

## Validierung eines virtualSEA Modells eines Flugzeugseitenwandausschnitts

Patrick Cordes<sup>1</sup>, Yannick Hoven<sup>1</sup>, Pankaj Joshi<sup>1</sup>, Benedikt Plaumann<sup>2</sup>, Tjerk Tews<sup>3</sup>, Jan Hansen<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung GmbH, 21129 Hamburg, E-Mail: patrick.cordes@zal.aero

<sup>2</sup>HAW Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 20099 Hamburg

<sup>3</sup>Lufthansa Technik AG, 22335 Hamburg

### Einleitung

Akustische Eigenschaften von Produkten erhalten zunehmend mehr Beachtung. Dies begründet sich einerseits in einem gestiegenen Bewusstsein über die negativen Einflüsse von zu hoher Lärmbelastung als auch dadurch, dass die akustischen Eigenschaften mittlerweile einen großen Einfluss auf die vom Kunden empfundene Qualität des Produktes haben können. Letzteres kann insbesondere bei hochpreisigen Produkten ausschlaggebend sein. Eine frühzeitige Abschätzung der zu erwartenden akustischen Eigenschaften im Entwicklungsprozess ist somit ein wichtiges Werkzeug. Da in frühen Entwicklungsphasen keine Prototypen zu Verfügung stehen, aber bereits signifikante Entscheidungen in dieser Phase getroffen werden müssen, deren spätere Änderung meist mit hohen zusätzlichen Kosten verbunden ist, gewinnt die numerische Simulation der akustischen Eigenschaften stetig an Relevanz.

Basierend auf dem interessierenden Frequenzbereich ist der Einsatz von verschiedenen numerischen Modellierungsansätzen etabliert. So zählt zum Beispiel die Finite Elemente Methode (FEM) zum heutigen Standard mit einer Vielzahl von kommerziellen Softwaretools und bietet im unteren Frequenzbereich die Möglichkeit akustische Phänomene abzubilden. Im höheren Frequenzbereich wird häufig auf die Statistische Energie Analyse (SEA) zurückgegriffen. Diese Methode bietet zwar einen niedrigeren Informationsgehalt als die FEM ist aber im hohen Frequenzbereich in der Lage die Informationen innerhalb kommerziell handhabbaren Rechenaufwänden zu liefern. Im vorliegenden Beitrag soll eine Variante der SEA, die virtualSEA (vSEA) des Softwaretools Hexagon ACTRAN®, genutzt werden, um den Schalldurchgang durch eine vereinfachte Flugzeugseitenwand vorherzusagen. Ziel ist dieses Tool perspektivisch zur Unterstützung bei der Entscheidungsfindung im Entwurfsprozess von VIP-Flugzeugkabinen einzusetzen. Hierbei wird der Speech Interference Level 3 (SIL3) spezifiziert, der das arithmetische Mittel der Oktavbänder 1kHz, 2kHz und 4kHz ist. Die simulativen Vorhersagen der Komponenteneinflüsse auf den SIL3 müssen somit eine Gültigkeit bis zu einer Frequenz von 5680Hz aufweisen.

### Theoretische Grundlagen

Die SEA betrachtet allgemein die Energie und die Energieflüssen zwischen Subsystemen. Bei Subsystemen handelt es sich um Segmente oder gesamte einzelne Komponenten. Bei der Wahl der Subsysteme ist entscheidend, dass diese eine möglichst hohe Modendichte aufweisen. Diese Anforderung ergibt sich aus der Herleitung der SEA-Gleichung, in der eine Zeit- und Frequenzmittelung

durchgeführt wird. Die berechnete Variable ist die Energie in den Subsystemen. Die Änderung der Energie kann über Anregung und Dissipation innerhalb eines Subsystems oder durch die Abgabe oder Annahme von Energie aus anderen Subsystemen erfolgen. Die Dissipations- und Kopplungsterme werden durch Verlust- und Kopplungsfaktoren beschrieben [1]. Eine schematische Darstellung der SEA ist in Abbildung 1 dargestellt.

