

# Akustikgerechtes Design statt Lärmbekämpfung – Zukunft der Akustikforschung?

Sabine C. Langer<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Akustik, TU Braunschweig, Deutschland, Email: s.langer@tu-braunschweig.de

PREVENT TROUBLE BEFORE IT ARISES.  
PUT THINGS IN ORDER BEFORE THEY EXIST. (LAOTSE)

## Einleitung

Die Minimierung der negativen Umweltwirkungen von Technologien und die Entwicklung von umweltverträglichen Lösungen ist die Zukunftsaufgabe von Ingenieurinnen und Ingenieuren. Für die Akzeptanz von zukünftigen Technologien wird die Akustik eine besondere Rolle spielen. Um dieser Rolle gerecht zu werden, steht der Akustik ein Paradigmenwechsel bevor – von der Lärmbekämpfung hin zum Akustikgerechten Design. Voraussetzung für einen akustikgerechten Produktentstehungsprozess sind insbesondere Werkzeuge zur Technologiebewertung, die auf zutreffenden Modellen, zuverlässigen Berechnungsmethoden und adäquaten Bewertungskriterien basieren.

*Lärmbekämpfung* wird hier verstanden als Begriff, der Maßnahmen und Aktivitäten mit dem Ziel zusammenfasst, gegen Lärm, d.h. unerwünschten Schall vorzugehen. In dieser Definition wird vorausgesetzt, dass das Lärmproblem schon vorhanden ist. Dagegen setzt sogenanntes *Lärmarme Konstruieren* bei der Erkenntnis an, dass insbesondere im Sinne des Gesundheitsschutzes ein Produkt möglichst leise sein sollte und dies im Produktentstehungsprozess Berücksichtigung finden muss. Das *Akustikgerechte Design* geht einen Schritt weiter - in Richtung der frühen Phasen der Produktentstehung und setzt bereits an dem Punkt an, in dem etwas Neues in die Welt gebracht werden soll und noch keine Festlegungen getroffen sind.

Der Begriff „akustikgerecht“ impliziert also die Frage danach, welche Zukunft kreiert werden soll. Es geht nicht nur darum, Grenzwerte einzuhalten, nicht nur darum, einen akzeptablen Zustand zu schaffen. Der Platz, von dem aus gehandelt wird, ist ein anderer: Es werden Lösungen gesucht, die einen „wünschenswerten“<sup>1</sup> Zustand schaffen. Diese Intention und dieses Ziel, den wünschenswerten Zustand zu (er)schaffen und damit im Sinne eines akustikgerechten Entwerfens und Konstruierens zu handeln, erfordert, dass das Paradigma dann in allen Phasen der Produktentstehung Einzug findet, sowohl in den ganz frühen Phasen als auch in den späteren. Hervorgehoben werden muss dabei, dass die Erkenntnisse und das Wissen zu Lärminderungsmaßnahmen und -bekämpfung und zum Lärmarmen Konstruieren weiter-

hin von besonderem Wert sind und dieser Stand des Wissens in die Umsetzung eines Akustikgerechten Designs einfließt.

Offensichtlich ist, dass für ein akustikgerechtes Design Modellierungsansätze und Vorhersagemethoden hilfreich sind, die es in den jeweiligen Produktentstehungsphasen ermöglichen, eine Bewertung der akustischen Eigenschaften vorzunehmen. Dies ist insbesondere in frühen Produktentstehungsphasen, wenn noch wenige Details festgelegt sind, eine besondere Herausforderung [3]. Es wird außerdem das Wissen benötigt, wie die akustischen Eigenschaften gezielt verändert werden können. Die Grundregeln des Lärmarmen Konstruierens sind bekannt und zum Beispiel in der DIN 11688 festgehalten [4]. Dort werden nicht nur die Planungsgrundlagen beschrieben, sondern gezielt Hinweise entlang der maschinenakustischen Wirkkette von der Quelle über den Transmissionspfad bis hin zum Empfangsort genannt.



