



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Mohamed Farid Nayel

Entwicklung eines parametrischen Netzgenerators für die Simulation der Schalltransmission beim Kabinenentwurf von Flugzeugen

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Mohamed Farid Nayel

**Entwicklung eines parametrischen
Netzgenerators für die Simulation der
Schalltransmission beim Kabinenentwurf
von Flugzeugen**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau/Entwicklung und Konstruktion
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt
Kabine und Nutzlastsysteme
Hein-Saß-Weg 22
21129 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Frank Ihlenburg
Zweitprüfer : Dr.-Ing. Christian Hesse

Abgabedatum: 31. Mai 2020

Zusammenfassung

Mohamed Farid Nayel

Thema der Bachelorthesis

Entwicklung eines parametrischen Netzgenerators für die Simulation der Schalltransmission beim Kabinenentwurf von Flugzeugen

Stichworte

Simulation, FEM, Akustik, Vibroakustik, Flugzeugkabine, Seitenwand, Digitaler Faden, Ansys APDL, MSC Nastran, Python

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines parametrischen Netzgenerators und dessen Einfügung in einen „digitalen Faden“. Der Netzgenerator erstellt in Ansys APDL parametrische Netzmodelle, welche für akustische Vorhersagen in der Kabinenentwicklung verwendet werden.

Name of Student

Mohamed Farid Nayel

Title of the paper

Development of a parametric mesh generator for the simulation of sound transmission in cabin design of aircrafts

Keywords

Simulation, FEA, acoustics, vibroacoustics, aircraft cabin, sidewall, digital string, Ansys APDL, MSC Nastran, Python

Abstract

This Thesis deals with the development of a parametric mesh generator and its integration into a “digital thread”. The mesh generator produces parametric meshes in Ansys APDL, that are used in the prediction of acoustics in cabin design.

Aufgabenstellung zur Bachelorarbeit von Mohamed Farid Nayel (Matr. 2106687)

Entwicklung eines parametrischen Netzgenerators für die Simulation der Schalltransmission beim Kabinenentwurf von Flugzeugen

Ein Schwerpunkt des Instituts für Systemarchitekturen in der Luftfahrt liegt im interdisziplinären Datenaustausch sowie der multidisziplinären Optimierung von luftfahrtrelevanten Komponenten. Zu diesem Zweck wurde das CPACS (Common Parametric Aircraft Configuration Scheme) als gemeinsame Austauschsprache etabliert.

In dieser Bachelorarbeit soll ein Finite-Elemente Netzgenerator für parametrische Modelle von Seitenwandpaneelen einer Flugzeugkabine mit Schnittstelle zu CPACS erstellt werden. Die FE-Modelle sollen auf der CAD-Geometrie der Paneele basieren, zu bereits bestehenden Primärstrukturmodellen kompatibel sein und für vibroakustische Vorhersagen der Schalltransmission in die Kabine genutzt werden. Zur Modellierung der Primärstruktur steht das Programm AFUS (acoustic fuselage) zur Verfügung. Zusätzlich zu den FE-Modellen für die Wandverkleidung sollen nach Möglichkeit auch formkompatible Netze für die akustische Modellierung der Abstrahlung in die Flugzeugkabine generiert werden.

Der Netzgenerator soll in der quelloffenen Programmiersprache Python geschrieben werden. Die Vernetzung der Modelle wird mit Hilfe der Ansys Parametric Design Language (APDL) und über die Schnittstelle *pyansys* realisiert. Besonderer Wert soll zudem auf die Programmmodularität und Wiederverwendbarkeit der aufgebauten Modelle für verschiedene Anwendungen gelegt werden. Die Funktionalität des erstellten Netzgenerators ist mit vibroakustischen Beispielrechnungen nachzuweisen.

Abschließend soll auch eine Möglichkeit zur Kopplung der Seitenwandpanelmodelle mit dem FE-Modell des *FlightLAB Demonstrators* für zukünftige Untersuchungen aufgezeigt werden. Der *FlightLAB Demonstrator* ist ein repräsentativer Rumpfabschnitt eines Kurzstreckenflugzeugs, welcher für Akustikmessungen im Labor aufgebaut wurde.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.....	2
2	Grundlagen der Akustik	3
2.1	Schall.....	3
2.2	Schallausbreitung in Gasen (und Flüssigkeiten)	3
2.3	Schallausbreitung in festen Körpern	4
2.3.1	BiegeWellen	5
2.3.2	Koinzidenzgrenzfrequenz	5
2.4	Energetische Größen des Schallfeldes	6
2.4.1	Schalleistung und Schallintensität.....	6
2.4.2	Schalldämmmaß.....	7
2.5	Schalldämmung von ein- und zweischalige Bauteile.....	7
2.5.1	Einschalige Bauteile	7
2.5.2	Zweischalige Bauteile	9
2.6	Diffuses Schallfeld	9
2.7	Fluid-Struktur-Kopplung in der numerischen Analyse (FEM).....	10
3	Vorstellung des parametrischen Netzgenerators und des digitalen Fadens	12
3.1	Primärstruktur und Seitenwand einer Flugzeugkabine	13
3.2	Vorstellung der Modelle	14
3.3	Modularer Export des Sekundärstruktur-Modells	19
3.4	CPACS	22
3.5	AFUS.....	23
4	Die Entwicklung des parametrischen Netzgenerators	24
4.1	Erstellung der CAD-Geometrie der Seitenwand in Ansys.....	24
4.2	Generierung des FEM-Netzes der Seitenwand.....	26
4.3	Generierung der Zwischen- und Empfangskavität.....	28
4.4	Export der Daten in ein natives Nastran-Format	31
5	Funktionalitätsnachweis der Parametrisierbarkeit und akustische Berechnungen.....	35
5.1	Aufzeigen der Parametrisierbarkeit.....	35

5.2 Akustische Berechnungen zur Schalltransmission 40

6 Zusammenfassung und Ausblick 47

Literatur- und Quellenverzeichnis..... 48

Symbolverzeichnis

A	Durchtrittsfläche
c_F	Schallgeschwindigkeit
c_B	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Biegewelle
c_L	Longitudinal-Wellen-Geschwindigkeit
E	Elastizitätsmodul der Platte
f	Frequenz
f_{cr}	Koinzidenzfrequenz
\square	Plattendicke
I	Schallintensität
m''	Flächenbezogene Masse der Wand
P	Schalleistung
P_E	Eintreffende Schalleistung
P_S	Abgestrahlte Schalleistung
p	Schalldruck
R	Schalldämmmaß
s''	Steifigkeit des Luft-Hohlraums
\vec{v}	Schallschnelle
φ	Winkel der Schallschnelle
ϑ	Schalleinfallswinkel
λ_0	Wellenlänge der Luft
λ_B	Biegewellenlänge
λ_S	Spurenwellenlänge
η	Verlustfaktor
ρ	Plattendichte
ρ_F	Dichte der Luft
ρ_S	Dichte der Wand
τ	Transmissionsgrad
$[C_F]$	Fluid-Dämpfungsmatrix
$[C_S]$	Struktur-Dämpfungsmatrix
$\{f_s\}$	Struktur-Lastenvektor
$\{f^{pr}\}$	Schalldruckvektor
$[K_F]$	Fluid-Steifigkeitsmatrix
$[K_S]$	Struktur-Steifigkeitsmatrix
$[M_F]$	Fluid-Massenmatrix
$[M_S]$	Struktur-Massenmatrix
\vec{n}	Flächennormale
$[R]$	Fluid-Grenzflächenmatrix
\vec{u}_F	Verschiebung im Fluid
\vec{u}_S	Verschiebung der Struktur
$\ddot{\vec{u}}$	Knoten-Beschleunigungsvektor
$\dot{\vec{u}}$	Knoten-Geschwindigkeitsvektor
\vec{u}	Knoten-Verschiebungsvektor
$\vec{\sigma}(\vec{u}_S)$	Spannungsvektor der Struktur

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Eindimensionale Schallausbreitung als Darstellungsbeispiel für die mechanische Kopplung [1].....	3
Abbildung 2.2: „Schematische Darstellung einer Dichtewelle“ [2].....	4
Abbildung 2.3: Schematische Darstellung von Biegewellen [2]	5
Abbildung 3.1: „Digitaler Faden“ dieser Arbeit, oberer Strang: Generierung der Seitenwand, unterer Strang: Generierung der Primärstruktur	13
Abbildung 3.2: Vorderseite eines Seitenwandpanels ohne Dadopanel.....	14
Abbildung 3.3: FEM-Modelle der Seitenwand, Links: Außenseite; Rechts: Innenseite	15
Abbildung 3.4: Winkelparameter	16
Abbildung 3.5: Radius und Spantabstand	16
Abbildung 3.6: Fensterparameter, Vorderansicht	16
Abbildung 3.7: Versatz des Fensters, Seitenansicht der Seitenwand	16
Abbildung 3.8: Netz der Zwischenkavität	17
Abbildung 3.9: Längenparameter der Zwischenkavität.....	17
Abbildung 3.10: Netz der Empfangskavität	18
Abbildung 3.11: Längenparameter der Empfangskavität.....	18
Abbildung 3.12: Komplettes FEM-Modell, bestehend aus Seitenwand und beider Kavitäten	19
Abbildung 3.13: Eigenform der 14. Eigenfrequenz des Modells; links in MSC Nastran, rechts in Ansys APDL.....	20
Abbildung 3.14: CAD-Geometrie der Seitenwand in Ansys	21
Abbildung 3.15: Aus CAD-Geometrie erzeugtes FEM-Netz in Gmsh	21
Abbildung 3.16: Übersicht über die Hauptknotenpunkte von CPACS.....	23
Abbildung 3.17: FEM-Netz aus AFUS.....	23
Abbildung 4.1: Punkte der Seitenwand-Geometrie, die direkt über Eingabeparameter erstellt werden können	25
Abbildung 4.2: Erstellung der Fensterpunkte anhand eines lokalen Koordinatensystems	26
Abbildung 4.3: Vergleich der Fenstervernetzung; Links: Normal, Rechts: gesonderte Fensterlinien Teilung.....	28
Abbildung 4.4: Kopplungsflächen der Kavitäten in explodierte Ansicht des Modells.....	29
Abbildung 4.5: Unterschiede in Netzauflösung in den Kavitätsnetzen	30
Abbildung 4.6: Links: Standard Datenfluss in pyAnsys, Rechts: Datenfluss bei Werteabfrage über CSV-Datei.....	33
Abbildung 4.7: Umwandlung von Pyramiden-Elementen zu zwei Tetraeder-Elementen mit Knotennummerierung	33
Abbildung 5.1: Links: erzeugtes Modell; Rechts: Modell A330	35
Abbildung 5.2: Übereinandergelegte Ansicht des A330- und des erzeugten Modells.....	36

Abbildung 5.3: Querschnittsfläche einer Dornier Do 728 mit erzeugten Seitenwand-Modellen an beiden Seiten.....	37
Abbildung 5.4: A350-Seitenwand-Modell und erzeugtes Modell nebeneinander	38
Abbildung 5.5: A350-Seitenwand-Modell und erzeugtes Modell übereinander.....	38
Abbildung 5.6: Erzeugtes Seitenwand-Modell eingefügt in das FLightLAB-Modell.....	39
Abbildung 5.7: Modelle aus AFUS und dem Netzgenerator kombiniert in Actran	40
Abbildung 5.8: Schematische Darstellung des Actran Berechnungsmodells.....	41
Abbildung 5.9: Vergleich der numerischen und analytischen Berechnung der Doppelwand Konfiguration	45
Abbildung 5.10: Vergleich der numerischen und analytischen Berechnung der Seitenwand	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Ersten zwanzig Eigenfrequenzen des Modells in Ansys APDL und MSC Nastran	20
Tabelle 5.1: Parameter zur Erstellung des A330-Seitenwand-Modells	36
Tabelle 5.2: Parameter der Dornier Do 728-Seitenwand-Modelle	37
Tabelle 5.3: Parameter zur Erzeugung des A350-Seitenwand-Modells.....	39
Tabelle 5.4: Parameter zur Erstellung des FlightLAB-Seitenwand-Modells	39
Tabelle 5.5: Geometrische Seitenwand Parameter	41
Tabelle 5.6: Geometrische Parameter für die Kavitäten	41
Tabelle 5.7: Parameter für die Netzgenerierung.....	42
Tabelle 5.8: Isotrope Materialdaten des Seitenwand-Modells	42
Tabelle 5.9: Orthotrope Materialdaten des Seitenwand-Modells	42
Tabelle 5.10: Aufbau des Kompositwerkstoffes der Seitenwand	43
Tabelle 5.11: Aufbau des Fensters der Seitenwand.....	43
Tabelle 5.12: Orthotrope Materialdaten der Primärstruktur	43
Tabelle 5.13: Kompositwerkstoff Lagenaufbau der Primärstruktur	44

1 Einleitung

Das Institut für *Systemarchitekturen in der Luftfahrt* ist eins der insgesamt 40 Forschungsinstitute des *Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)*. Es erforscht neue Methoden um die zunehmende Menge an digitalen Daten effizienter zu nutzen. Dies betrifft insbesondere jene Daten, welche während des Entwicklungsprozesses anfallen.

In diesem Zuge werden Projekte mit Industriepartnern durchgeführt, in welchem Entwurfsmethoden und –modelle miteinander verknüpft werden. Auch Airbus ist als ein Industriepartner in diesen Forschungsprojekten involviert.

Der derzeitige Umgang mit digitalen Daten in den Berechnungs- und Simulationsvorgängen der Industrie sieht meist wie folgt aus. Es gibt viele verschiedene Programme für Berechnungen und Simulationen, die in verschiedenen Abteilungen benutzt werden und ihre Daten und Modelle wieder aus anderen Abteilungen oder sogar anderen Firmen beziehen. Die Abteilungen oder Firmen haben häufig unterschiedliche Datei-, Einheiten- oder Programmstandards. Ein Folgeproblem hieraus ist, dass die Daten bevor sie genutzt werden können, angepasst werden müssen, um mit abteilungsinternen Programmen verwendet werden können. Diese nicht vorhandenen Austauschstandards bringen viel Mehraufwand, Kosten und Missverständnisse bei der Zusammenarbeit mit sich.

Durch diese Umstände wird nur in seltenen Fällen der Mehraufwand für Simulationen und Berechnungen aufgebracht und interdisziplinäre Einflüsse berücksichtigt. Die verschiedenen Disziplinen befinden sich häufig in unterschiedlichen Abteilungen und so kommt es zu den vorher genannten Problemen.

Aus dieser Problemstellung heraus soll ein „Digitalen Faden“ etabliert werden, welcher die digitalen Entwicklungsprozesse sowohl innerhalb der Disziplinen, als auch interdisziplinär verbindet. Dies bedeutet, soweit es geht, durchgängige digitalisierte Vorgänge der Modellerstellungen und Simulation. Hierfür benötigt man standardisierte Modelle und Programme die mit einheitlichen Dateiformaten arbeiten. Soweit dies nicht möglich ist, muss eine automatisierte Umwandlung der Datenformate bei Benutzung der Programme erfolgen.

Der „digitale Faden“ schließt die Entwicklungsprozesse in der Kabinenakustik mit ein. Dies geschieht in Kooperation mit Airbus in der akustischen Abschätzung einer Flugzeugkabine. Es wird sich dort mit der Vorhersage und Optimierung des Schalldurchganges durch eine Flugzeugkabinenwand befasst. Letzteres dient der Verbesserung des Komforts für den Passagier.

Zwischen dem DLR und Airbus wurde so ein „Digitaler Faden“ bereits zu einem Teil erstellt. Hierbei handelt es sich um den Aufbau eines neuen Berechnungsprozesses, der dieser Struktur eines digitalen Fadens entspricht. Es wurden Prozesse von Airbus mit denen vom DLR kombiniert. Hierfür wurde von Airbus ein Generator zur Erstellung von FEM-Netz-Modellen einer Rumpfstruktur einer Kabine an die digitalen Strukturen des DLR angeschlossen. Außerdem wurden diese Modelle erweitert, dass sie einem neuen Berechnungsprozesses des Schalldämmmaßes Genüge zu tun.

1.1 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Aus der zuvor vorgestellten Thematik ergibt sich folgende Zielsetzung für die vorliegende Arbeit. Für die Berechnung des Schalldurchganges in einer Flugzeugkabine ist bisher nur die Rumpfstruktur verfügbar. Der nächste Schritt ist nun, die Komplexität der Simulationsmodelle der Kabinenwandstruktur zu erweitern. Vorhanden ist eine schnelle Möglichkeit der Generierung für Modelle der Rumpfstruktur. Das gleiche soll nun für Modelle der Kabinenverkleidung geschehen, die dann kompatibel zu den ersteren sind. Außerdem werden die Luftkavitäten die an die Kabinenverkleidung anschließen mit modelliert. Die Kavitäten sind für die akustische Verbindung mit der Kabine und der Primärstruktur notwendig. Die Kabinenverkleidung oder auch Sekundärstruktur besteht aus mehreren Bauteilen. Ein Teil davon ist das Seitenwandpanel.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Generators für parametrische Modelle des Seitenwandpanels und den dazugehörigen Kavitäten. Diese Modelle sollen aufgrund ihrer Parametrisierung mit verschiedenen Kabinen-Designkonzepten kombinierbar sein. Außerdem sollen die erstellten FEM-Netze aufgrund ihres Aufbaus für akustische Vorhersagen verwendbar sein. Das beinhaltet, dass die erstellten Seitenwandmodelle mit den bereits vorhandenen Modellen der Primärstruktur kombinierbar sind.

Die Arbeit ist wie folgt aufgebaut. Im Kapitel 2 befasst sich die vorliegende Arbeit zuerst mit den theoretischen Grundlagen der Akustik, soweit sie für das Verständnis der Berechnungen notwendig sind. Danach wird in Kapitel 3 der entwickelte Netzgenerator und der „digitale Faden“, dessen Teil er ist vorgestellt. Hierbei werden seine Funktionsweise, die erzeugten Modelle und die weiteren Teile des „Fadens“ erläutert. Darauffolgend wird in Kapitel 4 die Vorgehensweis und Methodik bei der Entwicklung des Generator aufgezeigt. Es werden dann in Kapitel 5 die Verifikation der Parametrisierbarkeit der Modelle dargestellt und die akustische Berechnung des Schalldämmmaßes anhand der Modelle diskutiert. Zum Schluss wird in Kapitel 6 ein Ausblick gegeben auf die zukünftige Verwendung, mögliche Erweiterungen, als auch mögliche Optimierungsmaßnahmen in der Zukunft.