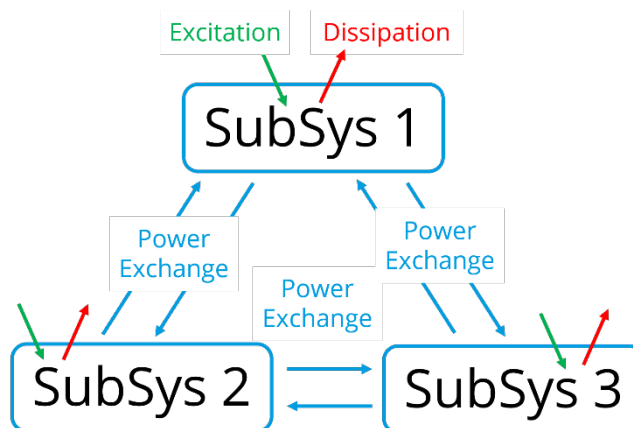


Abbildung 1: Schematische Darstellung der SEA

Durch die Bestimmung der Verlust- und Kopplungsfaktoren unterscheiden sich die unterschiedlichen Varianten der SEA. Bei der analytischen SEA werden die Faktoren durch analytische Ansätze ermittelt, weshalb hierfür zum einen ein hohes Expertenwissen notwendig ist und zum anderen nur stark vereinfachte Systeme betrachtet werden können. Bei der experimentellen SEA werden die Faktoren experimentell bestimmt, was jedoch das Vorhandensein eines Prototyps bedingt und somit erst in einer späteren Phase der Produktentwicklung möglich ist. Bei der vSEA handelt es sich um eine Variante, bei der die Faktoren auf der Basis eines FEM-Modells ermittelt werden. Vorteil ist, dass dies bereits auf dem CAD-Entwurf aufgebaut werden kann und mit dem Modell auch der untere Frequenzbereich abgedeckt werden kann. Der Nachteil ist jedoch, dass die vSEA die Moden bis zur höchsten abzubildenden Frequenz benötigt und diese aus dem FEM-Modell extrahiert werden müssen. Somit geht die Unabhängigkeit von der Diskretisierung bei hohen Frequenzen bei der vSEA verloren [1]. Die Anforderung an die Diskretisierungsgüte sind jedoch niedriger, als dies für die FEM notwendig wäre.

### Beschreibung des Messaufbaus

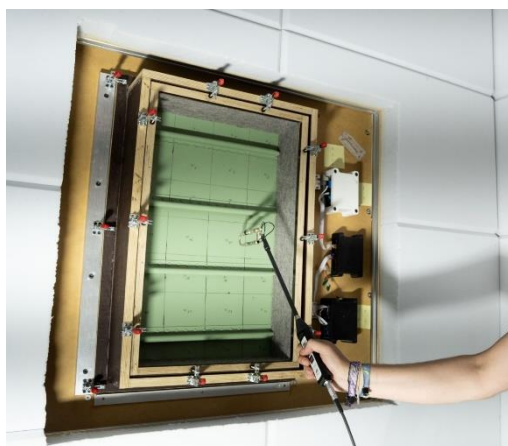
Im Folgenden sollen die Ergebnisse eines vSEA-Modells eines vereinfachten Flugzeugseitenwandaufbaus mit Messergebnissen gegenübergestellt werden. Daher wird zunächst kurz der genutzte Messaufbau beschrieben.