**Abbildung 1:** Technischer Produktentstehungsprozess (PEP) nach [3]

Und dennoch - obwohl diese Regeln hinlänglich bekannt und etabliert sind treten akustische Probleme von Produkten nach wie vor häufig auf und werden dabei nicht selten erst in späten Produktentstehungsphasen sichtbar - in vielen Fällen erst dann, wenn am *physikalischen Prototypen* (siehe Abb. 1) akustische Messungen vorgenommen werden. Dies ist insofern problematisch, als dass Maßnahmen zur Lärmbekämpfung in diesen späten Phasen in mehrerlei Hinsicht teuer sind. Sie nehmen Zeit in Anspruch und können zu Verzögerungen führen, die bis zu Verschiebungen der Auslieferung bzw. Markteinführung führen. Es handelt sich um zusätzliche Maßnahmen, die in der ursprünglichen Kalkulation nicht enthalten waren und damit zur Verteuerung der Herstellungskosten beitragen. Und es sind in der Regel lärmbekämpfende Maßnahmen, die durch zusätzliche Dämpfung und/oder Dämmungsmaßnahmen zusätzliche Masse ins Produkt bringen - eine Tatsache, die nicht nur bei Produkten aus dem Mobilitätssektor die Ökobilanz des Produktes verschlechtert, weil in der Regel insbesondere unter anderem mehr Kohlenstoffdioxid entsteht, wenn schwerere Produkte bewegt werden müssen.

Ziel muss es also sein, eine akustische Technologiebewertung zuverlässig schon in viel früheren Phasen der Produktentstehung möglich zu machen und als integralen Bestandteil der Technologiebewertung an einem *virtuel-*

<sup>1</sup>Hier schließt sich direkt die Frage danach an, welcher Zustand denn in dem jeweiligen Fall als „wünschenswerter“ Zustand angesehen wird und wie dieser „gefunden“ und beschrieben werden kann. Diese Frage ist nicht Gegenstand dieses Beitrags. Es kann aber beispielsweise auf die Methoden des Design Thinkings [1] und der Theorie U [2] verwiesen werden.

len Prototypen vorzusehen (siehe Abb. 1) - ganz gleich, ob die Akustik Hauptfunktion des Produktes ist oder nicht.

### Voraussetzungen für den Paradigmenwechsel

Die Modellierungs- und Vorhersagefähigkeit ist aber nur eine Voraussetzung für das Akustikgerechte Design. An vorderster Stelle steht ein Bewusstsein dafür, dass im kreativen Schaffensprozess der Möglichkeitsraum offen ist und ein Kontakt mit der zukünftigen Möglichkeit hergestellt werden kann [2]. In diesem Moment des Kontakts mit der zukünftigen Lösung geht es nicht darum, „das kleinste Übel“ zu wählen, sondern es geht wie beschrieben um das Schaffen der „wünschenswerten Lösung“<sup>2</sup>.

Damit kreative Ideen in eine Umsetzung überführt werden können, benötigt es darüber hinaus einen Rahmen, der ausreichend Struktur, aber weiterhin ausreichend Gestaltungsraum bietet, um den Produktentstehungsprozess erfolgreich zu durchlaufen. Diesen Rahmen kann ein konstruktionsmethodisches Vorgehen im Sinne eines *Design to Acoustics* bieten, der unter anderem auch sicherstellt, dass die vielfältigen Anforderungen an das Produkt erfüllt werden.

Weiterhin ist Voraussetzung für das Akustikgerechte Design, dass Metriken verfügbar sind, die das was „wünschenswert“ ist, vergleichbar machen. Denn es geht hier nicht alleine um laut oder leise. Es geht darum, wie der Mensch seine akustische Umgebung wahrnimmt und in weiterer Konsequenz auch darum, was die akustische Information im Menschen bewirkt.

Die Voraussetzung für den Paradigmenwechsel hin zum Akustikgerechten Design umfasst demnach drei Bereiche:

1. Sensibilisierung und Bewusstsein
2. Unterstützende Methodik: Design to Acoustics
3. Technologiegestaltung und Technologiebewertung

### Sensibilisierung und Bewusstsein

Die Gesellschaft wurde in den vergangenen Jahrzehnten verstärkt für den Themenkomplex Lärm *sensibilisiert* - dank intensiver Forschung auf dem Gebiet des Lärms und der Lärmwirkung und nicht zu letzt dank intensiver Aufklärungsarbeit zu den gesundheitlichen und weiteren Auswirkungen von Lärm. Das Akustikgerechte Konstruieren steht daher nicht im Widerspruch zur Lärmbekämpfung. Ein Zustand, der „nicht-wünschenswert“ ist, der unser Miteinander stört und nicht fördert, der gar gesundheitsgefährdend ist, sollte klar adressiert und möglichst verändert werden.

*Bewusstseinsentwicklung* ist eine wesentliche Komponente im Zusammenhang mit Innovation und Innovationsfähigkeit. Innovation wird befördert durch ein Be-

<sup>2</sup>Nicht unerwähnt bleiben darf hier, dass die akustische Funktion in der Regel immer neben anderen technischen Funktionen bewertet werden muss und die technischen Funktionen in einem potentiellen Zielkonflikt mit anderen Eigenschaften - zum Beispiel den wirtschaftlichen stehen. Gerade deshalb sollte der Lösungsraum für die komplexe Aufgabe der Lösungsfindung nicht zu früh eingeschränkt werden

wusstsein für den offenen Möglichkeitsraum am Anfang des kreativen Schaffensprozesses sowie durch das Bewusstsein dafür, dass zur Entwicklung und zur Bewertung von Technologien ein Modellierungsprozess vollzogen wird.

