

# Integration der Kabinenakustik in den multidisziplinären Flugzeugvorentwurfsprozess auf Basis datenangepasster Surrogatmodelle

Pia Allebrodt<sup>1</sup>, Christian Hesse<sup>1</sup>, Jasper Bussemaker<sup>1</sup>, Michael Petsch<sup>2</sup>, Yannik Hüpel<sup>3</sup>,  
Jörn Biedermann<sup>1</sup>, Sabine C. Langer<sup>3</sup>, Björn Nagel<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt, DLR e.V., 21129 Hamburg, Deutschland, Email: pia.allebrodt@dlr.de*

<sup>2</sup> *Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie, DLR e.V., 70569 Stuttgart, Deutschland*

<sup>3</sup> *Institut für Akustik und Dynamik, TU Braunschweig, 38106 Braunschweig, Deutschland*

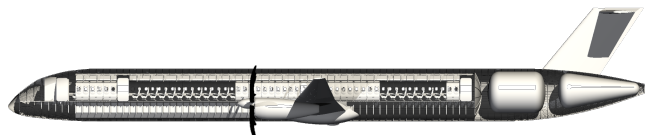
## Einleitung

Die wachsende Nachfrage im Luftverkehr und die damit einhergehende steigende Umweltbelastung stellen die Luftfahrt vor große Herausforderungen. Anforderungen der Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit zukünftiger Verkehrsflugzeuge erfordern neue Technologien, wie beispielsweise neue Antriebskonzepte, die den Rumpf und infolge veränderter Lärm- und Strukturcharakteristiken auch die Kabinenakustik stark beeinflussen. Zur Vermeidung nachträglicher, kosten- und massenintensiver Entwicklungsarbeiten ist die Berücksichtigung der Kabinenakustik als weitere Disziplin bereits in der frühen Entwurfsphase maßgeblich.

Angesichts von Zielkonflikten zwischen akustischen und etablierten Entwurfsanforderungen erweist sich der Ansatz der Multidisziplinären Analyse und Optimierung (MDAO) als notwendig für die simultane Berücksichtigung sämtlicher Disziplinen. Zur Etablierung eines MDAO-Ansatzes, der die Kabinenakustik integriert, wird ein repräsentativer Prozess betrachtet, der akustische Aspekte sowie die Strukturdimensionierung abbildet. Eine hohe Vorhersagegenauigkeit des Kabinenlärms in der frühen Entwurfsphase wird durch die automatisierte, hochfidele Modellgenerierung mittels des wissensbasierten Werkzeugs FUGA (FUSELAGE GEOMETRY ASSEMBLER) [1] sichergestellt. Dabei werden Vorentwurfsdaten im Luftfahrzeugschema CPACS (COMMON PARAMETRIC AIRCRAFT CONFIGURATION SCHEMA) [2], welche geometrisch lediglich die äußere Hülle des Flugzeugs beschreiben, mit spezifischem Wissen zur numerischen Detailanalyse angereichert. Durch den hohen Fidelitätsgrad weisen diese Modelle eine große Anzahl an Freiheitsgraden auf, was zu erheblichen Rechenzeiten führt und den Anforderungen einer schnellen Analyse zahlreicher Konzeptvarianten im Rahmen der MDAO entgegensteht. Zur Vereinbarkeit dieser Anforderungen wird in diesem Beitrag der Einsatz datenangepasster Surrogatmodelle als Ersatz rechenintensiver Simulationen unter Verwendung der Finite Elemente Methode (FEM) auf Basis von [3] untersucht.

Im Folgenden wird das betrachtete Optimierungsproblem unter Berücksichtigung der Strukturdimensionierung und der Kabinenakustik näher erläutert und die Methodik zur Integration der Kabinenakustik in den MDAO-Prozess vorgestellt, welche die Implementierung recheffizienter Kabinenlärmvorhersagen im Fokus betrachtet. Die Anwendbarkeit dieser Methodik wird abschließend anhand

einer neuartigen Flugzeugkonfiguration mit wasserstoffbasierten Propellertriebwerken aus dem DLR-Projekt EXACT (<https://exact-dlr.de>) gemäß Abbildung 1 aufgezeigt sowie das Potential zur Integration der Kabinenakustik in den Flugzeugvorentwurf diskutiert.