Ziel ist die Bestimmung des Schalldurchgangsverlust (engl.: Transmission Loss (TL)). Hierzu wird eine Alphakammer zur Erzeugung eines diffusen Schallfelds verwendet. Die Alphakammer ist über ein Fenster mit einem semi-anechoischen Raum verbunden. Innerhalb des Fensters wird das zu untersuchende Objekt eingespannt. Auf der diffusen Schallfeldseite wird der Schalldruck gemessen und auf der Abstrahlseite wird mit einer p-p Intensitätssonde die abgestrahlte Schalleistung bestimmt. Die Abtastung der Abstrahlseite erfolgt gemäß ISO 9614-1 [2] in diskreten Segmenten. Die Berechnung des TL erfolgt anschließend nach

$$TL = L_p - 6 - L_w,$$

wobei  $L_p$  den Schalldruckpegel des Diffusfelds und  $L_w$  die abgestrahlte Schalleistung der Probe beschreiben.

Ein Bild der Abstrahlseite des Messaufbaus ist in Abbildung 2 gezeigt. Hierin ist auch der Halter zu sehen, der den sukzessiven Aufbau einer Flugzeugseitenwand erlaubt. Gezeigt ist die Messung der Primärstruktur. Durch den Halter wird daraufhin anschließend noch Glaswolle und ein Sandwichpanel hinzugefügt. Die Größe der abstrahlenden Fläche beträgt 44cm x 70cm (Breite x Höhe). Dieses Fenster ist im Vergleich zu herkömmlichen TL-Fensterprüfständen kleiner. Der Grund hierfür ist, dass es sich sowohl bei der Alphakammer als auch beim semi-anechoischen Raum um mobile Testaufbauten handelt. Die Größe des Fensters ist daher die Kehrseite eines niedrigen Investitionsaufwands verglichen mit klassischen TL-Prüfständen. Insbesondere, wenn mit einbezogen wird, dass im Bereich der Luftfahrt häufig mindestens zwei Spantfelder betrachtet werden. Ein weiteres Ziel der Autoren ist es daher, zukünftig die Vorhersagegenauigkeit von Messungen und Simulationen im kleinen Maßstab zu bestimmen und die Vergleichbarkeit zu klassischen Prüfständen und Testaufbauten im vollen Flugzeugmaßstab zu untersuchen.



**Abbildung 2:** Messung der abgestrahlten Schalleistung mittels einer p-p Intensitätssonde

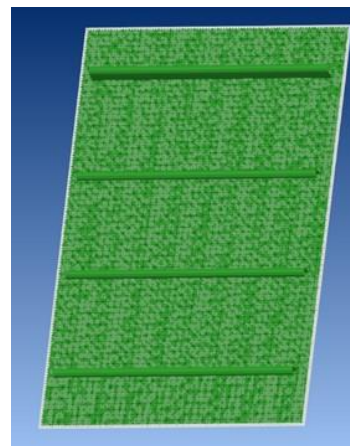
## Methodenvergleich an der Primärstruktur

Nachfolgend werden zunächst nur die Ergebnisse der TL-Messung der Primärstruktur mit den Simulationsergebnissen verglichen. Hierbei werden zwei Simulationsvarianten genutzt. Die erste Simulation ist ein FEM-Modell der Primärstruktur welches eine ausreichende Diskretisierung aufweist, um Frequenzen bis 5000Hz aufzulösen. Zusätzlich

wird ein vSEA-Modell derselben Struktur betrachtet, worin die gesamte Struktur als ein Subsystem definiert wird. Es wird ebenfalls das Massegesetz einer einfachen Platte betrachtet, um einen Anhaltspunkt der Ergebnisqualität zu bieten. Das Massegesetz lautet

