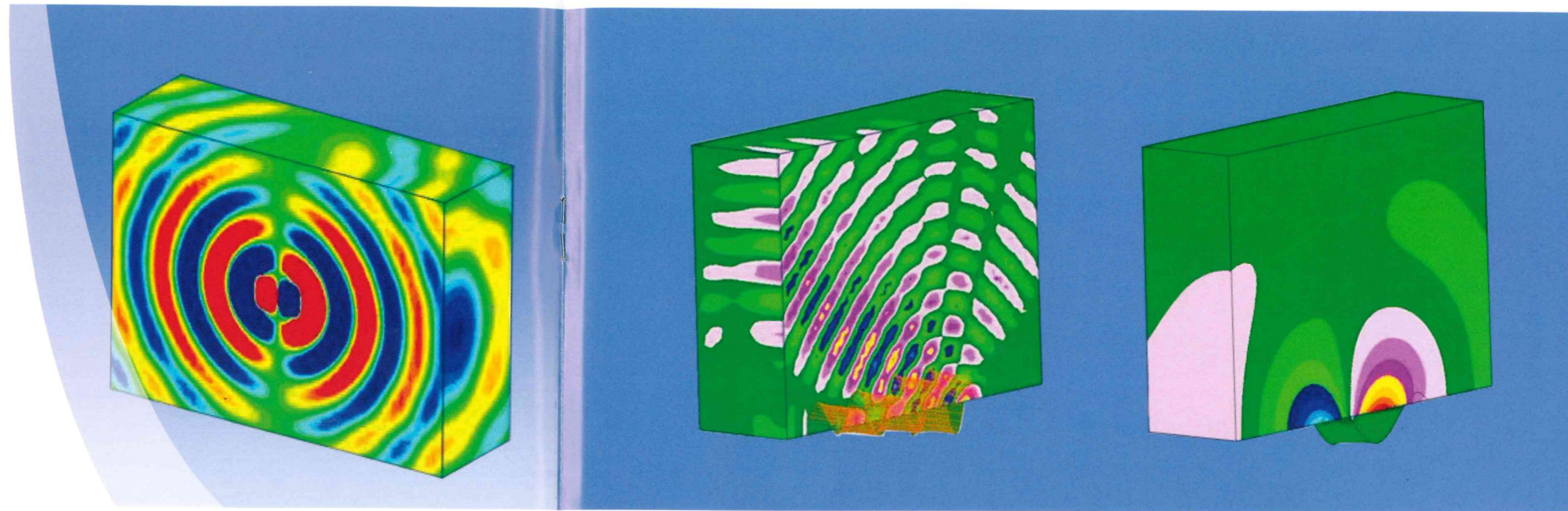


# Vibroakustische Simulation für den Kabinenkomfort



**M**oderne Passagierflugzeuge sollen leistungsfähig und effizient, aber auch komfortabel sein. Zum akustischen Komfort einer Flugzeugkabine zählt die Einhaltung vorgeschriebener Geräuschpegelhöchstwerte ebenso wie die Unterdrückung störender Einzelgeräusche. Bei früheren Flugzeugtypen waren die Konstrukteure für diese Zielstellungen primär auf ihre Erfahrung und physikalische Messungen angewiesen. Im Rahmen der virtuellen Produktentwicklung steht heute spezielle Software auch für die Simulation akustischer Effekte zur Verfügung. Anders als in der Automobilindustrie gibt es im Flugzeugbau keine Prototypenphase, sodass numerische Experimente an virtuellen Prototypen eine wichtige Komponente des Entwicklungsprozesses darstellen.

Flugzeugkabinen sind Leichtbaukonstruktionen. Wie in Automobilkabinen kann daher ein Teil des Innengeräusches auf die Übertragung von Schwingungen dünnwandiger Blechfelder zurückgeführt werden. Hinsichtlich der Dimensionen, insbesondere des für Akustiker wichtigen Verhältnisses der Konstruktionslänge zur akustischen Wellenlänge, sind die Herausforderungen an die Flugzeugentwickler aber eher mit der Bauphysik oder dem Schiffbau zu vergleichen.

Art und Intensität des Innengeräusches in der Kabine hängen wesentlich von den Schallquellen ab, die nach äußeren und inneren Quellen unterschieden werden. Die Luftschwingungen aus Antrieb und Umströmung werden an der Außenhaut aufgenommen und durch deren Schwingungen nach

innen übertragen. Zu den inneren Schallquellen zählen z. B. die Strahler der Klimaanlage. Zudem werden Aggregatenschwingungen über Körperschallpfade in die Kabine übertragen. Die verschiedenen Quellen strahlen sowohl breitbandige stochastische als auch schmalbandige tonale Geräusche ab.