Duddeck hat in diesem Zusammenhang schon in den 1980er Jahren die Frage aufgeworfen, ob Ingenieure und Ingenieurinnen die Tatsache, dass Modellierung in ihrem täglichen Schaffen notwendig ist, so stark verinnerlicht haben, dass sie sich dieser Tatsache gar nicht mehr bewusst sind. Er fragt in [5] außerdem, ob von diesen Modellen dadurch naiv, d.h. nicht reflektierend gebraucht gemacht wird. In [6] haben Langer et.al. abgeleitet, dass den Lehrenden in den Ingenieurwissenschaften eine besondere Verantwortung zukommt. Sie müssen ein Bewusstsein dafür schaffen, dass Modelle nur Abbilder der Realität sind und jeweils auch nur einen Teil dieser darstellen.

### Modellbildung

Modelle dienen dazu, über Realität zu kommunizieren und so die Realität für die Analyse (und damit auch für die (Technologie-)bewertung) zugänglich zu machen. Es wird die Sprache der Mathematik verwendet, um Realität eindeutig beschreibbar und damit „besprechbar“ zu machen. Dabei adressiert ein Modell, das mit Hilfe der Sprache der Mathematik beschrieben wird, jeweils aber nur einen Ausschnitt der Realität. Den Teil der Realität, der für den Beobachter wahrnehmbar und der für die Frage, die der Beobachter an die Realität hat, relevant ist. Man nennt diesen Teil der Realität auch Realitätsmodell (siehe Abb. 2). Dieses stellt schon den ersten Schritt in der Modellierungskette dar [7]. Gerade dieser

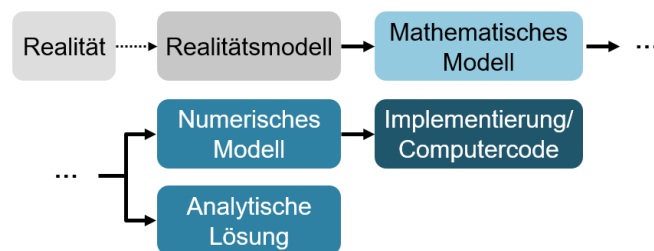


Abbildung 2: Phasen des Modellierungsprozess [7]

erste Schritt erfolgt allerdings in der Praxis mehr oder weniger bewusst. Hier ist es wesentlich zu erkennen, dass die Wahrnehmung von Realität subjektiv ist (und unter anderem durch unsere Prägung gefiltert wird) und in diesem Wahrnehmungsprozess daher ein inhärenter Modellbildungsprozess vonstatten geht. In Abb. 2 wird also als Realität das bezeichnet, was tatsächlich passiert und als Realitätsmodell, das was ein Beobachter von der Realität wahrnimmt. Dieses Realitätsmodell wird über ein Mathematisches Modell für die Analyse zugänglich gemacht. Eine analytische Lösung des mathematischen Modells ist häufig nur für generische Fragestellungen möglich, so dass in der Praxis das Mathematische Modell in der Regel in ein Numerisches Modell - die numerische Näherung des mathematischen Modells überführt wird. Als Imple-

mentierung bezeichnet man die Repräsentation des numerischen Modells im Computer. Jeder Teil dieses Modellierungsprozesses trägt also zur Prognosegüte - oder anders gesprochen zur Prognoseunsicherheit bei. Auf die ausführliche Diskussion dieser Details des Modellierungsprozesses und weiterer Aspekte, beispielsweise die notwendige Verifizierung (d.h. die Überprüfung, ob Numerik und Implementierung die Mathematik korrekt abbilden) und die Validierung (d.h. die Überprüfung, ob die Modellierung geeignet ist, die Frage zu beantworten) wird hier verzichtet und auf [7] verwiesen.

Zusammenfassend lässt sich in Bezug auf die Eigenschaften von Modellen also zunächst sagen:

- Modelle sind Abbilder (von Teilen) der Realität
- Sie sind subjektive Rezeption eines Beobachters
- Sie dienen der Kommunikation über die Realität

Bleibt die Frage, warum die Betrachtung des Modellierungsprozess an sich im Kontext des Akustikgerechten Entwickelns und Konstruierens von besonderer Relevanz ist?