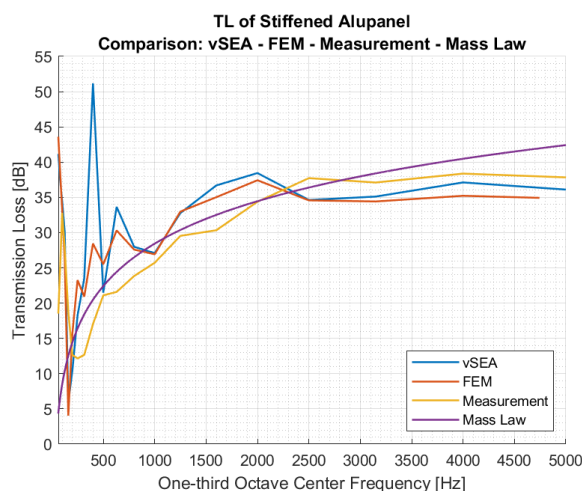
$$TL = 20 \log(fm'') - 47.3 \text{ dB},$$

worin  $f$  die Frequenz und  $m''$  die flächenbezogene Masse der Platte beschreibt. Anzumerken hierbei ist, dass die Versteifung der Platte durch die Stringer im Massegesetz keinen Einfluss haben. Die Masse der Stringer wird jedoch mit einbezogen. Abbildung 3 zeigt das FEM-Modell, worin auch die versteifenden Stringer zu erkennen sind.



**Abbildung 3:** Abbildung des FEM-Modells der Primärstruktur

Nachfolgend werden die bestimmten Werte des TL, die durch die unterschiedlichen Verfahren ermittelt wurden, gegenübergestellt. Abbildung 4 zeigt den TL der Primärstruktur aufgetragen über die Frequenz.



**Abbildung 4:** TL der Primärstruktur basierend auf vier unterschiedlichen Bestimmungswegen

Der Vergleich zeigt, dass die beiden simulativen Ansätze ähnliche Ergebnisse im Frequenzbereich oberhalb von ca. 800Hz liefern und diese hier auch in der qualitativ gut zu den Messergebnissen passen. Im Frequenzbereich unterhalb von 800Hz sind der Trend von vSEA und FEM ähnlich, jedoch überschätzt die vSEA hier die Peaks deutlich. Dies ist erwartbar, da hier die Modendichte der Struktur noch nicht ausreichend hoch ist und somit die Gültigkeit der vSEA

eingeschränkt ist. Im selben Frequenzbereich ist der Unterschied zwischen FEM und Messergebnis ebenfalls größer. Dies kann zum Beispiel über eine nicht korrekt gewählte Dämpfung im Materialmodell der FEM begründet sein. Die Überschätzung der Messergebnisse durch die Simulation legt eine zu hohe Materialdämpfung nahe. In weiterführenden Untersuchungen ist geplant, diese Vermutung zu überprüfen und die Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation durch ein Modelupdating zu verbessern.

Unter Betrachtung der Motivation zur Vorhersage des SIL3, die Ergebnisse im Frequenzbereich von 710Hz bis 5680Hz erfordert, ist es vielversprechend, dass die Ergebnisse beider Simulationsverfahren in diesem Bereich gut übereinstimmen. Der Mehrwert der vSEA wird deutlich bei der Betrachtung der Rechenzeiten. Die FEM-Simulation hatte eine Rechendauern von ca. 3 Stunden auf 20 Prozessoren mit einer Frequenzauflösung von 2Hz. Die vSEA-Simulation hingegen benötigt in etwa 10 Minuten auf einem Prozessor auf derselben Maschine.

### Betrachtung des vereinfachten Flugzeugseitenwandaufbaus

Nachfolgend werden die Ergebnisse der vSEA den Messergebnissen gegenübergestellt. Hierbei werden verschiedene Konfigurationen des vereinfachten Seitenwandaufbaus betrachtet. Diese Varianten sind nachfolgend aufgelistet:

- Primärstruktur
- Primärstruktur + Sandwich Panel (SWP)
- Primärstruktur + 1x Glaswolle (GW) + SWP
- Primärstruktur + 2x GW + SWP

Zunächst werden die Messergebnisse der unterschiedlichen Seitenwandkonfiguration in Abbildung 5 dargestellt. Hierin ist zunächst der Einfluss des Doppelwandaufbaus auf den TL deutlich zu erkennen. Eine gute Wirksamkeit der GW wird ab einer Frequenz von ca. 800Hz erwartet, welches sich ebenfalls in den Ergebnissen wiederfinden lässt.