**Abbildung 1:** Zu untersuchende neuartige Flugzeugkonfiguration aus dem DLR-Projekt EXACT.

## Definition des Optimierungsproblems

Im Rahmen des klassischen multidisziplinären Flugzeugentwurfs steht die Bereitstellung effizienter, sicherer und leistungsstarker Flugzeugkonfigurationen im Fokus. Hierbei ist insbesondere die Flugzeugmasse als zentraler Einflussfaktor zu identifizieren, welche im Rahmen der Strukturdimensionierung und im Kontext des Leichtbaus zu minimieren ist. Demgegenüber steht die zunehmende Nachfrage nach erhöhtem Passagierkomfort und der damit implizierten Reduktion des Kabinenlärms. Aufgrund der Abhängigkeit des akustischen Transmissionsverhaltens von der Strukturmasse sowie der durch die Massenreduktion im Leichtbau bedingten erhöhten Vibrationsanfälligkeit, die potentiell zu einem erhöhten Kabinenlärmpegel führen kann, entsteht ein wesentlicher Zielkonflikt. Dieser erfordert zur Identifikation einer geeigneten Kompromisslösung eine multikriterielle Betrachtung. Als Zielgröße wird daher auf Seiten der Strukturdimensionierung die Minimierung der primären Rumpfstrukturmasse  $m_{s,tot}$  gewählt. Zusätzlich sind in diesem Kontext Kriterien der strukturellen Festigkeit und Stabilität als Nebenbedingungen sicherzustellen, um sowohl die Funktionalität als auch die Sicherheit der Rumpfstruktur zu gewährleisten.

Bezüglich der Minimierung des Kabinenlärms wird zur Definition einer Zielgröße die akustisch potentielle Energie (APE) herangezogen, welche sich aus dem Volumenintegral der frequenzabhängigen Quadrate der Schalldruckamplituden  $p(\mathbf{r}, \omega)$  zu

$$E_{pot}(\omega) = \frac{1}{4\rho_F c_F^2} \int_{V_F} |p(\mathbf{r}, \omega)|^2 dV \quad (1)$$

unter Zuhilfenahme des Volumens  $V_F$ , der Dichte  $\rho_F$  und der Schallgeschwindigkeit  $c_F$  des betrachteten akus-

tischen Mediums ergibt. Die APE zeichnet sich somit als eine skalare, globale Größe aus, die das Schallfeld der Kabinenkavität adäquat repräsentiert.

Im Rahmen dieses Beitrags beschränkt sich die akustische Anregung auf den tonalen Propellerlärm. Hierbei gelten insbesondere die Blattfolgefrequenz sowie die zweite und dritte Harmonische als dominierende spektrale Komponenten und werden in die Untersuchungen einbezogen. Um diese Frequenzabhängigkeit ebenfalls in der Optimierung zu berücksichtigen, wird der energetisch gemittelte Pegel der APE bezogen auf den genormten Bezugswerts  $E_0 = 10^{-12} \text{J}$  für  $n_\omega$  Frequenzen gemäß

$$L_m = 10 \lg \left( \frac{1}{n_\omega} \sum_{i=1}^{n_\omega} \frac{E_{pot}(\omega)}{E_0} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

als weitere Zielgröße minimiert.