2 Grundlagen der Akustik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der technischen Akustik behandelt, soweit sie für das Verständnis und die Abschätzung der Kabinenakustik in dieser Arbeit gebraucht werden.

2.1 Schall

Schall im Allgemeinen ist eine elastische Kopplung einer Vielzahl von mechanischen Schwingungen. Masseteilchen bewegen sich dabei um ihre Ruhelage in einem elastischen Medium. Dieses Verhalten wird durch eine Verdichtung und Verdünnung des Mediums einer Schallquelle angeregt, bei denen es zu sehr kleinen Änderungen des Druckes p und der Dichte ρ kommt. Dies ist schematisch im eindimensionalen in Abbildung 2.1 dargestellt. Schall verbreitet sich dann wellenförmig im Medium mit der Wellengeschwindigkeit c [1].

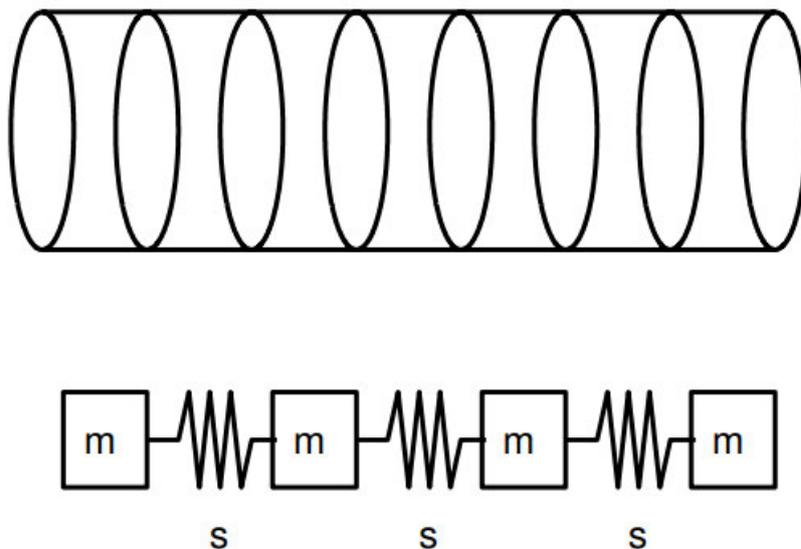


Abbildung 2.1: Eindimensionale Schallausbreitung als Darstellungsbeispiel für die mechanische Kopplung [1]

2.2 Schallausbreitung in Gasen (und Flüssigkeiten)

Das Verhalten von Schallausbreitungen in Gasen und Flüssigkeiten ist sich sehr ähnlich, daher wird im Folgenden hauptsächlich von der Ausbreitung in Luft gesprochen, da dies das zentrale Gasmedium in dieser Arbeit ist.

In der Schallausbreitung gibt es zwei verschiedene Arten von Geschwindigkeiten. Einmal die *Wandergeschwindigkeit* c , welches die Geschwindigkeit der Welle beschreibt. Sie wird auch

Ausbreitungs-, Wellen oder Schallgeschwindigkeit genannt. Zweitens die *Schnelle* v , die Geschwindigkeit der einzelnen Gasmassenelemente, die sich mit dieser Geschwindigkeit um ihre Ruhelage bewegen. Dieses Prinzip gilt auch für den Körperschall im Kapitel 2.3 [1].

Die Schallausbreitung in Luft wird auch als Luftschall bezeichnet. Der Luftschall entsteht entweder direkt durch Strömungsvorgänge (sogenannter primärer Luftschall) oder aber auch häufig indirekt als ein Resultat der durch Körperschall entstandene Bewegung der Luft (sogenannter sekundärer Körperschall) [4]. Dies können, wie zum Beispiel in dieser Arbeit, Schwingungen von dünnwandigen Bauteilen sein. Die Volumenänderungen des Gases, die dadurch entstehen, führen zu einer Änderung des Drucks und daraus zur Schallausbreitung. In der linearen Akustik wird Luft bzw. Gase als ideal angenommen. Das bedeutet es kommt zu keinen inneren Reibungen und somit treten bei Gas-Volumen keine Schubspannungen auf. Dies ist der fundamentale Unterschied zwischen der Schallausbreitung in Gasen und festen Körpern. [1]

Das Fehlen von Schubspannungen führt mit sich, dass die Schallausbreitung nur Formen von longitudinalen Wellen annimmt. Diese werden Dichtewelle genannt (siehe Abbildung 2.2). [2]

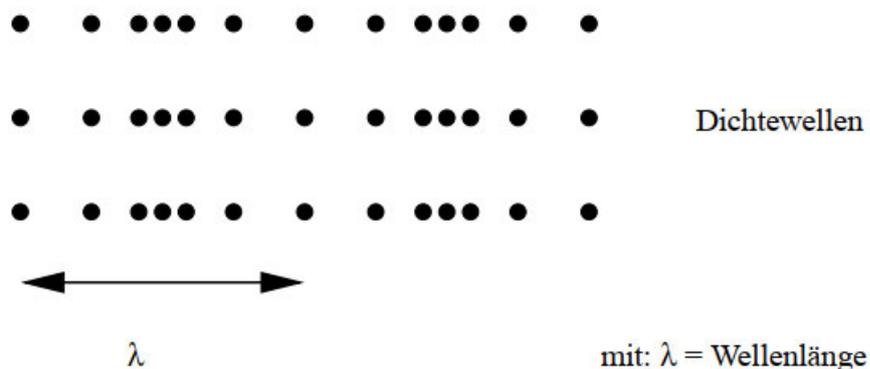


Abbildung 2.2: „Schematische Darstellung einer Dichtewelle“ [2]

2.3 Schallausbreitung in festen Körpern

Die Schallausbreitung in festen Körpern wird häufig auch als Körperschall bezeichnet. Im Gegensatz zur Luft, kommt es bei Volumenelementen fester Körper zu inneren Reibungen. Es treten Schubspannungen auf. Dadurch kommt es zu anderen weitaus komplexeren Wellenformen als im Luftschall, wo nur Längswellen auftreten. Im Körperschall können zusätzlich Schub-, Biege-, und Torsionswellen auftreten [1].

2.3.1 Biegewellen

Es existieren Dehnwellen, Dichtewellen (wie im Luftschall), Schubwellen, Torsionswellen und Biegewellen. Die transversale Biegewelle ist die komplizierteste Wellenart, aber auch für den Körperschall von plattenförmigen Bauteilen die wichtigste (schematisch zu sehen in Abbildung 2.3). Der Hintergrund hierfür ist, dass diese Wellenart hauptsächlich für die Ausbreitung und Schallabstrahlung von Körperschall in das umgebende Medium zu ständig ist. Dies geschieht aufgrund der Tatsache, dass für die Abstrahlung eine Auslenkung senkrecht zur Körperoberfläche nötig ist. Dehnwellen produzieren ebenfalls diese Auslenkungen, sind bei der Biegewelle aber wesentlich stärker ausgeprägt. Die anderen Wellenarten haben nur tangentielle Bewegungen zur Oberfläche [1].

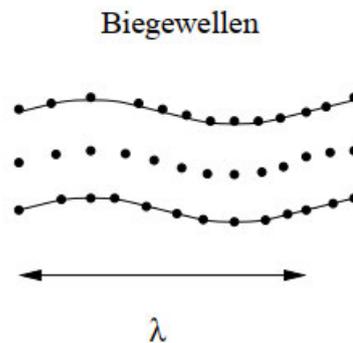


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung von Biegewellen [2]

Speziell bei Platten haben Biegewellen die Wellenlänge λ_B [1]

$$\lambda_B \approx 1,35 \sqrt{\frac{h \cdot c_L}{f}} \quad (2.1)$$

mit der Plattendicke h und der Longitudinal-Wellen-Geschwindigkeit $c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, wobei ρ die Dichte und E das Elastizitätsmodul der Platte sind. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c_B der Biegewelle ist [1]

$$c_B = \lambda_B f \approx 1,35 \sqrt{h c_L f} \quad (2.2)$$

2.3.2 Koinzidenzgrenzfrequenz

Wenn man nun die restlichen Variablen der Gleichung (2.1) betrachtet, sieht man, dass ansonsten die Materialwerte des Bauteils die Wellenlänge der Biegewellen bestimmen, namentlich die Dichte ρ , das Elastizitätsmodul E und die Dicke h des Bauteils. So kann man

je nachdem welches Material man nimmt, aber besonders, je nachdem wie dick man das Bauteil gestaltet, einen großen Einfluss auf die Biegewellenlänge nehmen. Dünne Platten haben kurzwelligere und dicke Platten langwelligere Biegewellen. [1]

Wenn man nun die Biegewellenlänge mit der Wellenlänge in Luft vergleicht stößt man auf einen Zusammenhang, der für das Luftschalldämm-Verhalten (Kapitel 2.4.2) wichtig ist [1]. Die Wellenlänge in Luft ist dabei

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (2.3)$$

mit der Schallgeschwindigkeit $c = 343 \frac{m}{s}$ (bei einer Temperatur von $20^\circ C$).

Je nachdem wie die Materialwerte des Bauteils ausfallen, gibt es eine Frequenz f bei der beide Wellenlängen, Biegewellenlänge λ_B und Wellenlänge λ_0 der Luft, gleich groß werden. Man spricht hierbei von der „Koinzidenzgrenzfrequenz“, „kritischen Frequenz“ oder einfach nur „Grenzfrequenz“ f_{cr} . Man erhält sie durch Gleichsetzen der Wellenlängen [1]

$$f_{cr} = \frac{c^2}{1,82hc_L} \quad (2.4)$$

2.4 Energetische Größen des Schallfeldes

2.4.1 Schalleistung und Schallintensität

In einem Schallfeld wird zu jedem Zeitpunkt mechanische Energie transportiert. Die Schalleistung beschreibt die durch eine Wand durchtretende mechanische Energie einer Schallquelle pro Zeit. Sie lässt sich über Integration der Intensität über eine Durchtrittsfläche A berechnen. [3]

$$P = \int_A I \cdot \cos\varphi \, dA \quad (2.5)$$

φ ist der Winkel zwischen der Flächennormalen \vec{n} des Flächenelementes dA und der Schnelle \vec{v} [3].

Die Intensität ist das Produkt aus der richtunggebenden Schallschnelle \vec{v} mit dem Druck p [3][4]

$$\vec{I} = p \cdot \vec{v} \quad (2.6)$$

2.4.2 Schalldämmmaß

Das Schalldämmmaß ist eine Größe, welches beschreibt, um wie viel ein Bauteil die Ausbreitung von Schall bei der Schallübertragung behindern kann. Es lässt sich berechnen, indem die auf dem Bauteil eintreffende Schalleistung P_S und die auf der anderen Seite abgestrahlte Schalleistung P_E Verhältnis gesetzt werden [1].

Im Allgemeinen kann man mathematisch das Schalldämmmaß R definieren als

$$R = 10 \lg \frac{P_S}{P_E} = 10 \lg \frac{1}{\tau} \quad (2.7)$$

wobei τ als Transmissionsgrad beschrieben wird.

2.5 Schalldämmung von ein- und zweischalige Bauteile

2.5.1 Einschalige Bauteile

Die Schallübertragung bei einschaligen Bauteilen ist eine einfache Wirkungskette. Bei eintreffendem Luftschall wird eine Wand elastisch gebogen. Diese Wandschwingungen übertragen so den Schall weiter zur Luft auf der anderen Seite und regt diese an. Bei dem Schalldämmverhalten von diesen einschaligen Wänden spielen mehrere Größen eine wichtige Rolle. Wenn man von einer homogenen, unendlich ausgedehnten Wand ausgeht, lässt sich das „Bergersche Massengesetz“ [2]

$$R = 10 \lg \left[1 + \left(\frac{\omega \rho_S h}{2 \rho_F c_F} \cos \vartheta \right)^2 \right] \quad [dB] \quad (2.8)$$

zur Berechnung verwenden, um diese zu betrachten. Hierbei sind ρ_F die Dichte der Luft und c_F die Schallgeschwindigkeit in Luft, feste Stoffgrößen. Des Weiteren ist ρ_S die Dichte der Wand und h die Dicke der Wand, sie bilden zusammen die flächenbezogene Masse der Wand $m'' = \rho_S \cdot h$ in $[\frac{kg}{m^2}]$. Man erkennt anhand des Massengesetzes, dass bei einer Verdopplung der Masse, das Schalldämmmaß um 6 dB vergrößert. Ebenso durch die durch $\omega = 2\pi f$ beschriebene Frequenz, die bei einer Verdoppelung den gleichen Einfluss hat. ϑ ist der Schalleinfallswinkel auf die Wand. Anhand der Formel ist bei senkrechten Einfall ($\vartheta = 0^\circ$) das Schalldämmmaß am größten und bei streifendem Schalleinfall ($\vartheta = 90^\circ$) am geringsten. [2][3]

Wie bereits in Kapitel 2.3.2 beschrieben können bei einer bestimmten Frequenz die Biegewellenlänge der Wand und die Luftschallwellenlänge gleich groß werden. Bei dieser Koinzidenzgrenzfrequenz gibt es einen Einbruch des Schalldämmmaßes. Allerdings kann

dies in der Realität durch die immer vorhandene Dämpfung der Wand abgefangen werden, in der ein Teil des Schalls absorbiert und in Wärme umgewandelt wird. Im Bereich unterhalb der Grenzfrequenz hat die Biegesteife der Wand keinen Einfluss auf das Schalldämmmaß, daher spricht man hier von „biegeweichen Wänden“. Man muss deswegen eine Unterscheidung bei der Berechnung des Schalldämmmaßes machen, ob der zu behandelnde Frequenzbereich sich unter oder über der Grenzfrequenz befindet. Aufgrund dessen, dass die Biegesteife im Frequenzbereich unter der Grenzfrequenz keinen Einfluss hat, kann man hier die Gleichung

$$R = 10 \lg \left(\frac{m'' \omega}{2\rho c_F} \right)^2 - 3 \text{dB} \quad (2.9)$$

Hier wurde zusätzlich über alle Schalleinrichtungen gemittelt, da man in der Realität meist von diffusen Schallfeldern ausgeht.

Im Bereich oberhalb der Grenzfrequenz hat Biegesteife der Wand dagegen einen Einfluss. Außerdem gibt hier es einen kritischen Effekt für die Schalldämmung. Bei einem bestimmten Einfallswinkel der Luftschallwellen auf die Wand kommt es zur sogenannten „Spuranpassung“. Bei dem Einfallswinkel ϑ

$$\sin \vartheta = \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \quad (2.10)$$

entsteht eine neue Spurenwellenlänge λ_S ,

$$\lambda_S = \frac{\lambda_0}{\sin \vartheta} \quad (2.11)$$

die mit der Biegewellenlänge λ_B übereinstimmt. Das hat in der Theorie einen Totaldurchgang dieser Schallwelle ohne jegliche Dämpfung zur Folge. Wie aber bereits angesprochen ist in der Realität noch die Wanddämpfung vorhanden. Daher bezieht man diese mit ein. So erhält man für die Frequenzbereiche über der Koizidenzfrequenz die angepasste Näherungsformel [1]

$$R = 10 \lg \left(\frac{m'' \omega}{2\rho_F c_F} \right)^2 + 5 \lg \frac{f}{f_{cr}} + 10 \lg 2\eta \quad (2.12)$$

wobei die Wanddämpfung durch den Verlustfaktor η mit eingeht.

2.5.2 Zweischalige Bauteile

Die zweischalige Bauweise ist eine kostengünstige und gewichtsparende Möglichkeit um höhere Dämmwirkungen zu erreichen. Die zweite Platte wird der ersten vorgestellt und der Luft-Hohlraum, der sich zwischen diesen bildet, kann dann wie eine Feder betrachtet werden. Es wird meist eine leichtere Wand vorgestellt. [1]

Bei einer Doppelschale lässt sich die Näherungsformel für das Schalldämmmaß R

$$R = R_1 + 10 \lg \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)^2 \quad (2.13)$$

verwenden, wobei R_1 das Schalldämmmaß der einzelnen schwereren Wand ist, aus dem vorherigen Abschnitt. Je nachdem in welchem Frequenzbereich man sich befindet. ω_0 ist die Resonanzfrequenz, der vorgestellten Schale in Verbindung mit der Kavität.

$$\omega_0^2 = \frac{s''}{m_2''} \quad (2.14)$$

mit der Masse der vorgeschobenen Wand m_2'' und der Steifigkeit des Luft-Hohlraums s''

$$s'' = \frac{\rho_F c_F^2}{d} \quad (2.15)$$

wobei d der Abstand zwischen den Schalen ist.

Wenn die Frequenz dieser Resonanzfrequenz entspricht, hat man wieder einen Einbruch des Schalldämmmaßes. Außerdem findet man bei Frequenzen unterhalb der Resonanzfrequenz keine Veränderung des Schalldämmmaßes im Gegensatz zum einschaligen Bauteil vor. Der zusätzliche Term wird null. Erst bei Frequenzen über der Resonanzfrequenz zeigt der zweischalige Aufbau seine Wirkung. Das Schalldämmverhalten steigt kontinuierlich mit zunehmenden Frequenzen. Daher versucht man die Doppelwand so zu konstruieren, dass die Resonanzfrequenz so tief wie möglich ist.

2.6 Diffuses Schallfeld

Ein diffuses Schallfeld wird durch einen ortsunabhängigen Pegel beschrieben, mit einem hinreichend breitbandigen Frequenzspektrum. In jedem Raumpunkt sind alle Schallausbreitungsrichtungen gleichermaßen am Energietransport beteiligt. Die Energiedichte des bleibt dabei konstant. Diffuse Schallfelder entstehen in Räumen mit Wänden mit hoher Schallreflexion. [1]

Es gibt drei zeitliche Phasen in einem diffusem Schallfeld, der Anhall, der stationäre Zustand und der Nachhall. Während des Anhall steigt der Schalldruckpegel im Raum, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. Der stationäre Zustand beschreibt die Phase während dieses Gleichgewichts, der Schalldruckpegel bleibt gleich. Der Nachhall ist die Phase nachdem die Schallquelle des Schallfeldes ausgeschaltet wurde und der Schalldruckpegel linear abfällt. Man kann die Verlusteigenschaften eines Raumes bzw. einer Wand, anhand der Nachhallzeit beurteilen. Dies ist die Zeit während des Nachhalls, die gebraucht wird bis der Schalldruckpegel um 60 dB abgenommen hat [1].