Modelle können mehr oder weniger komplex sein. Damit geht in der Regel eine größere oder kleinere Vorhersagegenauigkeit einher. Die Kunst ist nun, ein Modell zu wählen, das abhängig von Anzahl und Detailgrad an Informationen, die bekannt sind oder anders gesagt, abhängig von der Phase im Produktentstehungsprozess „geeignet“ ist. Geeignet soll in diesem Zusammenhang bedeuten, dass es vor dem Hintergrund der bekannten Informationen eine größtmögliche Vorhersagegenauigkeit bei möglichst kleinem Aufwand ermöglicht (siehe Abb. 3). Anzumerken ist in diesem Zusammenhang natürlich noch, dass Modelle spezifisch sind. Sie beantworten eine Frage an die Realität, aber natürlich nicht jede Frage an die Realität (siehe Abb. 3). Es ist daher auch wichtig, die Frage sorgfältig und bewusst zu stellen. Beispielsweise kann in früheren Produktentstehungsphasen die Frage nach der Lage der ersten Eigenfrequenz des Systems die best geeignete sein, in späteren Phasen kann es beispielsweise die Frage nach der Abstrahlcharakteristik eines Bauteils sein.

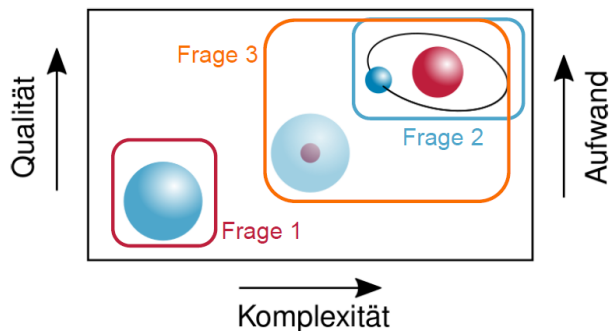


Abbildung 3: Qualitativer Zusammenhang zwischen Komplexität, Aufwand im Modellierungsprozess [7]

## Design to Acoustics

Eine Methodik, die die Integration dieses Paradigmenwechsels in den Produktentstehungsprozess unterstützt, ist das Design to Acoustics, das nach Rothe [8] und in Anlehnung an [3] wie folgt definiert werden kann.

Design to Acoustics:

*Wissenssystem mit Prinzipien, die auf akustische Schwerpunkte des Entwicklungsprozesses selbst gerichtet sind.*

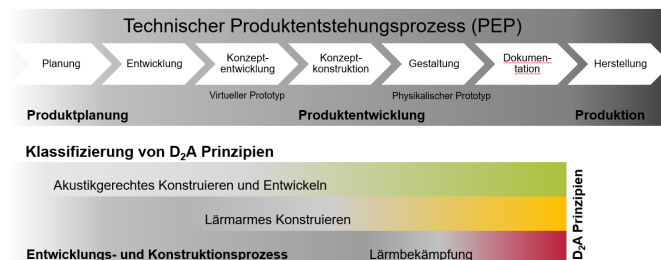


Abbildung 4: Klassifizierung von  $D_2A$  Prinzipien und ihre Positionierung im Produktentstehungsprozess [8]

In Abbildung 4 wird verdeutlicht, wie das akustikgerechte Konstruieren und Entwickeln nun alle Phasen der Produktentstehung umfasst und früher als das Lärmarme Konstruieren in den PEP eingegriffen, dessen Werkzeuge aber mit einbezieht. Ebenso sind weiterhin die Maßnahmen der Lärmbekämpfung integraler Bestandteil des Design to Acoustics - sollten akustische Probleme des Produktes zutage treten, denen durch Lärminderungsmaßnahmen begegnet werden muss.

## Technologiegestaltung und -bewertung

Zur Umsetzung des Akustikgerechten Konstruierens und Entwickelns sind Werkzeuge zur Technologiegestaltung und -bewertung notwendig. Insbesondere solche, die auch in frühen Phasen der Produktentstehung eingesetzt werden können und die auf zutreffenden Modellen, zuverlässigen Berechnungsmethoden und adäquaten Bewertungskriterien basieren.

## Technologiegestaltung durch passive Maßnahmen

In Bezug auf die *Technologiegestaltung* sind in diesem Zusammenhang insbesondere die passiven Maßnahmen<sup>3</sup> in der frühen Entwicklungsphase relevant. Bekannt ist, dass - allgemein gesprochen - das vibroakustische Systemverhalten maßgeblich durch die Steifigkeit, die Masse und die Dämpfung des Systems beeinflusst wird.

