

Luftfahrtforschung und -technologie

Abschlussbericht

Maßnahmen u. aktive Methoden zur Unterdrückung v. Triebwerkslärm (MAMUT)

Förderkennzeichen 20T1524B

Laufzeit: 01.07.2016 bis 31.12.2020

Berichtersteller: Dr. Florian Krömer

MTU Aero Engines AG

München, Juni 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Zusammenfassung.....	5
2.1	Projektstrukturplan (Verbund).....	5
2.2	Projektstrukturplan HAP 2 (MTU)	5
2.3	Erreichte Ergebnisse	6
2.3.1	AP 2.1 Radialmodenanalyse experimenteller und numerischer Daten	7
2.3.2	AP 2.2 3D-Simulation mehrstufiger Turbinen.....	8
2.3.3	AP 2.3 Verbesserte 1D-Modellierung von Turbinenlärm.....	10
2.3.4	AP 3.3.2 Haystacking Methoden und Validierung	11
3	Technische Darstellung der Arbeitspakete.....	12
3.1	AP 2.1 Radialmodenanalyse experimenteller u. numerischer Daten.....	12
3.2	AP 2.2 3D-Simulation mehrstufiger Turbinen	16
3.3	AP 2.3 Verbesserte 1D-Modellierung von Turbinenlärm.....	29
3.4	AP 3.3.2 Haystacking Methoden und Validierung.....	34
4	Literaturverzeichnis	35

1 Einleitung

Ein weiterer Anstieg des Luftverkehrs wird von der Bevölkerung nur dann akzeptiert, wenn gleichzeitig sichergestellt ist, dass der Lärmpegel in der Umgebung von Flughäfen auf keinen Fall weiter ansteigt. Dies bedeutet, dass heute die Technologien zur Lärmreduktion für die zukünftigen Flugzeuge entwickelt werden müssen.

Im Strategiedokument „Flightpath 2050“ sind Umweltschutzziele formuliert, die eine Reduktion des empfundenen Fluglärms um 65% gegenüber dem Stand der Technik im Jahr 2000 erfordern.

MAMUT trägt zur Erreichung der hoch gesteckten Lärminderungsziele für den Fluglärm bei, indem Triebwerks-, Flugzeug- und Komponentenhersteller in einem Verbund gemeinsam mit Großforschungseinrichtungen und KMU an **Maßnahmen und aktiven Methoden zur Unterdrückung von Triebwerkslärm** arbeiten und die dafür relevanten Simulations- und Messverfahren erforschen und entwickeln. Hierbei ist MAMUT mit anderen nationalen und europäischen Forschungsprojekten abgestimmt.

Das Ziel des Verbundes MAMUT war es, den entstehenden Lärm von modernen/ zukünftigen High Bypass Ratio Triebwerken einschließlich der Installation am Flugzeug bei allen lärmrelevanten Flugsituationen (Start, Überflug, Landung) zu mindern. Dafür wurden Technologien und Methoden zur Auslegung lärmarmen Triebwerke und Flugzeuge in der Flugzeug- und Triebwerksindustrie in Deutschland verfügbar gemacht.

Im Verbund MAMUT war speziell der Turbomaschinenlärm Gegenstand der Untersuchungen. Das beinhaltete (1) die Schallentstehung durch Rotor-Stator Interaktion und (2) deren aktive Minderung, (3) die Schallausbreitung im Triebwerk einschließlich der Absorption an akustischen Auskleidungen, (4) die Schallabstrahlung und (5) Installationseffekte (Reflexion und Abschattung durch Rumpf und Flügel), wie auch die aktive Beeinflussung zur Lärmreduktion. Im Einzelnen wurden Methoden für folgende Lärmquellen und Ausbreitungs-/Abstrahlungsmechanismen für breitbandige und tonale Anteile, insbesondere, aber nicht ausschließlich, für Turbomaschinenlärm entwickelt:

- Schallquellidentifikation in geschlossenen Triebwerks-Prüfständen
- Fan-Lärmentstehung

- Optimierung der Ausbreitung und Abstrahlung von Tönen am Triebwerkseinlauf unter Anwendung von adjungierten Verfahren
- Abschattung und Reflexion von Tönen beim installierten Triebwerk
- Turbinenlärmstehung und Ausbreitung
- Radialmodenanalyse

Auflistung der Arbeitspakete mit beteiligten Partnern:

HAP 1: Fan Installation und Triebwerksmesstechnik (RRD, DLR, CFDB)

HAP 2: Modellierung und Analyse von Turbinenlärm (MTU, DRL)

HAP 3: Aktive Beeinflussung von Tönen (MTU, RRD, DLR, AGI, CFDB)

2 Zusammenfassung

2.1 Projektstrukturplan (Verbund)

Abbildung 1 stellt den Projektstrukturplan des Gesamtverbunds dar, aktualisiert entsprechend des Aufstockungsantrags vom 29.04.2019 (APs mit Inhalten aus der Aufstockung sind durch eine rote Umrandung gekennzeichnet). Hierbei befinden sich die MTU-Arbeitspakete hauptsächlich im von MTU geleiteten HAP 2. Ein weiterer MTU-Beitrag ist auch im vom DLR Braunschweig geleiteten Arbeitspaket AP3.3 (Thema: Haystacking) enthalten.

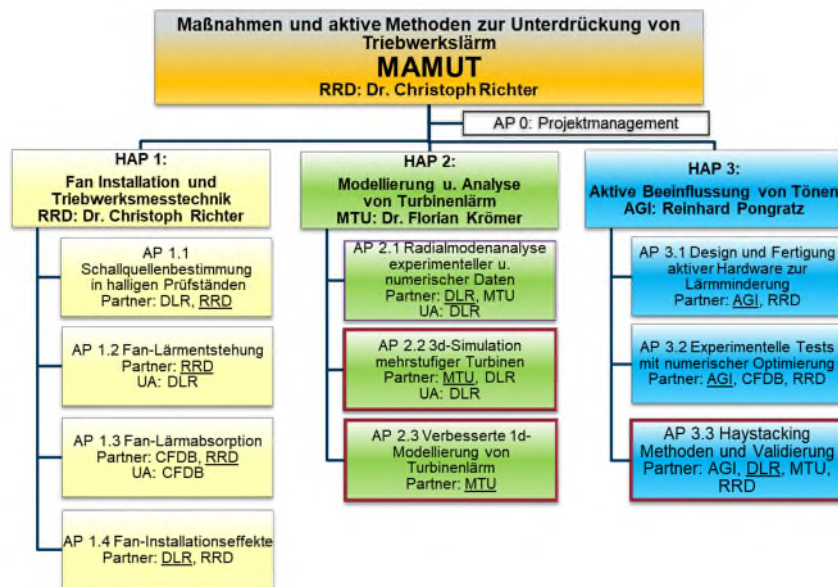


Abbildung 1: Projektstrukturplan des Verbundvorhabens

2.2 Projektstrukturplan HAP 2 (MTU)

Das von MTU geleitete Teilprojekt HAP 2 gliedert sich in 3 Arbeitspakete mit weiteren Unterarbeitspaketen (vgl. Abbildung 2):

- AP 2.1 mit Arbeiten zur Erweiterung der Radialmodenanalyse experimenteller sowie numerischer Daten
- AP 2.2 mit Arbeiten zur numerischen Simulation von Turbinenlärm mit der Har-

monic Balance (HB) Methode (inkl. Postprocessing), entsprechend Aufstockungsantrag vom 29.04.2019.

- AP 2.3 mit Arbeiten zur verbesserten 1D-Prognose von Turbinenlärm mittels eines semi-empirisch/ analytischen Verfahrens und mit der Erweiterung des Schallvorhersageverfahrens PropNoise (entsprechend Aufstockungsantrag vom 29.04.2019).

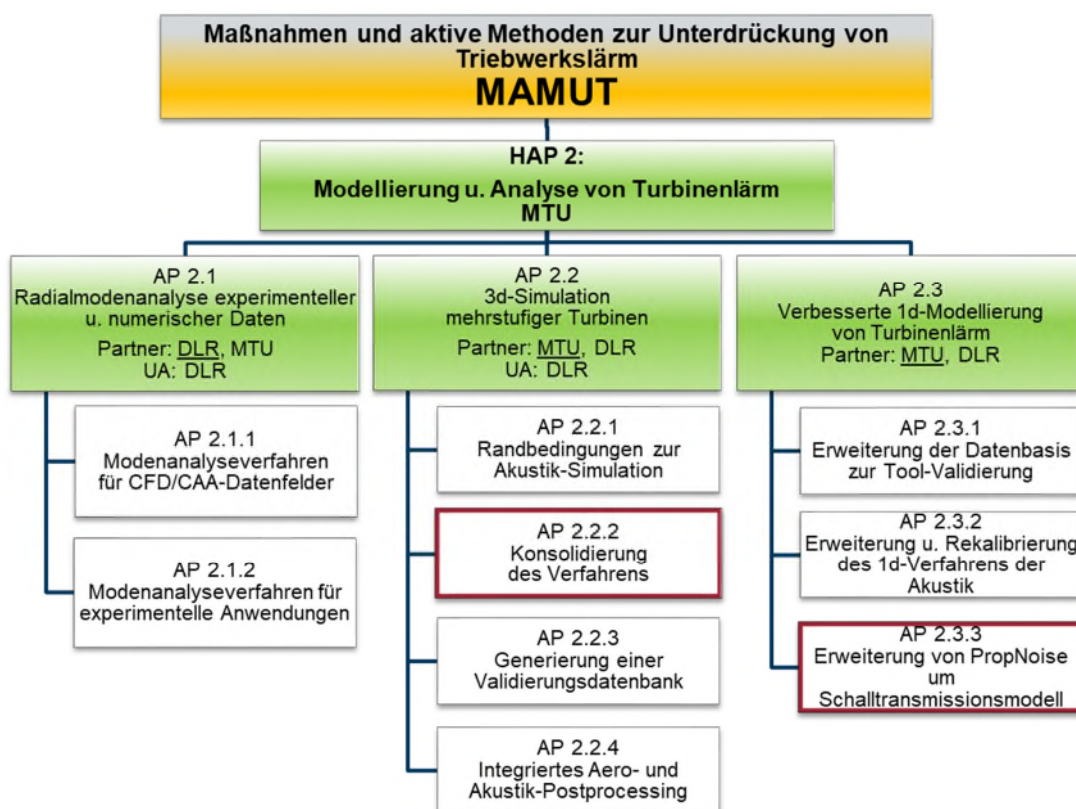


Abbildung 2: Projektstrukturplan HAP 2 (APs mit Inhalten aus der Aufstockung sind durch eine rote Umrandung gekennzeichnet).

2.3 Erreichte Ergebnisse

Das Verbundvorhaben MAMUT startete im Juli 2016. Am 15. September 2016 fand das Kick-Off Meeting mit allen Verbundpartnern statt. Es wurden jährlich bis zum Abschluss des Vorhabens Statustreffen der Partner mit Beteiligung des Projektträgers durchgeführt.

In 2018 wurde ein inhaltlicher Änderungsantrag gestellt, der die Arbeitspakete AP2.2.2

und AP2.2.3 betrifft. Dieser wurde am 13.09.2018 bewilligt. Von Seiten der MTU wurde – in Abstimmung mit den Projektpartnern RRD, DLR und CFD-Berlin – in 2019 ein Änderungs- und Verlängerungsantrag eingereicht, welcher im November 2019 genehmigt wurde. Eine weitere genehmigte Verlängerung erfolgte in 2020.

2.3.1 AP 2.1 Radialmodenanalyse experimenteller und numerischer Daten

Das Arbeitspaket AP 2.1 befasste sich mit der Erweiterung der akustischen Radialmodenanalyse hinsichtlich der Berücksichtigung realer Strömungen und Strömungskanäle mit veränderlichen Querschnitten (Extended Radial Mode Analysis = XMA). Diese Erweiterungen stellen eine Weiterführung der Arbeiten aus LuFo 4/4 „LeiLa“ (Broszat, D., 2016) dar und befassen sich mit der akustischen Analyse sowohl experimentell gewonnener als auch numerisch vorhergesagter Daten.

Im Rahmen des Arbeitspakets wurden entsprechend der Planung Untersuchungen zur Erweiterung der Radialmodenanalyse (XMA) durchgeführt. Es erfolgten Arbeiten für die Anwendung auf experimentelle und numerische Daten.

Seitens DLR Berlin wurde zunächst die Validierung des numerischen Eigenwertlösers basierend auf experimentellen Daten durchgeführt. Es wurde die Überprüfung des Algorithmus zur numerischen Bestimmung der Eigenwerte und -funktionen der Schallmoden unter Berücksichtigung einer realen Strömung (radiales Geschwindigkeits- und Drallprofil) anhand einer Reihe von Testfällen durchgeführt. Eine besondere Herausforderung stellte die korrekte Sortierung der Eigenwerte dar. Zudem wurde die Funktionalität (numerisch bestimmte Eigenwerte/-funktionen) auf experimentelle Daten angewendet und deren Einfluss auf die Konditionierung des Gleichungssystems untersucht.

