Interner Bericht

DLR-IB-SY-BS-2025-113

Anpassung von Materialparametern und Lagenaufbauten des vibroakustischen FE-Modells eines Seitenwandpaneels auf Basis von Messdaten

Studienarbeit

Sarah Wehling

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Systemleichtbau





Dokumenteigenschaften

Titel	Anpassung von Materialparametern und Lagenaufbauten des vibroakustischen FE-Modells eines Seitenwandpaneels auf Basis von Messdaten
Betreff	Studienarbeit
Institut	Systemleichtbau
Erstellt von	Sarah Wehling
Beteiligte	DrIng. Stephan Algermissen
Geprüft von	Prof. DrIng. Martin Wiedemann
Freigabe von	Prof. DrIng. Hans Peter Monner
Zugänglichkeit	
	☐ Stufe 2: DLR intern zugänglich (in elib mit Beschränkung "nur DLR-intern zugänglich")
Datum	01.08.2025
Version	1.0
Datei Info	IB_2025_113_SA_Wehling.pdf
Version	1.0

Inhaltsverzeichnis

ln	haltsv	erzeich	ınis	I
Αŀ	bildu	ıngsver	zeichnis	V
Ta	belle	nverzei	chnis	VII
Αŀ	okürz	ungsve	rzeichnis	IX
Sy	mbol	verzeic	hnis	ΧI
1	Einle	eitung		1
2	Star	nd der	Forschung	3
	2.1	Model	-Updating von FE-Modellen	3
	2.2	Ausga	ngsmodell	4
3	Exp	erimen	telle Modalanalyse	7
	3.1	Theore	etische Grundlagen der experimentellen Modalanalyse	7
		3.1.1	Voraussetzungen der experimentellen Modalanalyse	8
		3.1.2	Schritte der experimentellen Modalanalyse	8
	3.2		odik und Aufbau der experimentellen Modalanalyse des Seiten- vaneels mit montierten Fenstereinsätzen	9
		3.2.1	Versuchsaufbau	10
		3.2.2	Anregung der Struktur	11
		3.2.3	Messung der Systemantworten	13
		3.2.4	Bestimmung der Modalparameter	14
	3-3	_	nisse der experimentellen Modalanalyse des Seitenwandpaneels ontierten Fenstereinsätzen	15
	3-4	_	ich des Schwingungsverhaltens des Seitenwandpaneels ohne und ontierten Fenstereinsätzen	10

	3-5	Experi	mentelle Modalanalyse der Fenstereinsätze	20
4	Met	hodisch	nes Vorgehen der durchgeführten Model-Updatings	24
	4.1	Ablauf	der durchgeführten Model-Updatings	24
		4.1.1	Modellaufbau und Parameterdefinition	26
		4.1.2	Definition der Optimierungskriterien	27
		4.1.3	Sensitivitätsanalyse und Bestimmung des Ersatzmodells	29
		4.1.4	Durchführung der Mehrzieloptimierung und anschließende Validierung	31
5	Dur	chgefüh	rte Model-Updatings	33
	5.1	Ziel de	s Model-Updatings	33
	5.2	Ausgar	ngssituation	34
	5-3	Übersi	cht über die durchgeführten Model-Updatings	36
	5-4	Model-	-Updating 1: Berücksichtigung der zusätzlichen Masse	38
		5.4.1	Modellierung der zusätzlichen Masse	39
		5.4.2	Simulationsergebnisse in der Referenzkonfiguration	39
		5-4-3	Ergebnisse des Model-Updatings unter Berücksichtigung der zusätzlichen Masse	40
	5•5	und M	-Updating 2: Vereinfachte Modellierung der Fenstergeometrie odellierung der Schrauben als 1D Federelemente mit variabler teifigkeit	44
		5.5.1	Modellierung der Fenstergeometrie	44
		5.5.2	Modellaufbau	45
		5-5-3	Variable Parameter	47
		5-5-4	Simulationsergebnisse des Schwingungsverhaltens vor der Optimierung	48
		5-5-5	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse und anschließenden Optimierung	49
	5.6		-Updating 3: Nicht konstante Wandstärke der Fenstergeometrie odellierung der Schrauben als fixierte Verbindungen	53
		5.6.1	Modellaufbau	54

	5.6.2	Variable Parameter	55
	5.6.3	Simulationsergebnisse des Schwingungsverhaltens vor dem Mo Updating	del- 55
	5.6.4	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse und der anschließenden Optimierung	56
5•7		-Updating 4: Erweiterung der Fenstergeometrie und vereinfach- lellierung der Klettverbindungen	61
	5-7-1	Modellierung der Fenstergeometrie	61
	5.7.2	Modellaufbau	62
	5-7-3	Variable Parameter	65
	5-7-4	Simulationsergebnis des Schwingungsverhaltens vor dem Mode Updating	el- 66
	5-7-5	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse und anschließenden Optimierung	68
5. 8		-Updating 5: Variation der Verbindungssteifigkeiten aller Verbin- elemente bei konstanten Wandstärken	70
	5.8.1	Variable Parameter	70
	5.8.2	Simulationsergebnis des Schwingungsverhaltens vor dem Mode Updating	el- 72
	5.8.3	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse und der anschließenden Optimierung	73
5-9	Model-	-Updating 6: Model-Updating des Fenstereinsatzes	76
	5.9.1	Modellaufbau	76
	5.9.2	Variable Parameter	78
	5-9-3	Simulationsergebnisse des Schwingungsverhaltens vor dem Mo Updating	del- 79
	5-9-4	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse und der anschließenden Optimierung	79
5.10		Updating 7: Anpassung der Verbindungssteifigkeiten aller Vergselemente auf Basis des optimierten Fenstereinsatzes	84
	5.10.1	Modellaufbau und variable Parameter	84
	5.10.2	Simulationsergebnis vor dem Model-Updating	86

		5.10.3	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse und der anschließenden Optimierung	86
	5.11	Zusam	menfassung der durchgeführten Model-Updatings	90
6	Disk	ussion	der Ergebnisse	93
7	Zusa	ammen	fassung und Ausblick	97
Lit	eratı	ırverzei	chnis	101
Α	Info	rmation	nen aus der Voruntersuchung	105
В	Zus	ätzliche	Information zum Model-Updating 1	107
С			Informationen zur Erstellung der Fenstergeometrie und dungselementen	109
D	Zus	ätzliche	Informationen zum Model-Updating 2	111
Ε	Zus	ätzliche	Information zu dem Model-Updating 3	112
	E.1	Auswir kante	kung einer zusätzlichen Randbedingung an der Fensterober-	112

Abbildungsverzeichnis

1.1	Struktur der Arbeit	2
3.1	Struktur unter Testbedingungen	10
3.2 3.3	Fenstereinsatz im montierten Zustand (links) und zugehörige Anbin-	11
	dungspunkte auf der Oberfläche des Seitenwandpaneels (rechts)	12
3·4 3·5	Schematischer Versuchsaufbau zur Bestimmung der FRF Netz der verwendeten Messpunkte sowie die definierten Referenz-	12
3.6	und Anregungspunkte an die Kontur der realen Struktur angepasst . $CMIF_1$ (blau), $CMIF_2$ (rot), $CMIF_3$ (grün) und $CMIF_4$ (hellblau) sowie	13
3.7	die durch XModal III automatisch identifizierten Moden	17
3.8	Seitenwandpaneels mit montierten Fenstereinsätzen Visueller Vergleich der Moden bei 178,65 Hz (links) und bei 178,77 Hz	18
3.9	(rechts)	19
	paneels mit und ohne montierte Fenster	20
3.10	Messpunkte mit Darstellung der Referenz- und Anregungspunkte	21
3.11	Auto-MAC-Matrix: Ähnlichkeit der experimentell bestimmten Model des Fenstereinsatzes (ausschließlich Moden mit geringer Dämpfung)	22
4.1	Ablaufdiagramm des durchgeführten Model-Updatings	25
4.2	Modellaufbau in Ansys Workbench 2024 R2	26
4.3	Beispiel für ein Latin-Hypercube-Sampling in Anlehnung an [ANS24b]	29
4·4 4·5	Prozessablauf zur Bestimmung des AMOP	31 32
5.1	MAC-Matrix: Vergleich der simulierten Moden ohne Fenstereinsätze mit den experimentell bestimmten Moden mit Fenstereinsätzen	25
5.2	Darstellung der durchgeführten Vergleiche	35 36
5.3	Vergleich verschiedener Masseverteilungen auf Basis der Optimierungsergebnisse	41
5-4	Model-Updating 1: Vergleich der MAC-Matrix vor (Referenzkonfigu-	41
5.5	ration) und nach (optimierte Konfiguration) dem Model-Updating In den Model-Updatings 2 und 3 verwendete vereinfachte Fenstergeo-	43
	metrie	46
5.6	Model-Updating 2: Vergleich der MAC-Matrix vor (Referenzkonfiguration) und nach (optimierte Konfiguration) dem Model-Updating	50
5.7	Pareto-Front der Optimierung des Model-Updatings 2	51
5.8	Model-Updating 3: Vergleich der MAC-Matrix vor (Referenzkonfigu-	
	ration) und nach (optimierte Konfiguration) dem Model-Updating	57

5.9 5.10	Pareto-Front der Optimierung des Model-Updatings 3	59 62
5.11	Model-Updating 4: Vergleich der MAC-Matrix vor (Referenzkonfigu-	
5.12	ration) und nach (optimierte Konfiguration) dem Model-Updating Model-Updating 5: Vergleich der MAC-Matrix vor (Referenzkonfigu-	67
5.13	ration) und nach (optimierte Konfiguration) dem Model-Updating Model-Updating 6: Vergleich der MAC-Matrix vor (Referenzkonfiguration) und nach (optimierte Konfiguration) dem Model-Updating	74 80
5.14	Verteilung der Werte, die die Designs für das C_{12} -Kriterium und das	
5.15	C_3 -Kriterium annehmen	82 83
5.16	Model-Updating 7: Vergleich der MAC-Matrix vor (Referenzkonfiguration) und nach (optimierte Konfiguration) dem Model-Updating .	87
5.17	Vergleich der erstellten Ersatzmodelle in Abhängigkeit der gewählten Wertebereiche der Verbindungssteifigkeiten der Klettverbindungen .	89
A.1 A.2	Ergebnis des Model-Updating Prozesses der Voruntersuchung Auto-MAC der experimentellen Moden aus der Voruntersuchung	105 105
В.1	Python-Skript zur Platzierung der Massen entlang der Fensterkanten	108
C.1 C.2 C.3	Projektion der Konturen der Fensterauschnitte auf die x-z Ebene Visualisierung der Definition der Federelemente Visualisierung der Definition der Schraubenverbindungen; gültig für fixierte Verbindungselemente sowie Verbindungselemente des Typs	109 109
C.4	"Lagerbuchse"	110 110
D.1	Relativbewegung zwischen Seitenwandpaneel und Fenstereinsatz	111
E.1	Vergleich der MAC Matrix unter Verwendung der Mittelwerte der Wandstärken aus der Optimierung ohne und mit zusätzlicher fixierter Rand-	
E . 2	bedingung an der Oberkante der Fenstereinsätze Simulierte Mode, die die experimentell bestimmte Mode mit Eigenfrequenz 24,4 Hz abbildet, ohne (oben) und mit zusätzlicher (unten)	114
E.3	Randbedingung	115
E.4	Randbedingung	115
E.5	Randbedingung	116
	Randbedingung	116

Tabellenverzeichnis

3.1 3.2	Ungedämpfte Eigenfrequenzen $f_{\rm gemessen}$ und modale Dämpfungsfaktoren δ der experimentell bestimmten Moden	16
5.1 5.2	Zusammenfassung aller durchgeführter Model-Updating Prozesse . Model-Updating 1: Frequenzabweichung der simulierten Eigenfrequenzen in der Referenzkonfiguration $f_{sim,ref}$ und der optimierten Konfiguration $f_{sim,opti}$ von den experimentell bestimmten Eigenfrequenzen f_{exp} (absolute Frequenzabweichung \geq 10 Hz, prozentuale Frequenzabreichung	37
5.3	abweichung \geq 10 %)	42
5.4	Kriteriums, CoP bezüglich des C_3 -Kriteriums) Model-Updating 2: Frequenzabweichung der simulierten Eigenfrequenzen in der Referenzkonfiguration $f_{sim,ref}$ und der optimierten Konfiguration $f_{sim,opti}$ von den experimentell bestimmten Eigenfrequenzen f_{exp} (absolute Frequenzabweichung \geq 10 Hz, prozentuale Frequenzabwei	46
5.5	quenzabweichung \geq 10 %)	49
5.6	Kriteriums, CoP bezüglich des C_3 -Kriteriums) Model-Updating 3: Frequenzabweichung der simulierten Eigenfrequenzen in der Referenzkonfiguration $f_{sim,ref}$ und der optimierten Konfiguration $f_{sim,opti}$ von den experimentell bestimmten Eigenfrequenzen f_{exp} (absolute Frequenzabweichung \geq 10 Hz, prozentuale Frequenzabw	54
5.7	abweichung ≥ 10 %)	58
5.8	erfüllen	60
5.9	bezüglich des C_3 -Kriteriums rechter Fenstereinsatz) Model-Updating 4: Frequenzabweichung der simulierten Eigenfrequenzen in der Referenzkonfiguration $f_{sim,ref}$ und der optimierten Konfiguration $f_{sim,opti}$ von den experimentell bestimmten Eigenfre-	64
5.10	quenzen f_{exp} (absolute Frequenzabweichung \geq 10 Hz, prozentuale Frequenzabweichung \geq 10 %)	68
	Kriteriums)	71

5.11	Model-Updating 5: Frequenzabweichung der simulierten Eigenfrequenzen in der Referenzkonfiguration $f_{sim,ref}$ und der optimierten Konfiguration $f_{sim,opti}$ von den experimentell bestimmten Eigenfrequenzen f_{exp} (absolute Frequenzabweichung \geq 10 Hz, prozentuale Frequenz-	
5.12	abweichung \geq 10 %)	73
5.13	Kriteriums, CoP bezüglich des C_3 -Kriteriums) Model-Updating 6: Frequenzabweichung der simulierten Eigenfrequenzen in der Referenzkonfiguration $f_{sim,ref}$ und der optimierten	77
	Konfiguration $f_{sim,opti}$ von den experimentell bestimmten Eigenfrequenzen f_{exp} (absolute Frequenzabweichung \geq 10 Hz, prozentuale Frequenzabweichung \geq 10 %)	79
5.14	Model-Updating 7: Übersicht über die berücksichtigten Modellparameter sowie die ermittelten Sensitivitätswerte (CoP bezüglich des C_{12} -Kriteriums)	84
5.15	Model-Updating 7: Frequenzabweichung der simulierten Eigenfrequenzen in der Referenzkonfiguration $f_{sim,ref}$ und der optimierten Konfiguration $f_{sim,opti}$ von den experimentell bestimmten Eigenfrequenzen f_{exp} (absolute Frequenzabweichung \geq 10 Hz, prozentuale Frequenzabweichung \geq 10 %)	88
А.1	Ungedämpfte Eigenfrequenzen $f_{\rm gemessen}$ und modale Dämpfungsfak-	106
B.1	Vergleich des simulativ berechneten C_{12} -Kriteriums mit dem durch	100
	das Ersatzmodell bestimmten	107

Abkürzungsverzeichnis

ALHS Advanced Latin-Hypercube-Sampling. 29

AMOP Adaptive Metamodel of Optimal Prognosis. 29

CMIF complex mode indicator function. 15

CoP Coefficient of Prognosis. 30

DoE Design of Experiment. 29

FE Finite-Elemente. 1

FRF Frequency Response Function. 9

GFK glasfaserverstärkter Kunststoff. 10, 45

LHS Latin-Hypercube-Sampling. 29

LSV Laser-Scanning-Vibrometer. 13

MAC Modal Assurance Criterion. 16

MDOF Multi Degree Of Freedom. 9

MOP Metamodel of Optimal Prognosis. 29

OCO One-Click Optimization. 31

SDOF Single Degree Of Freedom. 9

uff universal file format. 14

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
A	Fläche	m²
C_{12}	Kriterium C_{12} zur Bewertung der MAC-Matrix	
C_3	Kriterium C_3 zur Bewertung der Masse der simulierten Fenstereinsätze	
$CoP(X_i)$	Sensitivitätswert, Einfluss des Eingabeparameters X_i auf die Optimierungskriterien	%
F	Kraft	N
$\underline{\underline{H}}(\omega)$	Frequency Response Function	
<u>M</u>	MAC-Matrix	
$SS_{E}^{Prediction}$	Summe der Fehlerquadrate der Vorhersage des Me-	
SS_T	tamodells Varianz des Optimierungskriteriums Z durch Varia- tion aller relevanten Eingabeparameter	
$\underline{\underline{U}}(\omega)$	Matrix der Singulärvektoren	
$Y(\omega)$	Admittanz	$m N^{-1} s^{-1}$
Z	Optimierungskriterium Z	
f_{exp}	Eigenfrequenz aus dem Experiment	Hz
$f_{exp,n}$	n-te Eigenfrequenz aus dem Experiment	Hz
$f_{sim,n}$	n-te Eigenfrequenz aus der Simulation	Hz
$f_{sim,opti}$	Simulierte Eigenfrequenz in der optimierten Konfiguration	Hz
$f_{sim,ref}$	Simulierte Eigenfrequenz in der Referenzkonfiguration	Hz

Symbol	Beschreibung	Einheit
j	imaginäre Einheit	
k	Federsteifigkeit	$N m^{-1}$
$k_{fl\"{a}chenspezifisch}$	Flächenspezifische Steifigkeit	$N m^{-2}$
$m_{fenster,sim}$	Masse des Fenstereinsatzes in der Simulation	kg
$n_{dyn}(\omega)$	dynamische Nachgiebigkeit (Receptance)	$m\;N^{\scriptscriptstyle{-1}}$
$\underline{u_i}(\omega)$	Singulärvektor	
v	Geschwindigkeit	m s ⁻¹
$\Delta x_{einheit}$	Einheitsverschiebung	mm
α	Gewichtungsfaktor	
δ	Dämpfungsfaktor	%
σ_i	Singulärwert	
$\{\underline{\varphi}_A\}$	Vektorset A	
$\{\underline{\varphi}_A\}_r$	r-te Mode aus dem Vektorset A	
$\{\underline{\varphi}_X\}$	Vektorset X	
$\{\underline{\varphi}_X\}_q$	q-te Mode aus dem Vektorset X	
$\underline{\underline{\Sigma}}(\omega)$	Matrix der Singulärwerte	
ξ	Auslenkung	m

1. Einleitung

Um das Fortschreiten des Klimawandels zu begrenzen, müssen alternative Antriebssysteme in der Mobilität entwickelt werden. Für die Luftfahrt ist der Einsatz elektrischer Antriebe auf Basis von Propeller-Triebwerken kombiniert mit Brennstoffzellensystemen ein möglicher Ansatz. Zur Umsetzung dieses Ansatzes sind Anpassungen im Rumpf- und Flügeldesign erforderlich. Dies führt zu veränderten Lärmquellen und vibroakustischen Transmissionspfaden [Hof+24]. Zum Schutz der Passagiere ist die Bewertung der Lärmbelastung und der Wirksamkeit von Schallschutzmaßnahmen in der Vorentwurfsphase erforderlich [Knu+24].

Die Bewertung der Lärmbelastung und der Wirksamkeit ergriffener Schallschutzmaßnahmen kann mit Hilfe von Finite-Elemente (FE)-Modellen erfolgen [Knu+24]. Im Rahmen des DLR Projektes INTONATE und des LuFo VI-3 Projektes ZEBRA werden daher FE-Modelle von Flugzeugrümpfen auf Basis vorhandener Vorentwurfsdaten zur Berechnung der Schalltransmission erstellt [Alg+24]. Die Genauigkeit der Simulationsergebnisse hängt stark von der Genauigkeit der Modellparameter wie verwendeten Materialien und Lagenaufbauten ab. Da diese für die Sekundärstruktur weitestgehend unbekannt sind, werden Erfahrungswerte aus Vorgängerprojekten verwendet. Das führt dazu, dass diese Parameter und damit die Simulationsergebnisse mit großer Unsicherheit behaftet sind [Alg25]. Um die Vorhersagegenauigkeit der Schalltransmission auf Basis der erstellten FE-Modelle zu erhöhen, werden die Modellparameter einzelner Bauteile der Sekundärstruktur durch FE-Model-Updating bestimmt. Dazu wird in einem ersten Schritt experimentell das reale Schwingungsverhalten ermittelt. Anschließend erfolgt die Anpassung der Modellparameter, sodass das reale Schwingungsverhalten durch das FE-Modell abgebildet werden kann. [Alg25]

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Optimierung des FE-Modells eines Seitenwandpaneels der Innenverkleidung eines Airbus A320 mit montierten Fenstereinsätzen. Für dieses Seitenwandpaneels existiert bereits ein FE-Modell, das das reale Schwingungsverhalten des Seitenwandpaneels ohne Fenstereinsätze abbilden kann. Das Ziel dieser Arbeit ist die Erweiterung dieses Modells um die Fenstereinsätze. Eine möglichst einfache Modellierung bei möglichst genauer Abbildung des realen Schwingungsverhaltens ist anzustreben. Aus diesem Grund werden verschiedene Komplexitätsstufen des FE-Modells untersucht.

In Abbildung 1.1 ist die Struktur dieser Arbeit dargestellt. Kapitel 2 fasst den Stand der Forschung zusammen. Dabei wird zuerst auf das Model-Updating von FE-Modellen im Allgemeinen und die dafür notwendigen Schritte eingegangen. Anschließend wird das Model-Updating, das zur Bestimmung der Materialparameter des Seitenwandpaneels ohne Fenstereinsätze verwendet wurde, vorgestellt. Das aus dieser Untersuchung resultierende Modell ist die Grundlage aller im Rahmen dieser Arbeit verwendeten FE-Modelle. Im anschließenden Kapitel 3 werden zunächst alle zum Verständnis notwendigen Grundlagen der durchgeführten experimentellen Modalanalyse dargestellt. Anschließend werden die Durchführung und die Ergebnisse der durchgeführten Modalanalysen erläutert. Mit Hilfe der experimentellen Modalanalyse wird einer-

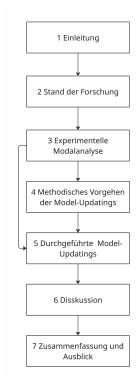


Abbildung 1.1 Struktur der Arbeit

seits das reale Schwingungsverhalten des Seitenwandpaneel mit montierten Fenstereinsätzen und andererseits des Fenstereinsatzes im demontierten Zustand bestimmt. Das anschließende Kapitel 4 stellt die verwendete Methodik der durchgeführten Model-Updatings dar. Es werden der Modellaufbau, die verwendeten Optimierungskriterien sowie alle der Sensitivitätsanalyse und Optimierung zugrunde liegenden methodischen Grundlagen dargestellt. Kapitel 5 beinhaltet die verschiedenen durchgeführten Model-Updatings. Für jedes durchgeführte Model-Updating wird die Modellierung der Geometrie der Fenstereinsätze entsprechend der jeweiligen Komplexitätsstufe, die verwendeten Modellaufbauten sowie die gewählten variablen Parameter und die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse dargestellt. Zudem wird die Simulation des Schwingungsverhaltens vor und nach dem Model-Updating bewertet. Dabei wird auf die experimentellen Ergebnisse aus Kapitel 3 und die Simulationsergebnisse der vorher durchgeführten Model-Updatings zurückgegriffen. Aus der Bewertung werden Hypothesen abgeleitet, die als Grundlage für das jeweils nachfolgende Model-Updating verwendet werden. Die erzielten Ergebnisse werden in Kapitel 6 diskutiert. Diese Diskussion stellt die Grundlage des in Kapitel 7 dargestellten Ausblicks dar. In diesem letzten Kapitel werden zudem alle Ergebnisse zusammengefasst.

2. Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird der Stand der Forschung zum Model-Updating von FE-Modellen, mit dessen Hilfe Simulationsergebnisse an das Verhalten realer Systeme angepasst werden können, dargestellt. Anschließend erfolgt die Beschreibung des Ausgangsmodells, auf dem die Untersuchungen dieser Arbeit basieren, beschrieben.

2.1 Model-Updating von FE-Modellen

Um das dynamische Verhalten von Strukturen zu untersuchen und vorherzusagen, werden in vielen Fällen FE-Modelle eingesetzt. Der Vorteil von FE-Modellen ist, dass sie neben der Untersuchung des Strukturverhaltens auch Vorhersagen über das Verhalten bei veränderten Parametern ermöglichen. Des Weiteren können komplexe Strukturen unter Verwendung einer FE-Simulation im Vergleich zu Experimenten mit verhältnismäßig geringem Aufwand untersucht werden. Die Genauigkeit der Simulationsergebnisse wird dabei von dem Modellaufbau, den gewählten Parametern und der Diskretisierung bestimmt. [Vaj+18]

Bei der Modellierung einer realen Struktur durch ein FE-Modell können verschiedene Fehler auftreten, die dazu führen, dass das Modell das reale Strukturverhalten unzureichend abbildet. Zu diesen Fehlern gehören einerseits Modellierungs- und andererseits Diskretisierungsfehler [Vaj+18].

Die Modellierungsfehler können weiter in Parameterfehler und Strukturfehler unterschieden werden. Strukturfehler sind Fehler, die durch inkorrekte Annahmen über die mechanischen Eigenschaften und das physikalische Verhalten der modellierten Struktur entstehen. Beispiele für diese Fehler sind unzulässige Vereinfachungen, ungenaue Annahmen der Masseverteilungen oder die inkorrekte Modellierung von Randbedingungen sowie von Verbindungselementen [EDF22]. Parameterfehler sind Fehler, die durch die falsche Wahl der numerischen Werte für relevante Modellparameter wie Materialeigenschaften, die Dicke verwendeter Elemente oder Federsteifigkeiten von Verbindungselementen auftreten [Ewioo] [YC19] [AA20]. Der Vorteil der Parameterfehler im Vergleich zu Strukturfehlern ist, dass sie durch die Durchführung eines Model-Updatings minimiert werden können [Ewioo].

Der Begriff Model-Updating beschreibt einen Optimierungsprozess zur gezielten Anpassung des Simulationsmodells, sodass das tatsächliche Strukturverhalten durch die Simulation präziser abgebildet werden kann. Dazu muss das reale Strukturverhalten durch ein entsprechendes Experiment bestimmt werden, ein initiales FE-Modell vorliegen und das Optimierungsziel klar definiert werden. [EDF22] [Alt+18]

Es existieren zwei verschiedene grundlegende Methoden des Model-Updatings. Einerseits kann die Systemmatrix des FE-Modells direkt verändert werden (direct matrix methods), andererseits können die physikalischen oder die Elementeigenschaften angepasst und damit die Systemmatrix indirekt beeinflusst werden (indirect, physical

property adjustment methods) [Ewioo]. Ein Model-Updating unter Verwendung indirekter Methoden kann entweder durch manuelle Variation der Modellparameter oder automatisiert erfolgen. Indirekte Methoden werden zudem in bayesianische und sensitivitätsbasierte Verfahren unterteilt. [Alt+18]

Der Ablauf eines automatisierten, iterativen sensitivitätsbasierten Model-Updatings, wie es in dieser Arbeit verwendet wird, besteht grundlegend aus den nachfolgend beschriebenen sechs Schritten [EDF22][Alt+18].

- 1. Experimentelle Bestimmung des realen Strukturverhaltens und Erstellung des initialen FE-Modells (Referenzkonfiguration)
- Vergleich der Simulationsergebnisse der initialen FE-Simulation mit den Messdaten aus dem Experiment (beispielsweise eine numerische und eine experimentelle Modalanalyse)
- 3. Auswahl der unsicheren und damit zu optimierenden Parameter
- 4. Definition der Grenzen der Wertebereiche für jeden Parameter
- 5. Bestimmung des Parametereinflusses auf die FE-Simulationsergebnisse unter Verwendung einer Sensitivitätsanalyse
- 6. Lösung der Zielfunktion der Optimierung und Überprüfung der Konvergenz, um die Abweichung der Simulationsergebnisse von dem realen Strukturverhalten zu minimieren
- 7. Durch Optimierung bestimmte, ideale Parameterkombination in das FE-Modell übernehmen

Sobald die Konvergenz der Zielfunktion der Optimierung erreicht ist, werden die durch den Prozess ermittelten Parameter in das FE-Modell übernommen. Das Model-Updating ist damit abgeschlossen [EDF22]. Die Art der Sensitivitätsanalyse und des verwendeten Optimierungsalgorithmus hängt von der jeweiligen Problemstellung ab. Wird ein Model-Updating durchgeführt, um das dynamische Strukturverhalten eines Systems präziser abbilden zu können, eignet sich eine experimentelle Modalanalyse zur Bestimmung des realen Schwingungsverhaltens. Der Vergleich von FE-Simulationsergebnissen und dem realen Schwingungsverhalten kann vorgenommen werden, wenn in der Simulation eine numerische Modalanalyse durchgeführt wird. [EDF22]

2.2 Ausgangsmodell

Von Algermissen wurde im Rahmen einer Voruntersuchung die Erstellung eines Simulationsmodells eines Seitenwandpaneels der Innenverkleidung eines Airbus A320 ohne Fenstereinsätze erreicht [Alg25]. Um die Genauigkeit, mit der das Schalltransimissionsverhalten dieses Seitenwandpaneels berechnet werden kann zu steigern, wurde im Rahmen dieser Voruntersuchung ein Model-Updating des Simulationsmodells durchgeführt. Das Ziel des Model-Updatings war die Bestimmung der unbekannten Materialparameter sowie Lagenaufbauten des Seitenwandpaneels. Dazu werden die

Fenstereinsätze aus der Struktur entfernt und das Seitenwandpaneel einzeln untersucht. Im Folgenden werden zum besseren Verständnis die durchgeführte Untersuchung und die wichtigsten Ergebnisse kurz zusammengefasst.

Zur Charakterisierung des realen Schwingungsverhaltens des Seitenwandpaneels ohne die Fenstereinsätze wurde eine experimentelle Modalanalyse durchgeführt. Um das reine Strukturverhalten ohne Einfluss vorhandener Anbindungen zu untersuchen, wurden freie Randbedingungen verwendet. Das Ergebnis der experimentellen Modalanalyse lieferte die Eigenfrequenzen und zugehörigen Eigenmoden des Seitenwandpaneels im Frequenzbereich von 8 Hz bis 200 Hz.

Um das experimentell bestimmte Schwingungsverhalten möglichst genau durch das FE-Modell des Seitenwandpaneels abbilden zu können, die Methodik des Model-Updatings ausgewählt. Die Durchführung des Model-Updatings war erforderlich, da weder die exakte Geometrie noch der Lagenaufbau oder die verwendeten Materialien genau bekannt sind. Zur Erstellung des initialen FE-Modells für das Model-Updating wurde die Geometrie des Seitenwandpaneels mit Hilfe eines optischen 3D Scans erfasst und durch ein Post-Processing in Catia V5 in ein Flächenmodell überführt. Es erfolgte keine Anpassung der Geometrie während des Model-Updatings. Zudem wurde die Masse des Seitenwandpaneels und der zur Aufhängung während der experimentellen Modalanalyse verwendeten Haken gemessen. Anschließend wurde das Flächenmodell in Ansys Workbench importiert und der initiale Lagenaufbau (Aufbau: durch Abschleifen der Oberfläche optisch bestimmt; Lagendicke: Messung mit Mikrometerschraube; Materialdaten: Erfahrungswerte aus ähnlichen Untersuchungen) durch Ansys Composite PrepPost (ACP) definiert. Danach erfolgte die Vernetzung unter Verwendung von Shell 181 Elementen. Für die Modellierung der Haken wurden unter Vernachlässigung der Geometrie sowie der Materialeigenschaften Punktmassen verwendet. Die Dämpfung wurde ebenfalls vollständig vernachlässigt. Dieses Modell entspricht dem zum Model-Updating verwendeten initialen FE-Modell (Referenzkonfiguration).

Für die Durchführung des Model-Updating Prozesses wurden drei Optimierungskriterien (Genauigkeit der Eigenform, Genauigkeit der Eigenfrequenzen und Übereinstimmung der Masse des Seitenwandpaneels) definiert. Anschließend erfolgte die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse und die Optimierung der Modellparameter. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde ein Ersatzmodell bestimmt, das die Systemeigenschaften abbildet und die Grundlage der Optimierung darstellt.

Das durch das Model-Updating von Algermissen ermittelte FE-Modell bildet das reale Schwingungsverhalten aus der experimentellen Modalanalyse insgesamt gut ab, wie in Abbildung A.1 im Anhang A dargestellt. Zwei der experimentell bestimmten Moden (Eigenfrequenzen: 58,8 Hz und 114,4 Hz) können durch die Simulation nicht abgebildet werden. Das Simulationsmodell zeigt eine geringe Übereinstimmung mit den experimentell bestimmten Moden bei 60,1 Hz und 173,1 Hz. Alle übrigen Moden können durch das erstellte Simulationsmodell mit hoher Übereinstimmung (63 % bis 98 %) abgebildet werden. Die Abweichung der Eigenfrequenzen der Simulation von dem Experiment liegt nur in drei Fällen (Eigenfrequenzen: 124,7 Hz, 148,7 Hz und 165,1 Hz) über 10 Hz. Auch die Masse des Seitenwandpaneels weicht lediglich um 5,2 % (0,14 kg) ab.

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen stehen sowohl die experimentell bestimmten Daten als auch das ermittelte FE-Modell des Seitenwandpaneels ohne Fenstereinsätze zur Verfügung. Sie dienen als Grundlage aller im Rah-

men dieser Arbeit durchgeführten Model-Updatings zur möglichst realitätsnahen Modellierung des Schwingungsverhaltens des Seitenwandpaneels mit montierten Fenstereinsätzen.[Alg25]

3. Experimentelle Modalanalyse

Das Ziel dieser Arbeit ist die möglichst realitätsnahe Modellierung des dynamischen Schwingungsverhaltens eines Seitenwandpaneels der Innenverkleidung eines Flugzeugrumpfes mit montierten Fenstereinsätzen. Für das Seitenwandpaneel ohne montierte Fenstereinsätze existiert, wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, bereits ein FE-Modell, das die Simulation des realen Schwingungsverhaltens ermöglicht.

Zunächst wird das reale Schwingungsverhalten des Seitenwandpaneels mit montierten Fenstereinsätzen unter Verwendung einer experimentellen Modalanalyse bestimmt. Anschließend zeigt ein Vergleich mit dem aus der Voruntersuchung bekannten realen Schwingungsverhalten ohne montierte Fenstereinsätze, ob die Notwendigkeit besteht, die Fenstereinsätze in der Modellierung zu berücksichtigen. Bestätigt der Vergleich die Notwendigkeit der Modellierung, so werden die Fenstereinsätze im Modell ergänzt und unbekannte Werte der Modellparameter unter Verwendung eines Model-Updatings bestimmt. Für das Model-Updating werden die Ergebnisse der experimentellen Modalanalyse zur Bewertung der Simulationsergebnisse im Vergleich zum realen Schwingungsverhalten herangezogen.

Nachfolgend sind zunächst zum Verständnis notwendige theoretische Grundlagen der experimentellen Modalanalyse dargestellt. Anschließend werden die Durchführung sowie die Ergebnisse der experimentellen Modalanalyse des Seitenwandpaneels mit montierten Fenstereinsätzen vorgestellt. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen die Notwendigkeit der separaten Betrachtung des Fenstereinsatzes im demontierten Zustand. Daher werden abschließend die Durchführung sowie die Ergebnisse der experimentellen Modalanalyse eines der Fenstereinsätze beschrieben.

3.1 Theoretische Grundlagen der experimentellen Modalanalyse

Das Ziel einer Modalanalyse im Allgemeinen ist die Charakterisierung des Schwingungsverhaltens des vorliegenden Systems. Die Charakterisierung des Schwingungsverhaltens erfolgt durch Ermittlung der Modalparameter Eigenfrequenz (auch Modalfrequenz genannt), Eigenform (auch Modenform genannt), und Modaldämpfung für jede auftretende Mode innerhalb des vorgegebenen Frequenzbereichs. Als Mode wird eine Eigenfrequenz mit zugehöriger Eigenform bezeichnet. [Möso9][KR19]

Die Modalparameter werden verwendet, um das dynamische Systemverhalten mit Hilfe eines Modalmodells zu beschreiben. Innerhalb des Modalmodells wird jede Mode als Einmassenschwinger mit einem Freiheitsgrad beschrieben (abgeschlossenes System). Eine vollständige Beschreibung des dynamischen Verhaltens kann auf Grund der Orthogonalität der Eigenformen durch die Superposition aller auftretenden Moden erreicht werden. Unter Verwendung des Modalmodells kann das Schwingungsverhalten mit reduziertem Aufwand analysiert, vorhergesagt und optimiert werden [Möso9]. Des Weiteren kann das im Modalmodell repräsentierte Schwingungsverhalten mit den Ergebnissen einer numerischen Simulation verglichen werden [Mös20].

Zur Bestimmung der Modalparameter können physikalische oder numerische Modelle herangezogen, sowie eine experimentelle Bestimmung an der realen Struktur durchgeführt werden. Das Verfahren zur experimentellen Bestimmung der Modalparameter wird experimentelle Modalanalyse genannt. Der Vorteil der experimentellen Modalanalyse ist, dass diese auch dann durchgeführt werden kann, wenn die physikalischen Eigenschaften des Systems weitgehend unbekannt oder mit großer Unsicherheit behaftet sind. [Mös20]

Um mit Hilfe der experimentellen Modalanalyse das reale Schwingungsverhalten einer Struktur bestimmen zu können, muss das System einige Voraussetzungen erfüllen. Diese sind im nachfolgenden Abschnitt zusammengefasst dargestellt.

3.1.1 Voraussetzungen der experimentellen Modalanalyse

Notwendige Voraussetzung für die Verwendung der experimentellen Modalanalyse ist, dass es sich bei der zu untersuchenden Struktur um ein lineares zeitinvariantes System handelt [Möso9]. Für die zu untersuchende Struktur müssen deshalb folgende Annahmen gelten [KR19]:

- Superpositionsprinzip: Wird das System mit mehreren Signalen angeregt, so entspricht die resultierende Systemantwort der Summe der Antworten, die jedes einzelne Signal erzeugt.
- **Proportionalität:** Wenn das Anregungssignal um einen Faktor verändert wird, so ändert sich die Systemantwort um denselben Faktor.
- **Reziprozität:** Der Ort der Anregung kann mit dem Ort der Antwort vertauscht werden, ohne dass das Übertragungsverhalten des Systems verändert wird.
- Kausalität: Die Systemantwort wird ausschließlich von dem Anregungssignal hervorgerufen.
- **Stabilität:** Es handelt sich um ein stabiles System, wenn nach Abschalten des Anregungssignals die Systemschwingung abklingt.
- **Zeitinvarianz:** Die dynamischen Eigenschaften sind während der gesamten Messung unveränderlich.

Weiterhin muss, wie oben bereits genannt, die Orthogonalität der Eigenfunktionen gegeben sein. Dies ist im Allgemeinen nur für abgeschlossene Systeme der Fall. Ein abgeschlossenes System ist gegeben, sofern die Ränder des Systems ideal frei oder starr sind. Im nachfolgenden Abschnitt werden die zur Durchführung der experimentellen Modalanalyse nötigen Schritte erläutert. [Mösoo]

3.1.2 Schritte der experimentellen Modalanalyse

Die experimentelle Modalanalyse besteht aus zwei Schritten. Zunächst wird **experimentell der Frequenzgang bestimmt**, der die Systemeigenschaften der zu untersuchenden Struktur repräsentiert. Anschließend wird der Frequenzgang verwendet, um die **Modalparameter** des Systems zu **bestimmen**. Der zweite Schritt wird allgemein als Modalanalyse bezeichnet. [Möso9]

Der Frequenzgang, auch Frequency Response Function (FRF) genannt und allgemein mit dem Formelzeichen $\underline{\underline{H}}(\omega)$ gekennzeichnet, beschreibt die Antwort des Systems auf eine definierte Anregung. Im Frequenzbereich gilt allgemein:

$$System eigenschaften = \frac{Antwortverhalten}{Anregung}$$

Zur Beschreibung der Systemeigenschaften durch die FRF müssen folglich die zur Anregung verwendete Kraft sowie die Systemantwort in Form von Auslenkung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung im Frequenzbereich bestimmt werden. Die während der Messung aufgezeichneten Signale liegen im Zeitbereich vor, sodass zur Bestimmung der FRF beide Signale mit Hilfe einer Fourier-Transformation in den Frequenzbereich übertragen werden müssen. Wird, wie in der vorliegenden Arbeit, als Systemantwort die Geschwindigkeit v gemessen, so heißt die FRF Admittanz oder Beweglichkeit $Y(\omega)$ (auch Mobility genannt). Sie wird gemäß Gleichung 3.1 berechnet, wobei F die Kraft ist, die zur Anregung verwendet wird. [Möso9]

$$Y(\omega) = \frac{v(\omega)}{F(\omega)}$$
 (3.1)

Die FRF dient als Grundlage der Bestimmung der Modalparameter. Auftretende Messungenauigkeiten führen dazu, dass die FRF das reale Übertragungsverhalten des Systems nur näherungsweise abbildet. Aus diesem Grund wird die Bestimmung der Modalparameter als Parameterschätzung bezeichnet.[Möso9]

Zur Bestimmung der Modalparameter stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Das geeignete Verfahren muss abhängig von dem vorliegenden System und den Messergebnissen gewählt werden. Die Verfahren werden im allgemeinen in zwei Kategorien eingeteilt. Einerseits existieren Single Degree Of Freedom (SDOF)- andererseits Multi Degree Of Freedom (MDOF) Kurvenermittlungsverfahren. Die Voraussetzung für die Verwendung von SDOF Verfahren ist, dass höchstens eine schwache Kopplung zwischen den Moden besteht, sodass sie sich wenig beeinflussen und gut voneinander abzugrenzen sind [Möso9]. Ist dies nicht gegeben, müssen, wie für das vorliegende System, die aufwendigeren MDOF Verfahren herangezogen werden. Dabei gilt es zu beachten, dass für ein MDOF System eine einzelne FRF nicht alle auftretenden Moden abbilden kann. Daher werden für solche Systeme mehrere FRFs bestimmt. Der Einfluss einer Mode und der zugehörigen Eigenfrequenz wird dann in mehreren der bestimmten FRFs abgebildet. Um alle Eigenfrequenzen identifizieren zu können, werden zur Bestimmung der Modalparameter die verschiedenen FRFs zu einer Indikatorfunktion kombiniert. [Mös2o]

Im Folgenden sind die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen beschrieben sowie die erzielten Ergebnisse dargestellt. Dabei wird die Bestimmung der Modalparameter, an die Problemstellung angepasst, detaillierter beschrieben.