2.7 Fluid-Struktur-Kopplung in der numerischen Analyse (FEM)

Die Wechselwirkungen von Struktur und Fluid können mathematisch über Gleichungssysteme erfasst werden. Die Verknüpfungen werden dabei implizit über Kopplungsbedingungen gestellt. Diese Bedingungen erfolgen an den Grenzflächen von Fluiden und Strukturen und beziehen sich darauf, dass an diesen Berührungsflächen der Schalldruck des Fluids gleich der Querbelaugung der Wand ist, außerdem dass der Impuls erhalten bleibt. Diese Gleichungssysteme sind in den seltensten Fällen analytisch lösbar, daher werden numerische Berechnungsverfahren verwendet. In der Finite-Element-Methode werden mit Hilfe des Prinzips der virtuellen Arbeit oder Energieprinzipien, die Gleichungen diskretisiert [2].

In der FEM müssen ebenfalls die Kopplungsbeziehungen von Fluid und Struktur angegeben werden. Es werden als Kopplungsbedingungen, sowie bereits angesprochen, an den Grenzflächen einmal eine kinetische Bedingung (Gleichung (2.16)), resultierend aus dem Zusammenspiel von Schalldruck und auftretenden Strukturspannung festgesetzt. Und außerdem eine kinematische Bedingung (Gleichung (2.17)), unter der Voraussetzung, dass Struktur und Fluid sich gleichermaßen bewegen.

$$\bar{\sigma}(\vec{u}_S)\vec{n} + p\vec{n} = 0 \quad (2.16)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{u}_S - \vec{n} \cdot \vec{u}_F = 0 \quad (2.17)$$

mit dem Spannungsvektor $\bar{\sigma}(\vec{u}_S)$ der Struktur, dem Schalldruck p , der Verschiebung der Struktur \vec{u}_S , der Verschiebung im Fluid \vec{u}_F und dem nach außen zeigenden Normalenvektor der Fluidgrenzfläche. [5]

Nach dem die Randbedingungen festgelegt sind, wird nun, zuerst um die Struktur darstellen zu können, ein Gleichungssystem für lineare dynamische Strukturen aufgestellt [5]

$$[M_S]\ddot{\vec{u}} + [C_S]\dot{\vec{u}} + [K_S]\vec{u} = \{f_s\} \quad (2.18)$$

mit der Struktur-Massenmatrix $[M_S]$, der Struktur-Dämpfungsmatrix $[C_S]$, der Struktur-Steifigkeitsmatrix $[K_S]$, dem Knoten-Beschleunigungsvektor $\ddot{\vec{u}}$, dem Knoten-Geschwindigkeitsvektor $\dot{\vec{u}}$, dem Knoten-Verschiebungsvektor \vec{u} und dem Struktur-Lastenvektor $\{f_s\}$.

Dann wird der Vektor des Schalldruckes $\{f^{pr}\}$ an der Grenzfläche diesem System hinzugefügt, da diese gemäß der kinetischen Kopplungsbedingung Gleichung (2.16) auch auf die Struktur wirkt [5]

$$[M_S]\ddot{\vec{u}} + [C_S]\dot{\vec{u}} + [K_S]\vec{u} = \{f_s\} + \{f^{pr}\} \quad (2.19)$$

Der Vektor resultiert aus der Integration des Schalldruckes über die Grenzfläche. Der Schalldruckvektor lässt sich auch darstellen als [5]

$$\{f^{pr}\} = [R]\{p_e\} \quad (2.20)$$

mit dem Knoten-Verschiebungsvektor $\{p_e\}$ und der akustischen Fluid-Grenzflächenmatrix $[R]$. Diese repräsentiert die Kopplungsbedingungen. Hieraus folgt dann das Gleichungssystem [5]

$$[M_S]\ddot{\vec{u}} + [C_S]\dot{\vec{u}} + [K_S]\vec{u} - [R]\{p_e\} = \{f_s\} \quad (2.21)$$

Das Gleichungssystem für die diskretisierte Wellengleichung vom akustischen Fluid lautet [5]

$$[M_F]\{\ddot{p}_e\} + [C_F]\{\dot{p}_e\} + [K_F]\{p_e\} + \bar{\rho}_0[R]^T\{\dot{u}_{e,F}\} = \{f_F\} \quad (2.22)$$

mit der akustischen Fluid-Massenmatrix $[M_F]$, der akustischen Fluid-Dämpfungsmatrix $[C_F]$, der akustischen Fluid-Steifigkeitsmatrix $[K_F]$, dem akustischen Fluid-Lastenvektor $\{f_F\}$, der akustischen Fluid-Massendichte-Konstante $\bar{\rho}_0$ und wieder der akustischen Fluid-Grenzflächenmatrix $[R]$. Nun kann man diese kombinieren für das gekoppelte Gleichungssystem

$$\begin{bmatrix} [M_S] & 0 \\ \bar{\rho}_0[R]^T & [M_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}_e\} \\ \{\ddot{p}_e\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_S] & 0 \\ 0 & [C_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}_e\} \\ \{\dot{p}_e\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_S] & -[R] \\ 0 & [K_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_e\} \\ \{p_e\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{f_S\} \\ \{f_F\} \end{Bmatrix} \quad (2.23)$$

für die Berechnung von Fluid-Struktur-Kopplungen [5].

3 Vorstellung des parametrischen Netzgenerators und des digitalen Fadens

In diesem Kapitel wird der entwickelte Finite-Elemente Netzgenerator vorgestellt und der digitale Faden in dem er das Kernstück ist. Es wird gezeigt, wie er aufgebaut ist, wie der digitale Faden aufgebaut ist und was für Modelle sich mit dem Generator erstellen lassen.

Der Netzgenerator erstellt FEM-Modelle, die aus drei verschiedenen FEM-Netzen bestehen:

- Ein Seitenwandpanel einer Flugzeugkabine
- Eine Kavität, die zwischen Seitenwandpanel und Primärstruktur (Rumpfstruktur) liegt
- Und einer Kavität, die vom Seitenwandpanel in die Kabine reicht.

Diese werden dann für Berechnungen zu akustischen Vorhersagen der Schalltransmission verwendet.

Die generierten Modelle werden in Ansys APDL über „pyAnsys“ erstellt. „pyAnsys“ ist eine freiverfügbare Erweiterung (sogenannte „Packages“) der quelloffenen Programmiersprache Python. Es erlaubt, die Ansys APDL Programmierbefehle in Python auszuführen. Somit ist der komplette Netzgenerator in Python geschrieben. Der Vorteil hiervon ist, dass man eine gut strukturierte Programmiersprache, wie Python benutzen kann. Außerdem stehen dadurch die weiten Verknüpfungsmöglichkeiten von Python (Vielzahl an anderen „Packages“, andere bereits geschriebene Programme und digitale Strukturen) zur Verfügung.

Die Entscheidung Ansys als FEM-Programm zu verwenden, geht aus den weiten Möglichkeiten an Multiphysik Schnittstellen in Ansys hervor. Diese Funktionen werden speziell für die zukünftige Verwendung der Modelle an dem Institut und deren multidisziplinären Forschungen (wie Akustik, Mechanik, Thermodynamik), als sehr nützlich angesehen.

Die akustischen Kenngrößen werden in der Software Actran berechnet. Hier gibt es bereits einen geläufigen Berechnungsvorgang der Firma Airbus. Dort wird das Schalldämmmaß berechnet, das sich bei einem kompletten Schalldurchgang von der äußeren Primärstruktur des Flugzeuges, über die Kavität zwischen den Strukturen, durch die Seitenwand in die luftgefüllte Kabine ergibt. Dabei wird das Modell, welches in dieser Arbeit erstellt wird, mit einem bereits vorhandenen Primärstrukturmodell des Programmes AFUS (siehe Kapitel 3.5) von Airbus verknüpft. Die Eingabewerte erhält der Modellgenerator aus einer CPACS-Datei (siehe Kapitel 3.4).

Zusammen mit den Berechnungsvorgängen in Actran, den Eingaben aus CPACS und der Erstellung der Primärstruktur in AFUS bildet der Modellgenerator für die Sekundärstruktur den „digitalen Faden“ dieser Arbeit. Dieser ist repräsentativ für einen kooperativen Entwicklungsprozess in der Kabinenakustik zwischen verschiedenen Unternehmen.

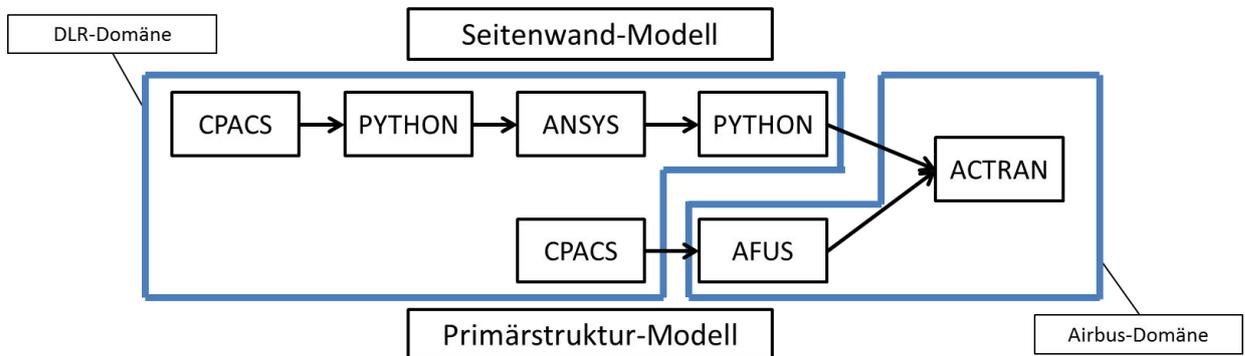


Abbildung 3.1: „Digitaler Faden“ dieser Arbeit, oberer Strang: Generierung der Seitenwand, unterer Strang: Generierung der Primärstruktur

In Abbildung 3.1 ist dieser dargestellt. Dabei entspricht der obere Strang, der Erstellung des Seitenwand-Modells und der untere Strang der Erstellung des Primärstruktur-Modells. Die Definition einer Primärstruktur und einer Seitenwand wird in dem folgenden Kapitel 3.1 behandelt. Ebenfalls ist gekennzeichnet welche Schritte bzw. Programme unter welcher Firmen-Domäne laufen.

Es ist aus IT-Sicherheitsgründen der Firma Airbus nicht möglich eine direkte digitale Verbindung zwischen dem Modellgenerator und den Berechnungsvorgängen in Actran herzustellen, um einen kompletten automatisierten Vorgang herzustellen. Daher werden die Daten von dem Generator, soweit es möglich ist, aufbereitet und angepasst, dass sie mit wenig Mehraufwand in Actran verwendet werden können.

3.1 Primärstruktur und Seitenwand einer Flugzeugkabine

Um den Aufbau und die Entscheidung hinsichtlich der Parameterwahl der Modelle zu verstehen, werden in diesem Kapitel die Wandstrukturen einer Flugzeugkabine vorgestellt.

Die Primärstruktur ist die Hülle und tragende Struktur eines Flugzeugs. Sie nimmt die Kräfte und Lasten des Flugzeuges auf. Die Primärstruktur besteht aus den Hautfeldern der Außenhaut, die mit Spanten in Querrichtung und Stringern in Längsrichtung verstärkt sind. Die Spanten und Stringer sind Profile, die verschiedene Formen annehmen können, wie zum Beispiel T-, I- oder Omega-Profile.

Die Seitenwand ist die Verkleidung der Primärstruktur eines Flugzeuges. Sie wirkt wie eine zweite Schale, die in die Primärstruktur eingehängt wird. Sie ist nur in wenigen Punkten mit der Primärstruktur verbunden und verankert. Ihre Ausmaße gehen vom Gepäckfach an der Decke bis zum Fußboden. Die Breite eines Seitenwandpanels entspricht der Länge von zwei Spantabständen der Primärstruktur. Ihre Aufgabe ist es, die Primärstruktur, die Isolierung und Verkabelungen vor dem Fluggast nicht einsehbar zu machen und die Isolierung zu unterstützen. Außerdem ist sie ein Designobjekt. Sie wird dadurch von Fluglinien und Flugzeugbauern verwendet ein Alleinstellungsmerkmal gegenüber der Konkurrenz aufzubauen.

In einigen Flugzeugmodellen ist auch das Dadopanel Teil der Seitenwand. Dies ist eine Dekompressionsplatte am unteren Teil der Seitenwandpanels, welche sich bei Druckabfall schließt. Dadurch kann die Druckkammer in der Kabine bewahrt und ein kompletter Druckabfall vermieden werden. In Abbildung 3.2 fehlt das Dadopanel. Es schließt normalerweise an das untere Ende der Seitenwand in dieser Abbildung an und führt die Form dadurch in näherungsweise zylindrischer Form weiter.



Abbildung 3.2: Vorderseite eines Seitenwandpanels ohne Dadopanel

3.2 Vorstellung der Modelle

Die FEM-Seitenwand-Netzmodelle, die der Generator erstellt, bedecken einen bestimmten Winkelbereich der Kabine. Die Seitenwand hat dabei eine zylindrische Form. Ein Seitenwandpanel besteht dabei immer aus zwei Hälften, die jeweils über einen Spantabstand der Primärstruktur gehen. Im oberen Bereich gibt es jeweils pro Hälfte eine U-förmige gebogene Ausbuchtung, wie in Abbildung 3.3 zu sehen. Diese gehen um das Fenster herum, die mit einem Versatz nach hinten geradlinig verlaufen. Die Fenster werden

vereinfacht oval förmig dargestellt. Im unteren Bereich des Panels bleibt die Form der Seitenwand zylindrisch. Diese unteren Flächen entsprechen dem eines Dadopanel, wie sie in manchen Flugzeugmodellen vorzufinden sind. Ansonsten ist dies als verlängerte Freifläche der Seitenwand zusehen.



Abbildung 3.3: FEM-Modelle der Seitenwand, Links: Außenseite; Rechts: Innenseite

Die einstellbaren Parameter, für die Erstellung des Modells, sind wie folgt:

- Der Radius, des zylindrischen Bereiches des Seitenwandpanels
- Der Spantabstand, der Primärstruktur, welcher die Länge einer Panelhälfte bestimmt
- Die Breite der Fenster
- Die Höhe der Fenster
- Der Anfangswinkel, welcher der Winkel ist, der das untere Ende des Panels beschreibt.
- Der Dado-Endwinkel, welcher das Ende des Abschnittes des Dadopanel der Seitenwand beschreibt
- Der Endwinkel, welcher der Winkel ist, der das Ende des kompletten Panels und der Anfang des Gepäckfaches beschreibt
- Der Fensterwinkel, welcher der Winkel zum Mittelpunkt des Fenster ist
- Die Länge des Versatz des Fensters nach hinten, bezogen auf den zylindrischen Bereich des Seitenwandpanels
- Elementgröße des FEM-Netzes

Die Längen werden standardmäßig in den Einheiten Meter vorgegeben, Winkel in Grad.

Die Winkel sind gemessen an der zylindrischen Struktur der Kabine, wobei 0° in horizontale Richtung auf das Seitenwandpanel zeigt (gestrichelte Linie in Abbildung 3.4 und 3.5) Diese geometrischen Parameter wurden zum besseren Verständnis noch einmal in Abbildungen 3.4-7 dargestellt.

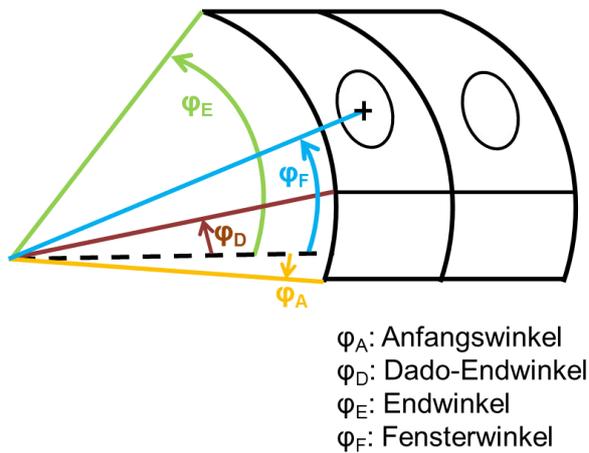


Abbildung 3.4: Winkelparameter

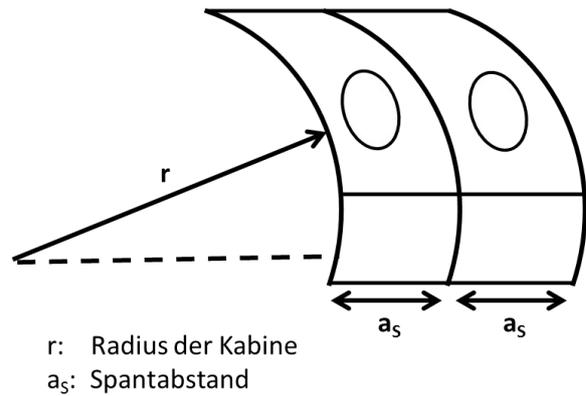


Abbildung 3.5: Radius und Spantabstand

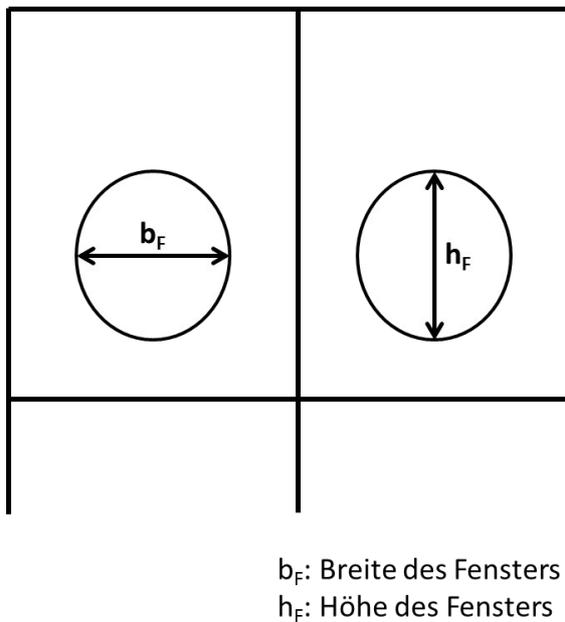


Abbildung 3.6: Fensterparameter, Vorderansicht

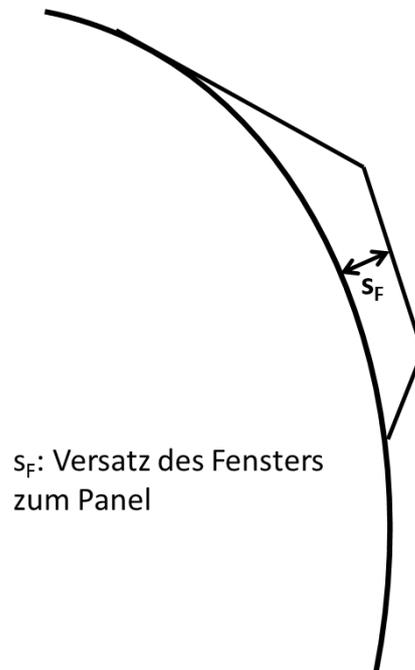


Abbildung 3.7: Versatz des Fensters, Seitenansicht der Seitenwand

Alle anderen Längen, Abstände und Winkel sind von diesen Parametern abhängig. Diese Parameter sind die notwendigen, um die erzeugten Modelle möglichst einfach soweit anpassen zu können, dass sie für verschieden Typen von Flugzeugen zu verwenden sind. Diese Funktionsweise wird in Kapitel 5.1 dargestellt.