Da die Abstrahlung des Propellerlärms primär in der Propellerebene stattfindet, werden als Entwurfsvariablen die Dicke der Spante  $t_s$  in der Propellerebene sowie die Dicke der Rumpfabschirmung  $t_r$  gegen das Auslösen von Propellerblättern zur Sicherstellung der Passagiersicherheit untersucht. Diese beeinflussen sowohl die Strukturmasse als auch das akustische Transmissionsverhalten des Rumpfes und haben damit Einfluss auf die beiden definierten Zielgrößen. Die betrachteten Entwurfsvariablen definieren ein kontinuierliches Optimierungsproblem und einen Entwurfsraum, dessen konfigurationsspezifische Randbedingungen sich aus vorgegebenen oder aus der Dimensionierung abgeleiteten Mindestdicken sowie dem verfügbaren Bauraum im Rumpf ergeben. Für die vorgestellte Konfiguration ergibt sich dieser Entwurfsraum zu:

$$\begin{aligned} 0,002 \text{ m} &\leq t_s \leq 0,016 \text{ m}, \\ 0,066 \text{ m} &\leq t_r \leq 0,150 \text{ m}. \end{aligned} \quad (3)$$

Basierend auf diesem Optimierungsproblem wird im Folgenden Abschnitt eine Methodik zur recheneffizienten, zuverlässigen Kabinenlärmprognose zur Integration in der MDAO vorgestellt.

## Kabinenakustik in der MDAO

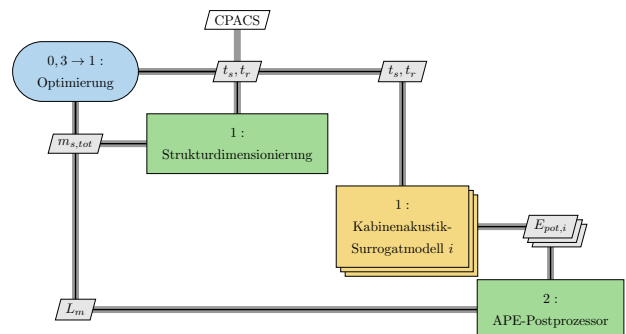
Zur recheneffizienten Kabinenlärmprognose im Kontext der MDAO wird in dem vorliegenden Beitrag der Ansatz datenangepasster Surrogatmodelle als Ersatz der aufwendigen FEM-Berechnungen untersucht. In [3] konnte Kriging als geeignete Surrogatmodellierungstechnik für vibroakustische Anwendungen identifiziert werden. Bei Kriging handelt es sich um eine Interpolationsmethode, die auf der Modellierung der räumlichen Korrelation bekannter Daten basiert und zur Schätzung von Werten an nicht beobachteten Punkten eingesetzt wird [4]. Grundlage für das Kriging-Modelltraining bilden Stichproben, die mittels Latin Hypercube Sampling (LHS) erzeugt werden und somit eine raumfüllende Verteilung über den Entwurfsraums sicherstellen [4]. Sowohl Kriging als auch LHS sind in der Python-Toolbox SMT [5] implementiert, welche im Kontext dieses Beitrags zur Erstellung von Surrogatmodellen verwendet wird. Aufgrund der Frequenzabhängigkeit des vibroakustischen Verhaltens wird pro Frequenz ein separates Surrogatmodell erstellt. Für jede Stichprobe und Frequenz erfolgt eine har-

monische FEM-Analyse auf Basis der detaillierten Simulationsmodelle aus FUGA zur Ermittlung der APE aus der Schalldruckverteilung in der Kabinenkavität, die als Trainingsinput für Kriging dient. Um Anpassungen der FUGA-Modelle entsprechend der Entwurfsvariablen möglichst effizient und ohne repetitive rechenintensive Geometrie- sowie Vernetzungsoperationen vorzunehmen, wird die solveragnostische Formulierung der FEM-Modelle in FUGA genutzt, mit der ein initial erstelltes Modell auf sehr einfache Weise unter Beachtung der Modellkonsistenz entsprechend modifiziert werden kann.

Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt in der Surrogatmodellerstellung besteht darin, dass die Anpassung der Primärstruktur im Rahmen der Strukturdimensionierung Einfluss auf das akustische Transmissionsverhalten hat und somit eine unidirektionale Kopplung zwischen Strukturdimensionierung und Kabinenakustik besteht. Diese Kopplung ist entsprechend in der Trainingsdatenerstellung zu berücksichtigen.

