahren im Frequenzbereich und im Modalbereich zu erwarten.

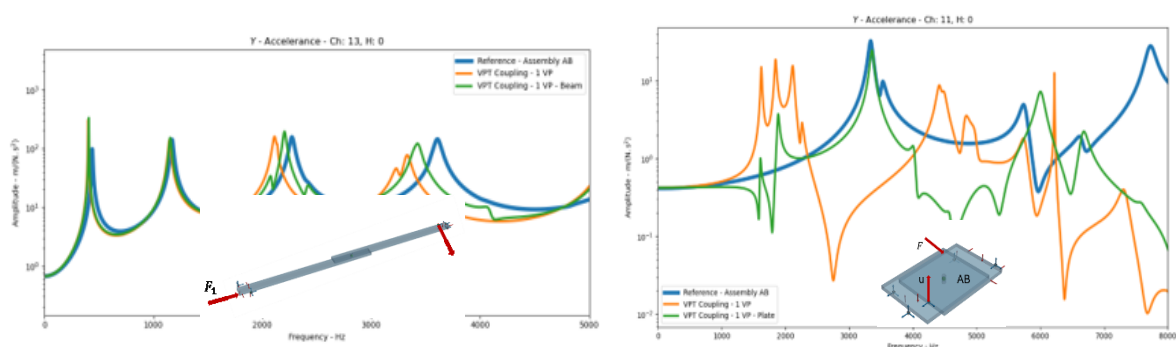


Abbildung 3: Substructuring coupling mit einer numerischen Balken-Balken- (links) und Platten-Platten-Verbindung (rechts). Links: Referenz (blau), virtueller Punkt mit 6 starren Moden (orange), virtueller Punkt mit zusätzlichen 3 Balkenmoden (grün). Rechts: Referenz (blau), virtueller Punkt mit 6 starren Moden (orange), virtueller Punkt mit zusätzlichen 3 Plattenmoden (grün).

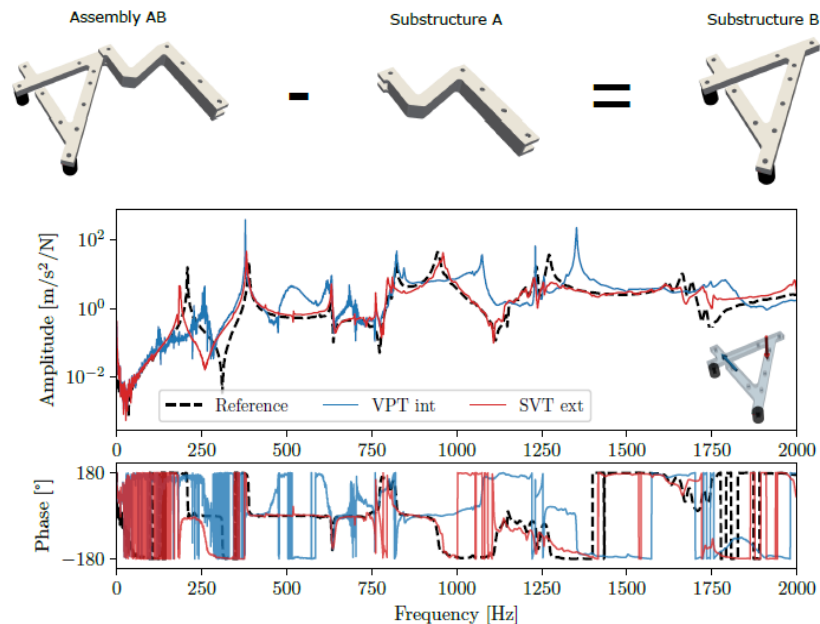


Abbildung 4: Substructuring decoupling mit experimentellem AM-Benchmark [17]. Oben: Arbeitsablauf der Entkopplung. Unten: Vergleich der Entkopplungsvorhersagen für Referenz (schwarz), Virtual Point Transformation (blau), Singular Vector Transformation (rot).

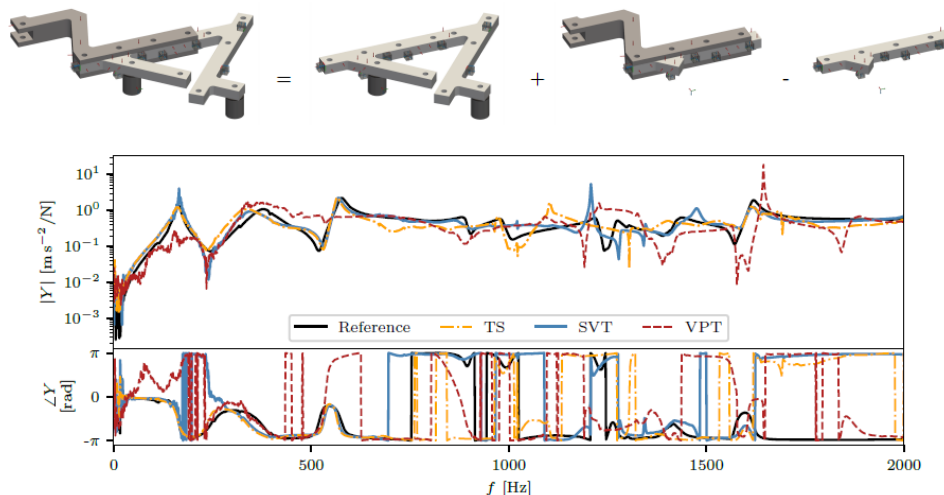


Abbildung 5: Substructuring coupling für experimentellen AM-Benchmark mit linearem/kontinuierlichem Verbindung [19]. Oben: Kopplung mit Transmissionssimulator-Workflow. Unten: Vergleich der Kopplungsvorhersagen für Referenz (schwarz), Virtual Point Transformation (rot), Singular Vector Transformation (blau), Modal-based Reduktion (gelb).