Die zusätzlichen Kavitäten-Netze sind dreidimensionale FEM-Netze. Sie reichen beide bis komplett an die Seitenwand heran und sind an den Berührungsflächen deckungsgleich. Die Zwischenkavität (siehe Abbildung 3.8) kann in der Länge verändert werden, je nachdem wie groß der Abstand zwischen Seitenwand und Primärstruktur sein soll (dargestellt in Abbildung 3.9). Für die Empfangskavität (siehe Abbildung 3.10) kann ebenfalls die Länge bestimmt werden, wie weit sie in die Kabine hineinreichen soll (dargestellt in Abbildung 3.11).

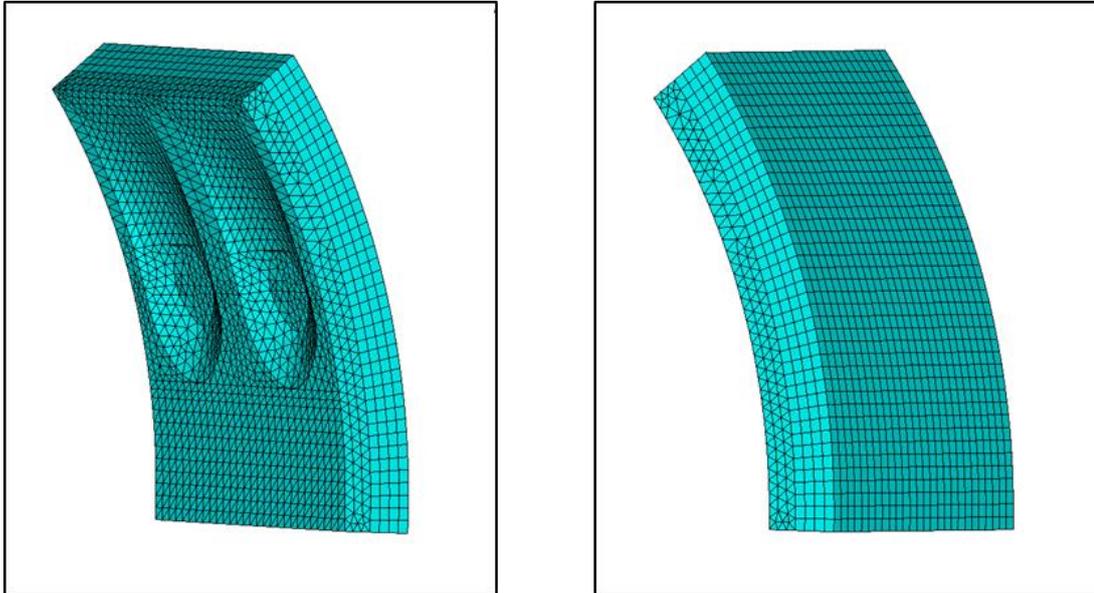


Abbildung 3.8: Netz der Zwischenkavität

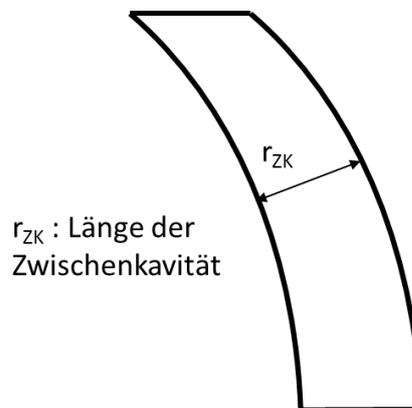


Abbildung 3.9: Längenparameter der Zwischenkavität

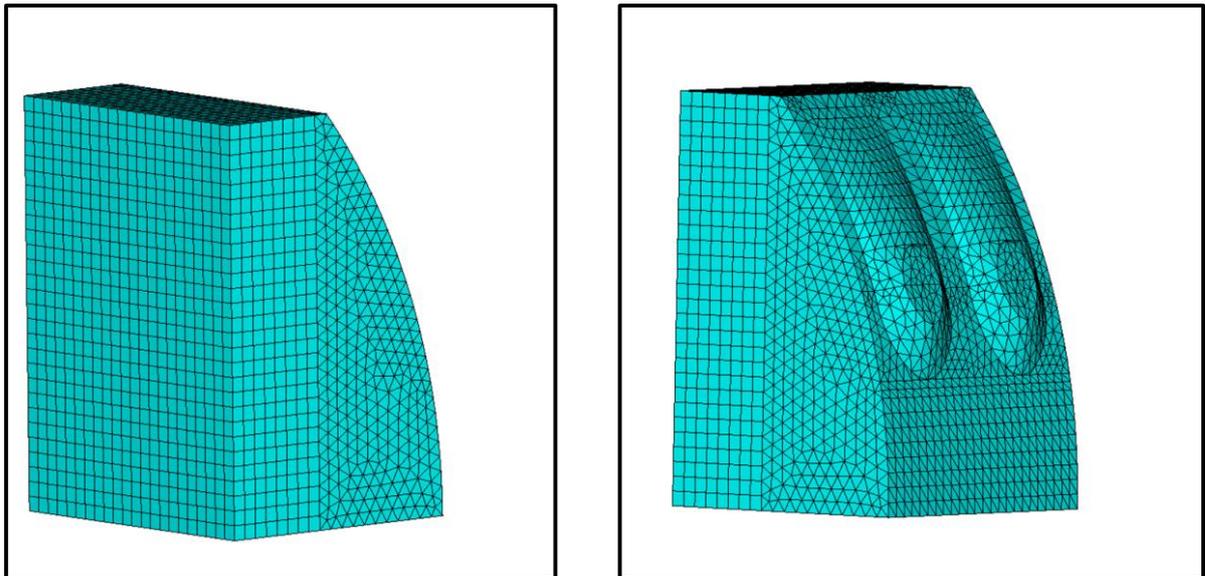


Abbildung 3.10: Netz der Empfangskavität

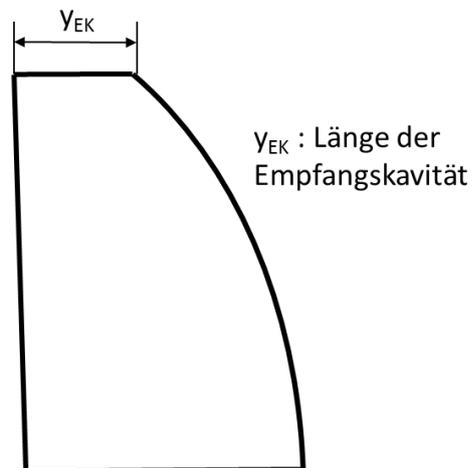


Abbildung 3.11: Längenparameter der Empfangskavität

In Abbildung 3.12 ist das komplette Modell, also die kombinierte Version der Seitenwand und der beiden Kavitäten zusehen:

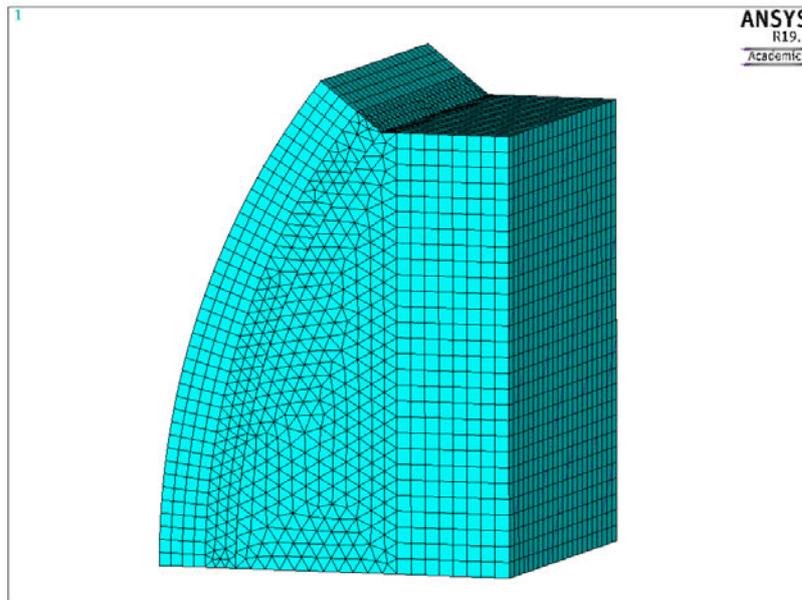


Abbildung 3.12: Komplettes FEM-Modell, bestehend aus Seitenwand und beider Kavitäten

3.3 Modularer Export des Sekundärstruktur-Modells

Durch den modularen Aufbau des Netzgenerators lässt sich dieser auch in anderen Problemstellungen und Aufgabengebieten verwenden. Er ist nicht nur auf diesen speziellen Anforderungsfall gegeben ist, eingeschränkt. Verschiedene mögliche zusätzliche Anwendungsfälle werden in diesem Kapitel dargestellt.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, wie man mit den FEM-Modellen arbeiten kann. Es werden die Modelle einmal ins Nastran-Format exportiert. Von hier aus können sie dann für die Berechnungen verwendet werden oder auch in anderen mögliche Vorgänge in Nastran. Ebenfalls sind die Modelle in Ansys APDL weiter verfügbar. Um diese Möglichkeit einmal darzustellen, wurde eine Modalanalyse für das gleiche erstellte Modell sowohl in Ansys APDL als auch MSC Nastran durchgeführt. Die Ergebnisse der ersten zwanzig Eigenfrequenzen sehen wie folgt in Tabelle 3.1 aus:

Tabelle 3.1: Ersten zwanzig Eigenfrequenzen des Modells in Ansys APDL und MSC Nastran

Nummer der Eigenfrequenz	Eigenfrequenz in MSC Nastran [Hz]	Eigenfrequenz in Ansys APDL [Hz]
1	$4,06 \cdot 10^{-5}$	0
2	$2,29 \cdot 10^{-5}$	0
3	$2,53 \cdot 10^{-5}$	0
4	$2,72 \cdot 10^{-5}$	$0,214 \cdot 10^{-4}$
5	$6,46 \cdot 10^{-5}$	$0,436 \cdot 10^{-3}$
6	$8,63 \cdot 10^{-5}$	$0,569 \cdot 10^{-3}$
7	7,665	7,5895
8	9,977	9,9311
9	14,944	14,847
10	22,099	21,926
11	25,081	25,017
12	29,976	29,763
13	30,018	29,792
14	45,363	45,038
15	47,177	47,198
16	47,874	47,515
17	49,211	48,968
18	59,003	58,607
19	60,534	60,148
20	63,948	63,858

Außerdem um die Ergebnisse weiter zu bekräftigen, ist in Abbildung 3.13 die Eigenform der 14. Eigenfrequenz zusehen:

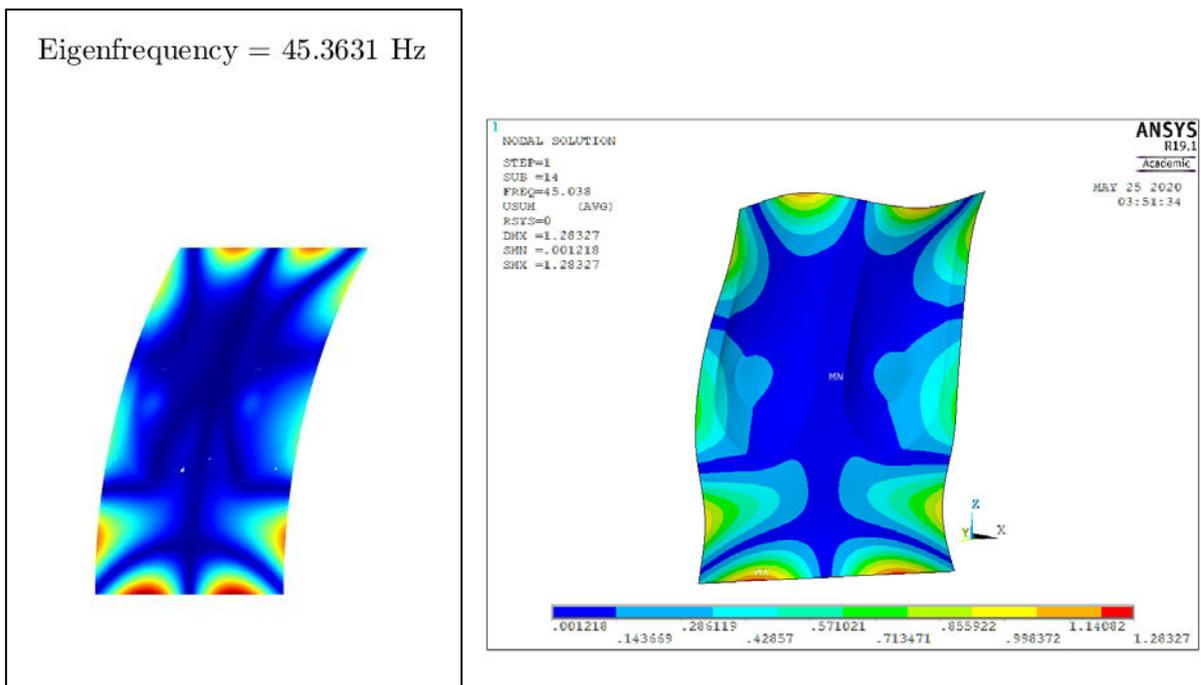


Abbildung 3.13: Eigenform der 14. Eigenfrequenz des Modells; links in MSC Nastran, rechts in Ansys APDL

Die leichten Unterschiede in den Ergebnissen entstehen durch die verschiedenen Berechnungsvorgänge die Ansys und Nastran im Detail verwenden. Die Ergebnisse zeigen aber qualitativ, dass die Modelle sowohl in Ansys als auch in Nastran verwendbar sind und ihre Eigenschaften erhalten bleiben.

Es werden auch CAD-Geometriemodelle von der Seitenwand erstellt (Abbildung 3.14), auf Basis dieser die FEM-Netze erstellt werden. Diese können ebenfalls unabhängig von den Netzen verwendet werden.

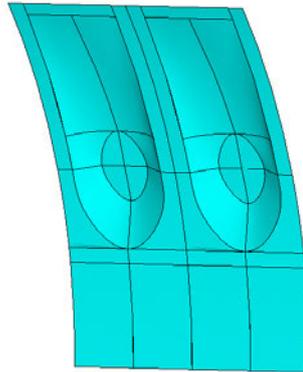


Abbildung 3.14: CAD-Geometrie der Seitenwand in Ansys

So können diese CAD-Geometrien exportiert werden, um als Basis für andere FEM-Vernetzer genutzt zu werden. Hier wird dies beispielhaft mithilfe des freiverfügbaren Vernetzers *Gmsh* durchgeführt. Das entstandene Netz sieht folgendermaßen aus:

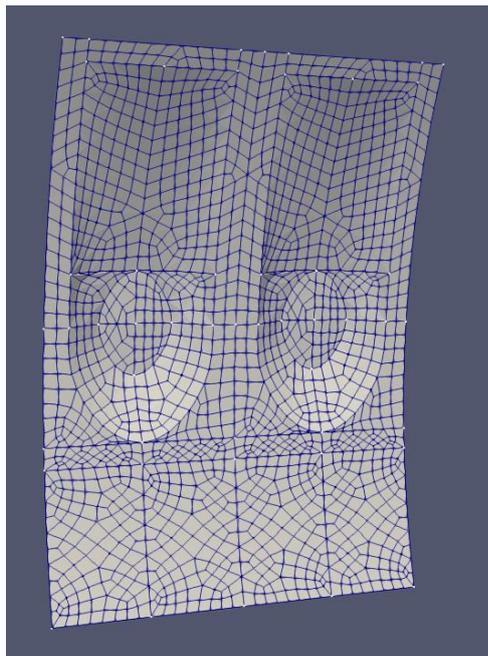


Abbildung 3.15: Aus CAD-Geometrie erzeugtes FEM-Netz in Gmsh

In den folgenden Kapiteln wird auf die weiteren Verbindungselemente im „digitalen Faden“ neben dem Netzgenerator eingegangen und diese für das bessere Verständnis erläutert.

3.4 CPACS

CPACS wird im DLR als Datenaustauschformat verwendet. Es dient im „digitalen Faden“ als Informationsträger der Eingabeparameter. In der Datei sind alle nötigen Parameter für die Modellgenerierung der Seitenwand und der Primärstruktur zu finden. Durch Änderungen der Parameter in dieser Datei können die Modelle den jeweiligen Anforderungen angepasst werden.

CPACS (Common Parametric Aircraft Configuration Schema) im Allgemeinen ist eine Daten-Definition für Multidisziplinären Datenaustausch. In dieser sind alle Parameter und Charakteristiken eines Flugzeugs hierarchisch eingegliedert. Ein Teil dieser Hierarchie ist in Abbildung 3.16 zu sehen. Es basiert auf dem XML-Schema-Datenformat und ist eine Entwicklung des DLR. Jeder CPACS-Datensatz entspricht dabei einem Flugzeugentwurf. Die Entwicklung von CPACS ist noch nicht abgeschlossen und es wird stetig daran weiterentwickelt. Es sollen weitere Bereiche der Flugzeugentwicklung mit einbezogen werden, um CPACS in dieser Hinsicht zu erweitern. Dies gilt auch für die akustischen Kenngrößen einer Kabine, die noch nicht fester Bestandteil in CPACS sind.

