Luftfahrtforschung und –technologie

LuFo VI-1

Abschlussbericht

Methoden und Technologien zur Vorhersage und Minderung von Triebwerkslärm (MUTE)

Förderkennzeichen 20T1915B

Laufzeit: 01.10.2020 bis 30.09.2024

Berichterstatter: Dr. Johannes Kissing

Die Verantwortung für den Inhalt liegt beim Autor

MTU Aero Engines AG

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

München, Dezember 2024

Copyright © MTU Aero Engines AG Public Information

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 3

2 Zusammenfassung 4

2.1 Projektstrukturplan 4

2.2 Erreichte Ergebnisse 4

2.2.1 HAP2 Modellierung u. Analyse v. Turbomaschinenlärm 4

2.2.2 HAP3 Haystacking Methoden und Experimente 7

3 Technische Darstellung der Arbeitspakete 10

3.1 HAP2 Modellierung u. Analyse von Turbomaschinenlärm 10

3.1.1 AP2.1 Schalltransmission durch Schaufelgitter 10

3.1.2 AP2.2 Modenanalyse im Interstage-Bereich 14

3.1.3 AP2.3 Propulsorlärm-Vorhersage 18

3.2 HAP 3 Haystacking Methoden und Experimente 21

3.2.1 AP3.2 Experimente zum Haystacking 21

3.2.2 AP3.3 Numerische Experimente und Parametervariation 24

3.2.3 AP3.4 Low order Modelle und Validierung 27

4 Literaturverzeichnis 33

1 Einleitung

In dem Verbundvorhaben MUTE wurden Technologien und Methoden entwickelt, die zur Erreichung der Umweltschutzziele, hier konkret der Lärmminderungsziele, im europäischen Strategiedokument ‚Flightpath 2050' beitragen. Das zentrale Ziel war, zur schrittweisen Reduktion des wahrgenommenen Fluglärms um 65 % bis zum Jahr 2050 beizutragen.

Das Vorhaben MUTE war in drei Hauptarbeitspakete untergliedert. HAP1 und HAP2 wurden, wie in den erfolgreichen Vorgängervorhaben MAMUT, LIST, LEILA und MASSIF-Effekt, jeweils von einem der Industriepartner RRD und MTU geleitet. Der Projektpartner DLR trug als Großforschungseinrichtung zu allen Arbeitspaketen bei.

In HAP2 wurden unter Leitung von MTU Untersuchungen zur Schalltransmission durch Schaufelgitter und deren vereinfachter Modellierung weitergeführt. Zudem wurden ein innovatives Sensorkonzept sowie eine neuartige Analysemethode zur Auswertung des Schallfelds im Interstage-Bereich entwickelt und validiert. Weiterhin wurden Arbeiten zur Vorhersage der Lärmentstehung moderner Antriebe unter Beteiligung der etablierten Forschungspartner DLR und des Instituts für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik (TFD) der Leibniz Universität Hannover (LUH) durchgeführt.

Im HAP3 entwickelten und validierten beide Industriepartner jeweils ein erweitertes Low Order Modell zur genaueren Vorhersage des Phänomens „Haystacking" (Spectral Broadening von Tönen). Das Ziel war, ein geeignetes Haystacking-Modell für den Einsatz in der industriellen Auslegung zu entwickeln. Die technische Leitung des HAP3 erfolgte durch das DLR.

Die hier gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Entwicklung künftiger Triebwerke ein und liefern einen signifikanten Beitrag zu dem Bestreben, den Fluglärm künftig zu reduzieren.

2 Zusammenfassung

2.1 Projektstrukturplan

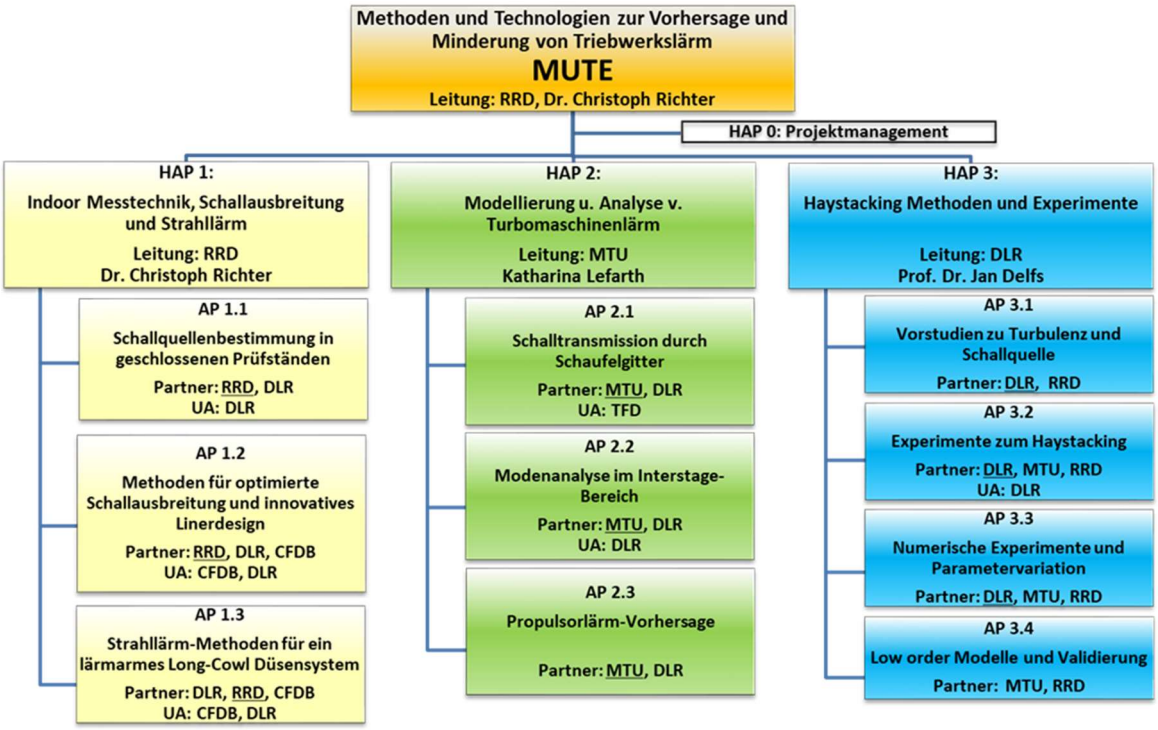

Abbildung 1: Projektstrukturplan

2.2 Erreichte Ergebnisse

2.2.1 HAP2 Modellierung u. Analyse v. Turbomaschinenlärm

2.2.1.1 AP2.1 Schalltransmission durch Schaufelgitter

Zur akustischen Auslegung von Niederdruckturbinen werden bei MTU je nach Designphase unterschiedliche Verfahren angewandt. In frühen Konzeptphasen beruht die Modellierung auf semi-empirischen 1D-Verfahren, während im späteren Detailed Design numerische 3D-Verfahren angewendet werden. Die Kalibration und Validierung dieser Verfahren findet bei MTU unter anderem auf Basis von Rig-Daten statt, welche akustische Referenzdaten unter kontrollierten (und bekannten) Randbedingungen liefern. In AP2.1 wurde hierfür auf die im Rahmen von SiValT (LuFo V-3) am „Acoustic Wind Tunnel“ (AWT) an der LUH erhobenen Messdaten zur Schallausbreitung über

Schaufelreihen (drei Aufbauten zur sukzessiven Abbildung einer Niederdruckturbinen-(LPT) Stufe mit Statoren) zurückgegriffen. Insgesamt standen Akustikmessdaten aus je 250 Einzelmessungen (Variation der Frequenz und dominanten Modenordnung) pro Aufbau zur Verfügung.

In AP2.1.1 wurden im Rahmen eines Unterauftrags am TFD der LUH aerodynamische und aeroakustische Nachrechnungen der Rig-Messungen durchgeführt. Diese wurden genutzt, um auf Basis aerodynamisch validierter Modelle die Vorhersagegüte des Harmonic Balance (HB) Verfahrens im Strömungslöser TRACE zu bewerten. Dabei wurden sowohl die auslaufenden Schallwellen stromauf und stromab der Schaufelreihen (Reflexion und Transmission) als auch instationäre Profildrücke einbezogen, um Netz- und Setup-Studien zu bewerten sowie Vergleiche mit Messdaten durchzuführen.

Analog dazu wurde in AP2.1.2 das im Rahmen von SiValT vom DLR entwickelte 2D-Transmissionsmodell in das MTU 1D-Tool TCLow implementiert und anhand der AWT-Messdaten kalibriert. Im Rahmen von Setup-Studien wurden hierfür Modellparameter optimiert, sodass eine bestmögliche Übereinstimmung mit den Rig-Messdaten erzielt wurde.

In beiden Fällen konnte bei Wahl geeigneter Setupeinstellung eine gute Übereinstimmung des Niveaus und eine sehr gute Übereinstimmung der Trends modaler Transmissionsgrade zwischen Experiment und Analytik bzw. Numerik erzielt werden. Eine ausführliche Darstellung ausgewählter Ergebnisse kann Kapitel 3.1.1 entnommen werden.

2.2.1.2 AP2.2 Modenanalyse im Interstage-Bereich

Zur Kalibration von Tools zur Lärmvorhersage sind Messdaten, z.B. aus Komponentenprüfständen, wie in Abschnitt 2.2.1.1 beschrieben, unerlässlich. Hierbei besteht das Problem, dass aufgrund der axial großen Bauräume konventioneller akustischer Mikrofonarrays für In-Duct-Messungen nur eine Instrumentierung stromauf oder stromab der Beschaufelung möglich ist, nicht aber im Interstage-Bereich zwischen den Schaufelreihen. Die Trennung von Schallentstehung und Schallausbreitung über Schaufelreihen kann daher im Versuch klassischerweise nicht messtechnisch erfasst werden, was die gezielte Validierung und Kalibrierung von Modellen für diese Effekte verhindert. Im Rahmen von AP2.2 wurden daher numerische und experimentelle Verfahren

weiterentwickelt und erprobt, um Auswertungen im Interstage-Bereich zu ermöglichen und so Quellpegel der Rotor-Stator-Interaktionsmoden erfassen zu können. Die experimentellen Arbeiten wurden dabei vom DLR in deren Teilvorhaben durchgeführt, sodass für die Ergebnisse dieser Arbeiten an dieser Stelle auf den zugehörigen DLR-Abschlussbericht verwiesen sei.

Die Erweiterung des numerischen Verfahrens wurde im Rahmen eines DLR-Unterauftrags durchgeführt. Dieses wurde anschließend bei MTU erprobt und befindet sich aktuell in der Industrialisierungsphase. Bei dem Verfahren werden die stationären und instationären Anteile einer 3D-Rechnung an drei axialen Ebenen extrahiert und zur Durchführung einer Modenzerlegung genutzt. Im Rahmen des AP2.2.3 wurde dieser Ansatz dahingehend erweitert, dass die Ebenen, auf denen die Computational Fluid Dynamics (CFD) bzw. Computational Aeroacoustics (CAA) Informationen extrahiert werden, nicht mehr nur rein axial konstant sein müssen, sondern die Vorgabe beliebiger radialer Profile ermöglicht wird. Auf diese Weise wird es möglich, die Auswerteebenen auch in den Interstage-Bereichen radial stark verwundener Schaufeln mit geringen Axialabständen, wie sie in modernen LPTs vorzufinden sind, zu platzieren.