Innovative passive Maßnahmen sind geeignet, das vibroakustische (Bauteil-)verhalten jenseits widerstreitender Zielkonflikte zwischen Akustik und Leichtbau oder Steifigkeit und Masse zu beeinflussen. Unter diese innovativen Maßnahmen fallen beispielsweise gene-

<sup>3</sup>Als passiv sollen hier im Kontext der Maschinenakustik solche Maßnahmen bezeichnet werden, die im Gegensatz zu aktiven Maßnahmen ohne die Zufuhr von kinetischer Energie zur Ausnutzung des Prinzips der destruktiven Interferenz geeignet sind, das System akustisch zu beeinflussen - beispielsweise durch Dämpfung oder Dämmung.

rische poröse Materialien, Metamaterialien oder auch die Integration von sogenannten Akustischen Schwarzen Löchern.

Beim Design von *generischen porösen Materialien* ist das Ziel, die Herstellung von akustisch wirksamen Materialien mit maßgeschneiderten akustischen Eigenschaften zu ermöglichen. Voraussetzung hierfür ist die Kenntnis über den Einfluss der Mikrogeometrie auf die makroskopischen Parametern, mit denen das poröse oder poroelastische Material beschrieben wird (also zum Beispiel der Einfluss auf die sogenannten Biot-Parameter). Aktuelle Arbeiten wenden Maschinelles Lernen an, um hierfür die Biot-Parameter aus der Mikrogeometrie zu ermitteln [9].

Als *Metamaterialien* werden künstlich hergestellte Materialien bezeichnet, die durch besondere Gestaltung auf der Mikroebene auf der Makroebene Eigenschaften aufweisen, die ungewöhnlich sind und in der Regel in der Natur nicht beobachtet werden können. Beispiele für solche ungewöhnlichen Eigenschaften sind eine negative Querkontraktionszahl oder ein negativer Brechungsindex [10]. Es lassen sich mit diesen Metamaterialien Bauteile entwerfen, die besondere Dämpfungseigenschaften haben oder die Körperschallwellen gezielt leiten (beispielsweise in einen Bereich hoher Dämpfung oder zur Beeinflussung der Abstrahlcharakteristik des Systems).

Bei *Akustischen Schwarzen Löchern (ASL)* in der Vibroakustik wird die Schallausbreitungsgeschwindigkeit in einem Bauteil zum Beispiel durch eine Querschnittänderung gezielt beeinflusst, um lokal sehr hohe Schwingungsamplituden zu erzeugen. An diesen Orten hoher Amplituden kann durch das Aufbringen von Dämpfungsmaßnahmen wie zum Beispiel „Constraint Layer Damping“ dem System effizient Schallenergie entzogen werden. Aktuelle eigene Arbeiten befassen sich mit dem Struktur- und Materialdesign für diese gezielte Wellenleitung, die Integration von ASL in Laminat-, Sandwich- und additiv gefertigte Strukturen, sowie mit der Modellierung und der experimenteller Validierung von numerischen Simulationsmodellen [11].

### Technologiebewertung durch Modellierung und Simulation am Beispiel der Luftfahrt

In frühen Phasen der Produktentwicklung können mit sehr einfachen Modellen wie zum Beispiel dem Modell des Einmassenschwingers erste Abschätzungen der akustischen Systemeigenschaften vorgenommen werden. Alle komplexeren Systemeigenschaften, die auf den Wellencharakter des Schalls zurückzuführen sind, benötigen jedoch eine detaillierte Modellierung, bei der zunächst eine mathematische Beschreibung der mechanischen Wellenausbreitung in den einzelnen Bauteilen mittels Differentialgleichungen erforderlich ist. Für realistische Aufgabestellungen müssen in der Regel numerische Verfahren für die Lösung herangezogen werden. Beispielsweise wird bei der Finite-Elemente-Methode das Gebiet in eine endliche Anzahl von Elementen diskretisiert und die Lösung näherungsweise an Stützstellen - den sogenannten Knoten - berechnet. Zwischen den Knoten wird die Lösung durch Ansatzfunktionen approximiert.

Dies soll an einem Beispiel aus dem Bereich der Luftfahrt demonstriert und das Potential von wellenauflösenden Verfahren für die Bewertung neuer Technologien diskutiert werden. Nachhaltigkeit im Luftverkehr erfordert die Ausschöpfung aller wesentlichen Potenziale zur Reduzierung der Umweltauswirkungen der Luftfahrt. Dabei spielen nicht nur die Steigerung der Effizienz des Gesamtsystems Flugzeug und die Reduktion von gasförmigen, flüssigen und festen Emissionen eine Rolle, sondern auch die Minimierung der Schallimmissionen – sowohl in der Umgebung und als auch in der Fluggastkabine. Insbesondere für die lokale Akzeptanz der Luftfahrt wird der Schallschutz zukünftig eine herausgehobene Rolle spielen.