Auf Seiten des DLR wurde zudem die Integration des SVD-Modells (Slowly Varying Duct) und die Erweiterung des Eigenwertproblems auf die Energiegleichung in der C3D-XMA Standalone Version (C3D: Connect3d, akust. Postprocessing-Verfahren

des DLR) durchgeführt. Diese Standalone Version wurde an MTU übermittelt. Außerdem erfolgte die Übermittlung des XMA-Quellcodes zur Integration in das MTU Post-processing Tool POST (in AP2.2.4). Beim DLR wurde darüber hinaus der Dralleinfluss bei der Auswertung experimenteller Daten untersucht und eine Best Practice Guideline für die Anwendung der XMA erstellt.

Auf Seiten der MTU wurde die XMA in der Standalone Version, inkl. SVD-Modell und Erweiterung des Eigenwertproblems, auf mehrere Testfälle angewendet und der Auswertung des bisherigen Postprocessings mittels der Standard Radialmodenanalyse RMA gegenübergestellt. Für die Testfälle liegt bis auf wenige Ausnahmen eine sehr gute Übereinstimmung mit der RMA vor, was es mit diesen speziellen Testfällen zu bestätigen galt – die Testfälle waren speziell darauf ausgelegt, dass die Einschränkungen und Annahmen der RMA erfüllt werden. Somit besteht die Möglichkeit der praktischen Anwendung der XMA im MTU-Umfeld.

Ferner wurde die Anwendung mit dem Fokus auf reale Turbinen-Testfälle untersucht. Dabei zeigte sich, dass XMA-Auswertungen grundsätzlich gleiche Tendenzen wie RMA-Auswertungen aufweisen. Hinsichtlich der absoluten Schallleistungspegel zeigten sich zwischen beiden Auswertemethoden jedoch Unterschiede – dies bestätigt die Notwendigkeit der XMA-Anwendung, um auch bei komplexen Testfällen die Schallleistungspegel physikalisch korrekt analysieren und wiedergeben zu können.

Im AP2.1 wurden alle Meilensteine plangemäß abgeschlossen.

2.3.2 AP 2.2 3D-Simulation mehrstufiger Turbinen

Das Arbeitspaket AP 2.2 befasste sich mit der 3D-Simulation in mehrstufigen Turbomaschinen, insbesondere in der Niederdruckturbine (NDT) als Triebwerkskomponente. Dabei wurde das bereits in „MASSIF-Effekt“ (Broszat, D., 2013) und „LeiLa“ (Broszat, D., 2016) entwickelte und für akustische Untersuchungen eingesetzte Harmonic Balance (HB)-Verfahren, insbesondere hinsichtlich seiner Robustheit, d.h. dem Erzielen einer Konvergenz für alle relevanten Anwendungsfälle, Betriebspunkte und

Frequenzen, verbessert (DLR Eigenantrag) und ausführlich getestet. Zudem wurden zwei spezifische Randbedingungen ergänzt, welche für akustische Simulationen notwendig sind (Acoustic Gust u. Impedanz-Randbedingungen). Die Schnittstellen von dem bereits in „LeiLa“ erweiterten und zum Einsatz gebrachten Akustik-Postprocessing-Verfahren Connect3d (C3D)-RMA wurden aktualisiert und für die Erweiterung der akustischen Modenanalyse (XMA, aus AP2.1) vorbereitet. Das Akustik-Postprocessing lässt sich nun als ein Modul des aerodynamischen Postprocessing-Verfahrens POST aufrufen und nutzt gemeinsame Bibliotheken für RMA und XMA.

Im Rahmen des Vorhabens wurden auf Seiten von DLR Köln die zwei zusätzlichen Randbedingungen (Acoustic Gust- und Impedanz-Randbedingung) nach der Spezifikation der MTU in HB implementiert und getestet. Zur Überprüfung und Validierung des HB-Verfahrens sowie zur Bias-Ableitung wurde eine Testmatrix erstellt. In den Tests wurde die grundlegende Funktionsweise bestätigt.

Anhand weiterer Testfälle wurde die im Rahmen von MAMUT verbesserte Version des Akustik-Postprocessing-Verfahrens POST-Connect3D erprobt.

In Verbindung mit der neu hinzugekommenen Aufgabe eines Heißgas-Absorber-Tests am HAT-Prüfstand (Hot Acoustic Test-Rig) des DLR Berlin (im Rahmen des in 2018 gestellten Änderungsantrags) wurden Prototypen der zwei Absorber-Samples mittels Additive Manufacturing (AM) gefertigt und an das DLR Berlin übermittelt. Nach dem Einbau im Prüfstand wurde für die Testmatrix eine Vermessung unter Heißgas-Bedingungen absolviert. Die Messungen wurden vollständig analysiert und Resultate in Form eines Berichts an MTU übergeben. Bei MTU erfolgte die Gegenüberstellung mit Simulationsdaten des kommerziellen Verfahrens ACTRAN TM. Mit den im HAT-Prüfstand gewonnenen Daten konnte ACTRAN TM auch für den Heißgas-Bereich validiert werden.

Zur Validierung des instationären 3D-Simulationsverfahrens TRACE HB wurde eine Datenbank erstellt. Hierzu wurden Testfälle aus verschiedenen Rig-Aufbauten der MTU herangezogen. Der Gesamtaufwand belief sich dabei auf über 300 HB Simulationen. Parallel dazu wurden auch die entsprechenden Simulationen mit dem bisherigen

3D-CAA-Tool der MTU, Lin3D, auf die neuesten Toolversionen und Setups nachgezogen. Abschließend wurden die Simulationsdaten den Messdaten gegenübergestellt und es wurde sowohl für TRACE HB als auch für Lin3D der Bias, also die systematische Abweichung zwischen Simulation und Messung, berechnet.

Im AP2.2 wurden alle Meilensteine plangemäß abgeschlossen.

2.3.3 AP 2.3 Verbesserte 1D-Modellierung von Turbinenlärm

Dieses Arbeitspaket befasste sich zum einen mit der Erweiterung und Rekalibrierung des MTU-eigenen semi-empirischen 1D-Turbinenlärmverfahrens TCLow (Turbine & Compressor LOWson). Dieses sollte in einzelnen Modulen bezüglich der Qualität der Vorhersage verbessert und erweitert werden. Zum anderen wurde es anhand einer umfangreicheren und vereinheitlichten Datenbank aus akustischen Triebwerks- und Prüfstandsdaten validiert und kalibriert.

Im Rahmen des AP 2.3.1 (Erweiterung der Datenbasis zur Tool-Validierung) wurde eine Standard-Vorgehensweise zur Separierung des Turbinenlärms aus SPL-Spektren (Sound Pressure Level), die aus Triebwerks-Bodenstandtests ermittelt wurden, definiert. Damit wurde die gesamte experimentelle Datenbank der MTU ausgewertet. Des Weiteren wurde eine verfeinerte Spezifikation für das Tool TCLow festgelegt und alle Testpunkte der vorhandenen experimentellen Datenbank damit einheitlich nachgerechnet.

Zur automatischen Durchrechnung der gesamten Datenbank wurde ein Skript implementiert. Hierdurch konnten erhebliche Bearbeitungszeitvorteile gegenüber der manuellen Berechnung erzielt werden.

Mit der aktualisierten Datenbank aus TCLow -Rechnungen und experimentellen Daten wurde der TCLow -Bias aktualisiert.

Im AP 2.3.2 (Erweiterung und Rekalibrierung des 1D-Verfahrens der Akustik) wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Die TCLow Einlese-Routine wurde erweitert, um eine neue Ausgabedatei des

Mehrschnitt-Aerodynamikverfahrens SGV einzulesen. Die Einlese-Routine wurde anhand eines Prototypen erprobt.

- Basierend auf der Analyse der experimentellen Datenbank wurde ein Ansatz zur Modellierung der NDT-Richtcharakteristik vorgeschlagen, welcher im Laufe des Projekts konsolidiert wurde.
- Die Berechnung der TCLow -Testsuite wurde automatisiert, um die Auswirkungen der untersuchten Modelländerungen schnell bewerten zu können.
- Die Portierung in eine moderne, objektorientierte, modular aufgebaute Programmiersprache wurde mit dem Unterauftragnehmer T-Systems SfR (Solutions for Research) umgesetzt. Für repräsentative Testfälle liefert die neue Toolversion plausible Ergebnisse.
- Für die verbesserte Modellierung der Fernfeldausbreitung (Richtcharakteristik) konnten wertvolle Zusammenhänge identifiziert werden.
- In die neue Toolversion wurde eine weiterentwickelte Modellierung der Schaufelnachläufe implementiert und getestet.

Im AP2.3 wurden alle Meilensteine plangemäß abgeschlossen.

2.3.4 AP 3.3.2 Haystacking Methoden und Validierung

Gegeben durch die hohe Relevanz und Komplexität des Themas Haystacking wurde über einen Aufstockungsantrag innerhalb von MAMUT ein neues Arbeitspaket AP3.3.2 geschaffen, das für Vorarbeiten zu dem im Fördervorhaben Lufo 6/1 „MUTE“ geplanten Arbeitspaket „Haystacking Methoden und Experimente“ vorgesehen ist. Die Vorarbeiten umfassten eine Analyse der vorliegenden Triebwerks- und Rig-Datenbank.

Im AP 3.3.2 wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Ein verbessertes Haystack-Modell zur Modellierung der Nahfeldausbreitung durch Scherschichten konnte gegenüber Messdaten evaluiert werden.
- Es erfolgte die Integration des entwickelten Haystack-Modells in die neue TCLow Version.

3 Technische Darstellung der Arbeitspakete

3.1 AP 2.1 Radialmodenanalyse experimenteller u. numerischer Daten

Ziel des Arbeitspakets war es, die erweiterte Radialmodenanalyse (Extended Radial Mode Analysis = XMA) als Weiterführung der Arbeiten aus LuFo 4/4 „LeiLa“ wissenschaftlich abzuschließen, das Verfahren anhand relevanter Testfälle zu validieren und zur Integration in das DLR-Tool Connect3d bereitzustellen. Die XMA-Methode sollte sowohl für numerische Anwendungen als auch für die Analyse experimenteller Daten entwickelt und validiert werden.

AP2.1.1 Modenanalyseverfahren für CFD/CAA-Datenfelder

Seitens des DLR wurden Arbeiten am C3D-XMA Programmcode mit der Integration des SVD-Modells (SVD: Slowly Varying Duct) und der Erweiterung des Eigenwertproblems auf die Energiegleichung durchgeführt. Hinsichtlich des Modenanalyseverfahrens für experimentelle Anwendungen wurde vom DLR der Vergleich der XMA-Auswertungen mit der Standard Radialmodenanalyse (RMA) durchgeführt, die Genauigkeit gegenüber der Standard-RMA bewertet und darauf basierend eine Best Practice Guideline für praktische Anwendungen erarbeitet. Darin wird auf folgende Aspekte eingegangen: Analysefrequenz, Grenzschichtdicke, azimutale und radiale Modenordnung, Ausbreitungsrichtung und Sensoranordnung.

Auf MTU-Seite wurden spezielle Testfälle mittels der XMA analysiert und den Ergebnissen der Standard-Radialmodenanalyse (RMA) gegenübergestellt. Ein beispielhafter Vergleich anhand zweier Azimutalmoden von komplexeren Testfällen, bei denen keine identischen Ergebnisse zwischen RMA und XMA zu erwarten sind, ist in Abbildung 3 dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Verteilung der Schallleistung auf die Radialmoden je nach Verfahren unterschiedlich ausfällt. Dies ist durch die vereinfachenden Annahmen bei der Standard Radialmodenanalyse (RMA) zu erklären (u.a. die Annahme von Festkörperdrall und die Vernachlässigung des Grenzschichtinflusses).