Die Strukturdimensionierung erfolgt mittels des Frameworks PANDORA (PARAMETRIC NUMERICAL DESIGN AND OPTIMIZATION ROUTINES FOR AIRCRAFT) [6], welches auf Basis Globaler Finite Elemente Modelle (GFEM) der Primärstruktur sowie statischer Flug- und Bodenlastfälle erfolgt. Aus der Dimensionierung resultiert eine optimierte Paneeldickenverteilung sowie eine aus dem GFEM abgeleitete Massenabschätzung. Die in der Optimierung als Nebenbedingungen definierten Kriterien der strukturellen Stabilität und Festigkeit werden in PANDORA implizit während des Dimensionierungsprozesses berücksichtigt. Zum konsistenten Datenaustausch zwischen der Strukturdimensionierung und der vibroakustischen Analyse wird CPACS verwendet.

Durch die Berücksichtigung der Kopplung zwischen der Strukturdimensionierung und der Kabinenakustik in den Surrogatmodellen kann diese Kopplung im MDAO-Prozess selbst vernachlässigt werden, sodass die Auswertung dieser beiden Disziplinen parallelisiert werden und folglich die Optimierung effizienter erfolgen kann. Die XDSM-Darstellung (EXTENDED DESIGN STRUCTURE MATRIX) dieses multikriteriellen MDAO-Prozesses ist in Abbildung 2 veranschaulicht. Dieser Prozess wird



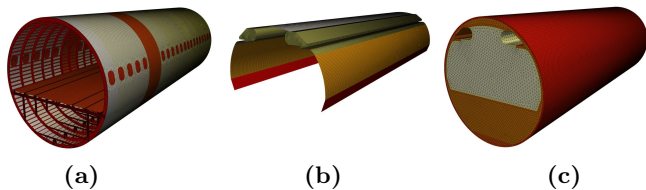
**Abbildung 2:** XDSM-Diagramm des betrachteten multikriteriellen Optimierungsproblems (in Anlehnung an [3]).

im Rahmen dieses Beitrags in dem Integrationsframework RCE (Remote Component Environment) [7] implementiert, welches die Integration eigener Tools, die Anbindung an bestehende Prozesse sowie die automatisierte

Ausführung dieser erlaubt. Zur Sicherstellung der Konsistenz zwischen den Disziplinen und den Modellvarianten wird auch hierbei CPACS als zentrales Datenaustauschformat verwendet. Die multikriterielle Optimierung basiert auf dem Ansatz der surrogat-basierten Optimierung (SBO), welche eine effiziente Suche im Entwurfsraum bei gleichzeitig geringem Bedarf an rechenintensiven Funktionsauswertungen ermöglicht [8]. Dies wird mittels des Python-Tools SBARCHOPT [9] zum Erhalt einer ausreichend konvergierten Pareto-Front realisiert.

### Anwendungsbeispiel der MDAO

Im Folgenden wird die Anwendbarkeit der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Methodik zur multikriteriellen Optimierung unter Berücksichtigung der Strukturdimensionierung und der Kabinenakustik anhand der Flugzeugkonfiguration gemäß Abbildung 1 aufgezeigt. Das GFEM zur Strukturdimensionierung modelliert die Primärstruktur mittels Schalen- und Balkenelemente mit 46144 Freiheitsgraden und einer Rechenzeit von etwa 25 min. Im Gegensatz dazu wird zur vibroakustischen FEM-Analyse, aus welcher die APE zur Generierung der Kriging-Trainingsdaten ermittelt wird, neben der detaillierten Primärstruktur außerdem die Sekundärstruktur sowie Kabinen- und Sekundärkavitäten berücksichtigt, deren Fidelitätsgrad in Abbildung 3 dargestellt ist. Um die Rechenzeiten der vibroakustischen FEM-Analysen auf einem machbaren Umfang zu halten, wird lediglich eine Rumpfschnittung in der Propellerebene betrachtet. Die strukturellen Komponenten werden mittels



**Abbildung 3:** FEM-Modell der zu untersuchenden Rumpfschnittung mit Primärstruktur (a), Sekundärstruktur (b) und Kavitäten (c) für vibroakustische Analysen (aus [3]).