Zur Simulation der konstruktiv relevanten vibroakustischen Effekte sind je nach Anforderungen und Zielgrößen verschiedene numerische Verfahren gebräuchlich. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist vor allem im nieder- bis mittelfrequenten Bereich und an Teilmodellen mit hoher Detailtreue, wie z. B. der Durchschallung typischer Wandsegmente, einsetzbar. Hochfrequente Effekte in der Gesamtkabine werden dagegen mit der statistischen Energieanalyse (SEA) oder der Ray-Tracing-Methode modelliert.

### Vibroakustische Simulation mit FE-Modellen

Für eine vollständige vibroakustische Simulation werden FE-Modelle der Kabine und des akustischen Mediums (Luft) benötigt. Bei der Vernetzung ist eine frequenzabhängige Netzfeinheit zur ausreichenden Auflösung der relevanten Wellenlängen zu gewährleisten. Kleine Amplituden und lineares Materialverhalten vorausgesetzt, kann das mathematische Modell der numerischen Berechnung als gekoppeltes System linearer Gleichungen in folgender Form dargestellt werden:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{K}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{K}_f \end{pmatrix} - i\omega \begin{pmatrix} \mathbf{C}_s & -\mathbf{A} \\ -\mathbf{A}^T & -\mathbf{C}_f \end{pmatrix} - \omega^2 \begin{pmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{M}_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{r}_s \\ \mathbf{r}_f \end{pmatrix}$$

Darin bezeichnen  $K$ ,  $C$  und  $M$  die Steifigkeits-, Dämpfungs- und Massenmatrizen sowie  $A$  die Fluid-Struktur-Koppelmatrix. Die Vektoren  $v$  und  $p$  enthalten die gesuchten Knotenwerte für Strukturschnellen und Schalldruck. Auf der rechten Seite bezeichnet  $r$  die komplexen Amplituden von Schallquellen bei harmonischer Erregung mit einer Betriebsfrequenz  $\omega$ . Die Indizes  $s$  und  $f$  stehen für „Struktur“ bzw. „Fluid“, der Faktor  $i$  bezeichnet die imaginäre Einheit und das hochgestellte  $T$  die Matrix-Transposition.

Schallquellen können sowohl in der Luft (als Quellstärke eines Strahlers) als auch auf der Struktur (als Kraft- oder Weganregung) aufgebracht werden. Die Bilder illustrieren beispiel-

haft die FE-Simulation von Luftschall bzw. vibroakustischer Abstrahlung: das Bild auf S. 22 zeigt die Simulation des Dipoleffekts bei gegenphasiger Wirkung zweier benachbarter Luftschallquellen, die Bilder oben den Koinzidenzeffekt bei der Abstrahlung von BiegeWellen einer schwingenden Platte. Während oben rechts der akustische Kurzschluss unterhalb der Koinzidenzfrequenz zu erkennen ist, zeigt das Bild oben links die hochfrequente Abstrahlung ebener Wellen. Diese Beispiele können analytisch verifiziert werden, wobei die analytischen Lösungen eine reflexionsfreie Abstrahlung der Schallwellen „ins Unendliche“, beinhalten. Diese Abstrahlbedingung wird in der FEM näherungsweise realisiert.

### Methodische Untersuchungen

Im Forschungsschwerpunkt Dynamik und Interaktion von Fluiden und Strukturen (DISS) werden in Kooperation mit der Gruppe Interior and Near Field Noise der Airbus Operations GmbH mehrere thematisch zusammenhängende Untersuchungen zur Effizienz und Zuverlässigkeit der FEM für die niederfrequente Schwingungs- und Schallsimulation in Flugzeugkabinen durchgeführt. Zur Validierung steht bei Airbus ein skaliertes Modell einer Flugzeugstruktur zur Verfügung. Die Berechnungen und Messungen werden am skalierten Modell als auch an großskaligen Flugzeugstrukturen ausgeführt. Der besondere Fokus liegt auf vibro- und aeroakustischen Simulationen für neue Antriebskonzepte. Ausgewählte Ergebnisse wurden auf Fachkonferenzen publiziert. Ein herzlicher Dank für die enge und konstruktive Zusammenarbeit

geht an Dr. Ralf Kemme und Dipl.-Ing. Martin Wandel.



Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Ihlenburg

frank.ihlenburg@haw-hamburg.de