Anhand vereinfachter Testfälle konnten dabei konsistente Ergebnisse zwischen der bestehenden und der erweiterten numerischen Auswertemethode gezeigt werden. Die Grenzen der Anwendbarkeit wurden identifiziert und dokumentiert. Anhand von Engine-Testfällen konnte zudem nachgewiesen werden, dass das neue Verfahren plausible Pegel im Interstage Bereich liefert. Eine detaillierte Darstellung ist Kapitel 3.1.2 zu entnehmen.

2.2.1.3 AP2.3 Propulsorlärm-Vorhersage

In diesem Arbeitspaket wurden sowohl auf Seiten des DLR als auch auf Seite der MTU Arbeiten am Propulsorlärm-Vorhersage-Tool PropNoise durchgeführt.

Das DLR hat intensive Weiterentwicklungen am Mehrschnittverfahren vorgenommen und konnte ein Absorber-Modul im Rahmen des Projekts in PropNoise integrieren. Genaue Inhalte zu den Weiterentwicklungen können dem Abschlussbericht des DLR entnommen werden.

Das Tool PropNoise wurde mit allen Weiterentwicklungen für weitere Analysen an MTU übermittelt und in die Prozesskette eingepflegt.

Bei MTU konnte die Schnittstelle zwischen dem MTU-2D-Tool zur Berechnung der Aerodynamik und PropNoise fertiggestellt werden. Die Erreichung dieses Meilensteins ermöglichte es, erste PropNoise Rechnungen im 2D-Modus des industriellen Fans mit Haupt- und Nebenstrom in AP 2.3.1.1 erfolgreich durchzuführen. In AP 2.3.2.3 konnte ein Großteil der RANS-Rechnungen des DLR Prüfstands (CRAFT) im 3D-Strömungslöser TRACE abschlossen werden, sowie erste 3D CAA-Rechnungen mit dem Frequenzverfahren in TRACE (HB) gestartet werden. Für die Anwendbarkeit von PropNoise im 3D-Modus im Systemumfeld der MTU wurden die Arbeiten an der Schnittstelle zwischen dem TRACE und PropNoise weitergeführt, sodass ein Prototyp zur Verfügung steht. Die Prozesskette zur industriellen Anwendung von PropNoise ist damit bei MTU geschaffen.

2.2.2 HAP3 Haystacking Methoden und Experimente

Ziel des HAP3 war, eine verbesserte Modellierung des Haystacking-Effekts zu entwickeln. Dazu wurde in AP3.2 und AP3.3 von Seiten des DLR eine umfassende Datenbasis generiert. Diese ist zusammen mit MTU-eigenen Triebwerksdaten in AP3.4 zur Modellbildung eingeflossen.

2.2.2.1 AP3.2 Experimente zum Haystacking

Zur Erreichung des übergeordneten Ziels im HAP 3, der Entwicklung eines verbesserten Modells zur Vorhersage des Haystacking-Effekts, wurde in diesem Arbeitspaket eine umfangreiche Datenbasis experimenteller Daten geschaffen.

Unter Federführung des DLR wurde zunächst ein neuartiger Versuchsaufbau konzipiert und am AWB (Akustischer Windkanal Braunschweig) umgesetzt (AP3.2.1 & AP3.2.2). Dabei trugen die Industriepartner Rolls Royce Deutschland (RRD) und MTU mit ihrer jeweiligen Fachexpertise und den Anforderungen der Industrie an den Messaufbau bei.

Nach Übergabe der Messdaten (MS3.2.2) wurde auf Seiten MTU eine detaillierte Auswertung und Analyse der Messdaten vorgenommen (AP 3.2.3). Ein für den Erfolg wesentlicher Aspekt stellte die Separierung des Haystacks eines angeregten Tons aus den Frequenzspektren dar. Zusammen mit den Daten aus der Vermessung der Scher-

schicht (Hitzdrahtmessungen) konnte gezeigt werden, dass die aus der Literatur bekannten Einflussfaktoren von der AWB-Messkampagne bestätigt werden. Über den Stand der Technik hinaus lieferten die Messdaten wichtige Erkenntnisse, die für die Entwicklung eines Haystackmodells für reale Triebwerke essenziell sind (MS 3.2.3). Zusammenfassend wird die im Rahmen des Arbeitspakets durchgeführte Messkampagne von Seiten der MTU als sehr erfolgreich bewertet, da die gewonnenen Erkenntnisse unmittelbar und zielführend in die Modellierung in AP3.4 einfließen konnten (AP3.3.4 und MS 3.3.4).

2.2.2.2 AP3.3 Numerische Experimente und Parametervariation

Ziel von AP3.3 war es, den Parameterraum hinsichtlich der Haystack Modellierung im Vergleich zu den experimentellen Arbeiten in AP3.2 zu erweitern. Insbesondere der Einfluss der Temperatur und höherer Machzahlen (Parameter, die im Experiment nicht abgedeckt werden konnten) sollten untersucht werden. In AP3.3.1 wurde zunächst von den Industriepartnern auf Basis realer Triebwerksanwendungen der angestrebte Parameterraum definiert und von Seiten des DLR ein Simulationssetup definiert. Die CAA Simulationen wurden vom DLR mit dem In-House Solver PIANO durchgeführt (AP3.4.2) und die Daten an MTU übermittelt (MS 3.3.2). Die Auswertung und Analyse der Haystackdaten aus der CAA wurde in AP 3.3.4 von MTU durchgeführt. Während die qualitativen Trends hinsichtlich der Ausprägung des Haystacks in Abhängigkeit der variierten Parameter durch die Daten wiedergegeben werden konnten, zeigten sich beim quantitativen Vergleich zum Experiment noch Defizite, die auf das Simulationssetup zurückzuführen waren. Dennoch konnten die Daten über ein von MTU angewendetes Korrekturverfahren teilweise bei der Modellbildung in AP3.4 berücksichtigt werden. Insbesondere hinsichtlich des Einflusses der Temperatur liefen die CAA Daten wertvolle Erkenntnisse. Somit wurden alle Unterarbeitspakete in AP3.3 vollständig bearbeitet und die Meilensteine erreicht.

2.2.2.3 AP3.4 Low-order Modelle und Validierung

In diesem Arbeitspaket wurde auf Basis der Haystack Datenbank aus AP3.2 und A3.3 sowie der MTU Triebwerksdaten ein Low-Order Modell zur Vorhersage des Haystacking-Effekts entwickelt und validiert. Dazu wurden zunächst in AP3.4.1 die relevanten

Einflussfaktoren identifiziert. Diese sind die Strömungsgeschwindigkeiten von Strahl und Umgebung, die Schallgeschwindigkeiten von Strahl und Umgebung, die Frequenz des Tons sowie die Scherschichtdicke und die turbulente Intensität (MS 3.4.1). Bei der Entwicklung eines Prototyps des Haystackmodells in AP3.4.2 wurde zunächst auf die AWB Daten (experimentelle und CAA) zurückgegriffen, da für diese Datensätze alle relevanten Einflussfaktoren bekannt waren. Der entwickelte Prototyp ist zweistufig aufgebaut. Im ersten Schritt werden die zur Beschreibung eines Haystacks notwendigen charakteristischen Parameter bestimmt. Diese sind das Energieverhältnis vom tonalen Anteil zur Gesamtenergie und eine bestimmte Definition der Haystackbreite. Im zweiten Schritt erfolgt die Rekonstruktion der Haystackform, wobei die zuvor bestimmten charakteristischen Parameter Randbedingungen darstellen. Zur Rekonstruktion der Haystackform wird von MTU vereinfacht ein linearer Verlauf im SPL Raum angenommen.

Dieser Modellierungsansatz zeigte sehr gute Ergebnisse im Vergleich zu AWB Daten. Sowohl gemessene als auch simulierte Haystacks konnten mit diesem Modell vorhergesagt werden (MS 3.4.2). Anschließend wurde das Haystackmodell anhand der verfügbaren Triebwerksdaten validiert (AP 3.4.3). Mit Einführung einer physikalisch motivierten Kalibrierung des Modells konnte eine sehr gute Übereinstimmung des Modells mit den Triebwerksdaten erzielt werden (MS 3.4.3).

Abschließend wurde das im Rahmen des Vorhabens entwickelte Haystackmodell in das MTU Akustikvorhersagetool TCLow implementiert (AP 3.4.5), sodass dieses für zukünftige Auslegungen in verbesserter Form eingesetzt werden kann (MS 3.4.5).

3 Technische Darstellung der Arbeitspakete

3.1 HAP2 Modellierung u. Analyse von Turbomaschinenlärm

3.1.1 AP2.1 Schalltransmission durch Schaufelgitter

Wie einleitend erläutert wurden innerhalb des AP2.1.1 und AP2.1.2 Messungen des AWT aus LuFo V-3 SiValT verwendet, um analytische und numerische Modellierungsansätze zur Schallausbreitung über Stator-Reihen zu validieren und kalibrieren. Eine Darstellung des AWT-Prüfstands kann Abbildung 2 entnommen werden.

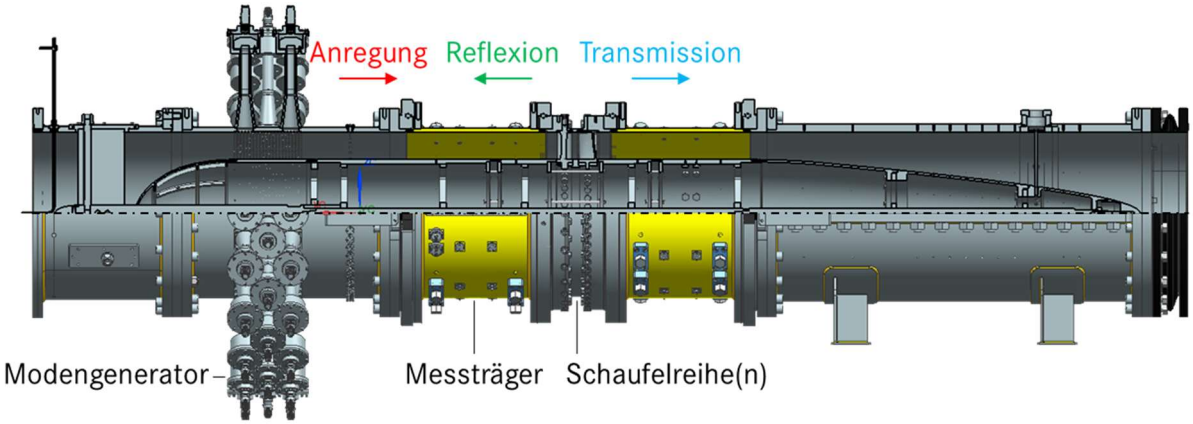

Abbildung 2: AWT-Prüfstand zum Stand SiValT im Aufbau mit zwei Schaufelreihen (Quelle: TFD)

Am AWT werden akustische Moden über den Modengenerator synthetisch erzeugt und in den durchströmten Kanal eingekoppelt. Die Abstimmung der Lautsprecher untereinander erlaubt dabei die gezielte Anregung einer akustischen Mode mit Umfangsmodenordnung *m* und Radialmodenordnung *n* (im Folgenden als Modenpaar *[m,n]* geschrieben) bei einer definierten Frequenz *f*. Mittels der in Abbildung 2 als Messträger bezeichneten rotierbaren Gehäuseelemente, in welche wandbündig axiale Mikrofonarrays verbaut sind, können stromauf und stromab der Beschaufelung akustische Modenzerlegungen erfolgen. Auf Basis einer Bilanzierung der einlaufenden und auslaufenden Anteile stromauf bzw. stromab der Beschaufelung können dabei Transmissions- und Reflexionskoeffizienten berechnet werden, welche abhängig von der verbauten Beschaufelung, dem aerodynamischen Betriebspunkt sowie der einlaufenden akustischen Mode sind. Auf diese Weise kann die Schallausbreitung

über verbaute Schaufelreihen unter vollständig bekannten aerodynamischen und akustisch optimierten Randbedingungen experimentell erfasst werden. Zur Nachrechnung bei MTU wurden vom TFD innerhalb von SiValT hierfür alle notwendigen aerodynamischen und akustischen Daten übergeben.