Schalenelemente sowie Kavitäten über Tetraederelemente diskretisiert. Strukturelle Verbindungen werden über Niet- und Federelemente repräsentiert. An der Grenzfläche zwischen Fluid und Struktur wird eine Fluid-Struktur-Interaktion definiert sowie Absorberelemente an offenen Kavitätenrändern berücksichtigt. Dies resultiert in Modellen mit ungefähr 8,04 Mio. Freiheitsgraden und einem Rechenaufwand von ca. 75 min pro Frequenz.

Die Kriging-basierten Surrogatmodelle zur Kabinenlärmpgnose in der Blattfolgefrequenz  $f_1 = 61,7$  Hz sowie der zweiten und dritten Harmonischen,  $f_2 = 123,4$  Hz und  $f_3 = 185,1$  Hz, sind in Abbildung 4 als Pegel der APE  $L_{E,pot}$  relativ zu dem Bezugswert  $E_0 = 10^{-12}$  J visualisiert. Mit 220 Trainingsdaten für jedes dieser Surrogatmodelle wird in [3] eine insgesamt hohe Vorhersagegenauigkeit mit lokal höheren Unsicherheiten in den Randbereichen des Entwurfsraums aufgewiesen. Diese Genauigkeiten werden zur Demonstration der Anwendbarkeit der entwickelten Methodik als hinreichend betrachtet.

Anhand der Surrogatmodelle wird ein komplexes, hochgradig nichtlineares Antwortverhalten deutlich, welches auf resonante Effekte zurückzuführen ist. Die Änderung der strukturellen Parameter führt diesbezüglich zu Veränderungen der Masse und Steifigkeit der Struktur, welche implizit die dynamischen Charakteristika der betrachteten Rumpfschnittung beeinflussen. Das nichtlineare Verhalten wird dabei aufgrund einer steigenden modalen Dichte mit zunehmender Frequenz verstärkt und führt somit zu einer Zunahme an lokalen Extrema der APE im Entwurfsraum.

Unter Einsatz dieser Surrogatmodelle zur Kabinenlärmpgnose im MDAO-Prozess gemäß Abbildung 2 ergibt sich die in Abbildung 5 in Orange hervorgehobene, approximierte und nach 200 Funktionsauswertungen hinreichend konvergierte Pareto-Front im Zielfunktionsraum. Die minimalen und maximalen Werte der Zielgrößen sind im Kontext der approximierten Pareto-Front zu

$$\begin{aligned} 10634 \text{ kg} &\leq m_{s,tot} \leq 10926 \text{ kg}, \\ 82,2 \text{ dB} &\leq L_m \leq 83,8 \text{ dB} \end{aligned} \quad (4)$$

zu bestimmen. Dabei ist die Maximierung der einen Zielgröße mit der Minimierung der jeweils anderen verbunden. Somit ist die Reduktion des energetisch gemittelten Pegels der APE um 1,6 dB bzw. 30,8 % möglich, auf Kosten einer strukturellen Massenzunahme von 292 kg, was einer relativen Zunahme von 2,7 % entspricht. Dies stellt eine wesentliche Verbesserung der Kabinenakustik bei einer geringen Massenzunahme im Rahmen des betrachteten Optimierungsproblems dar. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Strukturmassenerhöhung im Kontext des Gesamtflugzeugentwurfs aufgrund des Vergrößerungsgesetzes weitere Massenzunahmen nach sich ziehen kann, deren Quantifizierung die Berücksichtigung zusätzlicher Disziplinen im MDAO-Prozess erfordert. Außerdem ist zu beachten, dass durch die lokal höheren Ungenauigkeiten der Surrogatmodelle im Randbereich des Entwurfsraumes die Ergebnisse der Pareto-Front mit besonderer Sorgfalt abzuwägen sind. Dies wird in [3] anhand einer Validierung der nicht-dominierten Lösungen verdeutlicht.