Forschungsergebnisse - Arbeitspaket (c)

Die Forschung zur Fugendynamik (c) hat zur Formulierung grundlegender technischer Fragen über die geeignete Strategie zur Charakterisierung von Gummi geführt:

- 1) Identifizierung auf Material- oder Komponentenebene?
- 2) Phänomenologisches (z. B. FRF) oder konstitutives (z. B. MCK) Modell?
- 3) Quasistatisches (masseloses Bauteil) oder dynamisches Modell?
- 4) Parameterabhängigkeiten (z. B. Frequenz, Amplitude, Temperatur usw.)?
- 5) Single-DoF oder Multi-DoF Identifikation?

Die technischen Aspekte sollten dann den Anforderungen der industriellen Praxis entsprechen, wobei die Umgebung der technischen Lösung (z.B. FEM, MKS, Substruktur), die

Verfügbarkeit des Bauteils und der Bauteildaten (z.B. Gummiprüfung, CAD, Informationen über die Zusammensetzung) und die Gesamtkosten der Charakterisierung zu berücksichtigen sind. Ein Versuch, Charakterisierungsstrategien für industrielle Anwendungen zu klassifizieren, ist in Abbildung 7 dargestellt.

Es hat sich gezeigt, dass die Standard-Charakterisierung auf der Grundlage der Substruktur für Gummilager mit linearer Dynamik robust ist. Ein typisches Ergebnis ist in Abbildung 8 für ein Kfz-Gummilager dargestellt. Mit relativ geringem Aufwand (MIMO-Impaktprüfung mit 8 triaxialen Beschleunigungsaufnehmern) wird eine gute Darstellung der Bauteildynamik einschließlich Masse- und Dämpfungstermen für einen weiten Frequenzbereich (> 1000 Hz) erreicht. Eine 6-DoF-Übertragung wird durch eine virtuelle Punkttransformation realisiert. Es ist zu beachten, dass die gesamte Gelenkdynamik sukzessive in einen Substrukturierungsrahmen eingebettet werden kann (in diesem Fall kann eine Inverse Substructuring durchgeführt werden, wenn sich das Gummilager als masselose Komponente ohne Kreuzkopplungseffekte verhält). Trotz der offensichtlichen Vorteile eines solchen Charakterisierungsverfahrens besteht eine wesentliche Einschränkung darin, dass die Abhängigkeiten der (Gummi-)Parameter von anderen Größen als der Frequenz nicht bekannt sind. Darüber hinaus werden bei niedrigen Frequenzen (< 100 Hz) im Allgemeinen schlechte Ergebnisse erzielt, da die Bewegung des starren Körpers eine korrekte Abschätzung der Nachgiebigkeit des Gummis verhindert.

Die materialbasierte Charakterisierung hat sich bei der Analyse der Abhängigkeit von Parametern wie Temperatur und Amplitude als äußerst vielseitig erwiesen. Die Tests wurden an einer Gummiprobe durchgeführt und eine Momentaufnahme der Ergebnisse ist in Abbildung 9 dargestellt. Informationen über die Temperatur- und Amplitudenabhängigkeit sind für eine angemessene Bewertung der Zuverlässigkeit von Substrukturvorhersagen von entscheidender Bedeutung.

Alternative Versuche zur Vorhersage der Amplitudenabhängigkeit werden im Labor mit einem Shakeraufbau und einem Controller durchgeführt [27]. Im Gegensatz zu einer materialbasierten Analyse kann die Amplitudenabhängigkeit einer Vollkomponente direkt an einer Frequenzgangfunktion abgeschätzt werden.

Die vorgestellten Charakterisierungstechniken können als Alternative (und Ergänzung) zur bevorzugten Substrukturmethode erforderlich sein, um die Zuverlässigkeit der dynamischen Steifigkeitsvorhersage zu bewerten. Dies eröffnet das Konzept der gemischten Charakterisierung. Abbildung 10 zeigt eine Reihe von Beispielen für die Kombination verschiedener Charakterisierungsergebnisse. Die Einbeziehung von Materialtestdaten ermöglicht die Korrektur von Ungenauigkeiten bei der Vorhersage der Substrukturierung bei niedrigen Frequenzen und die Anpassung der dynamischen Kurven in Abhängigkeit von der Temperatur. Obwohl es sich hierbei um vorläufige Entwicklungen handelt, scheint die Verwendung der gemischten Charakterisierung Potenzial für eine robuste Bewertung der Eigenschaften von Gummilagern zu haben. Darüber hinaus ist ein Verfahren zur Kreuzvalidierung leicht verfügbar. Dies ist jedoch mit höheren Gesamtkosten verbunden.

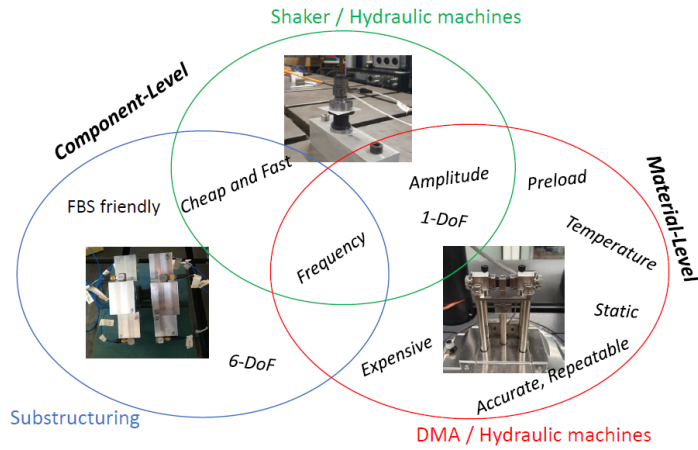


Abbildung 6: Klassifizierung der Strategien zur Gummicharakterisierung: Substrukturierung vs. Shaker-basierte vs. Dynamische Mechanische Analyse.