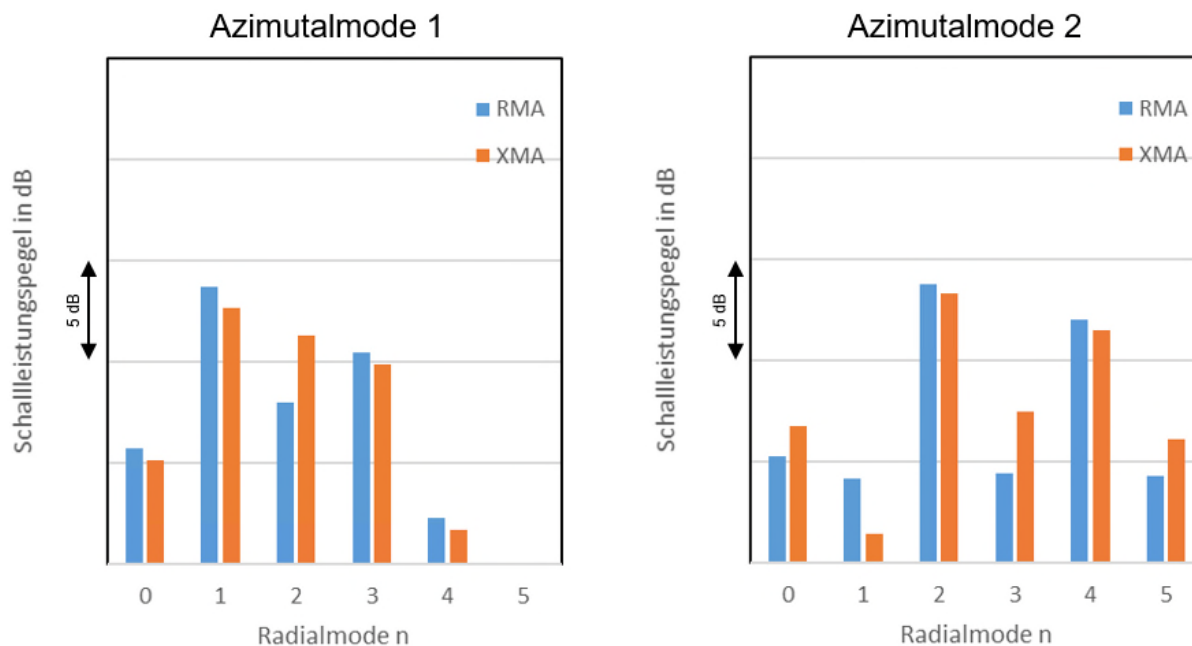


Abbildung 3: Vergleich - RMA vs. XMA, Auswertung verschiedener Azimutalmoden

Ferner wurden bei der MTU reale Turbinen-Testfälle untersucht. Dazu wurden Simulationsdaten zweier Testaufbauten eines Turbinen-Rigs einmal ohne und einmal mit TEC (Turbine Exit Case), also mit und ohne Drall in der Abströmung, analysiert. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Abbildung 4 dargestellt. Die RMA-Auswertung (am Austritt des Simulationsgebiets) wurde dabei jeweils mit der Annahme einer axial konstanten Strömung (plug flow) „RMA PF“ und mit der Annahme einer axial konstanten Strömung sowie eines überlagerten Festkörperdralls (solid body swirl) „RMA PF SBS“ durchgeführt. Zusätzlich zur RMA ist die Auswertung der XMA abgebildet. Generell ist zu erkennen, dass die Ergebnisse der Verfahren grundsätzlich ähnliche Tendenzen zeigen. Vereinzelt treten Unterschiede größer als 5dB zwischen den verschiedenen Auswertungen auf (lila umrandet). Insbesondere in Abbildung 4 unten treten bei einer Mode erhebliche Unterschiede zwischen der RMA- und der XMA-Auswertung auf. Somit ist zu einer physikalisch korrekten Bestimmung des Schalleistungspegels aller auftretenden Moden generell die XMA anzuwenden, da diese das real vorhandene Strömungsprofil an der Analyseebene berücksichtigt – man ist also nicht mehr auf die vereinfachenden Annahmen der RMA beschränkt.

Bei den Testfällen stellte sich heraus, dass mathematische Artefakte fälschlicherweise zu den akustischen Moden zugeordnet wurden, vor allem bei der Mode $m=0$. Da die Mode $m=0$ nur in sehr seltenen Fällen bei realen Anwendungen auftritt, ist die XMA dennoch produktiv bei der MTU anwendbar – mit der Einschränkung, dass die Mode $m=0$ vorerst nicht mit der XMA, sondern stattdessen mit der RMA analysiert werden sollte. Zur genauen Klärung dieser Fragestellung sind weitere Arbeiten ggf. im Rahmen eines Folgeprojekts erforderlich.

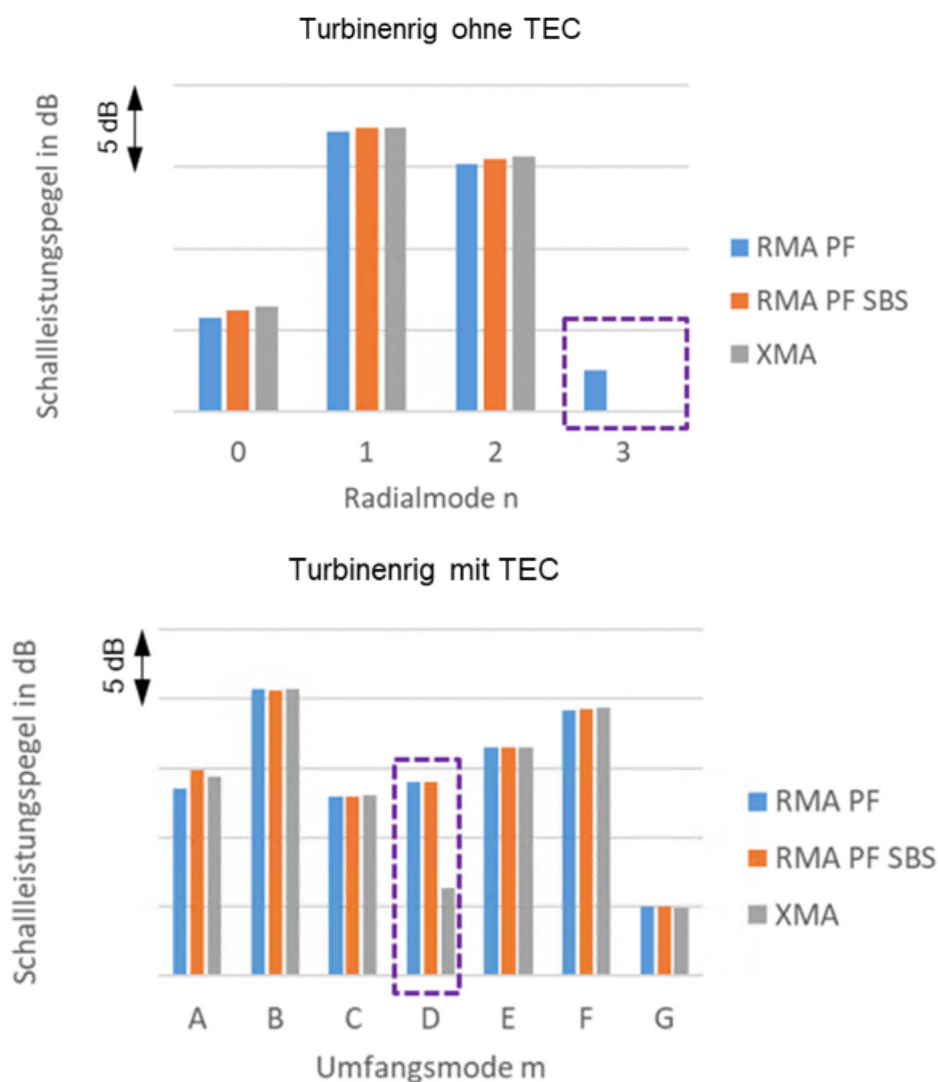


Abbildung 4: Vergleich: RMA vs. XMA, Auswertung anhand Turbinen-Testfälle. Oben: verschiedene Radialmoden einer Umfangsmode, unten: verschiedene Umfangsmoden.

AP2.1.2 Modenanalyseverfahren für experimentelle Anwendungen

Durch das DLR Berlin wurde die Auswertung mittels der erweiterten Radialmodenanalyse XMA auf experimentelle Daten aus dem MTU Turbinen-Rig angewendet.

Dabei lag der Fokus, wie auch schon bei den numerischen Testfällen, auf zwei Konfigurationen: ohne und mit TEC (Turbine Exit Casing), also mit und ohne Drall in der Abströmung.

Beispielhafte RMA- und XMA-Auswertungen der Konfiguration ohne TEC sind in Abbildung 5 dargestellt. Die Unterschiede zwischen RMA und XMA sind deutlich zu erkennen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass erst mit der XMA das reale Grenzschichtprofil sowie der tatsächliche Drallverlauf berücksichtigt werden können. Eine physikalisch richtige Bestimmung der Schalleistungswerte ist somit in diesem Fall erst durch Anwendung der XMA möglich.

Generell zeigte sich bei den Auswertungen, dass die RMA und die XMA gleiche Tendenzen aufweisen, dass aber jedoch bei einigen Fällen größere Unterschiede zwischen den Schalleistungswerten der RMA und XMA auftraten – analog zu den numerischen Daten. Hier können wiederum erst durch die XMA die real vorliegenden radialen Profile der Axial- und Umfangsgeschwindigkeit bei der Auswertung berücksichtigt werden.

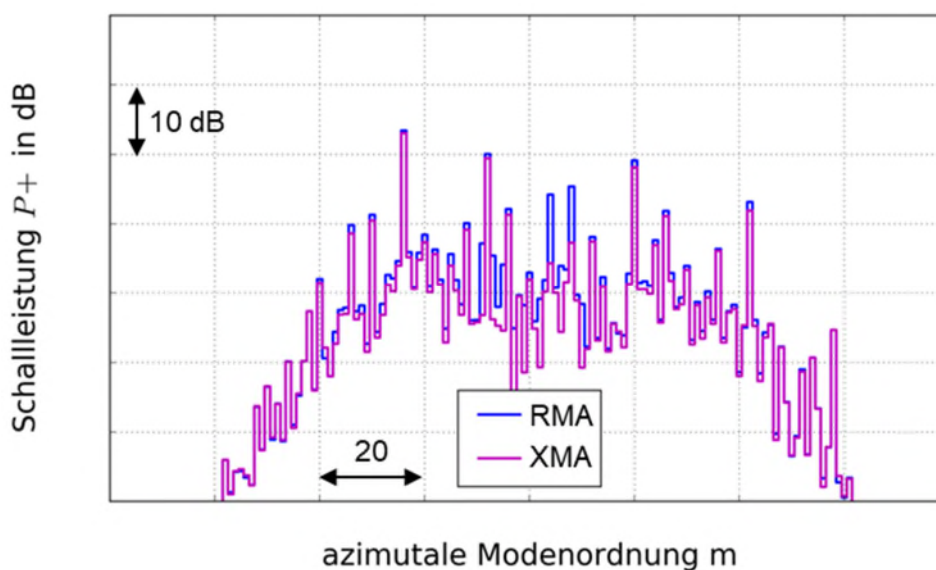


Abbildung 5: Vergleich einer experimentellen RMA und XMA Auswertung.

3.2 AP 2.2 3D-Simulation mehrstufiger Turbinen

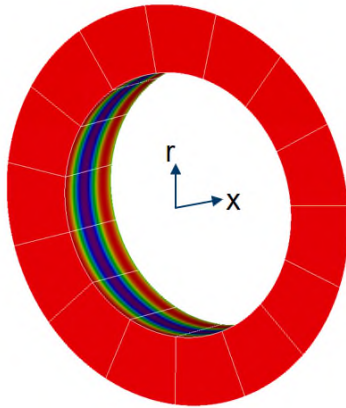
Die Hauptzielsetzung dieses Arbeitspakets war die Robustheitssteigerung des Harmonic Balance (HB) Verfahrens für akustische Simulationen mehrstufiger Turbinen. Die Arbeiten dazu widmeten sich den Randbedingungen, aber auch dem HB-Solver an sich. Zwei für akustische Simulationen notwendige Randbedingungen wurden ergänzt sowie das Akustik-Postprocessing (Connect3d) enger in das aerodynamische Postprocessing (POST) integriert. Parallel erfolgte der systematische Aufbau einer Validierungsdatenbank zur Überprüfung und Kalibrierung des Verfahrens HB.

AP2.2.1 Randbedingungen zur Akustik-Simulation

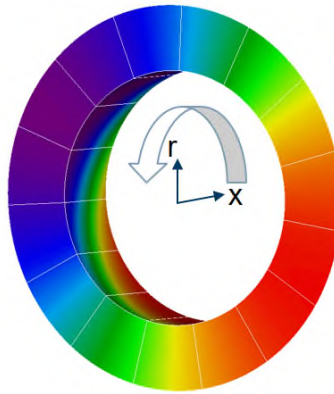
Die Implementierung der Impedanz- sowie der Acoustic Gust-Randbedingung wurde vom DLR durchgeführt. Nach der Implementierung konnten Erprobungen unter Verwendung dieser Randbedingungen erfolgen. Zur Überprüfung der neuen Tool-Funktionen wurde ein zylindrisches Kanalsegment ohne Schaufeln und ohne Querschnittsänderung herangezogen. Die Strömung wurde hierbei reibungsfrei betrachtet. Mithilfe der Acoustic Gust-Randbedingung wurden am Eintritt Druckstörungen über die Parameter Frequenz (f), Umfangs- und Radialmodenordnung (m , n) und Schalldruck (p bzw. SPL) oder Schalleistung (P bzw. PWL) vorgegeben. Die Druckfelder verschiedener Acoustic Gust Randbedingungen sind in Abbildung 6 dargestellt.

Durch die Auswertung der Strömung am Austritt des kurzen Kanals konnte gezeigt werden, dass bei Eingabe der oben genannten Parameter die korrekte Störung (Ausprägung, Struktur und Drehrichtung) im Strömungsfeld erzeugt wird.