Im Rahmen von AP2.1.1 wurden diese Daten zunächst für numerische Nachrechnungen aufbereitet, indem über geeignete Mittelungsansätze Sondentraversen in aerodynamische Randbedingungen und die Ergebnisse der Mikrofonmessungen in aeroakustische (modale) Randbedingungen überführt wurden. Zur Generierung geeigneter Rechennetze wurden Studien zur notwendigen räumlichen Diskretisierung durchgeführt und mit analytischen Abschätzungen der numerischen Dissipation und Dispersion [2] verglichen. Exemplarische Ergebnisse der auftretenden Dissipation bzw. Dispersion über eine unbeschaufelte Rechendomäne mit gleicher axialer Länge wie das AWT-Kotrollvolumen sind in
Abbildung 3 dargestellt. Um den Einfluss numerischer Dissipation bei tolerierbaren Rechenzeiten zu minimieren, wurde das Rechennetz auf mindestens 40 Zellen/Wellenlänge für alle Cut-On-Moden bei der maximal betrachteten Frequenz ausgelegt, sodass eine in der Literatur akzeptierte numerische Dissipation von unter 2% sichergestellt werden konnte.

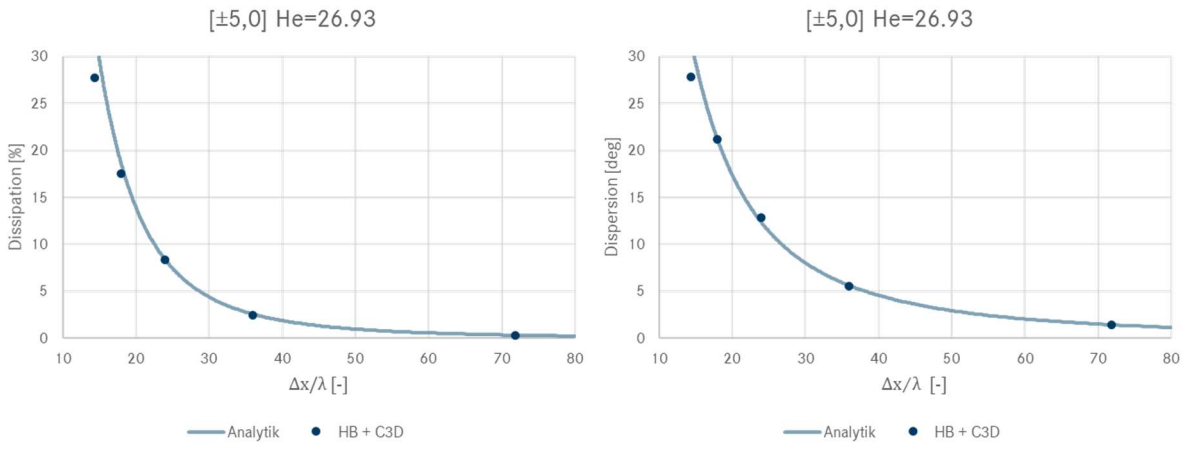

Abbildung 3: *Exemplarische Vergleiche der numerischen Dissipation und Dispersion*

zwischen analytischer Modellierung und dem Ergebnis von Simulationen für verschiedene axiale Netzauflösungen

Aufbauend auf den mittels Messdaten validierten aerodynamischen Simulationsergebnissen wurden Akustikrechnungen durchgeführt, bei denen das instationäre Druckfeld innerhalb des Kontrollvolumens für alle im Experiment auftretenden Moden und Frequenzen berechnet wurde. Durch die lineare Skalierung und Superposition dieser modalen Frequenzantworten konnte anschließend jede Einzelmessung nachgebildet und mit den Messdaten verglichen werden. Ergebnisse des Vergleichs der Transmissionskoeffizienten, welche bei der LPT-Lärmbewertung von besonderem Interesse sind, werden in diesem Abschnitt zusammen mit den Ergebnissen der analytischen Modellierung anhand von Abbildung 4 unten diskutiert.

In AP2.1.2 wurden äquivalente 1D-Nachrechnungen mit dem vom DLR im Rahmen von SiValT weiterentwickelten Transmissionsmodell bei MTU durchgeführt. Dieses wurde in einem ersten Schritt in das MTU-Verfahren TCLow implementiert, um als alternativer Ansatz zu bestehenden Modellen der Abschätzung modaler Transmissionsverluste über Schaufelreihen genutzt werden zu können. Nach erfolgreicher Implementierung und Erprobung wurden die im Experiment gemessenen, dominant angeregten, modalen Schallleistungspegel als einlaufende Welle aufgeprägt und die berechneten Transmissionsverluste den experimentellen Daten gegenübergestellt. Anhand der sich ergebenden Übereinstimmung der Transmissionsverluste mit dem Experiment wurden optimale Modellierungsparameter des Transmissionsmodells definiert und dokumentiert. Ein Abgleich der analytischen Modelle unter Verwendung eines optimierten Setups mit numerischen und experimentellen Ergebnissen ist in Abbildung 4 dargestellt.

Die darin dargestellten Transmissionsverluste für den Fall des AWT-Aufbaus mit zwei Schaufelreihen (LPT-Stator und Nachleitrad) bei verschiedenen Frequenzen und Modenordnungen zeigen eine gute Übereinstimmung des Niveaus der Modelle mit experimentellen Daten (mittleres Delta von bis zu 0.85 dB) und eine sehr gute Übereinstimmung der Trends bei verschiedenen Modenordnungen. Letztere ist insbesondere für das 1D-Modell von großer Relevanz, da auf diese Weise Studien zur

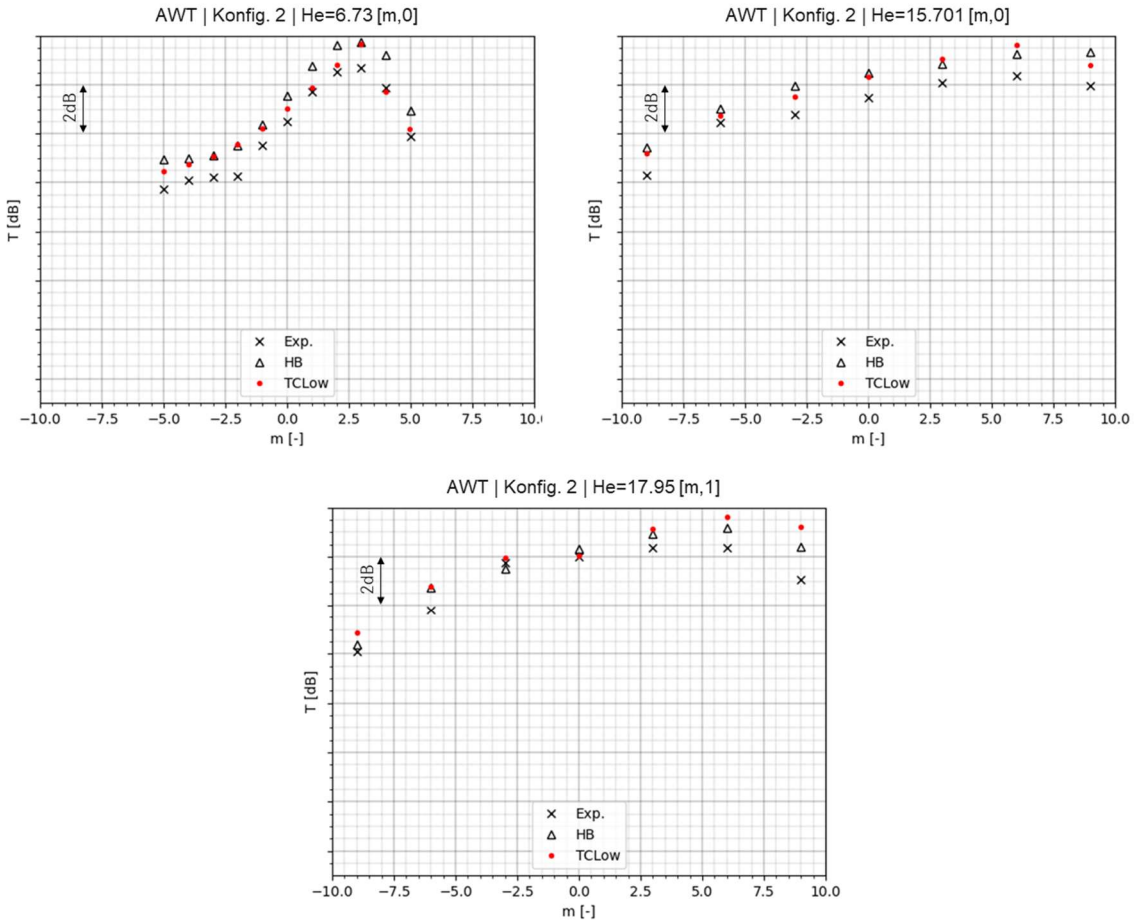

Abbildung 4: *Exemplarische Ergebnisse zum Vergleich der modalen Transmissionskoeffizienten T zwischen Experiment, Numerik (HB) und Analytik (TCLow)*

Wahl akustisch optimaler LPT-Geometrien erleichtert werden. Die hier dargestellten Ergebnisse sind nur ein Ausschnitt aller durchgeführten Validierungsrechnungen. Auf Basis der neu gefundenen 1D-Setups wurden in einem abschließenden Schritt Nachrechnungen von MTU-LPTs aus Triebwerken durchgeführt und auf Basis der sich ergebenden Abweichungen zu experimentellen Daten eine aktualisierte Fehlerabschätzung zur Lärmbewertung künftiger LPTs definiert.

Die im Rahmen des AP2.1 durchgeführten Arbeiten dienen als Basis der in HAP3 des LuFo VI-2 Vorhabens VedAs geplanten Arbeiten zur Untersuchung der Schalltransmission in mehrstufigen Turbinenkonfigurationen.

3.1.2 AP2.2 Modenanalyse im Interstage-Bereich

Zur Trennung der Effekte der Schallentstehung und Schallausbreitung über Schaufelreihen wurden in AP2.2 experimentelle und numerische Verfahren erarbeitet, die auf der Modenzerlegung des Schallfeldes im Interstage-Bereich zwischen Rotor- und Stator-Reihen beruhen. Die experimentellen Arbeiten und Methodenentwicklungen wurden dabei am DLR durchgeführt und von MTU zur Absicherung der Einsetzbarkeit in industriellen Anwendungen begleitet. Für eine umfangreiche Beschreibung dieser Arbeiten sei auf den Abschlussbericht des DLR verwiesen. Im Folgenden sollen Vorgehensweise und Ergebnisse des für numerische Vorhersagen erarbeiteten Ansatzes dargestellt werden, der am DLR durch einen Unterauftrag entwickelt und bei MTU umfangreich erprobt wurde.