Um dieser Rolle gerecht zu werden, steht der Akustik in der Luftfahrt wie vielen anderen Bereichen des Ingenieurwesens der beschriebene Paradigmenwechsel bevor – von der Lärmbekämpfung hin zum Akustikgerechten Design. Voraussetzung für einen akustikgerechten Produktentstehungsprozess sind insbesondere Werkzeuge zur Technologiebewertung, die auf zutreffenden Modellen, zuverlässigen Berechnungsmethoden und adäquaten Bewertungskriterien basieren.

Es geht in der Luftfahrt beispielsweise um die Frage, wie sich die Verwendung von sogenannten UHBR-(Ultra-high-bypass ratio) Triebwerken auf den Lärm in der Kabine auswirkt. Hierfür wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 880 zum Hochauftrieb künftiger Verkehrsflugzeuge eine Berechnungskette für Kabinenakustikprognose basierend auf wellenauflösenden Verfahren bereitgestellt [12]. Hierzu werden verschiedene numerische Methoden kombiniert, um eine multidisziplinäre Modellierungskette zu erstellen, die zu einer Vorhersage des Kabinenlärms aufgrund von Triebwerkslärm bei zwei verschiedenen Triebwerkskonfigurationen führt. Ein Triebwerk mit sehr großem Nebenstromverhältnis (UHBR-Triebwerk) wird mit einem konventionellen Triebwerk auf der Grundlage eines vorläufigen Flugzeugentwurfs verglichen. Auf der Grundlage von Strömungsberechnungen im Reiseflug als Betriebspunkt wird der hybride Aeroakustik-Solver PIANO des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Kombination mit der Fast Random Particle Mesh-Methode verwendet, um die Druckschwankungen aufgrund des Strahlärms auf der Außenhaut des Rumpfes zu berechnen. Diese Belastungen werden auf ein Finite-Elemente-Modell aufgebracht, das die Struktur und das Fluid der Flugzeugkabine berücksichtigt und eine vibroakustische Analyse ermöglicht, um den Kabinenlärm vorherzusagen. Das vibroakustische Modell basiert auf Vorentwurfsdaten des Flugzeugvorentwurfswerkzeugs (PrADO) des Institut für Flugzeugbau und Leichtbau der TU Braunschweig. Diese Daten enthalten die Dimensionierung der Gesamtgröße, der Spanten, der Flugzeughaut, des Bodens, sowie des 'bulk-head' sowie die zugehörigen Materialdaten. Es wird demnach basierend auf einem wellenbasiertes mechanischen Modell eine Diskretisierung mit der Finiten Element Methode vorgenommen und mit dem in-house Forschungscode ePaSo des

Institut für Akustik der TU Braunschweig gelöst [14]. Kabine, Dämmung und Struktur werden dabei stark gekoppelt um Wechselwirkungen abbilden zu können.

Durch dieses Beispiel aus der Luftfahrt kann gezeigt werden, dass das Potential im „Design to Acoustics“ durch eine wellenauflösende Gesamtsystemsimulation gesteigert werden kann, da in sehr früher Entwurfsphase ein A-B-Vergleich von Technologien auf Basis nicht nur eines Einzahlwertes oder energetisch gemittelter Größen, sondern auf Basis des lokal aufgelösten Schallfeldes in einem Frequenzbereich bis 1000 Hz unter Berücksichtigung der Interaktionen zwischen den Komponenten möglich wird.

Allerdings geht dies mit großen Herausforderungen einher. Es sind verschiedene Gebiete zu koppeln, was einen hybriden Berechnungsansatz großer Komplexität mit sich bringt. Bei einer Technologiebewertung im mittleren Frequenzbereich der für den Hörschall besonders relevant ist, treten relativ kurze Wellenlängen auf. In Kombination mit den großen Systemdimensionen bei realistischen Aufgabenstellungen führt dies mit steigender Frequenz zu Finite-Element-Netzen mit mehreren 10 Millionen Freiheitsgraden<sup>4</sup>. Die erforderliche Kombination verschiedenartiger Gebiete erschwert darüber hinaus effiziente Parameterstudien. Damit wellenauflösende numerische Verfahren das Akustikgerechte Design zukünftig effizient unterstützen können, müssen Verfahren zur Modellordnungsreduktion mit dem Blick auf Parameterstudien, Unsicherheitsanalysen, Optimierungen bereitgestellt werden [13].