$f = 6321 \text{ Hz}$, $m = 0$, $n = 0$
 $\text{Re}(p) = 100 \text{ Pa}$, $\text{Im}(p) = 0$



$f = 1500 \text{ Hz}$, $m = +1$, $n = 0$
 $\text{Re}(\text{SPL}) = 120 \text{ dB}$,
 $\text{Im}(\text{SPL}) = 0$



$f = 6321 \text{ Hz}$, $m = -2$, $n = 1$
 $\text{Re}(\text{SPL}) = 125 \text{ dB}$,
 $\text{Im}(\text{SPL}) = 0$

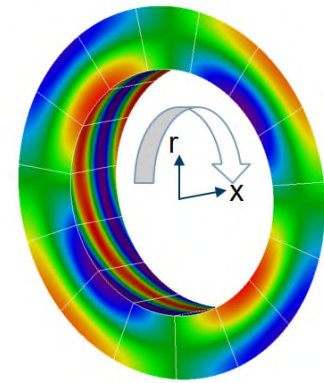


Abbildung 6: Testfälle zur Überprüfung der Acoustic Gust-Randbedingung

Nach beendeter Simulation wurde das Strömungsfeld mittels der RMA analysiert und das Ergebnis mit dem vorgegebenen Schallleistungspegel verglichen. Die Testfälle wurden separat für verschiedene Moden berechnet und ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt.

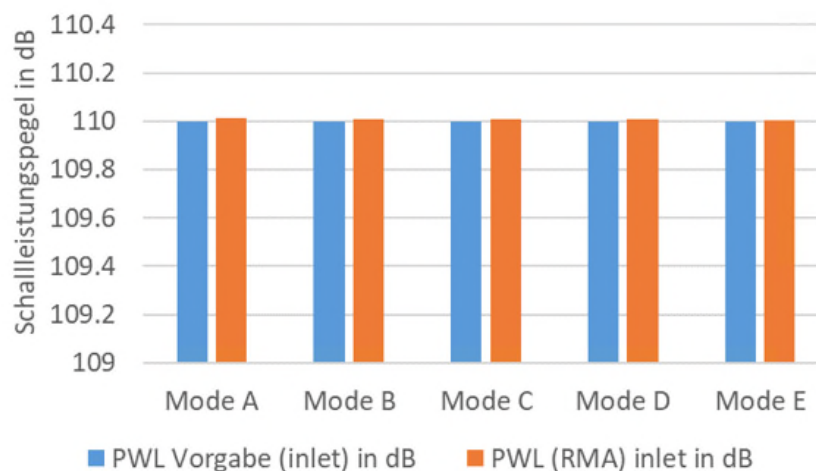


Abbildung 7: Auswertungen zu den Testfällen der Gust-Randbedingungen

Bei den Simulationen wurde stets ein Schallleistungspegel von 110dB vorgegeben. Die RMA-Auswertungen zeigen, dass im Strömungsfeld auch tatsächlich eine entsprechende Mode vorhanden ist, die zu einem Schallleistungspegel von 110dB führt. Dies

konnte für alle Testfälle bestätigt werden. Die Funktionalität der Gust-Randbedingungen ist somit überprüft und bestätigt.

Auch die implementierte Impedanz-Randbedingung wurde anhand des einfachen Kanalsegments überprüft. Die mit der akustischen Gust-Randbedingung berechneten Testfälle wurden um eine zusätzliche Aufprägung der Impedanz-Randbedingung erweitert. Mithilfe der Impedanz-Randbedingungen können u.a. Liner-Konzepte nachgebildet und analysiert werden. Die grundlegende Funktionsweise konnte anhand der visuellen Darstellung bestätigt werden. Die mit der Impedanz-Randbedingung beaufschlagte Wand zeigt eine lokale Dämpfung der Strömung entsprechend der Vorgabe. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt.

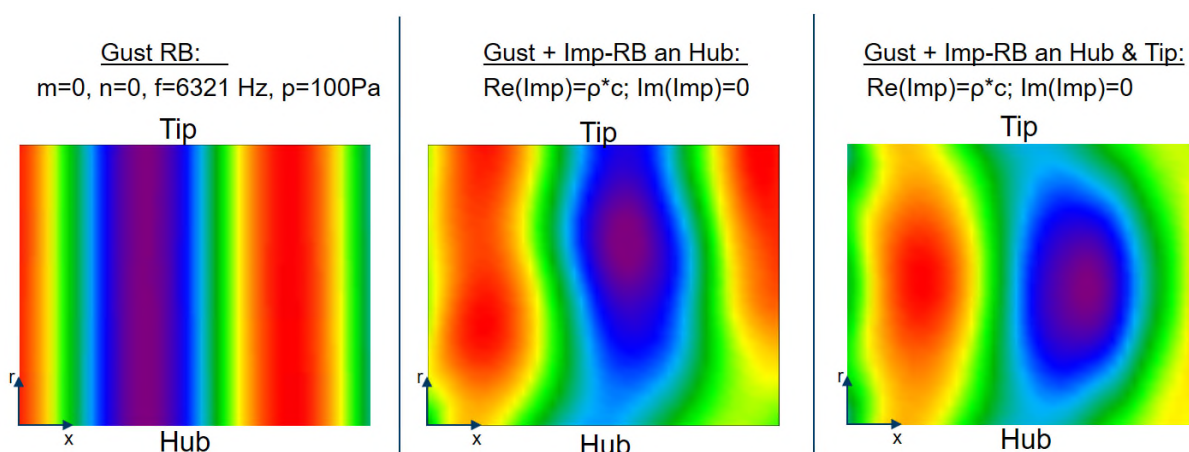


Abbildung 8: Testfälle zur Überprüfung der Impedanz-Randbedingung

Im Rahmen der Untersuchungen wurden verschiedene Einstellungen zur Vorgabe der Impedanz-Werte getestet. Die Vorgabe der komplexen spezifischen Impedanz-Werte erwies sich hier als vorteilhaft gegenüber der Vorgabe der einheitenbehafteten Impedanzwerte. Diese Normierung der Impedanz auf die vorliegenden Strömungsgrößen Dichte ρ und Schallgeschwindigkeit c stellte sich als physikalisch sinnvoll dar und wird auch für die Auslegung von akustischen Linern in dieser Form verwendet.

Der Zusammenhang für die spezifische Impedanz wird dargestellt durch:

$$Z_{spec} = \frac{Z}{\rho c}$$

Zum Vergleich wurden Rechnungen mit Lin3d (Linearisiertes Euler-Verfahren) durchgeführt, um die Funktionsweise der Impedanz-Randbedingung zu überprüfen. Die Eigenschaften von akustischen Absorbern wurden sowohl auf Segmente der Nabe als auch des Gehäuses aufgeprägt. Die Ergebnisse für den Vergleich zwischen HB und Lin3d sind in Abbildung 9 bis Abbildung 11 dargestellt. Gezeigt sind die axialen Verläufe der Druckamplitude und der Druckphase für fünf radiale Schnitte sowie die absoluten Impedanz-Werte an Nabe und Gehäuse beispielhaft für die Mode $m=0$, $n=0$ und mit Vorgabe der spezifischen Impedanz von $Re\{Z_{spec}\} = 1$, $Im\{Z_{spec}\} = 0$.

Die Vergleiche von Lin3d und HB zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der Druckamplitude, der Druckphase sowie der berechneten Impedanz-Werte für die untersuchten Testfälle. Die hohen Ausschläge in den Randbereichen in Abbildung 11 resultieren daraus, dass in diesen Bereichen keine Impedanzrandbedingung aufgeprägt wurde. Die Impedanz nimmt hier per Definition betragsmäßig den Wert „unendlich“ ein.

Die korrekte Funktionalität der implementierten akustischen Randbedingung konnte demnach bestätigt werden. Die neue Randbedingung kann folglich für die Auslegung und Untersuchung von akustischen Linern verwendet werden.

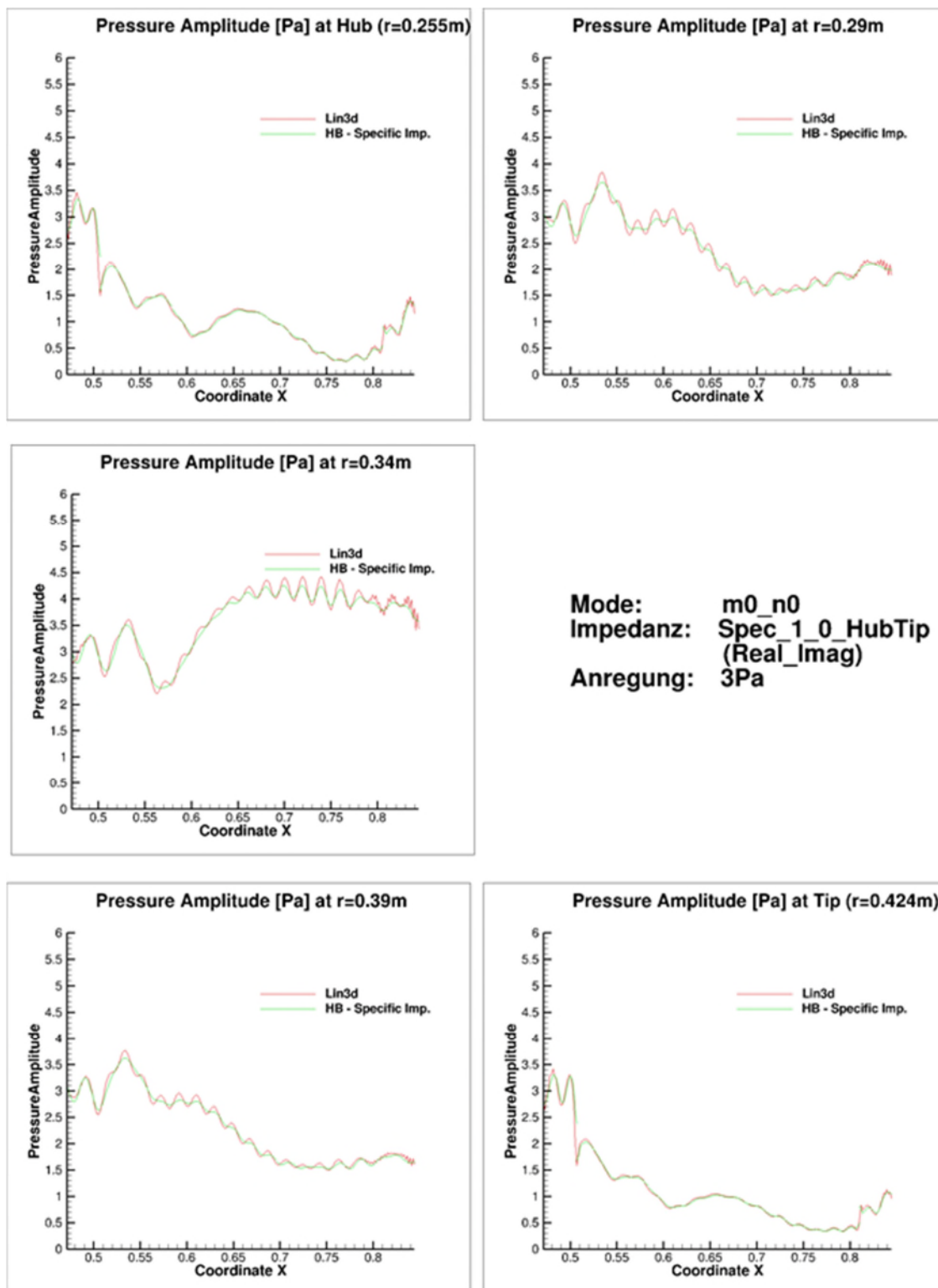


Abbildung 9: Druckamplitude an fünf radialen Schnitten bei Anregung der Mode $m=0$ $n=0$ und mit Vorgabe einer spezifischen Impedanz von $Re\{Z_{spec}\} = 1$, $Im\{Z_{spec}\} = 0$ an Nabe und Gehäuse, berechnet von Lin3d und HB.