Ausgangsbasis der Arbeiten war die bestehende POST-Connect3D-Routine des DLR. Das Verfahren liefert anhand von aus 3D-CAA-Rechnungen extrahierten Informationen (Kanalgeometrie, stationäre Grundströmung, instationäre Größen) auf drei axial äquidistant verteilten Ebenen modale Schalldrücke und –leistungen, welche die akustischen Emissionen von Triebwerkskomponenten vollständig charakterisieren. Die vor dem Projekt vorhandene Version war dabei auf axial konstante Schnittebenen limitiert (auf Basis XMA für „extended radial mode analysis“), welche im axial limitierten Bauraum zwischen radial stark verwundenen Schaufeln, wie sie in Niederdruckturbinen üblich sind, nicht ohne numerische Ungenauigkeiten oder gar nicht angewendet werden können. Um Modenzerlegungen auf Basis numerischer Simulationen im Interstage-Bereich durchführen zu können, war daher eine Erweiterung auf beliebige Schnittebenen notwendig (auf Basis iXMA für „interstage-extended radial mode analysis“).

Zunächst werden dazu die stationären und instationären Anteile der 3D-Lösung auf vom Anwender definierte Schnittflächen interpoliert und als Eingangsgrößen für die Modenzerlegung extrahiert. Das Vorgehen des vom DLR erweiterten Connect3D-Ansatzes zur Extraktion der CFD Daten ist in vereinfachter Form in Abbildung 5 dargestellt. Auf Basis der geometrischen und aerodynamischen Randbedingungen werden die modalen Eigenformen (radiale Eigenfunktion und axiale Wellenzahl) berechnet und ein sogenanntes Matching der komplexen modalen Amplituden auf Basis der extra-

hierten instationären Drücke durchgeführt. Durch die Berücksichtigung aerodynamischer Störungen können diese bei der Modenzerlegung unmittelbar von den akustischen Wellen separiert werden (XMA). In der neuen Formulierung des Verfahrens wird u.a. berücksichtigt, dass die Punkte einer Auswertefläche unterschiedliche axiale Positionen haben können (iXMA). Zum Nachweis der Konsistenz des neuen Verfahrens gegenüber den bisher genutzten Implementierungen wurden beim DLR und bei MTU verschiedene Testfälle bearbeitet.

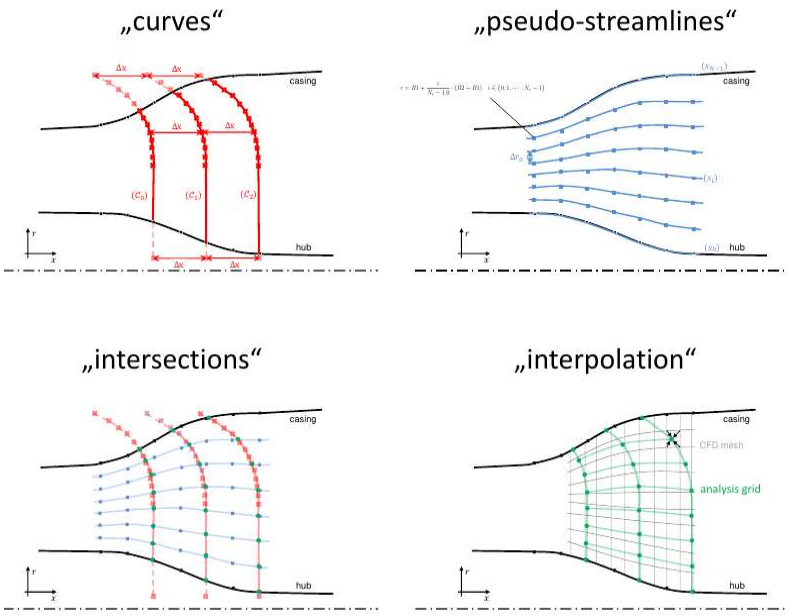

Abbildung 5: *Funktionsweise des vom DLR erweiterten Ansatzes zur Modenzerlegung in numerischen Simulationsergebnissen auf gekrümmten Ebenen (Quelle: DLR)*

Ein exemplarischer Vergleich ist in Abbildung 6 dargestellt, in welcher die modalen Schalldruck-Amplituden der stromauflaufenden Wellen stromauf eines DLR-Testfalls auf verschiedenen radialen Profilen ausgewertet wurden.

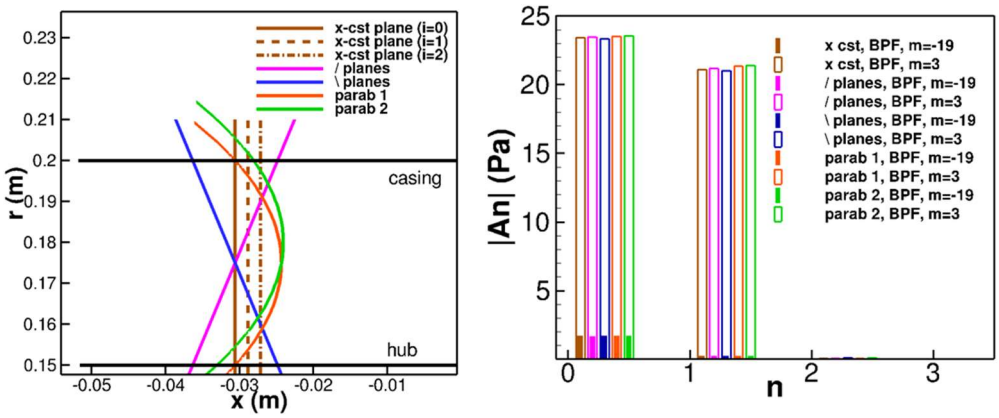

Abbildung 6: *Nachweis der Konsistenz des erweiterten Ansatzes im Vergleich zu der bestehenden Auswerteroutine (Quelle: DLR)*

Die axial konstanten Ebenen (x-cst) entsprechen dabei der bereits vor dem Projekt bestehenden C3D-Version. Wie darin ersichtlich ist, ergeben sich für die dominante Mode [-3,0] Abweichungen von max. 0.05 dB im Schalldruckpegel (rechte Abbildung). Diese Differenz ist für die Vorhersage der Lärmemissionen von Triebwerkskomponenten vernachlässigbar klein. Hier nicht weiter dargestellte Vergleiche der Phasenlagen der komplexen Amplituden zeigen eine ähnlich gute Übereinstimmung.

Zur Übertragung auf noch komplexere Testfälle und zur Plausibilisierung des Verfahrens wurden bei MTU zudem vergleichende Auswertungen im Interstage-Bereich einer 3.5-stufigen Niederdruckturbine durchgeführt. Eine schematische Darstellung der Rechendomäne sowie der mittels bestehender (XMA) und in diesem Projekt erweiterter Routine (iXMA) ermittelten Schallleistungspegel ist in Abbildung 7 dargestellt.

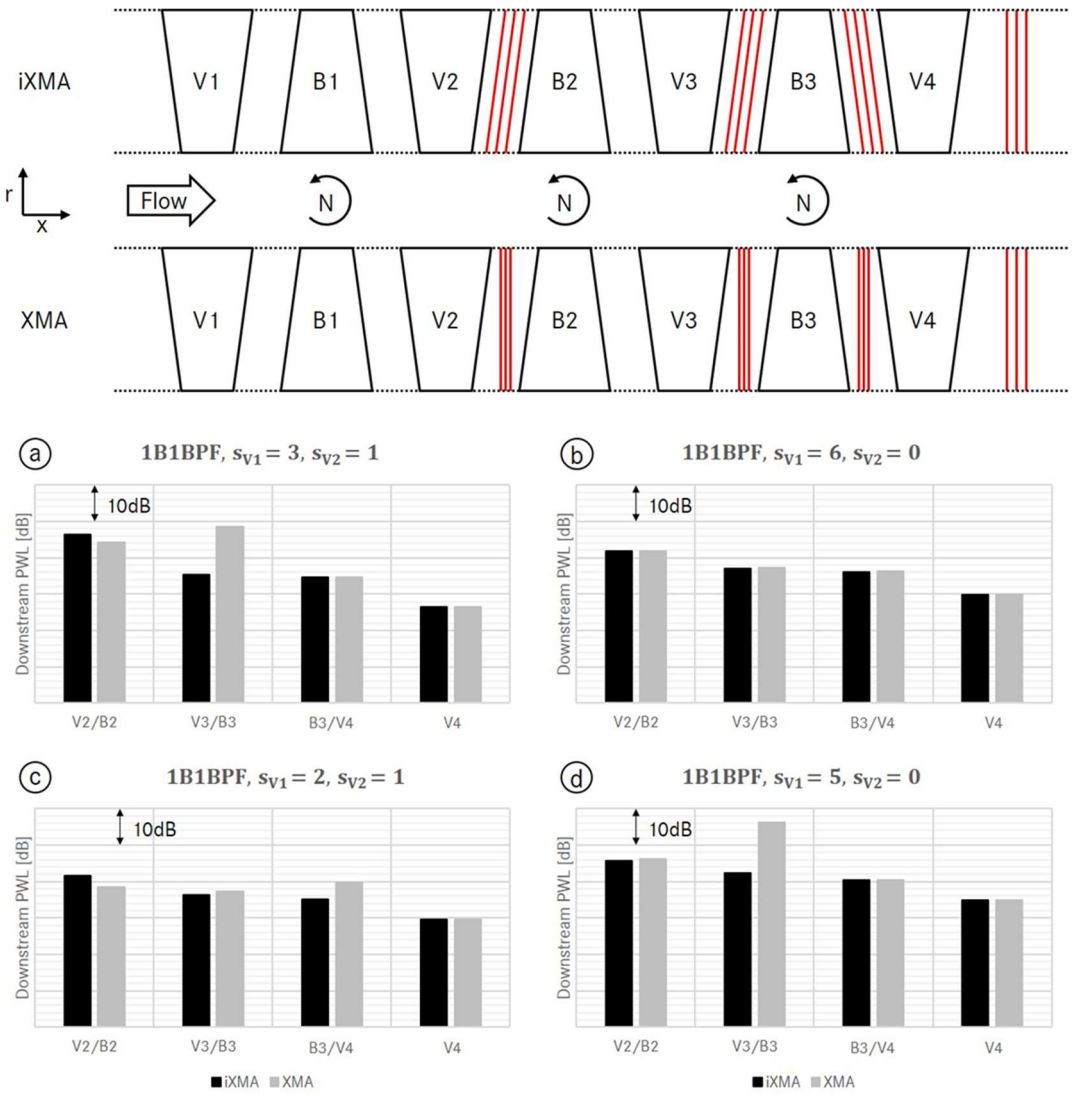

Abbildung 7: *Plausibilisierung des neuen Interstage-Ansatzes der numerischen Post-Processing-Routinen anhand von MTU –Rechnungen einer 3.5-stufigen LPT*

Darin werden die akustischen Moden der V1-B1-Interaktion an mehreren Inter-stage-Bereichen stromablaufend mit beiden Verfahren ausgewertet. Aufgrund des geringen axialen Raums zwischen den Profilen und der numerischen Rotor-Stator-Interfaces muss die bisherige Auswerteroutine (XMA) dabei auf Ebenen mit sehr geringen Axialabständen durchgeführt werden, wohingegen die neue Routine (iXMA) aufgrund der Auswertung auf gekrümmten Flächen mit optimierten Axialabständen durchgeführt werden kann. Da zu dieser Rechnung keine Messdaten im Interstage-Bereich vorliegen, kann auf Basis der numerischen Ergebnisse nur eine Plausibilisierung des neuen

Ansatzes erfolgen.