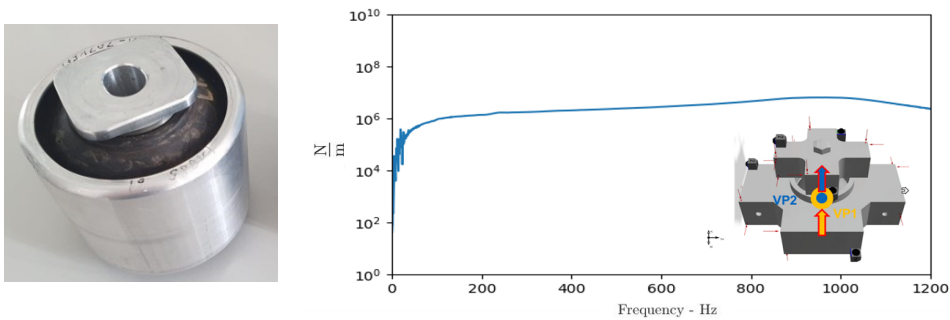


Abbildung 7: Charakterisierung von Gummilagern in Kraftfahrzeugen mit Substrukturierung, Virtual Point Transformation und einer Doppelkreuzmontage. Links: Gummilager. Rechts: Dynamische Steifigkeit für die Übertragung von axialer zu axialer DoF.

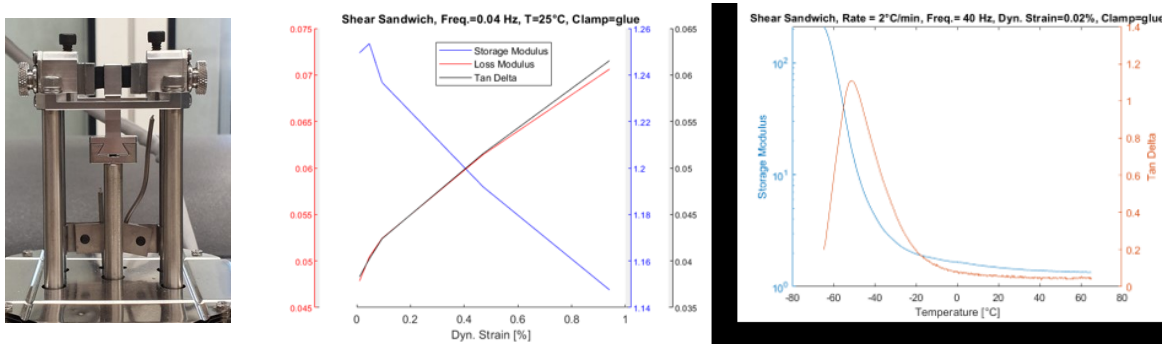


Abbildung 8: Ergebnisse der Materialprüfung mit einem DMA-Maschine an einer Gummiprobe. Von links nach rechts: DMA-Maschine, dynamische Dehnungsabhängigkeit (Storage- und Loss Modulus [MPa], Loss Factor [-]) und Temperaturabhängigkeit (Storage Modulus [MPa] und Loss Factor [-]).

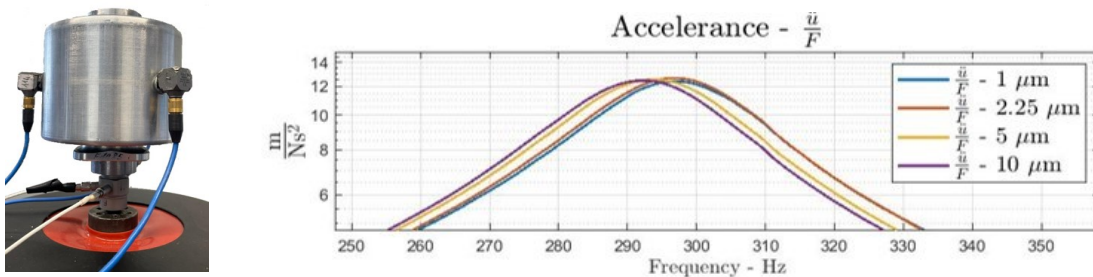


Abbildung 9: Ergebnisse der amplitudengesteuerten Shaker-Prüfung. Die relative Verschiebung wird bei unterschiedlichen dynamischen Dehnungen kontrolliert, während die Frequenz schrittweise durchlaufen wird.

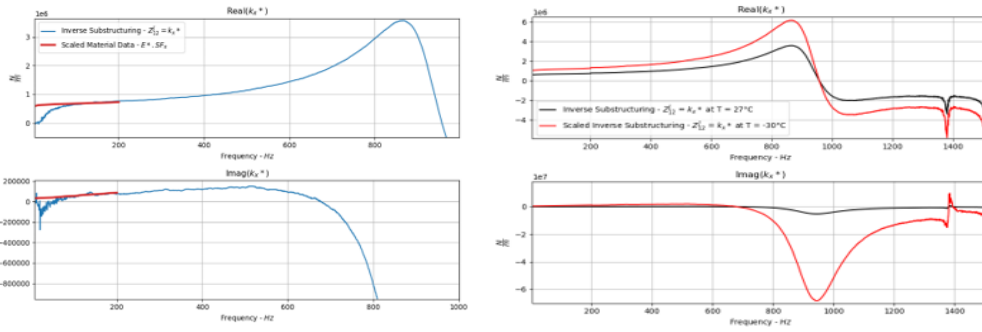


Abbildung 10: Gemischte Charakterisierungsversuche. Links: Korrektur des niederfrequenten Ergebnisses (< 100 Hz) einer Substrukturierungsvorhersage (blau) mit einer skalierten materialbasierten Prüfung (rot). Rechts: Skalierung der dynamischen Steifigkeitskurve einer Substrukturierungsvorhersage (schwarz) bei einer sehr unterschiedlichen Temperatur (von 27°C bis -30°C, rot).