3.2 Methodik und Aufbau der experimentellen Modalanalyse des Seitenwandpaneels mit montierten Fenstereinsätzen

Die experimentelle Modalanalyse wird in dieser Arbeit verwendet, um das reale Schwingungsverhalten des vorliegenden Seitenwandpaneels mit Fenstereinsätzen zu bestim-

men. In diesem Abschnitt werden die durchgeführten Experimente sowie die Ergebnisse dargestellt.

3.2.1 Versuchsaufbau

Wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben, besteht der erste Schritt einer experimentellen Modalanalyse darin, die FRF der zu untersuchenden Struktur in diesem Fall des Seitenwandpaneels mit montierten Fenstereinsätzen zu bestimmen. Eine Darstellung des zu untersuchenden Seitenwandpaneels unter Testbedingungen kann Abbildung 3.1 entnommen werden.



 Gekennzeichnete Referenzpunkte auf der Oberfläche des Seitenwandpaneels

Abbildung 3.1 Struktur unter Testbedingungen

Das Seitenwandpaneel wurde im Rahmen der Voruntersuchung von Algermissen ohne die Fenstereinsätze untersucht [Alg25]. Zur Montage der Fenstereinsätze werden die vorgesehenen fünf Schrauben- und die Klettverbindungen verwendet. Die Klettverbindungen dienen der Befestigung der GFK-Platte (glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)) auf dem Seitenwandpaneel (siehe Abbildung 3.3). Alle Anbindungspunkte der Fenstereinsätze befinden sich auf der Rückseite des Seitenwandpaneels. Sie können Abbildung 3.3 entnommen werden. Um die Klettverbindungen hervorzuheben, sind sie dunkelblau umrandet dargestellt, während die Anbindungspunkte der Schraubenverbindungen hellblau umrandet hervorgehoben sind.

Zum besseren Verständnis sind in Abbildung 3.2 Detailansichten der Fenstereinsätze dargestellt. Abbildung 3.2a zeigt den Einbauzustand, während Abbildung 3.2b den Fenstereinsatz im demontierten Zustand darstellt. Alle für die weiteren Betrachtungen relevanten Komponenten sind zum besseren Verständnis gekennzeichnet und

beschriftet dargestellt. Zeigt die experimentelle Modalanalyse die Notwendigkeit der Modellierung der Fenstereinsätze, erfolgt die Modellierung auf Basis dieser Abbildung.





(a) Eingebauter Zustand

(b) Demontierter Zustand

Abbildung 3.2 Detailansicht der Fenstereinsätze

Für die experimentelle Untersuchung werden frei gelagerte Randbedingungen gewählt, um das dynamische Verhalten des Seitenwandpaneels ohne Einfluss von Stützstrukturen zu untersuchen und das geforderte abgeschlossene System zu erzeugen (siehe Abschnitt 3.1.1). Auf diese Weise wird außerdem die Vergleichbarkeit zu der Voruntersuchung sichergestellt. Dazu wird die Struktur unter Verwendung von elastischen Bändern und an der Struktur befestigten Haken freischwebend an einem Aluminiumrahmen befestigt (siehe Abbildung 3.1). Dieser Rahmen aus Aluminiumprofilen ist auf einem Schwingfundament montiert.

Zur experimentellen Bestimmung der FRF muss die Systemantwort der Struktur auf eine definierte Anregung gemessen werden (siehe Abschnitt 3.1.2). Der dazu verwendete Versuchsaufbau ist in dem schematischen Versuchsaufbau in Abbildung 3.4 dargestellt. In den beiden nachfolgenden Abschnitten wird detailliert beschrieben, wie die Anregung der Struktur und die Messung der Systemantwort durchgeführt werden. Es werden vier Messungen mit unterschiedlichen Anregungspunkten durchgeführt, um sicherzustellen, dass das reale Schwingungsverhalten vollständig aufgezeichnet wird.

3.2.2 Anregung der Struktur

Für die Anregung der Struktur wird ein elektrodynamischer Shaker des Typs LDS® V201 verwendet. Die Anregung erfolgt durch ein Pseudo-random Signal mit Bandbreite von o Hz bis 500 Hz. Bei dem Pseudo-random Signal handelt es sich um ein





Abbildung 3.3 Fenstereinsatz im montierten Zustand (links) und zugehörige Anbindungspunkte auf der Oberfläche des Seitenwandpaneels (rechts)

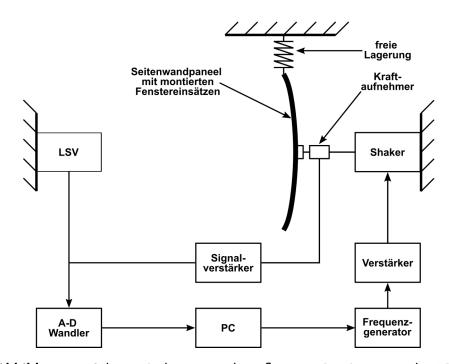


Abbildung 3.4 Schematischer Versuchsaufbau zur Bestimmung der FRF

innerhalb des Messfensters periodisches Signal mit konstanter Amplitude und stochastischem Phasenwinkel [KASo4].

Die Kraft, die zur Schwingungsanregung benötigt wird, wird mit Hilfe eines Kraftaufnehmers des Typs PCB° 208B01 gemessen. Dazu wird der Kraftaufnehmer mit Hilfe von Wachs an dem jeweiligen Anregungspunkt auf der Rückseite der Verkleidung befestigt. Die Verbindung des Kraftaufnehmers mit dem Shaker erfolgt durch eine Aluminiumstange. Bei der Montage des Kraftaufnehmers und damit der Positionierung des Shakers muss darauf geachtet werden, dass die Krafteinleitung senkrecht zur Oberfläche erfolgt. Dies ist wichtig, um die Einleitung statischer Kräfte, die die FRF beeinflussen können, zu verhindern [Möso9]. Weiterhin muss der Shaker einen sicheren Stand aufweisen, um Schwankungen in der Anregung zu verhindern [Möso9]. Der

sichere Stand wird gewährleisten, indem der Shaker auf einem Stativ befestigt wird. Bei der Wahl der Anregungspunkte muss berücksichtigt werden, dass alle relevanten Moden durch die Messung angeregt und aufgezeichnet werden. Um dies sicherzustellen, werden vier Messungen mit veränderten Anregungspunkten durchgeführt. Wird nur ein Anregungspunkt verwendet und liegt dieser im Knotenpunkt einer Schwingung einer Mode, so kann diese Mode in der FRF nicht identifiziert werden [GKL21]. Durch Variation des Anregungspunktes wird sichergestellt, dass auch die Moden, die einen Schwingungsknoten in einem der Anregungspunkte haben, durch die weiteren Messungen detektiert werden. Die für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen verwendeten vier Anregungspunkte sind in Abbildung 3.5 hellblau dargestellt.

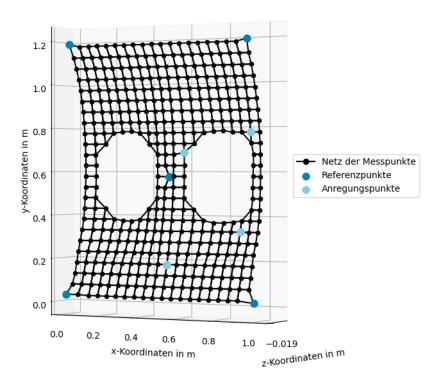


Abbildung 3.5 Netz der verwendeten Messpunkte sowie die definierten Referenzund Anregungspunkte an die Kontur der realen Struktur angepasst

3.2.3 Messung der Systemantworten

Die Strukturantwort wird mit Hilfe eines Laser-Scanning-Vibrometer (LSV) des Typs Polytec® PSV 200 an den gewählten Messpunkten bestimmt (siehe Abbildung 3.5). Das Messprinzip des LSV beruht auf der Laser-Doppler-Vibrometrie, bei der ausgenutzt wird, dass sich die Frequenz und Phase eines einfallenden Lichtstrahls ändert, wenn dieser an einem bewegten Objekt gestreut wird (Dopplereffekt). Aus der Interferenz von ausgesandtem und zurückgestreutem Lichtstrahl kann die Oberflächenschnelle und Auslenkung des Messobjektes berechnet werden. [Pol]

Wie bei der Anregung der Struktur ist auch bei der Wahl der Messpunkte darauf zu

achten, dass alle im definierten Frequenzbereich auftretenden Moden abgedeckt werden. Es wird dasselbe Netz der 402 Messpunkte wie in der Voruntersuchung verwendet. Da im Rahmen der Voruntersuchung [Alg25] alle relevanten Moden im betrachteten Frequenzbereich bestimmt werden können, ist davon auszugehen, dass die Diskretisierung auch in diesem Fall ausreichend genau ist, um alle relevanten Moden des Seitenwandpaneels detektieren zu können.

Für ein Model-Updating muss die Vergleichbarkeit der experimentellen Ergebnisse mit den Simulationsergebnissen sichergestellt werden. Während der Messung wird davon ausgegangen, dass es sich um eine ebene Struktur handelt, die an allen Messpunkten denselben Abstand zum LSV verfügt. Die Krümmung wird folglich in der Messung vernachlässigt, obwohl die reale Struktur leicht gekrümmt ist. Das CAD-Modell des Seitenwandpaneels, das in der Simulation verwendet wird, ist auf Grundlage eines 3D Scans erstellt worden. Die reale Krümmung des Paneels wird in der Simulation folglich abgebildet. Um die Vergleichbarkeit zwischen Experiment und Simulation herzustellen, muss eine Anpassung des Netzes der Messpunkte an die reale Struktur vorgenommen werden. Diese Anpassung hat keinen Einfluss auf die Messergebnisse und dient ausschließlich der Vergleichbarkeit zwischen Simulations- und experimentell bestimmten Ergebnissen. Die Anpassung erfolgt unter Verwendung vorher definierter Referenzpunkte, deren Position auf dem Seitenwandpaneel durch den 3D Scan der Geometrie genau bekannt und auf der Oberfläche markiert sind (siehe Abbildung 3.1).

Zu Beginn der Messung wird die Position der Messpunkte, die an den Orten der Referenzpunkte liegen, an die tatsächliche Position der Struktur angepasst. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Anpassung des Netzes der Messpunkte an die reale Kontur des Seitenwandpaneels durchgeführt werden kann. Das für die Messung verwendete, an die reale Kontur angepasste Netz der Messpunkte sowie die Positionen der Referenzpunkte können Abbildung 3.5 entnommen werden.

3.2.4 Bestimmung der Modalparameter

Wie in 3.2.3 beschrieben, wird mit Hilfe des LSV an den 402 definierten Messpunkten die Oberflächenschnelle, die Geschwindigkeit, mit der die Oberfläche des Paneels schwingt, gemessen. Unter Verwendung der am jeweiligen Anregungspunkt gemessenen Kraft als Referenzsignal und der gemessenen Systemantwort wird, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, die FRF berechnet. Da vier Messungen mit verschiedenen Anregungspunkten durchgeführt werden, ist das Ergebnis eine Mobilitätsmatrix mit 4 Eingängen und 402 Ausgängen.

Die Koordinaten der Messpunkte, das Netz, das die Messpunkte verbindet, und die berechneten FRFs werden im universal file format (uff) gespeichert. Dieses Dateiformat ist mit der Software XModal III des Structural Dynamics Research Laboratory der University of Cincinnati kompatibel. Diese Software wird zur Bestimmung der Modalparameter verwendet. Der Frequenzbereich, in dem alle Moden bestimmt werden, wird wie in den Voruntersuchungen zu 8 bis 200 Hz gewählt.

Um die Modalanalyse mit der Software XModal III durchführen zu können, muss die FRF in Form der dynamischen Nachgiebigkeit (receptance) $n_{dyn}(\omega)$ vorliegen. Diese Form der FRF setzt die Auslenkung der Oberfläche an den Messpunkten ξ ins Verhältnis zu der Anregungskraft F und ist nach Gleichung 3.2 definiert ist. Dazu muss

die Admittanz $Y(\omega)$, die aus den Messungen mit Hilfe des LSV bekannt ist, gemäß Gleichung 3.3 umgerechnet werden, wobei j die imaginäre Einheit ist [KR19]. Eine Umrechnung ist in der vom Hersteller des LSV Polytec® GmbH bereitgestellten Software bereits enthalten, sodass die benötigte FRF aus der Messung exportiert und für die Bestimmung der Modalparameter verwendet werden kann.

$$n_{dyn}(\omega) = \frac{\xi(\omega)}{F(\omega)}$$
 (3.2)

$$n_{dyn}(\omega) = \frac{Y(\omega)}{j\omega}$$
 (3.3)

Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, stehen zur Bestimmung der Modalparameter verschiedene Verfahren zur Verfügung. Die Wahl des angewendeten Verfahrens wird durch das System selbst bestimmt. Da es sich bei der experimentell bestimmten FRF um eine Multireferenz-FRF handelt, wird zur Bestimmung der Moden eine Indikatorfunktion, die complex mode indicator function (CMIF), verwendet. Diese ist in XModal III vollständig implementiert. Die CMIF basiert auf der in Gleichung 3.4 gezeigten Singulärwertzerlegung der FRF $\underline{\underline{H}}(\omega)$. Bei der Matrix $\underline{\underline{\Sigma}}(\omega)$ handelt es sich um eine rechteckige Diagonalmatrix, die die Singulärwerte σ_i enthält. In der unitären Matrix $\underline{\underline{U}}(\omega)$ sind in den Spalten die linksseitigen Singulärvektoren $\underline{u}_i(\omega)$ enthalten. Die Singulärvektoren $\underline{u}_i(\omega)$ entsprechen den unskalierten Eigenformen. Durch Anwendung der CMIF können folglich sowohl Eigenfrequenzen als auch Eigenformen bestimmt werden. [Shi+88]

$$\underline{H}(\omega) = \underline{U}(\omega)\underline{\Sigma}(\omega)\underline{V}(\omega)^{H}$$
(3.4)

$$CMIF_i = \sigma_i^2$$
 (3.5)

Die Matrizen der Singulärwertzerlegung müssen für jede Frequenz bestimmt und die Singulärwerte σ_i nach Größe geordnet werden, um dann die in Gleichung 3.5 dargestellte CMIF zu berechnen. Mit Hilfe einer automatischen Peakidentifikation wird die Existenz von Moden festgestellt. Dabei entsprechen die Frequenzen, bei denen die Peaks detektiert werden, den gedämpften Eigenfrequenzen des Systems. Unter Verwendung der unskalierten Eigenvektoren kann die sogenannte erweiterte FRF für jede Mode berechnet werden. Die erweiterte FRF enthält für jede Mode eine von allen anderen Moden entkoppelte FRF, sodass die Modalparameter, wie die Modaldämpfung, mit Hilfe eines SDOF Verfahrens bestimmt werden können. [Shi+88]

Alle beschriebenen Schritte zur Bestimmung der Modalparameter mit Hilfe der CMIF sind in der Software XModal III vollständig implementiert und werden zur Durchführung der Modalanalyse verwendet.

3.3 Ergebnisse der experimentellen Modalanalyse des Seitenwandpaneels mit montierten Fenstereinsätzen

In Abbildung 3.6 sind $CMIF_1$ bis $CMIF_4$ dargestellt, die mit der Software XModal III für die aus den Messungen exportierten FRFs bestimmt werden können.

Dabei kennzeichnen die vertikalen, farblich hervorgehobenen Linien die Frequenzen, bei denen Moden mit Hilfe der automatischen Modenidentifikation detektiert werden. Diese Frequenzen entsprechen den Eigenfrequenzen des Systems. Alle bestimmten Moden und ihre zugehörigen modalen Dämpfungsfaktoren δ sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst dargestellt.

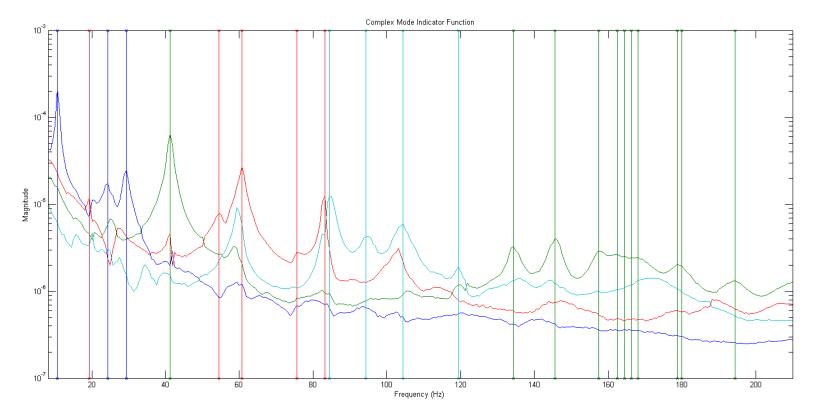
Bei Betrachtung der ermittelten Eigenfrequenzen und modalen Dämpfungsfaktoren (siehe Tabelle 3.1) fällt auf, dass die Eigenfrequenzen 178,6 Hz und 178,8 Hz sehr nah beieinander liegen und fast identische modale Dämpfungsfaktoren aufweisen. Um die Ähnlichkeit der bestimmten Moden zu vergleichen, mögliche Kopplungen zwischen den Moden zu identifizieren und auszuschließen, dass mit der experimentellen Modalanalyse dieselbe Mode mehrfach detektiert wird, wird die Ähnlichkeit aller experimentell bestimmten Moden miteinander bestimmt. Dazu wird das nachfolgend beschriebene Modal Assurance Criterion (MAC)-Kriterium verwendet. [MMT12]

Tabelle 3.1 Ungedämpfte Eigenfrequenzen $f_{\rm gemessen}$ und modale Dämpfungsfaktoren δ der experimentell bestimmten Moden

Modennr.	$f_{\sf gemessen}$ in Hz	δ in %
1	10,8	2,58
2	22,2	0,72
3	24,4	7,81
4	29,0	3,44
5	41,2	1,26
6	58,8	4,61
7	60,6	1,54
8	72,8	0,72
9	83,0	0,72
10	84,7	1,11
11	94,8	2,14
12	104,2	1,8

Modennr.	$f_{\sf gemessen}$ in Hz	δ in %
13	119,1	1,42
14	133,9	1,21
15	144,8	0,96
16	158,9	2,47
17	160,2	4,14
18	163,5	4,43
19	165,7	3,23
20	166,8	2,94
21	178,6	2,19
22	178,8	2,21
23	193,4	2,85

Das MAC-Kriterium ist ein objektives Kriterium zur Bewertung der Ähnlichkeit von Moden im Allgemeinen. Es wird gemäß Gleichung 3.6 als normiertes Skalarprodukt der beiden Vektorsets $\{\underline{\varphi}_A\}$ und $\{\underline{\varphi}_X\}$ berechnet. Mit dem in Gleichung 3.6 dargestellten Kriterium wird die $\{\underline{\varphi}_A\}_r$ -te Mode aus dem Vektorset $\{\underline{\varphi}_A\}$ mit der $\{\underline{\varphi}_X\}_q$ -ten Mode aus dem Vektorset $\{\underline{\varphi}_X\}_q$ -ten Mode aus dem Vektorset $\{\underline{\varphi}_X\}_q$ -verglichen. Der MAC-Wert gibt Auskunft über die Übereinstimmung der verglichenen Moden. Liegt der MAC-Wert bei o, so ist keine Übereinstimmung vorhanden, während ein MAC-Wert gleich oder nahe 1 eine vollständige Übereinstimmung der verglichenen Moden zeigt [Allo3] [MMT12]. Für alle folgenden Betrachtungen wird ab einem MAC-Wert von 0,7, entspricht einer Übereinstimmung von 70 %, von einer hohen Übereinstimmung der verglichenen Moden ausgegangen. Dieser Wert orientiert sich an der durchgeführten Voruntersuchung und entspricht zudem einer Empfehlung von Ewins [Alg25] [Ewioo]. Zur leichteren Identifikation ist dieser Wert in der Farblegende allen dargestellte MAC-Matrizen markiert.



 $\textbf{Abbildung 3.6} \ \mathsf{CMIF}_1 \ (\mathsf{blau}), \ \mathsf{CMIF}_2 \ (\mathsf{rot}), \ \mathsf{CMIF}_3 \ (\mathsf{gr\"{u}n}) \ \mathsf{und} \ \mathsf{CMIF}_4 \ (\mathsf{hellblau}) \ \mathsf{sowie} \ \mathsf{die} \ \mathsf{durch} \ \mathit{XModal III} \ \mathsf{automatisch} \ \mathsf{identifizierten} \ \mathsf{Moden} \ \mathsf{Moden} \ \mathsf{Model} \ \mathsf$

$$MAC(r,q) = \frac{|\{\underline{\varphi}_A\}_r^T \{\underline{\varphi}_X\}_q|^2}{(\{\underline{\varphi}_A\}_r^T \{\underline{\varphi}_A\}_r)(\{\underline{\varphi}_X\}_r^T \{\underline{\varphi}_X\}_r)}$$
(3.6)

Zur Berechnung des MAC-Wertes, der dem Vergleich der Ähnlichkeit aller experimentell bestimmten Moden dient, wird $\{\varphi_A\} = \{\varphi_X\}$ gesetzt. Für die Modennummern $\{\underline{\varphi}_A\}_r$ und $\{\underline{\varphi}_X\}_q$ gilt $r,q \in [1,23]$, weil 23 Moden (46 komplex-konjugierte Paare) aus der FRF bestimmt werden können (siehe Tabelle 3.1). Das Ergebnis der Berechnung des MAC-Kriteriums zur Bestimmung der Ähnlichkeit aller Moden untereinander ist in Abbildung 3.7 in Form einer MAC-Matrix dargestellt. Diese MAC-Matrix wird allgemein als Auto-MAC-Matrix bezeichnet [MMT12].

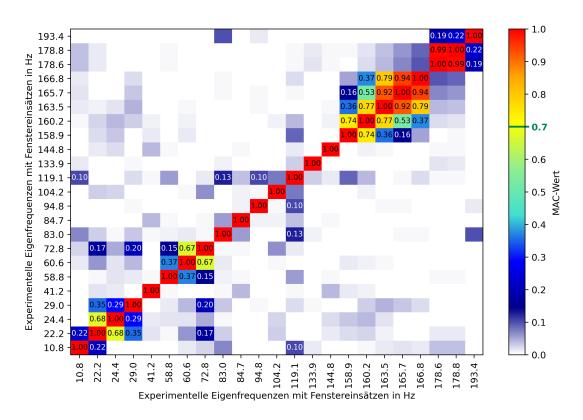


Abbildung 3.7 Auto-MAC-Matrix: Ähnlichkeit experimentell bestimmten Moden des Seitenwandpaneels mit montierten Fenstereinsätzen

Gemäß der Definition des MAC-Kriteriums sind alle Einträge auf der Hauptdiagonalen der MAC-Matrix 1, da diese Einträge den Vergleich der jeweiligen Mode mit sich selbst repräsentieren [MMT12]. Daher sind für die Bewertung der Ähnlichkeit verschiedener Moden die Einträge auf den Nebendiagonalen von Interesse, da diese den Vergleich der jeweiligen Mode mit allen anderen zeigen. Bei Betrachtung der MAC-Matrix fällt auf, dass zwischen den Moden mit Eigenfrequenzen 22,2 Hz und 24,4 Hz eine erhöhte Ähnlichkeit auftritt (MAC-Wert: 0,68). Dies gilt ebenso für die Moden bei 60,6 Hz und 72,8 Hz (MAC-Wert: 0,67) sowie alle auftretenden Moden im Frequenzbereich von 158,9 Hz bis 166,8 Hz. In den Frequenzbereichen erhöhter Ähnlichkeit zwischen den Moden sind die bestimmten modalen Dämpfungsfaktoren zudem erhöht (siehe 3.1).

Besonders auffällig ist die sehr hohe Ähnlichkeit der Eigenformen bei den Frequenzen 178,6 Hz und 178,8 Hz, die zudem ähnliche Dämpfungsfaktoren (siehe Tabelle 3.1)

aufweisen. Die aus dieser Beobachtung resultierende Hypothese, dass es sich bei den Moden, die bei diesen beiden Frequenzen auftreten, um dieselben Eigenformen handelt, wird im Folgenden überprüft.

Dazu werden die Schwingformen beider Moden visuell verglichen. Dieser Vergleich ist in Abbildung 3.8 zu sehen und bestätigt die getroffene Hypothese. Wird die Auslenkung von der Mode bei 178,6 Hz mit dem Faktor 0,993 multipliziert, so stimmen zudem die Schwingungsamplituden beider Moden überein. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die bestimmten Moden dieselbe Schwingungsform darstellen [MMT12]. Im Folgenden werden diese beiden Moden daher als eine identische behandelt.

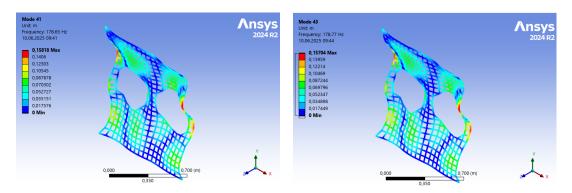


Abbildung 3.8 Visueller Vergleich der Moden bei 178,65 Hz (links) und bei 178,77 Hz (rechts)

3.4 Vergleich des Schwingungsverhaltens des Seitenwandpaneels ohne und mit montierten Fenstereinsätzen

Um die Auswirkung der zusätzlich montierten Fenstereinsätze auf das Schwingungsverhalten bewerten zu können, wird ein Vergleich des Schwingungsverhaltens des Seitenwandpaneels mit und ohne Fenstereinsätze durchgeführt. Das Schwingungsverhalten ohne die Fenstereinsätze ist aus den Voruntersuchungen von Algermissen bekannt [Alg25]. Zur Erstellung des Vergleichs wird ebenfalls das MAC-Kriterium benutzt und eine entsprechende MAC-Matrix erzeugt. Die MAC-Matrix vergleicht die Ähnlichkeit der experimentell bestimmten Moden mit und ohne Fenstereinsätze und ist in Abbildung 3.9 dargestellt.

Wie in dieser Abbildung zu erkennen, gibt es einige Moden, die durch die Montage des Fensters wenig verändert werden. Diese sind durch hohe MAC-Wert zwischen 0,9 und 1 auf der Hauptdiagonalen gekennzeichnet. Die Frequenzen bei denen die Moden kaum durch die Fenstereinsätze beeinflusst werden, sind die Moden mit Eigenfrequenzen 10,8 Hz, 41,2 Hz, 84,7 Hz, 94,8 Hz und 193,4 Hz. Alle übrigen Moden werden durch die Fenstereinsätze verändert. Die Mode mit der Frequenz 119,1 Hz ist bei Untersuchung des Paneels ohne Fenstereinsätze nicht zu beobachten. Umgekehrt kann die Mode mit der Frequenz 124,4 Hz nur in der Messung ohne Fenstereinsätze beobachtet werden.

Zudem ist auffällig, dass nicht jeder Mode des Seitenwandpaneels ohne Fenstereinsätze genau eine Mode mit montierten Fenstereinsätzen zugeordnet werden kann. Dies

kann auf die hohe Ähnlichkeit einiger benachbarter Moden des Paneels mit Fenstereinsätzen, wie in Abbildung 3.7 beobachtet, zurückzuführen sein.

Bei Betrachtung der modalen Dämpfungsfaktoren in Tabelle 3.1 zeigt sich ein deutlicher Anstieg durch die Montage der Fenstereinsätze, verglichen mit den in Tabelle A.1 dargestellten Ergebnissen der Voruntersuchung. Dies ist vermutlich auf die zusätzlichen Verbindungselemente im System zurückzuführen. An den Verbindungselementen wird Energie durch Reibung dissipiert. Für Schraubenverbindungen ist die Dämpfung von der Vorspannkraft abhängig [Zam+13]. Die Klettverschlüsse an der Oberseite der Fenstereinsätze weisen unabhängig von der Montage hohe Dämpfung (Dämpfungsfaktor 0,3) auf [Kwo+22].

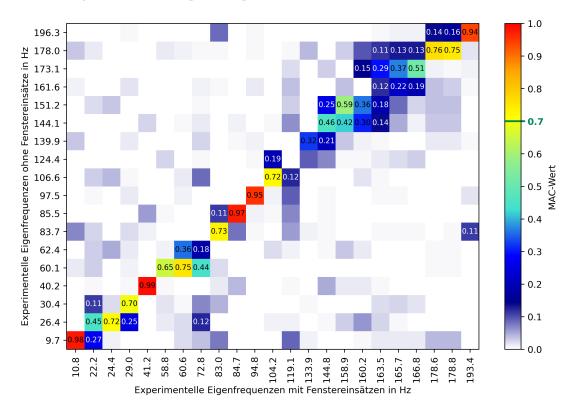


Abbildung 3.9 MAC-Matrix: Vergleich des Schwingungsverhaltens des Seitenwandpaneels mit und ohne montierte Fenster

Zwischenergebnis:

Die Fenstereinsätze verändern das Schwingungsverhalten des Seitenwandpaneels maßgeblich. Es ist notwendig, das Simulationsmodell um die Fenstereinsätze und entsprechende Verbindungselemente zu ergänzen, um das Schwingungsverhalten des Seitenwandpaneels mit montierten Fenstereinsätzen realistisch abbilden zu können. Außerdem ist zu prüfen, ob die Notwendigkeit besteht, die festgestellte zusätzliche Dämpfung in der Simulation zu berücksichtigen.

3.5 Experimentelle Modalanalyse der Fenstereinsätze

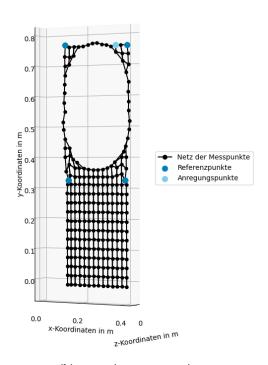
Die durchgeführten Untersuchungen zeigen die Notwendigkeit der Durchführung einer separaten experimentellen Modalanalyse für die Fenstereinsätze im demontier-

ten Zustand. Der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung und das Vorgehen zur Schätzung der Modalparameter sind identisch zu der Modalanalyse des Seitenwandpaneels mit Fenstereinsätzen. Im Folgenden werden daher lediglich die Unterschiede beschrieben. Alle übrigen Informationen sind Abschnitt 3.2 zu entnehmen.

Die Struktur wird mit Hilfe der elastischen Bänder freischwebend an dem Aluminium-rahmen befestigt. Da sich die Geometrie der Fenstereinsätze von der des Seitenwandpaneels unterscheidet, muss ein neues Netz für die Messpunkte angelegt werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Messpunkte ausschließlich auf der glatten Oberfläche und nicht in Nuten auf der Oberfläche (siehe Abbildung 3.2b) liegen, um zuverlässige Messergebnisse sicherzustellen. Zur anschließenden Anpassung dieses Netzes an das CAD-Modell müssen auf dem Fenstereinsatz Referenzpunkte definiert und ihre reale Position relativ zu der Fenstergeometrie bestimmt werden. Zudem müssen Messpunkte, die sich an den Positionen der Referenzpunkte befinden, definiert werden. In Abbildung 3.10a ist der freischwebend montierte Fenstereinsatz dargestellt, während in Abbildung 3.10b das verwendete Netz der Messpunkte abgebildet ist.



(a) Fenstereinsatz freischwebend montiert



(b) Netz der Messpunkte

Abbildung 3.10 Fenstereinsatz unter Testbedingungen sowie das verwendete Netz der Messpunkte mit Darstellung der Referenz- und Anregungspunkte

Durch die geringe Masse des Fensters und die elastische Aufhängung ist die Änderung des Anregungspunktes ohne Veränderung der Position des Fenstereinsatzes nicht möglich. Eine veränderte Position des Fenstereinsatzes schränkt die Vergleichbarkeit der Messergebnisse ein und schließt die Verwendung der CMIF für die verschiedenen Datensätze zur Bestimmung der Modalparameter aus. Aus diesem Grund wird zur Messung der FRF ein einzelner Anregungspunkt verwendet. Dieser wird auf der waagerechten Fläche des Fenstereinsatzes platziert. Es wird davon ausgegangen, dass die Deformation des Fenstereinsatzes in diesem Bereich durch die deutlich höhere Steifigkeit sehr viel geringer ist als im Bereich der GFK-Platte. Auf diese Weise

kann die Anregung in einem relevanten Schwingungsknoten ausgeschlossen werden. Die Bestimmung der Modalparameter erfolgt im Anschluss unter Verwendung der CMIF und der automatischen Peakidentifikation.

Das Ergebnis der CMIF zeigt, dass im Frequenzbereich von 8 Hz bis 200 Hz 68 Moden bestimmt werden können. Viele dieser Moden weisen sehr hohe Dämpfungsfaktoren auf. Da die Simulation des Fensters, wie in der Voruntersuchung, ohne Berücksichtigung der Dämpfung vorgenommen wird, werden aus den 68 Moden die Moden mit geringen Dämpfungsfaktoren ausgewählt. Die bestimmten Moden und die zugehörigen Dämpfungsfaktoren sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 3.2 Ungedämpfte Eigenfrequenzen $f_{\rm gemessen}$ und modale Dämpfungsfaktoren δ der bestimmten Moden des Fenstereinsatzes

Modennr.	$f_{\sf gemessen}$ in Hz	δ in %
1	2,5	-0,23
2	6,2	1,4
3	15,6	1,06
4	30,2	0,88
5	46,2	2,73
6	58,2	1,8
7	58,3	1,68
8	63,5	1,9
9	65	1,75
10	81,3	0,4
11	91,6	2,38
12	108,1	0,11
13	126,1	0,5

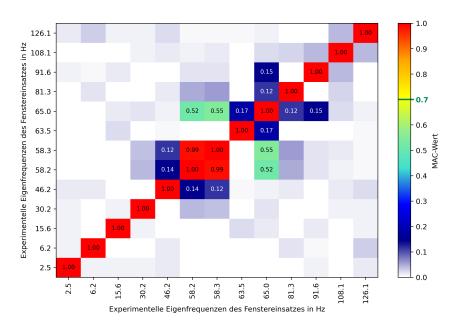


Abbildung 3.11 Auto-MAC-Matrix: Ähnlichkeit der experimentell bestimmten Model des Fenstereinsatzes (ausschließlich Moden mit geringer Dämpfung)

Die Betrachtung der Schwingformen der ausgewählten Moden zeigt, dass jede Schwingform präzise aufgezeichnet wird. Es ist daher davon auszugehen, dass die für das Netz der Messpunkte gewählte Diskretisierung ausreichend genau ist.

Zur Bewertung der Ähnlichkeit der bestimmten Moden wird im Anschluss die zugehörige Auto-MAC-Matrix berechnet (siehe Abbildung 3.11). Diese zeigt, dass die Moden bei 58,2 Hz und bei 58,3 Hz sehr ähnlich sind. Zusammen mit der nahezu identischen Eigenfrequenz ist davon auszugehen, dass es sich in diesem Fall um dieselbe Mode handelt. Diese Mode weist zudem Ähnlichkeit mit der Mode bei 65,0 Hz auf. Die übrigen Nebendiagonaleinträge zeigen geringe MAC-Werte auf, sodass die berechneten Ähnlichkeiten zwischen diesen Moden als vernachlässigbar angesehen wird. Diese Auto-MAC-Matrix stellt die Grundlage für das in Abschnitt 5.9 beschriebene Model-Updating dar.

4. Methodisches Vorgehen der durchgeführten Model-Updatings

Wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, wird das Schwingungsverhalten des Seitenwandpaneels durch die Montage der Fenstereinsätze maßgeblich beeinflusst. Es besteht somit die Notwendigkeit, die Fenstereinsätze in das bestehende Simulationsmodell des Seitenwandpaneels einzubinden, um das reale Schwingungsverhalten des Systems abbilden zu können. Zur Einbindung der Fenstereinsätze werden im Allgemeinen detaillierte Informationen über die Geometrie der Fenstereinsätze, die verwendeten Materialien und die Verbindungselemente zwischen den Baugruppenkomponenten benötigt. Je geringer die vorhandene Informationsdichte, desto ungenauer sind die Simulationsergebnisse und desto größer die Unsicherheit, mit denen sie behaftet sind [Alg25]. Im hier beschriebenen Fall sind weder die exakte Bauteilgeometrie der Fenstereinsätze noch das verwendete Material oder die Verbindungssteifigkeiten der Verbindungselemente zwischen Fenstereinsatz und Seitenwandpaneel bekannt. Es ist folglich mit den vorhandenen Informationen nicht möglich, ein realitätsgetreues Simulationsmodell mit eingefügten Fenstereinsätzen zu erstellen. Aus diesem Grund wird ein Model-Updating wie in Abschnitt 2.1 beschrieben durchgeführt. Durch das Model-Updating können die unbekannten Simulationsparameter so bestimmt werden, dass das Simulationsmodell das experimentell bestimmte Schwingungsverhalten aus Abschnitt 3 abbilden kann. Im Folgenden wird der grundlegende Ablauf dieses Model-Updatings dargestellt und die einzelnen Schritte näher erläutert.

4.1 Ablauf der durchgeführten Model-Updatings

Abbildung 4.1 zeigt den detaillierten Ablauf der durchgeführten Model-Updatings. Der erste Schritt besteht in dem Modellaufbau und der Definition der unbekannten und damit in der Optimierung anzupassenden Simulationsparameter. Für jeden dieser Simulationsparameter muss der zulässige Wertebereich festgelegt werden. Anschließend erfolgt die Definition der Optimierungskriterien, auf deren Basis das Model-Updating durchgeführt wird.

Damit durch das Model-Updating eine Anpassung der Simulationsergebnisse an das reale Schwingungsverhalten vorgenommen werden kann, muss das reale Schwingungsverhalten experimentell bestimmt werden. Die experimentellen Ergebnisse müssen anschließend in die zu definierenden Optimierungskriterien einbezogen werden. Die Optimierungskriterien müssen eine Aussage über die Genauigkeit, mit der die Simulationsergebnisse das reale Schwingungsverhalten abbildet, ermöglichen.

Um in der Optimierung lediglich die für die Problemstellung relevanten Parameter zu verwenden und damit den Rechenaufwand der Optimierung zu begrenzen, erfolgt zunächst eine Sensitivitätsanalyse. Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse zeigt den Einfluss der gewählten variablen Parameter auf die Optimierungskriterien und damit auf

die Simulationsergebnisse. Hat ein Parameter keinen oder einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Optimierungskriterien, so wird dieser im weiteren Verlauf der Mehrzieloptimierung als konstant angenommen und nicht angepasst. Es wird angenommen, dass der initiale Wert bereits hinreichend exakt ist.

Mit Hilfe der Datenbasis, die im Rahmen der Sensitivitätsanalyse berechnet wird, wird außerdem ein mathematisches Ersatzmodell erstellt. Dieses Ersatzmodell beinhaltet alle anzupassenden Parameter und bildet ihre Auswirkung auf die Optimierungskriterien ab.

Die Optimierung erfolgt nicht durch Optimierung des FE-Modells, sondern auf Basis des erstellten Ersatzmodells. Auf diese Weise lässt sich der Rechenaufwand der eigentlichen Optimierung deutlich reduzieren. Wird in der Optimierung die Konvergenz der Optimierungskriterien oder die maximale Anzahl der Evaluationen erreicht, so endet die Optimierung.

Im Anschluss erfolgt die Validierung der Optimierungsergebnisse unter Verwendung des FE-Modells. Dazu wird für die besten Designs (Parameterkombinationen), die mit der Optimierung erreicht werden können, das FE-Modell gelöst. Der Vergleich der durch die Optimierung vorhergesagten Werte, den die Optimierungskriterien annehmen, und der FE-Simulationsergebnisse zeigt die Genauigkeit der Vorhersagen. Die Validierung stellt den Abschluss der Mehrzieloptimierung dar. Nach Abschluss der Optimierung wird die beste, validierte Parameterkombination (Design) in das FE-Modell eingesetzt. Damit ist das Model-Updating abgeschlossen. Im Folgenden werden alle durchgeführten Schritte detailliert erläutert.

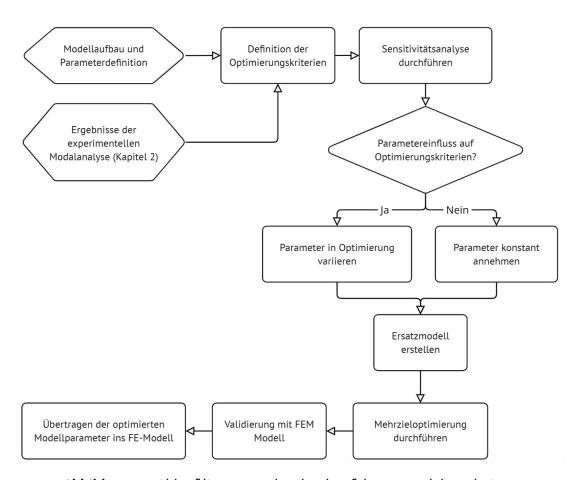


Abbildung 4.1 Ablaufdiagramm des durchgeführten Model-Updatings

4.1.1 Modellaufbau und Parameterdefinition

Für die experimentelle Bestimmung des Schwingungsverhaltens des Seitenwandpaneels mit montierten Fenstereinsätzen wird die in Abschnitt 3.2 beschriebene Modalanalyse verwendet. Um mit Hilfe der Simulation eine vergleichbare Beschreibung des Schwingungsverhaltens der Struktur zu berechnen und damit die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, wird eine numerische Modalanalyse durchgeführt. Der hierfür nötige Modellaufbau des FE-Modells in Ansys Workbench 2024 R2 wird im Folgenden dargestellt. Grundlage des Modellaufbaus ist das FE-Modell des Seitenwandpaneels, das im Rahmen der durchgeführten Voruntersuchungen 2.2 erstellt wurde. Die Geometrie in Form eines CAD-Modells, Materialkennwerte und Lagenaufbauten sowie die gewählten freien Randbedingungen des Paneels werden übernommen. Der vollständige Modellaufbau des FE-Modells in Ansys Workbench 2024 R2 kann Abbildung 4.2 entnommen werden.