Da in dem dargestellten Testfall stromab der B1 keine Leistung in die Moden transferiert wird, kann die Schallleistung der verfolgten Moden, wie in Abbildung 4 für einen anderen Anwendungsfall gezeigt, bei jeder Ausbreitung über eine Schaufelreihe nur gleich bleiben oder abnehmen. Es ist also ein kontinuierliches Abnehmen der Schallleistung über die LPT zu erwarten. Dieses Verhalten wird mit der neuen iXMA-Routine beobachtet, nicht aber bei Auswertung mit dem bisherigen XMA-Ansatz. Das unphysikalische Ansteigen der Schalleistung der XMA-Auswertung, zu sehen in Abbildung 7 Grafik (a) und (d) zwischen V2/B2 und V3/B3 bzw. in Grafik (c) zwischen V3/B3 und V4/B4, ist dabei dem kurzen Axialabstand der Ebenen zuzuschreiben, welcher in einer schlechten Konditionierung bei der Modenzerlegung resultiert. Hieraus ergibt die Zerlegung des akustischen Feldes in stromauf und stromablaufende Anteile überschätzte akustische Pegel. Dieser Effekt ist dabei abhängig von der Kanalgeometrie, der Durchströmung und der für die Zerlegung betrachteten Modenordnungen. Die Anwendung der neuen Routine kompensiert diesen Fehler und liefert plausible Werte der modalen Schallleistungen entlang der gesamten LPT. Als zusätzlicher Konsistenzcheck ist ein stromab von V4 gezeigter Vergleich dargestellt, indem XMA und iXMA bei gleichen Axialabständen ausgewertet wurden. Die sich aus dieser Auswertung ergebenden Schallleistungen sind in allen Fällen konsistent zueinander. Weitergehende Analysen der erzielten Ergebnisse sind auch in [3] zu finden. Die Arbeiten zur Interstage-Analyse sollen im Rahmen des LuFo VII-1 Verbundes Buzzkatz in AP2.2 weitergehend angewendet werden.

3.1.3 AP2.3 Propulsorlärm-Vorhersage

Im Rahmen des Fördervorhabens MUTE konnte das Tool PropNoise bei MTU in der gesamten Bewertungs-Prozesskette verfügbar gemacht werden. PropNoise ist ein schnelles analytisches Prognose-Tool für Triebwerkslärm und setzt den Fokus auf Niederdruckverdichter bzw. Fans. Im Vergleich zu numerischen Verfahren ist die Analyse mit PropNoise wesentlich ressourceneffizienter und schneller.

Das Tool arbeitet in verschiedenen Modi, welche gleichermaßen an Genauigkeit sowie Rechenaufwand zunehmen. Für MTU haben sich besonders zwei Modi als zielführend

herausgestellt.
Eine Möglichkeit ist die integrierte Implementierung eines Mehrschnittverfahrens, welches die instationäre Aerodynamik in Form von Nachläufen, Turbulenz und Potentialfeldern modelliert. Notwendige Randbedingungen sind dafür Strömungsinformationen auf verschiedenen radialen Stromlinien des untersuchten Gitters.
Genau diese aerodynamischen Randbedingungen werden bei MTU mithilfe des Stromliniengeometrieverfahrens SGV ermittelt. Um PropNoise im Mehrschnittverfahren nutzen zu können, müssen die vorhandenen Informationen aus SGV lediglich in das für PropNoise notwendige Eingabeformat umgewandelt werden.
Erste Arbeiten wurden bereits in der Vergangenheit im Rahmen einer Patenschaft zwischen DLR und MTU vorangetrieben. Aufgrund der Weiterentwicklungen von SGV und PropNoise musste die Schnittstelle jedoch angepasst werden, um einen reibungsfreien Prozessablauf zu ermöglichen. Darüber hinaus sollte im Rahmen dieses Projekts die Erweiterung der Schnittstelle auf die Auswertung von Triebwerken mit Haupt- und Nebenstrom durchgeführt werden. Einer der Hauptlärmanteile moderner Triebwerke, wie den Geared Turbofans, entsteht im Fan und wird überwiegend nach vorne abgestrahlt. Im Rahmen von MUTE konnten diese angestrebten Arbeiten bei MTU erfolgreich umgesetzt werden, sodass nun ein Converter-Tool für Ergebnisse aus SGV direkt im MTU Prozessumfeld eProtas zur Verfügung steht, welches sowohl Einstrom- als auch Mehrstromtriebwerke analysieren kann.

Ein weiterer Modus innerhalb von PropNoise verwertet Ergebnisse einer numerischen 3D RANS Simulation (bspw. in der TRACE-Umgebung), welcher instationäre Aerodynamikgrößen direkt aus dem 3D Simulationsnetz umrechnet und für PropNoise nutzbar macht. Auch für diesen Modus ist ein Converter-Tool notwendig, um alle relevanten Informationen aus der stationären Strömungslösung zu entnehmen und in das für PropNoise verwendete Eingabeformat umzuwandeln. Ebenso wie beim Schnittstellen-Tool SGV-PropNoise, sollte auch das Schnittstellen-Tool für die 3D Anwendung zwischen dem Strömungslöser TRACE und PropNoise eine Möglichkeit zur Auswertung von Mehrstromtriebwerken vorsehen.
MTU konnte innerhalb des Projekts erstmalig einen Prototypen für diese Schnittstelle etablieren. Es ist zum Projektende damit möglich, eine durchgehende Bewertung von

TRACE zu PropNoise durchzuführen.

Im Rahmen des Vorhabens wurde die Konzeptreife in diesem Arbeitspaket erreicht, so dass die Bewertungsfähigkeit umgesetzt ist. Dieser Stand ist für die Zwecke der Vorauslegung zunächst ausreichend, da der wesentliche Anwendungsfall in Vergleichsanalysen besteht. Auf diesem Stand wurden die Arbeiten dieses Arbeitspakets abgeschlossen. Auf Basis der in diesem Vorhaben erarbeiteten Ergebnisse werden die Arbeiten zu einem späteren Zeitpunkt im Sinne einer Anschlussfähigkeit bis zur Technologiereife (Auslegungsfähigkeit) fortgeführt.

3.2 HAP 3 Haystacking Methoden und Experimente

3.2.1 AP3.2 Experimente zum Haystacking

Das übergeordnete Ziel in AP3.2 bestand darin, eine umfangreiche Datenbank hochwertiger Messdaten zu generieren, die in AP3.4 einen wesentlichen Bestandteil für die Entwicklung eines verbesserten Modellierungsansatzes zur Vorhersage des Haystacking-Effekts darstellen sollten. Dazu wurde zunächst unter Federführung des DLR und gemeinsam mit Rolls-Royce Deutschland (RRD) ein neuartiges Konzept zur Erzeugung und Messung des Haystacks unter möglichst anwendungsnahen Bedingungen entwickelt und am AWB (Akustischer Windkanal Braunschweig) umgesetzt. In Abbildung 8 ist eine schematische Darstellung des Messaufbaus dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung des Messaufbaus ist im Bericht des DLR dokumentiert.

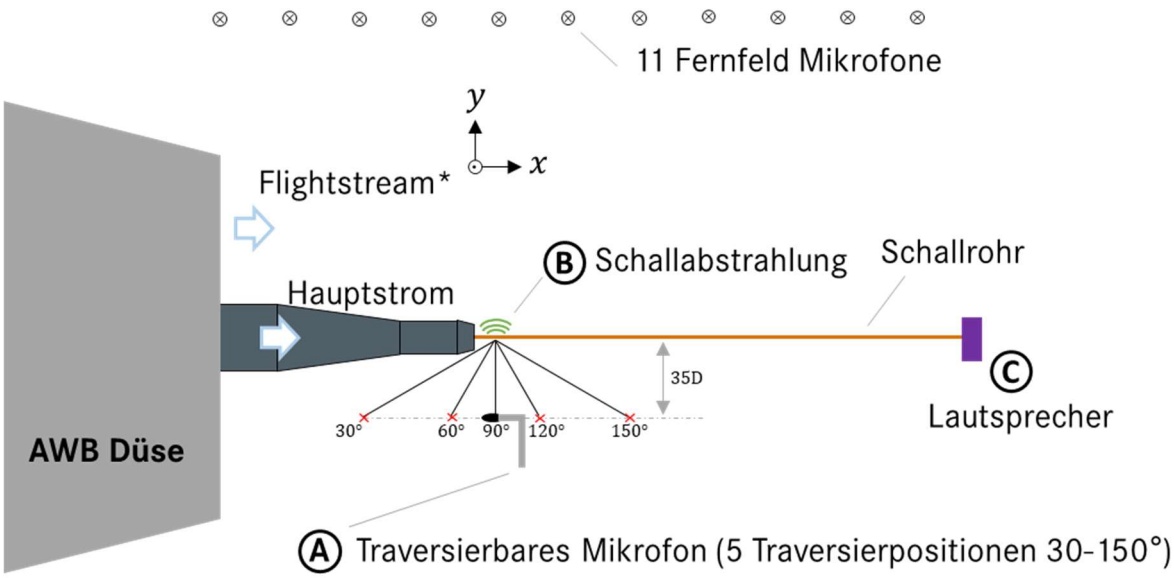

Abbildung 8: Me*ssaufbau AWB Haystacking Kampagne*

Die Hauptmesskampagne umfasste zum einen Hitzdrahtmessungen zur Charakterisierung der Scherschicht zwischen Strahl und Umgebung und zum anderen Mikrofonmessungen zur Erfassung des akustischen Haystacking-Effekts.

Im Folgenden wird zunächst auf die für die Modellbildung wesentlichen Erkenntnisse der Charakterisierung der Scherschicht eingegangen und im Anschluss werden die

Ergebnisse der Mikrofonmessungen dargestellt.

Abbildung 9 (links) zeigt die Abhängigkeit der Scherschichtdicke von der Axialposition (Abstand zum Düsenaustritt) für die Strahlmachzahl 0.3. Entsprechend dem zu erwartenden Verlauf ist ein linearer Anstieg der Scherschichtdicke mit Abstand zum Scherschichtursprung zu erkennen. Die laterale turbulente Geschwindigkeit (Abbildung 9) ist für x/D>0 annähernd unabhängig von der Axialposition. Sowohl Scherschichtdicke als auch turbulente Geschwindigkeit fließen in AP3.4 in die Modellbildung ein.