Aufbauend auf den Arbeiten zu Gummilagern wurden auch bei der Charakterisierung von Schraubverbindungen relevante Fortschritte erzielt [18,31]. Unter der Annahme einer quasistatischen Verbindung wurde ein robustes Verfahren standardisiert, das aus einem Identifikationsschritt (mit inverser Unterstrukturierung) und einem Parametrisierungsschritt besteht. Die quasistatische Annahme wird durch eine vollständige dynamische Entkopplung validiert. Die Identifizierung der Gelenksteifigkeit scheint robust und reproduzierbar zu sein, wie in Abbildung 11 dargestellt, während die Gelenkdämpfung als zu gering angesehen wird, um identifiziert zu werden. Ein Validierungsschritt bestätigt die Robustheit der extrahierten Steifigkeitswerte, indem die zusammengesetzten Messungen mit den isolierten Komponenten und dem modellierten Gelenk rekonstruiert werden (siehe Abbildung 11). Es wurden Fortschritte erzielt und weitere Forschungsarbeiten durchgeführt, um das Signal-Rausch-Verhältnis des Entkopplungsprozesses zu verbessern [28,30,33] und ein Optimierungsverfahren zu entwickeln, das die Identifikations- und Parametrisierungsschritte effizient kombiniert [21,32]. Die Erweiterung auf nichtlineare gekoppelte Dynamik wurde ebenfalls untersucht [26,29].

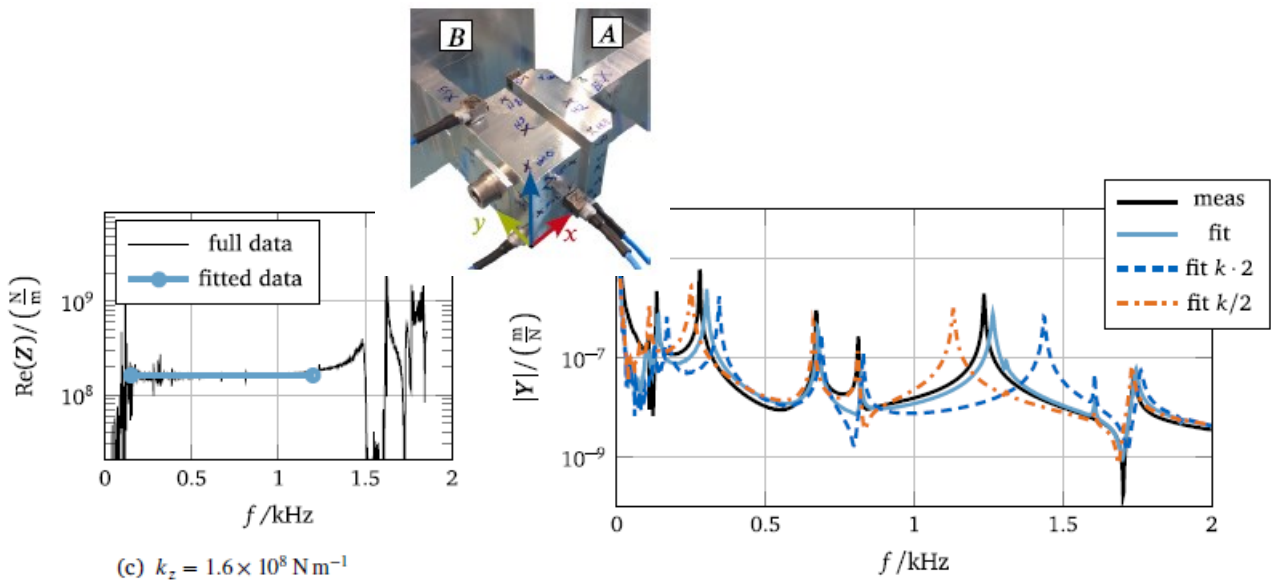


Abbildung 11: Schraubverbindungscharakterisierung mit Substructure decoupling [18]. Oben: Zusammengebautes System mit definiertem Schnittstellenbereich und einer Schraube. Links: Beispiel für die Parametrisierung/Anpassung der Steifigkeit in der Ebene (blauer Pfeil). Rechts: Vergleich der ursprünglich gemessenen FRF (schwarz) mit rekonstruierten FRFs mit identifizierter Verbindung (hellblau). Die gestrichelten Linien stellen das Ergebnis dar, wenn der identifizierte Steifigkeitswert mit einem Faktor 2 variiert wird.