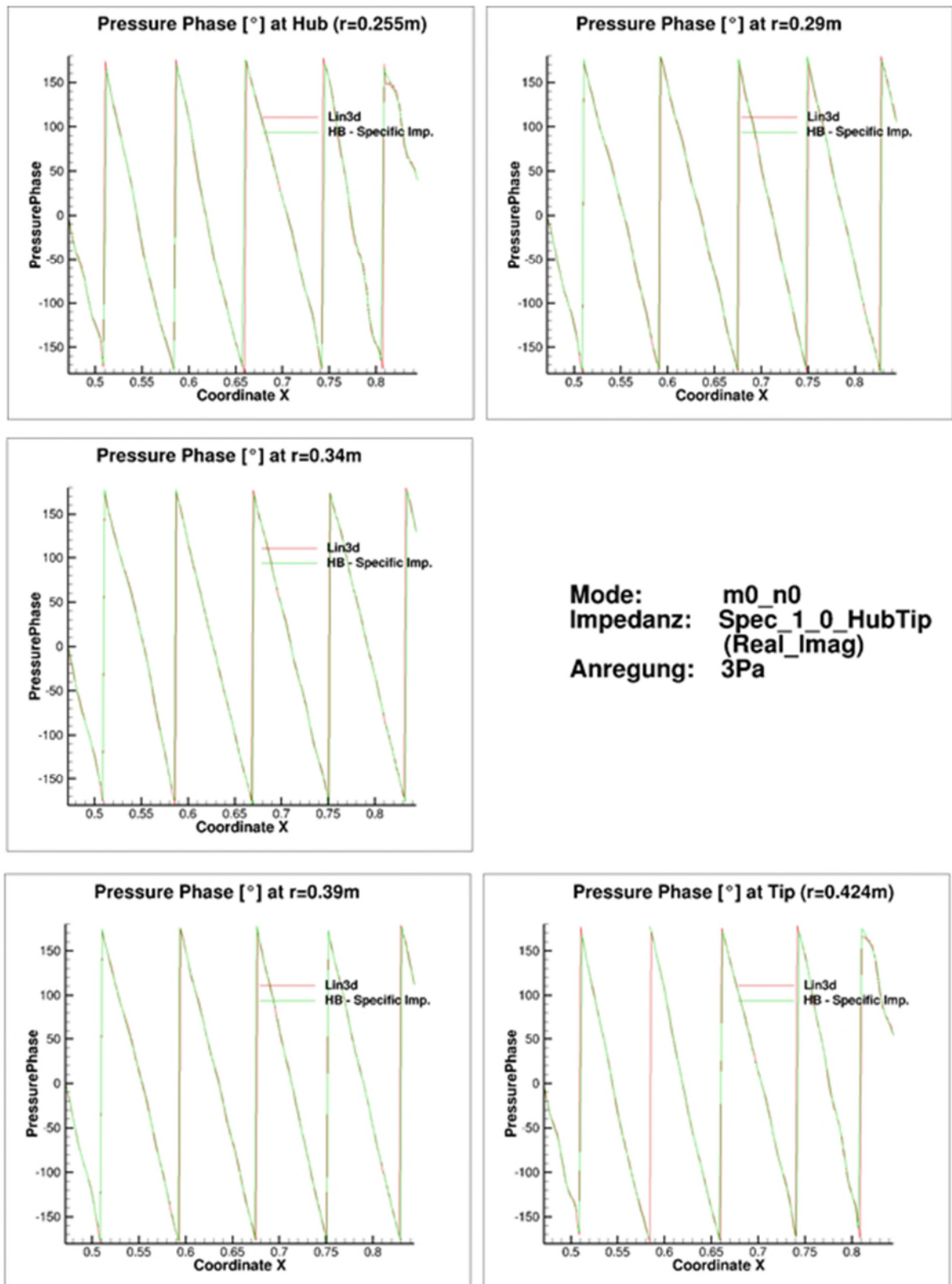


Abbildung 10: Druckphase an fünf radialen Schnitten bei Anregung der Mode $m=0$ $n=0$ und mit Vorgabe einer spezifischen Impedanz von $Re\{Z_{spec}\} = 1$, $Im\{Z_{spec}\} = 0$ an Nabe und Gehäuse, berechnet von Lin3d und HB.

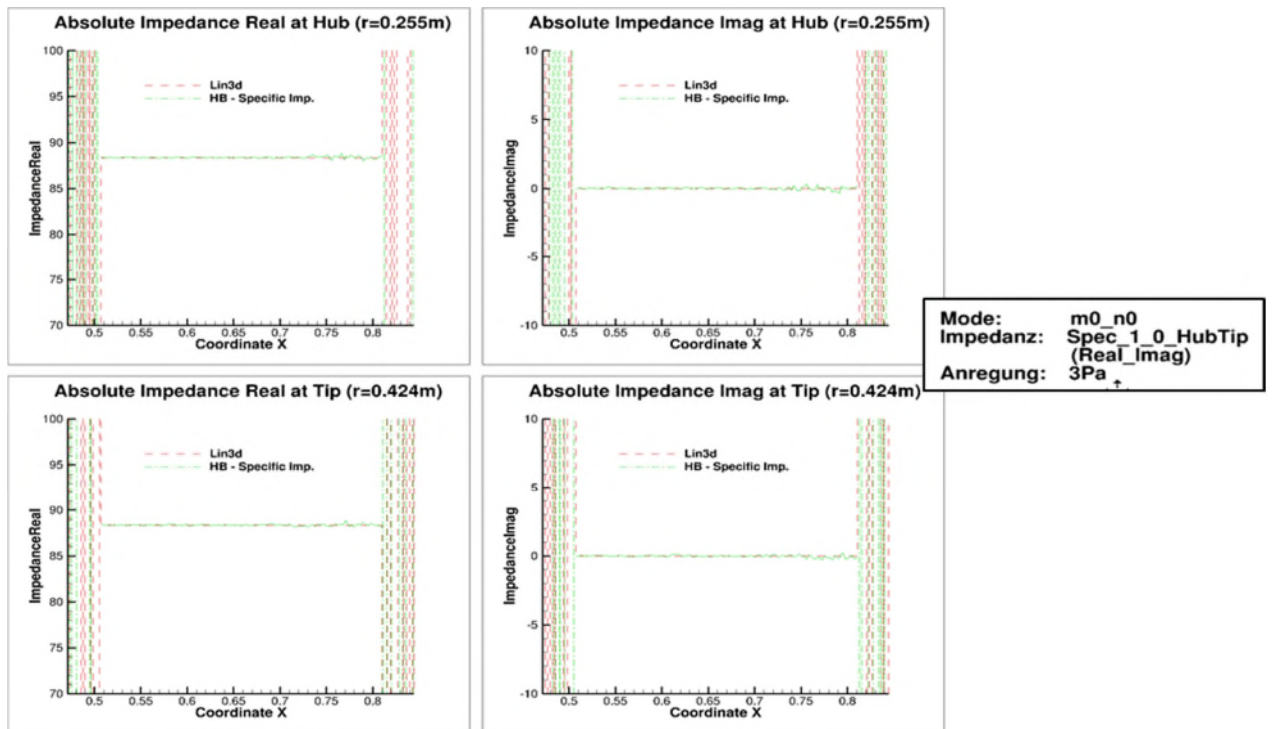


Abbildung 11: Absolute Impedanz an Nabe und Gehäuse bei Anregung der Mode $m=0$, $n=0$ und mit Vorgabe einer spezifischen Impedanz von $Re\{Z_{spec}\} = 1$, $Im\{Z_{spec}\} = 0$ an Nabe und Gehäuse, berechnet von Lin3d und HB.

AP2.2.2 Konsolidierung des Verfahrens linearTRACE → HB

Die Entwicklungsarbeiten zu HB sowie zum Postprocessing-Verfahren POST-C3D wurden beim DLR durchgeführt. Dafür wurde eine Spezifikation in Bezug auf die für die Akustik zu ergänzenden Randbedingungen von HB erstellt.

Die Stabilität und die Konvergenz der Berechnung wurde bei der MTU getestet. Mit dem Verfahren konnten alle Simulationen erfolgreich bis zur vollständigen Konvergenz berechnet werden.

Die HB Validierungsdatenbank (AP2.2.3) wurde auf Basis der getesteten Version aufgebaut.

AP2.2.3 Generierung einer Validierungsdatenbank

In diesem Arbeitspaket wurden Heißgas-Tests akustischer Absorber am HAT-Prüfstand (Hot Acoustic Test-Rig) beim DLR in Berlin geplant und durchgeführt, entsprechend dem Änderungsantrag vom 16.07.2018.

Für die Tests wurden zwei Samples abgeleitet und an die Randbedingungen/Anforderungen des HAT-Prüfstands angepasst. Die Bauteile wurden mittels Additive Manufacturing (AM) bei MTU gefertigt (vgl. Abbildung 12).

Hierbei waren die für AM spezifischen konstruktiven Anforderungen zu beachten. Zudem war zu überprüfen, ob das in den Absorber-Hohlräumen eingeschlossene Pulver im Rahmen einer Nachbehandlung leicht entfernt werden kann. Dies erwies sich als problemlos umsetzbar. Bezogen auf die Lochgeometrie wurden mehrere Iterationen an Probestplatten durchgeführt, da in ersten Varianten bei senkrechtem Aufbau der Absorber die Löcher fertigungsbedingt deutliche Abweichungen von der gewünschten runden Kontur aufwiesen.

Die Bauteile wurden an die Kartusche/ Probenaufnahme des DLR angepasst (vgl. Abbildung 13) und wurden im HAT-Prüfstand des DLR Berlin eingebaut.

Es wurde eine Testmatrix erstellt, die eine systematische Variation der Strömungsgeschwindigkeit und der Strömungstemperatur sowie (weitestgehend) triebwerkstypische Betriebsbedingungen beinhaltet.

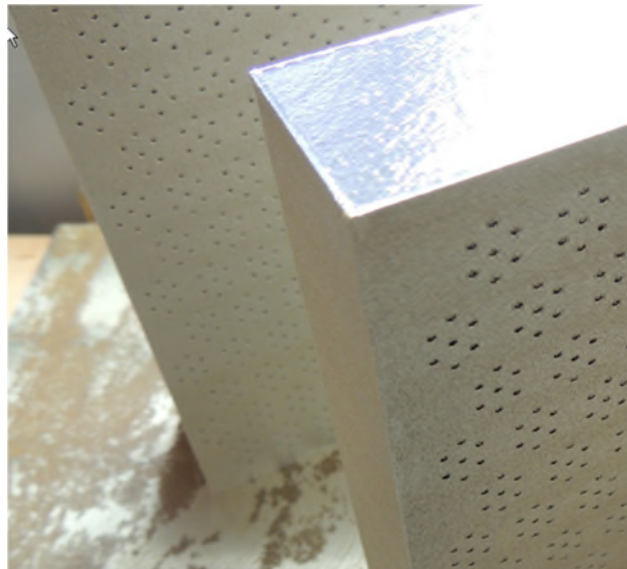


Abbildung 12: Mittels Additive Manufacturing (AM) hergestellte Absorber-Samples

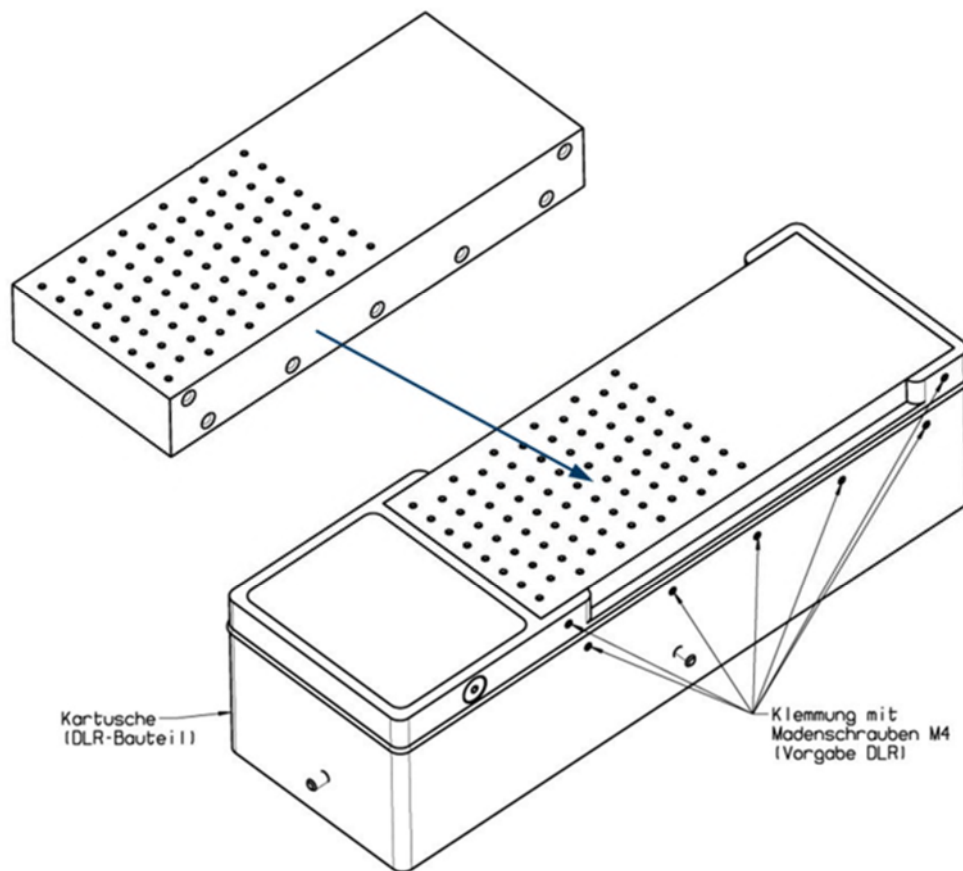


Abbildung 13: Prototypen eines der Absorber-Samples

Die Testmatrix konnte für beide Samples absolviert werden. Die erfolgten Analysen zeigten plausible Ergebnisse. Aus den akustischen Daten wurden die sogenannten „Streukoeffizienten“ abgeleitet, welche die Transmissions-, Reflexions- u. Dissipationseigenschaften der Absorber quantifizieren. Aus diesen wurde zudem die akustische Impedanz abgeleitet, welche die Dämpfungseigenschaften der Absorber beschreibt und als Randbedingung für die numerischen Simulationen genutzt werden kann. Es wurden alle getesteten Betriebsbedingungen für erfolgreich befunden, jedoch konnten in einzelnen Fällen nicht alle Ergebnisgrößen (alle Streukoeffizienten und Impedanz) abgeleitet werden. Dies beruht zum einen auf dem teilweise geringen Signal-Rauschverhältnis bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten, zum anderen auf Instabilitäten bzw. Uneindeutigkeiten in dem Verfahren zur Ableitung der Impedanz.