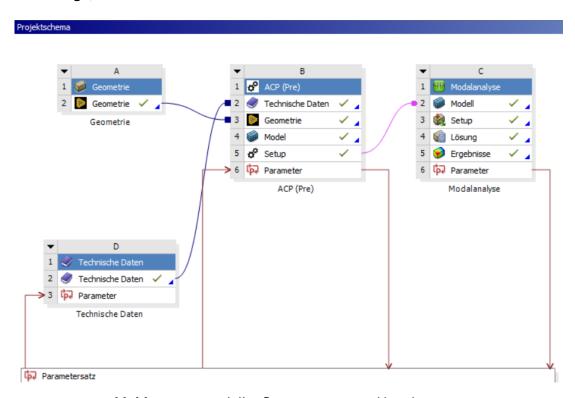


Abbildung 4.2 Modellaufbau in Ansys Workbench 2024 R2

Die Geometrie der verwendeten Fenstereinsätze und die nötigen Baugruppendefinitionen werden mit Hilfe von Catia V5-6R2024 erstellt. Im Anschluss wird das erzeugte CAD-Modell der Baugruppe in Form einer STEP-Datei in den Baustein A des Ansys Workbench 2024 R2 Modells eingelesen. Zur Modellierung und Berechnung wird das SI-Einheitensystem verwendet. Die Materialdefinition erfolgt in dem Baustein D "Technische Daten". In diesem Baustein werden auch unbekannte und damit während der Sensitivitätsanalyse variable Parameter in der Materialdefinition festgelegt. Daher ist der Baustein D mit dem Parametersatz verknüpft. Mit Hilfe des Bausteins B wird das FE-Modell vollständig definiert. Dazu werden die nötigen Informationen aus den Bausteinen A und D übergeben, die Vernetzung durchgeführt und Verbindungselemente der verschiedenen Baugruppenkomponenten in der Baugruppe definiert. Die Randbedingungen des Gesamtsystems werden in allen Berechnungen als frei de-

finiert und nicht verändert. Alle weiteren, in der Sensitivitätsanalyse anzupassenden Parameter müssen ebenfalls im Baustein B definiert werden. Neben der Modelldefinition wird das Ansys Composite PrepPost (ACP) Setup verwendet, um den Lagenaufbau des Seitenwandpaneels und den Materialaufbau der Fenstereinsätze zu definieren. Die Masse des Seitenwandpaneels sowie die der Fenstereinsätze wird nach Abschluss des Ansys Composite PrepPost (ACP) Setups an den Parametersatz übergeben, da diese für die spätere Definition der Optimierungskriterien (siehe 4.1.2) benötigt werden. Das vollständige Modell wird im Anschluss an Baustein C, die eigentliche numerische Modalanalyse, übergeben. Die Sensitivitätsanalyse funktioniert nur dann fehlerfrei, wenn die Parametervariation vor dem Lösungsbaustein, in diesem Fall vor der Modalanalyse, abgeschlossen ist. Aus diesem Grund müssen alle variablen Parameter in dem an Baustein C übergebenen Modell bereits enthalten sein.

4.1.2 Definition der Optimierungskriterien

Zur Durchführung eines Model-Updatings durch Mehrzieloptimierung müssen passende Optimierungskriterien definiert werden. In diesem Abschnitt werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Kriterien dargestellt.

Das Ziel der Optimierung ist, die Ergebnisse der numerischen Modalanalyse an die in Kapitel 3 experimentell bestimmten Ergebnisse anzupassen. Auf diese Weise soll eine möglichst realistische Berechnung des Schwingungsverhaltens erreicht werden. Daher wird nach Berechnung der numerischen Modalanalyse im FE-Modell ein Vergleich der numerisch berechneten mit den vorher experimentell bestimmten Eigenfrequenzen und Moden erstellt. Für diesen Zweck steht die Funktion "MAC Calculator" in der numerischen Modalanalyse zur Verfügung. Die experimentell bestimmten Moden können in Form einer uff-Datei in die numerische Simulation eingelesen werden. Um die Vergleichbarkeit der experimentell bestimmten Moden mit dem in der Simulation verwendeten CAD-Modell sicherzustellen, muss vorher die während der Messung aufgezeichnete Position der Messpunkte an das CAD-Modell des Seitenwandpaneels angepasst werden. Dazu wird ein Skript in Matlab und die in Abbildung 3.5 gekennzeichneten Referenzpunkte verwendet, deren exakte Postion auf der Oberfläche des Seitenwandpaneels bekannt ist. Zudem muss in den Einstellungen des "MAC Calculators" durch Selektion vorgegeben werden, welche Oberflächenschwingungen der Simulationsergebnisse mit denen in der eingelesenen Datei verglichen werden sollen. Da experimentell lediglich die Schwingung des Seitenwandpaneels und nicht die Fensterschwingungen aufgezeichnet werden (siehe Abschnitt 3.2.3), kann für den Vergleich ausschließlich die Fläche des Paneels verwendet werden. Im Anschluss an die Berechnung der numerischen Modalanalyse wird mit Hilfe der Funktion das MAC-Kriterium (siehe Gleichung 3.6) für jede mögliche Modenkombination aus dem numerischen Modell und dem experimentellen Datensatz bestimmt. Im Anschluss an die Berechnung des MAC-Kriteriums erfolgt ein automatisches "Mode-Pairing". Auf diese Weise können den experimentell bestimmten Moden die Moden aus der Simulation zugeordnet werden. Die Zuordnung geschieht einerseits auf Basis der berechneten MAC-Werte und andererseits auf Basis der Frequenzabweichungen der jeweils verglichenen Moden. Anschließend wird die MAC-Matrix so angepasst, dass sie ausschließlich alle zugeordneten Moden-Paare beinhaltet. In den Einstellungen des Mode-Pairings müssen für die Zuordnung zulässige Grenzen definiert werden. Einerseits wird eine maximale absolute Frequenzabweichung von 20 Hz definiert, andererseits eine maximale relative Frequenzabweichung von 10 %. Erfüllt eine Mode in der Simulation diese Kriterien nicht, so wird sie keiner experimentell bestimmten zugeordnet. [ANS24a]

Nach Zuordnung der simulierten zu den experimentell bestimmten Moden erfolgt die Bewertung der Genauigkeit mit der das reale Schwingungsverhalten abgebildet werden kann. Dazu werden beiden die folgenden Kriterien verwendet:

- 1. Die Bewertung der Genauigkeit mit der die Eigenformen durch die Simulation abgebildet werden können unter Verwendung der MAC-Matrix $\underline{\underline{M}}$ nach dem "Mode-Pairing"
- 2. Die Genauigkeit der Übereinstimmung der Eigenfrequenzen aus der Simulation $f_{sim,n}$ und dem Experiment $f_{exp,n}$ nach dem Mode-Pairing

Zur Bewertung der Genauigkeit der Eigenformen wird der Abstand, den jeder Eintrag auf der Hauptdiagonalen der MAC-Matrix zu dem Idealwert 1 hat, berechnet. Alle Abweichungen werden anschließend summiert.

Die Bewertung der Genauigkeit der Eigenfrequenzen erfolgt durch gewichtete Berechnung der Frequenzabweichungen und anschließende Summation. Beide Kriterien werden zu dem in Gleichung 4.1 gezeigten Optimierungskriterium kombiniert, wobei α der Gewichtungsfaktor beider Anteile ist. Im Rahmen dieser Arbeit wird $\alpha=$ 0,5 gesetzt. Zu beachten ist, dass der Wert, den dieses Kriterium annehmen kann, von der Anzahl der in der MAC-Matrix vorhandenen Moden abhängt. [ANS24a]

Ziel der Optimierung ist die Minimierung des C_{12} -Kriteriums, um eine möglichst gute Übereinstimmung der simulativ berechneten Moden mit dem realen Strukturverhalten zu erreichen. Aus diesem Grund wird der Wert des C_{12} -Kriteriums als Ausgabeparameter an den Parametersatz übergeben, sodass er in der Sensitivitätsanalyse und anschließenden Mehrzieloptimierung verwendet werden kann.

$$C_{12} = (1 - \alpha) \sum_{n=1}^{N} |M_{nn} - 1| + \alpha \sum_{n=1}^{N} \frac{|f_{sim,n} - f_{exp,n}|}{|f_{exp,n}|}$$
(4.1)

Um eine realitätsnahe Modellierung der Fenstereinsätze sicherzustellen, wird das nachfolgend vorgestellte dritte Optimierungskriterium gewählt:

3. Abweichung der Fenstermasse in der Simulation von der realen Fenstermasse

Die Masse der Fenstereinsätze beträgt im realen System für den montierten Zustand 0,84 kg. Sind die Fenstereinsätze demontiert, so beträgt ihre Masse 0,818 kg. Zur Bestimmung der Abweichung der Masse der modellierten Fenstereinsätze $m_{fenster,sim}$ von dem realen System wird die Methode der kleinsten Fehlerquadrate verwendet [Steo6]. Das zugehörige Kriterium C_3 ist in Gleichung 4.2 definiert. Wird der demontierte Zustand betrachtet, muss das Kriterium an die Masse von 0,818 kg angepasst werden. Das C_3 -Kriterium wird in der Optimierung ebenfalls minimiert, um eine möglichst gute Übereinstimmung der Fenstermasse in der Simulation mit der Realität zu erreichen.

$$C_3 = (m_{fenster,sim} - 0.84)^2$$
 (4.2)

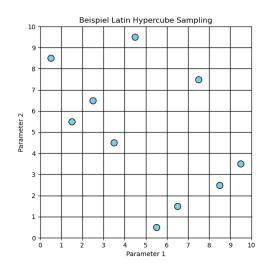


Abbildung 4.3 Beispiel für ein Latin-Hypercube-Sampling in Anlehnung an [ANS24b]

4.1.3 Sensitivitätsanalyse und Bestimmung des Ersatzmodells

Sowohl die Sensitivitätsanalyse als auch die nachfolgende Mehrzieloptimierung wird mit Hilfe der Software Ansys optiSlang 2024 R2 durchgeführt. Ansys Workbench 2024 R2 verfügt über eine direkte Integration von Ansys optiSlang 2024 R2, sodass problemlos auf alle vorher definierten Ein- und Ausgabeparameter des Simulationsmodells zurückgegriffen werden kann.

Ziel der Sensitivitätsanalyse ist die Quantifizierung des Einflusses eines jeden Eingabeparameters auf die Optimierungskriterien. Dazu werden alle Eingabeparameter systematisch variiert und die Werte, die die Optimierungskriterien für die jeweilige Parameterkombination annehmen, berechnet. Diese Datenbasis wird anschließend zur Berechnung der Sensitivitätswerte der einzelnen Parameter verwendet.

Zur Bestimmung der Sensitivitätswerte der einzelnen Parameter stehen verschiedene Algorithmen zur Verfügung. Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Durchführung der Sensitivitätsanalyse das empfohlene Verfahren Adaptive Metamodel of Optimal Prognosis (AMOP) verwendet. Bei diesem Verfahren handelt es sich um die iterative Bestimmung des Metamodel of Optimal Prognosis (MOP), eines mathematischen Ersatzmodells, bei gleichzeitiger Bestimmung des Parametereinflusses auf die verschiedenen Optimierungskriterien. Der Prozess der Bestimmung des AMOP kann Abbildung 4.4 entnommen werden. Zur Erstellung des AMOP wird zunächst eine in den Einstellungen festgelegte Anzahl Samples (Designs in der Sensitivitätsanalyse) mit Hilfe des Advanced Latin-Hypercube-Sampling (ALHS) für die erste Iteration erzeugt und das FE-Modell für die gewählten Samples gelöst. [ANS24c]

Das ALHS basiert auf dem Latin-Hypercube-Sampling (LHS) [ANS24b]. Dieses stochastische Design of Experiment (DoE) Verfahren teilt den Wertebereich eines jeden Parameters, wie in Abbildung 4.3 gezeigt, in gleichgroße, sich nicht überlappende Intervalle auf. Anschließend werden die Samples so bestimmt, dass alle Parameterintervalle eines jeden Eingabeparameters mindestens einmal verwendet werden (Samples als rote Punkte in der Abbildung 4.3 gekennzeichnet). Die in der Sensitivitätsanalyse verwendeten Werte der Parameter entsprechen dem jeweiligen Intervallmittelpunkt. Auf diese Weise wird die repräsentative Abdeckung des gesamten Parameterraumes

sichergestellt. Die Genauigkeit, mit der der Parameterraum durch diese Art DoE abgedeckt wird, hängt demnach von der Anzahl der Samples und der Größe der Bereichsintervalle ab [SK23]. In der Ansys optiSlang 2024 R2 Dokumentation wird empfohlen, das ALHS Verfahren einzusetzen, wenn die Anzahl der Eingabeparameter kleiner als 50 ist [ANS24b].

Im Anschluss an die Lösung des FE-Modells für die bestimmten Samples wird ein MOP für die definierten Optimierungskriterien bestimmt. Um das für die Problemstellung beste MOP zu finden, werden verschiedene Metamodelle, die sich zur Repräsentation der Datenbasis eignen, erstellt und hinsichtlich der Vorhersagegenauigkeit, des Coefficient of Prognosis (CoP), miteinander verglichen. Die verglichenen Metamodelle basieren auf den Methoden der polynomialen Regression, der Moving Least Squares Approximation und dem isotropic Kriging. Der Vergleich und die Auswahl des geeigneten Metamodells erfolgt unter Verwendung des CoP. Der CoP ermöglicht eine Aussage über die Vorhersagegenauigkeit des jeweiligen Metamodells bezüglich des jeweils betrachteten Optimierungskriteriums und wird nach Gleichung 4.3 berechnet. Dabei ist $SS_E^{Prediction}$ die Summer aller Fehlerquadrate der Vorhersage des Metamodells und SS_T die Varianz des Optimierungskriteriums Z durch Variation aller relevanten Eingabeparameter. Die Fehlerquadrate der Vorhersage $SS_E^{Prediction}$ werden unter Verwendung einer Kreuzvalidierung berechnet. Dazu wird nicht die gesamte Datenbasis zur Erstellung des Metamodells verwendet, sondern einige Datenpunkte, die zur Validierung und Berechnung des Vorhersagefehlers des Metamodells eingesetzt werden, ausgelassen. Wird davon ausgegangen, dass die erstellte Datenbasis für die Problemstellung repräsentativ ist, entspricht der CoP annähernd der Vorhersagegenauigkeit des Ersatzmodells bezüglich des jeweiligen Optimierungskriteriums.[ANS24c]

$$COP = 1 - \frac{SS_E^{Prediction}}{SS_T}$$
 (4.3)

Nach Auswahl des Metamodells, das die beste Vorhersagegenauigkeit (größter CoP) für die vorliegende Problemstellung liefert, wird für jeden Parameter der $CoP(X_i)$ (Sensitivitätswert) berechnet. Dieser gibt den Einfluss, den ein Parameter auf die Optimierungskriterien hat, an. Alle nicht relevanten Parameter $(CoP(X_i) \le 0.01)$ werden aus dem Modell entfernt und es erfolgt eine weitere Iteration. Liegt der Gesamt-CoP des Ersatzmodells unter 100 %, so ist davon auszugehen, dass in der Sensitivitätsanalyse nicht alle für die Problemstellung relevanten Parameter berücksichtigt werden. [ANS24b] [ANS24c]

In der zweiten Iteration wird die Datenbasis basierend auf den Einstellungen des AMOP um weitere Samples, die durch Anwendung des ALHS definiert werden, ergänzt. Auf diese Weise wird eine genauere Abbildung des Parameterraums erreicht. Mit der erweiterten Datenbasis wird das MOP adaptiv angepasst (Adaption des Modells) und die Genauigkeit der Vorhersage gesteigert.

Der Vorgang der Adaption des Ersatzmodells wird solange wiederholt, bis eines der in den Einstellungen definierten Konvergenzkriterien erreicht ist. Zu den Konvergenzkriterien gehört ein Ziel-CoP von 90 % und maximal 3 durchzuführende Iterationen. Ist eines dieser beiden Kriterien erreicht, wird die Berechnung des AMOP beendet. [ANS24b][ANS24c]

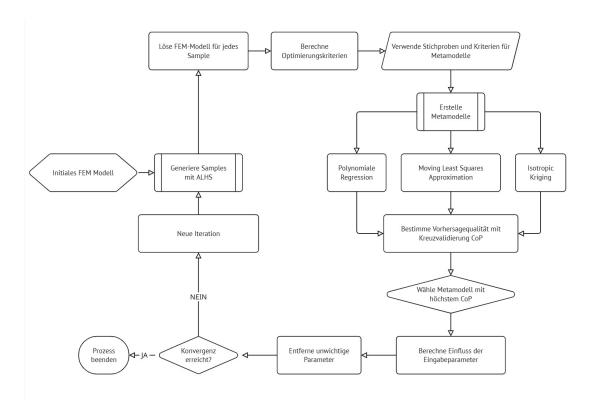


Abbildung 4.4 Prozessablauf zur Bestimmung des AMOP

4.1.4 Durchführung der Mehrzieloptimierung und anschließende Validierung

Das Ziel der Mehrzieloptimierung ist die Bestimmung des besten Designs für die vorliegende Problemstellung. Grundlage der Optimierung ist das im Rahmen der Sensitivitätsanalyse bestimmte AMOP (siehe Abschnitt 4.1.3), das den Zusammenhang zwischen den relevanten Eingabeparametern und den definierten Optimierungskriterien abbildet. Alle Parameter, die keinen Einfluss auf die Optimierungskriterien haben, werden in diesem Schritt als konstant angenommen. Ihnen wird der Wert zugewiesen, den sie in dem Referenzdesign vor der Sensitivitätsanalyse hatten. Zur Durchführung der Mehrzieloptimierung wird die in Ansys optiSlang 2024 R2 implementierte One-Click Optimization (OCO) verwendet. Dieser Algorithmus wählt, basierend auf der Problemstellung, automatisiert das passendste Optimierungsverfahren aus. Der Auswahlprozess des Optimierungsalgorithmus erfolgt dynamisch während der Optimierung. Die vorzunehmende Haupteinstellung ist die maximale Anzahl der Auswertungen während des Optimierungsprozesses. Zudem kann das im Rahmen der Sensitivitätsanalyse erstellte AMOP übergeben und für die Optimierung verwendet werden. Die Optimierung erfolgt in diesem Fall auf Basis des berechneten Ersatzmodells und ist auf diese Weise effizienter als die Optimierung des FE-Modells selbst. Zu beachten ist, dass die Optimierung nur dann zuverlässige Ergebnisse liefern kann, wenn das berechnete Ersatzmodell eine hohe Genauigkeit aufweist.[ANS24c] Das Ergebnis der Optimierung kann, sofern mehr als ein Optimierungskriterium verwendet wird, in Form eines Pareto 2D Plots dargestellt werden. Eine Beispieldarstel-

lung findet sich in Abbildung 4.5. Dabei werden alle während der Optimierung berechneten Designpunkte und die zugehörigen Werte, die die Optimierungskriterien

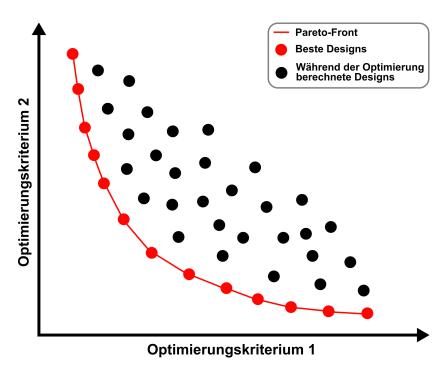


Abbildung 4.5 Beispieldarstellung einer Pareto-Front in Anlehnung an [ANS24b]

annehmen, dargestellt. Alle Designs entlang der extrahierten Pareto-Front werden als beste Designs identifiziert. Aus der Pareto-Front kann außerdem ein möglicher Zusammenhang zwischen den Optimierungskriterien abgeleitet werden. Es wird abgebildet, wie sich die Optimierungskriterien in Abhängigkeit der jeweils anderen verhalten. [ANS24b][ANS24c] Im Anschluss an die Berechnung der besten Designs erfolgt die Validierung der Optimierungsergebnisse für diese Designs. Dazu wird das FE-Modell für 20 dieser Designs gelöst und der Wert der Optimierungskriterien auf Basis des Simulationsergebnisses berechnet. Ein anschließender Vergleich mit den Werten, die das AMOP für die jeweilige Parameterkombination annimmt, zeigt die Genauigkeit der Optimierungsergebnisse. [ANS24c]

Die beste validierte Parameterkombination aus der Optimierung kann im Anschluss in das FE-Modell übertragen werden. Damit ist das Model-Updating abgeschlossen.

5. Durchgeführte Model-Updatings

Das Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung eines Simulationsmodells der Baugruppe, bestehend aus Seitenwandpaneel und eingebauten Fenstereinsätzen. Das Simulationsmodell soll das reale Schwingungsverhalten des Seitenwandpaneels möglichst genau abbilden und gleichzeitig eine möglichst geringe Komplexität aufweisen, um den Rechenaufwand zu begrenzen. Durch die Vielzahl unbekannter Parameter in dem System ist eine direkte Erstellung dieses Simulationsmodells nicht möglich. Aus diesem Grund werden mehrere Model-Updatings durchgeführt, bei denen die Modellkomplexität basierend auf den erzielten Ergebnissen schrittweise gesteigert wird. Alle durchgeführten Model-Updatings folgen der in Kapitel 2.1 beschriebenen Methodik. Die durchgeführten Model-Updatings sowie die erzielten Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

5.1 Ziel des Model-Updatings

Die von der Simulation zu erwartenden Ergebnisse sind, entsprechend dem Ziel einer möglichst genauen Abbildung des realen Schwingungsverhaltens, von den in Abschnitt 3.3 beschriebenen Ergebnissen der durchgeführten experimentellen Modalanalyse abhängig. In Abbildung 3.7 ist die Auto-MAC-Matrix der experimentell bestimmten Schwingungsmoden des Seitenwandpaneels mit montierten Fenstereinsätzen dargestellt. Diese Auto-MAC-Matrix zeigt, wie ähnlich sich die experimentell bestimmten Moden sind. Ermöglicht das Simulationsmodell eine exakte Abbildung des realen Schwingungsverhaltens, so entspricht die MAC-Matrix, die durch den Vergleich der simulierten und der experimentell bestimmten Moden entsteht, der Auto-MAC-Matrix. Diese Übereinstimmung betrifft sowohl die Einträge auf der Haupt- als auch die auf der Nebendiagonalen. Zur Bewertung der Simulationsergebnisse muss daher die Auto-MAC-Matrix als Referenz verwendet werden.

In der Voruntersuchung von Algermissen (siehe [Alg25]) wurde ein ähnlicher Model-Updating Prozess für das Seitenwandpaneel ohne montierte Fenstereinsätze durchgeführt. Das Ziel dieser Untersuchung war, den Lagenaufbau und die verwendeten Materialien, aus denen das Seitenwandpaneel besteht, zu spezifizieren. In dem dort beschriebenen Fall wird eine diagonal dominante Matrix angestrebt, deren Einträge auf der Hauptdiagonalen möglichst nahe 1,0 sein sollen. Gleichzeitig sollen keine Einträge auf den Nebendiagonalen zu finden sein. Diese Kriterien können in diesem Fall angewendet werden, da die Auto-MAC-Matrix der experimentell bestimmen Moden eine diagonal dominante Matrix ist (siehe Abbildung A.2 im Anhang A). Es existieren lediglich zwei Nebendiagonaleinträge. Diese beiden Einträge bei 139,9 Hz und 144,1 Hz sind mit einem MAC-Wert von 0,17 vernachlässigbar klein.

Die im Rahmen dieser Arbeit bestimmte symmetrische Auto-MAC-Matrix der experimentellen Moden des Seitenwandpaneels mit montierten Fenstereinsätzen weist

neben den Einträgen mit Wert 1,0 auf der Hauptdiagonalen auch einige nicht vernachlässigbare Nebendiagonaleinträge auf. Für die Bewertung der Ergebnisse aller durchgeführten Model-Updatings müssen daher sowohl die Haupt- als auch die Nebendiagonaleinträge berücksichtigt werden.

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse und der anschließenden Optimierung wird zur Bewertung der simulierten Moden das C_{12} -Kriterium (siehe Gleichung 4.1) verwendet. In diesem Kriterium werden die Abweichungen der Hauptdiagonaleinträge der MAC-Matrix vom Idealwert 1,0 sowie die Frequenzabweichungen zwischen den simulierten und den experimentell bestimmten Eigenfrequenzen berücksichtigt. Eine Bewertung der Genauigkeit, mit der die simulierten Moden die Einträge auf den Nebendiagonalen abbilden, ist mit diesem Kriterium nicht möglich. Zur abschließenden Bewertung der Genauigkeit der Simulationsergebnisse hinsichtlich der Einträge auf den Nebendiagonalen ist daher eine Betrachtung der für die jeweilige Konfiguration ermittelten MAC-Matrix erforderlich.

5.2 Ausgangssituation

Die experimentell bestimmten Ergebnisse aus Abschnitt 3.3 zeigen, dass die Montage der Fenstereinsätze das reale Schwingungsverhalten beeinflusst. Aus diesem Grund ist die Ergänzung der Fenstereinsätze in dem Simulationsmodell notwendig, um das reale Schwingungsverhalten simulieren zu können.

Die Voruntersuchung von Algermissen [Alg25] liefert ein Simulationsmodell für das Seitenwandpaneel ohne montierte Fenstereinsätze. In diesem Modell können nicht alle experimentell bestimmten Moden abgebildet werden (siehe Abschnitt 2.2). Zudem weisen die simulierten Moden eine hohe Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten auf, bilden diese aber nicht mit 100 % Genauigkeit ab. Da alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen auf diesem Simulationsmodell basieren, ist zu erwarten, dass die zu erzielenden Ergebnisse von diesen Abweichungen beeinflusst werden.

Um den Einfluss auf die zu erwartenden Simulationsergebnisse abzuschätzen, werden zunächst alle simulierten Moden des Seitenwandpaneels ohne Fenstereinsätze mit den experimentell bestimmten Moden des Seitenwandpaneels mit montierten Fenstereinsätzen verglichen. Dazu werden die experimentell bestimmten Moden aus Abschnitt 3.3 in das Simulationsmodell ohne Fenstereinsätze eingelesen und die MAC-Matrix berechnet. In Abbildung 5.1 ist die resultierende MAC-Matrix dargestellt. Diese Matrix muss mit der aus Abbildung 3.9, die den Vergleich der experimentell bestimmten Moden des Seitenwandpaneels mit und ohne Fenstereinsätzen zeigt, verglichen werden. Entsprechen die Simulationsergebnisse für das Seitenwandpaneel ohne Fenstereinsätze exakt den experimentell bestimmten Moden ohne Fenstereinsätze, so stimmen die beiden Abbildungen überein. Die Unterschiede zwischen beiden Abbildungen zeigen folglich, wie sich die Abweichungen in der Simulation des realen Schwingungsverhaltens des Seitenwandpaneels ohne Fenstereinsätze auf die Abbildung der experimentell bestimmten Moden mit Fenstereinsätzen auswirken. Um den Vergleich zu vereinfachen, sind auf der zweiten y-Achse in Abbildung 5.1 die den simulierten Moden ohne Fenstereinsätze zugeordneten experimentell bestimmten Moden dargestellt.

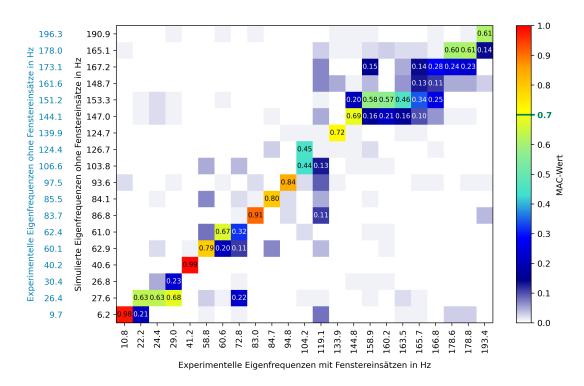


Abbildung 5.1 MAC-Matrix: Vergleich der simulierten Moden ohne Fenstereinsätze mit den experimentell bestimmten Moden mit Fenstereinsätzen

Der Vergleich von Abbildung 5.1 und Abbildung 3.9 zeigt die nachfolgend beschriebenen Unterschiede. Dabei entspricht Abbildung 3.9 dem zu erwartenden Verhalten und Abbildung 5.1 dem mit Hilfe der Simulation ermittelten. Zum besseren Verständnis sind die durchgeführten Vergleiche in Abbildung 5.2 dargestellt. Besonders auffällig ist die starke Abweichung der Ergebnisse für simulierten Moden ohne Fenstereinsätze mit den Eigenfrequenzen 26,8 Hz, 62,9 Hz, 61,0 Hz, 103,8 Hz, 126,7 Hz, 124,7 Hz, 147,0 Hz und 190,9 Hz.

Die Abbildung A.1 im Anhang A zeigt die Genauigkeit, mit der die Simulation ohne Fenstereinsätze die experimentell bestimmten Moden ohne Fenstereinsätze abbildet. Es ist zu erkennen, dass alle Moden, für die eine starke Abweichung vom zu erwartenden Verhalten ermittelt werden kann, einen MAC-Wert von maximal 0,85 aufweisen. Damit besteht zwischen den simulierten und den experimentell bestimmten Moden ohne Fenstereinsätze eine hohe Ähnlichkeit, die Übereinstimmung ist jedoch nicht 100 %.

Für alle übrigen Moden können ebenfalls Abweichungen von dem zu erwartenden Verhalten bestimmt werden. Eine Ausnahme stellen die beiden Moden mit den Eigenfrequenzen 6,2 Hz und 40,6 Hz dar, die das aus den Experimenten erwartete Verhalten sehr gut widerspiegeln. Die Genauigkeit, mit der die zugehörigen experimentell bestimmten Moden ohne Fenstereinsätze durch die Simulation abgebildet werden, ist mit 98 % sehr hoch.

Nach Pastor et. al. liegt eine sehr hohe Übereinstimmung der verglichenen Moden vor, wenn der MAC-Wert zwischen 0,9 und 1,0 liegt [MMT12]. Unter Verwendung dieser Grenzwerte wird, neben den beiden bereits genannten, auch die experimentell bestimmte Mode ohne Fenstereinsätze mit einer Eigenfrequenz von 97,5 Hz sehr gut durch das Simulationsmodell ohne Fenstereinsätze abgebildet (MAC-Wert 0,91).

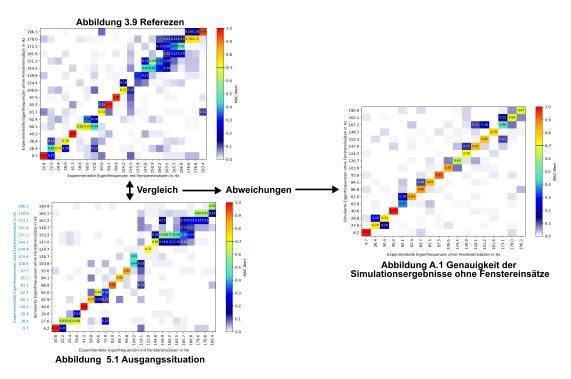


Abbildung 5.2 Darstellung der durchgeführten Vergleiche

Der Vergleich des Simulationsergebnisses ohne Fenstereinsätze für diese Mode mit der experimentell bestimmten Mode mit Fenstereinsätzen zeigt einen MAC-Wert von 0,84 (siehe Abbildung 5.1). Für den Vergleich der experimentell bestimmten Moden ohne und mit Fenstereinsätzen kann für die Mode bei 97,5 Hz ein MAC-Wert von 0,95 berechnet werden. Der Vergleich beider Werte zeigt folglich eine Abweichung, obwohl die Simulation das reale Schwingungsverhalten der Mode mit hoher Genauigkeit abbildet. Aus dieser Beobachtung kann abgeleitet werden, dass bereits eine leichte Abweichung des simulierten Schwingungsverhaltens ohne Fenstereinsätze die Abbildung der experimentellen Moden mit Fenstereinsätzen beeinflusst.

Im Rahmen dieser Arbeit wird keine Anpassung des Simulationsmodells ohne Fenstereinsätze vorgenommen. In der Bewertung der erzielten Ergebnisse sind Abweichungen, die durch das Simulationsmodell des Seitenwandpaneels ohne Fenstereinsätze entstehen, zu berücksichtigen.

5.3 Übersicht über die durchgeführten Model-Updatings

In der nachfolgenden Tabelle 5.1 sind alle durchgeführten Model-Updatings aufgelistet. In der Spalte "Kurzbeschreibung" sind die für das jeweilige Model-Updating getroffenen Modellannahmen zusammengefasst. In den folgenden Abschnitten erfolgt die ausführliche Beschreibung der durchgeführten Model-Updatings und der erzielten Ergebnisse. Weiterhin werden die aus den Ergebnissen abgeleiteten Hypothesen, die die Grundlage der weiteren Model-Updatings darstellen, beschrieben.

 Tabelle 5.1
 Zusammenfassung aller durchgeführter Model-Updating Prozesse

Bezeichnung	Kurzbeschreibung
Model-Updating 1 (Abschnitt 5.4)	 Masse der Fenstereinsätze wird durch 24 Massenpunkte entlang der Kanten im Seitenwandpaneel modelliert Vollständige Vernachlässigung der Geometrie sowie der Verbindungselemente
Model-Updating 2 (Abschnitt 5.5)	 Vereinfachte Modellierung der Fenstergeometrie Konstante, variable Wandstärke 1D Federelemente zur Modellierung der Schraubenverbindungen
Model-Updating 3 (Abschnitt 5.6)	 Vereinfachte Modellierung der Fenstergeometrie Bereichsweise verschiedene, variable Wandstärken Modellierung der Schraubenverbindungen durch fixierte Verbindungselemente
Model-Updating 4 (Abschnitt 5.7)	 Erweiterung der Modellierung der Fenstergeometrie durch die GFK-Platte Bereichsweise verschiedene, variable Wandstärken Berücksichtigung der Sonnenblende sowie der Plexiglasscheibe Modellierung der Schraubenverbindungen durch fixierte Verbindungselemente Modellierung der Klettverbindungen durch Verbindungselemente des Typs "Lagerbuchse" mit variabler Steifigkeit in allen Raumrichtungen

Bezeichnung	Kurzbeschreibung
	 Vereinfachte Fenstergeometrie mit GFK-Platte Bereichsweise verschiedene, konstante Wandstärken
	 Berücksichtigung der Sonnenblende sowie der Plexiglasscheibe
Model-Updating 5 (Abschnitt 5.8)	 Modellierung der Schraubenverbindungen durch Verbindungselemente des Typs "Lagerbuchse" mit hoher, variabler Steifigkeit in allen Raumrichtungen
	Modellierung der Klettverbindungen durch Verbindungselemente des Typs "Lagerbuchse" mit variabler Steifigkeit in allen Raumrichtungen
	Separate Modellierung des Fenstereinsatzes
	Vereinfachte Fenstergeometrie mit GFK-Platte
Model-Updating 6 (Abschnitt 5.9)	Bereichsweise verschiedene, konstante Wandstärken
	Berücksichtigung der Sonnenblende sowie der Plexiglasscheibe
	Modellierung der Fenstereinsätze gemäß Model-Updating 6
Model-Updating 7 (Abschnitt 5.10)	 Modellierung der Schraubenverbindungen durch Verbindungselemente des Typs "Lagerbuchse" mit hoher, variabler Steifigkeit in allen Raumrichtungen
	Modellierung der Klettverbindungen durch Verbindungselemente des Typs "Lagerbuchse" mit variabler Steifigkeit in allen Raumrichtungen

5.4 Model-Updating 1: Berücksichtigung der zusätzlichen Masse

Bei dem Seitenwandpaneel handelt es sich aus mechanischer Sicht, wenn die Krümmung vernachlässigt wird, um eine ebene Platte. Die Eigenfrequenzen und Eigenformen von Biegeschwingungen in einer Platte werden hauptsächlich durch die Plattenabmessungen, die Randbedingungen, die Plattenbiegesteifigkeit und die auf die

Fläche bezogene Plattenmasse beeinflusst [Mös15]. Da sich die Abmessungen des Seitenwandpaneels sowie die Randbedingungen durch Montage der Fenstereinsätze nicht ändern, sind eine veränderte Plattenbiegesteifigkeit und eine veränderte flächenbezogene Plattenmasse mögliche Erklärungen für das zu beobachtende veränderte Schwingungsverhalten des Seitenwandpaneels. Zuerst wird überprüft, ob die Berücksichtigung der veränderten flächenbezogenen Plattenmasse ausreicht, um das reale Schwingungsverhalten in der Simulation abbilden zu können.

5.4.1 Modellierung der zusätzlichen Masse

In der hier verwendeten Modellierung des Gesamtsystems wird die Geometrie der Fenstereinsätze sowie die Verbindungselemente zwischen den Fenstereinsätzen und dem Seitenwandpaneel vollständig vernachlässigt. Die Fenstereinsätze werden abstrahiert durch jeweils 24 Punktmassen entlang der Fensterkanten des Seitenwandpaneels modelliert. Alle Punktmassen werden direkt auf den Knoten des FE-Netzes, die sich entlang der Fensterkante befinden, platziert. Dafür wird das im Anhang B.1 aufgeführte Python-Skript verwendet. Zu Beginn des Model-Updatings wird davon ausgegangen, dass die Masseverteilung entlang der Fensterkanten konstant ist (Referenzkonfiguration). Beide Fenstereinsätze haben eine Masse von jeweils 0,84 kg. Aus diesem Grund wird für alle Punktmassen eine Masse von 0,035 kg verwendet. Während des Model-Updatings wird die den Punktmassen zugewiesene Masse variiert. Die Optimierungskriterien entsprechen den in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen. Dabei erfolgt die Berechnung des C_3 -Kriteriums durch Summation der Masse aller Punktmassen entlang einer Kante und für beide Fensterkanten separat. Auf diese Weise zeigt die Sensitivitätsanalyse einerseits den Einfluss der Gesamtmasse aller Punktmassen auf die Genauigkeit, mit der das Schwingungsverhalten (C_{12} -Kriterium) durch die Simulation abgebildet werden kann und andererseits, ob eine nicht konstante Masseverteilung die Simulationsergebnisse verbessert. Es kann außerdem überprüft werden, ob die notwendige Masseverteilung an den beiden Fensterkanten verschieden ausfallen muss.

Die Masse der Punktmasse wird im Rahmen der Sensitivitätsanalyse von o,okg bis o,15 kg variiert. Diese Grenzen werden gewählt, um sicherzustellen, dass die Masse einzelner Punktmassen o,o kg betragen kann. Die obere Grenze des Wertebereichs basiert auf der Annahme, dass mindestens sechs Punktmassen verwendet werden müssen, um die Fenstereinsätze abstrahiert zu modellieren. Diese Anzahl folgt aus der Anzahl der in der realen Baugruppe verwendeten Verbindungselementen. Dabei wird angenommen, dass die beiden einzelnen Klettverbindungen (siehe 3.3) an der Oberseite des Fenstereinsatzes als ein Verbindungselement behandelt werden können. Die Anzahl der Verbindungselemente wird zugrunde gelegt, weil davon auszugehen ist, dass die Masse im Bereich der Verbindungselemente die Moden stärker beeinflusst als in den übrigen Bereichen.

5.4.2 Simulationsergebnisse in der Referenzkonfiguration

In Abbildung 5.4a ist das Ergebnis der Simulation unter Verwendung der Referenzkonfiguration dargestellt. Es ist zu erkennen, dass alle Moden mit Eigenfrequenzen über 133,9 Hz durch die Simulation nicht abgebildet werden können. Sie werden im automatischen Mode-Pairing nicht berücksichtigt. Verglichen mit der Simulation ohne Fenstereinsätze, für die Moden im gesamten Frequenzbereich zugeordnet werden konnte, stellt dies eine Verschlechterung dar. Es ist jedoch zu sehen, dass im Simulationsmodell eine zusätzliche Mode, die der experimentell bestimmten Mode bei 24,4 Hz zugeordnet wird, entsteht.

Zur Bewertung der Eigenformen muss, wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, Abbildung 3.7 als Referenz herangezogen werden. Es ist zu erkennen, dass die Einträge auf der Hauptdiagonalen für alle Moden mit Eigenfrequenzen größer als 60,6 Hz mit Ausnahme der Mode bei 84,7 Hz mit geringer Übereinstimmung abgebildet werden. Die in Abbildung 3.7 zu beobachtenden Einträge auf den Nebendiagonalen werden nicht genau abgebildet. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass durch die Simulation nicht alle experimentell bestimmten Moden abgebildet werden und damit nicht in der MAC-Matrix vertreten sind. Folglich werden nicht alle relevanten Einträge auf den Nebendiagonalen dargestellt.

In Tabelle 5.2 sind die Frequenzabweichungen der simulierten von den experimentell bestimmten Eigenfrequenzen dargestellt. Für die Referenzkonfiguration $f_{sim,ref}$ ist zu erkennen, dass die Mode, die der experimentellen mit Eigenfrequenz f_{exp} 84,7 Hz zugeordnet wird, eine Frequenzabweichung von mehr als 10 Hz aufweist (rot gekennzeichnet). Die zu den experimentell bestimmten Moden mit Eigenfrequenzen von 10,8 Hz und 29,0 Hz zugeordneten simulierten Moden weisen eine Frequenzabweichung von mehr als 10 % auf (dunkelblau gekennzeichnet).

5.4.3 Ergebnisse des Model-Updatings unter Berücksichtigung der zusätzlichen Masse

In Abbildung 5.3 ist ein Vergleich verschiedener Masseverteilungen, die durch den Optimierungsprozess bestimmt werden können, dargestellt. Die dargestellten Designs entsprechen einer Auswahl der im Optimierungsprozess bestimmten besten Designs, die mit dem FE-Modell validiert werden. In der Darstellung visualisieren die schwarz gestrichelten Linien die Konturen der Ausschnitte für die Fenstereinsätze im Seitenwandpaneel. Zur Vereinfachung der Darstellung sind beide Konturen auf eine Ebene projiziert dargestellt (reale, nicht ebene Kontur: siehe Abbildung C.1 im Anhang C). Die Balken repräsentieren die Masse, die die Punktmasse an dem jeweiligen Knoten für die verschiedenen Designs besitzt. Zur Visualisierung der Ausgangssituation ist in dem ersten Diagramm a) die konstante Masseverteilung zu Beginn des Model-Updatings dargestellt. Zum besseren Vergleich ist im Titel eines jeden Diagramms der Wert des C_{12} -Kriteriums, der mit Hilfe des Ersatzmodells bestimmt werden kann, dargestellt.