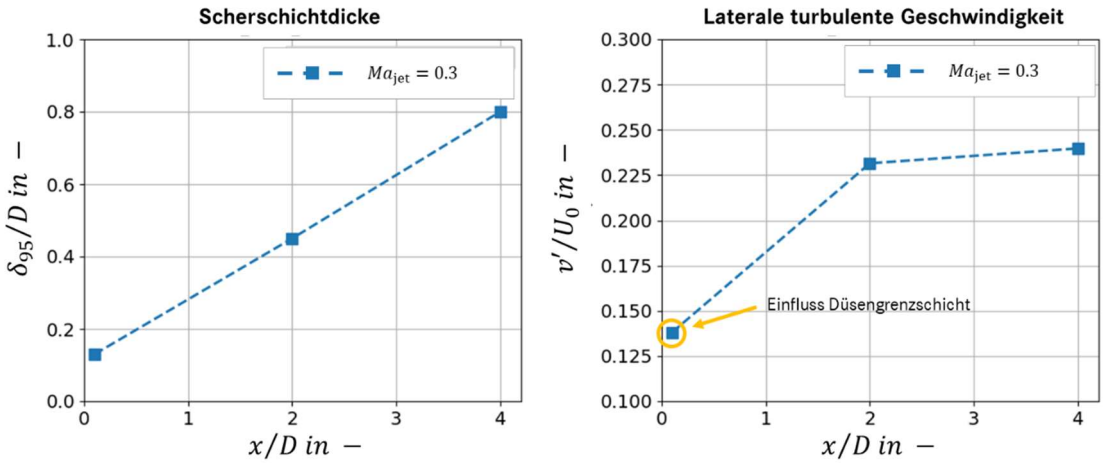

Abbildung 9: *Ergebnisse der Hitzdrahtmessung zur Charakterisierung der Scherschicht; Abhängigkeit der Scherschichtdicke von Abstand zu Düsenaustritt (links); Abhängigkeit der lateralen turbulenten Intensität von Abstand zum Düsenaustritt (rechts);*

Zur Analyse der Mikrofondaten wurde zunächst ein Auswerteverfahren entwickelt, das die Separierung des Haystacks aus dem gemessenen Frequenzspektrum ermöglicht (Abbildung 10). Das Verfahren umfasst drei Hauptschritte. Zunächst wird der Breitband-anteil (Strahllärm) des Signals entfernt (Referenzmessung im gleichen Betriebspunkt ohne Schallanregung). Anschließend wurde ein Tiefpassfilter auf das Signal angewendet, um einen möglichst glatten (rauschfreien) Signalverlauf zu erhalten. Im letzten Schritt wurden über ein Gradientenverfahren die Grenzen des Haystacks ermittelt.

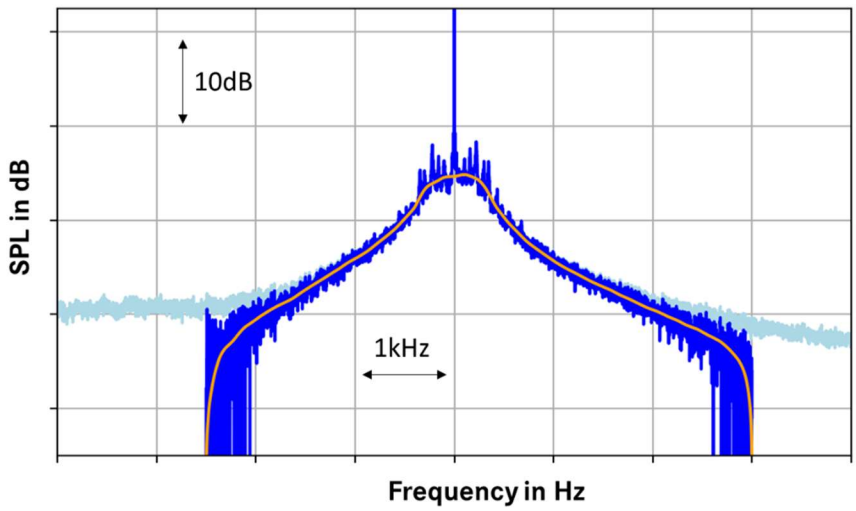

Abbildung 10: Vorgehensweise bei der Auswertung der Mikrofonsignale. Hell-blau: Gemessenes Signal, Dunkelblau: Gemessen minus Breitband; Orange: Tiefpassgefiltertes Signal;

Abbildung 11 zeigt den Einfluss der im Experiment variierten Parameter auf die Ausprägung des Haystacks. Folgende Trends können abgeleitet werden:

1. Mit zunehmender Machzahl wird der Haystack breiter und der Anteil der tonalen Energie nimmt ab.
2. Mit zunehmender Frequenz wird der Haystack breiter und die tonale Energie nimmt ab.
3. Mit zunehmender Scherschichtdicke bleibt die Haystackbreite annähernd konstant und die tonale Energie nimmt ab.

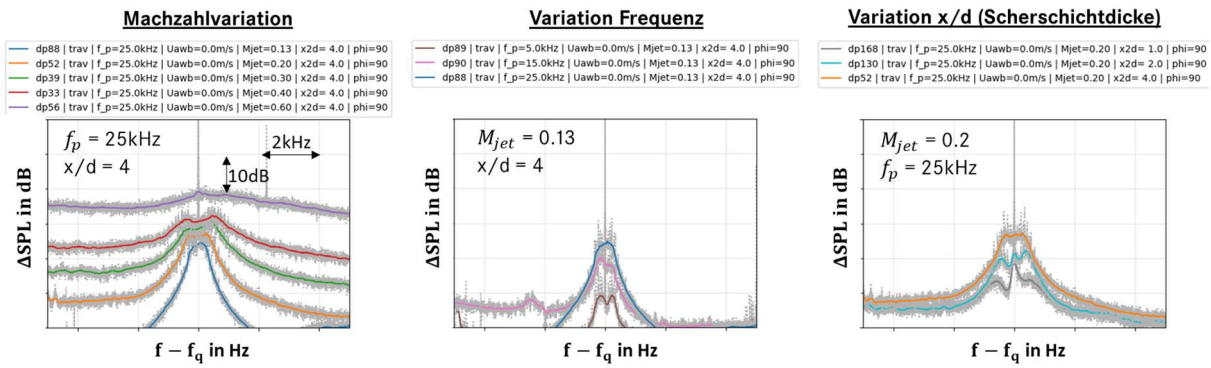

Abbildung 11: *Einfluss der im Experiment variierten Parameter auf die Ausbildung des Haystacks*

Die identifizierten Einflussparameter bestätigen die aus der Literatur bekannten Abhängigkeiten. Demnach wird auch geschlussfolgert, dass das im Rahmen des Vorhabens entwickelte Versuchskonzept erfolgreich war und die Daten in AP 3.4 für die Entwicklung einer verbesserten Modellierung des Haystacking-Effekts verwendet werden können.

3.2.2 AP3.3 Numerische Experimente und Parametervariation

Aufgrund der Einschränkungen hinsichtlich des Parameterraums im Experiment (Machzahlen <= 0.4 und Temperatur nicht variabel) sollten die numerischen Experimente (CAA) für die Modellierung des Haystacks (wesentlich) relevante Daten liefern, um die Lücke zur Triebwerksanwendung schließen zu können und somit in AP 3.4 ein möglichst allgemeingültiges Haystackmodell entwickeln zu können.

Zunächst wurde auf Seiten MTU identifiziert und mit RRD und DLR abgestimmt, welche Temperaturen und Machzahlen in der CAA Simulationsmatrix enthalten sein müssen, um den Betriebsbereich der MTU-Triebwerksanwendungen abzudecken.
Die Durchführung der CAA Simulationen wurde im Teilvorhaben des DLR durchgeführt. Eine detaillierte Darstellung des Simulationssetups und der Vorgehensweise beim Postprocessing der instationären Daten ist dem Detailbericht des DLR zu entnehmen. Die CAA-Simulationen wurden kontinuierlich von MTU und RRD beratend begleitet.
Nach Abschluss der CAA-Simulationen wurden RRD und MTU die Ergebnisse in gleicher Form wie die Daten aus den experimentellen Untersuchungen (Schmalbandfrequenzspektren auf 1m Entfernung zur Quelle) zur Verfügung gestellt.

Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse der CAA Simulationen für drei Parametervariationen (Machzahl, Temperatur und Frequenz). Folgende Trends können durch den Vergleich der Frequenzspektren identifiziert werden:

1. Mit zunehmender Machzahl wird der Haystack breiter und der Energiegehalt des Tons nimmt ab → Erkenntnis CAA: experimenteller Trend wird reproduziert
2. Mit zunehmender Temperatur wird der Haystack breiter und der Energiegehalt

des Tons nimmt ab → Erkenntnis CAA: Einfluss der Temperatur auf Haystacking wird deutlich. Bei Veränderung der Temperatur im Strahl wird auch die Temperatur und damit die Schallgeschwindigkeit am Ort des Haystackings (in der Scherschicht) beeinflusst.

3. Mit zunehmender Machzahl wird der Haystack breiter und der Energiegehalt des Tons nimmt ab → Erkenntnis CAA: Trend aus Experiment wird auch für höhere Machzahlen, außerhalb des experimentellen Parameterraums, bestätigt.

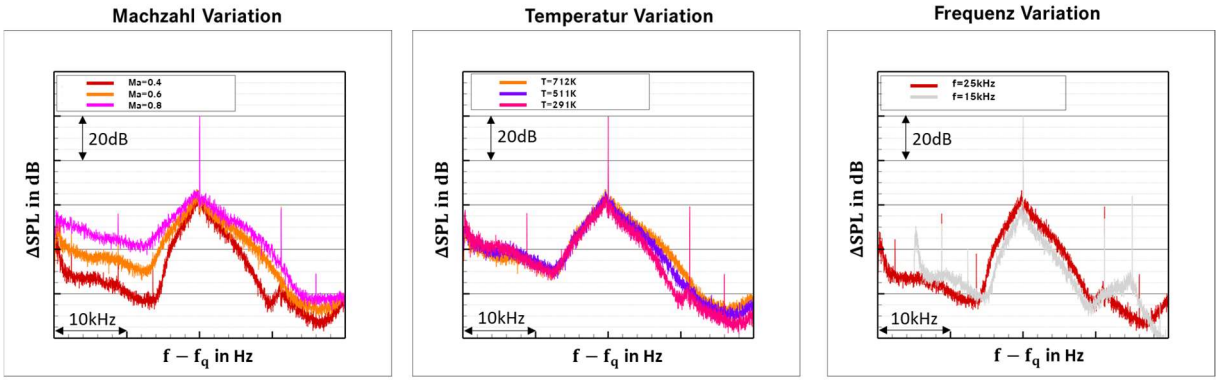

Abbildung 12: *Ergebnisse der Haystacking CAA-Simulationen*

Zur Nutzung der CAA Daten für die Modellbildung in AP 3.4 ist die Validierung der CAA gegenüber dem Experiment von zentraler Bedeutung. Dazu wurde ein Betriebspunkt aus der Messmatrix mittels CAA nachgerechnet. Der Vergleich der Haystacks aus CAA und Experiment ist in

Abbildung 13 (links) gezeigt. Es können zunächst drei Auffälligkeiten aufgezeigt werden:

1. Der CAA Haystack ragt deutlich stärker aus dem Breitbandlärm heraus. Ursache dafür ist, dass in der CAA nur ein kleiner Teil des Breitbandlärms des Strahls enthalten ist, da die Turbulenzrekonstruktion in der Scherschicht nur in einem kleinen Abschnitt rund um die Schallquelle durchgeführt wurde, um Rechenaufwand zu sparen.
2. Die Anregungsamplitude in der CAA wurde deutlich höher gewählt als im Experiment (Pegel der angeregten Frequenz wesentlich höher).