Die Entwicklung hybrider Methoden zur Reduktion großskaliger vibroakustischer Modelle ist aktueller Forschungsgegenstand. Beispielsweise werden in [15] sogenannte Surrogates und projektionsbasierte Methoden zur Modellordnungsreduktion parametrischer großer FE-Modelle angewandt. Eine Besonderheit des Ansatzes ist die Kombination der Methoden als fehlergesteuerten hybriden Ansatz für Parameterstudien.

Die Erforschung nachhaltiger Luftverkehrssysteme erfordert nicht nur die Entwicklung alternativer Treibstoffkonzepte und neuartiger Fahrzeugtechnologien, sondern auch die Entwicklung von Instrumenten und Kriterien für eine angemessene (Lärm-)Bewertung. In Bezug auf die Umweltrelevanz spielt im Vergleich zum Kabinenlärm der Umgebungslärm eine herausgehobene Rolle. Hier ist eine der aktuellen Herausforderungen, dass die Umgebungslärmprognose idealerweise für langfristige Szenarien erfolgt und die Modellierung großer Flugverkehrsszenarien und Berechnung des Lärms am Boden besonders aufwendig ist. In [16] wurde gezeigt, dass ein Multi-Scale, Multi-Fidelity-Ansatz diese Vorhersage leisten kann. In diesem Ansatz wurde eine dreistufige Berechnungskette bestehend aus dem Luftfahrzeug, der Ausbreitung und schließlich der Einbettung in das Szenario herangezogen, um die die unterschiedlichen Domänen zu koppeln.

<sup>4</sup>In Bezug auf die Diskretisierung muss sichergestellt werden, dass das (Körper-)Schallfeld ausreichend genau abgetastet wird. Mit steigender Frequenz und damit sinkender Wellenlänge erhöht sich daher die Anzahl der erforderlichen Knoten, was großen Systemmatrizen und damit einem großen Berechnungsaufwand führt.

Im Forschungskontext des Exzellenzclusters SE<sup>2</sup>A 2163 'Sustainable and Energy-Efficient Aviation' ist über diese Prognose hinaus auch die psychoakustische Bewertung des Lärms zukünftiger, im Rahmen des Excellence-Clusters entwickelter, Passagierluftfahrzeuge von besonderem Interesse. Denn die in der Regel verwendeten Metriken (insbesondere die auf dem A-bewerteten Schalldruckpegel basierenden Größen) sind auf eine sehr grobe Beschreibung der menschlichen Wahrnehmung von Lärm beschränkt. Daher kann die Verwendung von Bewertungskriterien, die auf den Mechanismen des menschlichen Gehörs basieren, dazu beitragen, neue Flugzeuge mit geringer Lärmbelastigung und gewünschten akustischen Eigenschaften zu entwerfen. Aktuelle Arbeiten beschäftigen sich daher mit der Implementierung und Anwendung eines Bewertungswerkzeugs, das in der Lage ist, schnelle Bewertungen von Fluglärm auf der Grundlage eines psychoakustisch basierten Belästigungsmodells unter Verwendung von Vorentwurfsdaten zu liefern [17].

## Fazit

Ein Paradigmenwechsel hin zum Akustikgerechten Design ist möglich. Er erfordert die Sensibilisierung für den Themenkomplex Lärm und darüber hinaus ein Bewusstsein für die Gestaltungsmöglichkeiten der akustischen Eigenschaften. Eine Konstruktionsmethodik im Sinne eines Design to Acoustics bildet den Rahmen für ein Akustikgerechtes Design und seine Integration ausgehend von den frühen Phasen der Produktentwicklung im gesamten Produktentstehungsprozess. Die gezielte Integration von akustischer Funktion und die Gestaltung der akustischen Eigenschaften von Produkten erfordert Werkzeuge zur Technologiegestaltung, die auf zutreffenden Modellen, zuverlässigen Berechnungsmethoden und adäquaten Bewertungskriterien (unter Berücksichtigung der Wahrnehmung durch den Menschen) basieren.

Am Beispiel von Anwendungen in der Luftfahrt wurden verschiedene dieser Voraussetzungen für das akustikgerechte Konstruieren und Entwickeln diskutiert. Um den Paradigmenwechsel vollständig zu vollziehen, sind vielfältige und umfangreiche weitere Arbeiten notwendig. Beispielsweise in Bezug auf die Effizienz von Numerischen Berechnungsverfahren, die Bereitstellung von validierten Metriken zu Bewertung der akustischen Qualität von Produkten sowie in Bezug auf die Mehrzieloptimierung mit Blick auf die Relevanz vielfältiger Anforderungen an Produkte in der Praxis.