Der Vergleich der Werte des C_{12} -Kriteriums der verschiedenen Masseverteilungen zeigt, dass mit Hilfe des in der Sensitivitätsanalyse erstellten Ersatzmodells durch die Verwendung einer nicht konstanten Masseverteilung eine Verbesserung des C_{12} -Kriteriums von 3,816 auf 1,81328 erreicht werden kann. Die mit Hilfe des FE-Modells validierten Werte beider Designs entsprechen 2,426 und 1,546. Es besteht folglich eine Abweichung zwischen Ersatzmodell und Simulation.

Diese Abweichung ist auf die Vorhersagegenauigkeit des Ersatzmodells zurückzuführen. Gemäß der Sensitivitätsanalyse liegt der Gesamt-CoP bezüglich des C_{12} -Kriteriums

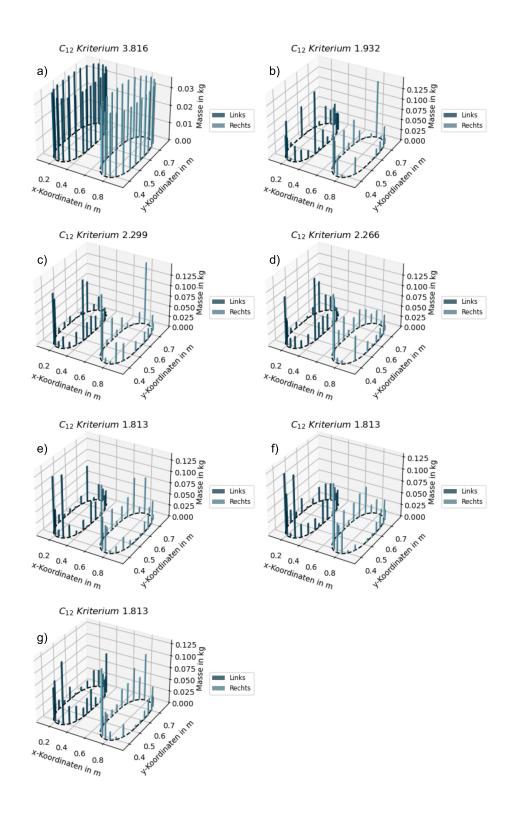


Abbildung 5.3 Vergleich verschiedener Masseverteilungen auf Basis der Optimierungsergebnisse

bei 19,06 %. Damit ist die Genauigkeit, mit der die in der Sensitivitätsanalyse berechneten Designs durch das Ersatzmodell abgebildet werden, sehr gering. Dies zeigt, dass neben der Masseverteilung die Berücksichtigung anderer Einflussfaktoren nötig ist, um eine präzisere Vorhersage des C_{12} -Kriteriums zu erreichen. Die Sensitivitätsanalyse zeigt außerdem, dass für den linken Fensterausschnitt lediglich die Massen mit den Nummern 6 und 12 und für den rechten Fensterausschnitt die Massen mit den Nummern 5 und 24 einen Einfluss auf das C_{12} -Kriterium haben.

Dass in dem Modell nicht alle relevanten Parameter berücksichtigt sind, um eine präzise Vorhersage des C_{12} -Kriteriums zu ermöglichen, kann durch Betrachtung von Abbildung 5.3 bestätigt werden. Es ist zu erkennen, dass der annähernd selbe Wert des C_{12} -Kriteriums (mit dem Ersatzmodell berechnet) durch verschiedene Masseverteilungen (Diagramme e) bis g)) erreicht werden kann. Gleichzeitig sind die Masseverteilung des Diagramms b) und des Diagramms d) sehr ähnlich. Dennoch weichen die Werte des C_{12} -Kriteriums voneinander ab (2,266 zu 1,813). Es ist durch die Modellierung der Fenstereinsätze unter ausschließlicher Verwendung von Punktmassen nicht möglich, eine allgemeingültige Aussage über eine besonders günstige Masseverteilung zu treffen.

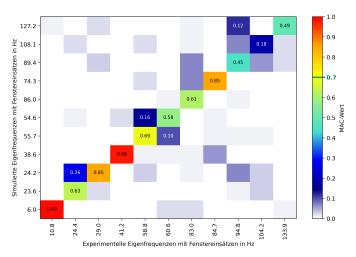
Tabelle 5.2 Model-Updating 1: Frequenzabweichung der simulierten Eigenfrequenzen in der Referenzkonfiguration $f_{sim,ref}$ und der optimierten Konfiguration $f_{sim,opti}$ von den experimentell bestimmten Eigenfrequenzen f_{exp} (absolute Frequenzabweichung \geq 10 Hz, prozentuale Frequenzabweichung \geq 10 %)

f_{exp} in Hz	$oxed{f_{sim,ref}}$ in Hz	Δ in Hz	Δ in %	$f_{sim,opti} \ $ in Hz	Δ in Hz	Δ in %
10,8	6,00	-4,80	-44,44	6,00	-4,80	-44,44
24,4	23,60	-0,80	-3,28	23,60	-0,80	-3,28
29,0	24,20	-4,80	-16,55	24,80	-4,20	-14,48
41,2	38,60	-2,60	-6,31	38,30	-2,90	-7,04
58,8	55,70	-3,10	-5,27	56,70	-2,10	-3,57
60,6	54,60	-6,00	-9,90	56,60	-4,00	-6,60
83,0	86,00	3,00	3,61	86,40	3,40	4,10
84,7	74,30	-10,40	-12,28	72,90	-11,80	-13,93
94,8	89,40	-5,40	-5,70	97,50	2,70	2,85

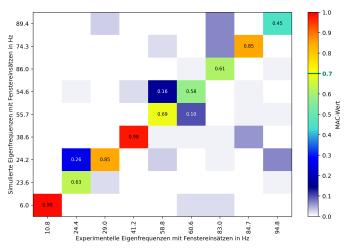
Bezüglich des C_3 -Kriteriums beider Fensterausschnitte weist das Ersatzmodell einen CoP von 100 % auf. Da in diesem Model-Updating lediglich die Masse der Punktmassen variiert wird, entspricht der CoP von 100 % den Erwartungen. In der Sensitivitätsanalyse ist außerdem zu sehen, dass alle Punktmassen, die entlang einer Fensterkante platziert sind, denselben Einfluss auf das C_3 -Kriterium haben. Der CoP Wert liegt für alle Punktmassen bei ca. 5 %.

Aus der durchgeführten Optimierung wird das beste Design ausgewählt. Wie oben bereits erwähnt, beträgt der Wert des C_{12} -Kriteriums für dieses Design 1,546. Dies entspricht einer deutlichen Verbesserung verglichen mit dem Referenzdesign (2,266). Diese starke Verbesserung ist in Abbildung 5.4 nicht zu erkennen.

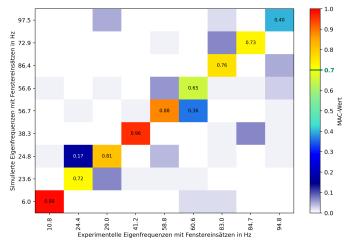
Allgemein ist zu beachten, dass die Werte des C_{12} -Kriteriums der Simulation auf dem automatischen Mode-Pairing basieren. Je nachdem, welche Moden automatisch zugeordnet werden, variiert das Ergebnis des C_{12} -Kriteriums der Simulation und die



(a) MAC-Matrix: Vergleich der simulierten Moden in der Referenzkonfiguration mit den experimentell bestimmten nach dem automatischen Mode-Pairing



(b) MAC-Matrix: Vergleich der simulierten Moden in der Referenzkonfiguration mit den experimentell bestimmten an das Mode-Pairing während der Optimierung angepasst



(c) MAC-Matrix: Vergleich der simulierten Moden in der optimierten Konfiguration mit den experimentell bestimmten

Abbildung 5.4 Model-Updating 1: Vergleich der MAC-Matrix vor (Referenzkonfiguration) und nach (optimierte Konfiguration) dem Model-Updating

Vergleichbarkeit ist eingeschränkt. Die Schwankung des C_{12} -Kriteriums folgt aus dessen Definition (siehe Gleichung 4.1). Wie in Abbildung 5.4 dargestellt, werden für das Startdesign die experimentellen Moden bis 133,9 Hz automatisch zugeordnet (es fehlen die Moden bei 22,2 Hz, 72,8 Hz und 119,1 Hz). Für das optimale Design werden lediglich die Moden bis 94,8 Hz (nicht zugeordnete Moden: 22,2 Hz, 72,8 Hz) von dem Mode-Pairing Algorithmus berücksichtigt. Die bestimmten Werte des C_{12} -Kriteriums für beide Designs ist daher nicht vergleichbar.

Um die Vergleichbarkeit herzustellen, wird das Mode-Pairing für das Referenzdesign manuell modifiziert. Nach der Modifikation liegt der Wert des C_{12} -Kriteriums für das Referenzdesign bei 1,718. Die durch die Optimierung erreichte, tatsächliche Verbesserung der Moden bis 94,8 Hz ist folglich nur gering. Werden durch die Simulation weniger Moden abgebildet und damit in dem Mode-Pairing berücksichtigt, ist die Genauigkeit, mit der das reale Schwingungsverhalten simuliert werden kann, geringer, wenngleich der Wert des C_{12} -Kriteriums kleiner ist. Die geringfügige Verbesserung des C_{12} -Kriteriums entspricht in diesem Fall daher keiner Verbesserung der Simulation des realen Schwingungsverhaltens. Auch bezüglich der Frequenzabweichungen der simulierten Eigenfrequenzen von den experimentell bestimmten, kann keine Verbesserung erreicht werden (siehe Tabelle 5.2).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Modellierung der Fenstereinsätze durch die zusätzliche Masse nicht ausreichend ist, um alle experimentell bestimmten Moden abzubilden. Um das Schwingungsverhalten des Systems genauer durch das Ersatzmodell beschreiben zu können, müssen weitere Parameter, die bisher nicht berücksichtigt wurden, berücksichtigt werden.

In diesem Model-Updating werden sowohl die Fenstergeometrie als auch die Verbindungselemente vollständig vernachlässigt. Beide Vereinfachungen führen zu einer ungenauen Modellierung der Plattensteifigkeit. Da diese, wie oben beschrieben, das Schwingungsverhalten der Platte ebenfalls beeinflusst, wird für die nachfolgenden Model-Updatings folgende Hypothese aufgestellt:

Hypothese:

Die Steifigkeit der Fenstereinsätze und der Verbindungselemente hat nicht vernachlässigbaren Einfluss auf das Schwingungsverhalten der Baugruppe.

5.5 Model-Updating 2: Vereinfachte Modellierung der Fenstergeometrie und Modellierung der Schrauben als 1D Federelemente mit variabler Federsteifigkeit

Im Folgenden wird die Hypothese überprüft, dass die Fenstersteifigkeit bei der Modellierung des realen Schwingungsverhaltens nicht vernachlässigt werden kann. Dazu werden die Fenstereinsätze mit vereinfachter Geometrie im Modell ergänzt und die Schraubenverbindungen als 1D Federelemente modelliert.

5.5.1 Modellierung der Fenstergeometrie

Die reale Geometrie der Fenstereinsätze ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Es liegen keine CAD-Daten oder technische Zeichnungen vor, somit ist die exakte Geometrie

nicht bekannt. Daher wird ein vereinfachtes Modell der Geometrie angefertigt. Dabei wird die Form der Fenstereinsätze an die Kontur des linken Fensterausschnittes im Seitenwandpaneel angepasst. Eine Visualisierung der Projektion der Konturen beider Fensterausschnitte auf die x-z Ebene ist in Abbildung C.1 im Anhang C dargestellt. Die Betrachtung der Konturen zeigt, dass der rechte Fensterausschnitt nicht gleichmäßig gekrümmt ist, sondern in der Mitte abfällt. Um eine möglichst exakte Geometrie für die Fensterausschnitte ableiten zu können, wird der gleichmäßigere linke Fensterausschnitt als Referenzkurve verwendet.

Zur vereinfachten Modellierung werden neben der Kontur der Fensterkanten, die Tiefe der verschiedenen Ebenen der Fenstereinsätze sowie der Versatz zu der Referenzkurve benötigt. Diese Daten werden durch Messungen an der realen Geometrie bestimmt. Auf dieselbe Weise werden die Abmessungen der Auflagefläche und Verbindungspunkte mit dem Seitenwandpaneel bestimmt. Die Bestimmung aller nötigen Abmessungen ist durch die komplexe Geometrie nicht exakt möglich. Alle bestimmten Werte sind daher mit Unsicherheit behaftet.

In der vereinfachten Modellierung wird zunächst die Sonnenblende sowie das zur Befestigung und Führung der Sonnenblende verwendete GFK-Gewebe (im Folgenden als GFK-Platte bezeichnet) an der Fensteroberseite vernachlässigt (siehe Abbildung 3.3).

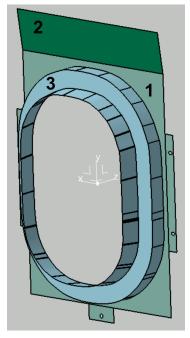
Das erzeugte CAD-Modell ist ein reines Flächenmodell. Aufgrund der geringen Wandstärke wird davon ausgegangen, dass das Schwingungsverhalten unter Verwendung von *Shell 181* Elementen im FE-Modell ausreichend genau abgebildet werden kann. Die erzeugte vereinfachte Geometrie des Fensters kann Abbildung 5.5 entnommen werden.

In Abbildung 5.5a ist die verwendete Fenstergeometrie dargestellt. Verglichen mit dem realen Fenstereinsatz ist ein Modellierungsfehler der Fläche 3 zu erkennen. Angepasst an die reale Geometrie ist das korrekte Modell in Abbildung 5.5b dargestellt. Da dieser Fehler erst nach Durchführung der Model-Updatings 2 und 3 entdeckt wurde, basieren die nachfolgend beschriebenen Ergebnisse auf der fehlerhaften Geometrie. Durch eine Kontrollrechnung mit der korrigierten Geometrie kann sichergestellt werden, dass dieser Modellierungsfehler die Simulationsergebnisse nicht maßgeblich beeinflusst. Die abgeleiteten Schlussfolgerungen haben somit dennoch Gültigkeit. Aus diesem Grund werden die erzielten Ergebnisse verwendet.

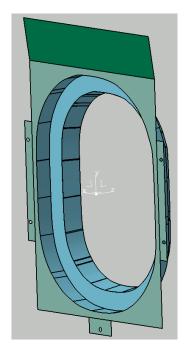
Neben dem CAD-Modell des Fenstereinsatzes wird für die Simulation eine vollständige Baugruppe benötigt, die das Seitenwandpaneel sowie die Fenstereinsätze und ihre Positionierung relativ zueinander beinhaltet. Die dafür nötigen Baugruppendefinitionen, die die Positionierung der Fenstereinsätze relativ zu dem Seitenwandpaneel festlegen, werden unter Verwendung vorher erzeugter Hilfsebenen, die an den Konturen der Fensterausschnitte orientiert sind, erzeugt. Zur Ausrichtung des Fensters, entsprechend der Position der fünf Schraubenverbindungen, wird die Position der unteren Schraubenverbindung als weitere Referenz für die Baugruppendefinition verwendet.

5.5.2 Modellaufbau

Für die Simulation des dynamischen Verhaltens unter Verwendung des FE-Modells muss das Material, aus dem die Fenstereinsätze hergestellt sind, definiert werden.



(a) Verwendete Geometrie der Fenstereinsätze



(b) An das reale Bauteil angepasste Geometrie

Abbildung 5.5 In den Model-Updatings 2 und 3 verwendete vereinfachte Fenstergeometrie

Da das reale Material unbekannt ist, werden die in Tabelle 5.3 dargestellten Kennwerte für das Referenzdesign verwendet. Diese entsprechen denen des ABS-Kunststoffs des Herstellers noltewerk GmbH & Co.KG [nol]. Da die Querkontraktionszahl nicht angegeben ist, wird diese zu Beginn auf 0,4 geschätzt. Dieser Wert entspricht einem für Polymere typischen [Mer25].

Tabelle 5.3 Model-Updating 2: Übersicht über die berücksichtigten Modellparameter sowie die ermittelten Sensitivitätswerte (CoP bezüglich des C_{12} -Kriteriums, CoP bezüglich des C_3 -Kriteriums)

Parameter	Referenz- konfigu- ration	Zulässiger Wertebereich	СоР	Optimierte Konfigurati- on
Wandstärke	7,0 mm	2,0 mm bis 9,0 mm	64,1 % 54,5 %	2,2 mm
Dichte Polymer	1040 kg m ⁻³ 9		8,1 % 52,0 %	2359,1 kg m ⁻³
E-Modul Polymer	2,2·10 ⁹ Pa	2,0 · 10 ⁹ Pa bis 2 · 10 ⁴ Pa		2,21 · 10 ⁹ Pa
Querkontrak- tionszahl Polymer	0,4	0,36 bis 0,44		0,4
Verbindungsstei- figkeit 1D Federelemente	2·10 ¹⁰ N m ⁻¹	2·10 ⁹ N m ⁻¹ bis 2·10 ¹⁰ N m ⁻¹		2·10 ¹⁰ N m ⁻¹

Im Modellaufbau werden neben der Definition der Wandstärke zu 7,0 mm auch die Verbindungselemente, die die Schraubenverbindungen repräsentieren, definiert. Als Verbindungselemente werden zunächst 1D Federelemente mit definierter Steifigkeit in Längsrichtung verwendet. Die Längsrichtung entspricht dabei der Flächennormalen der Fläche 1 des Fenstereinsatzes (siehe Abbildung 5.5a). In der Definition muss ein Referenzelement sowie das zugehörige mobile Element definiertet werden. Das mobile Element entspricht der Kontur der Durchgangslöcher im Fenstereinsatz. Für die Definition des Referenzelements wird die Kontur der Durchgangslöcher senkrecht zur Fläche 1 auf die Oberfläche des Seitenwandpaneels projiziert. Auf diese Weise entsteht die gewünschte Abhängigkeit der Relativbewegungen zwischen beiden Bauteilen. Zum besseren Verständnis ist ein Beispiel der Definition im Anhang C in Abbildung C.2 dargestellt. Zu Beginn wird die Federsteifigkeit der Verbindungselemente auf 2·10¹⁰ N m⁻¹ festgelegt, da davon ausgegangen wird, dass die Schraubenverbindungen steife Verbindungen sind.

Das beschriebene Modell mit den zugehörigen Modellparametern wird im Folgenden als Referenzkonfiguration bezeichnet. Die Parameter dieser Referenzkonfiguration sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst dargestellt.

5.5.3 Variable Parameter

Im Allgemeinen ist das Ziel des Model-Updatings trotz der mit großen Unsicherheiten behafteten Modellparameter, eine möglichst gute Abbildung des realen Schwingungsverhaltens zu erreichen. Die unbekannten und damit mit Unsicherheit behafteten Modellparameter sind die Verbindungssteifigkeit, die Wandstärke des Fenstereinsatzes, der E-Modul des Polymers, die Querkontraktionszahl des Polymers sowie die Dichte des Polymers. Alle diese Parameter werden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse als variabel betrachtet.

Zur Durchführung der Sensitivitätsanalyse muss für jeden der gewählten Parameter ein zulässiger Wertebereich definiert werden. Alle Parameter und die zugeordneten zulässigen Wertebereiche sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst dargestellt.

E-Modul und Querkontraktionszahl werden, wie von Ansys optiSlang 2024 R2 vorgeschlagen, um 10 % nach oben und unten variiert. Auf diese Weise folgt der Wertebereich von 2·109 Pa bis 2,4·109 Pa für den E-Modul und von 0,36 bis 0,44 für die Querkontraktionszahl.

Die homogenisierte Wandstärke wird im Bereich von 2 mm bis 9 mm variiert. Die untere Grenze folgt aus der Beobachtung, dass die Wandstärken im realen Fenstereinsatz nicht konstant sind. Die geringste Wandstärke des realen Bauteils ist im Bereich der Fläche 3 zu finden und beträgt 1,8 mm (siehe Abbildung 5.5). Wird die deutlich höhere Wandstärke im Bereich der Fläche 1 von 7 mm berücksichtigt, ist davon auszugehen, dass die minimal zulässige homogenisierte Wandstärke höher sein muss als 1,8 mm. Die obere Grenze ist unter Berücksichtigung, dass der Bereich der Fläche 1 im realen Bauteil doppelwandig und nicht aus Vollmaterial hergestellt ist und die resultierende Wandstärke dadurch kleiner als 7 mm ist, sehr hoch gewählt. Dies dient der Evaluation der Auswirkungen hoher Wandstärken auf das Systemverhalten. Die Grenzen des Wertebereichs der Dichte des Polymers orientiert sich an dem Wertebereich

der Wandstärken und der Masse des Fenstereinsatzes. Im Fall der größten zulässigen Wandstärke muss die Dichte 630 kg m⁻³ betragen, um die Masse von 0,84 kg zu erreichen. Wird hingegen die kleinste zulässige Wandstärke angenommen, so ist eine Dichte von 2835,2 kg m⁻³ nötig. Der Wertebereich der Dichte wird daher zu 630 kg m⁻³ bis 2840 kg m⁻³ gewählt.

Die Steifigkeit, mit der die Schraubenverbindungen modelliert werden müssen, um eine realistische Simulation des realen Schwingungsverhaltens zu ermöglichen, ist ebenfalls unbekannt. Wie vorher beschrieben, wird davon ausgegangen, dass es sich um steife Verbindungen handelt. Um diese Hypothese zu überprüfen, wird der zulässige Wertebereich der Federsteifigkeit zu 2,2·10⁹ N m⁻¹ bis 2·10¹⁰ N m⁻¹ gewählt. Wird in der Sensitivitätsanalyse ein großer Einfluss der Federsteifigkeit festgestellt, wird dieser Wertebereich in einem zweiten Schritt erweitert. Es wird außerdem davon ausgegangen, dass alle Schraubenverbindungen dieselbe Steifigkeit besitzen.

5.5.4 Simulationsergebnisse des Schwingungsverhaltens vor der Optimierung

Die Simulation des Schwingungsverhaltens unter Verwendung der in Tabelle 5.3 dargestellten Referenzkonfiguration führt auf die in Abbildung 5.6a dargestellte MAC-Matrix. Es ist zu erkennen, dass lediglich die experimentell bestimmten Moden mit den Eigenfrequenzen 22,2 Hz und 163,5 Hz nicht durch die Simulation abgebildet werden können.

Die Moden mit den Eigenfrequenzen 58,8 Hz, 72,8 Hz, 119,1 Hz, 165,7 Hz und 166,8 Hz können dabei nur mit sehr geringer Genauigkeit (MAC-Wert kleiner als 0,5) abgebildet werden. In den Frequenzbereichen 58,8 Hz bis 72,8 Hz und 158,9 Hz bis 168,8 Hz sind Einträge auf den Nebendiagonalen vorhanden. Diese entsprechen jedoch nicht dem nach Abbildung 3.7 zu erwartenden Muster. Außerdem sind diese Einträge nicht symmetrisch. Im Frequenzbereich 24,4 Hz bis 29,0 Hz entsprechen die Einträge auf den Nebendiagonalen ebenfalls nicht den erwarteten. Bei der Mode mit Eigenfrequenz 119,1 Hz sind hingegen Einträge auf den ersten Nebendiagonalen zu finden, die in der Auto-MAC-Matrix nicht zu beobachten sind.

Die Frequenzabweichungen der simulierten gegenüber den experimentell bestimmten Eigenfrequenzen sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass die simulierten Eigenfrequenzen, die den experimentellen Moden mit Eigenfrequenzen 119,1 Hz, 133,9 Hz, 160,0 Hz, 165,7 Hz und 178,6 Hz, zugeordnet sind, um mehr als 10 Hz abweichen. Zusätzlich weisen die simulierten Moden, die den experimentell bestimmten Moden bei 10,8 Hz, 24,4 Hz, 29,0 Hz und 72,8 Hz zugeordnet werden, eine prozentuale Abweichung von mehr als 10 % auf. Für die genannten Moden wird daher durch das Model-Updating eine Verbesserung der simulierten Eigenfrequenzen angestrebt. Die Modellierung der Fenstergeometrie sowie Verwendung der Federelemente führt verglichen mit dem Model-Updating 1 zu einer deutlichen Verbesserung der Simulationsergebnisse. Die experimentell bestimmte Mode mit der Eigenfrequenz 72,8 Hz kann abgebildet werden. Außerdem sind Moden mit Eigenfrequenzen über 94,8 Hz in der Simulation abbildbar. Auch hinsichtlich der Einträge auf den Nebendiagonalen ist eine Verbesserung zu erreichen. Die Ergänzung der Fenstereinsätze führt folglich insgesamt zu einer Verbesserung der Simulationsergebnisse.

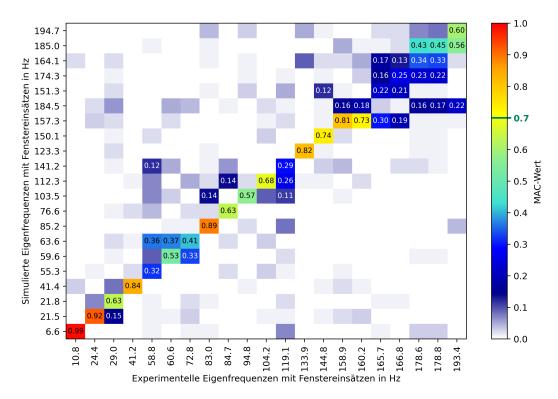
Tabelle 5.4 Model-Updating 2: Frequenzabweichung der simulierten Eigenfrequenzen in der Referenzkonfiguration $f_{sim,ref}$ und der optimierten Konfiguration $f_{sim,opti}$ von den experimentell bestimmten Eigenfrequenzen f_{exp} (absolute Frequenzabweichung \geq 10 Hz, prozentuale Frequenzabweichung \geq 10 %)

f_{exp} in Hz	$egin{array}{c} f_{sim,ref} \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \$	Δ in Hz	Δ in %	$f_{sim,opti}$ in Hz	Δ in Hz	Δ in %
10,8	6,60	-4,20	-38,89	6,10	-4,70	-43,52
24,4	21,50	-2,90	-11,89	26,60	2,20	9,02
29,0	21,80	-7,20	-24,83	30,50	1,50	5,17
41,2	41,40	0,20	0,49	40,50	-0,70	-1,70
58,8	55,30	-3,50	-5,95	69,50	10,70	18,20
60,6	59,60	-1,00	-1,65	68,20	7,60	12,54
72,8	63,60	-9,20	-12,64	68,40	-4,40	-6,04
83,0	85,20	2,20	2,65	87,40	4,40	5,30
84,7	76,60	-8,10	-9,56	86,70	2,00	2,36
94,8	103,50	8,70	9,18	92,80	-2,00	-2,11
104,2	112,30	8,10	7,77	104,10	-0,10	-0,10
119,1	141,20	22,10	18,56	119,10	0,00	0,00
133,9	123,30	-10,60	-7,92	125,50	-8,40	-6,27
144,8	150,10	5,30	3,66	147,10	2,30	1,59
158,9	157,30	-1,60	-1,01	153,00	-5,90	-3,71
160,2	184,50	24,30	15,17	155,60	-4,60	-2,87
165,7	151,30	-14,40	-8,69	141,30	-24,40	-14,73
166,8	174,30	7,50	4,50	167,70	0,90	0,54
178,6	164,10	-14,50	-8,12	170,20	-8,40	-4,70
178,8	185,00	6,20	3,47	171,20	-7,60	-4,25
193,4	194,70	1,30	0,67	194,80	1,40	0,72

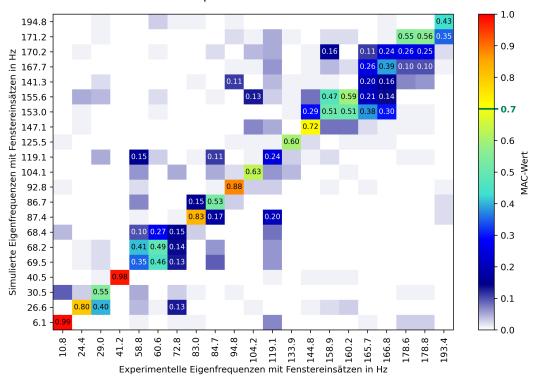
5.5.5 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse und anschließenden Optimierung

Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse zeigt, dass von den gewählten Parametern (siehe Abschnitt 5.3) lediglich die Dichte des Polymers und die Wandstärke Einfluss auf das C_{12} - und das C_3 -Kriterium haben. Der CoP des Ersatzmodells bezüglich des C_{12} -Kriteriums liegt bei 67,0 %. Das Ersatzmodell das Verhalten des C_{12} -Kriteriums folglich mit einer Genauigkeit von 67,0 % abbilden. Der Einfluss der einzelnen Parameter kann Tabelle 5.3 entnommen werden. Dabei ist der Einfluss bezüglich des C_{12} -Kriterium in hellblau und der Einfluss auf das C_3 -Kriterium in dunkelgrün dargestellt. Aus dem Einfluss der Modellparameter kann abgeleitet werden, dass die Variation der Steifigkeit der Federelemente keinen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat. Es wird daher davon ausgegangen, dass es sich bei dem in der Referenzkonfiguration angenommenen Wert um eine realistische Annahme handelt. Eine weitere Untersuchung der Steifigkeit ist nicht erforderlich.

Der CoP des Ersatzmodells bezüglich des C_3 -Kriteriums beträgt 100 %, wobei der Einfluss der Wandstärke und der der Dichte annähernd gleich groß ist. Das C_3 -Kriterium



(a) MAC-Matrix: Vergleich der simulierten Moden in der Referenzkonfiguration mit den experimentell bestimmten



(b) MAC-Matrix: Vergleich der simulierten Moden in der optimierten Konfiguration mit den experimentell bestimmten

Abbildung 5.6 Model-Updating 2: Vergleich der MAC-Matrix vor (Referenzkonfiguration) und nach (optimierte Konfiguration) dem Model-Updating

hängt damit annähernd gleich stark von der Wandstärke und der Dichte ab und kann durch das Ersatzmodell sehr genau abgebildet werden.

Das erstellte Ersatzmodell wird in der anschließenden Optimierung verwendet, um für das vorliegende Modell das bestmögliche Design zu ermitteln. Alle Parameter, die gemäß der Sensitivitätsanalyse keinen Einfluss haben, werden als konstant angenommen und ihnen wird die zu Beginn definierten Referenzwerte zugeordnet (siehe Tabelle 5.3). Nach Abschluss der Optimierung werden alle besten Designs auf Basis der Pareto-Front ausgewählt und 20 dieser Designs durch Lösung des FE-Modells validiert. Die Pareto-Front ist in Abbildung 5.7 rot dargestellt. Die durch Validierung berechneten Datenpunkte sind grün hervorgehoben. Es ist zu erkennen, dass die tatsächlichen Werte der beiden Kriterien, die das FE-Modell für die validierten Designs annimmt, bezüglich des C_{12} -Kriteriums geringer, folglich besser, sind (die besten, mit dem Ersatzmodell berechneten Designs liegen auf der Pareto-Front). Diese Abweichung kann dadurch erklärt werden, dass das Ersatzmodell das tatsächliche Verhalten des FE-Modells lediglich mit einer Genauigkeit von 67 % abbildet.

Bei Betrachtung der Pareto-Front zeigt sich außerdem, dass die Minimierung des C_{12} -Kriteriums zu einem Anstieg des C_{3} -Kriteriums führt. Es muss folglich ein Kompromiss gefunden werden zwischen der Minimierung der Abweichung der Fenstermasse von der realen und der Genauigkeit, mit der die Schwingformen abgebildet werden können.

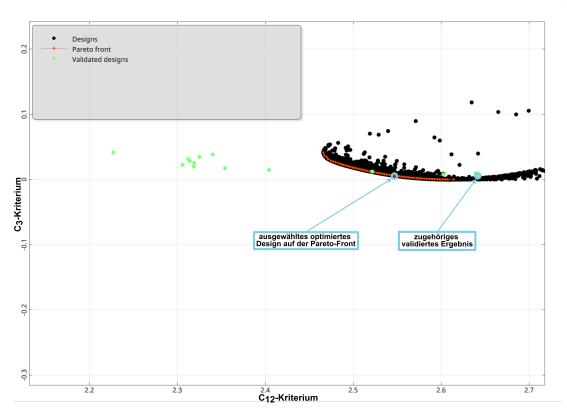


Abbildung 5.7 Pareto-Front der Optimierung des Model-Updatings 2

Aus der Optimierung wird das Design Nr. 2969 als bestmögliches Design ausgewählt. In der Pareto-Front sind noch weitere validierte Ergebnisse mit geringem Wert des C_3 - und des C_{12} -Kriteriums zu sehen. Bei diesen Designs weicht die Masse der Fenstereinsätze um mehr als 10 % von der Zielmasse ab. Aus diesem Grund wird das ge-

nannte Design ausgewählt.

Die Modellparameter dieses Designs sind in Tabelle 5.3 in der Spalte "Optimierte Konfiguration" zusammengefasst. Die resultierende Masse des Fensters beträgt 0,765 kg und weicht somit um 9 % von der Zielmasse von 0,84 kg ab. Der Wert, den das C_{12} -Kriterium für dieses Design annimmt, ist 2,64. Für die Referenzkonfiguration beträgt der Wert 3,7. Es kann durch dieses Model-Updating folglich eine Verbesserung der Simulation des realen Schwingungsverhaltens erreicht werden.

Bei Betrachtung der MAC-Matrix vor und nach der Optimierung fällt auf, dass die Werte, die das C_{12} -Kriterium annimmt, nur dann erzielt werden können, wenn verschiedene Frequenzbereiche durch das automatische Mode-Pairing zugeordnet werden. Vor der Optimierung wird der Frequenzbereich bis 160,2 Hz automatisch zugeordnet (nicht zugeordnete Moden: 22,2 Hz). Während der Sensitivitätsanalyse und Validierung der Optimierungsergebnisse wird lediglich der Frequenzbereich bis 119,0 Hz (nicht zugeordnete Moden: 22,2 Hz und 104,2 Hz) im Mode-Pairing berücksichtigt. Die Durchführung eines manuellen Mode-Pairings für beide Konfigurationen zeigt, dass mit den definierten Mode-Pairing Einstellungen (siehe 4.1.2) alle experimentellen Moden außer 22,2 Hz und 163,5 Hz in der MAC-Matrix zugeordnet werden müssten. Dies ist während der Sensitivitätsanalyse allerdings nicht der Fall. Grund hierfür ist, dass das erste Design, das im Rahmen der Sensitivitätsanalyse berechnet wird, als Referenz für alle folgenden Berechnungen dient. Können für dieses erste Design nicht alle Moden zugeordnet werden, so werden im Verlauf der Sensitivitätsanalyse ausschließlich die zugeordneten Moden, für das Mode-Pairing verwendet. Auf diese Weise wird die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sichergestellt. Ein Vergleich des C_{12} -Kriteriums nach dem manuellen Mode-Pairing zeigt, dass die Konfiguration nach der Optimierung einen Wert von 5,4 und vorher von 5,43 hat. Die Optimierung hat folglich bei Betrachtung der Einträge auf der Hauptdiagonalen und der simulierten Eigenfrequenzen für alle zugeordneten Moden lediglich geringe Auswirkungen auf die Genauigkeit, mit der das Schwingungsverhalten simuliert werden kann. Auffällig ist zudem, dass einige der experimentell bestimmten Moden (24,4 Hz, 29,0 Hz, 72,8 Hz, 83,0 Hz, 84,7 Hz, 104,2 Hz, 113,9 Hz, 144,8 Hz und 193,4 Hz) nach der Optimierung verschlechtert abgebildet sind (siehe Abbildung 5.6). Dies ist durch einen geringeren MAC-Wert auf der Hauptdiagonalen gekennzeichnet. Die übrigen Moden zeigen entweder nur geringe Abweichungen oder sind verbessert abgebildet. Trotz der Verschlechterung der Hauptdiagonaleinträge findet keine große Veränderung des C_{12} -Kriteriums statt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die simulierten Eigenfrequenzen deutlich geringere Abweichungen zu den experimentell bestimmten aufweisen (siehe Tabelle 5.4). Lediglich die experimentell bestimmten Moden mit Eigenfrequenzen von 58,8 Hz und 165,7 Hz weisen eine Frequenzabweichung von mehr als 10 Hz auf. Die Moden bei 10,8 Hz und 60,6 Hz weisen eine Frequenzabweichung von mehr als 10 % auf.

Neben den Hauptdiagonaleinträgen sind auch die Einträge auf den Nebendiagonalen relevant, da gemäß der Auto-MAC-Matrix (siehe Abbildung 3.7) zwischen einigen der experimentellen Moden Ähnlichkeiten bestehen. Diese Ähnlichkeiten müssen durch die Simulation abgebildet werden, wenn das Ziel eine möglichst exakte Repräsentation des realen Schwingungsverhaltens ist. Verglichen mit den Einträgen auf den Nebendiagonalen der Referenzkonfiguration kann durch das Model-Updating für die Moden von 58,8 Hz bis 72,8 Hz und von 158,9 Hz bis 166,8 Hz eine Verbesserung der vorhandenen Nebendiagonaleinträge erreicht werden. Allerdings fehlen in dem Fre-

quenzbereich von 158,9 Hz bis 160,2 Hz die Nebendiagonaleinträge der simulierten Moden, die zu 165,7 Hz und 166,8 Hz zugeordnet werden. Zudem sind die Nebendiagonaleinträge weiterhin nicht symmetrisch. Die Abweichung der Symmetrie und die fehlenden Nebendiagonaleinträge können auf die ungenaue Abbildung der experimentellen Moden durch die Simulation zurückzuführen sein, sodass eine Optimierung der Hauptdiagonaleinträge auch zu einer Verbesserung der Nebendiagonaleinträge führt.

Unter Berücksichtigung des durch die Sensitivitätsanalyse erzielten Ersatzmodells und der aus der Optimierung resultierenden Pareto-Front kann mit dem hier verwendeten Modell keine weitere Verbesserung des Simulationsergebnisses erwartet werden. Um eine Verbesserung des C_{12} -Kriteriums für das vorliegende Modell zu erreichen, muss die Vorgabe der Masse für die Fenstereinsätze, die sich aus dem realen System ergibt, verletzt werden. Der CoP Wert des Ersatzmodells bezüglich des C_{12} -Kriteriums von 67,0 % deutet zudem darauf hin, dass in dem vorliegenden System bisher nicht alle relevanten Parameter, die das Schwingungsverhalten beeinflussen, enthalten sind. Das Modell muss im Folgenden daher erweitert werden, um verbesserte Simulationsergebnisse zu erzielen.

Zur Bestimmung der möglichen Erweiterung wird die Schwingungsmode betrachtet, die der experimentellen bei 193,4 Hz zuzuordnen ist, weil diese nach der Optimierung verschlechtert abgebildet wird. Die Betrachtung der Schwingungsmode im Bereich der Fenstereinsätze zeigt, dass die Fenstereinsätze eine Relativbewegung in x- und y-Richtung zu dem Seitenwandpaneel aufweisen (siehe Abbildung D.1 im Anhang D). Diese Freiheitsgrade werden durch die 1D Federelemente nicht eingeschränkt, welche in der folgenden Optimierung angepasst werden. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Steifigkeit der Verbindungselemente, wenn eine sehr hohe Steifigkeit angenommen wird, keine Auswirkung auf das Schwingungsverhalten hat. Daher wird für die nachfolgende Modellierung von einer in alle Raumrichtungen fixierten Verbindung ausgegangen.

Eine weitere Vereinfachung in dem hier verwendeten Modell ist die Annahme einer konstanten Wandstärke des Fenstereinsatzes. Im realen Bauteil sind unterschiedliche Wandstärken festzustellen. Da die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass bisher nicht alle relevanten Parameter berücksichtigt werden, wird die Wandstärke für die weitere Betrachtung bereichsweise verschieden definiert. Die Definition orientiert sich dabei an dem realen Bauteil.

Hypothese:

Die Berücksichtigung bereichsweise verschiedener Wandstärken und die Modellierung der Schraubenverbindungen als fixierte Verbindungen führt zu einer verbesserten Abbildung des realen Schwingungsverhaltens.

5.6 Model-Updating 3: Nicht konstante Wandstärke der Fenstergeometrie und Modellierung der Schrauben als fixierte Verbindungen

In diesem Abschnitt werden in dem Modell die Schraubenverbindungen angepasst und bereichsweise verschiedene Wandstärken des Fenstereinsatzes definiert. Auf diese Weise kann die aus den Beobachtungen des Model-Updatings 2 resultierende Hypothese überprüft werden.

5.6.1 Modellaufbau

Die Geometrie der Fenstereinsätze sowie die Baugruppendefinitionen werden nicht verändert und entsprechen demnach den in Abschnitt 5.5.1 beschriebenen. Im Modellaufbau wird der Verbindungstyp der Verbindungselemente zu fixierten Verbindungen verändert (Definition: siehe Abbildung C.3 im Anhang C). Die Definition des Referenzelements und des mobilen Elements wird beibehalten.

Um eine bereichsweise Definition der verschiedenen Wandstärken zu realisieren, wird das Composite PrepPost (ACP) Setup verwendet. Dieses Vorgehen ermöglicht die Verwendung der Geometrie als eine zusammenhängende Fläche, sodass keine weiteren Kontaktbedingungen zwischen den Bereichen definiert werden müssen.

Die in Abbildung 5.5 farblich gleich gekennzeichneten Bereiche Fläche 1, Fläche 2 und Fläche 3 werden mit einer jeweils konstanten Wandstärke versehen, da diese Bereiche im realen Bauteil näherungsweise dieselbe Wandstärke haben. Dabei ist anzumerken, dass die Wandstärke im Bereich der Fläche 3 im realen Bauteil nicht konstant ist. In der vereinfachten Modellierung wird dennoch von einer konstanten Wandstärke ausgegangen. Die für die Referenzkonfiguration verwendeten Wandstärken sind Tabelle 5.5 zu entnehmen. Dabei entspricht die Wandstärke von 1,8 mm im Bereich der Fläche 3 der am realen Bauteil bestimmten. Die Wandstärke der anderen Bereiche basiert auf der am realen Bauteil zu sehenden doppelwandigen Ausführung sowie der Annahme einer durchgängig gleichen Wandstärke.

Das zugeordnete Material entspricht dem vorher definierten Polymer (siehe Abschnitt 5.5.2). Dabei erfolgt eine Anpassung der Dichte an die gewählten Wandstärken, sodass die Referenzkonfiguration die Zielmasse der Fenstereinsätze von 0,84 kg aufweist. Die dafür benötigte Dichte beträgt 2270 kg m⁻³.