Es kommen nicht nur rein geometrische und strukturelle Daten in CPACS vor. Auch Daten zu der Mission (Daten zur Flugstrecke, Landebahn etc.) und den zu benutzenden Flughäfen sind hier zu finden.

Da der Modellgenerator für verschiedene Entwicklungsprozesse im DLR in der Zukunft eingegliedert werden soll, ist eine Anbindung an CPACS eine elementare Anforderung. CPACS ist eine XML-Datei und lässt sich daher sehr einfach mit eingebauten Standardfunktionen in Python einlesen, um so die benötigten Parameter für den Generator zu entnehmen.

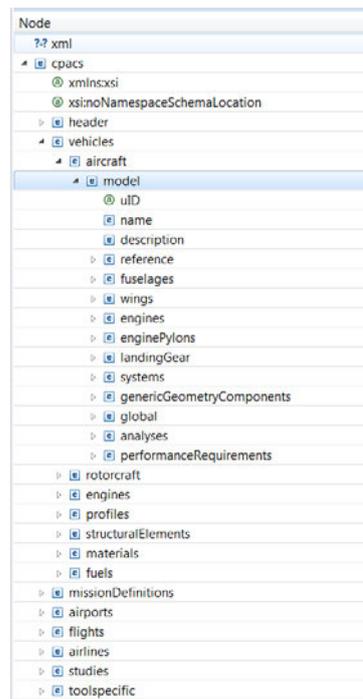


Abbildung 3.16: Übersicht über die Hauptknotenpunkte von CPACS

3.5 AFUS

AFUS (Acoustic Fuselage) wird im „digitalen Faden“ zur Bereitstellung von Finite-Elemente Modellen der Primärstruktur verwendet. Es ist ein in Matlab geschriebenes Programm, welches in mehreren Abschlussarbeiten bei Airbus entstanden ist. Es erstellt unter anderem parametrische Netze einer Primärstruktur im Nastran-Format. Diese Modelle beinhalten die Hautfelder, Spanten und Stringer. Als Material wird ein Kompositlagenaufbau benutzt. AFUS wurde bereits modifiziert, damit es automatisiert mit Anschluss an CPACS funktioniert. So konnte es in den „digitalen Faden“ eingefügt werden (siehe Kapitel 1).

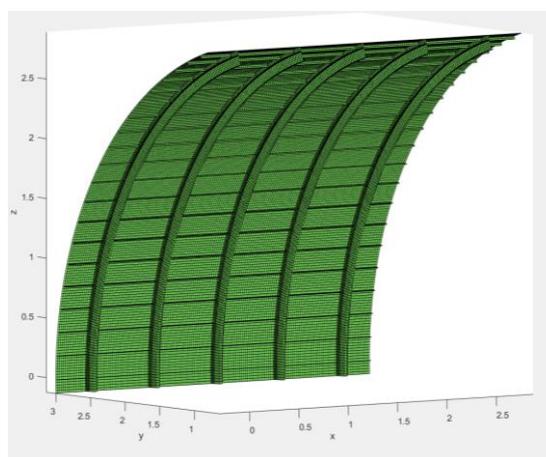


Abbildung 3.17: FEM-Netz aus AFUS

4 Die Entwicklung des parametrischen Netzgenerators

In diesem Kapitel werden die Vorgehensweise und Methodik des Netzgenerators vorgestellt. Zuerst werden die allgemeinen Grundlagen des Netzgenerators besprochen, danach werden die Programmmodule vorgestellt und die Methodiken dahinter erörtert.

Das Programm besteht aus folgenden Modulen:

- *cpacs_import* – Importiert die Eingabeparameter aus einer CPACS-Datei
- *sidewall_ansys* – Das Modul zu Erstellung des Seitenwandmodells als CAD-Geometrie
- *mesh_sidewall_geometry* – Das Modul, welches dann auf Basis der CAD-Geometrie oder einer ähnlichen ein FEM-Netz erstellt
- *create_inner_cavity_mesh* – Hier wird ein 3D-FEM-Netz der Zwischenkavität erstellt
- *create_receiving_cavity* – Erstellt ein Netz der Empfangskavität
- *mesh_nastran_export* - Exportiert alle Knoten und Element des FEM-Netzes aus Ansys in ein natives Nastran-Format

Bei einem Programmdurchlauf in dem alle Funktionalitäten verwendet werden, werden die Module in dieser Reihenfolge einmal durchgegangen. Es gibt aber, wie in Kapitel 3.3 gezeigt, auch andere Anwendungsmöglichkeiten in dem nicht alle Module verwendet werden müssen. Hier können diese einfach ausgelassen werden.

4.1 Erstellung der CAD-Geometrie der Seitenwand in Ansys

Um FEM-Netze in Ansys APDL erstellen zu können, muss eine CAD-Geometrie vorhanden sein, anhand dieser das Netz generiert werden kann. Es wird also zuerst eine Geometrie in Ansys erstellt, die dann als Grundlage benutzt wird. Ansys verfolgt dabei einem automatisierten Vernetzungsvorgang mit einigen Parameter-Einstellmöglichkeiten (mehr dazu im Kapitel 4.2).

Die primäre Aufgabe des Modellgenerators ist es für verschiedene Kabinenkonfigurationen Modelle zu erzeugen. Das heißt die Modelle müssen geometrisch variabel sein, um sich der jeweiligen Konfiguration anzupassen. Die entscheidenden Parameter die dabei ausschlaggebend sind, sind Längen (wie der Spantabstand) oder Winkel (wie der bedeckte Winkelabschnitt der Kabine durch die der Seitenwand). Daher entsprechen alle erzeugten Modelle demselben Seitenwand-Design und sind in der Hinsicht nicht variabel. Hierfür wurde das Design, wie es in Abbildung 3.2 zu sehen ist und Kapitel 3.1 beschrieben wird, gewählt.

In dem Modul zur anfänglichen Geometrie-Erstellung werden zuerst die Punkte in Ansys, die sogenannten „Keypoints“, definiert. Dann werden diese Punkte zu Linien verbunden und zum Schluss aus diesen Linien Flächen gebildet. In der Geometrieerstellung sind die Punkte diejenigen, auf die die Eingabeparameter des Generators direkten Einfluss haben. Die Linien und Flächen werden immer nach dem selber Schema erstellt, bzw. immer anhand derselben Punkte bzw. Linien generiert.

Bei der Punkteerstellung müssen einige Randbedingungen beachtet werden. Für die Netzgenerierung in Ansys ist es wichtig, dass entweder die Linien einer Fläche in einer Ebene liegen oder eine Geometriefläche nur aus maximal vier Linien besteht. Um etwaigen Problemen vorzubeugen und die Robustheit des Generators zu erhöhen, bestehen alle Flächen daher aus maximal vier Linien.

Die Punkte, die direkt durch die Eingabeparameter (siehe Kapitel 3.2) erstellt werden können, sind begrenzt (gekennzeichnet in Abbildung 4.1). Sie sind nicht ausreichend, um eine komplette Seitenwand-Geometrie zu erstellen.

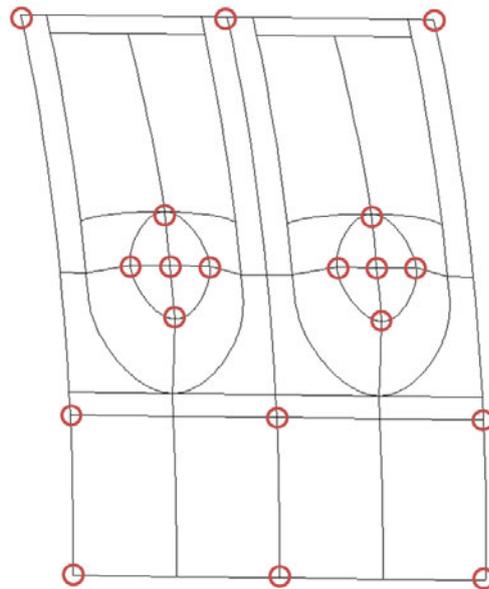


Abbildung 4.1: Punkte der Seitenwand-Geometrie, die direkt über Eingabeparameter erstellt werden können

Damit die Parametrisierbarkeit erhalten bleibt, müssen die Positionen der anderen Punkte von diesen Punkten abhängig sein. Alle anderen Punkte die nicht direkt über Parameterwerte erstellt werden können, müssen über Verhältnisse dieser Werte gesetzt werden. Wie zum Beispiel, könnte der Winkel eines Punktes ein Drittel des Abstandes zwischen Dado-Endwinkel und Endwinkel betragen. Es dürfen keine festen Zahlenwerte abgesehen von den Parametern verwendet werden. Ansonsten kann die Plausibilität des Modells nicht gewährleistet werden.

In der Erstellung der Geometrie werden zuerst die Punkte auf dem zylindrischen Abschnitten erstellt. Dies beinhaltet alle Punkte bis auf die Fensterpunkte. Das Fenster hat einen kleinen Versatz zu dem zylindrischen Bereich und ist etwas nach hinten versetzt. Das Fenster hat eine gerade und keine gebogene Form wie die Hauptfläche der Seitenwand. Daher müssen die Fensterpunkte anders generiert werden. Dort wird nun ein neues Koordinatensystem erstellt. Das Koordinatensystem hat eine Verdrehung um 90° zum Fenstermittelpunktwinkel und einen Versatz radial zur Seitenwand (Fenstermittelpunktwinkel und Versatz sind auch in Kapitel 3.2 dargestellt). So kann man nun dort die restlichen Fensterpunkte in einer tangentialen Ebene zur Seitenwand erstellen. Dies wird in Abbildung 4.2 verdeutlicht.

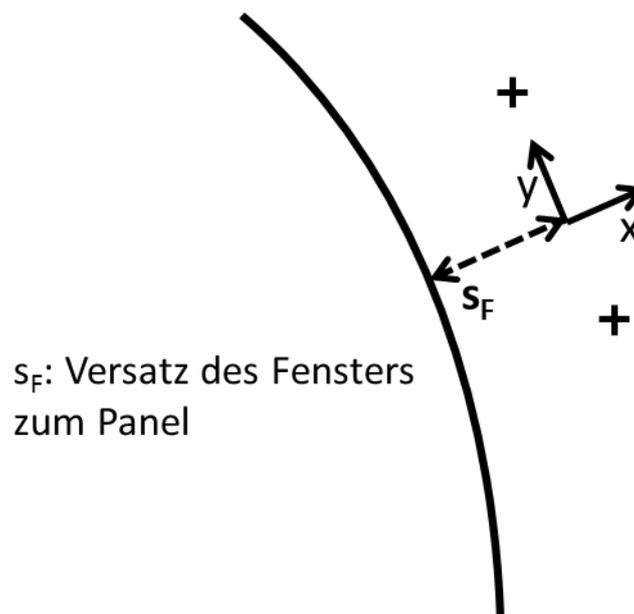


Abbildung 4.2: Erstellung der Fensterpunkte anhand eines lokalen Koordinatensystems

4.2 Generierung des FEM-Netzes der Seitenwand

Ansys führt beim Vernetzen der Geometrie ein automatisiertes Vorgehen durch. Einfluss auf Aussehen und Qualität des Netzes, das dabei entsteht, hat die Form der CAD-Geometrie. Daneben sind noch vier weitere Vernetzungsparameter in Ansys APDL von großer Bedeutung, die Netz-Elementgröße, der Elementtyp, „MSHAPE“ und „MSHKEY“.

Die Elementgröße lässt sich in zwei möglichen Formen in Ansys angeben. Man kann die Kantenlänge eines Elementes oder die Anzahl der Elementdivisionen entlang der Randlinien der vernetzten Flächen bestimmen. Dies ist entlang einzelner Berandungslinien oder über komplette Flächen möglich. Das Vorgehen kann bei ungleichförmigen Flächen von Vorteil sein, wenn man Linien auf unterschiedlichen Seiten andere Elementaufteilungen gibt. Bei der Angabe einer Länge nimmt Ansys diesen Wert als Richtwert an und versucht, soweit es geht diesen zu erreichen. Gleichzeitig werden möglichst gleichlange Elemente in einem Abschnitt erstellt. So kommt es zu Abweichungen zur angegebenen Länge.

Mit „MSHAPE“ gibt man Ansys vor welche Form und Dimension die Elemente haben sollen. Es gibt die Möglichkeit zwischen zwei- und dreidimensionalen Elementen zu entscheiden und ob im zweidimensionalen Fall sie nun viereckig oder dreieckig werden sollen. Beim dreidimensionalen Fall wählt man zwischen Hexaeder- und Tetraeder-Formen.

Bei „MSHKEY“ kann man zwischen den Optionen des freien Vernetzens, des geordneten Vernetzens und einer Mischform der beiden wählen. Bei der Mischform überlässt man dem Vernetzungs-Algorithmus von Ansys die Wahl, ob in einem Bereich geordnetes Vernetzen möglich ist oder nicht. Dieser Algorithmus ist natürlich nicht perfekt. Die Form der Flächen haben einen großen Einfluss darauf, aber auch die Wahl der Elementlänge in Kombination damit.

Der erste Schritt dieses Moduls ist es die Grundeinstellungen für das Vernetzen festzusetzen. Als Elementtyp wird „Shell181“ gewählt, dies ist ein zweidimensionaler Elementtyp von Ansys für Schalenbauteile mit linearer Ansatzfunktion. „MSHAPE“ wird auf 2D und viereckige Elemente gesetzt. „MSHKEY“ wird auf das „gemischte“ Vernetzen gestellt. Geordnetes Vernetzen kann nicht gewählt werden. Durch vorhandene nicht gleichförmige Flächen ist dieser Vorgang nicht überall möglich. Die Auswahl des Modus geordnetes Vernetzen würde bei Ausführung zu einer Fehlermeldung führen. Es wird ebenfalls die Elementlänge gesetzt, hier in diesem Fall die Kantenlänge der Elemente innerhalb einer Fläche.

Darauf folgend werden alle Flächen der Geometrie nacheinander durchgegangen und für jede Fläche wird einzeln der Befehl zum Vernetzen übergeben. Ausnahmen hierbei sind die Flächen der Fenster und die umliegenden Flächen um das Fenster (siehe Abbildung 4.3). Diese werden in diesem Vorgang nicht mit einbezogen. Die Fensterflächen werden in einem nächsten Schritt gesondert vernetzt. Grund hierfür ist, dass die Elementgröße hier separat an den Fensteraußenlinien eingestellt wird, um die Elemente des Fensters mit den umliegenden Flächen abzugleichen. Dann kann auch an den Fenstern ein der Parameter „MSHKEY“ auf geordnetes Vernetzen gesetzt werden. Hierdurch wird die Qualität des Netzes innerhalb des Fensters verbessert.

Damit die gesonderte Elementarteilung an den Fensterlinien möglich ist dürfen keine anliegenden Flächen dieser Linien bereits vernetzt sein. Daher werden auch die umliegenden Flächen, um das Fenster herum gesondert vernetzt.

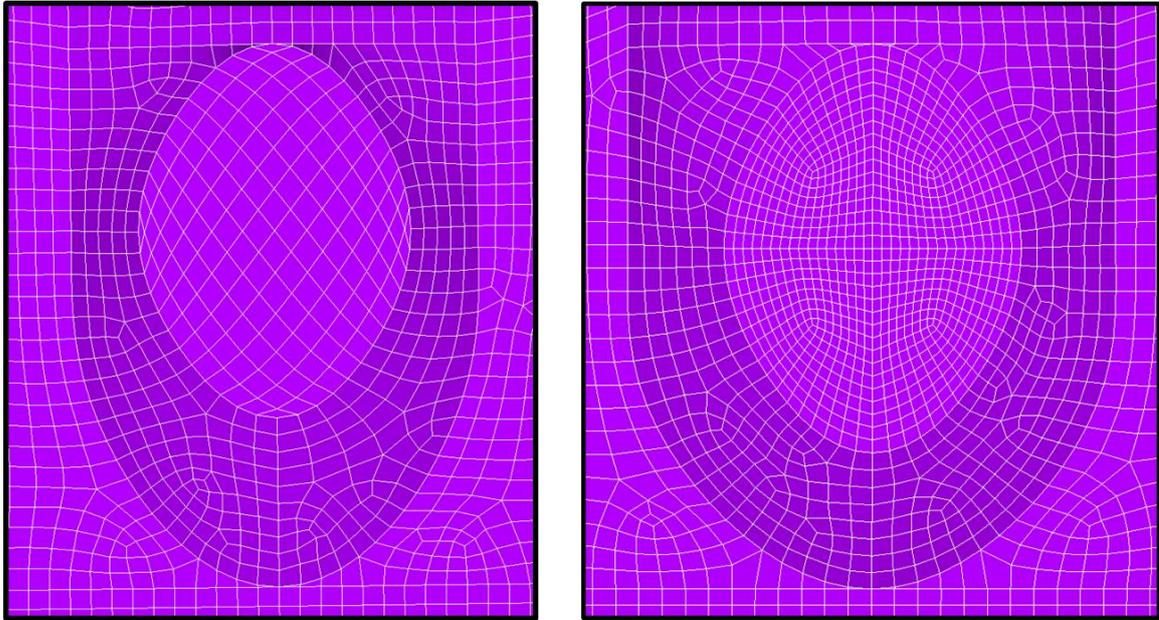


Abbildung 4.3: Vergleich der Fenstervernetzung; Links: Normal, Rechts: gesonderte Fensterlinien Teilung

4.3 Generierung der Zwischen- und Empfangskavität

Die Generierung der Zwischen- und Empfangskavität wird auf zwei Module aufgeteilt. In dem ersten Modul wird ein weiteres FEM-Netz erstellt, das die Zwischenkavität abbildet, welche zwischen Primär- und Sekundärstruktur vorzufinden ist. Dieses Netz besteht im Gegensatz zu dem des Seitenwandpanels aus dreidimensionalen Elementen, um die Kavitätswolumen abbilden zu können.

Um die Ausführung dieses Modul zu verstehen, wird vorher erläutert, welche Anforderungen an dieses Netz von den Berechnungen gestellt werden. Es muss ein komplett entkoppeltes Netz von der Hauptgeometrie sein. Das bedeutet, die Kavität darf sich keine Netzknoten mit dem Netz der Seitenwand teilen. Trotzdem muss die Kavität bis zu der Position des Panels „heranreichen“ und mit dieser Form abschließen. Das heißt, man braucht ein zweites Netz der Seitenwand, mit derselben geometrischen Form und denselben Ausmaßen, welches dann als Basis für die Kavität verwendet wird. Die Größe und Form der Elemente muss nicht mit dem zu verbindenden Modell der Seitenwand übereinstimmen.