Forschungsergebnisse - Arbeitspaket (a) und (d)

Die Bauteilqualität (a) wurde im Zusammenhang mit der Quantifizierung und Übertragung von Messfehlern (d) untersucht. Die Analyse des zufälligen Messfehlers (d.h. unter Ausschluss des systematischen Fehlers) erfolgt nach dem Stand der Technik mit der sogenannten Delta-Methode. In der Literatur ist eine Taylor-Entwicklung erster Ordnung beschrieben. In Fällen mit schlechtem Signal-Rausch-Verhältnis und angesichts der (stark) nichtlinearen Natur der LM-FBS-Funktion könnte eine Linearisierung jedoch a) nicht angemessen sein und b) Verzerrungseffekte, die sich im Mittelwert fortpflanzen, ignorieren. Daher wurde eine Erweiterung der Delta-Methode zweiter Ordnung vorgeschlagen [36]. Ein analytisches Beispiel für die Kopplung eines 2-DoF zu 2-DoF Masse-Feder-Dämpfer-Systems ist in Bild 12 dargestellt. Die Verbesserung des vorhergesagten Fehlers ist im Vergleich zu einer Monte-Carlo-Referenz dargestellt. Das Verfahren der Unsicherheitsfortpflanzung wird im Folgenden beschrieben:

- 1) Berechnung der komplexen Gauß-Verteilung des Zufallsfehlers, der anhand des gemessenen FRF-Datensatzes für jede an der Kopplung beteiligte Unterkomponente geschätzt wird
- 2) Bewertung der Jacobi (Taylor erster Ordnung) und/oder Hessian (Taylor zweiter Ordnung)
- 3) Schätzung des Fehlers des gekoppelten Systems nach der Delta-Methode
- 4) Schätzung des Amplituden- und Phasenfehlers und des relativen Vertrauensintervalls/der relativen Grenze

Ein neuer Ansatz zur Schätzung des absoluten Konfidenzintervalls wurde formuliert [36]. Das Verfahren basiert auf der Verwendung einer Nakagami-p-Verteilung für die Fehlerfortpflanzung aus der bivariaten Zufallsnormalverteilung der Real-/Imaginäranteile der Admittanz. Das Quantifizierungswerkzeug wurde an zahlreichen numerischen und experimentellen Beispielen getestet. Ein Beispiel der endgültigen Fehlerprognose für einen realen Testfall ist in Abbildung 13 dargestellt. Die Anwendung beinhaltet die Verwendung der Virtual Point Transformation, die in den Ausbreitungsalgorithmus integriert wurde. Konfidenzgrenzen werden mit einer Delta-Methode erster Ordnung zu einem Bruchteil der Kosten einer äquivalenten Monte-Carlo-Simulation genau berechnet. Darüber hinaus wird eine Qualitäts-/Fehlermetrik vorgeschlagen, die auf der Vertrauensgrenze basiert und einen Bereich von 0 bis 1 pro Frequenzlinie abdeckt (siehe Abbildung 13). Alternative Indikatoren für die Messkonsistenz auf Komponenten- und Baugruppenebene können definiert werden.

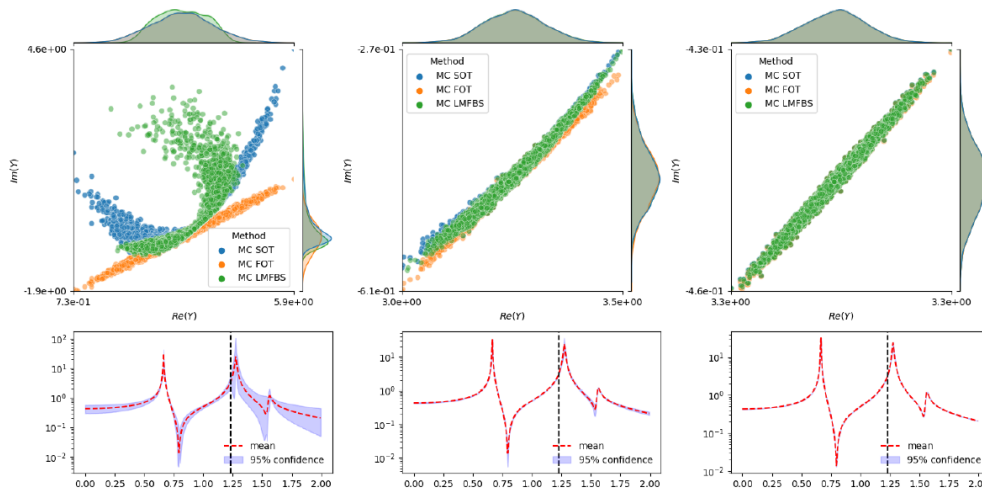


Abbildung 12: Analytische Masse-Feder-Dämpfer-Kopplung [36]. Monte-Carlo-Validierung (grün) für die Delta-methode erster Ordnung (orange) und zweiter Ordnung (blau) für eine gewählte Frequenzlinie und drei verschiedene vordefinierte Eingabefehler.