Wie einleitend hervorgehoben wird, sind die Rechenzeiten der numerischen Kabinenlärmpgnosen ein limitierender Faktor zur praktischen Integration der Kabinenakustik in die MDAO, welche durch die Verwendung von datenangepassten Surrogatmodellen überwunden werden soll. Für die Surrogatmodellierung sind hierbei 220 Trainingsdaten für eine ausreichende Vorhersagegenauigkeit erforderlich, während die Pareto-Front bereits nach 200 Funktionsauswertungen hinreichend konvergiert. Aus den entsprechenden Rechenzeiten zur Strukturdimensionierung sowie der vibroakustischen FEM-Analyse ergibt sich zur Surrogatmodellgenerierung der betrachteten Frequenzen ein Rechenaufwand von ungefähr 917,4 h. Die Optimierung ist in ca. 84 h gelöst, sodass eine Gesamt-Rechenzeit von 1001,4 h resultiert. Im Vergleich zu einem Optimierungsprozess mit direkter Einbindung der FEM-Analysen würde mit der Annahme einer gleich bleibenden Anzahl an erforderlichen Funktionsauswertungen in der

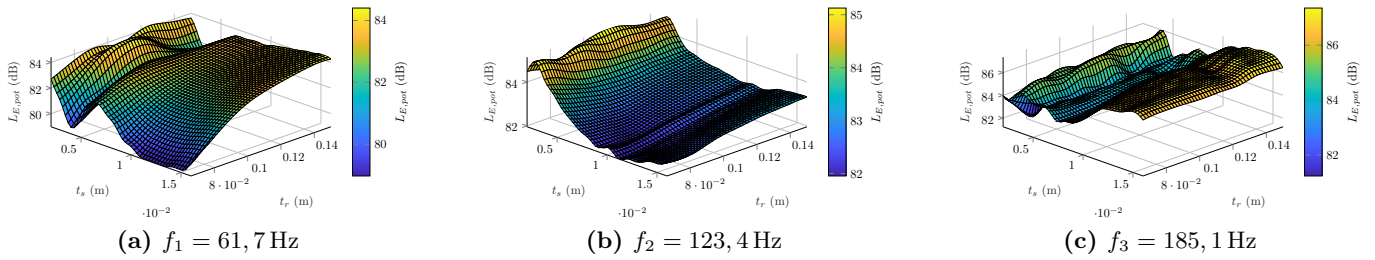


Abbildung 4: Surrogatmodelle zur Kabinenlärmprognose (aus [3]).

Optimierung ein Rechenaufwand von lediglich 834 h erforderlich sein. Dies deutet auf den ersten Blick auf eine erhöhte Berechnungszeit durch die Verwendung von Surrogatmodellen hin. Surrogatmodelle weisen jedoch mehrere Vorteile auf, durch die sich die zusätzliche Rechenzeit kompensieren lässt und die Effizienz der MDAO insgesamt gesteigert wird. In diesem Kontext ist die Wiederverwendbarkeit der Surrogatmodelle ein wesentlicher Aspekt, mit welcher die Optimierung auch bei einer veränderten Lösungsstrategie oder einer Anpassung der Problemformulierung erneut effizient gelöst werden kann. Auch ist zu erwarten, dass bei der Verwendung alternativer Lösungsstrategien, wie z.B. genetischen Algorithmen, oder einer erhöhten Komplexität des Optimierungsproblems eine deutlich höhere Anzahl an Funktionsauswertungen in der Optimierung erforderlich ist, in welchen Surrogatmodelle zur Kabinenlärmprognose zu einer Recheneffizienzsteigerung beitragen.