Dennoch gewährleisteten die Ergebnisse in allen getesteten Punkten einen ausreichenden Vergleich der experimentellen Daten mit numerischen Simulationen, welche auf Seiten der MTU mittels des kommerziellen Verfahrens ACTRAN™ durchgeführt

wurden. Hierfür wurde die Testsektion des HAT-Prüfstands modelliert, die vermessenen Bedingungen des Strömungsmediums vorgeschrieben und die stromab bzw. stromauf des Absorber-Samples angeregten akustischen Wellen vorgegeben.

In Abbildung 14 ist ein Längsschnitt durch den Kanal im Bereich der Testsektion dargestellt. In diesem Fall erfolgt die Anregung einer ebenen Welle vom linken Rand des Rechengebiets, wobei der Liner sich mittig an der oberen Kanalwand befindet.

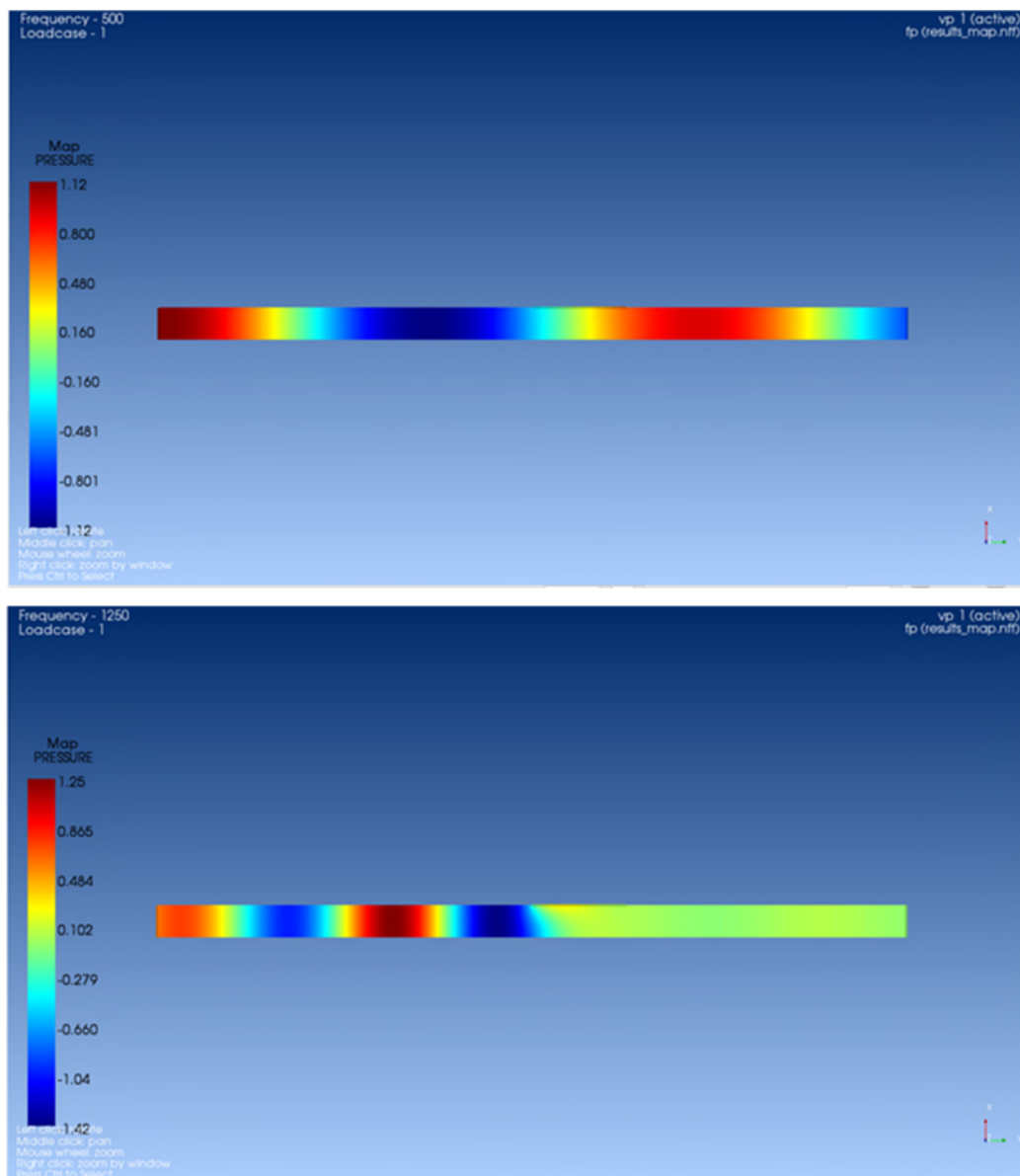


Abbildung 14: Seitenansicht des akustischen Kanals (HAT-Prüfstand): Ausbreitung einer ebenen Welle nahe der Resonanzfrequenz des Absorbers (rechts) und im Bereich geringer Dissipation (links); Momentaufnahme des Realteils des Schalldrucks in Pascal.

Die linke Abbildung zeigt die nahezu ungestörte Ausbreitung der akustischen Welle bei einer Frequenz fernab der Resonanzfrequenz des Absorbers. Im rechten Bild ist eine Frequenz sehr nahe der Resonanzfrequenz gewählt. Hier zeigt sich deutlich eine geringe Transmission der Schallwellen stromab des Absorbers.

Aus der Simulation konnten analog zum Experiment die Streukoeffizienten abgeleitet und den experimentell ermittelten gegenübergestellt werden (siehe Abbildung 15). Sie zeigen eine sehr gute Übereinstimmung im gesamten getesteten Frequenzbereich mit einer leichten Abweichung im Bereich des Peaks. Dargestellt sind auch die anhand einfacher Formeln theoretisch abgeleiteten Resonanzfrequenzen der Absorber-Samples (gestrichelte Linien). Der Peak der Absorption frequenzbezogen zeigt sich jeweils etwas unterhalb dieser theoretischen Frequenzen, ein Effekt, welcher oftmals in Absorber-Untersuchungen beobachtet wird.

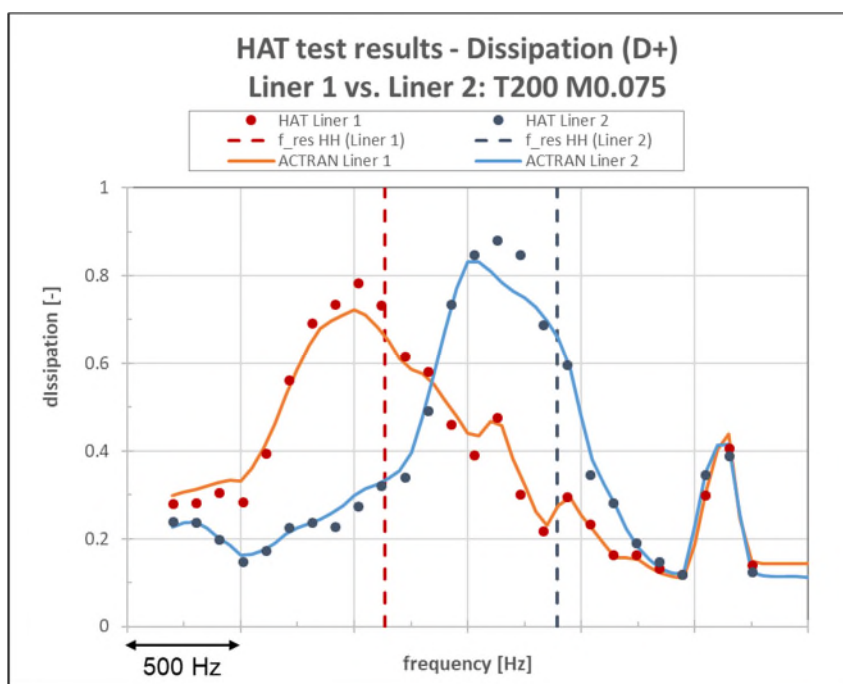


Abbildung 15: Vergleich der Dissipationskurven aus Experiment und Simulation für beide Absorber-Samples

Zur Validierung des instationären 3D-Simulationsverfahrens TRACE HB wurde eine Datenbank aufgebaut. Hierzu wurden vorhandene Testfälle aus Rig-Aufbauten der MTU herangezogen.

Pro Rig wurden dabei jeweils Simulationen mehrerer Betriebspunkte durchgeführt. Da pro Betriebspunkt 10-20 einzelne HB Simulationen für eine vollständige Bewertung notwendig sind, belief sich der Gesamtaufwand auf über 300 HB Simulationen. Parallel dazu wurden auch die entsprechenden Simulationen mit dem bisherigen 3D-Tool der MTU (Lin3D) durchgeführt.

Abschließend wurden die Simulationsdaten den Messdaten gegenübergestellt und es wurde sowohl für TRACE HB als auch für Lin3D der Bias, also die systematische Abweichung zwischen Simulation und Messung, berechnet. Dies wurde sowohl auf der Basis der Standard-Radialmodenanalyse RMA als auch mit der XMA durchgeführt (für Fälle, bei denen experimentelle Auswertungen mit der erweiterten Radialmodenanalyse XMA vorlagen).

Generell zeigte sich, dass durch die Verwendung von TRACE HB eine qualitativ hochwertigere Akustikvorhersage durchgeführt werden kann als es bisher mit Lin3D möglich war. Dies lässt sich anhand der Standardabweichung des Bias (also des Deltas aus Simulation und Messung) bewerten. Bei einer kleinen Standardabweichung ist die systematische Abweichung zwischen Messung und Simulation stets ähnlich, wohingegen bei einer großen Standardabweichung auch größere Unterschiede bei den Delta-Werten aus Simulation und Messung auftreten. Ein Bias mit einer kleinen Standardabweichung ist somit verlässlicher, als ein Bias mit einer hohen Standardabweichung. Wie in Abbildung 16 zu erkennen ist, ist die Standardabweichung des HB-Bias deutlich geringer als die Standardabweichung des Lin3D-Bias. Somit ist die Akustikvorhersage mit HB qualitativ hochwertiger, insbesondere in Bezug auf die absoluten Schalleistungswerte nach Abzug des Bias.

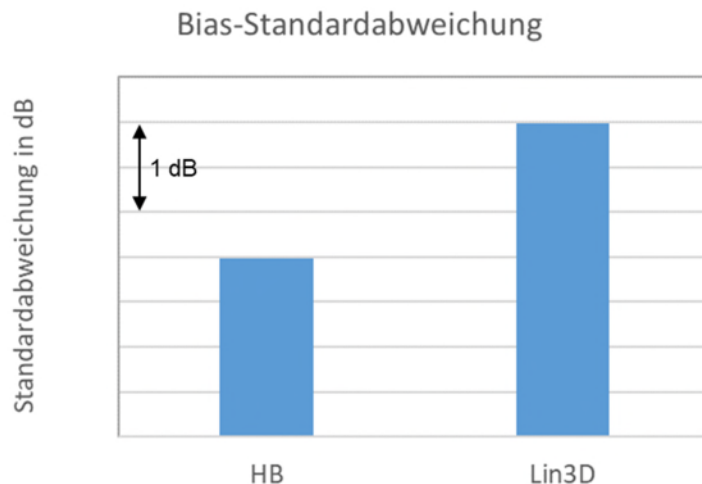


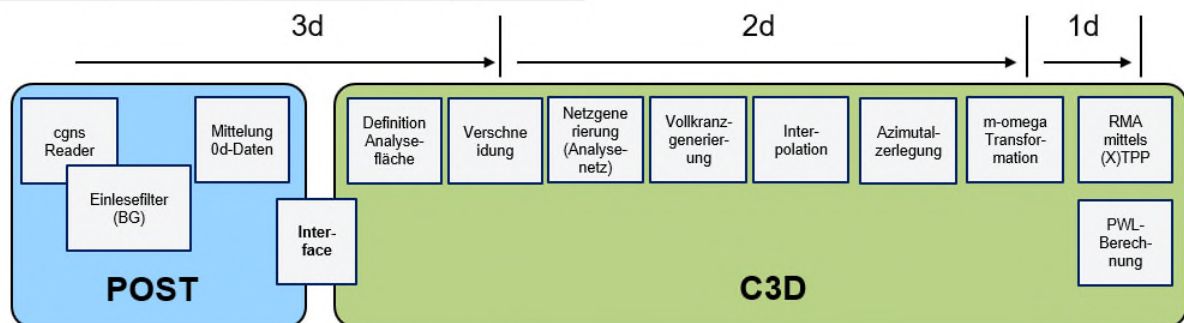
Abbildung 16: Bias-Standardabweichung des HB- und Lin3D-Bias.