Des Weiteren werden 2D-Schallenelemente an den Übergangflächen benötigt. Dies sind die Flächen des Volumens zu dem Seitenwandpanel und die gegenüberliegende Fläche zu der Primärstruktur. Diese Flächen werden in Actran benötigt. Die Flächen zur Seitenwand und zur Primärstruktur hin werden für die Kopplungsbedingungen der Netze untereinander benutzt, also von Fluid zu Struktur. Die Fläche der Empfangskavität zur Kabine hin wird für die akustische Berechnung der endgültigen Schalleistung berechnet. Zum besseren Verständnis sind die Kopplungsflächen schematisch in Abbildung 4.4 dargestellt.

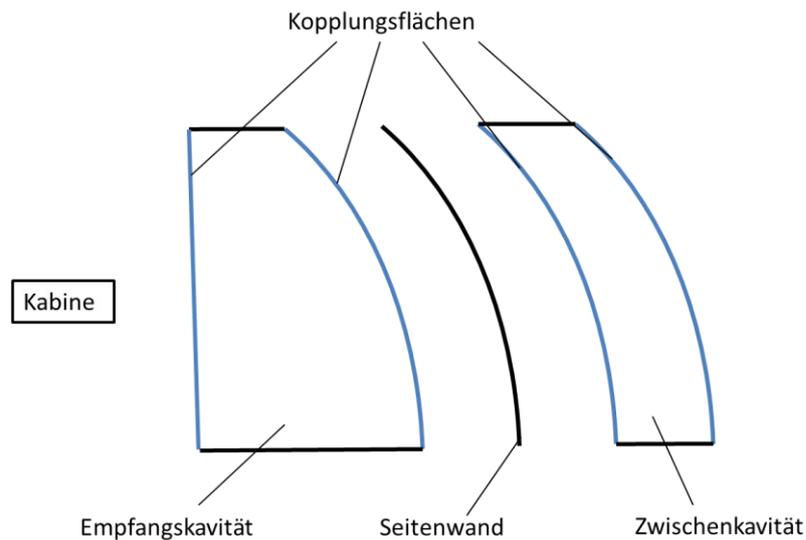


Abbildung 4.4: Kopplungsflächen der Kavitäten in explodierte Ansicht des Modells

In Ansys kann man keine bereits vernetzte Geometrie noch einmal vernetzen. Um ein zusätzliches FEM-Netz zu generieren, muss man eine komplette neue aber identische Geometrie der Seitenwand erstellen. Hier kommt die Modularität des Programmes zu Gute. Man kann das Modul zur Geometrie-Erstellung (*sidewall_ansys*) ein weiteres Mal innerhalb des Moduls zur Kavitätserstellung aufrufen. Es wird dadurch eine weitere Geometrie erstellt, die zwar kongruent und positionsgleich mit der Geometrie des Seitenwandmodells ist, aber ansonsten nicht mit diesem verbunden ist. Die neuen dazugehörigen IDs der Flächen sind auch nur innerhalb des Moduls zur Kavitätserstellung datentechnisch zugänglich. Es kann in anderen Modulen also nicht zu Verwechslungen der erstellten Seitenwand-Geometrien kommen.

Für die Erstellung des Netzes muss zuerst wieder eine CAD-Geometrie vorhanden sein, die als Basis zur Vernetzung dient. Die Geometrie ist ein Volumen, welches die eben bereits beschriebene neugenerierte Flächen-Geometrie der Seitenwand als Basis benutzt. Davon ausgehend wird dieser Bereich, um einen Versatz, der dem Abstand von Primärstruktur und Seitenwand entspricht, radial extrudiert. Diese Extrusion wird in zwei Zügen durchgeführt. Der Hintergrund für dieses Vorgehen ist, um das Kavitätsnetz grundlegend zu verbessern und die Anzahl der Elemente zu verkleinern. Der automatisierte Vernetzer von Ansys kann in einem Volumen, wo eine der Randflächen, sehr unförmig und ungleichmäßig ist, nur Tetraeder-Elemente beim Generieren des Netzes benutzen. Dies ist bei der Kavität, aufgrund der komplexen Fläche der Seitenwand der Fall. Da aber hexaederförmige Elemente in Modellen bevorzugt werden, wird das Volumen in zwei Teile aufgeteilt. Der hintere Teil zur Primärstruktur ist dadurch ein einfacher gebogener Quader, der nur aus sechs Flächen besteht. Hier kann Ansys sowohl Hexaeder-Elemente benutzen, als auch ein homogenes Netz erstellen. So erhält man ein Volumen hin zur Seitenwand, welches aus

ungeordneten Tetraeder-Elementen besteht und ein zweites Volumen hin zur Primärstruktur, welches aus geordneten Hexaeder-Elementen besteht. Diese Unterschiede in der Netzauflösung sind in Abbildung 4.5 zusehen.

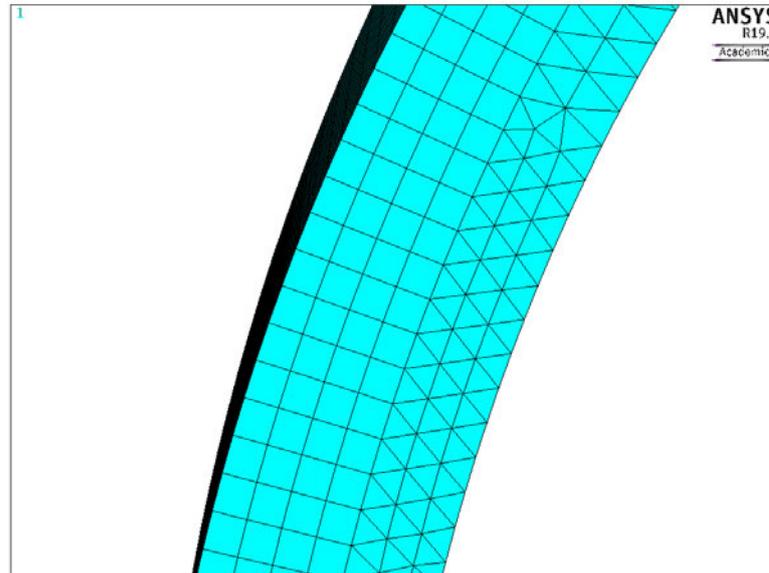


Abbildung 4.5: Unterschiede in Netzauflösung in den Kavitätsnetzen

Die zwei nun fertigen Volumen-Geometrien werden dann im nächsten Schritt von Ansys vernetzt. Die Elementlänge wird hier als allgemeine Kantenlänge über die Volumina angegeben. Als Elementtyp wird der Ansys-Elementtyp „Fluid30“ gewählt. Dies ist ein Element mit linearer Ansatzfunktion, welches speziell für Fluide in einer Fluid-Struktur-Kopplung ausgelegt ist.

Es ist wichtig, dass zuerst das zur Primärstruktur aufschließende, gebogene Quadervolumen vernetzt wird. Die Verbindungsfläche zwischen den Volumina ist dann in Quadrate unterteilt. Wenn man das Vernetzen anders herum durchführen würde, bestünde die Verbindungsfläche aus ungeordneten Dreiecken, da dieses Volumen aus Tetraedern besteht. Dies wäre dann die Basis der Vernetzungsstruktur im Quader und somit wäre wieder kein geordnetes Hexaeder-Netz möglich. Um dann einen Übergang zwischen dem Tetraeder- und Hexaeder-Netz zu erreichen, fügt Ansys zusätzlich in das Tetraeder-Netz pyramidenförmige Elemente ein. Diese schaffen aufgrund ihrer quadratischen Basis eine Verbindung zu den Verbindungsflächen.

Das Vorgehen im zweiten Modul zur Erstellung des FEM-Netzes der Empfangskavität ist dem der Zwischenkavität sehr ähnlich. Die einzigen Unterschiede liegen in der Form der Kavität und somit in der Erstellung der CAD-Geometrie. Hier wird der Versatz der von dem Seitenwandmodell für die Extrusion verwendet wird nicht radial, sondern in y-Koordinaten

Richtung gesetzt (siehe Abbildung 3.11). Dadurch hat die Kavität in Richtung Kabine auch keine gebogene Form sondern eine ebene.

Es wird ebenfalls wieder die Kavität, wie bei der Zwischenkavität, in zwei Teile geteilt. Es gibt einen geordneten Hexaeder Bereich und einen ungeordneten Tetraeder Bereich. Die Gründe hierfür sind dieselben, wie bei der Zwischenkavität.

4.4 Export der Daten in ein natives Nastran-Format

Dieses Modul nimmt alle Daten des FEM-Netzes aus Ansys und schreibt sie in eine Datei im MSC Nastran-Format. Diese Datei wird benötigt für die akustischen Berechnungen in Actran. Nastran-konforme Netze werden standardmäßig in einer BDF-Datei („Bulk Data Input“) niedergeschrieben. Diese bestehen aus verschiedenen „Bulk Data Sections“, verschiedene Sektionen in denen jeweils die Knoten, Elemente, Materialien etc. stehen.

Für die Berechnungen wird eine BDF-Datei benötigt in der alle Knoten, alle Elemente, alle Materialien und alle Elementeneigenschaften des Netzes vorzufinden sind. Für die Überführung von Ansys nach Nastran ist es sinnvoll sich anzuschauen, auf welche Art und Weise beide Programme diese Daten handhaben.

Die Knoten werden von beiden Programmstrukturen gleich gehandhabt. Die Daten müssen nicht weiter angepasst werden.

Bei der Handhabung der Elemente gibt es aber Unterschiede. In Nastran wird eine Unterscheidung gemacht, wie die Anzahl der Knoten ist und ob es ein zwei- oder dreidimensional Element ist. Je nachdem wie dies ausfällt, hat das Element eine andere Elementtyp-Bezeichnung. So wird zum Beispiel ein vierknotiges 2D-Element in Nastran als „CQUAD4“ deklariert. In Ansys wiederum werden die Element-Bezeichnungen eher nach der Aufgabe des Elements vergeben, ob zum Beispiel es ein Fluid oder eine Plattenstruktur ist. Diese Elementbezeichnungen sind zwar ebenfalls, wie die Nastran-Elemente eindeutig zwei- oder dreidimensional, aber nicht wie bei Nastran von Namen her ableiten, wie viele Knoten das Element hat. So können die dreidimensionalen Ansys-Elemente „FLUID30“, sowohl achtknotig, sechsknotig, fünfknotig, als auch vierknotig sein. In Ansys werden trotzdem dafür immer acht Knoten angegeben, es kommt dann je nachdem zu Doppelungen der Knoten. So wäre in Ansys das Element mit der Definition

[1, 4, 6, 6, 9, 9, 9]

ein vierknotiges Tetraeder Element mit den Knoten 1, 4, 6 und 9. Bei Nastran wiederum, darf es keine Doppelungen der Knoten innerhalb der Elementdefinitionen kommen. Als Anmerkung: es wird hierbei nur auf Elemente mit linearer Ansatzfunktion eingegangen, da

diese soweit ausreichend sind für die Modelle. Alle die für diese Modelle verwendeten Elemente in Nastran sind entweder CTRIA3, CQUAD4, CTETRA oder CHEXA. In Ansys werden Elementen vom Typ SHELL181 und FLUID30 verwendet.

Die bezogenen Daten für die Materialeigenschaften der Seitenwand und der Kavität stammen aus bereits bestehenden Nastran-Modelldaten und werden einfach übernommen. Daher muss hierfür keine Überführung durchgeführt werden. Ebenso wie die Elementeigenschaften, mit den Struktureigenschaften (wie Kompositlagenaufbau), kommen direkt aus den Nastran-Modelldaten.

Für den ersten Schritt des Exports müssen alle in Ansys vorhandenen Daten ausgelesen werden. Dies sind die Knotenpunkte und Elemente. Dies kann nicht direkt über Python geschehen. Grund hierfür ist zum einen, dass pyAnsys die Verbindung zu Ansys über eine weitere Programmschnittstelle herstellt, mit dem Namen CORBA. Python gibt Befehle an CORBA, CORBA gibt diese an Ansys weiter. Danach werden die Ergebnisse dieses Befehls zurück an CORBA geben und dann von CORBA an Python (siehe linke Seite Abbildung 4.6). Durch diesen Extraschritt beansprucht jede Parameterabfrage mehr Zeit. Zum zweiten wird für jede Parameterabfrage von pyAnsys eine Datei gespeichert und nach Ausführung wieder gelöscht. Dies ist ein weiterer Extraschritt über die Festplatte, welcher viel Zeit in Anspruch nimmt. Bei einzelnen Werteabfragen, wie sie auch bei den anderen Modulen häufig vorkommen fällt so etwas nicht weiter ins Gewicht. Wenn aber ein ganzes Modell exportiert werden muss, kommen dort mehrere hunderttausend Werteanfragen zusammen. Dies dauert dann mehrere Stunden. Deshalb wird ein anderer Weg gewählt.

Die Werteabfrage wird nun über eine CSV-Datei geregelt. Ansys selbst hat auch in der eigenen Programmiersprache APDL Funktionen zur Erstellung von einfachen Textdateien und deren Befüllung mit Daten. Diese werden hier verwendet, so dass Ansys direkt alle Werte in eine CSV-Datei schreibt und dann die Datei in Python eingelesen wird. Somit wird quasi der zweite Rückschritt über CORBA umgangen. Dieser Vorgang braucht statt der mehreren Stunden nur einige Sekunden. Beide Datenflüsse sind in Abbildung 4.6 dargestellt.

Nach dem nun die Daten erfolgreich ausgelesen werden können, müssen diese ins Nastran-Format übersetzt werden. Wie bereits besprochen können die Knoten einfach direkt übernommen werden. Bei den Elementen müssen die Knotendopplungen der Ansys-Elemente Definition entfernt werden. Danach werden je nach Anzahl der eindeutigen Knoten dem Element den richtigen Nastran-Elementtyp zugeordnet.

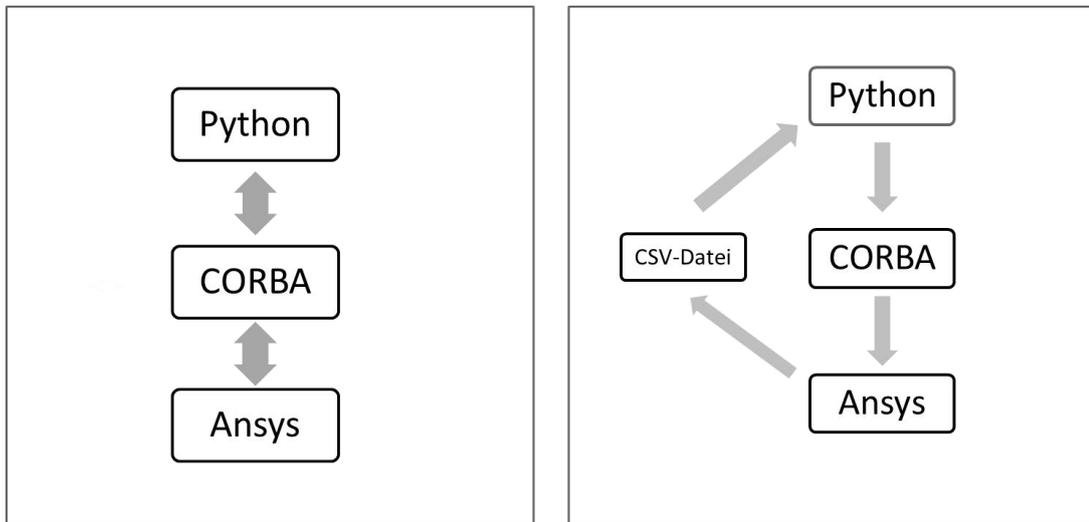


Abbildung 4.6: Links: Standard Datenfluss in pyAnsys, Rechts: Datenfluss bei Werteabfrage über CSV-Datei

Die einzige Ausnahme hierbei sind die fünfknotigen Pyramiden-Elemente. Diese existieren gar nicht in MSC Nastran. Daher müssen die Pyramiden-Elemente aufgeteilt werden in zwei Tetraeder-Elemente, wie in Abbildung 4.7 dargestellt.

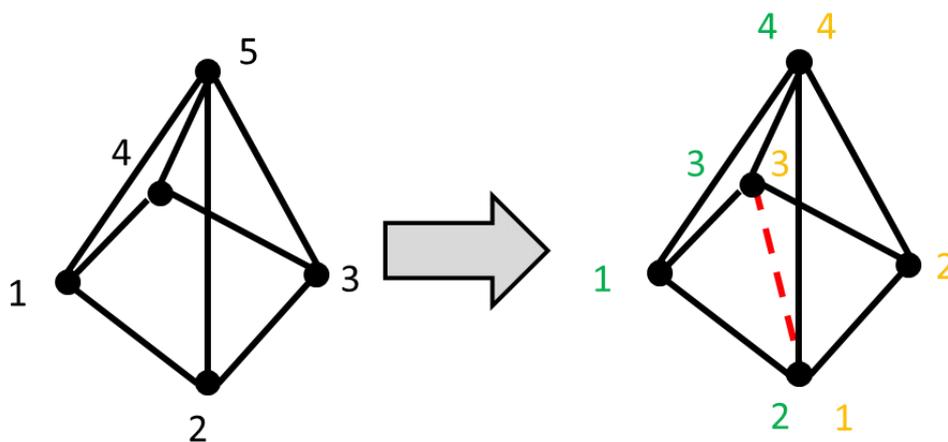


Abbildung 4.7: Umwandlung von Pyramiden-Elementen zu zwei Tetraeder-Elementen mit Knotennummerierung

Für die Zuweisung der zuvor besprochenen Elementeigenschaften und damit auch die passenden Materialien, wird in Nastran jedem Element die zur Eigenschaft dazugehörige „PID“ (Property Identification Number) zugeordnet. In diesem Modell gibt es neun Bereiche, deren Elemente jeweils mit einer „PID“ belegt werden müssen:

- Die Fenster der Seitenwand
- Das restliche Seitenwandpanel bis auf die Fenster
- Die Zwischenkavität
- Die Empfangskavität
- Und die vier Kopplungsflächen der Kavitäten (siehe Abbildung 4.4)

Die Kopplungsflächen haben keine physikalische Struktur und bekommen daher auch keine Strukturwerte. Sie werden nur für die Kopplungsbedingungen in Actran benötigt. Hier werden die jeweiligen „PIDs“ zur richtigen Zuordnung der Elemente in Actran verwendet.