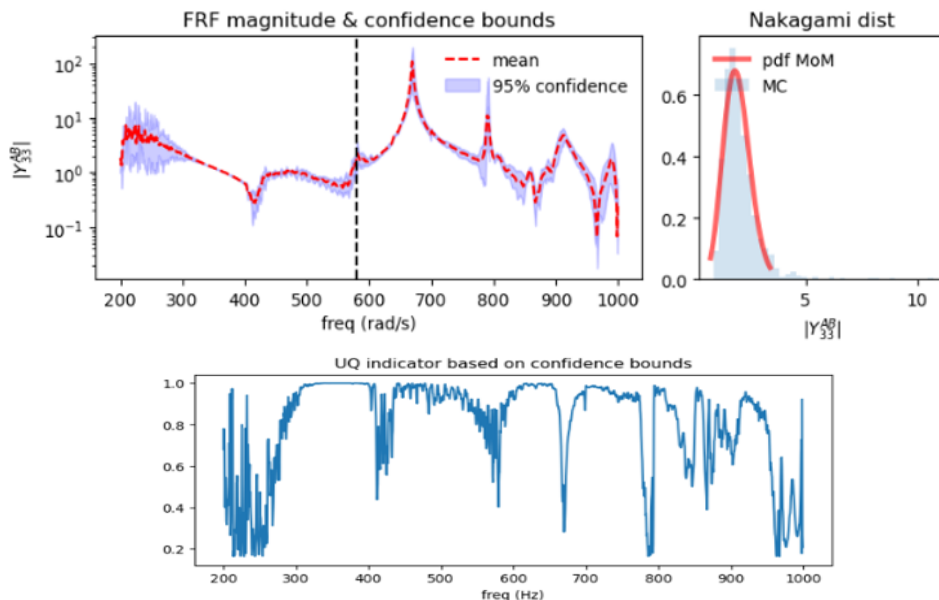


Abbildung 13: Fehlerquantifizierung für die experimentelle Kopplung des Benchmarks in Abbildung 1/ links. Oben: Validierung der Nakagami-p-Verteilung mit Monte-Carlo. Unten: Qualitätsmetrik auf der Grundlage der Konfidenzgrenze.

Um den Einfluss der Messunsicherheit zu begrenzen, wurde eine neue Filterstrategie namens PRANK formuliert [20,23]. PRANK ist ein robuster, effizienter und automatisierter Algorithmus auf der Basis der Singulärwertzerlegung zur Entfernung von Rauschen und Ausreißern aus Messdatensätzen mit mehreren Eingängen und mehreren Ausgängen. Der Name ergibt sich aus der Kombination zweier Rauschunterdrückungsstrategien, die auf der Principal Response Function (PRF) und der Hankel-Matrixform basieren. Die Automatisierungsmöglichkeiten ergeben sich aus der Einbettung des sogenannten e15-Algorithmus, einem modernen empirisch-statistischen Werkzeug zur Erkennung unwichtiger singulärer Komponenten einer zufälligen Rauschmatrix. Es hat sich gezeigt, dass PRANK besonders gut bei Aufnahmen mit extrem schlechtem Signal-Rausch-Verhältnis funktioniert. Ein experimentelles Beispiel ist in Abbildung 14 dargestellt, in der die Übertragungsfunktion

der verarbeiteten Verschiebungsdaten aus einer Hochgeschwindigkeitskameraaufnahme gezeigt wird, die die Genauigkeit der Signalrekonstruktion, insbesondere in der Nähe von Nullen/Antiresonanzen, unterstreicht. Dies kann z.B. zur Verbesserung der Qualität rekonstruierter experimenteller Vollfeldmoden verwendet werden [20]. Die PRANK-Methode wurde ausführlich in analytischen und numerischen frequenzbasierten Substruktur-Szenarien getestet. Sie übertraf durchweg die modernsten Regularisierungsmethoden wie Truncated-SVD und Tikhonov, insbesondere unter Bedingungen mit sehr geringen Signal-Rausch-Bandbreiten (siehe Abbildung 15). Weitere Fortschritte wurden erzielt, um die Anwendbarkeit auf die Kopplung mit Kameradaten zur Substrukturierung auszuweiten [25], wobei vergleichbare Ergebnisse wie bei traditionellen modalbasierten Rekonstruktionsverfahren erzielt wurden, ohne dass die Verwendung von Algorithmen zur Modalidentifikation erforderlich ist. Weitere Anstrengungen/Forschungsarbeiten sind jedoch erforderlich, um die Erhaltung der physikalischen Eigenschaften zu gewährleisten.

Im Rahmen des Projekts wurde auch die Einbeziehung nichtlinearer Effekte in den Prozess der äquivalenten Quellencharakterisierung, den so genannten In-situ-Blocked-Force-Ansatz, untersucht. Ein in der Literatur als Operating System Identification bezeichneter Ansatz wurde berücksichtigt und in numerischen und experimentellen Einstellungen validiert. Die Ergebnisse werden hier nicht weiter dargestellt, da sie von den in den Arbeitspaketen definierten Zielen abweichen.

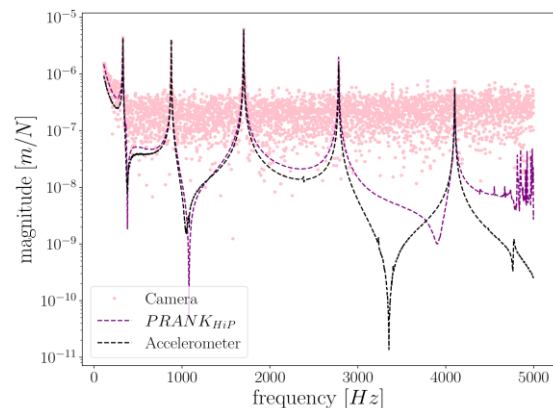
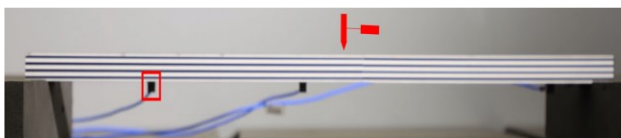


Abbildung 14: Filterung verrauschter Kameraempfangsdaten mit PRANK [20]. Links: Referenzaufbau mit Ort der Stoßerregung und Referenzbeschleunigungsmesser. Rechts: Vergleich zwischen Rohdaten (rosa), gefilterten Daten (lila) und Referenz-Beschleunigungsmesserdaten (schwarz).