Abbildung 5: TL der Seitenwandkonfigurationen basierend auf den Messergebnissen

Der sichtbare Einbruch der GW-Wirksamkeit im Bereich zwischen 2kHz und 3kHz erfordert weitere Untersuchungen. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der vSEA-Simulationen. Hierin wurden die einzelnen Komponenten des Aufbaus jeweils als ein Subsystem betrachtet. Im Modell wird nur die Kopplung der Subsysteme über den Luftschallpfad betrachtet und kein Körperschallpfad mit einbezogen. Die Betrachtung der Körperschallbrücke durch den Probenhalter im Experiment ist für zukünftige Iterationen geplant, wie beispielsweise in [3] umgesetzt. Die Ergebnisse der vSEA sind für die übrigen Konfiguration aber einer Frequenz von 800Hz dargestellt. Dies ist dadurch begründet, dass aufgrund der geringen Tiefe des Luftvolumens zwischen der Primärstruktur und dem SWP die ersten Moden in Richtung der Schallübertragung erst bei Frequenzen oberhalb von 1000Hz auftreten und somit innerhalb der niedrigen betrachteten Terzbänder die Modendichte gering ausfällt. Die in den Messergebnissen beobachteten Effekte zeigen sich auch in den Simulationsergebnissen. Der Effekt der Doppelwand ist im oberen Frequenzbereich deutlich ausgeprägt. Ebenfalls der GW-Effekt ist ersichtlich. Der Einbruch sowohl beim einfachen Doppelwandaufbau und bei doppelt GW um 1500Hz bedarf weiterer Untersuchungen.

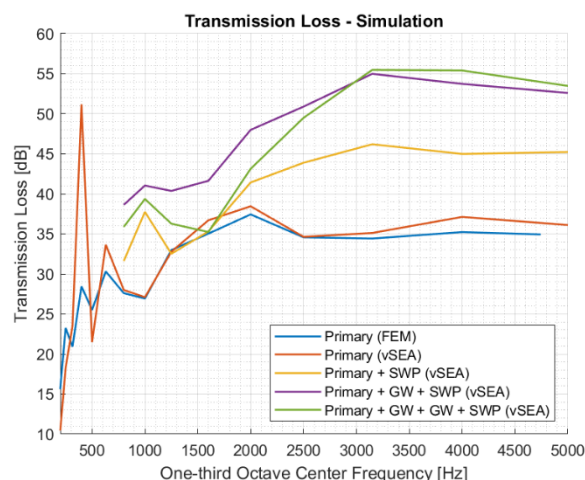
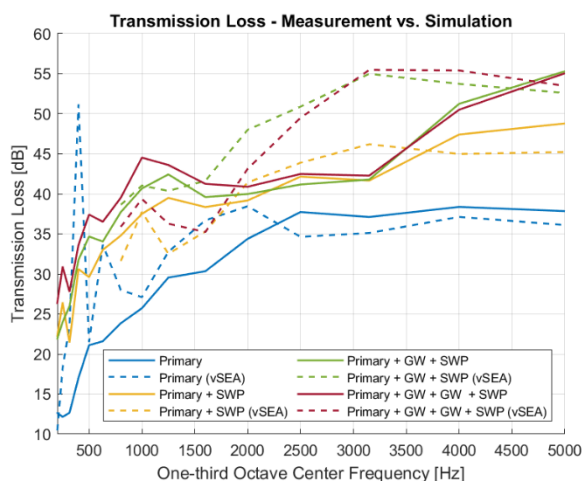


Abbildung 6: TL der Seitenwandkonfigurationen basierend auf der vSEA

In Abbildung 7 sind die Ergebnisse der Messung und Simulation gegenübergestellt. Die Unterschiede zwischen Messung und Simulation sind aktuell noch erheblich. Verschiedene Erklärungsansätze hierzu finden sich in den vorigen Abschnitten. Dennoch liegen alle Ergebnisse innerhalb der zu erwartenden Größenordnung, die aus der Literatur bekannt ist.