Für die Formatierung der BDF-Textdatei wird das „Python-Package“ „pyNastran“ verwendet. In „pyNastran“ werden die Knoten und Elemente über Funktionen einer internen Datenstruktur des „Packages“ übergeben. Es gibt für jeden Elementtyp (CQUAD4, CHEXA, etc.) eine eigene Funktion. Wenn dann zum Schluss der Befehl zum Erstellen der BDF-Datei ausgeführt wird, formatiert „pyNastran“ automatisch alles in das typische Nastran-Format. Dies beinhaltet, dass jeder Parameter in der Text-Datei genau acht Zeichen lang sein muss.

Dieses Modul ist so angelegt, dass es auch möglich ist, einen Export für ein Modell durchzuführen, welches nur aus einer Seitenwand besteht ohne Kavitäten.

5 Funktionalitätsnachweis der Parametrisierbarkeit und akustische Berechnungen

In diesem Kapitel werden einmal die Funktionalität der Parametrisierbarkeit des Netzgenerators und eine Plausibilisierung durch eine Berechnung des Schalldämmmaßes aufgezeigt.

5.1 Aufzeigen der Parametrisierbarkeit

Um die Funktionalität der Parametrisierbarkeit des Netzgenerators aufzuzeigen, werden vier Modelle in einer Konfiguration gezeigt, wie sie bestimmte reale Flugzeugtypen verwenden. Dabei werden die erzeugten Modelle vom Generator dieser Arbeit zusammen mit Modellen dieser realen Konfigurationen gezeigt und miteinander verglichen. Je nachdem was für reale Modelle zur Verfügung stehen, werden entweder die Geometrie- oder die FEM-Modelle benutzt. Diese sind in der Erstellung von der Form und den Ausmaßen gleich.

Die erste Konfiguration entspricht der Seitenwand eines A330 Flugzeuges, ein Großraumflugzeug für Mittel- und Langstrecken. Hier werden zum Vergleich, Geometrie-Modelle der Seitenwand einer A330 mit dem Modell aus dem Netzgenerator nebeneinander (Abbildung 5.1) und übereinander gelegt (Abbildung 5.2).

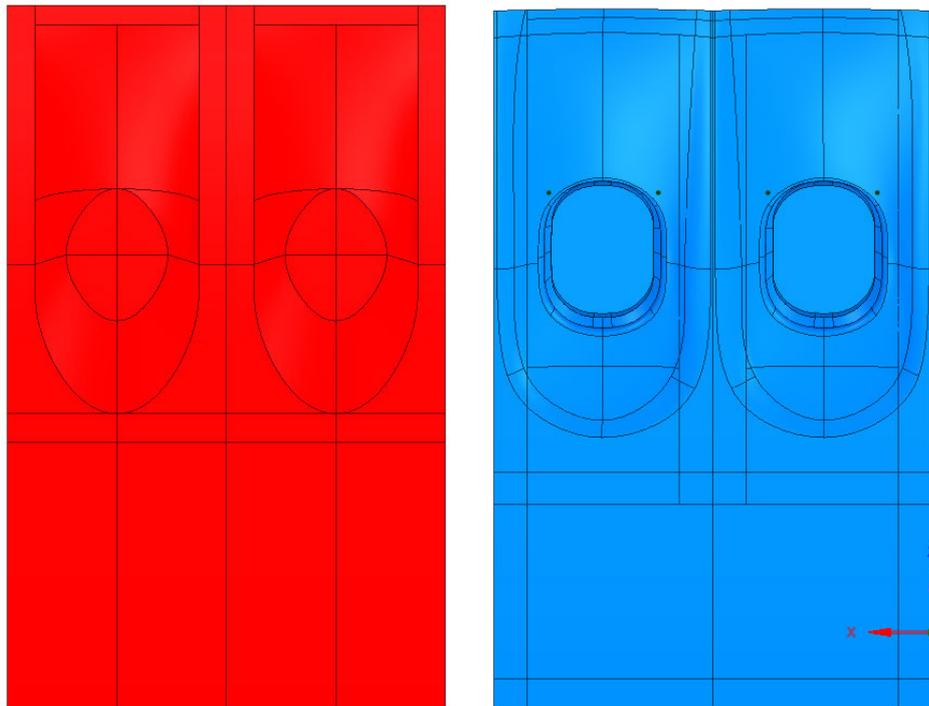


Abbildung 5.1: Links: erzeugtes Modell; Rechts: Modell A330

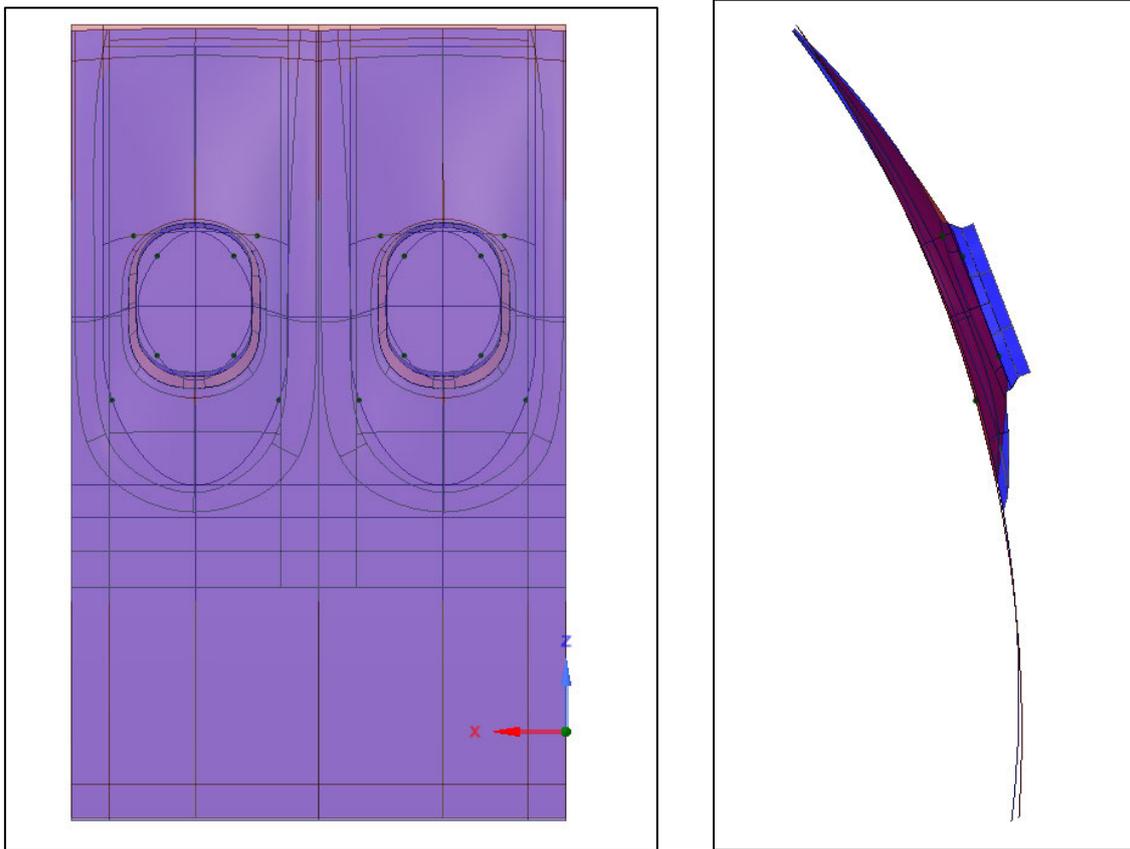


Abbildung 5.2: Übereinandergelagerte Ansicht des A330- und des erzeugten Modells

Wie man sieht sind die Modelle fast denkungsgleich. Die geringe Abweichung entsteht dadurch, dass das Modell der Seitenwand der A330 nicht perfekt zylindrisch ist, im Gegensatz zum erzeugten Modell.

Die gewählten Parameter für die Konfiguration sind die Folgenden in der Tabelle 5.1:

Tabelle 5.1: Parameter zur Erstellung des A330-Seitenwand-Modells

Radius [m]	Spantabstand [m]	Startwinkel [°]	Dado-Endwinkel [°]	Endwinkel [°]	Fensterwinkel [°]	Fensterbreite [m]	Fensterhöhe [m]
2,64	0,525	-4	10	35	19,667	0.244	0.339

Für die zweite Konfiguration wird eine Querschnittübersicht einer Kabine einer Dornier Do 728 verwendet. Ein Schmalrumpfflugzeug für Kurzstrecken. Hier werden, wie in Abbildung 5.3 gezeigt, die erzeugten Modelle an die Außenkontur der Seitenwand angelegt.

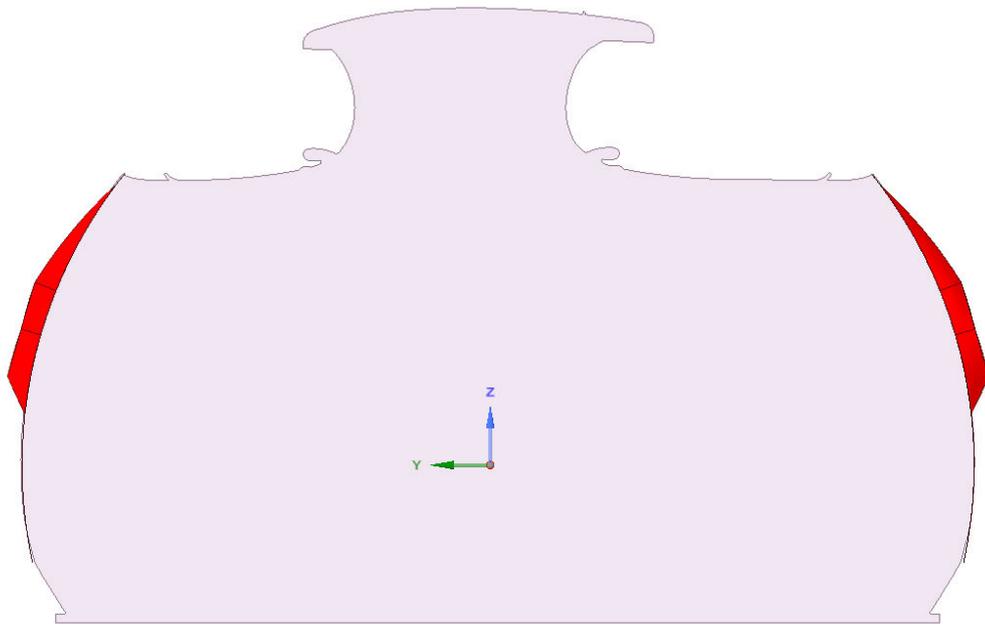


Abbildung 5.3: Querschnittsfläche einer Dornier Do 728 mit erzeugten Seitenwand-Modellen an beiden Seiten

Der untere Teil der Seitenkontur wurde in diesem Konzept weggelassen, da er ebenfalls wieder in einen nicht zylindrischen Bereich übergeht. Die Bereiche aber, die von dem erzeugten Modell abgedeckt werden, sind formschlüssig.

Die gewählten Parameter für die Erzeugung sind in Tabelle 5.2 zu finden:

Tabelle 5.2: Parameter der Dornier Do 728-Seitenwand-Modelle

Radius [m]	Spantabstand [m]	Startwinkel [°]	Dado-Endwinkel [°]	Endwinkel [°]	Fensterwinkel [°]	Fensterbreite [m]	Fensterhöhe [m]
1,625	0,635	-12	5	38,5	16,167	0.244	0.339

Die dritte Konfiguration ist die einer Seitenwand einer A350, wieder ein Großraum-Langstreckenflugzeug. Hier werden wieder Modelle nebeneinander in Abbildung 5.4 und übereinander in Abbildung 5.5 dargestellt.

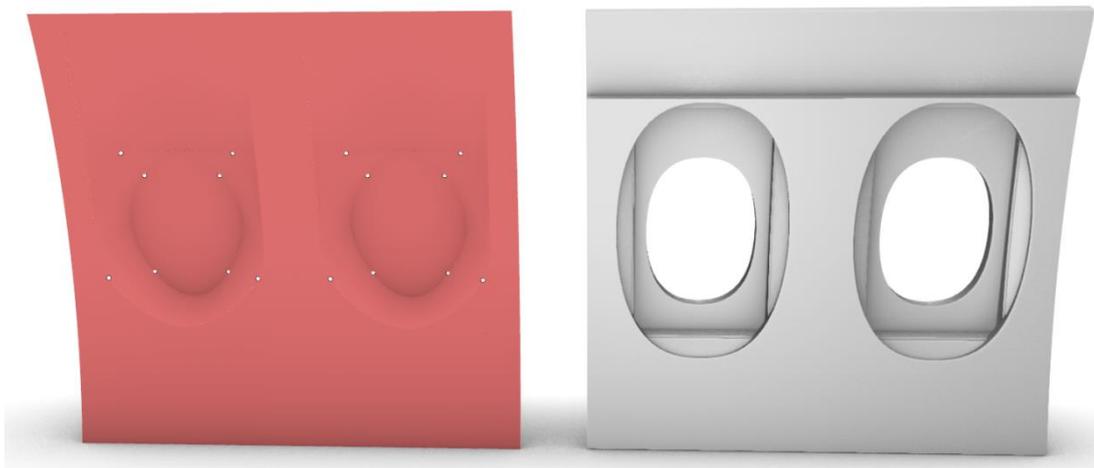


Abbildung 5.4: A350-Seitenwand-Modell und erzeugtes Modell nebeneinander



Abbildung 5.5: A350-Seitenwand-Modell und erzeugtes Modell übereinander

Die Modelle sind trotz ihrer unterschiedlichen Formen im Bereich der Fenster sehr deckungsgleich und passen gut zusammen.

Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 5.3 zu finden:

Tabelle 5.3: Parameter zur Erzeugung des A350-Seitenwand-Modells

Radius [m]	Spant-abstand [m]	Start-winkel [°]	Dado-Endwinkel [°]	End-winkel [°]	Fenster-winkel [°]	Fenster-breite [m]	Fenster-höhe [m]
2,82	0,68	-2	5	25	11,667	0.347	0.459

Die letzte Konfiguration ist die des FlightLAB Demonstrators. Der FlightLAB Demonstrator ist ein repräsentativer Rumpfabschnitt eines Kurzstreckenflugzeugs, welcher für Akustikmessungen im Labor im ZAL in Hamburg aufgebaut wurde. Hierfür wird ein Nastran FEM-Model verwendet.

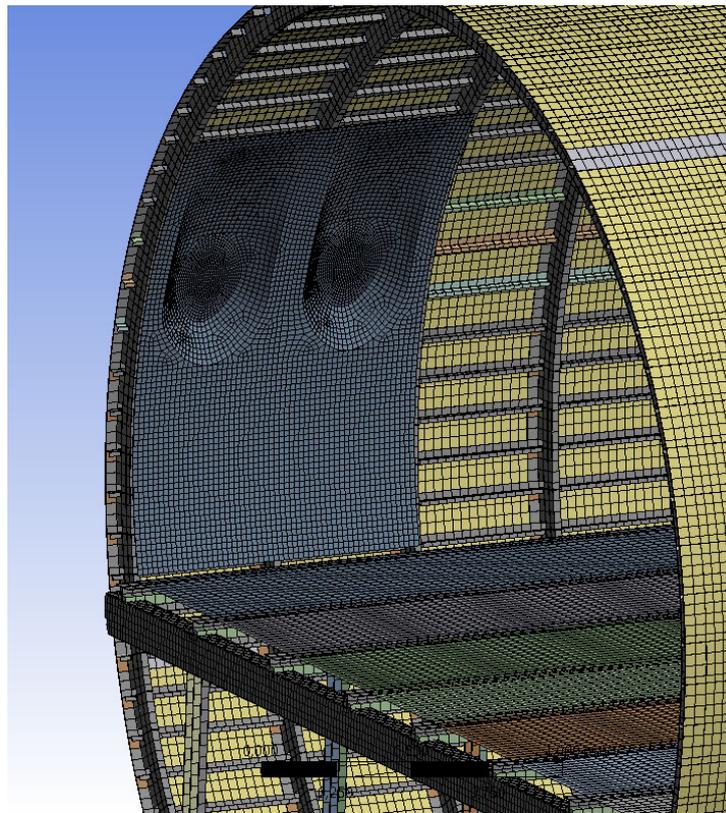


Abbildung 5.6: Erzeugtes Seitenwand-Modell eingefügt in das FLightLAB-Modell

Wie in Abbildung 5.6 zu sehen ist, legt sich das erzeugte Modell der Seitenwand gut in das Modell der Primärstruktur des FlightLAB Demonstrator. Es tut dies sowohl von der Rundung her, als auch von der Breite zwischen den Spanten der Primärstruktur.

Die verwendeten Eingabeparameter sind:

Tabelle 5.4: Parameter zur Erstellung des FlightLAB-Seitenwand-Modells

Radius [m]	Spant-abstand [m]	Start-winkel [°]	Dado-Endwinkel [°]	End-winkel [°]	Fenster-winkel [°]	Fenster-breite [m]	Fenster-höhe [m]
1,88	0,534	-15	5	35	15	0.244	0.339

5.2 Akustische Berechnungen zur Schalltransmission

In diesem Kapitel werden zuerst kurz die Berechnungen des Schalldämmmaßes in Actran vorgestellt. Darauf folgend werden die Ergebnisse dieser Berechnungen gezeigt. Die erste Berechnung entsteht aus einem kompletten Schalldurchgang, das heißt ein System aus der Primärstruktur, den beiden Kavitäten und der Sekundärstruktur. Die zweite Berechnung besteht aus einem Schalldurchgang nur durch die Seitenwand und die Empfangskavität. Zum Schluss werden für diese numerischen Berechnungen, analytische Gegenrechnungen zur Plausibilisierung durchgeführt, miteinander verglichen und diskutiert.

In Actran wird das FE-Modell der Seitenwand (mit Kavitäten) aus dem Modellgenerator mit dem der Primärstruktur aus AFUS kombiniert, um so das Schalldämmmaß dieser kombinierten Doppelwandstruktur zu berechnen. Die Kombination der Modelle in Actran ist in Abbildung 5.7 dargestellt. In der Berechnung wird die Primärstruktur mit einem diffusen Schallfeld angeregt. Dabei wird dann an der ersten Fläche, also der Außenseite Primärstruktur die einfallende Schalleistung berechnet. Hierfür wird Gleichung (2.5) verwendet. Da wir mit einem diffusen Schallfeld arbeiten, wird in der Gleichung über den Winkel gemittelt.