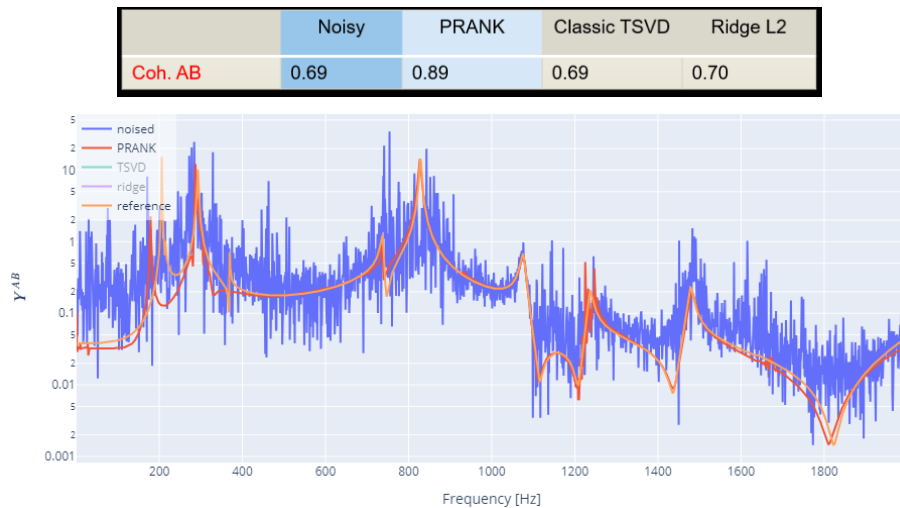


Abbildung 15: Vergleich der Auswirkungen von Filterung und Regularisierung auf die numerisch gekoppelte Admittanz des Benchmarks in Abbildung 1 / links. Oben: Kohärenzwertbereich 0-1 für verrauschte, gefilterte und regulierte Vorhersagen. Unten: Vergleich der verrauschten (blau), mit PRANK gefilterten (rot) und der Referenzergebnisse (orange).

Fazit

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Höhepunkt der Eurostars-Zusammenarbeit einen wichtigen Meilenstein auf dem Weg zu einem robusten NVH-Prototyping von Fahrzeugen mit einem hybriden Substrukturansatz darstellt. Durch die Zusammenarbeit und das Engagement mit industriellen und akademischen Partnern konnten ein tieferes Verständnis der versuchsbasierten Modellierung, innovative Methoden und einsatzbereite Analysewerkzeuge entwickelt werden. Die erzielten Ergebnisse bestätigen nicht nur die Effektivität des Workflows, sondern bilden auch eine solide Grundlage für zukünftige Entwicklungen im Bereich der modularen NVH-Systemoptimierung. Das Potenzial für eine Ausweitung auf Bereiche außerhalb der Automobilindustrie ist vielversprechend.

State-of-Art Veröffentlichungen

- [1] D. de Klerk, D. J. Rixen, J. De Jong. The frequency based substructuring (FBS) method reformulated according to the dual domain decomposition method. In: 24th International Modal Analysis Conference. St.Louis, MO, 2006
- [2] D. de Klerk, D. J. Rixen, S. Voormeeren. General Framework for Dynamic Substructuring: History, Review and Classification of Techniques. In: AIAA Journal 46.5, 2008
- [3] P. Tiso, P., M.S. Allen, D. J. Rixen, T. Abrahamsson, M. Van der Seijs, R. L. Mayes. Substructuring in Engineering Dynamics - Emerging Numerical and Experimental Techniques. Springer, 2020.
- [4] T. C. Lim, J. Li. A theoretical and computational study of the FRF-based substructuring technique applying enhanced least square and TSVD approaches. In: Journal of Sound and Vibration 231.4, pp. 1135–1157, 2000
- [5] M. Haeussler. Modular Sound and Vibration Engineering by Substructuring. 2020
- [6] D. De Klerk, S. Voormeeren. Uncertainty propagation in experimental dynamic substructuring. In: Proceedings of the Twenty Sixth International Modal Analysis Conference. Orlando, FL, Jan. 2008
- [7] F. Trainotti, M. Haeussler, D. J. Rixen. A practical handling of measurement uncertainties in frequency based substructuring. Mechanical Systems and Signal Processing 2020
- [8] J.W.R. Meggitt, A.T. Moorhouse. A covariance based framework for the propagation of correlated uncertainty in frequency based dynamic sub-structuring. Mechanical Systems and Signal Processing 2020
- [9] M. V. Van Der Seijs, D. Van Den Bosch, D. J. Rixen, D. De Klerk. An improved methodology for the virtual point transformation of measured frequency response functions in Dynamic Substructuring. ECCOMAS Thematic Conference - COMPDYN 2013: 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Proceedings - An IACM Special Interest Conference, June, 4334–4347, 2013
- [10] M. Van der Seijs, Experimental Dynamic Substructuring: Analysis and Design Strategies for Vehicle Development. 2016
- [11] E. Pasma, M. Van der Seijs, S. Klaassen, M. van der Kooij. Frequency Based Substructuring with the Virtual Point Transformation, Flexible Interface Modes and a Transmission Simulator. 2018
- [12] M. Allen, R. Mayes, E. Bergman. Experimental modal substructuring to couple and uncouple substructures with flexible fixtures and multi-point connections. In: Journal of Sound and Vibration. 329, pp. 4891–4906, 2010
- [13] A. El Mahmoudi, D. J. Rixen, C. H. Meyer. Comparison of Different Approaches to Include Connection Elements into Frequency-Based Substructuring. Experimental Techniques, 44(4), 425–433. 2020

[14] J. W. R. Meggitt, A. S. Elliott, A. T. Moorhouse, H. K. Lai, In situ determination of dynamic stiffness for resilient elements. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 230, no. 6, pp. 986–993, 2016

[15] M. Haeussler, S. W. B. Klaassen, and D. J. Rixen. Experimental twelve degree of freedom rubber isolator models for use in substructuring assemblies. *J. Sound Vib.*, vol. 474, no. January 2020