**Abbildung 7:** Vergleich der TL basierend auf der Messung und der vSEA für die Seitenwandkonfigurationen

## Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde die Nutzung der vSEA als schnelles Berechnungstool im frühen Stadium eines Entwicklungszyklus motiviert und am Beispiel verschiedener Konfigurationen mit steigender Komplexität eines vereinfachten Flugzeugseitenwandaufbaus erprobt. Zusätzlich wurden Messergebnisse der gleichen Aufbauten auf einem kleinen TL-Fensterprüfstand präsentiert.

Die Messmethode liefert für die Primärstruktur vergleichbare Ergebnisse mit der FEM und der vSEA. Eine Verbesserung der Übereinstimmung ist zukünftig noch durch die Abstimmung der Modellparameter auf die Messergebnisse erwartbar. Beim Vergleich der notwendigen Rechenzeiten zwischen FEM und vSEA zeigt sich der Vorteil der vSEA, wenn diese verlässliche Ergebnisse liefert.

Sowohl die Messergebnisse als auch die Simulationsergebnisse zeigen die erwartbaren physikalischen Phänomene bei den untersuchten Konfigurationen, wie beispielsweise den Einfluss der Doppelwand und der Glaswolle. Jedoch zeigen beide Verfahren ebenfalls Effekte in unterschiedlichen Frequenzbändern, die noch weiterer Untersuchungen bedürfen. Nennenswert hierbei sind der Einbruch der Wirksamkeit der Glaswolle in den Messungen im mittleren Frequenzbereich. In der Simulation ist zu klären, weshalb das Hinzufügen eines zweiten Glaswollpakets den TL im Frequenzbereich um 1500Hz senkt.

Angestrebte zukünftige Untersuchungen zur Verbesserung der Validationsergebnisse sind ein Modelupdate des zugrundeliegenden FEM-Modells auf Basis einer Modalanalyse des eingespannten Panels sowie eine vertiefende Betrachtung existierender Strukturpfade durch die Halterung der Probenkörper im Messaufbau sowohl experimentell als auch die Abbildung dieser innerhalb des vSEA-Modells. Anschließend wird eine Erweiterung des numerischen Modells auf größere Maßstäbe angestrebt und eine Validierung hiervon durch messtechnische Untersuchungen an einem Demonstrator vorgenommen. Hierbei ist auch ein Vergleich mit den Ergebnissen einer vorangegangenen Messkampagne geplant die in [4] veröffentlicht wurden.

## Danksagung

Die gezeigten Inhalte wurden innerhalb eines Verbundprojektes des zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo VI-2) erarbeitet. Dieses Projekt ist gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

## Literatur

- [1] Peiffer, A. (2022). *Vibroacoustic Simulation – An Introduction to Statistical Energy Analysis and Hybrid Methods*. John Wiley & Sons, Inc.
- [2] DIN EN ISO 9614-1:2009-11 Akustik - Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräuschquellen aus Schallintensitätsmessungen - Teil 1: Messungen an diskreten Punkten
- [3] Brühl, S., Bremner, P., Roeder, A. & Grünwald, M. (2000). *Transmission Loss of Double Walls: SEA Modelization versus Experiment*. SFA – InterNoise 2000, Nizza, Frankreich.
- [4] Plaumann, B., Ziegner, T., Tews, T., & Hansen, J. (2023). *Untersuchung und Optimierung der Schallpfade in die VIP-Kabine*. In *Fortschritte der Akustik* (Vol. 49, pp. 557-560). Deutsche Gesellschaft für Akustik eV (DEGA)