3. Das Haystacking in der CAA ist deutlich schwächer ausgeprägt als im Experiment. Dies ist daran zu erkennen, dass die in der angeregten Frequenz verbleibende (tonale) Energie im Vergleich zur Energie im Haystack in der CAA größer ist als im Experiment.

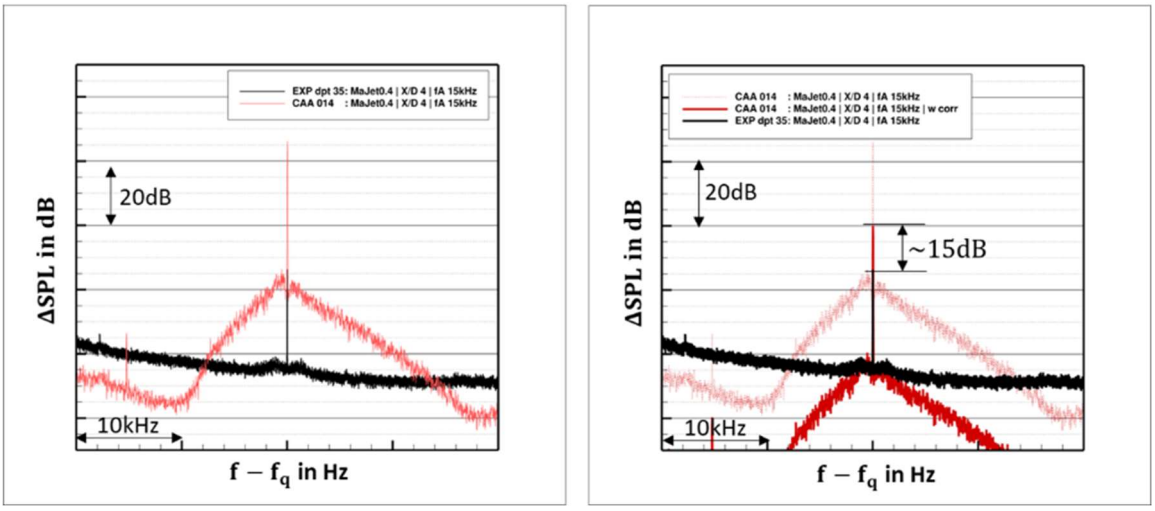

Abbildung 13: *Vergleich gemessener Haystack (schwarz) mit über CAA vorhergesagtem Haystack (rot) (links); Darstellung der auf CAA Daten angewendeten Korrektur (rechts);*

Aufgrund der Tatsache, dass die qualitativen Trends in der CAA mit dem Experiment übereinstimmen, wird in der CAA von einem systematischen Fehler ausgegangen.
Um die CAA Daten in AP3.4 für die Modellbildung nutzen zu können, wurde eine Korrektur dieses Fehlers auf Basis dieses Referenzdatensatzes entwickelt und anschließend auf die weiteren CAA Daten angewendet. Bei der Korrektur wurde zunächst das SPL Niveau des CAA Spektrums so verändert, dass der Ansatzpunkt des Haystacks zwischen Experiment und CAA konsistent ist. Anschließend wurde die Pegeldifferenz der tonalen Peaks bestimmt (Abbildung 13rechts). Die so ermittelte Pegeldifferenz wurde im Bereich des tonalen Peaks auf alle CAA Daten angewendet.
Bei der folgenden Auswertung der Frequenzspektren (Separierung des Haystacks) wurde äquivalent zu der Vorgehensweise bei den experimentellen Ergebnissen verfahren.

3.2.3 AP3.4 Low order Modelle und Validierung

Im Rahmen des AP3.4 wurde eine verbesserte Modellierung des Haystacking-Effekts entwickelt, wobei RRD und MTU unabhängig voneinander mit den gleichen Daten aus AP3.2 und AP3.3 arbeiteten und die Datenbasis mit eigenen Triebwerksdaten ergänzten.

Zur Charakterisierung des Haystacks werden zunächst anhand von Abbildung 14 zwei Parameter eingeführt.

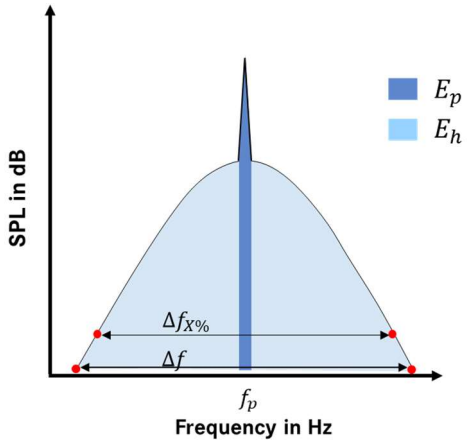

Abbildung 14: *Charakteristische Parameter eines Haystacks*

Zum einen das Energieverhältnis

$$\Pi = \frac{E_p}{E_{tot}} = \frac{E_p}{E_p + E_h} \qquad [1]$$

welches die nach dem Haystacking im diskreten Ton verbleibende Energie E_p bezogen auf die Gesamtenergie des Tons $E_{tot} = E_p + E_h$ wiedergibt.

Darüber hinaus wird die Breite des Haystacks an einer definierten Stelle eingeführt.

$$\mathbf{\Delta f_{X\%}} = \mathbf{\Delta f}\ (E/E_{tot} * 100 = X\%)$$

Die Eignung dieser Definition wurde erfolgreich an MTU Triebwerksdaten validiert.

Theoretische Grundlage der Modellierung ist der von Sijtsma et al. [1] veröffentlichte Ansatz zur Vorhersage des Energieverhältnis, nachfolgend β^2-Modell genannt.

$$\Pi = \frac{E_p}{E_{tot}} = \frac{E_p}{E_p + E_h} = e^{-\boldsymbol{\beta}^2} \text{ mit } \boldsymbol{\beta} = \frac{2\sqrt{2}\ \pi\ f_p\ T_v U}{a^2}\delta' \qquad [2]$$

Der Haystackparameter β ist definiert über die Tonfrequenz f_p, den lateralen Turbulenzgrad in der Scherschicht T_v, die Geschwindigkeit U, die Impulsverlustdicke δ‘ und die Schallgeschwindigkeit a.

Zunächst wurde die komplette Haystack-Datenbank (AWB Experimente, AWB CAA und MTU Triebwerksanwendungen) hinsichtlich der oben definierten charakteristischen Parameter zur Beschreibung des Haystacks ausgewertet. Die zur Ermittlung des jeweiligen Haystackparameters erforderlichen Scherschichtgrößen (lateraler Turbulenzgrad und Scherschichtdicke) lieferten die Ergebnisse der Hitzdrahtmessung aus AP3.2.

Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse der Analyse für die Datensätze, die im Rahmen des Vorhabens erhoben wurden (AWB CAA und AWB EXP). Links ist das Energieverhältnis über dem Haystackparameter dargestellt, rechts die Haystackbreite über dem Produkt aus Machzahl und Tonfrequenz.

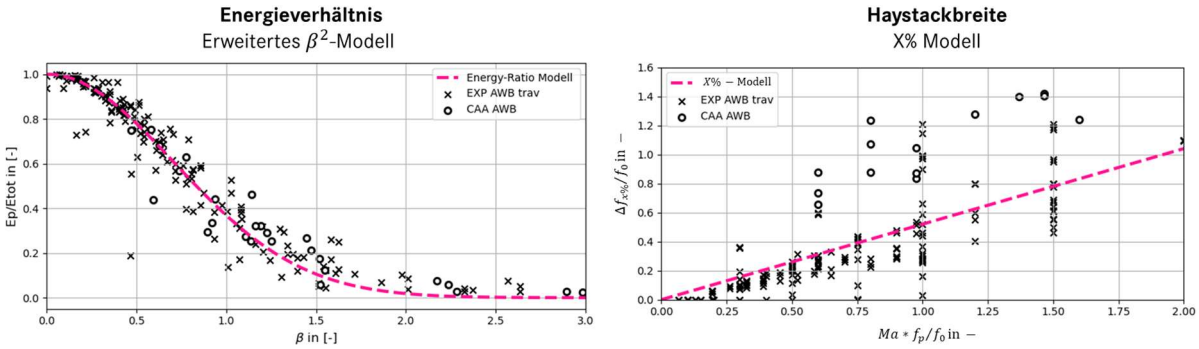

Abbildung 15: Abhängigkeit Energieverhältnis von Haystackparameter β (links). Abhängigkeit der Haystackbreite von Produkt aus Machzahl und Tonfrequenz (rechts). Die pinke Linie links entspricht der theoretischen Abhängigkeit [1]. Die pinke Linie rechts entspricht einer linearen Regression durch alle Datenpunkte.

Im Hinblick auf das Energieverhältnis wird deutlich, dass der Ansatz nach [1] eine gute Übereinstimmung mit der Haystack-Datenbank zeigt. Bei der Haystackbreite konnte eine lineare Abhängigkeit von dem Produkt aus Machzahl und Tonfrequenz identifiziert

werden. Diese kann mittels einer linearen Regression durch alle Datenpunkt hinreichend genau approximiert werden.

In Abbildung 15 sind bereits Erweiterungen der Theorie nach [1] enthalten, die nachfolgend erläutert werden.
Abbildung 16 (links) zeigt die Ergebnisse, wobei unabhängig von Ausbreitungswinkel die gleiche Scherschichtdicke pro Messpunkt verwendet wurde. Die Gruppierung der Datenpunkte nach Ausbreitungswinkel verdeutlicht, dass dieser in die Modellierung einfließen muss. Dementsprechend wurde ein geometrisches Verfahren eingeführt, mit dem die Bestimmung der effektiven Scherschichtdicke in Abhängigkeit vom Ausbreitungswinkel möglich ist. Der gleiche Datensatz, wobei in die Berechnung des Haystack-Parameters die effektive Scherschichtdicke eingeflossen ist, ist in Abbildung 16 (rechts) dargestellt. Eine signifikante Reduzierung der Streuung der Datenpunkte konnte damit erreicht werden.

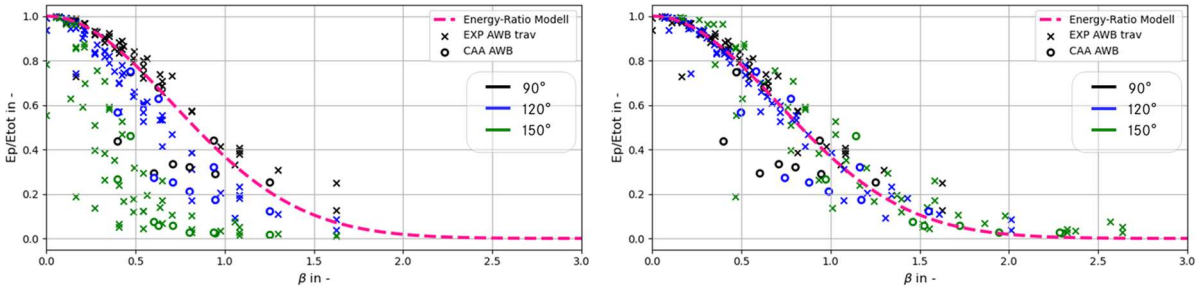

Abbildung 16: *Abhängigkeit Energieverhältnis von Haystackparameter β (links). Abhängigkeit der Haystackbreite von Produkt aus Machzahl und Tonfrequenz (rechts). Die pinke Linie links entspricht der theoretischen Abhängigkeit nach [1]. Die pinke Linie rechts entspricht einer linearen Regression durch alle Datenpunkte.*

Weiterhin wurde der Einfluss der Temperatur auf die Haystackbreite untersucht (Abbildung 17). Hierzu wurden CAA-Datenpunkte verwendet, da im Experiment die Temperatur nicht variiert werden konnte. Die Gruppierung der Datenpunkte in Abhängigkeit von der Temperatur (links), legt eine entsprechende Berücksichtigung in der Modellierung nahe. Während in Abbildung 17 (links) jeweils die Strahltemperatur für die Berechnung der Machzahl verwendet wurde, ist in Abbildung 17 (rechts) eine Mischungstemperatur eingeflossen. Dies ist notwendig, um zu berücksichtigen, dass die für das

Haystacking relevante Temperatur eine Mischungstemperatur in der Scherschicht ist.