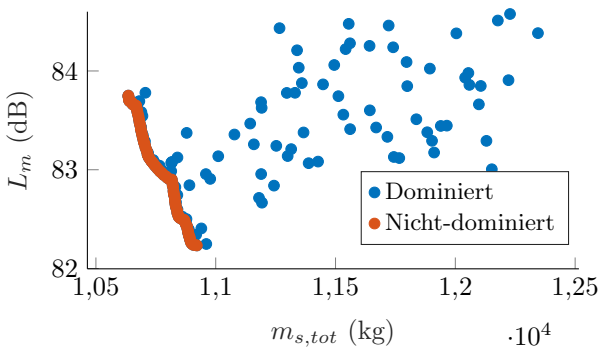


Abbildung 5: Approximierte Pareto-Front sowie die dominierten Lösungen im Zielfunktionsraum (in Anlehnung an [3]).

## Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag beschreibt eine Methodik zur Integration der Kabinenakustik in den multidisziplinären Flugzeugvorentwurfsprozess mittels datenangepasster Surrogatmodelle als recheneffizienter Ersatz der vibroakustischen FEM-Analysen auf Basis von Modellen hohen Fidelitätsgrades. Die Verwendung von standardisierten Datenformaten und Softwarelösungen, wie CPACS und RCE, ermöglicht die einfache Anbindung an etablierte Entwurfsprozesse und -tools unter Berücksichtigung der Konsistenz unterschiedlicher Disziplinen und Modellvarianten. Im Rahmen von Untersuchungen an einer neuartigen Flugzeugkonfiguration kann die Anwendbarkeit der entwickelten Methodik nachgewiesen sowie das Potential zur Einbeziehung der Kabinenakustik in den Flugzeugvorentwurfsprozess aufgezeigt werden.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen kann im Kontext weiterführender Arbeiten die Komplexität des MDAO-Prozesses durch die Berücksichtigung weiterer Disziplinen sowie zusätzlicher akustischer Anregungen erhöht werden. Dies erfordert allerdings auch eine Verbesserung der Surrogatmodellierung zur Sicherstellung einer hohen Vorhersagegenauigkeit und einer effizienteren Modellgenerierung durch z.B. optimierte Stichprobenalgorithmen.

## Literatur

- [1] C. Hesse, P. Allebrodt, M. Teschner, J. Biedermann: *Knowledge-based model generation for aircraft cabin noise prediction from pre-design data*. CEAS Aeronautical Journal, 15, 1127–1136, 2024.
- [2] M. Alder, E. Moerland, J. Jepsen, B. Nagel: *Recent Advances in Establishing a Common Language for Aircraft Design with CPACS*. Aerospace Europe Conference 2020, Bordeaux, France, 2020.
- [3] P. Allebrodt: *Integration der Kabinenakustik in den multidisziplinären Flugzeugvorentwurfsprozess*. Braunschweig, TU Braunschweig, Masterarbeit, 2024.
- [4] J. R. R. A. Martins, A. Ning: *Engineering design optimization*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [5] P. Saves, R. Lafage, N. Bartoli, Y. Diouane, J. Bussemaker, T. Lefebvre, J. T. Hwang, J. Morlier, J. R. Martins: *SMT 2.0: A Surrogate Modeling Toolbox with a focus on hierarchical and mixed variables Gaussian processes*. Advances in Engineering Software 188, 103571, 2024.
- [6] M. Petsch, D. Kohlgrüber, D. Schwinn, C. Leon Munoz, L. Marconi: *Enhancements of the DLR tool Pandora for automated detailed preliminary design and crash analyses*. Augsburg: DLRK 2025, 2025.
- [7] B. Boden, J. Flink, N. Först, R. Mischke, K. Schaffert, A. Weinert, A. Wohlan, A. Schreiber: *RCE: An Integration Environment for Engineering and Science*. SoftwareX 15, 100759, 2021.
- [8] J. H. Bussemaker, P. Saves, N. Bartoli, T. Lefebvre, R. Lafage: *System architecture optimization strategies: dealing with expensive hierarchical problems*. Journal of Global Optimization 91, 851-895, 2025.
- [9] J. H. Bussemaker: *SBArchOpt: Surrogate-Based Architecture Optimization*. Journal of Open Source Software 8, 89, 5564, 2023.