Tabelle 5.5 Model-Updating 3: Übersicht über die berücksichtigen Modellparameter sowie die ermittelten Sensitivitätswerte (CoP bezüglich des C_{12} -Kriteriums, CoP bezüglich des C_3 -Kriteriums)

Parameter	Referenz- konfigu- ration	Zulässiger Wertebereich		
Wandstärke	3,6 mm	1,5 mm bis	8,4 %	7,03 mm
Fläche 1	3,011111	7,5 mm	17,3 %	7,05 11111
Wandstärke	3,6 mm	1,5 mm bis	7,4 %	1,56 mm
Fläche 2	3,011111	7,5 mm	6,9 %	1,50 11111
Wandstärke	1,8 mm	0,5 mm bis	15,5 %	1,9 mm
Fläche 3	1,6111111	3,5 mm	27,6 %	1,911111
		1040 kg m ⁻³	28 7 %	
Dichte Polymer	2270 kg m ⁻³	bis	28,7 % 50,6 %	2359,1 kg m ⁻³
		2500 kg m ⁻³	50,0 /0	

Parameter	Referenz- konfigu- ration	Zulässiger Wertebereich	СоР	Optimierte Konfigurati- on
E-Modul Polymer	2,2·10 ⁹ Pa	1,99 · 10 ⁹ Pa bis 2,43 · 10 ⁹ Pa		2,21·10 ⁹ Pa
Querkontrak- tionszahl Polymer	0,4	0,36 bis 0,44		0,4

5.6.2 Variable Parameter

Während der Sensitivitätsanalyse werden alle Materialparameter sowie Wandstärken als variabel angenommen. Die Sensitivitätsanalyse aus dem Model-Updating 2 (siehe Abschnitt 5.5.5) zeigt, dass für das angenommene Modell lediglich Dichte und Wandstärke einen Einfluss haben. Die zulässigen Wandstärken sind insbesondere im Bereich der Fläche 3 in dem hier beschriebenen Modell deutlich geringer. Um auszuschließen, dass durch die geringeren Wandstärken ein relevanter Einfluss der Materialparameter entsteht, werden alle Materialparameter ein weiteres Mal als variabel angenommen. Der E-Modul und die Querkontraktionszahl werden dazu wiederholt, wie von Ansys optiSlang 2024 R2 vorgeschlagen, um 10 % in beide Richtungen variiert. Für die untere Grenze des Wertebereichs der Dichte wird, abgeleitet aus dem Model-Updating 2, die für den ABS-Kunststoff ermittelte Dichte verwendet. Die obere Grenze entspricht einer Variation von 10 %. Der Wertebereich wird folglich in diesem Model-Updating nicht an den Wandstärken und der Zielmasse orientiert. Grund hierfür ist, dass wenn in allen Bereichen die minimal zulässigen Wandstärken angenommen werden, eine Dichte von 6400 kg m⁻³ benötigt wird, um die Zielmasse zu erreichen. Dies ist ein unrealistisch hoher Wert für ein Polymer, sodass die Variation um 10 % als sinnvoller erachtet wird. Dadurch werden außerdem unrealistisch hohe Fenstermasse bei hoher Wandstärke vermieden und physikalisch sinnvolle Ergebnisse sichergestellt. Der Wertebereich, in dem die Wandstärken variiert werden, orientiert sich an der Referenzkonfiguration. Die Sensitivitätsanalyse des Model-Updatings 2 aus dem Abschnitt 5.5.5 zeigt, dass die Wandstärke einen entscheidenden Einfluss auf das Schwingungsverhalten des Seitenwandpaneels und damit das erstellte Ersatzmodell hat. Um diesen Einfluss detaillierter abbilden zu können, werden die Grenzen der Wertebereiche der Wandstärken größer gewählt, auch wenn dies bezüglich der Fenstermasse zu unrealistischen Ergebnissen führen kann. Alle in diesem Abschnitt beschriebenen Wertebereiche sind in Tabelle 5.5 zusammengefasst dargestellt.

5.6.3 Simulationsergebnisse des Schwingungsverhaltens vor dem Model-Updating

In Abbildung 5.8a ist die MAC-Matrix, die unter Verwendung der Referenzkonfiguration mit dem beschriebenen Simulationsmodell berechnet werden kann, dargestellt. Da das Model-Updating 2 (siehe Abschnitt 5.5) zu einer Verbesserung der Simulationsergebnisse geführt hat, wird die optimierte Konfiguration dieses Model-Updatings zu

einer ersten Bewertung der vorgenommenen Anpassungen verwendet.

Der Vergleich von der MAC-Matrix aus Abbildung 5.8a mit dem Optimierungsergebnis aus dem Model-Updating 2 in Abbildung 5.6b zeigt, dass die experimentell bestimmten Moden mit den Eigenfrequenzen 24,4 Hz, 29,0 Hz,58,8 Hz, 60,6 Hz, 83,0 Hz, 104,2 Hz, 119,1 Hz, 133,9 Hz, 144,8 Hz, 158,8 Hz, 178,6 Hz und 193,4 Hz nun verbessert abgebildet werden können. Dabei werden 10 von 19 Moden mit einer Genauigkeit von mehr als 70 % abgebildet. Insgesamt führt dies zu einem Wert des C_{12} -Kriteriums von 3,96.

Allerdings fehlen in der MAC-Matrix des automatischen Mode-Pairings der Referenzkonfiguration des hier beschriebenen Model-Updatings die experimentell bestimmten Moden mit den Eigenfrequenzen 22,2 Hz, 160,2 Hz und 178,8 Hz. Wie im Abschnitt 3.3 beschrieben, sind die Moden mit den Eigenfrequenzen 178,6 Hz und 178,8 Hz nahezu identisch. Das Schwingungsverhalten der Mode bei 178,8 Hz kann folglich durch dieselben Moden in der Simulation abgebildet werden, wie die Mode bei 178,6 Hz. Aus diesem Grund wird das Fehlen dieser Mode als vernachlässigbar angesehen. In keinem der beiden vorangegangenen Model-Updatings kann die Mode mit der Eigenfrequenz 22,2 Hz abgebildet werden. Zudem werden die Einträge auf den Nebendiagonalen auch weiterhin nicht wie erwartet abgebildet.

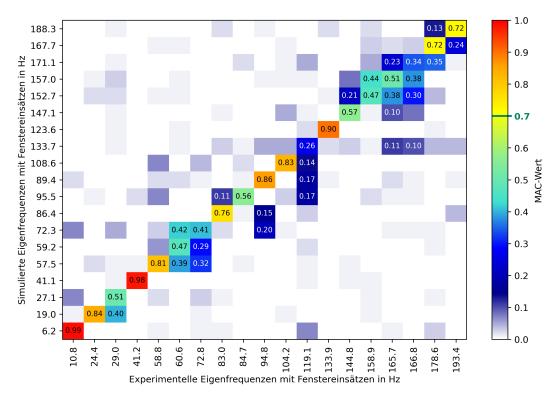
Tabelle 5.6 zeigt, dass für 4 von 19 simulierten Moden eine Frequenzabweichung von mehr als 10 Hz verglichen mit den experimentell bestimmten vorliegt. Drei weitere simulierte Moden weisen eine Frequenzabweichung von mehr als 10 % auf. Das Ziel des Model-Updatings ist, diese Frequenzabweichungen zu minimieren.

5.6.4 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse und der anschließenden Optimierung

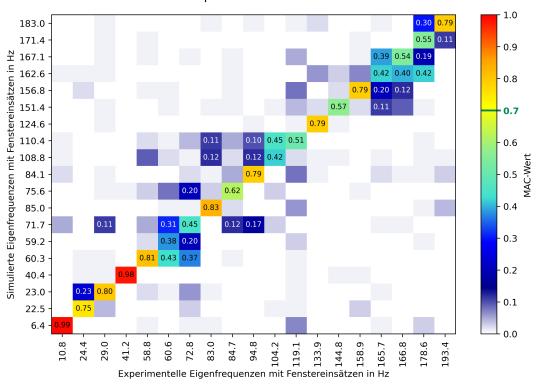
Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse zeigt, dass von den variablen Parametern lediglich die Dichte des Materials sowie die verschiedenen Wandstärken einen Einfluss auf die beiden gewählten Optimierungskriterien C_{12} und C_3 haben. Damit wird das Verhalten aus dem letzten Model-Updating 2 bestätigt und es kann davon ausgegangen werden, dass auch bei geringen Wandstärken kein relevanter Einfluss der Materialparameter auf das Schwingungsverhalten vorhanden ist. Der Gesamt-CoP des Ersatzmodells bezüglich des C_{12} -Kriteriums liegt bei 50,09 %. Der Einfluss der Dichte sowie der verschiedenen Wandstärken auf dieses Kriterium können Tabelle 5.5 entnommen werden (hellblau dargestellt). Es ist zu erkennen, dass die Dichte des Polymers sowie die Wandstärke im Bereich der Fläche 3 größeren Einfluss auf das C_{12} -Kriterium haben als die beiden übrigen Wandstärken.

Bezüglich des C_3 -Kriteriums hat das Ersatzmodell wie erwartet einen Gesamt-CoP von 100 %. Dabei haben alle Wandstärken addiert annähernd gleich großen Einfluss wie die Dichte (in Tabelle 5.5 in dunkelgrün hervorgehoben).

Das ermittelte Ersatzmodell wird in der Optimierung verwendet, um für das vorliegende Simulationsmodell ein optimales Design zu ermitteln. Alle Parameter, die gemäß der Sensitivitätsanalyse keinen Einfluss auf die Optimierungskriterien haben, werden als konstant angenommen. Ihnen wird derselbe Wert, wie in der in Abschnitt 5.6.1 beschriebenen Referenzkonfiguration, zugewiesen. Nach Abschluss der Optimierung werden die besten Designs auf Basis der Pareto-Front ausgewählt. Die Pareto-Front



(a) MAC-Matrix: Vergleich der simulierten Moden in der Referenzkonfiguration mit den experimentell bestimmten



(b) MAC-Matrix: Vergleich der simulierten Moden in der optimierten Konfiguration mit den experimentell bestimmten

Abbildung 5.8 Model-Updating 3: Vergleich der MAC-Matrix vor (Referenzkonfiguration) und nach (optimierte Konfiguration) dem Model-Updating

Tabelle 5.6 Model-Updating 3: Frequenzabweichung der simulierten Eigenfrequenzen in der Referenzkonfiguration $f_{sim,ref}$ und der optimierten Konfiguration $f_{sim,opti}$ von den experimentell bestimmten Eigenfrequenzen f_{exp} (absolute Frequenzabweichung \geq 10 Hz, prozentuale Frequenzabweichung \geq 10 %)

f_{exp} in Hz	$f_{sim,ref}$ in Hz	Δ in Hz	Δ in %	$f_{sim,opti}$ in Hz	Δ in Hz	Δ in %
10,8	6,20	-4,60	-42,59	6,40	-4,40	-40,74
24,4	19,00	-5,40	-22,13	22,50	-1,90	-7,79
29,0	27,10	-1,90	-6,55	23,00	-6,00	-20,69
41,2	41,10	-0,10	-0,24	40,40	-0,80	-1,94
58,8	57,50	-1,30	-2,21	60,30	1,50	2,55
60,6	59,20	-1,40	-2,31	59,20	-1,40	-2,31
72,8	72,30	-0,50	-0,69	71,70	-1,10	-1,51
83,0	86,40	3,40	4,10	85,00	2,00	2,41
84,7	95,50	10,80	12,75	75,60	-9,10	-10,74
94,8	89,40	-5,40	-5,70	84,10	-10,70	-11,29
104,2	108,60	4,40	4,22	108,80	4,60	4,41
119,1	133,70	14,60	12,26	110,40	-8,70	-7,30
133,9	123,60	-10,30	-7,69	124,60	-9,30	-6,95
144,8	147,10	2,30	1,59	151,40	6,60	4,56
158,9	152,70	-6,20	-3,90	156,80	-2,10	-1,32
165,7	157,00	-8,70	-5,25	162,60	-3,10	-1,87
166,8	171,10	4,30	2,58	167,10	0,30	0,18
178,6	167,70	-10,90	-6,10	171,40	-7,20	-4,03
193,4	188,30	-5,10	-2,64	183,00	-10,40	-5,38

ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine Minimierung des C_{12} -Kriteriums zu einem deutlichen Anstieg des C_3 -Kriteriums führt. Dieses Verhalten kann in der Pareto-Front des vorhergegangenen Model-Updatings ebenfalls beobachtet werden (siehe Abschnitt 5.5.5). 20 der mit Hilfe der Pareto-Front bestimmten besten Designs werden unter Verwendung des FE-Modells validiert. Es ist zu erkennen, dass die Werte der Optimierungskriterien, die das FE-Modell für die validierten Designs annimmt, von der Pareto-Front abweichen. Dies ist auf die geringe Vorhersagegenauigkeit des Ersatzmodells zurückzuführen.

Aus allen validierten Designs wird das für die Problemstellung optimale Ergebnis ausgewählt. Dies entspricht dem Design mit der Nummer 3923. Der Wert des C_{12} -Kriteriums beträgt für dieses Design 3,80 und die Masse der Fenstereinsätze 0,777 kg (C_3 =0.004). Die Werte aller variablen Parameter für diese optimierte Konfiguration sind in Tabelle 5.5 dargestellt. Verglichen mit dem Referenzdesign, bei dem der Wert des C_{12} -Kriteriums 3,96 und die Masse des Fensters 0,84 kg beträgt, kann folglich bezüglich des C_{12} -Kriteriums eine leichte Verbesserung erreicht werden. Eine größere Verbesserung ist unter Berücksichtigung der Forderung das C_3 -Kriterium ebenfalls zu minimieren, in diesem Model-Updating nicht möglich.

Der Vergleich der Einträge auf der Hauptdiagonalen der MAC-Matrix der optimierten mit der Referenzkonfiguration aus Abbildung 5.8 zeigt, dass die Moden bei den experimentell bestimmten Eigenfrequenzen von 29,0 Hz, 83,0 Hz, 84,7 Hz, 119,1 Hz,

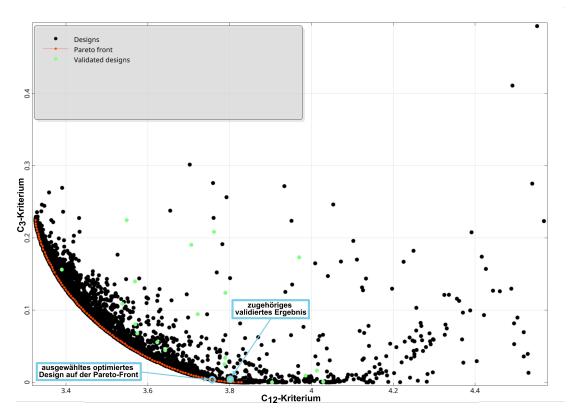


Abbildung 5.9 Pareto-Front der Optimierung des Model-Updatings 3

158,8 Hz, 166,8 Hz und 193,4 Hz verbessert abgebildet werden können. Allerdings werden alle übrigen experimentell bestimmten Moden (12 von 19) durch die Simulationsergebnisse nur geringfügig verändert oder schlechter abgebildet. Die Anzahl der Moden, die mit einer Genauigkeit von mehr als 70 % abgebildet (MAC-Wert über 0,7) werden, liegt wie in der Referenzkonfiguration bei 10 von 19. Die experimentellen Moden, die mit dieser hohen Genauigkeit abgebildet werden, unterscheiden sich jedoch von der Referenzkonfiguration. Zudem kann bezüglich der in Abbildung 3.7 zu sehenden Nebendiagonaleinträgen keine Verbesserung erreicht werden.

Weiterhin weisen die simulierten Eigenfrequenzen Abweichungen zu den experimentellen Eigenfrequenzen auf. Im Vergleich zu der Referenzkonfiguration kann eine Verbesserung der Frequenzabweichung der experimentell bestimmten Mode bei 84,7 Hz auf unter 10 Hz erreicht werden. Prozentual liegt die Frequenzabweichung dennoch bei über 10 %. Die Frequenzabweichung der simulierten Mode, die der experimentell bestimmten Mode bei 178,6 Hz zugeordnet wird, kann durch das Model-Updating deutlich verbessert werden. Allerdings weist die Mode bei 193,4 Hz nun eine Frequenzabweichung von mehr als 10 Hz auf. Alle übrigen Moden, für die vor dem Model-Updating eine zu hohe Frequenzabweichung festgestellt wurde, weisen diese weiterhin auf. Bezüglich der Frequenzabweichungen kann durch das durchgeführte Model-Updating folglich keine Verbesserung beobachtet werden. Insgesamt sind die erzielten Verbesserungen hinsichtlich der Genauigkeit, mit der das reale Schwingungsverhalten durch die Simulation abgebildet werden kann, somit gering.

In den validierten Designs existieren neben dem ausgewählten noch zwei weitere, bei denen die Massenrestriktion gut eingehalten wird. Diese beiden Designs sind in Tabelle 5.7 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Design mit Nummer 3111 sehr ähnlich zu dem Design der optimierten Konfiguration ist. Allerdings weicht der Wert, den das

Tabelle 5.7 Vergleich der besten Designs, die die Restriktionen der Fenstermasse
erfüllen

Nr.	Dichte	Wandstärke Fläche 1	Wandstärke Fläche 2	Wandstärke Fläche 3	Masse	C_{12} - Kriteri- um
3111	1635,2 kg m ⁻³	6,8 mm	1,6 mm	1,9 mm	0,74 kg	3,99
4143	1734,54 kg m ⁻³	6,6 mm	1,6 mm	2,3 mm	0,84 kg	3,90
Mit- tel- wer- te	2008 kg m ⁻³	6,2 mm	1,9 mm	1,7 mm	0,84 kg	3,89

 C_{12} -Kriterium annimmt, ab. Das Design mit Nummer 4143 erfüllt die Zielmasse der Fenstereinsätze exakt. Der Wert des C_{12} -Kriteriums ist verglichen mit dem Referenzdesign, bei dem die Zielmasse ebenfalls exakt abgebildet wird, besser. Auf Grundlage dieser Beobachtungen und der geringen Genauigkeit des Ersatzmodells bezüglich des C_{12} -Kriteriums werden für die weiteren Betrachtungen die aus der Optimierung abgeleiteten Mittelwerte für die verschiedenen Wandstärken verwendet. Die Dichte wird so angepasst, dass die Fenstermasse 0,84 kg beträgt. Die MAC-Matrix, die für das Design, in dem die Mittelwerte (siehe Tabelle 5.7) verwendet sind, ist in Anhang E in Abbildung E.1a dargestellt. Der Wert, den das C_{12} -Kriterium annimmt, ist 3,89. Dies ist geringfügig schlechter als der Wert des Designs in der optimierten Konfiguration aus Design 3923.

Aus den beschriebenen Beobachtungen ist abzuleiten, dass in dem bisher verwendeten Simulationsmodell entscheidende Einflussfaktoren vernachlässigt werden, die wenn das Schwingungsverhalten realitätsnah abgebildet werden soll, nicht vernachlässigbar sind. Die größte bisher getroffene Vereinfachung ist die Vernachlässigung der GFK-Platte an der Fensteroberseite sowie die zur Befestigung auf der Oberfläche des Seitenwandpaneels verwendeten Klettverbindungen. Um zu überprüfen, ob eine zusätzliche Randbedingung an den Oberkanten der beiden Fenstereinsätze einen positiven Einfluss auf die Simulation des Schwingungsverhaltens hat, wird eine solche in das bestehende Modell probehalber eingefügt. Danach werden die simulierten Schwingformen vor und nach der Anpassung miteinander verglichen. Auf diese Weise kann der Effekt der zusätzlichen Randbedingungen evaluiert werden. Sollte diese Untersuchung einen großen Effekt zeigen, werden die bisher vernachlässigte GFK-Platte sowie die Klettverbindungen in dem Simulationsmodell ergänzt.

Der Vergleich der Schwingformen ohne und mit zusätzlicher Randbedingung des Fenstereinsatzes ist im Anhang E dargestellt. Aus den Beobachtungen kann abgeleitet werden, dass eine zusätzliche Randbedingung das Schwingungsverhalten einiger Moden positiv beeinflusst. Es ist bei der Wahl dieser Randbedingung auf eine realistische Annahme der Steifigkeit zu achten, um negative Effekte auf das simulierte Schwingungsverhalten zu vermeiden. Zudem muss überprüft werden, ob eine Anpassung der Steifigkeit im Bereich der Fläche 3 zu einer verbesserten Abbildung des realen Schwingungsverhaltens im Bereich der hohen Frequenzen führt.

In den realen Fenstereinsätzen ist eine Plexiglasscheibe, die bisher vernachlässigt wurde, vorhanden (siehe Abbildung 3.2a). Diese ist in eine Nut, die die Relativbewegung in x- und y-Richtung behindert, eingefasst. Die Plexiglasscheibe wird in dafür vorge-

sehenen Klammern eingeschoben. Da diese über Spiel in z-Richtung verfügen, wird die Bewegung in z-Richtung lediglich geringfügig eingeschränkt. Es ist davon auszugehen, dass das zusätzliche Material im Bereich der Plexiglasscheibe sowie die eingeschränkte Bewegung in x- und y-Richtung zu einer erhöhten Steifigkeit führen. Die Plexiglasscheibe wird zur Überprüfung, ob eine höhere Steifigkeit im Bereich der Fläche 3 einen positiven Einfluss auf die simulierten Moden hat, berücksichtigt. Aus allen beschriebenen Beobachtungen wird die nachfolgende Hypothese, die Grundlage der anschließenden Untersuchungen ist, aufgestellt.

Hypothese:

Die Ergänzung der GFK-Platte an der Oberkante der Fenstereinsätze sowie die Wahl realistischer Verbindungselemente führt zu einer verbesserten Abbildung des realen Schwingungsverhaltens im Simulationsmodell. Zudem führt die Berücksichtigung der durch die Plexiglasscheibe entstehenden zusätzlichen Steifigkeit zu einer positiven Verbesserung der Simulationsergebnisse der Moden bei hohen Frequenzen.

5.7 Model-Updating 4: Erweiterung der Fenstergeometrie und vereinfachte Modellierung der Klettverbindungen

In diesem Abschnitt wird die Erweiterung des Modells unter Berücksichtigung der GFK-Platte, der Klettverbindungen sowie der Plexiglasscheibe vorgenommen. Die Ergebnisse werden zur Überprüfung der im vorangegangenen Abschnitt aufgestellten Hypothese verwendet.

5.7.1 Modellierung der Fenstergeometrie

Die Grundlage der Erweiterung der Fenstergeometrie stellt das zuvor verwendete CAD-Modell, angepasst an die reale Geometrie, dar. An der Oberkante wird ein Flächenmodell der GFK-Platte ergänzt. Die Länge sowie Krümmung der Platte orientieren sich am realen Bauteil. In Abbildung 5.10 ist die erweiterte Geometrie dargestellt. Die Modellierung des Fenstereinsatzes entspricht auch in diesem Fall einer zusammenhängenden Fläche.

Nach Erweiterung des CAD-Modells der Fenstereinsätze werden diese zusammen mit dem Seitenwandpaneel in eine Baugruppe eingefügt. Die Positionierung der Bauteile relativ zueinander wird in diesem Fall an der Position der Schraubenverbindung an der Unterseite des Fenstereinsatzes sowie der Position der Klettverbindungen orientiert. Die exakte Position der Fenstereinsätze kann aufgrund der CAD Geometrie des Seitenwandpaneels sowie der nicht genauen Modellierung der Fenstereinsätze leicht von der vorherigen Modellierung (Model-Updating 2 und 3) abweichen. Aufgrund der geringen Abweichungen wird davon ausgegangen, dass der Einfluss auf das Schwingungsverhalten vernachlässigbar ist.

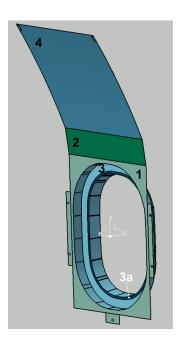


Abbildung 5.10 CAD-Modell der erweiterten Geometrie der Fenstereinsätze

5.7.2 Modellaufbau

Der Modellaufbau entspricht dem in den vorherigen Model-Updatings verwendeten und wird lediglich um die zusätzlich berücksichtigten Komponenten erweitert. Die zu Beginn angenommenen Wandstärken und die zugehörige bereichsweise Definition entsprechen den Mittelwerten (für die Fläche 1 und die Fläche 2 werden diese aufgerundet), die aus der Optimierung des Model-Updatings 3 ermittelt werden können (siehe Abschnitt 5.6).

An dem realen Bauteil kann die Dicke der GFK-Platte näherungsweise zu 0,8 mm bestimmt werden. Zu beachten ist die verschiedene Position der Sonnenblenden beider Fenstereinsätze unter Testbedingungen (siehe Abbildung 3.1). Ist die Sonnenblende, wie bei dem linken Fenstereinsatz, hochgeschoben, so ist die für das Schwingungsverhalten relevante Wandstärke in dem Bereich der GFK-Platte erhöht. Zu Beginn wird entsprechend dem realen Bauteil von einer Wandstärke der Sonnenblende von 0,7 mm ausgegangen. Da die vorherigen Model-Updatings die hohe Relevanz der verwendeten Wandstärken gezeigt haben, wird die Sonnenblende in der Modellierung beider Fenstereinsätze durch angepasste Wandstärken berücksichtigt. Für den linken Fenstereinsatz wird die Anpassung der Dicke der GFK-Platte und für den rechten Fenstereinsatz die Anpassung der Wandstärke im Bereich der Fläche 1 vorgenommen. Die verschiedene Modellierung beider Fenstereinsätze sorgt dafür, dass in der Sensitivitätsanalyse und der Optimierung eine getrennte Betrachtung der C_3 Kriterien für beide Fenstereinsätze erforderlich ist.

Für die abstrahierte Modellierung der Plexiglasscheibe wird eine entsprechende Flächendefinition der Zone, in der sich die Scheibe im realen Bauteil befindet (Fläche 3a), im Modell ergänzt. Eine physische Modellierung der Scheibe erfolgt nicht. Für die Fläche 3a wird zu der Wandstärke, die für die Fläche 3 definiert ist, die Dicke der Plexiglasscheibe addiert. Diese Wandstärke wird an dem realen Bauteil zu 2,2 mm bestimmt. Außerdem wird die Bewegung aller Elemente, die in Fläche 3a liegen, in xund y-Richtung durch Definition eines Remotepoints aneinandergekoppelt. Auf diese

Weise wird eine Relativbewegung der Kontur in diese Richtungen verhindert. Die rotatorischen Freiheitsgrade sowie die translatorische Bewegung in z-Richtung werden basierend auf dem realen Bauteil nicht eingeschränkt.

Neben den Wandstärken muss auch die Definition der Materialparameter vorgenommen werden. Die Materialparameter für das Polymer werden beibehalten. Für das GFK werden zwei verschiedene Materialdefinition für den linken und den rechten Fenstereinsatz basierend auf denselben Kennwerten getroffen. Auf diese Weise kann überprüft werden, ob die unterschiedliche Position der Sonnenblende eine Anpassung der Materialparameter erfordert. Die für das GFK verwendeten Kennwerte sind in Tabelle 5.8 dargestellt. Grundsätzlich orientiert sich diese Definition an den durch Algermissen bestimmten Materialdaten des GFK [Alg25]. Da von insgesamt geringem Einfluss des E-Moduls ausgegangen wird, wird der E-Modul bewusst erhöht, um den möglichen Einfluss besser abbilden zu können. Es ist zu beachten, dass dieses Vorgehen zu unrealistischen Ergebnissen führen kann.

Die Klettverbindungen müssen als zusätzliche Verbindungselemente ins Modell eingebracht werden. Es ist davon auszugehen, dass die Steifigkeiten der Verbindungen in alle Raumrichtungen verschieden sind. Um dieses Verhalten abbilden zu können, werden Verbindungselemente vom Typ "Lagerbuchse" verwendet, da sie variable Steifigkeiten in die verschiedenen Raumrichtungen zulassen. Die Verbindung wird tangential zum Seitenwandpaneel eingebracht. Abbildung C.4 im Anhang C kann die Orientierung des Koordinatensystems, das der Definition der Verbindungssteifigkeiten zugrunde liegt, entnommen werden. Um realistische Startwerte für die Verbindungssteifigkeit der Klettverbindung anzunehmen, werden Referenzwerte aus der Literatur gesucht. Die Literaturrecherche zeigt, dass die Steifigkeitswerte für die Schersteifigkeit sowie die Steifigkeit gegen Zugbelastung stark von dem verwendeten Klettband abhängig ist. Zudem werden diese in flächenspezifisch angegeben. Die erforderliche Steifigkeitsangabe ist jedoch in N m⁻¹ erforderlich. Eine Umrechnung ist daher erforderlich.

Da der Typ des Klettbands sowie der Hersteller unbekannt sind, können auch mit Hilfe der Literatur keine präzisen Steifigkeitswerte bestimmt werden. Zusammen mit der Variabilität der infrage kommenden Kennwerte sowie der nötigen Umrechnung beruht die Steifigkeitsdefinition auf einer Schätzung, deren Zutreffen durch eine manuelle Parameterstudie bestätigt wird. Für die x-Richtung wird eine Steifigkeit von 1,27 N cm $^{-3}$ angenommen, für die Steifigkeit in y-Richtung 0,67 N m $^{-3}$ und für die Steifigkeit in z-Richtung 39,2 N cm $^{-3}$. Die Umrechnung der flächenspezifischen Steifigkeit $k_{flächenspezifisch}$ in die benötigte Federsteifigkeit k erfolgt nach Gleichung 5.1 in Abhängigkeit der Fläche der Klettverbindung A, in der sich Haken befinden. Diese wird am realen Bauteil zu 9 mm mal 17 mm bestimmt. Für die Einheitsverschiebung $\Delta x_{einheit}$ wird eine Verschiebung von 1 mm angenommen.

$$\frac{k_{fl\"{a}chenspezifisch}A}{\Delta x_{einheit}} = k \tag{5.1}$$

Tabelle 5.8 Model-Updating 4: Übersicht über die berücksichtigten Modellparameter sowie die ermittelten Sensitivitätswerte (CoP bezüglich des C_{12} -Kriteriums, CoP bezüglich des C_3 -Kriteriums linker Fenstereinsatz, CoP bezüglich des C_3 -Kriteriums rechter Fenstereinsatz)

Parameter	Referenz- konfigu- ration	Zulässiger Wertebereich	СоР	Optimierte Konfigurati- on
Wandstärke Fläche 1	6,0 mm	2,0 mm bis 8,0 mm	7,4 % 26,8 % 25,4 %	2,23 mm
Wandstärke Fläche 2	2,0 mm	1,5 mm bis 4,5 mm	3,1 % 1,9 % 1,6 %	3,78 mm
Wandstärke Fläche 3	1,7 mm	1,5 mm bis 4,5 mm	4,1 % 17,7 % 18,0 %	3,02 mm
Dicke GFK-Platte	o,8 mm	0,5 mm bis 2 mm	8,1 % 16,6 % 17,9 %	1,15 mm
Wandstärke Sonnenblende	0,7 mm	0,5 mm bis 1 mm	0,0 % 1,7 % 0,0 %	0,5 mm
Dicke Plexiglas	2,2 mm	o,5 mm bis		2,41 mm
Dichte Polymer	1526 kg m ⁻³	1200 kg m ⁻³ bis 2200 kg m ⁻³	7,8 % 35,8 % 37,8 %	1556 kg m ⁻³
E-Modul Polymer	2,21 · 10 ⁹ Pa	1,99 · 10 ⁹ Pa bis 2,43 · 10 ⁹ Pa		2,33 · 10 ⁹ Pa
Querkontrak- tionszahl Polymer	0,4	0,36 bis 0,44		0,373
Dichte GFK	1892 kg m ⁻³	1703 kg m ⁻³ bis 2082 kg m ⁻³	6,0 % 1,1 % 0,0 %	links: 1946 kg m ⁻³ rechts: 1817 kg m ⁻³
E-Modul in x-Richtung GFK	2,45·10 ¹² Pa	2,2·10 ¹² Pa bis 2,7·10 ¹² Pa		links: 2,26·10 ¹² Pa rechts: 2,35·10 ¹² Pa
E-Modul in y-Richtung GFK	2,45·10 ¹² Pa	2,2·10 ¹² Pa bis 2,7·10 ¹² Pa		links: 2,3·10 ¹² Pa rechts: 2,36 Pa

Parameter	Referenz- konfigu- ration	Zulässiger Wertebereich	СоР	Optimierte Konfigurati- on
E-Modul in z-Richtung GFK	5·10 ¹¹ Pa	4,5·10 ¹⁰ Pa bis 5,5·10 ¹⁰ Pa		links: 5,39·10 ¹⁰ Pa rechts: 5,16·10 ¹⁰ Pa
Querkontrak- tionszahl xy GFK	0,126	0,1134 bis 0,1386		links: 0,12 rechts: 0,129
Querkontrak- tionszahl yz GFK	0,126	0,1134 bis 0,1386		links: 0,126 rechts: 0,133
Querkontrak- tionszahl GFK xz	0,3	nic	ht variab	el
Verbindungsstei- figkeit Klett in x-Richtung	1938 N m ⁻¹	500 N m ⁻¹ bis 5000 N m ⁻¹	4,0 % 0,0 0,0 %	871 N m ⁻¹
Verbindungsstei- figkeit Klett in y-Richtung	1026 N m ⁻¹	500 N m ⁻¹ bis 5000 N m ⁻¹	3,8 % o,o o,o %	673 N m ⁻¹
Verbindungsstei- figkeit Klett in z-Richtung	60000 N m ⁻¹	6000 N m ⁻¹ bis 100000 N m ⁻¹		22535

5.7.3 Variable Parameter

Während der Sensitivitätsanalyse werden alle Wandstärken sowie die Materialparameter der beiden GFK-Platten als variabel angenommen. Durch die variablen Wandstärken wird auch die Dichte des Polymers angepasst, um die Massenvorgabe der Fenstereinsätze trotz veränderter Wandstärke zu erfüllen. Die verwendeten Grenzwerte aller Parameter sind in Tabelle 5.8 zusammengefasst.

Die Grenzwerte für die Wandstärken der Fläche 1, Fläche 2 und der Fläche 3 werden durch die Optimierung des Model-Updatings 3 und dem dort festgestellten relevanten Wertebereich festgelegt.

Die Wandstärken der GFK-Platte sowie der Sonnenblende werden an den real bestimmten Werten orientiert. Dabei wird für beide die untere Grenze zu 0,5 mm gewählt. Da von einem großen Einfluss der Dicke der GFK-Platte ausgegangen wird, wird die obere Grenze für die GFK-Platte mit 2,0 mm bewusst größer als im realen System gewählt. Auf diese Weise wird ermöglicht, den Effekt verschiedener Wandstärken auf das Optimierungsergebnis untersuchen zu können. Für die Sonnenblende wird die obere Grenze der Wandstärke zu 1,0 mm gewählt. Alle Materialparameter, außer die Dichte des Polymers, werden um ±10 % variiert. Der Wertebereich, den die Dichte des Polymers abdecken muss, um die Zielmasse von 0,84 kg zu erreichen, wird an den Wandstärken und den zugeordneten Flächen orientiert.

Die Grenzen für den Wertebereich der Klettverbindungen wird bewusst sehr groß gewählt. Diese Parameter sind mit sehr großer Unsicherheit behaftet. Das Ziel dieses Model-Updatings ist daher die Untersuchung der Sensitivität des Systems hinsichtlich Veränderung der Verbindungssteifigkeiten. Für die Variation wird daher der

große Wertebereich angesetzt, um sicherzustellen, dass der Einfluss der Verbindungssteifigkeiten abgebildet werden kann.

Die Optimierungskriterien entsprechen dem C_{12} und dem C_3 -Kriterium. Dabei wird das C_3 -Kriterium für beide Fenstereinsätze separat berechnet. Um auszuschließen, dass die stark ähnlichen experimentell bestimmten Moden (MAC-Wert auf den Nebendiagonalen von mehr als 0,7), die Erstellung des Ersatzmodells sowie die Optimierungsergebnisse negativ beeinflusst, werden alle experimentellen Moden über 158,8 Hz bei diesem und zukünftigen Model-Updatings nicht betrachtet.

5.7.4 Simulationsergebnis des Schwingungsverhaltens vor dem Model-Updating

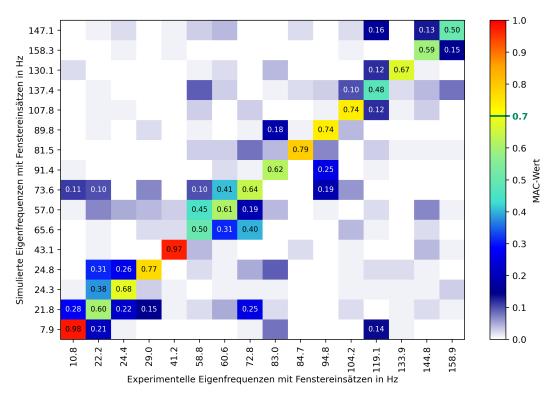
Das Simulationsergebnis des Schwingungsverhaltens unter Verwendung der Referenzkonfiguration aus Tabelle 5.8 ist in der MAC-Matrix in Abbildung 5.11a dargestellt. Das C_{12} -Kriterium nimmt für diese Referenzkonfiguration einen Wert von 3,18 an. Zur Bewertung des Effektes, den die Ergänzung der GFK-Platte, der Klettverbindungen, der Sonnenblende und der Plexiglasscheibe hat, wird diese MAC-Matrix mit der MAC-Matrix aus Abbildung E.1a, die unter Verwendung der Mittelwerte aus der Optimierung des Model-Updatings 3 entsteht, verglichen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der hier beschriebenen Referenzkonfiguration lediglich die Moden bis 158,9 Hz betrachtet werden. In diesem Frequenzbereich können 10 von 15 Moden mit einer Genauigkeit von mehr als 70 % abgebildet werden.

Im Vergleich zu dem Optimierungsergebnis aus dem Model-Updating 3 fällt auf, dass alle experimentell bestimmten Moden durch die Simulation abgebildet werden können. Dies trifft auch auf die Mode bei 22,2 Hz, die in keiner der vorherigen Simulationen abgebildet werden kann.

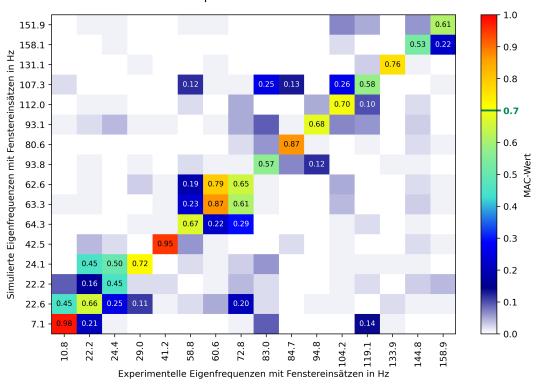
Bezüglich der MAC-Werte auf der Hauptdiagonalen kann festgehalten werden, dass die Moden mit den Frequenzen 58,8, 60,6 Hz, 72,8 Hz, 84,7 Hz und 144,9 Hz verbessert abgebildet werden. Alle übrigen 11 von 16 Moden werden durch die Simulation mit den Parametern der Referenzkonfiguration nicht verändert oder verschlechtert abgebildet. Insgesamt werden 6 der 16 Moden mit einer Genauigkeit von mehr als 70 % abgebildet. Damit werden weniger Moden als zuvor mit hoher Genauigkeit in der Simulation abgebildet.

Gemäß Tabelle 5.9 kann für die Moden bei 119,1 Hz, 144,8 Hz und 158,9 Hz zudem eine Frequenzabweichung von mehr als 10 Hz festgestellt werden. Die Moden bei 10,8 Hz, 29,0 Hz, 58,8 Hz und 83,0 Hz weisen eine prozentuale Frequenzabweichung von mehr als 10 Hz auf. Verglichen mit der vorherigen Simulation kann folglich keine Verbesserung bezüglich der Genauigkeit, mit der die Eigenfrequenzen abgebildet werden können, erzielt werden.

Im Frequenzbereich von 10,8 Hz bis 29,0 Hz sind alle Einträge, die in der Auto-MAC-Matrix der experimentellen Ergebnisse aus Abbildung 3.7 zu sehen sind, vorhanden. Die Werte dieser Einträge weichen jedoch stark ab. Ähnlich verhält es sich mit dem Frequenzbereich von 58,8 Hz bis 72,8 Hz, wobei der Unterschied der Werte zur Auto-MAC-Matrix deutlich geringer ist. Der Nebendiagonaleintrag der Eigenfrequenz 144,8 Hz ist durch die veränderte Modellierung der Fenstereinsätze geringer geworden. Da dieser in der Auto-MAC 0,0 ist, entspricht auch dies einer Verbesserung.



(a) MAC-Matrix: Vergleich der simulierten Moden in der Referenzkonfiguration mit den experimentell bestimmten



(b) MAC-Matrix: Vergleich der simulierten Moden in der optimierten Konfiguration mit den experimentell bestimmten

Abbildung 5.11 Model-Updating 4: Vergleich der MAC-Matrix vor (Referenzkonfiguration) und nach (optimierte Konfiguration) dem Model-Updating

Tabelle 5.9 Model-Updating 4: Frequenzabweichung der simulierten Eigenfrequenzen in der Referenzkonfiguration $f_{sim,ref}$ und der optimierten Konfiguration $f_{sim,opti}$ von den experimentell bestimmten Eigenfrequenzen f_{exp} (absolute Frequenzabweichung \geq 10 Hz, prozentuale Frequenzabweichung \geq 10 %)

f	<i>f</i>			<i>f</i> .		
f_{exp} in Hz	$f_{sim,ref}$ in Hz	Δ in Hz	Δ in %	$f_{sim,opti}$ in Hz	Δ in Hz	Δ in %
10,8	7,90	-2,90	-26,85	7,10	-3,70	-34,26
22,2	21,80	-0,40	-1,80	22,60	0,40	1,80
24,4	24,30	-0,10	-0,41	22,20	-2,20	-9,02
29,0	24,80	-4,20	-14,48	24,10	-4,90	-16,90
41,2	43,10	1,90	4,61	42,50	1,30	3,16
58,8	65,60	6,80	11,56	64,30	5,50	9,35
60,6	57,00	-3,60	-5,94	63,30	2,70	4,46
72,8	73,60	0,80	1,10	62,60	-10,20	-14,01
83,0	91,40	8,40	10,12	93,80	10,80	13,01
84,7	81,50	-3,20	-3,78	80,60	-4,10	-4,84
94,8	89,80	-5,00	-5,27	93,10	-1,70	-1,79
104,2	107,80	3,60	3,45	112,00	7,80	7,49
119,1	137,40	18,30	15,37	107,30	-11,80	-9,91
133,9	130,10	-3,80	-2,84	131,10	-2,80	-2,09
144,8	158,30	13,50	9,32	158,10	13,30	9,19
158,9	147,10	-11,80	-7,43	151,90	-7,00	-4,41

5.7.5 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse und anschließenden Optimierung

Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse zeigt, dass neben den verschiedenen Wandstärken und Dichten auch die Verbindungssteifigkeiten einen Einfluss auf das erstellte Ersatzmodell zur Vorhersage des C_{12} -Kriteriums haben. Der Einfluss von jedem dieser Parameter ist gemäß Tabelle 5.8 gering (in hellblau hervorgehoben). Bezüglich des C_{12} -Kriteriums weist das Ersatzmodell einen Gesamt-CoP von 34,9 % auf. Dies stellt, verglichen mit den vorherigen Model-Updatings 2 und 3, eine deutliche Verschlechterung der Genauigkeit, mit der das C_{12} -Kriterium abgebildet werden kann, dar. Bezüglich des C_3 -Kriteriums hat das Ersatzmodell einen Gesamt-CoP von 100 % für den linken und 99,4 % für den rechten Fenstereinsatz. Der Unterschied ist auf die verschiedene Definition der Wandstärken in Abhängigkeit der Position der Sonnenblenden zurückzuführen. Die Betrachtung des Einflusses, den die einzelnen Parameter auf das Ersatzmodell hinsichtlich der C_3 Kriterien haben, zeigt, dass vor allem Bereiche, in denen das Polymer verwendet wird, einen Einfluss auf das C_3 -Kriterium haben (in Tabelle 5.8 in dunkelgrün für das linke und in hellgrün für den rechten Fenstereinsatz hervorgehoben).