Neue Zeitschrift-Veröffentlichungen

[16] T. Bregar, A. El Mahmoudi, G. Cepon, D. J. Rixen, and M. Boltezar. Performance of the expanded virtual point transformation on a complex test structure. *Experimental Techniques*, 45(1):83–93, 2021

[17] F. Trainotti, T. Bregar, S.W.B. Klaassen, and D.J. Rixen. Experimental decoupling of substructures by singular vector transformation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 163:108092, 2022

[18] M. Kreutz, F. Trainotti, V. Gimpl, and D. J. Rixen. On the robust experimental multi-degree-of-freedom identification of bolted joints using frequency based substructuring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 203:110626, 2023

[19] D. Ocepek, F. Trainotti, G. Cepon, D. J. Rixen, Miha Boltezar. On the experimental coupling with continuous interfaces using frequency based substructuring. Submitted to *Mechanical System and Signal Processing*, 2023

[20] F. Trainotti, S. W. B. Klaassen, T. Bregar, D. J. Rixen. PRANK: a singular value based noise filtering approach. Submitted to *Journal of Sound and Vibration*, 2024

[21] M. Brøns, F. Trainotti, D. J. Rixen. A novel optimization framework using frequency-based substructuring for estimation of linear bolted joint stiffness and damping. Submitted to *Mechanical System and Signal Processing*, 2024

Neue Konferenz-Veröffentlichungen

[22] F. Trainotti, T. Bregar, S. W. B. Klaassen, and D. J. Rixen. Robust substructure decoupling using the singular vector transformation. In *IMAC-XXXIX: International Modal Analysis Conference*, Online, number 10216, Bethel, CT, January 2021. Society for Experimental Mechanics

[23] F. Trainotti, S. Klaassen, T. Bregar, and D. J. Rixen. A singular value based filtering strategy for noise reduction on measured response data. In *IMAC-XXXVIII: International Modal Analysis Conference*, online, number 12331, Bethel, CT, January 2022. Society for Experimental Mechanics

[24] M. Goldeli, F. Trainotti, A. El Mahmoudi, and D. J. Rixen. Using weighting functions for improving the virtual point transformation in frequency based

substructuring. In IMAC-XXXVIII: International Modal Analysis Conference, online, number 12943, Bethel, CT, January 2022. Society for Experimental Mechanics

[25] F. Trainotti, T. Slimak, and D. J. Rixen. Towards full-field frequency based substructuring: an application case. In ISMA 2022-International Conference on Noise and Vibration Engineering, number 497, 2022

[26] M. Brøns and D. J. Rixen. Dynamic disturbance substructuring: identifying localized nonlinear vibrations. In ISMA 2022-International Conference on Noise and Vibration Engineering, number 510, 2022

[27] F. Trainotti, T. Slimak, D. J. Rixen. On the study of fatigue on vulcanized rubber using vibration testing. In IMAC-XLI: International Modal Analysis Conference, Austin (TX), Bethel, CT, February 2023. Society for Experimental Mechanics

[28] M. Brons, F. Trainotti, D.J. Rixen. Dynamic disturbance substructuring: Experimental identification of a joint. In IMAC-XLI: International Modal Analysis Conference, Austin (TX), Bethel, CT, February 2023. Society for Experimental Mechanics

[29] M. Di Manno, F. Trainotti, D. J. Rixen, and A. Fregolent. Nonlinear joint identification through substructure decoupling. In IMAC-XLI: International Modal Analysis Conference, Austin (TX), Bethel, CT, February 2023. Society for Experimental Mechanics

[30] M. Kreutz, D. J. Rixen. Isolation and expansion of gyroscopic effects using frequency-based substructuring. In IMAC-XLI: International Modal Analysis Conference, Austin (TX), Bethel, CT, February 2023. Society for Experimental Mechanics

[31] D. J. Rixen. Experimental substructuring for linear and nonlinear connection dynamics: A tutorial - part 1: Linear joints. In IMAC-XLII: International Modal Analysis Conference, Orlando (FL), Bethel, CT, February 2024. Society for Experimental Mechanics

[32] M. Brons, F. Trainotti, and D.J. Rixen. Estimating linear joint stiffness and damping using a frequency-based optimization framework and the emerging concept of dydis. In IMAC-XLII: International Modal Analysis Conference, Orlando (FL), Bethel, CT, February 2024. Society for Experimental Mechanics

[33] M. Kreutz and D. J. Rixen. Linear joint identification for frictional rotor shaft-to-hub connections using frequency-based substructuring. In IMAC-XLII: International Modal Analysis Conference, Orlando (FL), Bethel, CT, February 2024. Society for Experimental Mechanics

[34] F. Trainotti, J. Qi, and D. J. Rixen. Comparing frequency-based and modalbased substructuring on the dynamic substructuring round robin benchmark. In IMACXLII: International Modal Analysis Conference, Orlando (FL), Bethel, CT, February 2024. Society for Experimental Mechanics

[35] D. Ocepek, F. Trainotti, G. Cepon, D. J. Rixen, and M. Boltezar. Different displacement reduction spaces for the use in admittance-based tpa methods. In IMAC-XLII: International Modal Analysis Conference, Orlando (FL), Bethel, CT, February 2024. Society for Experimental Mechanics

[36] del Fresno Zarza, F. Trainotti, F. Naets. Unveiling New Insights for Uncertainty Propagation in Frequency-based Substructuring. In IMAC-XLII: International Modal Analysis Conference, Orlando (FL), Bethel, CT, February 2024. Society for Experimental Mechanics