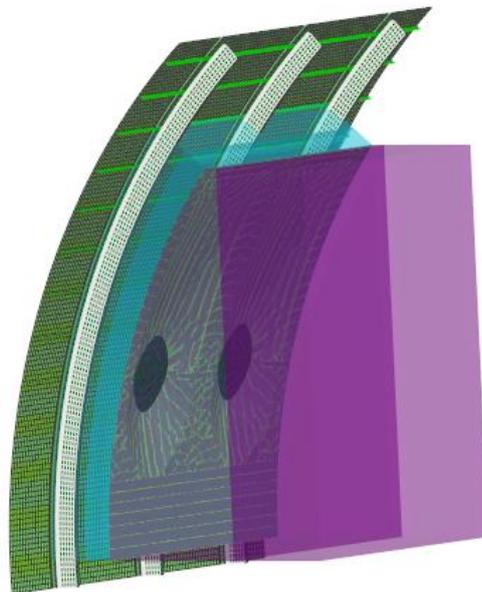


Abbildung 5.7: Modelle aus AFUS und dem Netzgenerator kombiniert in Actran

Durch die Kopplungsflächen an den Kavitäten können alle vier FEM-Netze in Actran miteinander gekoppelt werden. Es findet so ein Transport der Schallenergie durch die Strukturen und Kavitäten in die Kabine statt, wie in Abbildung 5.8 dargestellt. Hier wird dann an der Empfangskavität an der Fläche gegenüber der Seitenwand (in Abbildung 5.8 als

Austrittsfläche A_s bezeichnet) die ausgehende Leistung berechnet. Hier werden zuerst der Schalldruck und die Schallschnelle bestimmt. Dann wird nach Gleichung (2.6) die Intensität berechnet. Und über diese kann dann wieder nach Gleichung (2.5) die endgültige Schalleistung berechnet werden. An dieser Fläche werden PML (Perfect Match Layer) angenommen. Diese bilden an der Oberfläche eine unendliche Randbedingung. Dies erlaubt, dass an der Fläche keine Schallreflexionen stattfinden.

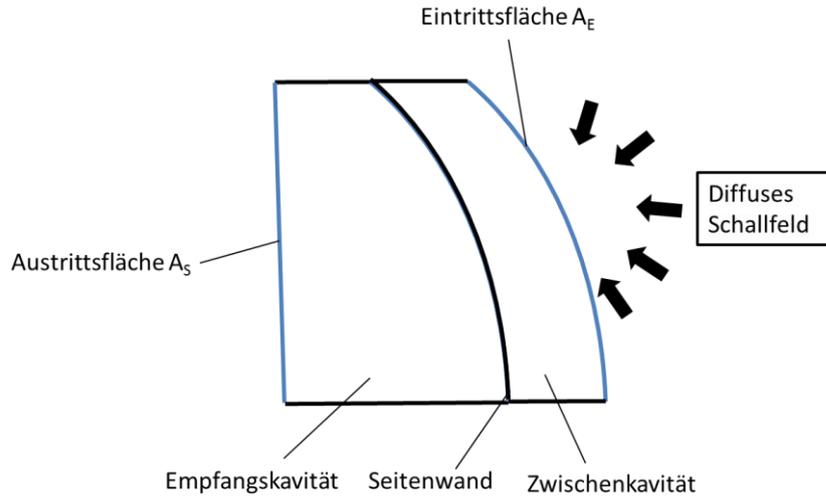


Abbildung 5.8: Schematische Darstellung des Actran Berechnungsmodells

Durch das Verhältnis von einfallender und zum Schluss abgegebener Schalleistung wird nach Gleichung (2.7) das komplette Schalldämmmaß berechnet.

Im Folgenden werden die verwendeten Parameter für die Modellerstellungen angegeben. Die geometrischen Parameter der Seitenwand sind in Tabelle 5.5 gegeben:

Tabelle 5.5: Geometrische Seitenwand Parameter

Radius [m]	Spantabstand [m]	Startwinkel [°]	Dado-Endwinkel [°]	Endwinkel [°]	Fensterwinkel [°]	Fensterbreite [m]	Fensterhöhe [m]	Fensterversatz zur Oberfläche [m]
2,7	0,635	-0,167	10	38	19,333	0.244	0.339	0,7

Die Parameter zur Erstellung der Kavitäten sind in Tabelle 5.6 zu finden:

Tabelle 5.6: Geometrische Parameter für die Kavitäten

	Länge der Kavität [m]
Zwischenkavität	0,3
Empfangskavität	0,5

Die Parameter für die Netzgenerierung sind, wie folgt in Tabelle 5.7:

Tabelle 5.7: Parameter für die Netzgenerierung

	Elementgröße [m]
Seitenwand	0,02
Zwischenkavität	0,05
Empfangskavität	0,06

Für die Seitenwand werden folgende isotrope Materialien verwendet:

Tabelle 5.8: Isotrope Materialdaten des Seitenwand-Modells

	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4
E-Modul [Pa]	$1,25 \cdot 10^{10}$	$1,7 \cdot 10^{10}$	$1,7 \cdot 10^{10}$	$3,3 \cdot 10^9$
Schubmodul [Pa]	$4,6 \cdot 10^9$	$6,3 \cdot 10^9$	$6,3 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^9$
Quer- kontraktionszahl []	0,35	0,35	0,35	0,35
Dichte [kg/m ³]	3300	5550	3370	2150

Und folgendes orthotrope Material:

Tabelle 5.9: Orthotrope Materialdaten des Seitenwand-Modells

	Material 5
E-Modul in x-Richtung [Pa]	$0,6 \cdot 10^6$
E-Modul in y-Richtung [Pa]	$0,6 \cdot 10^6$
Quer- kontraktionszahl []	0
Schubmodul in der xy-Ebene [Pa]	$0,25 \cdot 10^6$
Schubmodul in der yz-Ebene [Pa]	$25 \cdot 10^6$
Schubmodul in der xz-Ebene [Pa]	$17 \cdot 10^6$
Dichte [kg/m ³]	0

Die Seitenwandpanel-Struktur ist dabei ein Kompositwerkstoff, die wie im folgendem aufgebaut ist:

Tabelle 5.10: Aufbau des Kompositwerkstoffes der Seitenwand

	Dicke [m]	Material	Winkel [°]
Schicht 1	$0,4 \cdot 10^3$	Material 1	0
Schicht 2	$4 \cdot 10^3$	Material 5	0
Schicht 3	$0,25 \cdot 10^3$	Material 2	0
Schicht 4	$0,2 \cdot 10^3$	Material 3	0

Die Fenster haben folgenden Aufbau:

Tabelle 5.11: Aufbau des Fensters der Seitenwand

Dicke [m]	Material
$2 \cdot 10^3$	Material 4

Die Primärstruktur besteht aus dem orthotropen Material:

Tabelle 5.12: Orthotrope Materialdaten der Primärstruktur

	Material 6
E-Modul in x-Richtung [Pa]	$15,7 \cdot 10^{10}$
E-Modul in y-Richtung [Pa]	$8,5 \cdot 10^9$
Quer- kontraktionszahl []	0,35
Schubmodul in der xy-Ebene [Pa]	$4,2 \cdot 10^9$
Schubmodul in der yz-Ebene [Pa]	$4,2 \cdot 10^9$
Schubmodul in der xz-Ebene [Pa]	$4,2 \cdot 10^9$
Dichte [kg/m^3]	1580

Die Primärstruktur ist ebenfalls ein Kompositwerkstoff mit folgendem Lagenaufbau:

Tabelle 5.13: Kompositwerkstoff Lagenaufbau der Primärstruktur

	Dicke [m]	Material	Winkel [°]
Schicht 1	$0,127 \cdot 10^3$	Material 1	45
Schicht 2	$0,127 \cdot 10^3$	Material 1	-45
Schicht 3	$0,127 \cdot 10^3$	Material 1	45
Schicht 4	$0,127 \cdot 10^3$	Material 1	-45
Schicht 5	$0,127 \cdot 10^3$	Material 1	90
Schicht 6	$0,127 \cdot 10^3$	Material 1	0
Schicht 7	$0,127 \cdot 10^3$	Material 1	90
Schicht 8	$0,127 \cdot 10^3$	Material 1	0
Schicht 9	$0,127 \cdot 10^3$	Material 1	90
Schicht 10	$0,127 \cdot 10^3$	Material 1	-45
Schicht 11	$0,127 \cdot 10^3$	Material 1	45
Schicht 12	$0,127 \cdot 10^3$	Material 1	-45
Schicht 13	$0,127 \cdot 10^3$	Material 1	45

Es wird ein Frequenzband von 50 Hz bis 1000 Hz untersucht.

Um diese Rechenergebnisse zu plaubilisieren, wird eine analytische Rechnung nach der Annäherungsformel des Bergschen Massengesetzes durchgeführt, sowohl für das einschalige Bauteil als auch für die Doppelwand. In beiden Fällen ergibt sich eine Koinzidenzfrequenz, die über der höchsten Frequenz des untersuchten Frequenzbandes liegt. Dadurch wird für die Berechnung für den einschaligen Fall nach Gleichung (2.9) durchgeführt. Im zweischaligen Fall wird Gleichung (2.9) in (2.13) eingefügt. Für die gesamte flächenbezogene Maße werden bei der Doppelwand die einzelnen flächenbezogenen Massen der einzelnen Schichten des Kompositwerkstoffes der Primärstruktur aufsummiert. Bei der Seitenwand wird stattdessen sich auf die Gesamtmasse bezogen, die das Modell in Ansys aufweist. Diese wird dann durch die Gesamtfläche des Panels geteilt.

Wenn man nun beide Ergebnisse gegeneinander aufträgt, erhält man folgende Graphen Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10:

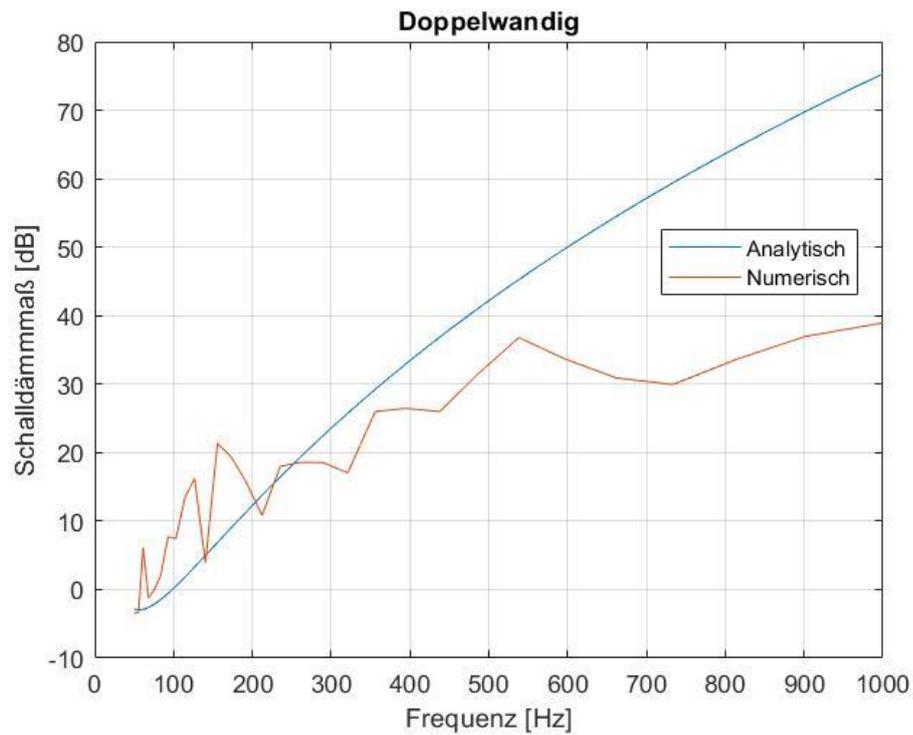


Abbildung 5.9: Vergleich der numerischen und analytischen Berechnung der Doppelwand Konfiguration

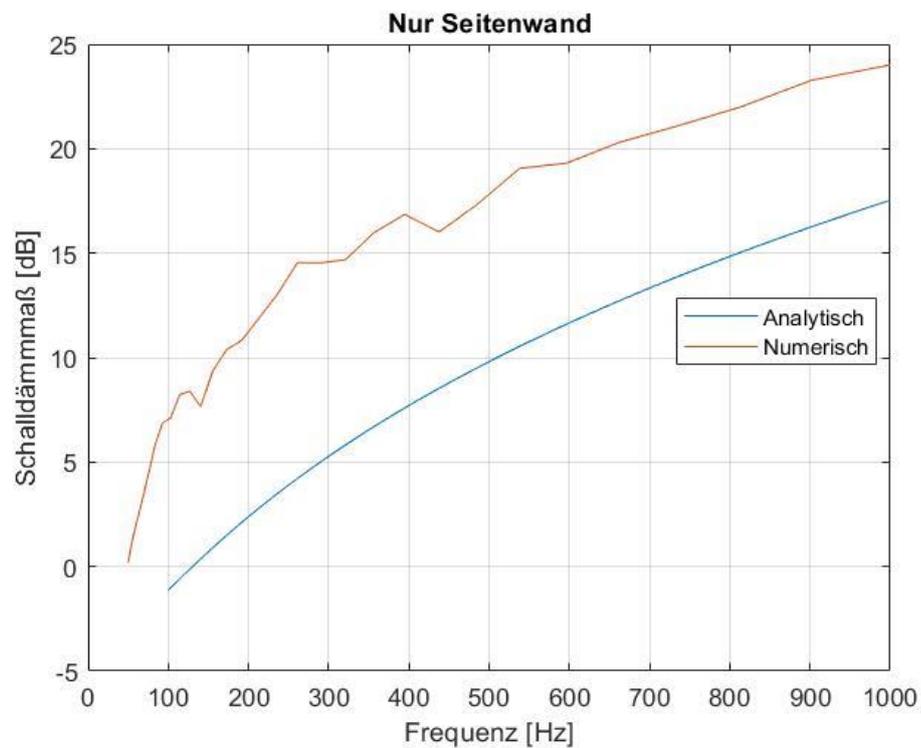


Abbildung 5.10: Vergleich der numerischen und analytischen Berechnung der Seitenwand

Wie man sieht, gibt es erkennbare Abweichungen zwischen den Graphen der numerischen und analytischen Berechnung. Diese kommen durch das grundlegende Unterschiedliche Vorgehen. Speziell die analytische Bergersche Massenformel ist nur eine Näherungsformel, die von unendlichen langen Schalen ausgeht. Das Vorhandensein einer Einspannung der Schalenbauteile kann bereits diese Abweichung hervorrufen. Dies wurde auch in der Dissertation [6] bestätigt.

Da aber die grundlegende Form der Kurven sich ähnelt, kann man vom selben Verhalten beim Schalldurchgang sprechen. Dies reicht, um zu zeigen, dass diese Modelle sowohl allein stehend als auch kombiniert mit den Primärstrukturmodellen von AFUS für akustische Berechnungen verwendbar sind.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Finite-Element Netzgenerator ist ein automatisierter Vorgang entwickelt worden, der sehr schnell Netzmodelle für verschiedenste Seitenwandkonfigurationen erzeugt. Diese Modelle lassen sich in verschiedenen Formen und in verschiedenen Programmen weiterverwenden. Außerdem lässt sich die Komplexität der Modelle (mit oder ohne Kavität) und die Art der Modelle (als CAD-Geometrie oder als FEM-Netz) einfach ändern. Außerdem ist es durch die Modularität möglich, die Modelle jederzeit zu erweitern und realitätsnäher zu gestalten.

Diese Modelle können für viele Anwendungsmöglichkeiten weiterverwendet werden. Die Netzmodelle können für akustische Abschätzungen in der Schalltransmission verwendet werden. Sie können ebenfalls für die Massenabschätzung, Schwerpunktberechnung und Bestimmung des Trägheitsverhaltens der Seitenwände eingesetzt werden. Diese werden benötigt als Teil eines gesamten Flugzeugmodells, das für Crash-Verhalten und „Ditching“-Simulationen von Flugzeugen verwendet werden. Die CAD-Geometrien können zur weiteren Benutzung in anderen Vernetzern für Vergleichsmodelle verwendet werden.

Trotzdem gibt es noch viele Möglichkeiten in der Zukunft den Netzgenerator weiter zu verbessern. Die Netzqualität kann verbessert werden. Viele Bereiche des Netzes sind noch immer unstrukturiert. Auch, wie bereits erwähnt worden, kann die Komplexität der Geometrie erhöht werden, um so realistischere Modelle zu erreichen. Weiteres Verbesserungspotential haben auch die Kavitätsnetze. Diese sind zu einem großen Teil in nicht strukturierter Form und beinhalten viele Pentaeder-Elemente. Hier kann man versuchen dieses Netz in ein größtenteils Hexaeder-Netz zu ändern. Dies trägt einen großen Beitrag zu der Genauigkeit in der Simulation des Schalldurchganges.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Möser, M.: Technische Akustik, 7., erweiterte und aktualisierte Auflage, Springer, Berlin 2007.

- [2] Ackermann, L.: Simulation der Schalltransmission durch Wände, Institut für Angewandte Mechanik der Technische Universität Braunschweig, Braunschweiger Schriften zur Mechanik, 2002.

- [3] Sinamnari, Gh. R.; Sentpali, S.: Ingenieurakustik, 6. Auflage, Springer, Berlin 2020.

- [4] Möser, M.; Müller, G.: Grundlagen der Technischen Akustik, Springer, Berlin 2017.

- [5] Mechanical APDL 2020 R1, Theory Reference, ANSYS, Inc., 2020.

- [6] Tewes, S.: Active Trim Panel Attachments for Control of Sound Transmission through Aircraft Structures, Lehrstuhl für Leichtbau der Technischen Universität München, München 2006



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Nayel

Vorname: Mohamed Farid

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Entwicklung eines parametrischen Netzgenerators für die Simulation der Schalltransmission beim Kabinenentwurf von Flugzeugen

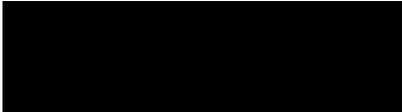
ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Bachelorarbeit ist erfolgt durch:

Hamburg
Ort

28.05.2020
Datum


Unterschrift im Original