Durch den sehr geringen CoP des Ersatzmodells bezüglich des C_{12} -Kriteriums sind mit Hilfe der Optimierung keine zuverlässigen Ergebnisse zu erwarten. Die Optimierung wird dennoch durchgeführt und ein bestes Design aus den validierten Designs ausgewählt. Die Parameter dieses Designs sind in Tabelle 5.8 in der Spalte "Optimierte Konfiguration" dargestellt. Der Vergleich der Werte der einzelnen Parameter zwischen

Referenz- und optimierter Konfiguration zeigt, dass auch Parameter verändert sind, die gemäß der Sensitivitätsanalyse keinen Einfluss auf das Optimierungsergebnis haben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei Übertragung des Ersatzmodells auf die Optimierung das Referenzdesign der Sensitivitätsanalyse nicht übertragen wurde. Für zukünftige Optimierungen ist darauf zu achten, dass das Referenzdesign übertragen wird. Gegebenenfalls ist eine manuelle Anpassung erforderlich. Da diese Parameter gemäß Sensitivitätsanalyse keinen Einfluss auf das Simulationsergebnis haben, wird nicht davon ausgegangen, dass diese Abweichungen zu einer relevanten Verfälschung des Optimierungsergebnisses führen.

In Abbildung 5.11b ist die MAC-Matrix, die für die optimierte Konfiguration (bestes Design) ermittelt werden kann, dargestellt. Für dieses Design nimmt das C_{12} -Kriterium einen Wert von 3,10 an. Die Masse der linken Fenstereinsatzes beträgt 0,838 kg und des rechten Fenstereinsatzes 0,773 kg.

Der Vergleich von der MAC-Matrix der optimierten- und der Referenzkonfiguration zeigt, dass die experimentell bestimmten Moden mit den Eigenfrequenzen 22,2 Hz, 58,8 Hz, 60,6 Hz, 84,7 Hz, 119,1 Hz, 133,9 Hz und 158,9 Hz verbessert (7 von 16) abgebildet werden können. Die auftretenden Verbesserungen sind folglich im gesamten betrachteten Frequenzbereich zu finden. Alle nicht genannten Moden sind entweder unverändert oder verschlechtert abgebildet. Insgesamt werden nach dem Model-Updating 7 Moden mit einer Genauigkeit von mehr als 70 % abgebildet. Es wird somit eine leichte Verbesserung, mit der die Eigenformen simuliert werden, erreicht.

Der Vergleich der Genauigkeit mit der die experimentell bestimmten Eigenfrequenzen nach Tabelle 5.9 simuliert werden können, zeigt eine Verringerung der Abweichung von den Eigenfrequenzen 58,8 Hz und 158,9 Hz. Allerdings weicht die Simulation der experimentell bestimmten Eigenfrequenzen 72,8 Hz, 83,0 Hz stärker ab als für das Referenzdesign. Insgesamt kann durch dieses Model-Updating folglich keine große Verbesserung der Genauigkeit mit der die Eigenfrequenzen simuliert werden können, erreicht werden.

Trotz der geringen Verbesserung der Simulationsergebnisse durch das Model-Updating und die im Vergleich zu den Ergebnissen des Model-Updatings 4 reduzierten Anzahl mit hoher Genauigkeit abgebildeten Moden, wird die Modellierung beibehalten. Diese Entscheidung basiert auf der verbesserten Abbildung der Einträge auf den Nebendiagonalen sowie der Tatsache, dass in dieser Konfiguration alle experimentell bestimmten Eigenfrequenzen abgebildet werden können.

Durch den geringen CoP des Ersatzmodells ist davon auszugehen, dass in dem bestehenden Modell nicht alle relevanten Modellparameter in der Sensitivitätsanalyse berücksichtigt werden. Die berücksichtigten Parameter, insbesondere die Verbindungssteifigkeit der Klettverbindung, sind mit großer Unsicherheit behaftet. Zudem kann nicht ausgeschlossen werden, dass zwischen der Wahl der besten Wandstärke der GFK-Platte und benötigten Klettsteifigkeiten ein komplexer Zusammenhang besteht.

In einem zweiten Schritt wird daher dasselbe Modell verwendet und durch Variation der Verbindungssteifigkeiten unter Annahme konstanter Wandstärken der Einfluss der Verbindungssteifigkeiten überprüft. Die verwendeten Wandstärken basieren auf der optimierten Konfiguration dieses Model-Updatings 4. Um auszuschließen, dass die verwendeten fixierten Verbindungselemente für die Schrauben, durch ihre unendlich hohe Steifigkeit das Modellverhalten negativ beeinflussen, wird der Verbindungstyp verändert. Auch für diese Verbindungselemente erfolgt die Bestimmung

der nötigen Steifigkeiten durch das nachfolgend beschriebene Model-Updating 5.

Hypothese

Durch Variation der Verbindungssteifigkeiten bei konstanten Wandstärken wird eine genauere Abbildung des C_{12} -Kriteriums durch das Ersatzmodell erreicht. Der Einfluss der Verbindungssteifigkeiten, die mit sehr großer Unsicherheit behaftet sind, kann außerdem detaillierter untersucht werden, wenn keine Variation der Wandstärken und Dichten vorgenommen wird.

5.8 Model-Updating 5: Variation der Verbindungssteifigkeiten aller Verbindungselemente bei konstanten Wandstärken

In dem hier beschriebenen Model-Updating werden die Verbindungssteifigkeiten aller Schraubenverbindungen sowie der Klettverbindungen optimiert. Alle anderen Modellparameter werden konstant belassen. Es wird auf eine Beschreibung der Fenstergeometrie sowie des Modellaufbaus verzichtet, da diese mit der vorherigen Simulation in Model-Updating 4 übereinstimmen. Diese Informationen können folglich Abschnitt 5.7.3 entnommen werden.

5.8.1 Variable Parameter

Das Ziel dieses Model-Updatings ist, den Einfluss der Verbindungssteifigkeiten zu bestimmen. Dazu werden für alle Wandstärken sowie die Materialparameter die in Tabelle 5.10 zusammengefassten Werte angenommen. Die Modellparameter, die im Model-Updating 4 einen Einfluss auf die Optimierungskriterien gezeigt haben, werden gemäß dem optimalen Design angepasst. Alle übrigen Modellparameter entsprechen denen, die im Model-Updating 4 im Referenzdesign verwendet werden. Die Dichte des GFK wird dabei so angepasst, dass beide Fenstereinsätze die Zielmasse von 0,84 kg aufweisen.

Die Verbindungssteifigkeiten der Klettverbindungen werden als variabel angenommen. Die Startwerte entsprechen denen aus der Referenzkonfiguration des Model-Updatings 4. Um zusätzlich den Einfluss der Verbindungselemente, die als Schraubenverbindungen verwendet werden, zu überprüfen, werden die entsprechenden Verbindungselemente in den Typ "Lagerbuchse" umgewandelt und mit variabler Steifigkeit versehen (Koordinatensystem siehe Abbildung C.3 im Anhang C). Zu Beginn wird für die Schraubenverbindungen in alle Raumrichtungen eine Steifigkeit von $2 \cdot 10^8$ N/m angenommen. Um sowohl den Einfluss geringerer als auch höherer Steifigkeiten abbilden zu können, wird der in Tabelle 5.10 dargestellte Wertebereich verwendet. Auf diese Weise kann ausgeschlossen werden, dass die Simulationsergebnisse durch die unendlich hohe Steifigkeit der vorher verwendeten fixierten Verbindungen negativ beeinflusst werden. Es wird davon ausgegangen, dass alle Verbindungselemente desselben Typs dieselben Steifigkeiten haben. Weil die Masse der beiden Fenstereinsätze während der Sensitivitätsanalyse und der Optimierung konstant ist, wird lediglich das C_{12} -Kriterium verwendet. Dies führt dazu, dass aus der Optimierung keine

Pareto-Front extrahiert werden kann. Stattdessen wird genau ein optimales Design bestimmt.

Tabelle 5.10 Model-Updating 5: Übersicht über die berücksichtigten Modellparameter sowie die ermittelten Sensitivitätswerte (CoP bezüglich des C_{12} -Kriteriums)

Parameter	Referenz- konfigu- ration	Zulässiger Wertebereich	СоР	Optimierte Konfiguration	
Wandstärke Fläche 1	2,23 mm	nicht variabel			
Wandstärke Fläche 2	3,78 mm	ni	cht varial	pel	
Wandstärke Fläche 3	3,02 mm	ni	cht varial	pel	
Dicke GFK-Platte	1,15 mm	ni	cht varial	pel	
Wandstärke Sonnenblende	0,5 mm	ni	cht varial	pel	
Dicke Plexiglas	2,41 mm	ni	cht varial	pel	
Dichte Polymer	1331 kg m ⁻³	ni	cht varial	pel	
E-Modul Polymer	2,21 · 10 ⁹ Pa	ni	cht varial	pel	
Querkontrak- tionszahl Polymer	0,4	nicht variabel			
Dichte GFK	rechts: 1892 kg m ⁻³ links: 1452 kg m ⁻³	nicht variabel			
E-Modul in x-Richtung GFK	2,45·10 ¹² Pa	ni	cht varial	pel	
E-Modul in y-Richtung GFK	2,45·10 ¹² Pa	ni	cht varial	pel	
E-Modul in z-Richtung GFK	5·10 ¹¹ Pa	ni	cht varial	pel	
Querkontrak- tionszahl xy GFK	0,126	nicht variabel			
Querkontrak- tionszahl yz GFK	0,126	nicht variabel			
Querkontrak- tionszahl GFK	0,3	nicht variabel			
Verbindungsstei- figkeit Klett in x-Richtung	1938 N m ⁻¹	174,42 N m ⁻¹ bis 21318 N m ⁻¹	18,5%	1080,6 N m ⁻¹	

Parameter	Referenz- konfigu- ration	Zulässiger Wertebereich	СоР	Optimierte Konfiguration
Verbindungsstei- figkeit Klett in y-Richtung	1026 N m ⁻¹	92,34 N m ⁻¹ bis 11286 N m ⁻¹	25,6%	5049,5 N m ⁻¹
Verbindungsstei- figkeit Klett in z-Richtung	60000 N m ⁻¹	5400 N m ⁻¹ bis 6,6 · 10 ⁵ N m ⁻¹		6,5·105
Verbindungssteifigkeit Schraubenverbindungen in x-, y- und z-Richtung	2·10 ⁸ N m ⁻¹	2·10 ⁶ N m ⁻¹ bis 2·10 ⁹ N m ⁻¹		x-Richtung: 8,87 · 10 ⁸ N m ⁻¹ y-Richtung: 1,8 · 10 ⁹ N m ⁻¹ z-Richtung: 1,63 · 10 ⁹ N m ⁻¹

5.8.2 Simulationsergebnis des Schwingungsverhaltens vor dem Model-Updating

Durch die Veränderung der Verbindungselemente und die angepassten Dichten im Vergleich zu dem Model-Updating 4 ist trotz derselben Wandstärken eine Betrachtung des Simulationsergebnisses in der Referenzkonfiguration erforderlich. Da die übrigen Materialparameter in dem Model-Updating 4 keinen Einfluss auf die Simulationsergebnisse gezeigt haben, wird davon ausgegangen, dass die Anpassung dieser das Simulationsergebnis nicht beeinflusst. Die Veränderung der Parameter auf die Werte der Referenzkonfiguration des Model-Updatings 4 kann unter dieser Bedingung folglich nicht zu einer Veränderung der Simulationsergebnisse führen.

Der Wert des C_{12} -Kriteriums liegt für die gewählte Referenzkonfiguration bei 3,0 und ist damit um 0,1 besser als das Ergebnis des Model-Updatings 4. Die entsprechende MAC-Matrix ist in Abbildung 5.12a dargestellt. Verglichen mit der optimierten Konfiguration des Model-Updating 4 (siehe Abbildung 5.11b sind Unterschiede in den MAC-Matrizen zu erkennen. Die experimentell bestimmten Moden mit den Eigenfrequenzen 24,4 Hz, 58,8 Hz, 72,8 Hz, 94,8 Hz, 144,8 Hz (5 von 16) werden verbessert abgebildet. Die Abbildung aller übrigen 9 von 16 Moden ist unverändert oder verschlechtert. Besonders auffällig ist hierbei die Mode mit der Eigenfrequenz 119,1 Hz. Neben der Abnahme des MAC-Wertes auf der Hauptdiagonalen steigt der Eintrag auf der Nebendiagonalen zu der experimentell bestimmten Mode mit Eigenfrequenz 104,2 Hz deutlich an. In der Auto-MAC der Ergebnisse der experimentellen Modalanalyse aus Abbildung 3.7 ist dieser Eintrag 0,0. Ein Anstieg in der Simulation ist folglich nicht wünschenswert. Insgesamt werden in dieser Konfiguration 7 von 16 Moden mit einer Genauigkeit von mehr als 70 % abgebildet.

Der geringere Wert des C_{12} -Kriteriums ist durch den Vergleich der Frequenzabweichungen der simulierten mit den experimentell bestimmten Eigenfrequenzen zu erklären. Die Frequenzabweichungen in der hier betrachteten Referenzkonfiguration sind für die Eigenfrequenzen 72,8 Hz, 83,0 Hz, und 119,1 Hz deutlich geringer als 10 Hz. In der optimierten Konfiguration des Model-Updatings 4 liegen die Abweichungen

deutlich über 10 Hz.

Durch die Anpassung der Verbindungssteifigkeiten kann folglich insgesamt eine leichte Verbesserung des C_{12} -Kriteriums erreicht werden. Das Ziel des nachfolgend durchgeführten Model-Updatings ist die weitere Verbesserung der Genauigkeit, mit der das reale Schwingungsverhalten simuliert werden kann.

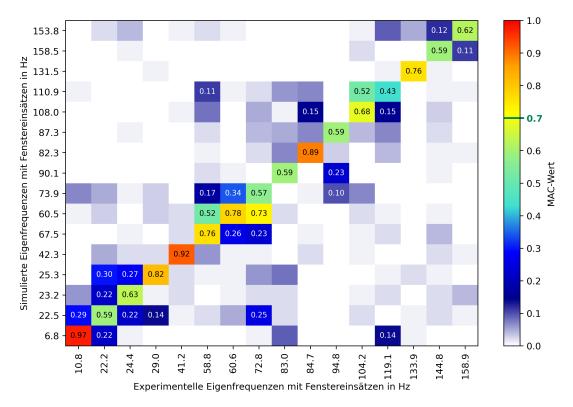
Tabelle 5.11 Model-Updating 5: Frequenzabweichung der simulierten Eigenfrequenzen in der Referenzkonfiguration $f_{sim,ref}$ und der optimierten Konfiguration $f_{sim,opti}$ von den experimentell bestimmten Eigenfrequenzen f_{exp} (absolute Frequenzabweichung \geq 10 Hz, prozentuale Frequenzabweichung \geq 10 %)

				· ·		
f_{exp} in Hz	$f_{sim,ref} \ $ in Hz	Δ in Hz	Δ in %	$f_{sim,opti} \ $ in Hz	Δ in Hz	Δ in %
10,8	6,80	-4,00	-37,04	6,90	-3,90	-36,11
22,2	22,50	0,30	1,35	22,70	0,50	2,25
24,4	23,20	-1,20	-4,92	22,80	-1,60	-6,56
29,0	25,30	-3,70	-12,76	25,30	-3,70	-12,76
41,2	42,30	1,10	2,67	42,20	1,00	2,43
58,8	67,50	8,70	14,80	68,20	9,40	15,99
60,6	60,50	-0,10	-0,17	61,90	1,30	2,15
72,8	73,90	1,10	1,51	74,30	1,50	2,06
83,0	90,10	7,10	8,55	90,20	7,20	8,67
84,7	82,30	-2,40	-2,83	82,30	-2,40	-2,83
94,8	87,30	-7,50	-7,91	94,40	-0,40	-0,42
104,2	108,00	3,80	3,65	108,60	4,40	4,22
119,1	110,90	-8,20	-6,88	111,00	-8,10	-6 , 80
133,9	131,50	-2,40	-1,79	131,40	-2,50	-1,87
144,8	158,50	13,70	9,46	158,50	13,70	9,46
158,9	153,80	-5,10	-3,21	154,10	-4,80	-3,02

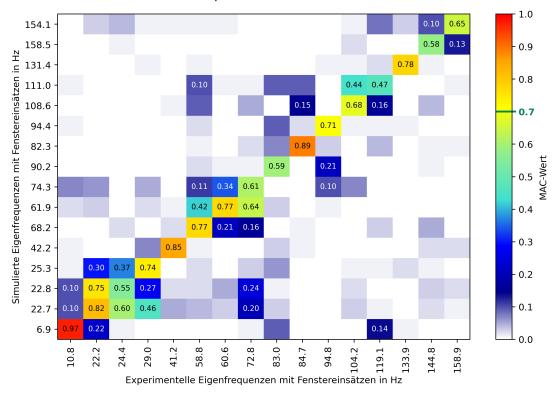
5.8.3 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse und der anschließenden Optimierung

Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse liefert ein Ersatzmodell, dessen Gesamt-CoP bezüglich des C_{12} -Kriteriums 31,7 % beträgt. Damit ist die Vorhersagegenauigkeit des Ersatzmodells geringfügig schlechter als in dem Model-Updating 4. Es kann bestätigt werden, dass von den Verbindungssteifigkeiten lediglich die Steifigkeit der Klettverbindung in x- und y-Richtung einen relevanten Einfluss auf das C_{12} -Kriterium hat (siehe Tabelle 5.10 in hellblau hervorgehoben).

Durch den mangelnden Einfluss der übrigen Verbindungssteifigkeiten ist davon auszugehen, dass die übrigen Verbindungssteifigkeiten den gewählten Startwerten entsprechen. Dies zeigt, dass die vorher verwendete fixierte Verbindung, die über eine unendlich hohe Steifigkeit verfügt, zu steif angenommen wurde. Wäre die Annahme einer fixierten Verbindung korrekt, so hätte durch die Sensitivitätsanalyse und die Optimierung ein Design mit höchstmöglicher Steifigkeit ermittelt werden müssen. Aus diesem Grund werden für alle weiteren Betrachtungen die Schraubenverbindungen



(a) MAC-Matrix: Vergleich der simulierten Moden in der Referenzkonfiguration mit den experimentell bestimmten



(b) MAC-Matrix: Vergleich der simulierten Moden in der optimierten Konfiguration

Abbildung 5.12 Model-Updating 5: Vergleich der MAC-Matrix vor (Referenzkonfiguration) und nach (optimierte Konfiguration) dem Model-Updating

nicht weiter als fixierte Verbindungen angenommen, sondern wie hier beschrieben als "Lagerbuchsen" mit der angegebenen Steifigkeit.

Durch den niedrigen CoP des Ersatzmodells liefert die anschließende Optimierung ein optimiertes Ergebnis, dessen Wert des C_{12} -Kriteriums gleich dem des Referenzdesigns ist.

Für das Design, für das die in Abbildung 5.12b gezeigte MAC-Matrix berechnet werden kann, nimmt das C_{12} -Kriterium einen Wert von 2,86 an. Dieses Design wird zufällig während der Sensitivitätsanalyse berechnet. Aus dieser Beobachtung kann abgeleitet werden, dass grundsätzlich die weitere Optimierung des vorliegenden Simulationsmodells möglich ist. Dazu müssen jedoch andere Parameter berücksichtigt und in die Optimierung einbezogen werden.

Für die weiteren Betrachtungen wird das optimierte Design, das mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse bestimmt werden kann, verwendet. Der Vergleich der MAC-Matrix für diese optimierte Konfiguration mit dem Referenzdesign zeigt, dass durch die veränderten Verbindungssteifigkeiten vor allem die Moden in dem Frequenzbereich von 22,2 Hz bis 41,2 Hz verändert werden. In diesem Bereich werden die Nebendiagonaleinträge nach dem Model-Updating ebenfalls verbessert abgebildet. Alle Moden mit Eigenfrequenzen außerhalb dieses Frequenzbereichs werden lediglich geringfügig verändert. Eine Ausnahme stellt die Mode bei 94,8 Hz dar. Insgesamt werden in dem optimierten Design 9 von 16 Moden mit einer Genauigkeit von mehr als 70 % abgebildet.

In dem Model-Updating, in dem sowohl die Verbindungssteifigkeiten der Klettverbindungen als auch die Wandstärken variiert werden, werden durch die Optimierung die Moden des gesamten betrachteten Frequenzbereichs verändert. Da sich im gesamten Frequenzbereich Moden finden, die mit geringerer Genauigkeit als 70 % abgebildet werden, ist eine weitere Anpassung, die im gesamten Frequenzbereich wirksam ist, vorzunehmen. Es ist daher davon auszugehen, dass zur weiteren Optimierung der Simulationsergebnisse die Anpassung der Fenstereinsätze erforderlich ist. Allerdings hat das im Rahmen des Model-Updating 4 bestimmte Ersatzmodell einen geringen CoP bezüglich des C_{12} -Kriteriums. Die weitere Optimierung auf Basis dieses Modells erscheint daher nicht sinnvoll. Aus diesem Grund wird das reale Schwingungsverhalten eines der Fenstereinsätze im demontierten Zustand bestimmt. Im Anschluss wird ausschließlich für den Fenstereinsatz ein Model-Updating auf Basis des realen Schwingungsverhaltens durchgeführt. Das auf diese Weise bestimmte Modell des Fenstereinsatzes wird anschließend in die Baugruppe eingefügt und die Verbindungssteifigkeiten ein weiteres Mal variiert.

Die separate Betrachtung des Fenstereinsatzes kann weiterhin verwendet werden, um den Einfluss der vereinfacht modellierten Geometrie auf die Simulation des Schwingungsverhaltens abzuschätzen. Im nachfolgenden Abschnitt ist daher das Model-Updating des demontierten Fenstereinsatzes beschrieben, bevor im letzten Model-Updating 7 die Variation der Verbindungssteifigkeiten beschrieben wird.

Hypothese:

Durch die verbesserte Modellierung der Fenstereinsätze und anschließende Variation der Verbindungssteifigkeiten kann eine weitere Verbesserung der Simulationsergebnisse erreicht werden. Um die realistische Modellierung der Fenstereinsätze zu ermöglichen, ist ein Model-Updating für die Fenstereinsätze im demontierten Zustand erforderlich.

5.9 Model-Updating 6: Model-Updating des Fenstereinsatzes

Die zuvor durchgeführten Model-Updatings 4 und 5 zeigen, dass durch die Berücksichtigung der Klettverbindungen und der GFK-Platte sowie der Sonnenblende und Plexiglasscheibe eine genauere Simulation des realen Schwingungsverhaltens möglich ist als bei den Model-Updatings 1 bis 3. Allerdings weisen die aus den Sensitivitätsanalysen abgeleiteten Ersatzmodelle lediglich geringe Vorhersagegenauigkeiten hinsichtlich des C_{12} -Kriteriums auf. Dies deutet darauf hin, dass nicht alle relevanten Parameter in der Sensitivitätsanalyse berücksichtigt werden. Um auszuschließen, dass der Grund für die geringe Genauigkeit des Ersatzmodells die Fenstereinsätze sind, wird ein Model-Updating, das ausschließlich die Fenstereinsätze berücksichtigt, durchgeführt. Dazu werden die in Abschnitt 3.5 beschriebenen Ergebnisse der experimentellen Modalanalyse des Fenstereinsatzes verwendet.

5.9.1 Modellaufbau

Die Modellierung der Fenstergeometrie wird geringfügig verändert. In den bisherigen Simulationsmodellen der Model-Updatings 2 bis 5 sind die Fenstereinsätze als zusammenhängende Flächen mit verschiedener Materialzuweisung und verschiedenen Wandstärken modelliert. Diese Modellierung sorgt für eine steife Verbindung an der Verbindungskante zwischen GFK-Platte (Fläche 4) und Fläche 2. Um auszuschließen, dass die Annahme einer idealen Verbindung zwischen GFK-Platte und Fläche 2 die Simulationsergebnisse negativ beeinflusst, wird die Fenstergeometrie an der Übergangsstelle in zwei getrennte Flächen aufgeteilt.

Die Betrachtung des realen Bauteils zeigt, dass die GFK-Platte nicht vollständig entlang der Kante mit der Fläche 2 verbunden ist. Zur Befestigung der GFK-Platte werden fünf Klammern verwendet (siehe Abbildung 3.10a). Die Positionen der Klammern werden ebenfalls im Modell ergänzt und dort jeweils eine Interaktionsbeziehung zur Verbindung der beiden Flächen definiert. Eine manuelle Variation verschiedener Verbindungselemente sowie Lagerungen zwischen der GFK-Platte und der Fläche 2 zeigt, dass durch eine nicht lösbare Kontaktbedingung die besten Ergebnisse in der Referenzkonfiguration erzielt werden können. Die Annahme, dass die Modellierung als zusammenhängende Fläche zu einer zu steifen Verbindung und der Verschlechterung der Simulationsergebnisse führt, kann folglich nicht bestätigt werden. Die Kontaktdefinition entlang der Verbindungsstellen wird deshalb beibehalten.

Während der experimentellen Bestimmung der FRF ist der Fenstereinsatz mit der GFK-Platte nach unten frei schwebend an elastischen Gummibändern aufgehängt (siehe Abbildung 3.10a). Durch die geringe Dicke der GFK-Platte nimmt deren Krümmung durch die wirkende Gravitation im Vergleich zum montierten Zustand ab. Um die Anpassung des Netzes der Messpunkte aus dem Experiment an das CAD-Modell der Struktur zu ermöglichen, muss daher die Krümmung der GFK-Platte im CAD-Modell reduziert werden. Die bereichsweise Definition der Wandstärken zur Berücksichtigung der Sonnenblende sowie des Plexiglases wird beibehalten. Die den verschiedenen Bereichen zu Beginn zugeordneten Wandstärken sind in Tabelle 5.12 in der Spalte "Referenzkonfiguration" zusammengefasst. Die Werte der Wandstärken in der Referenzkonfiguration entsprechen den am realen Bauteil gemessenen. Für

die Wandstärke im Bereich der Fläche 2 wird mit den Model-Updatings 4 und 5 eine Wandstärke von 3,7 mm bestimmt. Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Fläche 1 dieselbe Wandstärke aufweist. Die Gesamtwandstärke im Bereich der Fläche 1 wird aus der Wandstärke des Polymers in dem Bereich zuzüglich der Wandstärke der Sonnenblende berechnet. Im realen System kann eine Wandstärke von 0,7 mm für die Sonnenblende ermittelt werden. Daher folgt für die Wandstärke der Fläche 1 ein Wert von 3,0 mm.

Im demontierten Zustand wird zudem die Masse der Fenstereinsätze ein weiteres Mal bestimmt. Die Masse beträgt im demontierten Zustand 0,818 kg. Die Differenz zu dem montierten Zustand ist durch die fehlenden Verbindungselemente zu erklären. Für die Berechnung des C_3 -Kriterium wird der neu bestimmte Wert als Zielmasse verwendet.

Zu Beginn werden die Materialparameter entsprechend der vorher bereits verwendeten gewählt. Die Materialparameter des GFK werden an die in der Voruntersuchung bestimmten angepasst. Die verwendeten Materialkennwerte des Referenzdesigns sind ebenfalls in Tabelle 5.12 zusammengefasst.

Tabelle 5.12 Model-Updating 6: Übersicht über die berücksichtigten Modellparameter sowie die ermittelten Sensitivitätswerte (CoP bezüglich des C_{12} -Kriteriums, CoP bezüglich des C_3 -Kriteriums)

Parameter	Referenz- konfigu- ration	Zulässiger Wertebereich	СоР	Optimierte Konfigurati- on	
Wandstärke Fläche 1	3,0 mm	2,0 mm bis 4,5 mm	5,7 % 20,4 %	4,26 mm	
Wandstärke Fläche 2	3,7 mm	1,5 mm bis 5,0 mm	2,0 % 15,0 %	2,2 mm	
Wandstärke Fläche 3	1,8 mm	1,5 mm bis 2,5 mm	6,5 % 19,3 %	1,58 mm	
Dicke GFK-Platte	o,8 mm	0,5 mm bis 1,1 mm	26,0 % 12,5 %	0,89 mm	
Wandstärke Sonnenblende	0,7 mm	0,5 mm bis 1,5 mm	0,0 % 2,5 %	0,96 mm	
Dicke Plexiglas	2,2 mm	1,8 mm bis 2,6 mm		2,2 mm	
Dichte Polymer	1716 kg m ⁻³	1544 kg m ⁻³ bis 1887 kg m ⁻³	6,2 % 15,3 %	1565 kg m ⁻³	
E-Modul Polymer	2,21·10 ⁹ Pa	nic	ht variab	el	
Querkontrak- tionszahl Polymer	0,4	nicht variabel			
Dichte GFK	1892 kg m ⁻³	1200 kg m ⁻³ bis 2800 kg m ⁻³	16,5 % 23,0 %	2265 kg m ⁻³	

Parameter	Referenz- konfigu- ration	Zulässiger Wertebereich	СоР	Optimierte Konfigurati- on
E-Modul in	2,45·10¹º Pa	2,21 · 10¹º Pa		2,45·10¹º Pa
x-Richtung GFK	2,45 10 1 a	bis 2,7 · 1010 Pa		2,45°10 Ta
E-Modul in y-Richtung GFK	2,54 · 10 ¹⁰ Pa	2,28 · 10 ¹⁰ Pa bis 2,79 · 10 ¹⁰ Pa	5,8 % o,o %	2,4·10 ¹⁰ Pa
E-Modul in z-Richtung GFK	5·10 ⁹ Pa	4,5·10 ⁹ Pa bis 5,5·10 ⁹ Pa		5·10 ⁹ Pa
Querkontrak- tionszahl xy GFK	0,126	0,113 bis 0,139		0,126
Querkontrak- tionszahl xz GFK	0,3	0,27 bis 0,33		0,3

5.9.2 Variable Parameter

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse werden alle in Tabelle 5.12 zusammengefassten Parameter, bis auf E-Modul und Querkontraktionszahl des Polymers, als variabel angenommen. Die Entscheidung, diese beiden Materialkennwerte des Polymers nicht zu variieren, beruht auf den vorher durchgeführten Model-Updatings 2 bis 5, die gezeigt haben, dass sie bezüglich der Optimierungskriterien keinen Einfluss auf das Verhalten des Simulationsmodells haben.

Für die E-Module und Querkontraktionszahlen des GFK werden die vom Programm vorgeschlagenen Grenzen von ± 10 % verwendet. Gleiches gilt für die Dichte des Polymers. Die Grenzen, in denen die Dichte des GFK variiert wird, orientieren sich an den Grenzen der zugehörigen Wandstärke und der Zielmasse des Fenstereinsatzes, um sicherzustellen, dass durch die Sensitivitätsanalyse Designs mit realistischem Wert des C_3 -Kriteriums ermittelt werden können.

Im Bereich der Fläche 1 ist das reale Bauteil doppelwandig ausgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass die Wandstärke eines jeden Einzelteils 1,8 mm entspricht, wie im Bereich der Fläche 3. Daher folgt für die nötige Wandstärke mindestens ein Wert von 3,6 mm. Im Bereich der Verbindungsstelle beider Einzelteile kann von außen eine Wandstärke von 7 mm gemessen werden. Unter Berücksichtigung der Führungsschiene für die Sonnenblende wird von einer maximal zulässigen Gesamtwandstärke von 6,0 mm ausgegangen. Für die obere Grenze der Wandstärke im Bereich der Fläche 1 folgt, unter Berücksichtigung der oberen Grenze der Wandstärke der Sonnenblende, ein Wert von 4,5 mm.

Die Dicke der GFK-Platte wird im Bereich von 0,5 mm bis 1,1 mm variiert, um mögliche Messungenauigkeiten ausgleichen zu können. Der Wertebereich der Wandstärke der Sonnenblende wird zu 0,5 mm bis 1,5 mm festgelegt.

Im realen Bauteil ist die Wandstärke der Fläche 2 nicht konstant (siehe Abbildung 3.10a). Bei Modellierung durch eine konstante Wandstärke wird daher davon ausgegangen, dass die zulässigen durchschnittlichen Wandstärken etwas geringer sind als die der Fläche 1. Aus diesem Grund wird der in Tabelle 5.12 dargestellte Wertebereich verwendet. Der Wertebereich für die Wandstärke des Plexiglases orientiert sich ebenfalls an der Annahme vorliegender Messungenauigkeiten.

5.9.3 Simulationsergebnisse des Schwingungsverhaltens vor dem Model-Updating

Mit den in der Referenzkonfiguration gewählten Parametern kann die in Abbildung 5.13a dargestellte MAC-Matrix berechnet werden. Der Wert des C_{12} -Kriteriums liegt bei 2,56. Es ist außerdem zu erkennen, dass nicht alle 13 experimentell bestimmten Moden (siehe Tabelle 3.2) durch die Simulation abgebildet werden können. Die Moden, die durch die Simulation abgebildet werden, weisen in der Auto-MAC aus Abbildung 3.11 des experimentellen Datensatzes keine Nebendiagonaleinträge und damit keine Ähnlichkeit zueinander auf. Die durch die Simulation berechnete MAC-Matrix spiegelt dies wider.

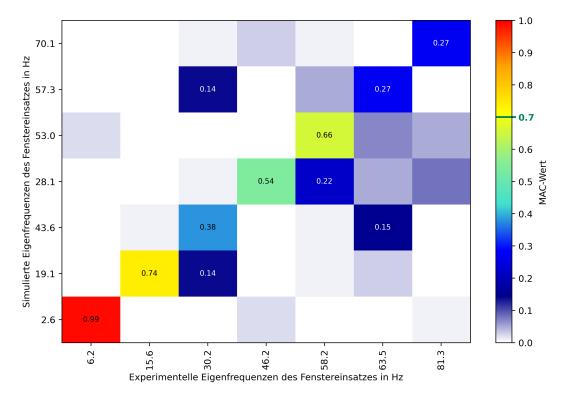
Insgesamt ist die Übereinstimmung der simulierten zu den experimentell bestimmten Moden mit den Eigenfrequenzen 30,2 Hz, 46,3 Hz, 63,5 Hz und 81,3 Hz gering. Die übrigen 3 experimentell bestimmten Moden werden mit größerer Übereinstimmung (MAC-Wert zwischen 0,65 und 0,99) durch die Simulation abgebildet. Der Vergleich der experimentell bestimmten und der simulierten Eigenfrequenzen aus Tabelle 5.13 zeigt bei allen Moden außer 58,2 Hz und 63,5 Hz große absolute oder prozentuale Frequenzabweichungen. Die Übereinstimmung hinsichtlich der Eigenfrequenzen ist folglich nicht gegeben.

Tabelle 5.13 Model-Updating 6: Frequenzabweichung der simulierten Eigenfrequenzen in der Referenzkonfiguration $f_{sim,ref}$ und der optimierten Konfiguration $f_{sim,opti}$ von den experimentell bestimmten Eigenfrequenzen f_{exp} (absolute Frequenzabweichung \geq 10 Hz, prozentuale Frequenzabweichung \geq 10 %)

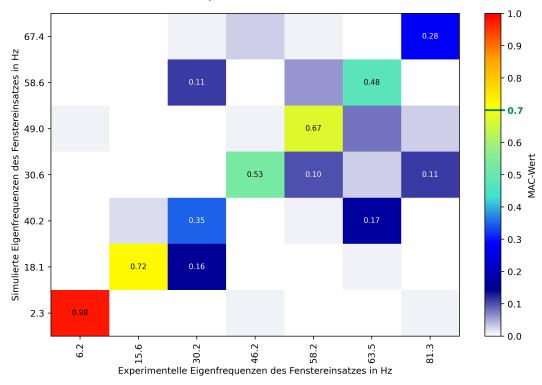
		U				0
f_{exp} in Hz	$f_{sim,ref} \ $ in Hz	Δ in Hz	Δ in %	$f_{sim,opti} \ $ in Hz	Δ in Hz	Δ in %
6,2	2,60	-3,60	-58,06	2,30	-3,90	-62,90
15,6	19,10	3,50	22,44	18,10	2,50	16,03
30,2	43,60	13,40	44,37	40,20	10,00	33,11
46,2	28,10	-18,10	-39,18	30,60	-15,60	-33,77
58,2	53,00	-5,20	-8,93	49,00	-9,20	-15,81
63,5	57,30	-6,20	-9,76	58,60	-4,90	-7,72
81,3	70,10	-11,20	-13,78	67,40	-13,90	-17,10

5.9.4 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse und der anschließenden Optimierung

Das erste Design, das im Rahmen der Sensitivitätsanalyse berechnet wird, weist einen Wert des C_{12} -Kriteriums von 0,59 auf. Dieser Wert ist sehr viel niedriger als der für das Referenzdesign berechnete (2,56). Alle nachfolgenden Designs weisen ähnlich niedrige Werte auf. Aus diesem Grund wird die Sensitivitätsanalyse nach 14 Designs angehalten. Die Betrachtung der MAC-Matrix des ersten Designs zeigt, dass nur zwei der experimentellen Moden für dieses Design abgebildet werden können. Dieses Design dient, da nicht anders definiert, als Referenz für alle nachfolgenden Designs. Das



(a) MAC-Matrix: Vergleich der simulierten Moden in der Referenzkonfiguration mit den experimentell bestimmten



(b) MAC-Matrix: Vergleich der simulierten Moden in der optimierten Konfiguration

Abbildung 5.13 Model-Updating 6: Vergleich der MAC-Matrix vor (Referenzkonfiguration) und nach (optimierte Konfiguration) dem Model-Updating

führt dazu, dass für jedes Design in der Sensitivitätsanalyse ausschließlich diese beiden Moden in dem Mode-Pairing berücksichtigt werden, obwohl auch weitere Moden durch die jeweilige Simulation abgebildet werden können.

Die Anzahl der im Mode-Pairing berücksichtigten Moden kann durch die gewählten Optimierungskriterien nicht bestimmt werden. Zwei Moden sind nicht ausreichend, um eine präzise Aussage über die Genauigkeit, mit der das reale Schwingungsverhalten abgebildet werden kann, zu treffen. Daher wird in den Einstellungen der Sensitivitätsanalyse manuell das Design der Referenzkonfiguration als Referenzdesign definiert. Dadurch werden im Mode-Pairing eines jeden Samples der Sensitivitätsanalyse alle Moden berücksichtigt, die im Referenzdesign abgebildet werden. Können für ein Design nicht alle diese Moden durch die Simulation abgebildet werden, nimmt der Wert des C_{12} -Kriteriums automatisch ab, da die Summe der berücksichtigten Abweichungen geringer ist (siehe Gleichung 4.1). Diese Abnahme ist auf die Definition des C_{12} -Kriteriums aus Gleichung 4.1 zurückzuführen. Die Werte, die das C_{12} -Kriterium für die verschiedenen Designs annimmt, unterliegen daher starken Schwankungen. Dies ist in Abbildung 5.14 zu sehen. In dieser Abbildung sind die Werte, die die Datenpunkte für das C_{12} -Kriterium und das C_3 -Kriterium annehmen, dargestellt. Neben den staken Schwankungen des Wertes des C_{12} -Kriteriums ist zu erkennen, dass die Designs gruppiert auftreten. Jede Gruppe von Designs bildet eine bestimmte Anzahl experimentell bestimmter Moden ab. Je weniger Moden durch die Simulation abgebildet werden können, desto geringer ist der Wert des C_{12} -Kriteriums, da weniger Abweichungen berücksichtigt werden. Ein geringer Wert des C_{12} -Kriteriums bedeutet in diesem Fall jedoch keine Verbesserung, sondern eine verschlechterte Abbildung des realen Schwingungsverhaltens.

Das auf Basis dieser Daten erstellte Ersatzmodell liefert durch Optimierung in jedem Fall ein Design mit niedrigem Wert des C_{12} -Kriteriums. In diesem Design können jedoch nur zwei der experimentell bestimmten Moden abgebildet werden. Aus diesem Grund erfolgt eine manuelle Anpassung des Datensatzes, auf dem das erstellte Ersatzmodell basiert. Dabei werden ausschließlich alle Designs, die einen Wert von mehr als 1,9 für das C_{12} -Kriteriums annehmen, berücksichtigt. Alle nachfolgenden Betrachtungen basieren auf diesem angepassten Ersatzmodell.

Der Gesamt-CoP bezüglich des C_{12} -Kriteriums des angepassten Ersatzmodells beträgt 81,0 %. Dies zeigt, dass in diesem Model-Updating viele der relevanten Parameter berücksichtigt werden. Die ermittelten Werte des CoP für jeden Parameter können Tabelle 5.12 entnommen werden. Es ist zu erkennen, dass die Dicke der GFK-Platte sowie der zugehörigen Dichte den größten Einfluss auf das Verhalten des Ersatzmodells bezüglich des C_{12} -Kriteriums haben.