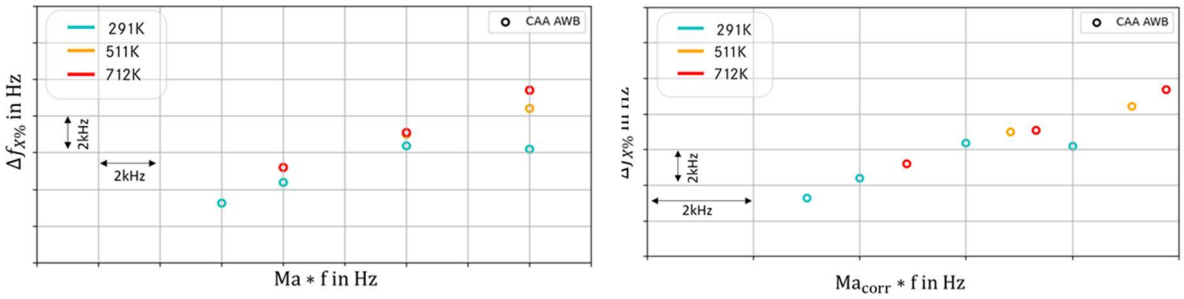

Abbildung 17: *Einfluss der Temperatur auf die Haystackbreite*

Somit konnten Korrelationen zur Vorhersage der charakteristischen Parameter des Haystacks entwickelt werden, die die Grundlage für die weitere Modellbildung darstellen.

Anschließend wurde ein Modell entwickelt, mit dem die Rekonstruktion der Form des Haystacks basierend auf den charakteristischen Parametern möglich ist. Dazu wurde angenommen, dass die Form des Haystacks einer linearen Funktion im SPL-Raum entspricht.

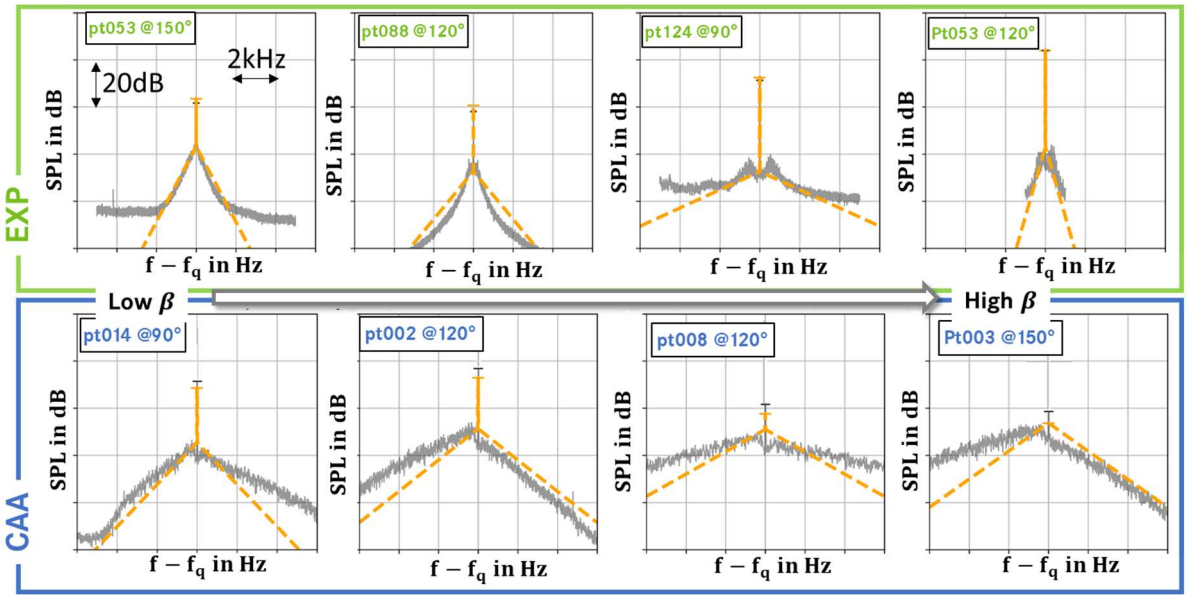

Abbildung 18: *Vergleich der AWB Daten (CAA und EXP) mit der jeweiligen Modellierung (orangene Linie)*

Abbildung 18 zeigt den Vergleich der AWB Daten aus Experiment oben und CAA unten mit der im Rahmen des Vorhabens entwickelten Modellierung für verschiedene Haystackparameter. Da für einen breiten Wertebereich des Haystackparameters eine gute Übereinstimmung der Modellierung mit dem jeweiligen Haystack aus Experiment bzw. CAA erreicht wurde, ist eine hohe Allgemeingültigkeit des Modells zu erwarten.

Abschließend wurde die Modellierung auf Basis der MTU-Triebwerksdatenbank validiert. Die Ergebnisse für zwei repräsentative Triebwerke hinsichtlich der charakteristischen Parameter ist in Abbildung 19 dargestellt.
Es ist zu erkennen, dass die Triebwerksdaten sich hinsichtlich des Energieverhältnis sehr gut über das β^2 - Modell abbilden lassen. Bezüglich der Haystackbreite wird die lineare Abhängigkeit von dem Produkt aus Machzahl und Frequenz bestätigt.

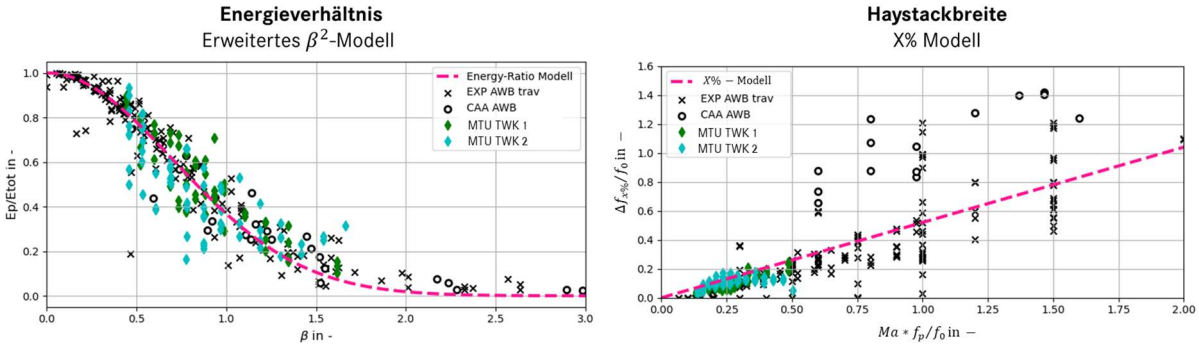

Abbildung 19: *Abhängigkeit Energieverhältnis von Haystackparameter β (links). Abhängigkeit der Haystackbreite von Produkt aus Machzahl und Tonfrequenz (rechts). Inklusive der MTU Triebwerksdaten*

Der Vergleich der rekonstruierten Haystacks mit den Triebwerksdaten in Abbildung 20 zeigt über einen breiten Drehzahlbereich eine sehr gute Übereinstimmung.

Dementsprechend kann geschlussfolgert werden, dass die im Rahmen von HAP 3 entwickelte Modellierung des Haystacks eine deutliche Verbesserung der bisherigen Modellierung für MTU darstellt. Die Ergebnisse aus HAP 3 können für MTU als ein großer Erfolg gewertet werden.

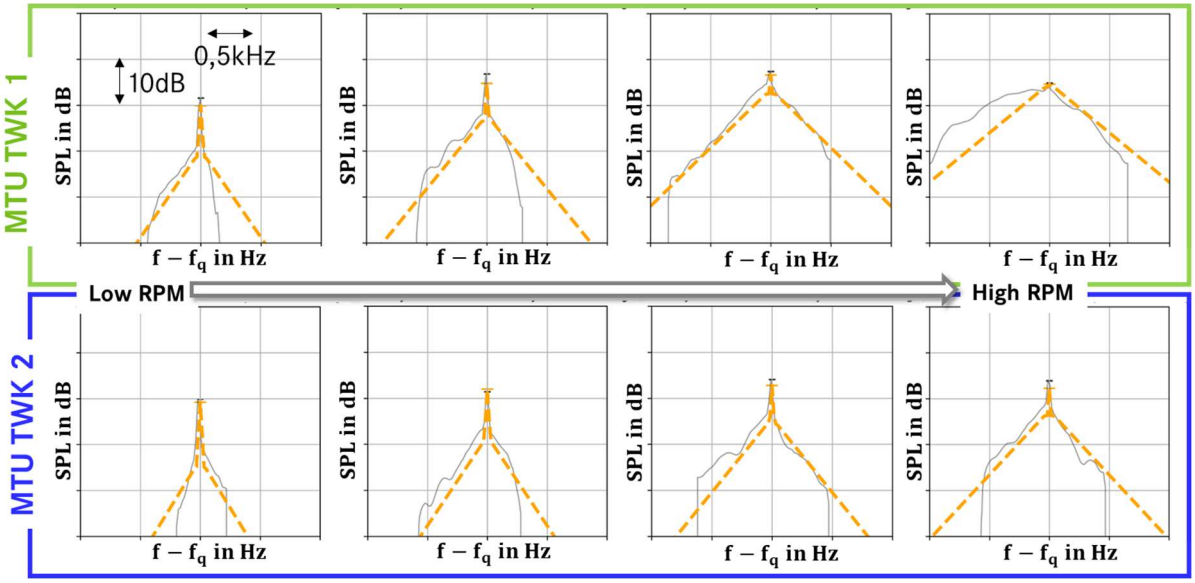

Abbildung 20: *Abhängigkeit Energieverhältnis von Haystackparameter β (links). Abhängigkeit der Haystackbreite von Produkt aus Machzahl und Tonfrequenz (rechts). Inklusive der MTU Triebwerksdaten*

4 Literaturverzeichnis

[1] Sijtsma, P., Oerlemans, S., Tibbe, T.G., Berkefeld, T., Spehr, S. (2014) „Spectral broadening by shear layers of open jet wind tunnels”

[2] Schnell, R. (2004) „Numerische Simulation des akustischen Nahfeldes einer Triebwerksgebläsestufe“

[3] Guérin, S., Fischer, F. (2024) „15 years of experience with the Triple Plane Pressure Mode Matching technique.“