AP2.2.4 Integriertes Aero- und Akustik-Postprocessing

In AP2.2.4 wurde die optimierte Schnittstelle zwischen dem Aerodynamik-Postprocessing (POST) und dem akustischen Postprocessing (Connect3d-RMA) anhand des vom DLR bereitgestellten Prototyps im industriellen Umfeld erprobt. Es erfolgte eine MTU-interne Abnahme im Zusammenhang mit der Produktivsetzung einer neuen TRACE-Version.

Die Prozessschritte im Rahmen einer POST-C3D-RMA Analyse vor und nach Optimierung der Schnittstelle zwischen POST und C3D sind in Abbildung 17 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit der POST Version 9.1 mehr Prozessschritte von POST und weniger von C3D übernommen werden. Dies ist aus MTU-Sicht ein großer Vorteil, da das Postprocessing-Verfahren POST ebenfalls von anderen Disziplinen der MTU (u.a. Aerodynamik und Aeroelastik) genutzt wird. Die Funktionalitäten der neu hinzugekommenen Prozessschritte in POST waren zum Großteil bereits in POST vorhanden. Die von C3D an POST „abgegebenen“ Prozessschritte müssen somit nicht mehr zusätzlich in C3D gewartet und gepflegt werden, was Doppelaufwände verringert. Der Wartungs- und Aktualisierungsaufwand, z.B. in Rahmen von neuen POST-C3D Versionen, ist dadurch merklich reduziert. Das C3D-Modul übernimmt aber weiterhin die Kernaufgabe, für die es entwickelt wurde: die Radialmodenanalyse.

bisheriger Prozessablauf (POST 8.2 / 9.0)



angepasster Prozessablauf (POST 9.1)

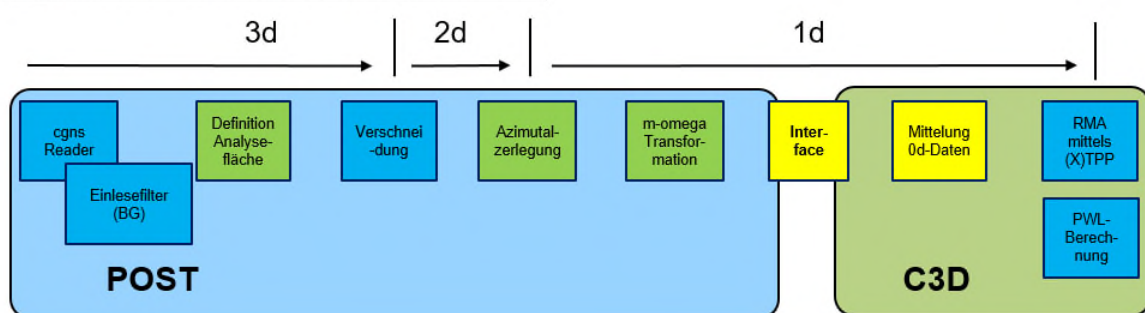


Abbildung 17: Prozessablauf POST-C3D-RMA vor und nach der Schnittstellenoptimierung.

3.3 AP 2.3 Verbesserte 1D-Modellierung von Turbinenlärm

In diesem Arbeitspaket wurde das semi-empirische 1D-Verfahren der MTU zur Vorhersage von Turbinenlärm (TCLow) in verschiedenen Modulen erweitert bzw. verbessert und insgesamt auf einen aktuellen Stand gebracht. Dort fließen Erkenntnisse aus der GTF-Entwicklung und Erprobung der letzten Jahre, aber auch Ergebnisse anderer Technologievorhaben (z.B. MASSIF-Effekt/ Leila etc.) ein.

AP2.3.1 Erweiterung der Datenbasis zur Tool-Validierung

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde eine standardisierte Vorgehensweise zur Separierung des Lärmbeitrags der NDT aus dem Gesamtspektrum definiert. Dabei wurden z.B. geeignete Parameter zur optimalen Filterung im Frequenzbereich des Breitbandlärms bestimmt. Ein, mit diesen Filterparametern ausgewertetes, Gesamtlärmspektrum einer Frei-Feld Bodenstandsmessung ist in Abbildung 18 dargestellt. Daraus wird deutlich, dass eine sehr gute Trennung der Lärmanteile Haystack (grün)

und Breitband (orange) vom Gesamtlärmspektrum möglich ist. Dies ermöglicht die Bestimmung der tonalen Beiträge verschiedener NDT Stufen. Eine entsprechende Methode wurde ebenfalls im Rahmen des Fördervorhabens entwickelt.

Mit dieser Vorgehensweise wurde konsistent die gesamte Datenbank der MTU ausgewertet.

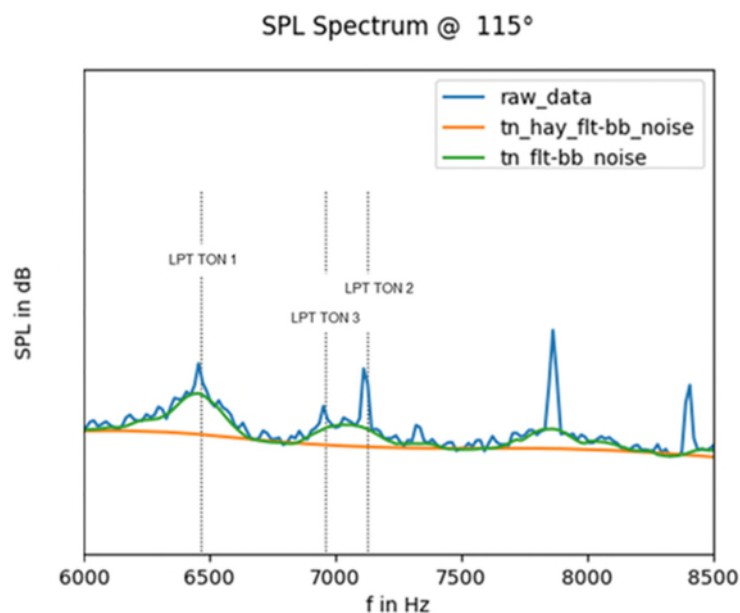


Abbildung 18: Beispielhaftes Gesamtlärmspektrum (blau), Haystackanteil (grün), Breitbandanteil (orange).

Zwecks Kalibrierung der Vorhersage (Bias-Bildung) sollten alle Turbinen und deren Betriebspunkte einheitlich nachgerechnet werden. Basierend auf der Erfahrung des MTU-Akustikteams wurde ein standardisiertes TCLow Setup für die Posttest Prediction der bis dato ausgewerteten Engine Tests verwendet. Weiterhin konnte im Rahmen des Vorhabens die Vorhersagequalität einer Posttest Prediction durch die Erhöhung der Qualität der Randbedingungen erzielt werden. Dies war zum einen dadurch möglich, dass ein Vorgehen etabliert wurde, mit dem die Ermittlung der für den jeweiligen Testtag gültigen Performance-Daten möglich ist. Diese fließen in die Aerodynamik-Rechnung ein, welche ein essentieller Input für die TCLow Vorhersage ist. Zum anderen wurde ein Update des Geometriemodells durchgeführt, um die jeweilige Testkonfiguration möglichst exakt abbilden zu können.

AP2.3.2 Erweiterung und Rekalibrierung des 1D-Verfahrens der Akustik

Der zentrale Aspekt dieses Arbeitspakets bestand darin, das 1D-Akustikvorhersage-tool TCLow grundlegend zu modernisieren. Dazu gehörte neben der Portierung des TCLow Programm-Codes in eine moderne Programmiersprache (Python) auch die Erweiterung der darin enthaltenen Modelle und Korrelationen.

Den Grundstein der Portierung stellte ein von der MTU entwickeltes Konzept, die technische Umsetzung wurde durch den Unterauftragnehmer T-Systems SfR durchgeführt. Die neue TCLow-Version bietet dabei auch eine Visualisierungsoption der Ergebnisse. Zusätzlich werden die Ergebnisse in einer sogenannten HDF5-Datei (bisher Textdateien) ausgegeben. Diese besitzt die Struktur des zukünftigen Akustik-Standarddatenformats, welches für jegliche Akustikdaten (aus Simulation und Messungen) geeignet ist. Dies führt neben einer Vereinheitlichung der Datenlandschaft in der Akustik auch zu einer erheblichen Vereinfachung des Postprocessings (z.B. für Vergleiche verschiedener Ergebnisse).

Auf der Prozessebene wurde ferner eine automatisierte Testsuite für die Bias-Bildung der 1D-Vorhersage entwickelt. Mit dieser ist eine Reduktion des Aufwands bei der Bias-Generierung (Posttest Prediction aller verfügbaren Engine Testdaten) von einem Tag auf wenige Minuten möglich.

Bei der Erweiterung des 1D-Verfahrens wurden die wesentlichen Beiträge zur Lärmausbreitung berücksichtigt und modelliert. Dazu gehören:

Transmissionsmodell (Ausbreitung innerhalb der NDT):

Aufbauend auf Arbeiten aus LuFo 5/1 „LIST“ wurde ein Transmissionsmodell des DLR Berlin weiterentwickelt. Es wurden konzeptionelle Arbeiten durchgeführt, um dieses Transmissionsmodell in TCLow effizient integrieren zu können.

Nachlaufmodellierung:

Ein wesentlicher Bestandteil der 1D-Akustikvorhersage ist die Modellierung der Schaufelnachläufe. Zur Verbesserung des verwendeten Modells wurden umfangreiche Stu-

dien durchgeführt. Dabei wurde geprüft, ob ein von der MTU im Rahmen eines anderen Forschungsvorhabens entwickeltes Nachlaufmodell potentiell für TCLow geeignet ist. Ergebnis der Studien war, dass die neue Nachlaufmodellierung leider nicht mit den in TCLow getroffenen Annahmen kompatibel ist.

Richtcharakteristik:

Um die Abhängigkeiten der Richtcharakteristik identifizieren zu können, wurde die experimentelle Datenbank der MTU genutzt. Die Auswertung der Messdaten hinsichtlich der Ermittlung einer Richtcharakteristik wurde mit einem neu entwickelten Algorithmus durchgeführt. Auf der Basis der Ergebnisse konnte ein analytisches Modell zur Abbildung der Richtcharakteristik gefunden werden. Die aus den Messdaten ermittelten Abhängigkeiten der Richtcharakteristik von geometrischen und aerodynamischen Größen lassen sich mit Hilfe dieses analytischen Ansatzes modellieren.

Zur Erweiterung der Erkenntnisse aus der Analyse der Triebwerksdatenbank wurde das Thema in einer Bachelorarbeit (Siehl, 2019) untersucht. Dafür wurden Studien mit der kommerziellen Software ACTRAN TM durchgeführt. Eines der Resultate – die beispielhafte Abstrahlung einer Schallmode aus einer generischen, vereinfachten Düsengeometrie - ist in Abbildung 19 gezeigt.

Es wurden verschiedene vereinfachte Düsengeometrien analysiert. Mit einer ausgewählten Variante wurden umfangreiche Parametervariationen der wesentlichen Strömungsparameter des Kern- sowie des Bypass-Stroms durchgeführt, um die Haupteinflussparameter und deren Sensitivität zu detektieren.

Diese Erkenntnisse können im Rahmen zukünftiger Arbeiten verwendet werden, um eine verfeinerte Modellierung der Richtcharakteristik des Turbinenlärms zu erstellen, insbesondere die Abhängigkeit vom Betriebspunkt und den Strömungsdaten der beiden Ströme (Kern- u. Bypass-Strom) des Triebwerks.