## Literatur

- [1] Meinel, C. Leifer, L (Hrsg.): Design Thinking Research. Springer-Verlag. 2019
- [2] Scharmer, C.O.: Theorie U - Von der Zukunft her führen. Carl-Auer 2009.
- [3] Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013
- [4] DIN EN ISO 11688-1:2009-11 Akustik - Richtlinien für die Konstruktion lärmarmen Maschi-

- nen und Geräte - Teil 1: Planung (ISO/TR 11688-1:1995); Deutsche Fassung EN ISO 11688-1:2009 und DIN EN ISO 11688-2:2001-03, DOI: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-11688-1/121383872> Akustik - Richtlinien für die Gestaltung lärmarmen Maschinen und Geräte - Teil 2: Einführung in die Physik der Lärminderung durch konstruktive Maßnahmen (ISO/TR 11688-2:1998); Deutsche Fassung EN ISO 11688-2:2000, DOI: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-11688-2/24488347>
- [5] Duddeck, H.: *Jenseits und diesseits von Technik. Texte und Reden 1962 - 2002*, Braunschweig, 2002.
- [6] Langer, S.C.; Böhrnsen, J.-U.: *Innovationsschübe und die Verantwortung der Lehrenden in den Ingenieurwissenschaften*. In: Hieber, L.; Kammeyer, H.-U. (Hrsg.): *Verantwortung von Ingenieurinnen und Ingenieuren*, Springer VS, Wiesbaden 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-05530-1>
- [7] Ring, T.: *Beschleunigung der Unsicherheitsquantifizierung in der Akustik mittels eines Multi Modell Verfahrens*. Dissertation, TU Braunschweig, DOI: <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202003031456-0>, 2019.
- [8] Rothe, S.: *Optimal placement of passive acoustic measures in early design phases*. Interner Bericht des Instituts für Akustik. Braunschweig, 2021.
- [9] Kuschmitz, S.; Ring, T.P.; Watschke, H.; Langer, S.C.; Vietor, T.: *Additive Manufacturing of Porous Sound Absorbers — A Machine-Learning Approach*. *Materials*, Volume 14(1747), 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14071747>
- [10] Nojavan, A.; Langer, S.C.: *Frequency Limits of Locally Resonant Acoustic Metamaterials*. DAGA 2019, Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Akustik, Rostock 2019.
- [11] Rothe, S.; Blech, C.; Watschke, H.; Vietor, T.; Langer, S.C.: *Layer-effect by additive manufacturing of acoustic black holes* *Proceedings of inter-noise 2019*, Madrid, 2019.
- [12] Blech, C.; Appel, C.K.; Ewert, R. ; Delfs, J.W.; Langer S.C.: *Wave-resolving Numerical Prediction of Passenger Cabin Noise Under Realistic Loading* In: Radespiel, R., Semaan, R. (Hrsg.): *Fundamentals of High Lift for Future Civil Aircraft: Papers Contributed to the Final Symposium of the Collaborative Research Center 880 December 17-18, Braunschweig, Germany 2019*. Springer, 2020. DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-030-52429-6>
- [13] Guruprasad, S. M.; Ram, P. R. M.; Blech, C.; Römer, U.; Langer, S. C.: *Aircraft Cabin Noise Prediction Under Uncertainty* In: Radespiel, R., Semaan, R.: *Fundamentals of High Lift for Future Civil Aircraft: Papers Contributed to the Final Symposium of the Collaborative Research Center 880 December 17-18, Braunschweig, Germany 2019*. Springer, 2020. DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-030-52429-6>
- [14] Blech, C.; Appel, C.K.; Ewert, R.; Delfs, J.W.; Langer S.C.: *Numerical prediction of passenger cabin noise due to jet noise by an ultra-high-bypass ratio engine*. *Journal of Sound and Vibration*, Volume 464(1), (2020), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.114960>
- [15] Römer, U.; Bollhöfer, M.; Sreekumar, H.K.; Blech, C.; Langer, S.C.: *An adaptive sparse grid rational Arnoldi method for uncertainty quantification of dynamical systems in the frequency domain*. *Int J Numer Methods Eng.*, Volume 122(20), pp. 5487-5511 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1002/nme.6761>
- [16] Delfs, J.; Bertsch, L.; Zellmann, C.; Rossian, L.; Kian Far, E.; Ring, T.; Langer, S.C.: *Aircraft Noise Assessment—From Single Components to Large Scenarios* *Energies* 11 (2), 429, (2018), DOI: <https://doi.org/10.3390/en11020429>
- [17] Felix Greco, G.; Bertsch, L.; Ring, T.P.; Langer, S.C.: *Sound quality assessment of a medium-range aircraft with enhanced fan-noise shielding design*. *CEAS Aeronaut Journal*, 12, pp. 481–493 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00515-9>