Bezüglich des C_3 -Kriteriums zeigt von den für das C_{12} -Kriterium relevanten Parametern der E-Modul des GFK in y-Richtung wie erwartet keinen Einfluss. Stattdessen hat die Wandstärke der Sonnenblende einen Einfluss. Dieser Parameter ist bezüglich des C_{12} -Kriteriums nicht relevant. Der Gesamt-CoP des Ersatzmodells bezüglich des C_3 -Kriteriums beträgt 99,5%.

Das erstellte Ersatzmodell wird als Grundlage der anschließenden Optimierung verwendet, dessen Ergebnis in Form der Pareto-Front in Abbildung 5.15 dargestellt ist. Es ist zu sehen, dass die Minimierung des C_{12} -Kriteriums zu einem Anstieg des C_{3} -Kriteriums führt. Diese Verhalten kann in vorangegangenen Model-Updatings 2 und 3 ebenfalls beobachtet werden (siehe 5.6). Zudem ist zu erkennen, dass alle validierten besten Designs, bis auf eins, deutlich geringere Werte des C_{12} -Kriteriums annehmen

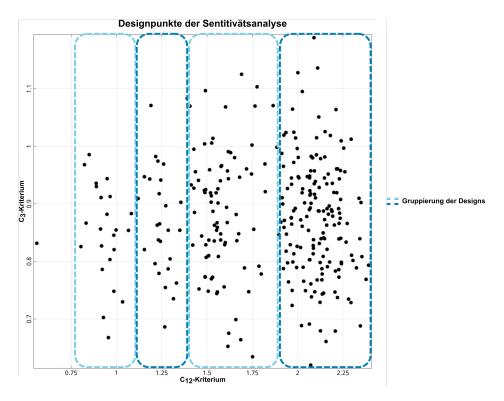


Abbildung 5.14 Verteilung der Werte, die die Designs für das C_{12} -Kriterium und das C_3 -Kriterium annehmen

als durch die Optimierung berechnet. Die Betrachtung der MAC-Matrix eines dieser Designs zeigt, dass nicht alle im Referenzdesign vorgegebenen Moden durch die Simulation abgebildet werden. Das Design mit Nummer 301 ist das einzige Design, für das alle Moden, die in der Referenzkonfiguration abgebildet werden, weiterhin abgebildet werden können. Aus diesem Grund wird dieses Design als optimierte Konfiguration ausgewählt. Die Werte der Parameter für dieses Design können Tabelle 5.12 entnommen werden.

Der Wert, den das C_{12} -Kriterium für dieses Design annimmt, beträgt 1,94. Die MAC-Matrix, die für dieses Design berechnet werden kann, ist in Abbildung 5.13b dargestellt.

Verglichen mit dem Design der Referenzkonfiguration kann lediglich eine geringe Verbesserung der Genauigkeit, mit der die experimentellen Moden durch die Simulation abgebildet werden können, erreicht werden. Die einzige Mode, für die eine Verbesserung erzielt werden kann, ist die bei 63,5 Hz. Obwohl die Frequenzabweichungen für 6 der 7 Moden auch weiterhin 10 Hz oder 10 % überschreiten, ist für alle Moden eine Verringerung der Frequenzabweichung zu erkennen. Eine Ausnahme stellen die simulierten Moden, die den experimentell bestimmten bei 58,2 Hz und 81,3 Hz zugeordnet werden, dar, deren Frequenzabweichung zunimmt.

Die Wandstärken für die Fläche 3 und die GFK-Platte zeigen gute Übereinstimmung mit den am realen Bauteil bestimmten Werten. Die Gesamtwandstärke aus GFK-Platte und Sonnenblende ist mit 1,85 mm etwas höher als im realen Bauteil. Für die übrigen Parameter sind keine exakten Referenzwerte bekannt, sodass keine Bewertung der Übereinstimmung mit den im realen Bauteil vorhandenen getroffen werden kann. Die Masse, die der Fenstereinsatz in der optimierten Konfiguration hat, liegt bei 0,814 kg und weicht damit um 0,5 % von der realen Masse ab. Die geringen Abwei-

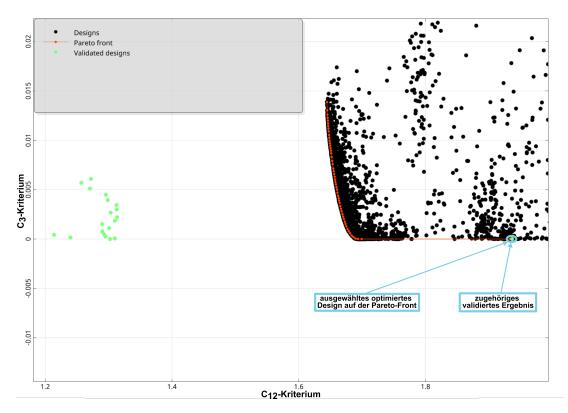


Abbildung 5.15 Pareto-Front der Optimierung des Model-Updatings 6

chungen der Wandstärken und der Masse vom realen Bauteil zeigen, dass durch das Model-Updating eine realitätsnahe Modellierung der Geometrie erreicht werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Abweichungen des simulierten vom realen Schwingungsverhaltens groß sind.

Insgesamt zeigt das hier beschriebene Model-Updating, dass mit den vorgenommenen Vereinfachungen lediglich eine geringe Verbesserung der Simulation des realen Schwingungsverhaltens im Vergleich zum Referenzdesign möglich ist. Eine nicht betrachtete Vereinfachung und ihre Auswirkungen auf die Simulation des Schwingungsverhaltens ist die Geometrie. Zur weiteren Verbesserung der Simulation kann es daher notwendig sein, die Geometrie an das reale Bauteil anzupassen.

Der Fenstereinsatz wird im Folgenden unter Verwendung der optimierten Konfiguration in die Baugruppe des Seitenwandpaneels mit montierten Fenstereinsätzen eingefügt. Anschließend erfolgt die Anpassung der Verbindungssteifigkeiten aller Verbindungselemente. Dieses Model-Updating ist im nachfolgenden Abschnitt dargestellt.

Zwischenergebnis:

Durch das durchgeführte Model-Updating kann die Simulation des realen Schwingungsverhaltens des Fenstereinsatzes leicht verbessert werden. Die bestimmten Wandstärken stimmen, soweit Referenzwerte am realen Bauteil bestimmbar sind, gut mit dem realen Fenstereinsatz überein. Die Gesamtmasse wird sehr präzise durch das Modell abgebildet.

5.10 Model-Updating 7: Anpassung der Verbindungssteifigkeiten aller Verbindungselemente auf Basis des optimierten Fenstereinsatzes

Im Folgenden wird das Model-Updating zur Bestimmung der Verbindungssteifigkeiten der Verbindungselemente unter Verwendung der optimierten Konfiguration des Fenstereinsatzes beschrieben. Es wird keine Variation der Wandstärken sowie Materialparameter vorgenommen.

5.10.1 Modellaufbau und variable Parameter

Der Modellaufbau entspricht dem aus Model-Updating 5 (siehe Abschnitt 5.8). Alle verwendeten Modellparameter sind in Tabelle 5.14 zusammengefasst. Die Modellparameter bis auf die Steifigkeiten der Verbindungselemente werden nicht verändert. Die zulässigen Wertebereiche der Steifigkeiten entsprechen denen aus Model-Updating 5 aus Abschnitt 5.8.1. Für die Steifigkeiten der Schraubenverbindungen, wird durch den geringen zu erwartenden Einfluss ein geringerer Wertebereich gewählt. Die Betrachtung dieser Steifigkeiten dient ausschließlich der Bestätigung des nicht vorhandenen Einflusses.

Tabelle 5.14 Model-Updating 7: Übersicht über die berücksichtigten Modellparameter sowie die ermittelten Sensitivitätswerte (CoP bezüglich des C_{12} -Kriteriums)

	- 12	Kinteriainsj				
Parameter	Referenz- konfigu- ration	Zulässiger Wertebereich	СоР	Optimierte Konfigurati- on		
Wandstärke Fläche 1	4,26 mm	nic	ht variab	el		
Wandstärke Fläche 2	2,22 mm	nic	ht variab	el		
Wandstärke Fläche 3	1,58 mm	nicht variabel				
Dicke GFK-Platte	0,89 mm	nicht variabel				
Wandstärke Sonnenblende	0,96 mm	nicht variabel				
Dicke Plexiglas	2,2 mm	nic	ht variab	el		
Dichte Polymer	1565 kg m ⁻³	nic	ht variab	el		
E-Modul Polymer	2,21·10 ⁹ Pa	nicht variabel				
Querkontrak- tionszahl Polymer	0,4	nicht variabel				

Parameter	Referenz- konfigu- ration	Zulässiger Wertebereich	СоР	Optimierte Konfigurati- on		
Dichte GFK	rechts: 2265 kg m ⁻³ links: 1383 kg m ⁻³	nicht variabel				
E-Modul in x-Richtung GFK	2,45·10¹º Pa	nicht variabel				
E-Modul in y-Richtung GFK	2,39 · 10 ¹⁰ Pa	nicht variabel				
E-Modul in z-Richtung GFK	5·10¹º Pa	nicht variabel				
Querkontrak- tionszahl xy GFK	0,126	nicht variabel				
Querkontrak- tionszahl yz GFK	0,126	nicht variabel				
Querkontrak- tionszahl GFK	0,3	nicht variabel				
Verbindungsstei- figkeit Klett in x-Richtung	1938 N m ⁻¹	1. Sensitivitäts- analyse: 174,42 N m ⁻¹ bis 21318 N m ⁻¹ 2.Sensitivitäts- analyse: 1500 N m ⁻¹ bis 2500 N m ⁻¹	1. 18,4% 2. 16,4%	2201 N m ⁻¹		
Verbindungsstei- figkeit Klett in y-Richtung	1026 N m ⁻¹	1. Sensitivitäts- analyse: 92,34 N m ⁻¹ bis 11286 N m ⁻¹ 2.Sensitivitäts- analyse: 1000 N m ⁻¹ bis 3500 N m ⁻¹	1. 41,5 % 2. 57,8 %	2658 N m ⁻¹		
Verbindungsstei- figkeit Klett in z-Richtung	60000 N m ⁻¹	1. Sensitivitäts- analyse: 5400 N m ⁻¹ bis 6,6·10 ⁵ N m ⁻¹ 2. Sensitivitäts- analyse: konstant		6,5·10 ⁵		

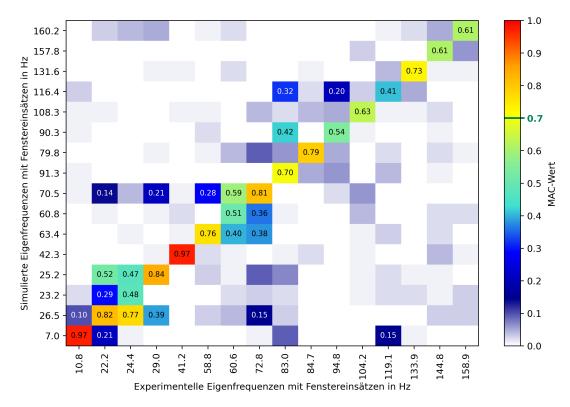
Parameter	Referenz- konfigu- ration	Zulässiger Wertebereich	СоР	Optimierte Konfigurati- on	
Verbindungssteifigkeit Schraubenverbindungen in x-, y- und z-Richtung	2·10 ⁸ N m ⁻¹	1. Sensitivitäts- analyse: 1,5·10 ⁸ N m ⁻¹ bis 8·10 ⁸ N m ⁻¹ 2. Sensitivitäts- analyse: konstant		2·10 ⁸ N m ⁻¹	

5.10.2 Simulationsergebnis vor dem Model-Updating

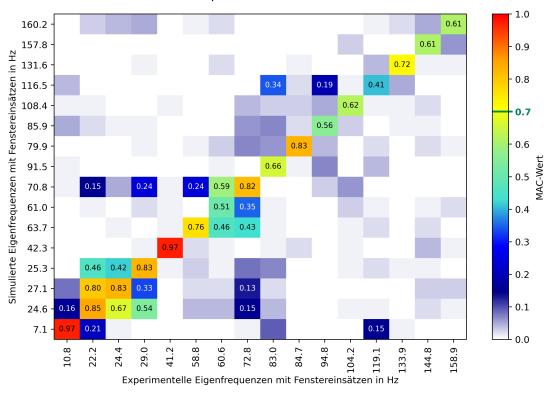
In Abbildung 5.16a ist die MAC-Matrix, die unter Verwendung der Modellparameter des Referenzdesigns berechnet werden kann, dargestellt. Der Wert, den das C_{12} -Kriterium für das Referenzdesign annimmt, beträgt 3,03. Die experimentellen Moden bei 10,8 Hz, 22,2 Hz, 29,0 Hz, 41,2 Hz, 58,8 Hz, 72,8 Hz, 83,0 Hz, 84,7 Hz und 133,9 Hz können durch die simulierten Moden gut abgebildet werden. Für alle übrigen 7 Moden wird eine Verbesserung des simulierten Schwingungsverhaltens angestrebt. In Tabelle 5.15 sind die Abweichungen der simulierten Eigenfrequenzen von den experimentell bestimmten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass lediglich die simulierte Mode, die der experimentell bestimmten mit Eigenfrequenz von 144,8 Hz zugeordnet wird, eine absolute Frequenzabweichung von mehr als 10 Hz aufweist. Für die Eigenfrequenzen 10,8 Hz, 22,2 Hz, 29,0 Hz und 83,0 Hz beträgt die prozentuale Frequenzabweichung mehr als 10 %. Absolut betrachtet sind diese Frequenzabweichungen für die Moden im Frequenzbereich von 10,8 Hz bis 29,0 Hz jedoch gering. Für die Sensitivitätsanalyse werden in diesem Fall lediglich 100 Datenpunkte berechnet. Es wird durch die geringe Anzahl der betrachteten variablen Parameter davon ausgegangen, dass diese Anzahl ausreichend ist, um den Einfluss der Parameter zu bestimmen und ein zuverlässiges Ersatzmodell zu bestimmen. Da die separate Optimierung des Fenstereinsatzes die Wichtigkeit der Definition des Referenzdesigns in den Einstellungen der Sensitivitätsanalyse gezeigt hat, wird das Referenzdesign explizit definiert. Die Optimierung erfolgt ohne Berücksichtigung des C_3 -Kriteriums, da die Fenstermasse konstant ist.

5.10.3 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse und der anschließenden Optimierung

Aus der ersten Sensitivitätsanalyse (gleichnamig in Tabelle 5.14 bezeichnet) wird ein Ersatzmodell erstellt, dessen Vorhersagegenauigkeit bezüglich des C_{12} -Kriteriums 49,4 % beträgt. Dabei zeigt die Sensitivitätsanalyse, dass lediglich die Verbindungssteifigkeit der Klettverbindung in x- und in y-Richtung einen Einfluss auf das C_{12} -Kriterium haben. Der CoP beider Parameter zeigt, dass der Einfluss der Verbindungssteifigkeit in y-Richtung größer ist als der in x-Richtung (hellblau in Tabelle 5.14).



(a) MAC-Matrix: Vergleich der simulierten Moden in der Referenzkonfiguration mit den experimentell bestimmten



(b) MAC-Matrix: Vergleich der simulierten Moden in der optimierten Konfiguration

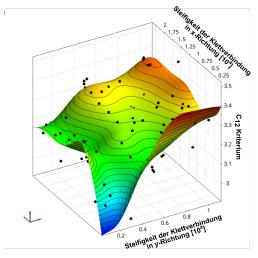
Abbildung 5.16 Model-Updating 7: Vergleich der MAC-Matrix vor (Referenzkonfiguration) und nach (optimierte Konfiguration) dem Model-Updating

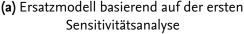
Tabelle 5.15 Model-Updating 7: Frequenzabweichung der simulierten Eigenfrequenzen in der Referenzkonfiguration $f_{sim,ref}$ und der optimierten Konfiguration $f_{sim,opti}$ von den experimentell bestimmten Eigenfrequenzen f_{exp} (absolute Frequenzabweichung \geq 10 Hz, prozentuale Frequenzabweichung \geq 10 %)

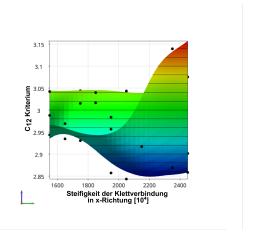
f_{exp} in Hz	$igg f_{sim,ref} \ $ in Hz	Δ in Hz	Δ in %	$igg f_{sim,opti} \ igg $ in Hz	Δ in Hz	Δ in %
10,8	7,00	-3,80	-35,19	7,10	-3,70	-34,26
22,2	26,50	4,30	19,37	24,60	2,40	10,81
24,4	23,20	-1,20	-4,92	27,10	2,70	11,07
29,0	25,20	-3,80	-13,10	25,30	-3,70	-12,76
41,2	42,30	1,10	2,67	42,30	1,10	2,67
58,8	63,40	4,60	7,82	63,70	4,90	8,33
60,6	60,80	0,20	0,33	61,00	0,40	0,66
72,8	70,50	-2,30	-3,16	70,80	-2,00	-2,75
83,0	91,30	8,30	10,00	91,50	8,50	10,24
84,7	79,80	-4,90	-5,79	79,90	-4,80	-5,67
94,8	90,30	-4,50	-4,75	85,90	-8,90	-9,39
104,2	108,30	4,10	3,93	108,40	4,20	4,03
119,1	116,40	-2,70	-2,27	116,50	-2,60	-2,18
133,9	131,60	-2,30	-1,72	131,60	-2,30	-1,72
144,8	157,80	13,00	8,98	157,80	13,00	8,98
158,9	160,20	1,30	0,82	160,20	1,30	0,82

Die Betrachtung des in Abbildung 5.17a abgebildeten Ersatzmodells zeigt, dass das Minimum der Funktion außerhalb des betrachteten Wertebereichs liegt. Der abgebildete Wertebereich entspricht nicht dem ursprünglich definierten, sondern dem, in dem Datenpunkte aus der Sensitivitätsanalyse (schwarze Punkte in der Abbildung) liegen. In diesen Grenzen ist das Ersatzmodell definiert und damit, entsprechend der Vorhersagegenauigkeit, exakt. Das Verhalten außerhalb des Bereichs kann durch das Ersatzmodell nicht direkt abgebildet werden. Da das Ersatzmodell am Rand des Wertebereichs monoton fällt, führt die Optimierung entlang dieses Ersatzmodells zu einem besten Design mit möglichst geringer Steifigkeit der Klettverbindung in x- und y-Richtung. Der validierte Wert des C_{12} -Kriteriums für das, mit diesem Ersatzmodell bestimmten, optimierte Design entspricht 3,32. Dies entspricht, verglichen mit dem Referenzdesign, einer deutlichen Verschlechterung. Das Ersatzmodell eignet sich nicht, um ein tatsächlich optimiertes Design zu bestimmen.

Da dieses Verhalten auf die unzureichende Abbildung des Simulationsverhaltens im Bereich des möglichen tatsächlichen Minimums zurückzuführen ist, wird eine zweite Sensitivitätsanalyse, in der ausschließlich die Verbindungssteifigkeiten der Klettverbindung in x- und y-Richtung variiert werden, durchgeführt. Dazu werden die Grenzen der zulässigen Wertebereiche an das Intervall, in dem gemäß der ersten Sensitivitätsanalyse das Minimum erwartet wird, angepasst. Die Definition der Wertebereiche ist in Tabelle 5.14 mit Bezeichnung "2. Sensitivitätsanalyse" gekennzeichnet. Aufgrund der weiteren Reduktion von variablen Parametern sind weniger Samples nötig, um ein Ersatzmodell mit hoher Vorhersagegenauigkeit zu erreichen. Daher werden in diesem Fall nur 30 Designs berechnet.







(b) Ersatzmodell basierend auf der zweiten Sensitivitätsanalyse

Abbildung 5.17 Vergleich der erstellten Ersatzmodelle in Abhängigkeit der gewählten Wertebereiche der Verbindungssteifigkeiten der Klettverbindungen

Das Ergebnis dieser zweiten Sensitivitätsanalyse ist ein Ersatzmodell mit einer Vorhersagegenauigkeit bezüglich des C_{12} -Kriteriums von 58,0 %. Durch Anpassung der Wertebereiche der variablen Parameter kann folglich eine Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit des Ersatzmodells erreicht werden. Der Einfluss der Steifigkeiten der Klettverbindungen kann bestätigt werden, genau wie die Tatsache, dass der Einfluss der Steifigkeit in y-Richtung deutlich größer ist.

In Abbildung 5.17b ist das erzeugte Ersatzmodell dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ein Minimum innerhalb des Wertebereichs, in dem das Ersatzmodell definiert ist, liegt. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass durch Optimierung unter Verwendung dieses Ersatzmodells ein optimiertes Ergebnis erreicht wird. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass dies das beste Ergebnis für die gewählten Vereinfachungen ist.

Die Parameter der optimierten Konfiguration sind in Tabelle 5.14 dargestellt. Für diese Konfiguration kann ein Wert des C_{12} -Kriteriums von 2,85 berechnet werden. Die Optimierung unter Verwendung des zweiten Ersatzmodells führt folglich zu einer Verbesserung der Simulationsergebnisse hinsichtlich der Genauigkeit, mit der die experimentell bestimmten Moden abgebildet werden können. Die zugehörige MAC-Matrix ist in Abbildung 5.16b dargestellt.

Verglichen mit der MAC-Matrix des Referenzdesigns wird eine Verbesserung der Genauigkeit, mit der die experimentellen Moden bei 24,4 Hz und bei 84,7 Hz durch die Simulation abgebildet werden, erreicht. Die Mode bei 83,0 Hz wird etwas schlechter abgebildet. Alle übrigen Moden zeigen lediglich geringfügige Veränderungen. Dies gilt auch für die Einträge auf den Nebendiagonalen, die gute Übereinstimmung mit dem aus Abbildung 3.7 zu erwartenden Muster zeigen. Die Werte weichen dennoch ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die experimentellen Moden nicht mit einer Genauigkeit von 100 % simuliert werden können. Insgesamt werden die Moden mit Eigenfrequenzen von 10,8 Hz bis 58,8 Hz, 72,8 Hz, 84,7 Hz und 133,9 Hz mit einer Genauigkeit von mehr als 70 % durch das Simulationsmodell abgebildet. Eine Verbesserung der Genauigkeit, mit der die Simulationsergebnisse die experimentellen Moden

abbilden, führt zu einer Verbesserung der Nebendiagonaleinträge. Dies ist für die Mode bei 24,4 Hz vor und nach dem Model-Updating zu beobachten.

Die in Tabelle 5.15 dargestellten Frequenzabweichungen zeigen, dass nach dem Model-Updating die prozentuale Frequenzabweichung der simulierten Mode, die der experimentell bestimmten Mode bei 24,4 Hz zugeordnet wird, über 10 % liegt. Vor dem Model-Updating lag die Frequenzabweichung unter 10 %. Durch das Model-Updating ist folglich eine leichte Verschlechterung bezüglich der Genauigkeit, mit der die Eigenfrequenzen simuliert werden, eingetreten. Alle übrigen Eigenfrequenzen werden annähernd mit derselben Genauigkeit wie in der Referenzkonfiguration abgebildet. Durch die Anpassung der Verbindungssteifigkeiten werden die simulierten Eigenfrequenzen nahezu nicht verändert.

Insgesamt zeigt das durchgeführte Model-Updating eine geringfügige Verbesserung der Simulation der realen Schwingungsmoden im Vergleich zur Referenzkonfiguration. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Referenzkonfiguration verglichen mit vielen der vorangegangenen Model-Updatings bereits eine sehr gute Abbildung des realen Schwingungsverhaltens ermöglicht. Die Abbildung des realen Schwingungsverhaltens ist in der in diesem Abschnitt bestimmten optimalen Konfiguration für die vorhandenen Modellannahmen die bestmögliche.

5.11 Zusammenfassung der durchgeführten Model-Updatings

Um ein möglichst einfaches Simulationsmodell mit ausreichender Genauigkeit zu erstellen, werden wie, in diesem Kapitel beschrieben, verschiedene Model-Updatings mit schrittweise gesteigerter Modellkomplexität durchgeführt. Zur Bewertung der Simulationsergebnisse wird die Übereinstimmung der simulierten mit den realen Eigenformen, die Frequenzabweichung der Eigenfrequenzen und die Masse der Fenstereinsätze verwendet.

Zunächst erfolgt im Model-Updating 1 ausschließlich die Berücksichtigung der zusätzlichen Masse ohne Modellierung der Fenstergeometrie. Dieses Model-Updating zeigt, dass die alleinige Berücksichtigung der Masse nicht ausreichend ist, um eine realitätsnahe Simulation des Schwingungsverhaltens zu ermöglichen. Daraus wird die Notwendigkeit der Modellierung der Geometrie der Fenstereinsätze sowie die Verbindungselemente abgeleitet.

Das anschließende Model-Updating 2 wird unter Verwendung eines vereinfachten Flächenmodells der Fenstereinsätze mit konstanter Wandstärke und Modellierung der Schraubenverbindungen durch 1D Federelemente mit hoher Steifigkeit durchgeführt. Die Simulationsergebnisse können deutlich an das reale Schwingungsverhalten angenähert werden. Aus dem simulierten Schwingungsverhalten kann abgeleitet werden, dass zu einer weiteren Verbesserung die Verwendung von Verbindungselementen mit sehr hoher Steifigkeit in alle Raumrichtungen notwendig ist.

Aus diesem Grund wird dieselbe Geometrie unter der Verwendung fixierter Verbindungselemente und der bereichsweisen Definition verschiedener Wandstärken als Grundlage des nächsten Model-Updatings verwendet. Das Ergebnis dieses Model-Updatings 3 zeigt eine leicht verbesserte Simulation des realen Schwingungsverhaltens. Allerdings kann aus dem Model-Updating abgeleitet werden, dass nicht alle relevanten Parameter berücksichtigt werden. Eine vorgenommene Vereinfachung ist die

Vernachlässigung der Verbindung der Oberseite des Fenstereinsatzes mit dem Seitenwandpaneel. Die manuelle Ergänzung einer zusätzlichen, steifen Verbindung an der Oberkante des Fenstereinsatzes zeigt, dass durch die Wahl einer Randbedingung mit realistischer Steifigkeit eine Verbesserung des Schwingungsverhaltens erzielt werden kann.

Im nächsten Model-Updating wird daher die Fenstergeometrie um die GFK-Platte an der Fensteroberseite ergänzt (Model-Updating 4). Zudem wird die unter Testbedingungen verschiedene Position der Sonnenblende und die zusätzliche Steifigkeit durch die Plexiglasscheibe im Modell berücksichtigt. Der betrachtete Frequenzbereich wird auf alle Frequenzen bis einschließlich 158,9 Hz eingeschränkt. Das Simulationsergebnis bildet zum ersten Mal alle Schwingungsmoden bis 158,9 Hz ab. Die Notwendigkeit der Modellierung aller relevanter Verbindungselemente mit realistischen Steifigkeiten kann folglich bestätigt werden. Das aus der Sensitivitätsanalyse abgeleitete Ersatzmodell zeigt eine geringe Vorhersagegenauigkeit bezüglich des Schwingungsverhaltens. Um auszuschließen, dass dies auf eine komplexe Korrelation der Wandstärken und der verwendeten Verbindungssteifigkeiten zurückzuführen ist, wird ein weiteres Model-Updating durchgeführt.

In diesem Model-Updating 5 werden ausschließlich die Verbindungssteifigkeiten als variabel angenommen. Der Verbindungstyp der Schraubenverbindungen wird geändert, um die negative Beeinflussung des Simulationsergebnisses durch eine unphysikalisch hohe Steifigkeit auszuschließen. Aus der Sensitivitätsanalyse dieses Model-Updatings kann ein zufälliges Design mit verbesserter Simulation des realen Schwingungsverhaltens bestimmt werden. Der Vergleich von Referenz- und optimierter Konfiguration zeigt, dass die Verbindungssteifigkeiten vor allem den niedrigen Frequenzbereich beeinflussen. Durch die Anpassung der Wandstärken im Model-Updating 4 wurde der gesamte Frequenzbereich beeinflusst.

Um eine bessere Abbildung des realen Schwingungsverhaltens zu erreichen, wird daher zunächst eine separate Anpassung der Simulation des Schwingungsverhaltens des Fenstereinsatzes im demontierten Zustand vorgenommen. Durch Optimierung des Simulationsmodells des demontierten Fenstereinsatzes (Model-Updating 6) kann ein Modell mit realistischen Wandstärken und Materialparametern erzeugt werden, dessen Masse lediglich um 0,5 % von der Zielmasse abweicht. In dem Simulationsmodell des Fenstereinsatzes können jedoch nicht alle experimentell bestimmten Moden abgebildet werden. Zudem zeigen die Eigenformen und Eigenfrequenzen große Abweichungen von den Messdaten. Da basierend auf den getroffenen Modellannahmen keine weitere Verbesserung erreicht werden kann, wird das Modell des Fenstereinsatzes in die Baugruppe eingefügt.

Für die Baugruppe erfolgt ein weiteres Model-Updating zur Bestimmung der Verbindungssteifigkeiten. Das Vorgehen entspricht dem Vorgehen aus Model-Updating 5. Das Ergebnis dieses Model-Updatings 7 entspricht bezüglich der Eigenformen und Frequenzabweichungen der besten mit den vorhandenen Modellannahmen zu erreichenden Simulation des realen Schwingungsverhaltens. Die Sensitivitätsanalyse bestätigt, dass die für die Schraubenverbindungen angenommenen hohen Steifigkeiten eine realistische Annahme darstellen. Für die Klettverbindungen können ebenfalls adäquate Verbindungssteifigkeiten ermittelt werden. Da die realen Steifigkeiten unbekannt sind, kann keine Einschätzung dieser Werte hinsichtlich der Realitätsnähe getroffen werden.

Zur möglichst exakten Abbildung des realen Schwingungsverhaltens bei gleichzeitig

geringer Modellkomplexität sind zusammenfassend folgende Modellmerkmale erforderlich:

- In der vereinfachten Fenstergeometrie müssen alle Verbindungsstellen inklusive der Klettverbindungen und der GFK-Platte enthalten sein
- Die Wandstärken müssen bereichsweise verschieden modelliert werden
- Die verschiedene Position der Sonnenblenden unter Testbedingungen sowie die Plexiglasscheibe sind zu berücksichtigen
- Die Schraubenverbindungen können durch Verbindungselemente mit endlich hoher Steifigkeit in allen Raumrichtungen modelliert werden
- Die Steifigkeiten der Klettverbindungen sind, unabhängig von der Realität, durch Anpassung des Simulationsmodells in alle Raumrichtungen verschieden auszulegen

6. Diskussion der Ergebnisse

Das Ziel dieser Arbeit ist die möglichst realitätsnahe Simulation des Schwingungsverhaltens des Seitenwandpaneels eines Airbus A320 mit montierten Fenstereinsätzen. Dabei wird ein möglichst einfaches Simulationsmodell angestrebt. Durch die Vielzahl unbekannter Modellparameter ist es ohne Optimierung nicht möglich ein exaktes Simulationsmodell zu erstellen. Aus diesem Grund werden die in Kapitel 5 beschriebenen Model-Updatings durchgeführt. Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse diskutiert.

Durch den beschriebenen iterativen Prozess kann ein Simulationsmodell erstellt werden, in dem 9 von 16 experimentellen Moden im Frequenzbereich bis 158,9 Hz mit einer Übereinstimmung von mehr als 70 % (MAC-Wert 0,7) abgebildet werden können. Vier der experimentell bestimmten Moden werden mit einer Genauigkeit von mehr als 60 % durch das Simulationsmodell abgebildet. Für die übrigen drei Moden ist die Genauigkeit geringer. Die Eigenfrequenz einer der simulierten Moden weicht um mehr als 10 Hz von der experimentell bestimmten ab, während für fünf weitere Moden eine prozentuale Abweichung von mehr als 10 % festgestellt werden kann. Da vier dieser fünf Moden im Frequenzbereich bis 29,0 Hz liegen, sind die absoluten Frequenzabweichungen dieser vier Moden dennoch gering. Insgesamt können sowohl die Eigenformen als auch die Eigenfrequenzen akzeptabel durch das Simulationsmodell abgebildet werden. Eine weitere Verbesserung der Abbildung aller Moden, die mit einer Genauigkeit von weniger als 70 % abgebildet werden, ist wünschenswert, kann allerdings mit dem hier verwendeten Simulationsmodell nicht erreicht werden. Die zu beobachtenden Abweichungen der Simulation von dem realen Schwingungsverhalten des Seitenwandpaneels sind durch vorgenommene Vereinfachungen sowie das zugrunde liegende Simulationsmodell ohne Fenstereinsätze zu erklären. Abweichungen im Simulationsmodell des Seitenwandpaneels ohne Fenstereinsätze können, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, die Simulationsergebnisse unter Berücksichtigung der Fenstereinsätze beeinflussen. Da das zugrunde liegende Simulationsmodell nicht verändert wird, bleiben die Abweichungen unverändert. Besonders starke Abweichungen vom realen Schwingungsverhalten sind in der Simulation der experimentell bestimmten Moden ohne Fenstereinsätze bei 60,1 Hz und 173,1 Hz zu sehen. Durch die Einschränkung des betrachteten Frequenzbereichs ist die Abweichung von der experimentell bestimmten Mode bei 173,1 Hz nicht relevant. Die experimentell bestimmte Mode mit Eigenfrequenz von 60,1 Hz liegt im betrachteten Frequenzbereich. Abbildung 3.9 zeigt, dass zwischen dieser experimentell bestimmten Mode ohne Fenstereinsätze und den experimentell bestimmten Moden mit Fenstereinsätzen im Frequenzbereich von 58,8 Hz bis 72,8 Hz Ähnlichkeit besteht. Die Simulation muss, um eine realistische Abbildung des realen Schwingungsverhaltens zu ermöglichen, dieselbe Ähnlichkeit zeigen. Durch die Abweichung des Simulationsmodells tritt jedoch eine Abweichung dieser Ähnlichkeit auf (siehe Abbildung 5.1). Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass die simulierten Moden mit Fenstereinsätzen, die den experimentell bestimmten Moden im Frequenzbereich von 58,8 Hz bis 72,8 Hz zugeordnet

werden durch das ungenaue Simulationsmodell des Seitenwandpaneels ohne Fenstereinsätze beeinflusst werden. Um in diesem Frequenzbereich eine Verbesserung der Simulation zu erreichen, ist es daher nötig, das zugrunde liegende Simulationsmodell des Seitenwandpaneels ohne Fenstereinsätze zu verbessern.

Das final ausgewählte beste Simulationsmodell basiert auf dem Model-Updating des demontierten Fenstereinsatzes. Daher können Abweichungen in der Simulation des Schwingungsverhaltens des Fenstereinsatzes ebenfalls zu Abweichungen des simulierten Schwingungsverhaltens des Seitenwandpaneels mit montierten Fenstereinsätzen führen. Das Model-Updating des Simulationsmodells des Fenstereinsatzes ermöglicht die Bestimmung realistische Werte für die einzelnen Modellparameter. Allerdings können in der Simulation lediglich sieben von dreizehn der experimentell bestimmten Moden des demontierten Fenstereinsatzes abgebildet werden. Von diesen sieben Moden werden zwei mit einer Genauigkeit von mehr als 70 %, eine mit einer Genauigkeit von mehr als 90 % und alle übrigen mit geringerer Genauigkeit durch das Simulationsmodell abgebildet. Zudem weisen drei der simulierten Eigenfrequenzen eine Frequenzabweichung von mehr als 10 Hz und drei weitere eine prozentuale Frequenzabweichung von mehr als 10 % auf. Insgesamt weicht das simulierte Schwingungsverhalten des demontierten Fenstereinsatzes deutlich von dem realen ab.

Diese Abweichungen können einerseits durch vorgenommene Modellvereinfachung und andererseits durch die durchgeführte experimentelle Modalanalyse erklärt werden. Während der Durchführung der experimentellen Modalanalyse des demontierten Fenstereinsatzes ist eine Messung mit verändertem Anregungspunkt nicht möglich, ohne die Position des Fenstereinsatzes zu verändern. Dies deutet darauf hin, dass der Shaker das Systemverhalten ungewollt beeinflusst. Eine solche Beeinflussung kann die Messergebnisse verfälschen. Da diese Messergebnisse Grundlage des Model-Updatings sind, werden folglich die mit dem Model-Updating zu erreichenden Ergebnisse negativ beeinflusst, da der Shaker im Modell nicht berücksichtigt wird.

In dem Modell des Fenstereinsatzes wird eine vereinfachte Geometrie verwendet. Die Sonnenblende und die Plexiglasscheibe werden nicht physisch in das Modell eingefügt. Zudem werden die doppelwandige Ausführung der waagerechten Fläche und die Führungsschiene der Sonnenblende vernachlässigt. Diese geometrischen Vereinfachungen können die Systemsteifigkeit sowie die Masseverteilung im System beeinflussen und dadurch zu einer ungenauen Abbildung des realen Schwingungsverhaltens durch das Simulationsmodell beitragen.

Da die Geometrie der Fenstereinsätze an dem CAD Modell des Seitenwandpaneels und nicht dem realen Bauteil orientiert ist, können weitere geometrische Unterschiede zu einem veränderten simulierten Schwingungsverhalten führen. Die Anpassung an die reale Geometrie ermöglicht zudem eine genauere Positionierung der Fenstereinsätze relativ zum Seitenwandpaneel in der Baugruppe. Eine ungenaue Positionierung kann das simulierte Schwingungsverhalten durch geänderte Massenschwerpunkte negativ beeinflussen.

Weiterhin zeigt das Model-Updating des Fenstereinsatzes eine hohe Sensitivität des Modells auf die Variation der gewählten Parameter. Je nach Konfiguration wird eine unterschiedliche Anzahl der experimentell bestimmten Moden abgebildet. Werden weniger Moden abgebildet, nimmt der Wert des C_{12} -Kriteriums ab, wenngleich keine Verbesserung der Simulationsergebnisse erreicht wird. Der Wert, den das C_{12} -Kriterium für die verschiedenen Designs annimmt, unterliegt starken Schwankungen. Um aus dem Datensatz ein sinnvolles Ersatzmodell abzuleiten, wird eine manuelle

Modifikation der Datenbasis, auf der das Ersatzmodell basiert, durchgeführt. Dies kann die erzielten Optimierungsergebnisse ebenfalls negativ beeinflussen.

Neben den beschriebenen Einflussfaktoren können auch die Steifigkeiten der Verbindungselemente zwischen den Baugruppenkomponenten die Simulationsergebnisse beeinflussen. Insbesondere die Verbindungssteifigkeiten der Klettverbindungen sind unbekannt. Durch das Model-Updating 7 wird der große Einfluss der gewählten Wertebereiche der variablen Parameter auf das Optimierungsergebnis deutlich. Eine realistische Parameterschätzung ist daher erforderlich, um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten.

Eine weitere Vereinfachung in der Modellierung hinsichtlich der Verbindungselemente stellen die Schraubenverbindungen dar. In der realen Baugruppe erfolgt die Verbindung der Fenstereinsätze nicht direkt mit der Oberfläche des Seitenwandpaneels, sondern mit dafür vorgesehenen Zwischenelementen. Diese Zwischenelemente sind durch eine Klebverbindung mit der Oberfläche des Seitenwandpaneels verbunden. Obwohl die Sensitivitätsanalyse bestätigt, dass eine realistische Annahme der Verbindungssteifigkeiten getroffen wird, schränken die Zwischenelemente die Bewegung der Oberfläche des Seitenwandpaneels lokal ein. Diese Einschränkung und die daraus resultierende lokal erhöhte Steifigkeit wird in dem vorhandenen Modell nicht berücksichtigt. Werden die Zwischenelemente nicht modelliert, wird zudem ihre Masse im System vernachlässigt.

Grundsätzlich hängen die Ergebnisse eines Model-Updatings neben den Modellannahmen von den Ergebnissen der durchgeführten experimentellen Modalanalyse ab. Die Auto-MAC-Matrix des experimentellen Datensatzes mit montierten Fenstereinsätzen zeigt, dass zwischen einigen Moden hohe Ähnlichkeiten bestehen. Diese Ähnlichkeiten, die sich in einem MAC-Wert größer als 0,7 ausdrücken, erschweren die korrekte Zuordnung der simulierten Moden während des Model-Updatings [Ewioo]. Aus diesem Grund werden alle Moden im Frequenzbereich 158,9 Hz bis 193,4 Hz im finalen Simulationsmodell vernachlässigt. Hohe Korrelationen zwischen zwei Moden in der Auto-MAC-Matrix deuten darauf hin, dass durch die gewählte Diskretisierung des Netzes der Messpunkte während der experimentellen Modalanalyse nicht alle relevanten Freiheitsgrade des Systems erfasst werden. Ist die Diskretisierung nicht hoch genug, so können die Schwingformen der Moden nicht exakt erfasst und voneinander unterschieden werden. Die Moden ähneln sich unter Verwendung der gewählten Freiheitsgrade. Für die Durchführung eines Model-Updatings ist eine Auto-MAC-Matrix in Form einer Diagonalmatrix erstrebenswert, um die fehlerfreie Zuordnung der simulierten Moden sicherzustellen [Ewioo]. Da die Diskretisierung für die Bestimmung der Moden des Seitenwandpaneels ausreichend fein ist, besteht die Vermutung, dass die nicht ausreichende Diskretisierung durch die Verbindungselemente hervorgerufen wird.

Ein weiterer möglicher Grund für die inadäquate Abbildung des realen Schwingungsverhaltens ist das Auftreten von Nichtlinearitäten in der Test-Struktur [Ewioo]. Nach Kwon et al. sind die Steifigkeiten der Klettverbindungen im Allgemeinen nicht-linear [Kwo+22]. Die Modellierung erfolgt in der Simulation als konstant. Das kann ebenfalls zu Unterschieden zwischen den Simulationsergebnissen und den experimentell bestimmten Ergebnissen führen.