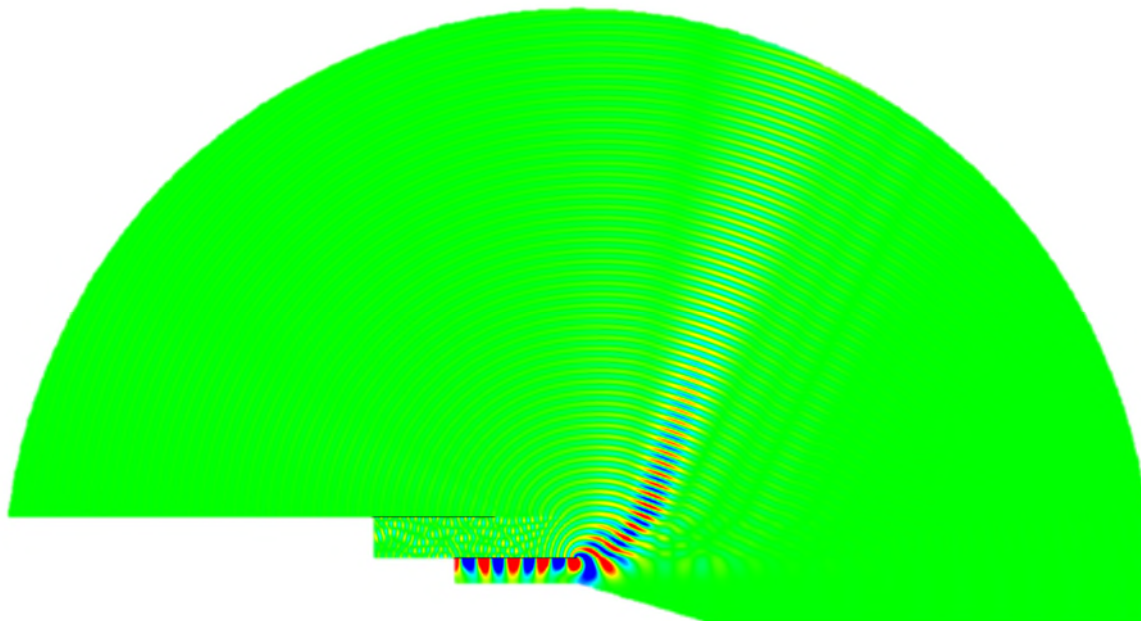


Abbildung 19: Abstrahlung einer Schallmode aus einer vereinfachten Düsengeometrie, mit ACTRAN TM gerechnet

Die Schalldruckpegelverteilung über den Ausbreitungswinkel in Abhängigkeit der Primär-Stromgeschwindigkeit ist in Abbildung 20 gezeigt. Der Abstrahlwinkel 0° entspricht dabei einer Abstrahlung entlang der Triebwerkshauptachse nach vorne, 180° einer Abstrahlung nach hinten. Das von links nach rechts abfallende Band hoher Schalldruckpegel deutet darauf hin, dass mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit am Austritt des Primärstroms der Winkel des maximalen Schalldruckpegels abnimmt.

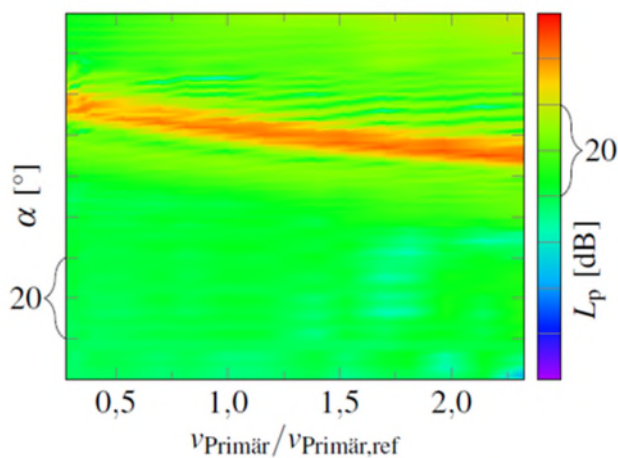


Abbildung 20: Schalldruckpegelverteilung in Abhängigkeit vom Abstrahlwinkel und Primärstromgeschwindigkeit.

Wie in Abbildung 21 verdeutlicht, konnte dieser Zusammenhang auch mittels eines analytischen Ansatzes festgestellt werden. Für die Entwicklung eines verbesserten Ansatzes zur Modellierung der Fernfeldausbreitung (Richtcharakteristik) stellt diese Erkenntnis einen wichtigen Beitrag dar.

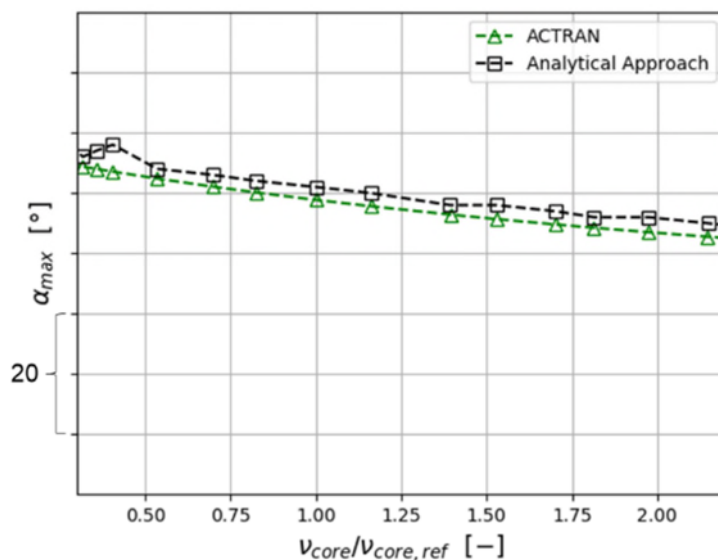


Abbildung 21: Abstrahlwinkel des maximalen Schalldruckpegels in Abhängigkeit der Primärstromgeschwindigkeit. Vergleich von Vorhersage und analytischem Ansatz.

3.4 AP 3.3.2 Haystacking Methoden und Validierung

Basierend auf einer systematischen Auswertung der MTU-Messdaten wurde eine Korrelation zur Modellierung des Haystack-Effekts entwickelt. Mit diesem Modell kann für jeden Ton der NDT im breiten Frequenzbereich die Aufteilung der Schalleistung zwischen dem tonalen Anteil und dem Haystack-Anteil vorhergesagt werden. Dieses Modell beruht auf Kalibrierungsparametern, die für eine bestmögliche Übereinstimmung mit den vorhandenen Triebwerks-Messdaten festgelegt wurden. Abbildung 22 zeigt, dass der qualitative Verlauf des gemessenen Haystacks mit dem Modell gut abgebildet werden kann.

Die Integration des Modells in die neue TCLow Version konnte ebenfalls durchgeführt werden.

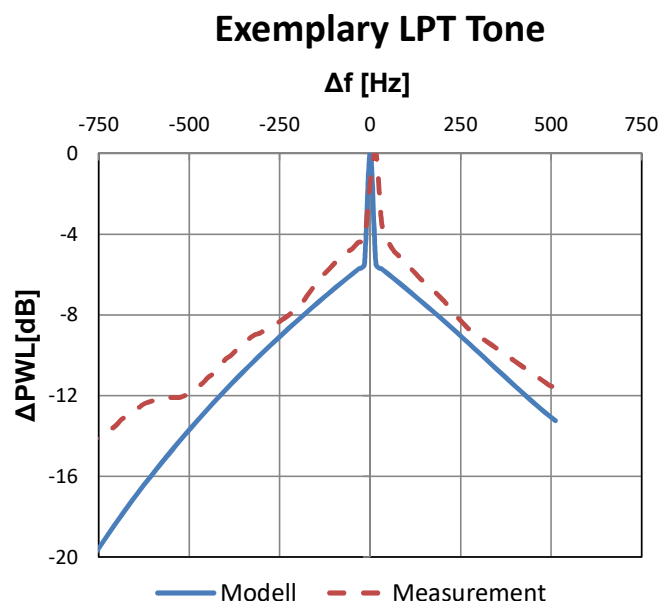


Abbildung 22: Vergleich eines gemessenen Turbinenton inklusive Haystack mit modelliertem Haystack

Mit den Arbeiten zum Thema Haystacking im Rahmen dieses Fördervorhabens konnten bereits sehr gewinnbringende Erkenntnisse für das Folgevorhaben MUTE gewonnen werden. Durch die am AWB (Akustischer Windkanal Braunschweig-DLR) geplante Messkampagne und umfangreiche CAA Studien des DLR wird ein weiterer deutlicher Fortschritt im Verständnis und Vorhersagefähigkeit des Haystacking-Phänomens erwartet.

4 Literaturverzeichnis

- Broszat, D. (2013). *Verbundvorhaben MASSIF-EffekT (Maßnahmen zur Schallpegelsenkung im Flugverkehr Effektive Triebwerkslärminderung – Abschlussbericht; Förderkennzeichen 20T0809B; MTU Aero Engines GmbH. München.*
- Broszat, D. (2016). *Verbundvorhaben LeiLa (der Leise LuftfahrtAntrieb) – Schlussbericht, Förderkennzeichen 20T1107E. MTU Aero Engines AG, München.*
- Siehl, P. (2019). *Untersuchung der Schallabstrahlung von Turbinentönen vom Triebwerk - Bachelorarbeit. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.*

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht
3. Titel Maßnahmen und aktive Methoden zur Unterdrückung von Triebwerkslärm (MAMUT)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Krömer, Florian	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12..2020
	6. Veröffentlichungsdatum Juni 2021
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) MTU Aero Engines AG Postfach 50 06 40 D-80976 München	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 20T1524B
	11. Seitenzahl 35
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 3
	14. Tabellen ---
	15. Abbildungen 22
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Die Arbeiten innerhalb des Verbunds MAMUT erfolgten in Zusammenarbeit der MTU Aero Engines AG mit Rolls-Royce Deutschland (RRD), dem DLR und Airbus. Das Vorhaben konzentriert sich auf Untersuchungen und Methoden zur Lärminderung. Arbeiten der MTU erfolgten innerhalb der Arbeitspakete AP2.1, AP2.2, AP2.3 und AP3.3.2.. Das AP2.1 befasste sich mit der Erweiterung der akustischen Radialmodenanalyse hinsichtlich der Berücksichtigung realer Strömungen und Strömungskanäle mit veränderlichen Querschnitten (Extended Radial Mode Analysis = XMA). Die Anwendung ist auf experimentelle und numerische Daten gerichtet. Das AP2.2 konzentrierte sich auf 3D-Simulation in mehrstufigen Turbomaschinen, insbesondere in der Niederdruckturbinen (NDT) als Triebwerkskomponente. Auf Seiten von DLR Köln wurden Randbedingungen Acoustic Gust und Impedanz in Harmonic Balance (HB)-Verfahren implementiert. Dabei wurde das HB-Verfahren hinsichtlich seiner Robustheit verbessert (DLR) und ausführlich getestet (DLR und MTU). Das AP2.3 befasste sich mit der Erweiterung und Rekalibrierung des semi-empirischen 1D-Turbinenlärmverfahrens TCLow (Turbine & Compressor LOWson). Dieses wurde bezüglich Qualität der Vorhersage verbessert und erweitert. Es wurde anhand einer Datenbank aus akustischen Triebwerks- und Prüfstandsdaten validiert und kalibriert. Im AP 3.3.2 wurde das Thema Haystacking bearbeitet. Es wurde ein verbessertes Haystack-Modell zur Modellierung der Nahfeldausbreitung durch Scherschichten gegenüber Messdaten evaluiert sowie in die neue TCLow Version integriert.	
19. Schlagwörter Turbine, Niederdruckturbinen, GTF, Akustik, Schalltransmission,	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of document (e.g. report, publication) Final report
3. Title Maßnahmen und aktive Methoden zur Unterdrückung von Triebwerkslärm (MAMUT)	
4. Author(s) (family name, first name(s)) Dr. Krömer, Florian	5. End of project 31.12.2020
	6. Publication date June 2021
	7. Form of publication
8. Performing organization(s) (name, address) MTU Aero Engines AG Postfach 50 06 40 D-80976 München	9. Originator's report no.
	10. Reference no. 20T1524B
	11. No. of pages 35
12. Sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. No. of references 3
	14. No. of tables 1
	15. No. of figures 22
16. Supplementary notes	
17. Presented at (title, place, date)	
18. Abstract The current project concentrated on the noise reduction at and inside of aero engines. Several partners (MTU Aero Engines AG, Rolls-Royce Deutschland (RRD), DLR und Airbus) joined this undertaking with their own special work packages. The main attention of MTU Aero Engines has been directed to the improvement of methods for noise analysis. This is addressed in work packages AP2.1, AP2.2, AP2.3 and AP3.3.2.. The WP2.1 is dealing with the extension of Radial Mode Analyses by considering real fluid conditions and channel geometry with variable boundaries (Extended Radial Mode Analysis = XMA). The application is adjusted to numerical and experimental data. The WP2.2 concentrated on 3D-simulation inside of multi-stage turbo machines, especially of a low pressure turbine (LPT). DLR Köln implemented the Acoustic Gust and the Impedance boundary conditions into the Harmonic Balance (HB) CFD tool. Thereby the robustness of the HB tool has been improved by DLR. The application of the tool has been tested extensively. The WP2.3 is directed to an extension and calibration of a semi-empirical 1D tool TCLow (Turbine & Compressor LOWson) which is dedicated to a fast acoustic analyses at predesign. The quality and the range of the noise prediction is improved. The tool has been validated and calibrated by using data of engine and rig tests. The WP3.3.2 concentrated on an acoustic phenomenon - Haystacking. A special noise modelling is applied in the new version of TCLow in order to describe the propagation of the noise through the shear layers in the near sound field of the engine.	
19. Keywords Turbine, compressor, propeller, gear, predesign, structural mechanics, aerodynamics, , aero-elastics, thermal analysis	
20. Publisher	21. Price