Die Durchführung der verschiedenen Model-Updatings zeigt, dass die separate an das reale Schwingungsverhalten angepasste Modellierung des Fenstereinsatzes und die anschließende Anpassung der Verbindungssteifigkeiten zu dem besten Ergebnis

führt. Durch die separate Optimierung der Fenstereinsätze kann zudem Rechenzeit gespart werden, da die Berechnung einer einzelnen Struktur deutlich effizienter ist als die der gesamten Baugruppe. Dieser Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass in den Simulationsergebnissen der Baugruppe neben den globalen auch die lokalen Moden der Fenstereinsätze berechnet werden. Dadurch werden mehr Moden als für die Simulation der Gesamtstruktur zu berücksichtigen sind, ermittelt. Dies führt zu einem deutlichen Anstieg der Rechenzeit. Für alle zukünftigen Model-Updatings von Baugruppen wird daher empfohlen, die Baugruppenkomponenten separat zu untersuchen und ausschließlich die Steifigkeiten vorhandener Verbindungselemente in der Baugruppe zu optimieren. Zang et al. verwenden ebenfalls diesen Ansatz zur Modellierung einer Baugruppe und können auf diese Weise eine realitätsnahe Modellierung der Struktur erzielen [ZMF13]. Zu beachten ist, dass Abweichungen der Simulationsergebnisse der Einzelteile von dem realen Schwingungsverhalten die Simulation der Baugruppe maßgeblich beeinflussen können. Daher ist bei Durchführung eines solchen Model-Updatings auf die präzise Abbildung des realen Schwingungsverhaltens in der Simulation der Einzelteile zu achten.

Eine weitere Beobachtung aus den durchgeführten Model-Updatings ist, dass die Wahl des Referenzdesigns in der Sensitivitätsanalyse und der Optimierung durch Ansys optiSlang 2024 R2 automatisch vorgenommen wird. Das führt dazu, dass nicht automatisch das Referenzdesign der Optimierung mit dem der vorangegangenen Sensitivitätsanalyse übereinstimmt. Wenn ein Parameter in der Sensitivitätsanalyse keinen Einfluss auf die Optimierungskriterien hat, wird ihm der Wert des Referenzdesigns der Optimierung zugewiesen. Stimmen die Referenzdesigns der Sensitivitätsanalyse und der Optimierung nicht überein, so ist die Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse vor und nach dem Model-Updating lediglich eingeschränkt möglich. Der zu erwartende Einfluss der veränderten Parameter ist zwar gering, kann allerdings bei geringer Vorhersagegenauigkeit des Ersatzmodells nicht vollständig ausgeschlossen werden.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung:

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Model-Updatings verschiedener Komplexitätsstufen für das Seitenwandpaneel mit montierten Fenstereinsätzen durchgeführt. Das Ziel ist die Erstellung eines Simulationsmodells, mit dem das reale Schwingungsverhalten möglichst exakt abgebildet werden kann. Grundlage des verwendeten FE-Modells ist dabei die von Algermissen durchgeführte Voruntersuchung und das daraus abgeleitete FE-Modell des Seitenwandpaneels ohne Fenstereinsätze [Alg25].

Der erste Schritt bestand in der Bestimmung des realen Schwingungsverhaltens des Seitenwandpaneels mit montierten Fenstereinsätzen unter Verwendung einer experimentellen Modalanalyse. Das Ergebnis dieser experimentellen Modalanalyse zeigt alle auftretenden Moden des Seitenwandpaneels im Frequenzbereich von 8 Hz bis 200 Hz. Der Vergleich dieses Datensatzes mit dem realen Schwingungsverhalten vor Montage der Fenstereinsätze bestätigt, dass das Schwingungsverhalten durch die montierten Fenstereinsätze verändert wird. Aus dieser Beobachtung folgt die Notwendigkeit, das Simulationsmodell um die Fenstereinsätze zu erweitern.

Um ein möglichst einfaches Simulationsmodell mit ausreichender Genauigkeit zu erstellen, wurden die in Kapitel 5 beschriebenen Model-Updatings mit schrittweise gesteigerter Modellkomplexität durchgeführt. Zur Bewertung der Simulationsergebnisse wurde die Übereinstimmung der simulierten Eigenformen mit den realen, die Frequenzabweichung der Eigenfrequenzen und die Masse der Fenstereinsätze verwendet.

Durch den beschriebenen iterativen Prozess konnte ein Simulationsmodell mit bestmöglicher Vorhersagegenauigkeit, unter Berücksichtigung der vorgenommenen Vereinfachungen, des realen Schwingungsverhaltens erreicht werden. Dazu war zunächst die separate Anpassung des Simulationsmodells des Fenstereinsatzes im demontierten Zustand an dessen reales Schwingungsverhalten erforderlich. Das erstellte Modell des Fenstereinsatzes wurde anschließend in die Gesamtbaugruppe eingefügt und die Steifigkeiten der Verbindungselemente in der Gesamtbaugruppe so angepasst, dass das reale Schwingungsverhalten möglichst exakt abgebildet werden konnte.

In dem erstellten Simulationsmodell werden 9 von 16 der experimentell bestimmten Moden mit einer Genauigkeit von mehr als 70 % abgebildet. Für vier weitere Moden kann eine Genauigkeit von mehr als 60 % erreicht werden. Lediglich drei Moden werden mit geringerer Genauigkeit abgebildet. Für die Frequenzabweichungen der simulierten von den experimentell bestimmten Eigenfrequenzen kann festgestellt werden, dass lediglich eine Mode eine Frequenzabweichung von mehr als 10 Hz aufweist. Für fünf weitere Moden kann eine Frequenzabweichung von mehr als 10 % bestimmt werden. Da vier dieser Moden im Frequenzbereich bis 29,0 Hz liegen, sind die absoluten Frequenzabweichungen dieser Moden jedoch gering. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Modellierung der Schraubenverbindungen durch Verbindungselemente mit endlich hoher Steifigkeit in alle drei Raumrichtungen erfolgen kann. Die Verwendung fixierter Verbindungselemente ist nicht möglich.

Für die Klettverbindungen können ebenfalls adäquate Verbindungssteifigkeiten ermittelt werden. Da die realen Steifigkeiten unbekannt sind, kann keine Einschätzung dieser Werte hinsichtlich der Realitätsnähe getroffen werden.

Wie in der Einleitung beschrieben, ist das Ziel dieser Arbeit die Erstellung eines möglichst einfachen Simulationsmodells des Seitenwandpaneels mit montierten Fenstereinsätzen. Um dieses Ziel zu erreichen, sind, wie im Rahmen dieser Arbeit festgestellt, die nachfolgend aufgelisteten Schritte erforderlich:

- 1. Durchführung einer experimentellen Modalanalyse der Baugruppe sowie des demontierten Fenstereinsatzes
- 2. Erstellung eines an die reale Geometrie der Fenstereinsätze angepassten Simulationsmodells
- 3. Model-Updating des Simulationsmodells des demontierten Fenstereinsatzes
- 4. Erstellung der benötigten Baugruppe und Übertragung der Simulationsergebnisse des Model-Updatings des demontierten Fenstereinsatzes
- 5. Definition aller Verbindungselemente
- 6. Model-Updating der Baugruppe zur Bestimmung der Steifigkeiten der Verbindungselemente

Dieses Vorgehen wird allgemein für die Simulation des Schwingungsverhaltens von Baugruppen empfohlen, um den nötigen Rechenaufwand zu verringern und realitätsnahe Simulationsergebnisse zu erzielen.

Ausblick:

Um die Simulationsergebnisse weiter zu verbessern und die Genauigkeit aller Moden auf mehr als 70 % zu verbessern, muss in einer weiterführenden Arbeit das Simulationsmodell des Seitenwandpaneels ohne Fenstereinsätze verbessert werden. Auch eine Verbesserung des Simulationsmodells des demontierten Fenstereinsatzes ist vorzunehmen. Dazu ist die verwendete CAD-Geometrie genauer an die reale anzupassen und eine exakte Positionierung in der Baugruppe vorzunehmen.

Da die durchgeführten Model-Updatings gezeigt haben, dass realistische Verbindungssteifigkeiten angenommen werden müssen, um gute Ergebnisse zu erzielen, die Verbindungssteifigkeiten der Klettverbindung jedoch gänzlich unbekannt sind, müssen diese in entsprechenden Versuchen bestimmt werden. Zudem ist die Modellierung der Zwischenelemente der Schraubenverbindungen und die entsprechende Steifigkeit vorzunehmen, um die Deformation der Oberfläche des Seitenwandpaneels wie im realen System einzuschränken.

Um die Simulation aller Moden bis 200 Hz in dem Model-Updating zu berücksichtigen, muss sichergestellt werden, dass die Auto-MAC-Matrix aus der experimentellen Modalanalyse eine Diagonalmatrix ist. Dazu muss die richtige Wahl der Diskretisierung sichergestellt werden. In zukünftigen Untersuchungen muss daher der Einfluss von Verbindungselementen auf die notwendige Diskretisierung überprüft und die Diskretisierung der Messungen entsprechend den Ergebnissen gewählt werden.

Der Wert, den das definierte C_{12} -Kriterium, das die Genauigkeit, mit der das Schwingungsverhalten simuliert werden kann, angibt, annimmt, ist von den im Mode-Pairing berücksichtigten Moden abhängig. Werden durch das Simulationsmodell weniger

Moden abgebildet, so sinkt der Wert, obwohl die Genauigkeit, mit der das reale Schwingungsverhalten abgebildet werden kann, abnimmt. Dies ist insbesondere dann entscheidend, wenn das Simulationsmodell sensitiv gegenüber den variablen Parametern ist. In diesem Fall reicht eine Bewertung durch das C_{12} -Kriteriums nicht aus. Daher ist für zukünftige Untersuchungen die Erweiterung der Optimierungskriterien um die Anzahl der zugeordneten Moden notwendig. Die Maximierung dieses Kriteriums bei gleichzeitiger Minimierung des C_{12} -Kriteriums ermöglicht eine umfassende Bewertung der Genauigkeit, mit der das reale Schwingungsverhalten abgebildet werden kann. Zudem besteht die Notwendigkeit, in allen Model-Updatings jeweils in der Sensitivitätsanalyse und der Optimierung das Referenzdesign explizit anzugeben, um die Übereinstimmung mit dem gewünschten Referenzdesign sicherzustellen.

Literaturverzeichnis

- [Alg+24] S. Algermissen u. a. "Berechnung des Flugzeuginnenlärms mittels automatisiert erstellter FE-Modelle". In: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt. DGLR, 2024. URL: https://www.dglr.de/publikationen/2024/630303.pdf.
- [Alg25] Stephan Algermissen. "Finite Element Model Update of an Aircraft Interior Lining Panel". In: *Proc. of Forum Acusticum Euronoise*. 2025.
- [AA20] R. Allemang und Peter Avitabile, Hrsg. Handbook of Experimental Structural Dynamics. New York, NY: Springer New York und Imprint Springer, 2020. ISBN: 978-1-4939-6503-8. DOI: 10.1007/978-1-4939-6503-8.
- [Allo3] Randall Allemang. "The Modal Assurance Criterion (MAC): Twenty Years of Use and Abuse". In: Sound and Vibration 37 (Jan. 2003).
- [Alt+18] Ahmet Can Altunişik u. a. "Automated Model Updating of Historical Masonry Structures Based on Ambient Vibration Measurements". In: Journal of Performance of Constructed Facilities 32.1 (2018). ISSN: 0887-3828. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001108.
- [ANS24a] ANSYS, INC., Hrsg. MAC Calculator. 2024. URL: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/mech_addon/ds_results_nvh-maccalc-objfuncform.html. Zugegriffen am: 10.06.2025.
- [ANS24b] ANSYS, INC., Hrsg. Methods for Multi-Disciplianry Optimization and Robustness Analysis. 2024. URL: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/opti_multi_disc/opti_multi_disc.html. Zugegriffenam:14.06.2024.
- [ANS24c] ANSYS, INC., Hrsg. optiSlang User's Guide. 2024. URL: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/mech_addon/ds_results_nvh-maccalc-objfuncform.html. Zugegriffen am: 22.06.2024.
- [EDF22] Suzana Ereiz, Ivan Duvnjak und Javier Fernando Jiménez-Alonso. "Review of finite element model updating methods for structural applications". In: Structures 41 (2022), S. 684–723. ISSN: 23520124. DOI: 10.1016/j.istruc. 2022.05.041.
- [Ewioo] David John Ewins. Modal testing: Theory, practice and application. 2. ed. Bd. 10. Mechanical engineering research studies Engineering dynamics series. Baldock: Research Studies Press, 2000. ISBN: 978-0-86380-218-8. URL: http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0745/97043590-d.html.

- [GKL21] Robert Gasch, Klaus Knothe und Robert Liebich. *Strukturdynamik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. ISBN: 978-3-662-61767-0. DOI: 10.1007/978-3-662-61768-7.
- [Hof+24] B. von den Hoff u. a. "Noise Emissions and Noise Annoyance of a Single-propeller Electric Aircraft During Flyover". In: Proceedings of the 30th International Congress on Sound and Vibration. Hrsg. von W. van Keulen und J. Kok. Society of Acoustics, 2024, Article 558. URL: https://iiav.org/content/archives_icsv_last/2024_icsv30/content/papers/papers/full_paper_558_20240430204034527.pdf.
- [Knu+24] D. Knuth u. a. "Auralization of Aircraft Cabin Noise Predictions in Early Development Stages". In: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt. DGLR, 2024. URL: https://www.dglr.de/publikationen/2024/610523.pdf.
- [KAS04] Franz Kollmann, Roland Angert und Thomas F. Schösser. *Praktische Maschinenakustik*. VDI. Berlin: Springer, 2004. ISBN: 3-540-20094-0.
- [KR19] Thomas Kuttner und Armin Rohnen. Praxis der Schwingungsmessung: Messtechnik und Schwingungsanalyse mit MATLAB®. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019. ISBN: 978-3-658-25047-8. URL: https://www.springer.com/gp/book/9783658250478.
- [Kwo+22] Semin Kwon u. a. "Use of probabilistic fastener velcro as a friction-induced vibration damping treatment". In: *Scientific reports* 12.1 (2022), S. 19399. DOI: 10.1038/s41598-022-23946-8.
- [Mer25] Polymer Service GmbH Merseburg, Hrsg. Poissonzahl Lexikon der Kunststoffprüfung. 2025. URL: https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Poissonzahl. Zugegriffen am: 28.07.2025.
- [MMT12] Miroslav Pastor, Michal Binda und Tomáš Harčarik. "Modal Assurance Criterion". In: *Procedia Engineering* 48 (2012), S. 543—548. ISSN: 1877-7058. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.09.551. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812046140.
- [Möso9] Michael Möser, Hrsg. Messtechnik der Akustik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN: 978-3-540-68087-1. DOI: 10.1007/978-3-540-68087-1. URL: http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz: 31-epflicht-1598270.
- [Mös20] Michael Möser. *Modalanalyse*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020. ISBN: 978-3-662-60927-9. DOI: 10.1007/978-3-662-60928-6.
- [Mös15] Michael Möser. *Technische Akustik*. 10. Auflage. VDI-Buch. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2015. ISBN: 978-3-662-47704-5.
- [nol] noltewerk GmBH & Co. KG, Hrsg. Technisches Datenblatt: ABS (Acrylnitrit-Butadien-Styrol). URL: https://noltewerk.de/fileadmin/user_upload/D_Kunststofftechnik/Technische_Datenblaetter/TD_ABS_1215_DE.pdf. Zugegriffen am: 28.07.2025.
- [Pol] Polytec GmbH, Hrsg. Laser-Doppler-Vibrometrie. URL: https://www.polytec.com/de/vibrometrie/technologie/laser-doppler-vibrometrie.

 Zugegriffen am: 24.05.2025.

- [Shi+88] C. Y. Shih u. a. "Complex mode indication function and its applications to spatial domain parameter estimation". In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 2.4 (1988), S. 367–377. ISSN: 08883270. DOI: 10.1016/0888-3270(88)90060-X.
- [SK23] Chenxiao Song und Reiichiro Kawai. "Monte Carlo and variance reduction methods for structural reliability analysis: A comprehensive review". In: *Probabilistic Engineering Mechanics* 73 (2023), S. 103479. ISSN: 0266-8920. DOI: https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2023.103479. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266892023000681.
- [Steo6] Steven J. Miller. "The method of least squares". In: (2006). URL: http://web.williams.edu/mathematics/sjmiller/public_html/105sp10/handouts/methodleastsquares.pdf.14.06.2024.
- [Vaj+18] Sándor Vajna u. a. CAx für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung. 3. Aufl. 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN: 9783662546246.

 DOI: 10.1007/978-3-662-54624-6. URL: http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1496156.
- [YC19] Xijun Ye und Bingcong Chen. "Model updating and variability analysis of modal parameters for super high—rise structure". In: Concurrency and Computation: Practice and Experience 31.12 (2019). ISSN: 1532-0626. DOI: 10. 1002/cpe.4712.
- [Zam+13] I. Zaman u. a. "The effects of bolted joints on dynamic response of structures". In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 50 (2013), S. 012018. ISSN: 1757-8981. DOI: 10.1088/1757-899X/50/1/012018.
- [ZMF13] C. Zang, Shuangchao Ma und Michael Friswell. "Finite Element Model Updating of an Assembled Aero-Engine Casing". In: Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series 5 (Mai 2013), S. 199–212. DOI: 10.1007/978-1-4614-6564-5_20.

Anhang A

Informationen aus der Voruntersuchung

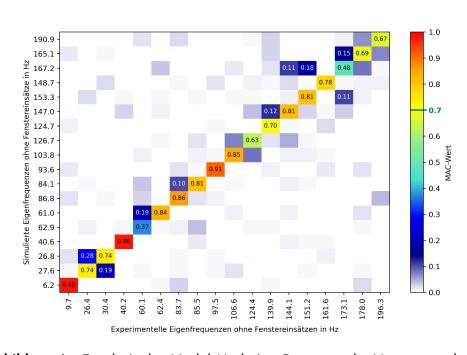


Abbildung A.1 Ergebnis des Model-Updating Prozesses der Voruntersuchung

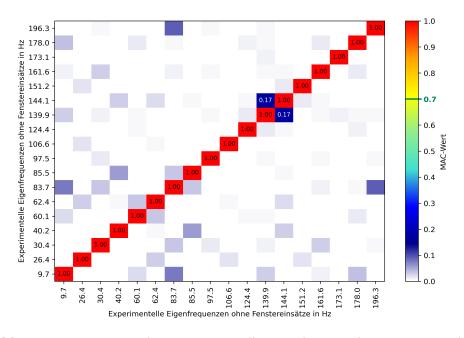


Abbildung A.2 Auto-MAC der experimentellen Moden aus der Voruntersuchung

Tabelle A.1 Ungedämpfte Eigenfrequenzen $f_{\rm gemessen}$ und modale Dämpfungsfaktoren δ der experimentell bestimmten Moden

Modennr.	$f_{\sf gemessen}$ in Hz	δ in %
1	9,7	3,93
2	26,4	0,51
3	30,4	0,84
4	40,2	0,35
5	60,1	0,64
6	62,4	0,80
7	83,7	0,38
8	85,5	0,46
9	97,5	0,41

Modennr.	$f_{\sf gemessen}$ in Hz	δ in %
10	106,6	0,46
11	124,4	0,43
12	139,9	1,19
13	144,1	0,38
14	151,2	0,52
15	161,6	0,51
16	173,1	0,50
17	178,0	0,63
18	196,3	0,56

Anhang B

Zusätzliche Information zum Model-Updating ${\bf 1}$

Nr. Design	C_{12} -Kriterium aus der Optimierung	C_{12} -Kriterium aus der Simulation
324	1,93	1,87
327	2,29	2,29
1676	2,38	2,26
6215	1,81	1,63
6273	1,81	1,55
6315	1,81	1,56
6315	1,81	1,67

Tabelle B.1 Vergleich des simulativ berechneten C_{12} -Kriteriums mit dem durch das Ersatzmodell bestimmten

```
import os
import ison
                                                                    2 | MeshDetails=DataModel.MeshDataByName(DataModel.MeshDataNames[0])
                                                                                                                                           3) for j in range(len(Distances)):
                                                                                                                                                     ActualDist+=Distances[j]
    import wbjn
                                                                                                                                                     "print(ActualDist.Distances[i])"
                                                                         EdgeNodes=[]
    import sys
                                                                         for edge in EdgeNamedSelection.Location:
                                                                                                                                                     if ActualDist<ApprDistanceBetweenMasses:
    import string
                                                                             EdgeNodes.extend(MeshDetails.MeshRegionById(edge).NodeIds)
    from collections import Counter
                                                                                                                                                        Indices.append(i)
    import math
                                                                         EdgeElements = MeshDetails.ElementIdsFromNodeIds(EdgeNodes)
                                                                                                                                                         NodeListForPlaceMasses.append(nodesCombined[j])
                                                                         EdgeElements = sorted(EdgeElements)
                                                                                                                                                        ActualDist=0.0
    NodesOnEdge=[]
    EdgeNamedSelection = DataModel.GetObjectsByName("RightWindow")[0]
                                                                                                                                                 "print(NodeListForPlaceMasses)"
    print(EdgeNamedSelection)
                                                                         for E in EdgeElements:
    NodeNamedSelection=DataModel.GetObjectsByName("StartNodesMasses")[0]
                                                                                                                                                 MassOfPointMass=(4.38-2.7)/(len(NodeListForPlaceMasses)*2)
                                                                             nodes_zwischenspeicher=[]
                                                                             ElementNodes = sorted(MeshDetails.Ele
                                                                                                                                                if\ Calculate Distance (Node List For Place Masses [0], Node List For Place Masses [-1]) < Appr Distance Between Masses:
                                                                                                                                                     NodeListForPlaceMasses=NodeListForPlaceMasses[:-1]
    if N in EdgeNodes:
    def CalculateDistance(i,j):
                                                                                    nodes zwischenspeicher.append(N)
                                                                                                                                                     NumberNodes=(len(nodesCombined)-1-nodesCombined.index(NodeListForPlaceMasses[-1]))/2
        Nodei_xyz = MeshDetails.NodeXYZById(i)
                                                                             if len(nodes_zwischenspeicher)<=1:
        Nodej xyz = MeshDetails.NodeXYZById(j)
                                                                                                                                                     newIndex=nodesCombined[nodesCombined.index(NodeListForPlaceMasses[-1])+int(NumberNodes)]
        dx = Nodei xyz[0]-Nodej xyz[0]
                                                                                                                                                     NodeListForPlaceMasses.append(newIndex)
                                                                             else:
        dy = Nodei_xyz[1]-Nodej_xyz[1]
                                                                                 NodesOnEdge.append(nodes_zwischenspeicher)
                                                                                                                                                     print(NodeListForPlaceMasses)
                                                                                                                                                     "NodeListForPlaceMasses[-1]=NodeListForPlaceMasses[int(num)]"
        dz = Nodei_xyz[2]-Nodej_xyz[2]
        d = dx **2 + dy ** 2 + dz ** 2
                                                                         EdgeNodes=[]
                                                                                                                                                ExtAPI.SelectionManager.ClearSelection()
        return math.sqrt(d)
                                                                         for edge in EdgeNamedSelection.Location:
    EdgeNodes.extend(MeshDetails.MeshRegionById(edge).NodeIds)
                                                                                                                                                 "print(NodeListForPlaceMasses)"
    def sort_chain(nodes_startnode):
        nodes = nodes
                                                                         for node in NodeNamedSelection.Location:
                                                                                                                                                xRightWindow=[]
                                                                                                                                                 yRightWindow=[
                                                                             StartNodes.extend(MeshDetails.MeshRegionById(node).NodeIds)
        flat = [n for node in nodes for n in node]
                                                                                                                                                zRightWindow=[]
                                                                                                                                                 xLeftWindow=[]
        start = startnode
                                                                                                                                                yLeftWindow=[
                                                                         if EdgeNamedSelection == DataModel.GetObjectsByName("RightWindow")[0]:
                                                                             sortedNodes=sort_chain(NodesOnEdge,StartNodes[0])
                                                                                                                                                zLeftWindow=[]
        for i, node in enumerate(nodes):
                                                                         else:
                                                                                                                                                 for node in NodeListForPlaceMasses:
            if start in node:
                                                                             sortedNodes=sort_chain(NodesOnEdge.StartNodes[1])
                                                                                                                                                     if EdgeNamedSelection == DataModel.GetObjectsByName("RightWindow")[0]:
                                                                                                                                                        nameWindow="RightWindow"
                if node[1] == start:
                                                                          "print(sortedNodes)"
                    node.reverse()
                                                                                                                                                         sel = ExtAPI.SelectionManager.CreateSelectionInfo(SelectionTypeEnum.MeshNodes)
                chain = [node]
                                                                          nodesCombined=[sortedNodes[0][0]]+[node[1] for node in sortedNodes]
                                                                                                                                                        sel.Ids = [node]
                del nodes[i]
                                                                          "print(len(nodesCombined))
                break
                                                                                                                                                         xRightWindow.append(mesh.NodeById(node).X)
                                                                                                                                                        yRightWindow.append(mesh.NodeById(node).Y)
zRightWindow.append(mesh.NodeById(node).Z)
        current = chain[-1][1]
                                                                          ResultingLength=0
        while nodes:
            for j, node in enumerate(nodes):
                                                                          for i in range(len(nodesCombined)-1):
                if current in node:
                                                                             NodeDistances=CalculateDistance(nodesCombined[i],nodesCombined[i+1]
                                                                                                                                                        ns = DataModel.Project.Model.AddNamedSelection()
                                                                             Distances.append(NodeDistances)
                                                                                                                                                        ns.Name = "PointMass" + str(nameWindow) + str(i)
                    if node[0] != current:
                                                                                                                                                        ns.Location=sel
                    node.reverse()
chain.append(node)
                                                                                                                                                 # Create point mass on node
                                                                          "print(nodesCombined)
                     current = node[1]
                                                                                                                                                        pm = Model.Geometry.AddPointMass()
                     del nodes[j]
                                                                          mesh = DataModel.MeshDataByName("Global")  # Get mesh data
                                                                                                                                                        pm.Location = ns
                     break
                                                                          nodes = mesh.Nodes
                                                                                                                    # Get all nodes
                                                                                                                                                        pm.AppliedBy = RemoteApplicationType.DirectAttachment
                                                                                                                                                        pm.Mass = Quantity(MassOfPointMass, 'kg')# Set mass
                                                                          xEdgeWindow=[mesh.NodeById(n).X for n in nodesCombined[:-1]]
                                                                                                                                                        pm.Name = 'mass' + str(nameWindow) + str(i)
                raise ValueError("Kein Anschluss für Knoten gefunden.")
                                                                         yEdgeWindow=[mesh.NodeById(n).Y for n in nodesCombined[:-1]]
                                                                                                                                                        else:
                                                                          zEdgeWindow=[mesh.NodeById(n).Z for n in nodesCombined[:-1]]
        return chain
                                                                                                                                                            nameWindow="LeftWindow"
                                                                          print("xEdgeWindow",xEdgeWindow)
                                                                                                                                                           sel = ExtAPI.SelectionManager.CreateSelectionInfo(SelectionTypeEnum.MeshNodes)
                                                                         print("yEdgeWindow",yEdgeWindow)
                                                                                                                                                           sel.Ids = [node]
                                                                         print("zEdgeWindow",zEdgeWindow)
                                                                                                                                                           xLeftWindow.append(mesh.NodeById(node).X)
                                                                                                                                                           yLeftWindow.append(mesh.NodeById(node).Y)
                                                                          "print(ResultingLength, Distances)"
                                                                                                                                                           zLeftWindow.append(mesh.NodeById(node).Z)
                                                                         NumberOfPointMasses=25
                                                                          ApprDistanceBetweenMasses=ResultingLength/(NumberOfPointMasses)
                                                                          "print(ApprDistanceBetweenMasses, Distances)"
                                                                                                                                                           ns = DataModel.Project.Model.AddNamedSelection()
                                                                          ActualDist=0.0
                                                                                                                                                           ns.Name = "PointMass" + str(nameWindow) + str(len(NodeListForPlaceMasses)-i)
                                                                                                                                                           ns.Location=sel
                                                                          NodeListForPlaceMasses=[nodesCombined[0]]
                                                                                                                                                   # Create point mass on node
                                                                                                                                                           pm = Model.Geometry.AddPointMass()
                                                                                                                                                           pm.Location = ns
pm.AppliedBy = RemoteApplicationType.DirectAttachment
                                                                                                                                                           pm.Mass = Quantity(MassOfPointMass,'kg')
                                                                                                                                                           pm.Name = 'mass' + str(nameWindow) + str(len(NodeListForPlaceMasses)-i)
```

Abbildung B.1 Python-Skript zur Platzierung der Massen entlang der Fensterkanten

Anhang C

Zusätzliche Informationen zur Erstellung der Fenstergeometrie und den Verbindungselementen

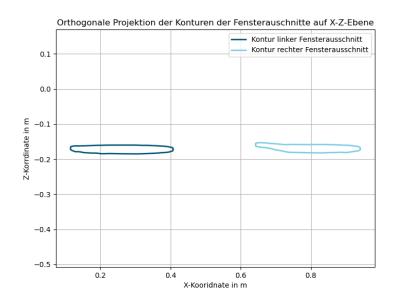


Abbildung C.1 Projektion der Konturen der Fensterauschnitte auf die x-z Ebene

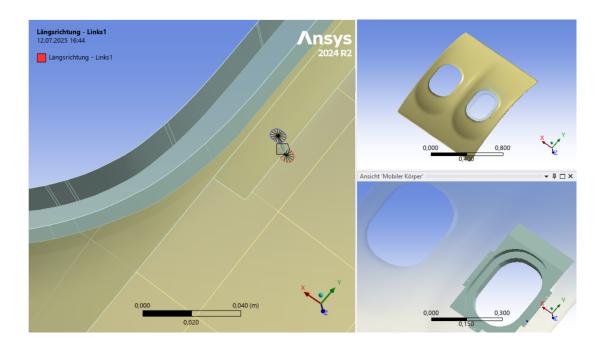


Abbildung C.2 Visualisierung der Definition der Federelemente

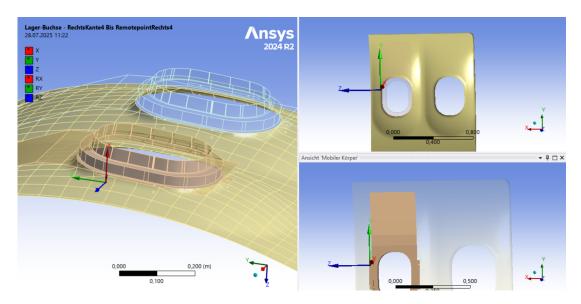


Abbildung C.3 Visualisierung der Definition der Schraubenverbindungen; gültig für fixierte Verbindungselemente sowie Verbindungselemente des Typs "Lagerbuchse"

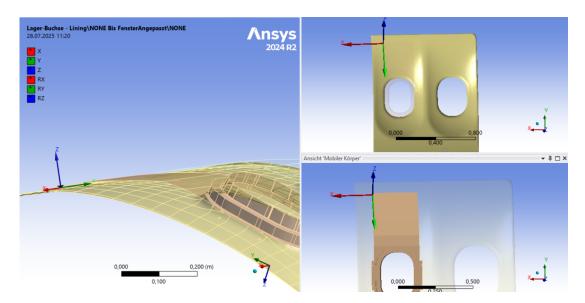


Abbildung C.4 Visualisierung der Definition der Klettverbindungen

Anhang D

Zusätzliche Informationen zum Model-Updating 2

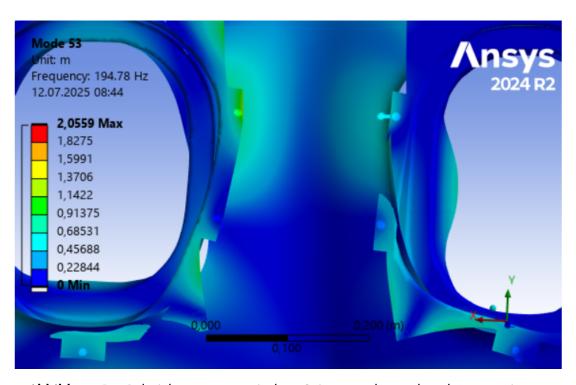


Abbildung D.1 Relativbewegung zwischen Seitenwandpaneel und Fenstereinsatz

Anhang E

Zusätzliche Information zu dem Model-Updating 3

E.1 Auswirkung einer zusätzlichen Randbedingung an der Fensteroberkante

In Abbildung E.1 sind die MAC Matrix ohne und mit zusätzlicher Randbedingung dargestellt. In dem Modell entsprechen die Wandstärken den Mittelwerten aus der OCO. Die Dichte ist an die Zielmasse der Fenstereinsätze angepasst, sodass die Masse in dieser Konfiguration 0,84 kg entspricht. Die Oberkante der Fenstereinsätze wird senkrecht zu der Fläche 2 auf die Oberfläche des Seitenwandpaneels projiziert. Anschließend wird entlang der projizierten Kanten zwischen dem Seitenwandpaneel und den Fenstereinsätzen eine fixierte Randbedingung definiert. Dabei wird die Deformation der verbundenen Kanten zugelassen, da davon auszugehen ist, dass diese Deformation durch die im realen System verwendete Klettverbindung zulässig ist. Für das System ohne die zusätzliche Randbedingung beträgt der Wert des C_{12} -Kriteriums 3,89, während für das System mit der zusätzlichen Randbedingung ein Wert von 3,70 berechnet wird. Dies zeigt, dass durch die zusätzliche Randbedingung eine Verbesserung der Abbildung des realen Schwingungsverhaltens durch das Simulationsmodell erreicht werden kann. Allerdings ist zu beachten, dass die Einträge auf den Nebendiagonalen durch die Randbedingung deutlich reduziert sind. Dieses Verhalten entspricht nicht dem in der Auto-MAC aus Abbildung 3.7 zu sehenden Verhalten. Des Weiteren werden die Moden bei 24,4 Hz, bei 58,8 Hz und bei 119,1 Hz schlechter abgebildet. Die Moden bei 178,6 Hz und bei 193,4 Hz hingegen verbessert. Der Effekt, den die zusätzliche Randbedingung auf diese Moden hat, wird im Folgenden durch die Betrachtung der simulierten Schwingformen im Vergleich zu der experimentell bestimmten evaluiert.

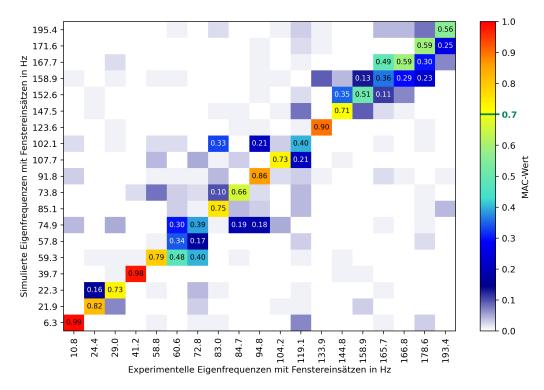
Die Schwingformen, die die Moden zu den experimentell bestimmten mit Eigenfrequenzen 24,4 Hz, 58,8 Hz, 119,1 Hz und 178,6 Hz haben, sind in den Abbildungen E.2 bis E.5 dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass für die Mode bei 24,4 Hz durch die zusätzliche Steifigkeit, durch die Randbedingung an der Oberkante der Fenstereinsätze, eine asymmetrische Deformation berechnet wird. Die beiden simulierten Moden, die durch das automatische Mode-Pairing zugeordnet werden, sind annähernd identisch allerdings gespiegelt. Durch die zusätzliche Randbedingung werden die Fenster relativ zu dem Seitenwandpaneel in beiden zugeordneten Moden kaum deformiert. Dies führt dazu, dass das Schwingungsverhalten des Seitenwandpaanels dominiert und resultiert in der abgebildeten Schwingungsform. Um das reale Schwingungsverhalten abbilden zu können, müssen die Fenster eine Deformation aufweisen. Dies kann aus der simulierten Schwingungsmode ohne Fenstereinsätze abgeleitet werden, da in diesem Fall eine deutlich genauere Abbildung der experimentell bestimmten Mode

möglich ist.

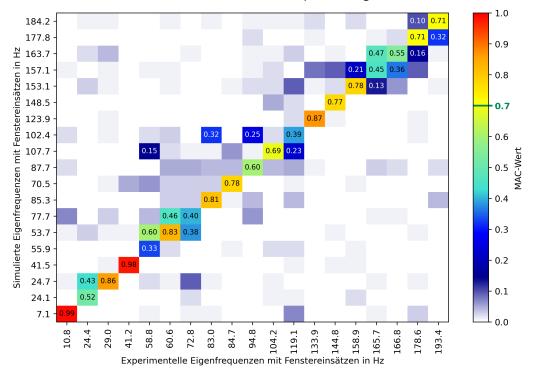
Eine ähnliche Beobachtung kann für die Schwingungsmode, die die experimentell bestimmte bei 58,8 Hz abbildet, gemacht werden. Durch die hohe Steifigkeit der Verbindung an der Oberkante der Fenstereinsätze, werden die Fenstereinsätze lediglich an der Unterseite deformiert. Auf diese Weise entsteht das veränderte Schwingungsmuster.

Die Betrachtung der Schwingungsmoden, die den experimentell bestimmten bei 178,6 Hz und bei 193,4 Hz zugeordnet werden, zeigt, dass die geringere Deformation der Fenstereinsätze durch die zusätzlichen Randbedingungen die simulierten Moden positiv beeinflusst. Es fällt jedoch auf, dass im Bereich derFläche 3 bei diesen Moden sehr starke Deformationen zu erkennen sind. Um die simulierten Moden weiter an die experimentell bestimmten anzupassen, muss die Steifigkeit in diesem Bereich erhöht werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Schwingungsverhalten durch die zusätzliche Randbedingung positiv beeinflusst werden kann. Allerdings muss eine realistische Steifigkeit der Anbindung vorgesehen werden, um eine negative Beeinflussung der simulierten Moden durch eine zu geringe Deformation der Fenstereinsätze zu vermeiden. Die betrachteten Moden deuten auf eine zu steife Anbindung hin. Zudem muss überprüft werden, ob eine veränderte Steifigkeit im Bereich der Fläche 3 zu einer Verbesserung des simulierten Schwingungsverhaltens führt. Die experimentell bestimmte Mode mit Eigenfrequenz 119,1 Hz zeigt zudem eine stark asymmetrische Schwingform. In der Voruntersuchung konnten auftretende asymmetrische Moden durch das Simulationsmodell unzureichend abgebildet werden. Damit die Asymmetrie abgebildet werden kann, kann die Berücksichtigung der unterschiedlichen Position der Sonnenblenden während der experimentellen Modalanalyse erforderlich sein. Diese Position führt zu einer asymmetrischen Massenverteilung und zu unterschiedlichen resultierenden Wandstärken im Bereich der GFK-Platte. Dieser Unterschied wird daher in den nachfolgenden Betrachtungen ebenfalls berücksichtigt.



(a) MAC Matrix Vergleich der simulierte Moden unter Verwendung der Mittelwerte der Wandstärken aus der Optimierung



(b) MAC Matrix Vergleich der simulierte Moden mit zusätzlicher Randbedingung an den Oberkanten der Fenstereinsätze

Abbildung E.1 Vergleich der MAC Matrix unter Verwendung der Mittelwerte der Wandstärken aus der Optimierung ohne und mit zusätzlicher fixierter Randbedingung an der Oberkante der Fenstereinsätze

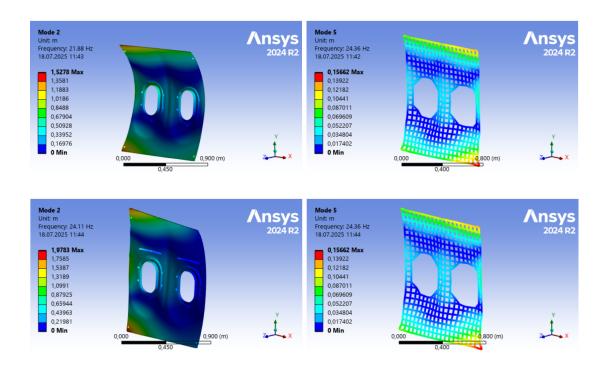


Abbildung E.2 Simulierte Mode, die die experimentell bestimmte Mode mit Eigenfrequenz 24,4 Hz abbildet, ohne (oben) und mit zusätzlicher (unten) Randbedingung

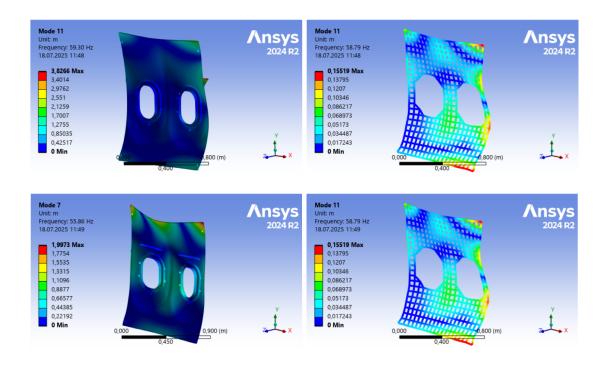


Abbildung E.3 Simulierte Mode, die die experimentell bestimmte Mode mit Eigenfrequenz 58,8 Hz abbildet, ohne (oben) und mit zusätzlicher (unten) Randbedingung

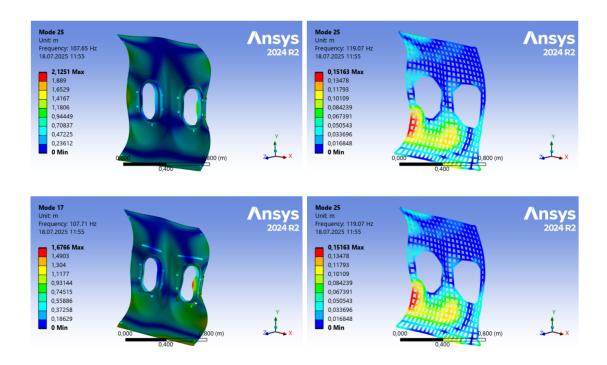


Abbildung E.4 Simulierte Mode, die die experimentell bestimmte Mode mit Eigenfrequenz 119,1 Hz abbildet, ohne (oben) und mit zusätzlicher (unten) Randbedingung

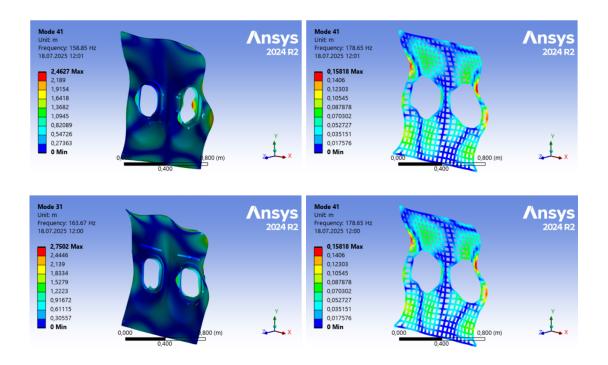


Abbildung E.5 Simulierte Mode, die die experimentell bestimmte Mode mit Eigenfrequenz 178,6 Hz abbildet, ohne (oben) und mit zusätzlicher (unten) Randbedingung